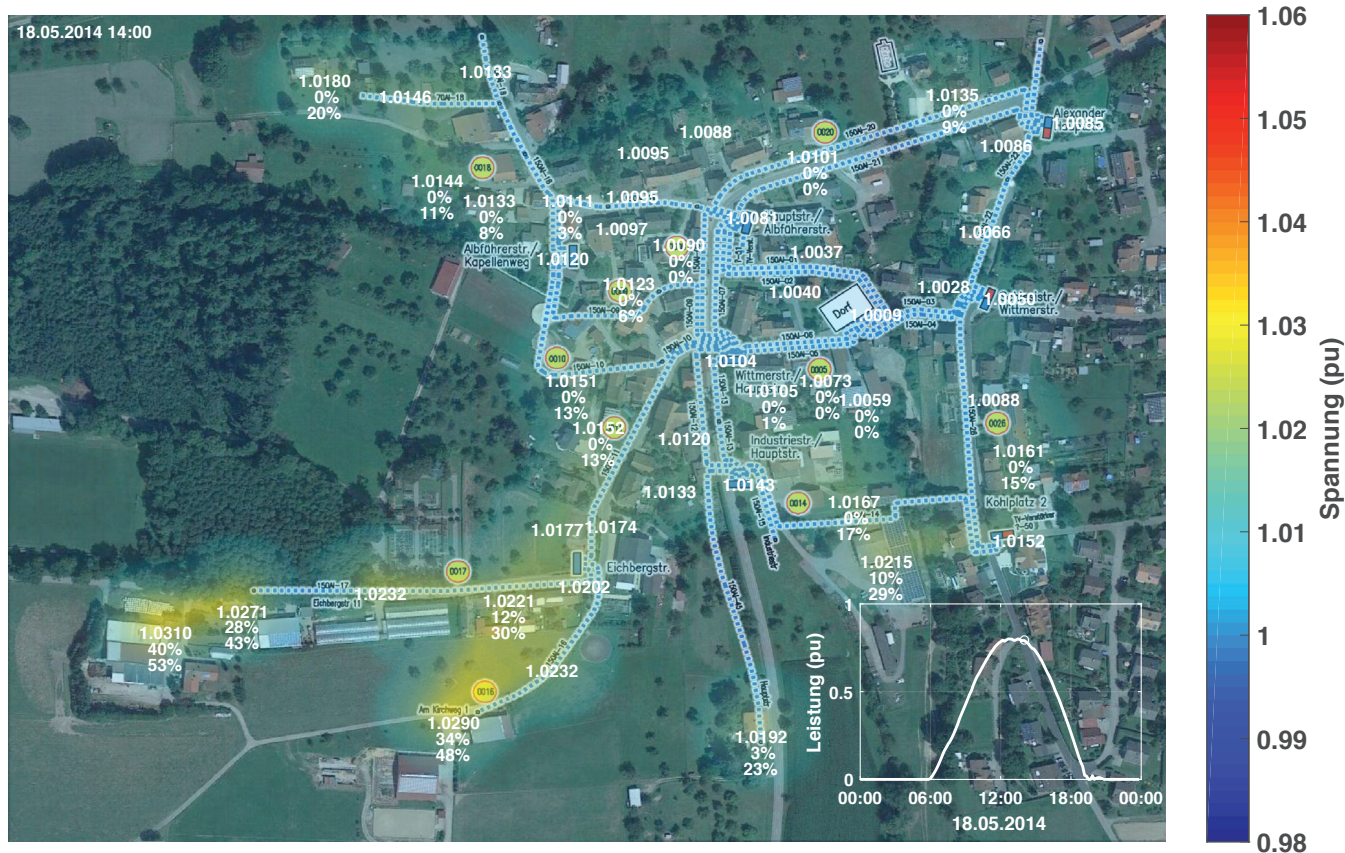


INSTALLATIONS PV : PROBLÈME ET SOLUTION

Lorsque l'alimentation électrique par des installations photovoltaïques (PV) augmente fortement, le risque de déséquilibres augmente, ce qui provoque des fluctuations de tension sur le réseau électrique. Afin de limiter ces fluctuations à un niveau acceptable, les exploitants de réseau disposent de divers instruments. Un projet de recherche de la Haute école des sciences appliquées de Zurich à Winterthur a désormais analysé les instruments à ses frais. Les scientifiques plaident, entre autres, pour recourir directement aux installations PV afin de réduire les fluctuations de tension: leurs onduleurs ont un potentiel considérable pour éviter les problèmes de stabilité.



