

Les onduleurs PV stabilisent le réseau

Une alternative au renforcement du réseau | La régulation de la puissance active en fonction de la tension est essentielle pour permettre une intégration rapide et efficace de nombreuses installations PV décentralisées dans le réseau électrique. Dans le projet Goda, cette solution a été mise en œuvre avec succès dans un quartier pilote, et des mesures en laboratoire ont confirmé un comportement stable des onduleurs.

DAVID JOSS, PETER CUONY

Lorsque de nombreuses installations de production décentralisées alimentent simultanément le réseau électrique, la tension augmente. Or, si celle-ci dépasse les limites définies, le fonctionnement des appareils connectés au réseau n'est plus garanti. Dans le pire des cas, des appareils électriques peuvent subir des dommages chez les clients. Le gestionnaire du réseau de distribution (GRD) est donc tenu de prendre des mesures pour que la tension reste à tout moment dans les limites définies par les normes européennes.

Pour limiter l'augmentation de la tension provoquée par une forte injection de production provenant d'installations photovoltaïques (PV), les GRD recourent aujourd'hui généralement à des mesures traditionnelles de renforcement du réseau: ils remplacent les câbles existants par des câbles de section supérieure, ou les transformateurs par des plus puissants. Il s'agit-là de solutions très coûteuses dans le contexte d'une forte augmentation du nombre d'installations photovoltaïques, indispensable à la transition énergétique. De plus, les délais de mise

en œuvre de ces renforcements peinent à suivre la croissance rapide du photovoltaïque.

La régulation de la puissance active en fonction de la tension, également appelée P(U), constitue une alternative encore peu utilisée en Suisse, qui permet une intégration plus rapide et plus efficace de nombreuses installations PV dans le réseau électrique. Avec la régulation P(U), l'installation PV réduit sa puissance de production (P) dès que la tension (U) dépasse une valeur limite définie. L'installation PV réduit la production de manière autonome et remé-

die ainsi elle-même au problème de tension qu'elle a provoqué.

La régulation P(U) est activée et paramétrée dans les onduleurs PV. Elle fonctionne de manière décentralisée, ne dépend pas de systèmes de communication et constitue une solution efficace et fiable. Les onduleurs doivent cependant proposer cette fonction et les techniciens qui les mettent en service doivent maîtriser sa mise en œuvre. La régulation P(U) n'est toutefois pas sans conséquence pour le propriétaire de l'installation PV puisqu'elle peut entraîner des pertes de production. Celles-ci doivent donc être identifiées et rétribuées si elles participent à limiter les renforcements de réseau à charge du distributeur.

Dans le cadre du projet Goda (Grid Optimization with Decentralized Actors), Groupe E a testé la régulation P(U) sur cinq installations PV situées sur le même départ basse tension. Le fonctionnement des installations PV a été vérifié et les pertes de production ont été calculées à l'aide de l'intelligence artificielle. Des mesures ont été effectuées au Laboratoire des systèmes photovoltaïques (PV-Lab) de la Haute école spécialisée bernoise (Berner Fachhochschule, BFH) pour déterminer la fiabilité, la précision et la stabilité de la régulation sur des onduleurs de différents fabricants.

Essais sur le terrain

Groupe E a déjà réalisé et documenté plusieurs projets smart grid au cours des dernières années dans le réseau basse tension Neyruz-Daille. Les essais sur le terrain du projet Goda ont également été réalisés sur ce réseau, qui accueille aujourd'hui déjà un grand nombre d'installations PV. Or, le cumul de ces installations provoque une augmentation de la tension sur les lignes basse tension, qui risquent dès lors de franchir le seuil supérieur de tension défini dans la norme SN EN 50160:2022, et ce, au plus tard dans les années à venir, lorsque des installations photovoltaïques supplémentaires seront raccordées.

