

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 113 (2022)

Heft: 6

Artikel: Spannungsqualität in der Netzplanung = Qualité de la tension dans la planification du réseau

Autor: Schori, Stefan / Höckel, Michael

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1037117>

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

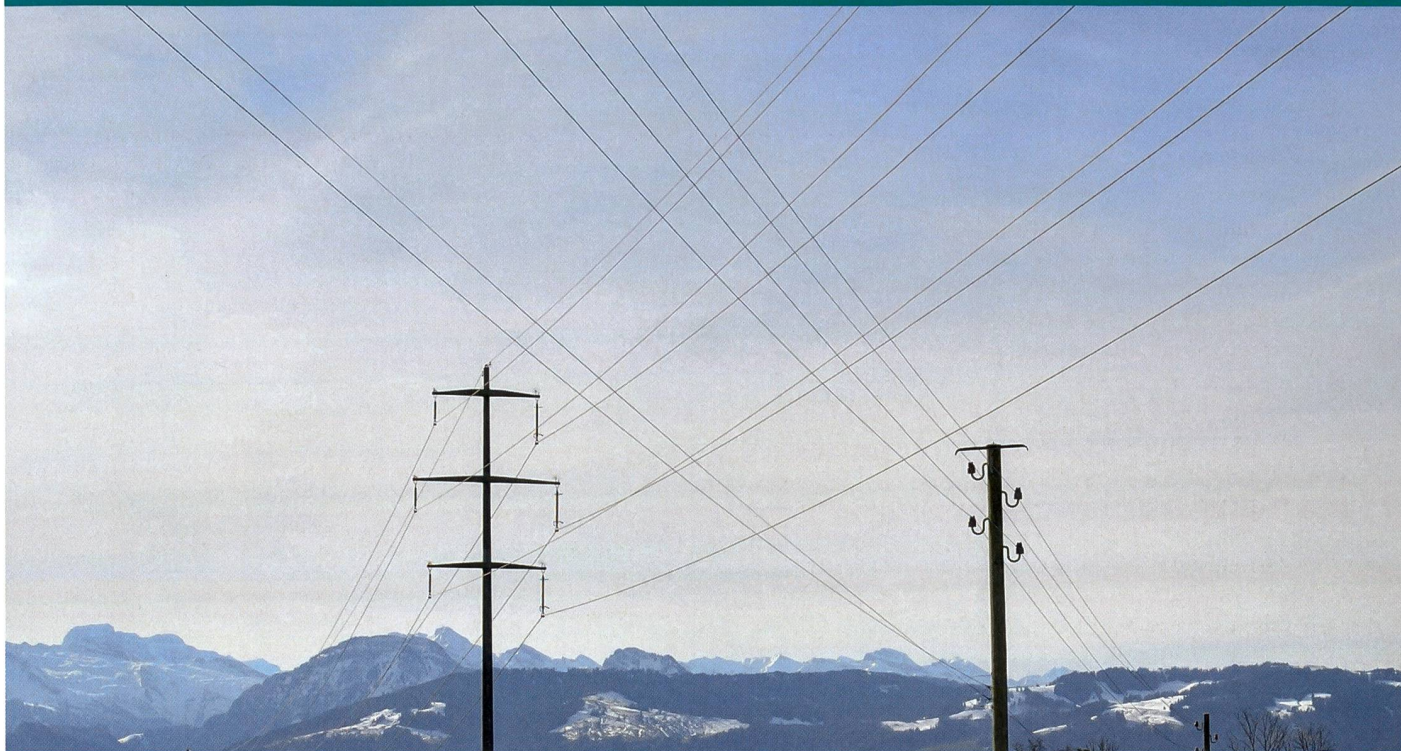
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées 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: 03.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Spannungsqualität in der Netzplanung

Hilfsmittel und Empfehlungen | Die Entwicklung der Spannungsqualität im Verteilnetz wird durch Typ, Anzahl, Leistung und Einsatz der Geräte und Anlagen in der Zukunft und durch die Dimensionierung des Netzes bestimmt. Im Projekt OptiQ wurden Hilfsmittel und Empfehlungen, mit denen der Netzplaner die Spannungsqualität bei der Zielnetzplanung berücksichtigen kann, erarbeitet.

STEFAN SCHORI, MICHAEL HÖCKEL

Viele Netzbetreiber stehen vor der komplexen Aufgabe, eine effiziente Zielnetzplanung durchzuführen. Zur Unterstützung des Einstiegs und der Durchführung einer Zielnetzplanung wurden im vom Bundesamt für Energie und Innosuisse (SCCER FURIES) geförderten Projekt OptiQ diverse Werkzeuge, Methoden und Dokumentationen entwickelt. Dabei berücksichtigen die erarbeiteten Lösungen nicht nur den Leistungsfluss und die Wirtschaftlichkeit, sondern auch die Ausprägung der Spannungsqualitätsparameter nach EN 50160 [1]. Die Spannungsqualität, auch PQ (Power Quality) genannt, umfasst unter anderem die Parameter Spannungseffektivwert, Spannungsüberschwingungen, Gesamterschwingungs-

gehalt der Spannung (THD_v), Langzeitflicker und Spannungsunsymmetrie. Die Auswirkungen und die Entwicklung der erwähnten PQ-Parameter und der frequenzabhängigen Netzimpedanz (fNI) im Verteilnetz müssen in der Netzplanung und im Netzbetrieb ausreichend berücksichtigt werden. Deshalb wurden Netzzrückwirkungen und die frequenzabhängige Netzimpedanz unter realen Bedingungen in den Verteilnetzen gemessen, anhand von Modellen simuliert und analysiert.