Perspective aérienne du village allemand de Dettighofen: les points marqués en jaune représentent les hautes tensions. La régulation de la puissance active et réactive est active sur le réseau illustré. Photo: ZHAW

L'expansion du photovoltaïque progresse. Dettighofen, une commune allemande à la frontière du canton de Schaffhouse, compte plus de toits équipés de modules PV que nulle part ailleurs. Environ 45 pour cent de l'électricité dont les habitantes et habitants ont besoin sont produits sur place avec des installations solaires. Dettighofen est ainsi l'élève modèle du « tournant énergétique ». Mais pas seulement: la commune rurale permet également d'analyser les conséquences d'une forte croissance des installations de production d'électricité décentralisées sur le réseau d'alimentation. C'est exactement ce que deux projets de recherche de la Haute école des sciences appliquées de Zurich (ZHAW) ont réalisé depuis 2014. Dans les études, les scientifiques impliqués ont pu démontrer que l'injection décentralisée de courant PV provoquait des surcharges ponctuelles sur le réseau. La tension du réseau sur les points d'injection était parfois de cinq à sept pour cent supérieure à la valeur standard de 230 volts.

Les écarts de la tension du réseau par rapport à la norme ne sont pas inhabituels. La tension du réseau ne s'élève pas précisément à 230 volts mais oscille autour de cette valeur; elle est parfois supérieure (lorsque l'électricité produite est supérieure à celle consommée) et parfois plus basse (lorsque la consommation est supérieure à la production). Les écarts de tension ne doivent toutefois pas être aussi importants. Dans le cas contraire, les installations de traitement de données et

autres appareils électriques raccordés au réseau, ou le réseau lui-même, risque d'être endommagés. Pour cette raison, les normes International Electrotechnical Commission IEC 60038:1983 autorisent des écarts maximaux de 10%, la tension doit donc se situer entre 207 et 253 volts.

Des mesures ciblées sur quelques points du réseau

Les fluctuations de tension mesurées à Dettighofen se situent encore sur la plage des valeurs autorisées. « Nous savons, grâce aux analyses réalisées à Dettighofen, qu'une expansion du photovoltaïque n'est pas problématique en soi puisque nos réseaux électriques sont conçus de manière robuste », affirme Markus Niedrist, responsable du service Réseau de la centrale électrique du canton de Schaffhouse (EKS), dont la zone d'approvisionnement comprend Dettighofen. Selon l'expert, il ne faut toutefois pas perdre le problème de vue: « Nous devons observer l'évolution au cours des prochaines années et prendre des mesures ciblées sur les points du réseau soumis à des charges critiques. »

Les centrales électriques disposent de toute une série d'instruments pour maîtriser les fluctuations de tension et assurer ainsi la stabilité du réseau électrique. L'essentiel est la robustesse des réseaux électriques. Traditionnellement, les quelque 700 centrales électriques suisses veillent à la performance et,

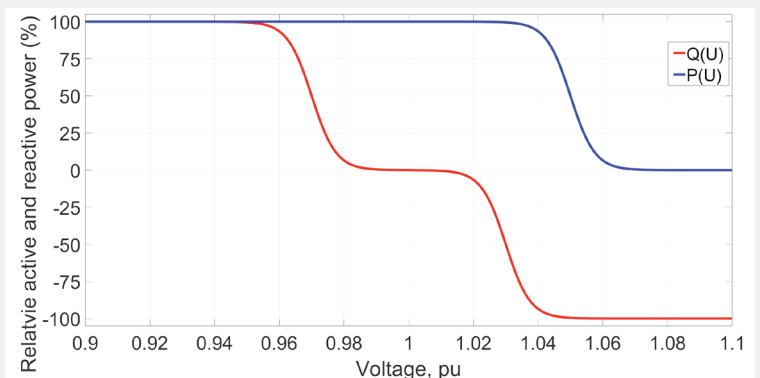


À Dettighofen (Allemagne du sud), l'utilisation du photovoltaïque est fortement développée. La production d'électricité solaire correspond à pratiquement la moitié de la consommation. Image: installation PV sur la caserne des pompiers mise en service en 2017. Photo: commune de Dettighofen

RÉGULER LA PUISSANCE ACTIVE ET LA PUISSANCE RÉACTIVE

La puissance réactive est une forme de puissance. Elle est par exemple utile pour établir le champ magnétique des moteurs ou des transformateurs. Elle est restituée sur le réseau lors de la décomposition de ces champs. Contrairement à la puissance active, la puissance réactive ne peut pas être convertie en puissance utilisable, la puissance mécanique sur l'arbre de transmission dans le cas des moteurs. Les flux de puissance réactive sont indésirables car ils sollicitent également le réseau et provoquent des pertes supplémentaires. Cependant, il est possible de les utiliser pertinemment pour contrer les sous-tensions ou les sur-tensions sur le réseau. Les onduleurs modernes des installations photovoltaïques ayant pour tâche de transformer le courant continu des modules PV en courant alternatif, sont aujourd'hui capables de réguler la puissance active et la puissance réactive en fonction de la tension actuelle sur le réseau. La régulation de la puissance active est également nommée « régulation active de la puissance » et la régulation de la puissance réactive « régulation réactive de la puissance ».