La **figure 1** montre la situation sur l'ensemble du réseau basse tension alimenté par le transformateur lors d'un après-midi d'été ensoleillé en 2021, sans activation de la fonction P(U). Au cours de ce projet, cette dernière a été activée pour cinq installations PV sur le même départ basse tension afin de

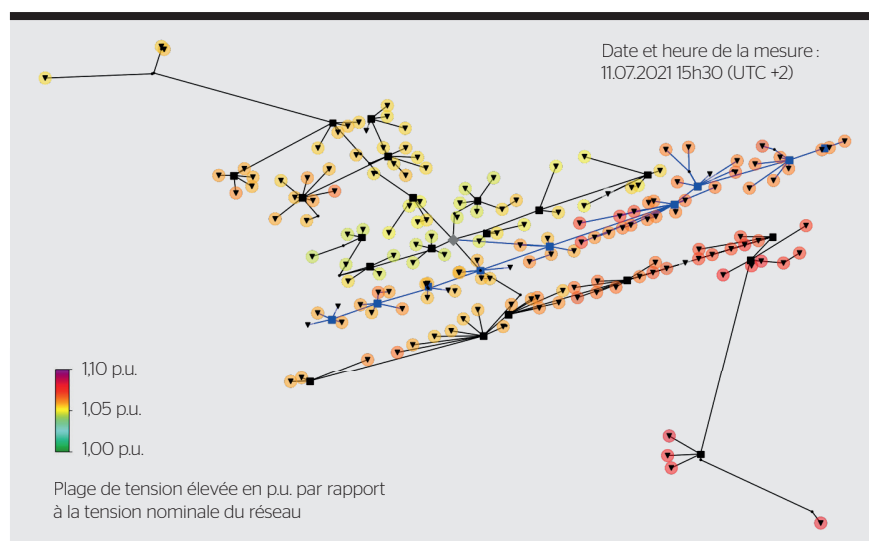


Figure 1 Réseau basse tension Neyruz-Daille avec les tensions mesurées par les smart meters lors d'un après-midi ensoleillé. Le départ basse tension avec les installations PV qui ont participé aux essais P(U) est marqué en bleu, la station de transformation est indiquée par un carré gris, les cabines de distribution par des carrés noirs et les raccordements domestiques par des triangles.

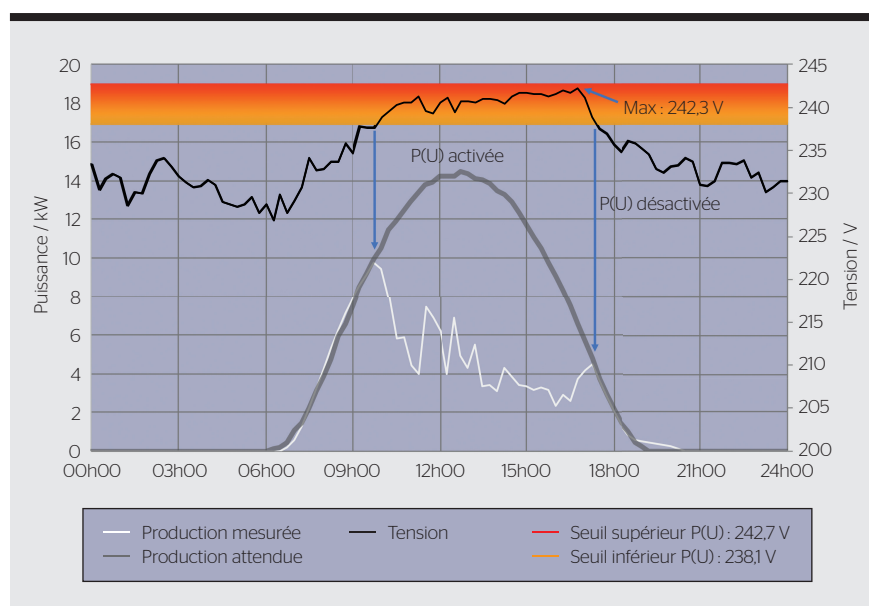


Figure 2 Évolution journalière de la tension du réseau et de la production d'une installation PV avec la fonction P(U) activée, et production calculée de l'installation PV sans la régulation P(U) le 28.04.2022. Le seuil programmé de 242,7 V (105,5 % de la tension nominale) n'est dépassé à aucun moment grâce à la réduction de la puissance active par l'installation PV.

réduire l'augmentation de tension. Entre mars et septembre 2022, deux courbes P(U) ont été définies et testées avec un abaissement de la puissance sur les plages 103,5-105,5 % et 105-107 % de la tension nominale (230/400 V). Les données des compteurs intelligents (smart meters) ont été évaluées pour analyser le comportement des onduleurs. Il a pu être démontré que ces der-

niers diminuaient la puissance de production lorsque la tension du réseau dépassait les seuils définis, et que la tension dans le réseau électrique était réduite comme souhaité (**figure 2**).