Netzknoten mit potenziell schlechter Spannungsqualität

Die Auswertung von Langzeitdaten in Mittel- und Niederspannungsnetzen ergab keine generelle Verschlechterung der Spannungsqualität über die Zeit. Es

kann davon ausgegangen werden, dass die Spannungsqualität in solchen Netzen meist grosse Reserven zu den Grenzwerten nach EN 50160 aufweist. Grund dafür ist die Umsetzung der Regeln zur Anschlussbeurteilung (z. B. D-A-CH-CZ-Regeln) durch die Verteilnetzbetreiber [2]. Grenzwertverletzungen sind aufgrund der niedrigen Grenzwerte am ehesten bei der 15. und 21. Spannungsharmonischen zu erwarten.

Im MS-Netz zeigte sich für alle PQ-Phänomene tendenziell eine mittlere bis hohe Korrelation zwischen der gemessenen Ausprägung im Unterwerk und in den Trafostationen. Netzzrückwirkungen breiteten sich folglich über das gesamte Netz aus. Eine Ausnahme bildeten Abgänge mit hoher Leistung. Sie wiesen teils andere Aus-

prägungen der PQ-Phänomene auf. Im NS-Netz zeigte sich, dass kritische Spannungsoberschwingungen durch Anlagen mit hoher Leistung, aber auch durch die Summe vieler nichtlinearer Lasten, die an unterschiedlichen Anschlusspunkten angeschlossen sind, verursacht werden können. Hohe Pegel der Spannungsharmonischen lassen sich daher nicht in jedem Fall durch einzelne Massnahmen begrenzen. Jedoch sollte bei Pegeln in der Nähe des Grenzwertes beurteilt werden, ob überhaupt Störungen verursacht werden, bevor Anpassungen des Netzes oder von Anlagen vorgenommen werden. Eine permanente Überwachung an kritischen Netzknoten kann hier sinnvoll sein, um Kosten und Nutzen zu optimieren, denn unnötige Massnahmen wie eine Netzverstärkung könnten dadurch vermieden werden.

Um aus Kostengründen nur die kritischsten Netzknoten mit PQ-Messgeräten überwachen zu müssen, ist es nötig, sogenannte PQ-Hotspots zu erkennen. Ein einfacher Ansatz zur Identifikation potenzieller PQ-Hotspots wurde im Projekt erarbeitet [3]. Er besteht darin, die relative Spannungsänderung d für symmetrische Lasten an den Netzknoten gemäss untenstehender Formel zu berechnen.

Zu berücksichtigen ist dabei, dass für die Beurteilung von PQ-Hotspots der Übergabepunkt zwischen Netzbetreiber und dem Kunden, also der Netzanschlusspunkt, massgeblich ist.

$$d = \frac{\Delta U}{U_V} \times 100 \approx \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi) \times 100$$

d	Relative Spannungsänderung in %
ΔU	Verkettete Spannungsänderung in V
U_V	Verkettete Nennspannung in V
ΔS_A	Scheinleistungsänderung in kVA
S_{kV}	Kurzschlussleistung (dreiphasig, symmetrisch) in kVA
ψ_{kV}	Netzimpedanzwinkel in °
φ	Winkel der Laständerung in °

Für eine Worst-Case-Betrachtung kann der Kosinus-Term mit dem Wert 1 angenommen werden. S_{kV} kann in der Regel von den meisten Verteilnetzbetreiberinnen bestimmt werden. Schwieriger ist aber die Bestimmung der Leistungsänderung ΔS_A . Daher wurden verschiedene Methoden entwickelt, um ΔS_A zu quantifizieren und d zu berechnen. Die Untersuchung von verschiedenen Schwellwerten für d hat gezeigt, dass bei Betrachtung der Netzknoten mit einem Wert d grösser als