Le graphique illustre, à titre d'exemple, comment un onduleur contrôle la puissance active et la puissance réactive en fonction de la tension actuellement disponible sur le réseau (voir l'axe X). Si la tension chute à plus de 2% sous la valeur nominale, l'injection de puissance réactive (rouge) augmente continuellement jusqu'à 100% de la valeur nominale. Si, en revanche, la tension augmente de plus de 2% au-dessus de la valeur nominale, le prélèvement de puissance réactive augmente jusqu'à -100% (fonctionnement sous-excité). Dans les deux cas, la sous-tension ou la surtension est typiquement réduite jusqu'à deux points de pourcentage, sans affecter la puissance active de l'installation PV. Une surtension peut ainsi être réduite de 104 à 102% ou une sous-tension augmentée de 96 à 98%.



C'est différent pour la puissance active (bleu): dans le cas présent, elle est réduite à partir d'un dépassement de 10% de la tension nominale (c-à-d à partir de 253 volts). Cela réduit la puissance d'injection de l'installation PV et baisse à 0 en cas de surtension de 12%. Les deux courbes caractéristiques du diagramme doivent être considérées comme des exemples. Il revient à l'exploitant de réseau de décider du réglage des courbes caractéristiques dans la réalité. Un électricien règle les courbes caractéristiques lors de l'installation sur le système lui-même.

Sur le réseau de la société Vorarlberger Energienetze GmbH, où la régulation de la puissance active et réactive des onduleurs photovoltaïques est obligatoire depuis plusieurs années, la régulation de la puissance active n'est pratiquement jamais utilisée (uniquement en cas d'affaiblissement du réseau ou de commutations). En revanche, la régulation de la puissance réactive est utilisée certains jours au cours de l'année. Cette régulation permet aux installations photovoltaïques – si, par exemple, une zone du réseau dispose d'une capacité réduite en raison de mesures de réparation ou de maintenance – de fournir au moins une capacité d'alimentation résiduelle. Quiconque exploite une installation photovoltaïque dans le Vorarlberg doit respecter les conditions de raccordement spécifiées par l'exploitant du réseau et prouver, au moyen d'un rapport, que ses onduleurs disposent de la régulation de puissance active et réactive prescrite et que celle-ci est réglée. BV

avec des réserves appropriées, à la sécurité des réseaux. L'expansion ou le renforcement des câbles en cuivre a toutefois son prix. En outre, il existe toute une série d'autres possibilités pour maîtriser l'alimentation croissante issue des centra-

les électriques décentralisées sans expansion du réseau. Elles comptent différents types de régulation de la tension, par exemple dans le poste de transformation ou l'onduleur des installations PV, mais également des batteries de stockage ou

Frais d'investissement en Fr. par kWp de puissance PV installée sur une période de 25 ans pour différentes mesures de maintien de la tension sur le réseau basse tension								
	Développement de réseau: les câbles en cuivre avec une plus grande section réduisent la résistance de la ligne et ainsi l'augmentation de la tension	Régulation de la tension active et réactive sur l'onduleur en fonction de la tension, en abrégé PQ(V) ctrl: réduit la tension du réseau mais également le courant injecté lorsque la régulation de tension active est activée	Régulation de la tension réactive sur l'onduleur en fonction de la tension, en abrégé Q(V) ctrl: réduit la tension du réseau mais pas la quantité de courant injecté	Régulateur de tension (angl. Line Voltage Regulator LVR): régule la tension progressivement sur une section de la ligne où il est installé, typiquement par étapes de processus	Transformateur de réseau local réglable (angl. On-Load Tap Changer, OLTC): régule la tension sur le transformateur haute et moyenne tension, est de plus en plus souvent appliqué également entre les réseaux moyenne et basse tension	Les systèmes de batteries de stockage: délestent le réseau par le stockage intermédiaire de l'électricité	La gestion de la charge (angl. Demand Side Management / DSM) contrôle les appareils électriques de telle sorte qu'ils absorbent l'électricité en cas de production élevée, ce qui déleste le réseau	Combinaison d'un régulateur de tension (LVR) et d'une régulation dynamique de la tension active et réactive PQ(V)
Réseaux avec exploitations industrielles moyennes	-	-	-	-	-	-	-	-
Réseaux avec petite zone industrielle	-	-	-	-	-	-	-	-
Réseaux avec centres commerciaux proches de la ville	55-155	65-80	60-80	45-55	-	>500	-	85-100
Réseaux urbains avec immeubles	réseau puissant	50-70	50-70	40-50	50-60	réseau puissant	-	80-120
Réseaux urbains avec centres commerciaux ou écoles	réseau puissant	40-60	40-60	75-85	55-65	réseau puissant	-	110-120
Réseaux dans le centre de villages	réseau puissant	30-35	30-35	70-80	90-100	réseau puissant	-	90-100
Réseaux à la périphérie de villages	160-450	90-130	90-125	50-60	70-80	>350	-	120-150
Réseaux de hameaux	490-1700	390-430	impossible	impossible	impossible	>2'200	-	570-610