Rémunération de l'énergie régulée

L'utilisation de la régulation P(U) comme mesure de soutien du réseau

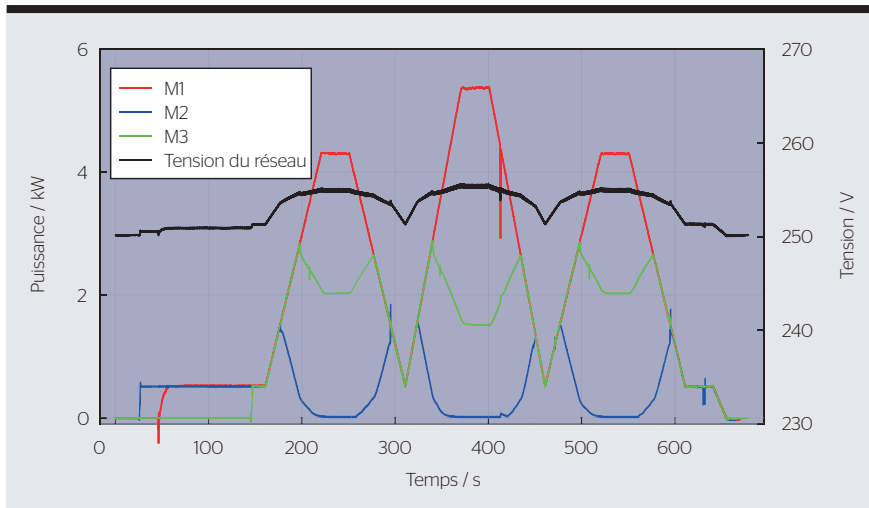


Figure 3 Comportement de la régulation P(U) de trois onduleurs mesurés en parallèle au même point de connexion. En raison des réglages et de la précision de leur mesure interne de la tension, les onduleurs réagissent plus ou moins tôt et intensément à la tension du réseau (en noir), qu'ils influencent également eux-mêmes (P_{DC} variable, U_{AC} constant, impédance de réseau élevée vers le simulateur basse tension).

présente l'inconvénient que la réduction de la puissance active entraîne une perte de production pour les exploitants des installations PV concernées. Si la mesure de soutien du réseau aide le GRD à respecter les valeurs limites de tension, il est indiqué que celui-ci rembourse la perte de production au producteur. La perte ne peut toutefois pas être mesurée, mais doit être calculée.

Pour calculer ces pertes de production, Groupe E a développé et testé, parallèlement au projet Goda, différents algorithmes basés sur le machine learning. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des méthodes de régression linéaire et des méthodes d'apprentissage ensembliste.

Les algorithmes ont ainsi appris à estimer la production écartée en utilisant des mesures de production de l'installation en question et la mise en relation de celles-ci avec les mesures de production des installations PV environnantes non régulées. Après la phase d'apprentissage, les algorithmes ont pu calculer les pertes de production avec une erreur d'environ 1% seulement. Les producteurs qui ont mis leur installation PV à disposition pour les essais effectués dans le cadre du projet Goda ont été rémunérés pour leur perte de production au tarif de rachat valable pour la production injectée au réseau.

La contribution d'une installation PV au soutien de la tension, et donc sa perte

de production, dépend fortement de son positionnement topographique dans le réseau. Cette approche avec rémunération de la perte de production par le GRD présente l'avantage qu'elle permet un traitement non discriminatoire des producteurs qui n'ont ainsi ni avantage ni inconvénient quand leur installation participe au soutien du réseau.