La présence de nombreuses installations PV sur une zone peut provoquer des surtensions que l'exploitant de réseau peut compenser en prenant différentes mesures. Dans un projet actuel, les chercheurs de la ZHAW ont calculé le coût de telles mesures sur différents types de réseaux. Les champs sans valeurs n'ont pas pu être calculés. Un « réseau puissant » signifie que dans ces situations, aucune mesure spéciale pour la prévention des sous-tensions et des surtensions n'est nécessaire car les réseaux sont suffisamment robustes. Pour réaliser les calculs, les chercheurs de la ZHAW se sont basés sur différents types de réseaux réels, par exemple un quartier de la ville de Ilanz (GR) pour les réseaux urbains, et un réseau de la commune rurale de Dettighofen (Bade-Wurtemberg) dans la zone de distribution des EKS pour les réseaux de centres et périphéries de villages. Tableau: Rapport final de l'OFEN/traitement B. Vogel

la commutation ciblée des consommateurs d'électricité (Demand Side Management).

Coûts pour le maintien de la tension

Dans le cadre d'une nouvelle étude intitulée CEVSol (voir les informations à la fin de l'article), une équipe de chercheurs de la ZHAW a analysé le fonctionnement de différents instruments sur différents types de réseaux et notamment comparé les coûts par puissance PV installée sur une période de 25 ans. Ce faisant, il s'est avéré que les mesures pour le maintien d'une tension conforme à la norme, en particuliers dans les zones reculées, génèrent des coûts élevés. En outre, il apparaît clairement que les batteries de stockage, appliquées exclusivement pour le maintien de la tension, comptent parmi les technologies les plus onéreuses, tandis que la régulation de la puissance réactive et active directement sur l'onduleur des installations solaires compte parmi les mesures les moins coûteuses (cf. tableau p. 4). Dans ce contexte, dans l'étude financée par l'OFEN, EKS et les centrales électriques du canton de Zurich, les scientifiques plaident pour un recours accru à la régulation de la puissance réactive, qui n'a guère été utilisée en Suisse jusqu'à présent (cf. encadré p. 3). « Les onduleurs modernes sont capables de contrôler la puissance active et réactive dans le respect de la tension de réseau actuelle », affirme Fabian Carigiet, collaborateur scientifique à la ZHAW, avant d'ajouter: « Cela crée de nouvelles opportunités, non seulement pour les exploitants de réseaux de distribution, mais aussi pour les autorités de surveillance. Les exploitants de réseau devraient avoir la possibilité d'exploiter leurs réseaux sur la plage de tension complète, jusqu'à 110% de la tension normale, sans les restrictions actuellement en vigueur. Par conséquent, lorsque la tension atteint cette limite, la puissance d'alimentation des onduleurs doit être amenée linéairement vers zéro, comme les autorités autrichiennes l'ont déjà fait dans leurs règlements techniques nationaux TOR D4. »

Cette recommandation signifie que dans certains cas, le rendement d'énergie solaire est réduit en fonction de la charge sur le réseau. Toutefois, c'est le cas uniquement lorsque la régulation de la puissance active est utilisée sur l'onduleur. Si, en revanche, seule la puissance réactive est régulée, une augmentation de la tension peut être atténuée jusqu'à deux points de pourcentage sans réduire l'injection d'électricité sur le réseau. « Les installations PV peuvent provoquer le dépassement des limites de tension mais avec leurs onduleurs, elles donnent également le moyen de régler le problème ou



Les onduleurs modernes pour les installations solaires (un produit du fabricant SolarMax sur l'image) sont en mesure de contribuer à la prévention des surtensions dues à l'injection sur le réseau par le biais de la régulation des puissances active et réactive.
Photo: SolarMax

au moins de le désamorcer; nous devons cueillir les fruits à notre portée », affirme prof. Franz Baumgartner, expert en photovoltaïque à la ZHAW. Cette mesure est économique en plus d'être efficace. Elle présente également l'avantage de ne réduire la tension sur certains points précis du réseau, tandis que les transformateurs de réseau local modernes et réglables, par exemple, affectent toutes les connexions qui proviennent d'un poste de transformation, qu'elles connaissent ou non des problèmes de tension.