Comportement de régulation des onduleurs

Des mesures effectuées au PV-Lab de la BFH ont permis d'analyser en détail le comportement P(U) de plusieurs onduleurs de différents fabricants, en complément des tests sur le terrain. L'accent a été mis sur la fiabilité et la précision de la régulation ainsi que sur les différences entre les divers appareils. Les mesures devaient en outre montrer l'influence des réglages des appareils sur la stabilité de la régulation P(U). Pour ce faire, les onduleurs ont été raccordés en laboratoire à un simulateur PV et à un simulateur réseau basse tension. Les simulateurs peuvent, par exemple, faire varier la puissance DC tout en maintenant la tension AC constante – ou inversement. Cela permet d'effectuer des mesures reproductibles pour comparer les onduleurs. Les appareils ont été mesurés en parallèle, individuellement et en groupe, au même point de connexion. Plusieurs points de connexion repré-

sentant des situations proches ou éloignées du transformateur MT/BT ont été simulés.

Les analyses de laboratoire ont confirmé qu'il est possible d'obtenir une régulation fiable de la puissance active avec les réglages standards de P(U) dans les onduleurs. Dans tous les scénarios de mesure réalisés, les onduleurs présentent le comportement attendu de réduction de la puissance active en cas de dépassement d'un seuil de tension prédéfini, ce qui leur permet de stabiliser la tension du réseau elle-même. La figure 3 le montre bien à titre d'exemple : chaque appareil suit la tension du réseau et réduit sa puissance active à partir d'un certain niveau de tension, mais des différences de comportement importantes entre les divers appareils sont évidentes.

Certains onduleurs réagissent très rapidement, tandis que d'autres ne limitent leur puissance qu'après un délai plus important. La conception du régulateur, les différents paramètres standards et, surtout, les tolérances de la mesure de la tension exercent probablement une grande influence sur le com-

Cadre politique

Pour que la régulation P(U) puisse contribuer à une intégration efficace du photovoltaïque dans le réseau électrique, il est important que le gestionnaire de réseau de distribution (GRD) puisse exiger cette flexibilité photovoltaïque sans discrimination et avec une approche standardisée. Aujourd'hui, il manque encore une base légale pour une telle approche. Dans le cadre de la révision actuelle de la loi sur l'approvisionnement en électricité (LApEI), le Conseil fédéral, le Conseil national et le Conseil des États sont d'accord pour que les GRD puissent exiger une utilisation « garantie » de la flexibilité utile au réseau pour la régulation d'une certaine part de l'injection (LApEI, art. 17b^{bis}, al. 3). Ce que signifie « une certaine part » n'est pas encore clair, ni si et comment la régulation doit être rémunérée. Il reste à espérer que cette adaptation de la loi permettra au plus vite une mise en œuvre efficace de la régulation P(U).

portement de régulation. Les mesures en laboratoire montrent ainsi de grands écarts de la régulation de puissance par rapport à la valeur attendue.

On observe que, dans le pire des cas, la puissance active n'est pratiquement pas régulée en réalité, bien qu'il ne devrait théoriquement plus y avoir d'in-

jection. Une tolérance dans la mesure de la tension des onduleurs se reflète donc directement dans le maintien de la tension du réseau. Il convient d'en tenir compte lors de la définition des valeurs limites pour le réseau, et de prévoir une marge de sécurité si nécessaire.

On observe parfois des discontinuités et des fluctuations de courte durée dans la puissance d'injection. Celles-ci apparaissent souvent après une phase de régulation lors du passage à un mode d'injection illimité. La plupart du temps, la puissance chute brièvement (environ 3 s) et parfois plusieurs fois de suite. L'effet des réactions varie fortement d'un appareil à l'autre. Les plus petites chutes de puissance sont de l'ordre de 15 à 20%. Les plus grandes variations mesurées atteignent jusqu'à 80% de la puissance disponible, ce qui est considérable. L'origine de ces effets fera l'objet d'analyses futures.

La stabilité a été analysée en faisant varier les paramètres qui pourraient potentiellement influencer la régulation de manière critique. Ces paramètres sont le gradient (ou la pente) de la courbe caractéristique $P(U)$, le filtre de consigne et la constante de temps (τ). Il n'est cependant pas possible de modifier tous les paramètres sur tous les types d'onduleurs.