Expériences positives dans le Vorarlberg

Dans leur étude, les scientifiques de la ZHAW font plusieurs fois référence aux expériences réalisées en Autriche. La régulation de la puissance réactive en fonction de la tension $Q(U)$ y est déjà largement répandue – contrairement à la situation en Suisse. « En Autriche, un onduleur sur deux est contrôlé pour utiliser la puissance réactive pour la réduction des augmentations de la tension », affirme l'ingénieur diplômé Frank Herb, responsable de la planification du réseau et du service Power Quality chez la Vorarlberger Energienetze GmbH. Depuis 2015, l'exploitant de réseau du Vorarlberg exige des propriétaires d'installations PV installées dans sa zone, qu'ils activent la stratégie de régulation de la puissance réactive $Q(U)$ dans leurs onduleurs. Herb affirme que les expériences avec cette mesure ont été positives. Afin de pouvoir arrêter de tester la fonctionnalité des onduleurs dans les moindres détails en tant qu'exploitants de réseau, les fabricants des onduleurs travaillent actuellement à l'obtention d'un certificat d'essais pour leurs appareils auprès d'un institut de test.

Selon les informations d'Herb, le système de régulation de la puissance réactive est également utilisé dans l'Allgäu allemand, où la société Vorarlberger Energienetze GmbH agit en tant que fournisseur d'électricité. Pour répondre à l'injection croissante des installations PV, l'exploitant de réseau du Vorarlberg a également équipé ses sous-stations de régulateurs de tension étendus (compoundages de courant actif), lesquels définissent la valeur de consigne pour la tension moyenne de manière flexible – plus basse en cas de faible charge et plus haute en cas de charge élevée. « Grâce à ces différentes mesures, la crainte que les installations PV poussent le réseau à ses limites n'a plus lieu d'être », affirme Frank Herb. Selon lui, le défi suivant se situe dans le nombre croissant des bornes de recharge pour voitures électriques, lesquelles présentent de hautes puissances sur de longues périodes et sont ainsi susceptibles de créer des sous-tensions locales.

Utilisation de l'électronique de puissance moderne

Il reste à voir si les exploitants de réseau suisses seront impressionnés par les expériences positives et utiliseront le système de régulation de la puissance réactive pour stabiliser le réseau à l'avenir. Dr Michael Moser, responsable du programme de recherche Réseaux de l'Office fédéral de l'énergie, exprime son estimation en ces termes: « Sur les niveaux supérieurs du réseau, la tension a toujours été régulée par une injection et un prélèvement ciblés de la puissance réactive. Avec l'application de l'électronique de puissance moderne dans les onduleurs PV, cette fonctionnalité sera de plus en plus disponible sur le réseau basse tension. Par conséquent, il tombe sous le sens d'exploiter cette possibilité avant de prendre d'autres mesures. »

➤ Le **rapport final** du projet de recherche de l'OFEN «Cost effective smart grid solutions for the integration renewable power sources into the low-voltage networks» (CEVSol) est disponible sur:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=37871>

➤ Fabian Carigiet (fabian.carigiet[at]zhaw.ch), collaborateur scientifique à l'Institut des systèmes énergétiques et de l'ingénierie des fluides de la ZHAW, communique des **informations** sur le projet.

COURS DE FORMATION

«Das Tech» de Winterthur est le deuxième plus ancien centre de formation d'ingénieurs électriciens après l'École polytechnique fédérale de Zurich. Aujourd'hui, l'école traditionnelle fait partie de la Haute école des sciences appliquées de Zurich (ZHAW). Elle forme 20% des ingénieurs diplômés de hautes écoles. Le programme de licence de trois ans « Technologie de l'énergie et de l'environnement », sous la nouvelle direction du professeur Franz Baumgartner, est axé sur la technologie des réseaux électriques et se concentre, entre autres, sur le couplage des systèmes photovoltaïques au réseau électrique. BV

➤ Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et de démonstration dans le domaine des réseaux sur www.bfe.admin.ch/ec-electricite.