Les mesures montrent que même avec des gradients élevés (jusqu'à plus de 400%/V) ainsi qu'avec la minimisation des temps pour les filtres de valeur de consigne et des constantes de temps proches de zéro, il n'y a pas d'instabilité qui s'installe à long terme. Les onduleurs peuvent garantir une stabilité satisfaisante par une limitation des variations et une conception robuste du régulateur. Un appareil mesuré légèrement oscille légèrement autour de la valeur attendue avec une faible amplitude, à condition que les autres onduleurs régulent également activement. Il est rare que l'on constate une influence mutuelle qui, dans le pire des cas, pourrait provoquer une bistabilité temporaire avant que la puissance correcte ne soit réglée. Outre les fluctuations à court terme décrites, qui semblent largement indépendantes des réglages, de légères oscillations ou des dépassements ont pu être constatés de manière isolée en raison de réglages extrêmes non pertinents pour la pratique. Les observations décrites lors des mesures en laboratoire sont représentées à titre d'exemples dans la **figure 4**.

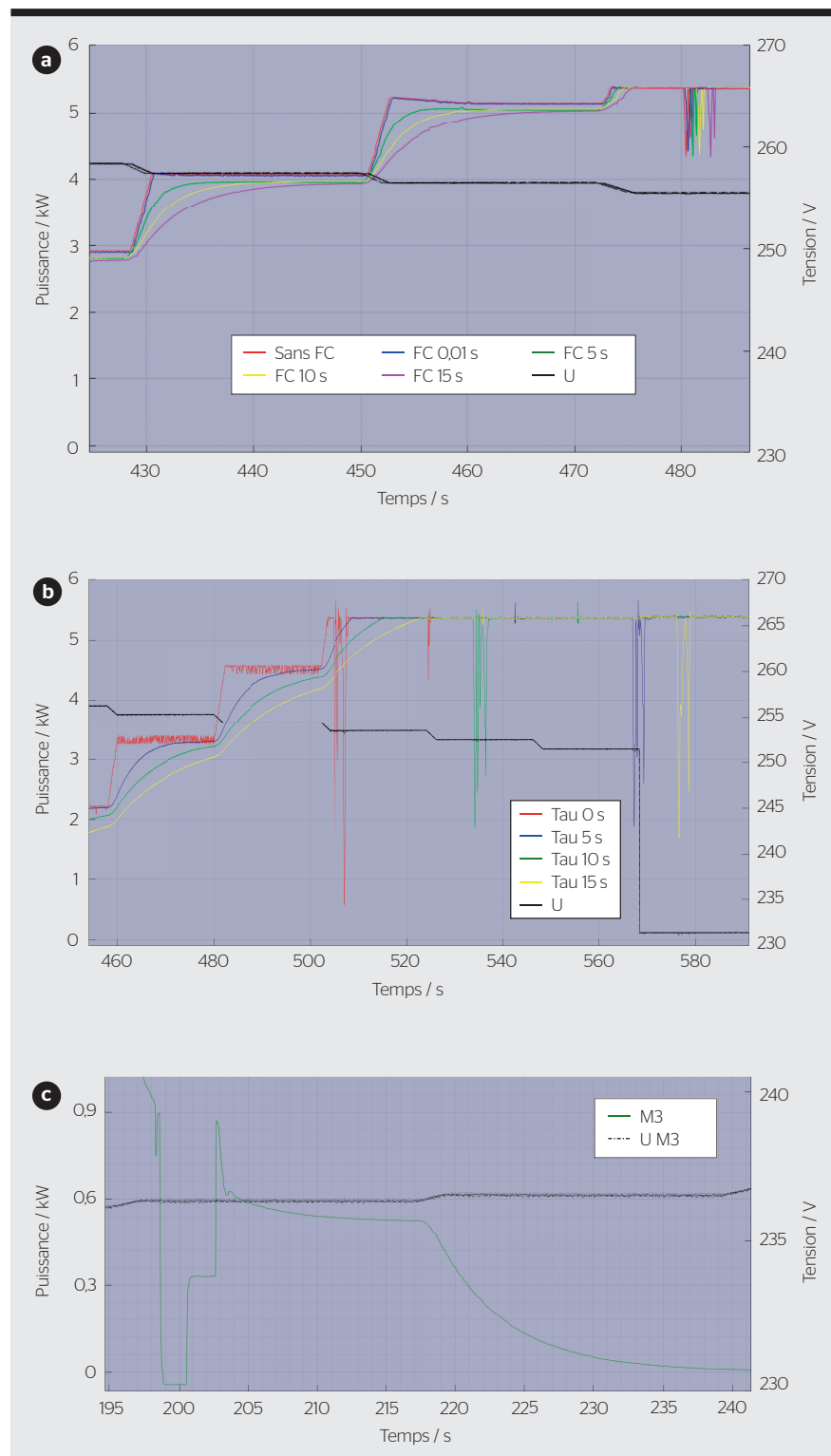


Figure 4 Exemples de phénomènes observés lors des mesures. **a)** Légères suroscillations de la régulation avec un temps de filtrage de la consigne (FC) de 0 s ainsi que des chutes de courte durée (15-20% P_m) lors du retour à la situation non régulée. **b)** Oscillations avec une constante de temps $\tau = 0$ s et chutes massives de courte durée (jusqu'à 80% P_m). **c)** Chute de courte durée lors du passage à la phase entièrement régulée à zéro.

Conclusion

Dans le cadre du projet Goda, Groupe E et l'équipe de la BFH ont pu démontrer que la régulation P(U) fonctionnait de manière fiable. Les installations PV réduisent la puissance active injectée lorsque la tension dépasse la valeur seuil.

La régulation P(U) est stable avec des réglages standards, bien que des différences considérables soient observées dans la mise en œuvre effective entre les différents onduleurs et leur marge de phase. Comme le montrent les mesures, le comportement de régulation peut varier fortement même pour les installations PV raccordées au

même point de connexion. Les onduleurs contribuent par conséquent au maintien de la tension dans des proportions différentes.

Les méthodes d'estimation établies dans le cadre du projet ont permis de déterminer de manière satisfaisante les pertes de production et de compenser les producteurs pour leur contribution au maintien de la tension du réseau. L'activation de la régulation P(U) pour les onduleurs dans les zones de réseau où des problèmes de maintien de la tension se profilent, et ce, en utilisant l'approche de rémunération, constitue donc un complément ou une alternative intelligente au renforcement du réseau.

Liens vers le projet Goda

→ www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=49396
→ www.bfh.ch/pvlab-projets-goda

Auteurs

David Joss est collaborateur scientifique au PV-Lab de la Haute école spécialisée bernoise (BFH).
→ BFH, 3400 Burgdorf
→ david.joss@bfh.ch

Peter Cuony est responsable des produits pour la distribution électrique chez Groupe E.
→ Groupe E SA, 1763 Granges-Paccot
→ peter.cuony@groupe-e.ch

Le projet Goda est soutenu par le programme pilote et de démonstration de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Les partenaires du projet sont Groupe E SA et la BFH.



VSAS
USAT
USAQ

Connecter les intérêts

Le label de qualité USAT



Certifié USAT

Le label de qualité USAT valorise et renforce la qualité dans la construction d'ensemble d'appareillage et procure des avantages décisifs sur le marché.

Pour obtenir le label de qualité USAT, les critères suivants sont vérifiés par un organisme de certification indépendant:

- | | | |
|--------------|-------------------------------|-------------|
| ▼ Entreprise | ▼ Production | ▼ Personnel |
| ▼ Produit | ▼ Infrastructure / Équipement | ▼ Marketing |

Nous misons sur le Swissness!

Le Swissness revêt une grande importance dans le label de qualité USAT. La croissance durable de nos membres nous tient particulièrement à cœur.

Les entreprises membres s'améliorent en permanence et le label est lui aussi constamment adapté aux exigences. L'USAT a tout intérêt à associer des entreprises de haute qualité au sein de l'union. La mise en réseau des entreprises suisses et la promotion de produits suisses de qualité sont au centre de l'action de l'USAT.



VSAS – Verband Schaltanlagen und Automatik Schweiz
USAT – Union Suisse Automation et Tableaux électriques
USAQ – Unione Svizzera Automazione e Quadri elettrici

Rue du Chantier 9
2503 Bienne

Tel. +41 32 322 85 78
LinkedIn

www.vsas.ch
info@vsas.ch