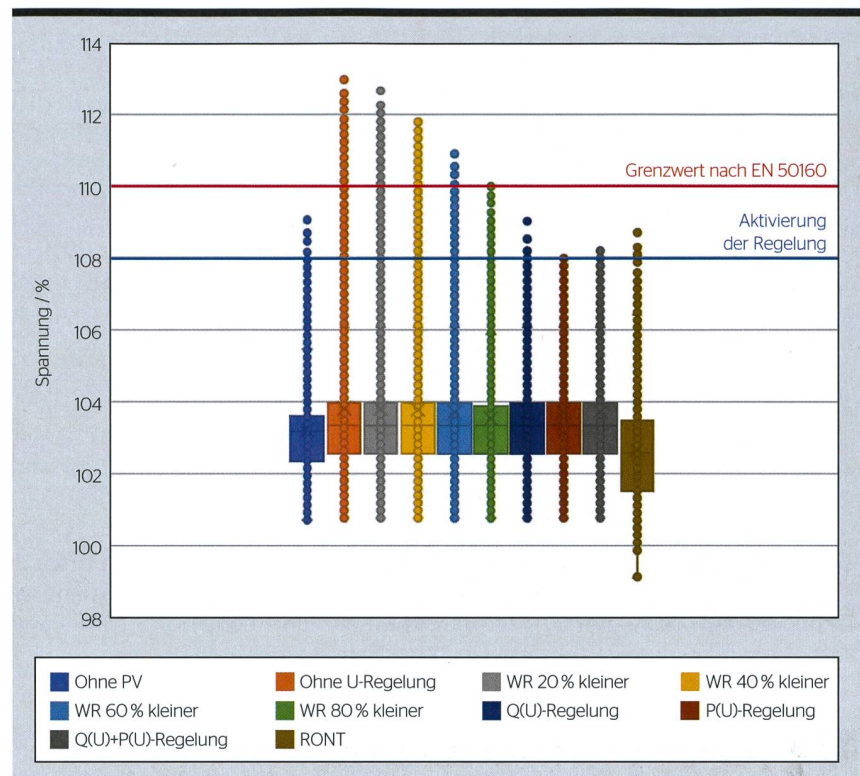


Bild 1 Boxplots aller simulierten Spannungswerte eines Jahres.

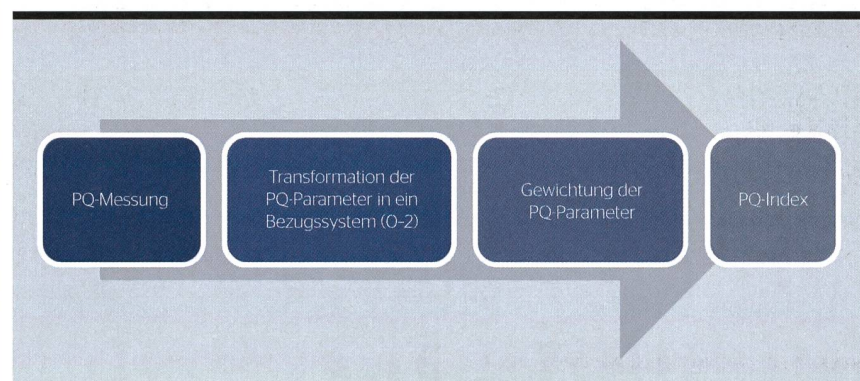


Bild 2 Berechnung des PQ-Index.

3% die Mehrheit aller potenziell kritischer Netzanschlüsse ermittelt werden kann. Der Algorithmus zur Bestimmung potenzieller PQ-Hotspots wird im Schlussbericht ausführlich beschrieben. Dieses Vorgehen hilft bei der Eingrenzung der kritischsten Netzknoten bezüglich Spannungsqualität, um eine geeignete Auswahl für die dauerhafte Überwachung zu treffen.

Spannungsregelung

Der Spannungseffektivwert ist ein zentraler Parameter bei der Beurteilung der Spannungsqualität. Er darf nicht mehr als +10% und -15% von der Nennspannung abweichen. Durch den Zubau

von PV-Anlagen wird die Spannung in Niederspannungsnetzen wesentlich erhöht. Damit der obere Spannungsgrenzwert nicht überschritten wird, können Massnahmen nötig werden. Mittels Simulation wurde daher an einer PV-Anlage mit einer Nennleistung von 240 kVA untersucht, welchen Einfluss eine spannungsabhängige Wirk- und Blindleistungsregelung (P(U)- und Q(U)-Regelung), zwei parallele regelbare Ortsnetztransformatoren (Ront) sowie eine Reduktion der Wechselrichterleistung auf die Spannungseffektivwerte im Stromnetz hätten [4]. Bild 1 fasst alle simulierten Spannungswerte, die während der gan-

PQ-Index	PQ ist:
$0 < \text{PQ-Index} \leq 0,5$	zu gut
$0,5 < \text{PQ-Index} \leq 1,5$	gut
$1,5 < \text{PQ-Index} \leq 2$	kritisch
$2 < \text{PQ-Index}$	schlecht

Bild 3 Schwellwerte des PQ-Index.

zen Simulationsdauer von einem Jahr am Anschlusspunkt der PV-Anlage aufgetreten sind, bezogen auf die Nennspannung von 400 V, zusammen. Der Grenzwert bei 110 % wurde im Szenario mit einer PV-Anlage ohne spannungsreduzierende Massnahmen sowie bei den Szenarien mit einer bis zu 60 % reduzierten Auslegung der Wechselrichter (WR) verletzt. Bei diesen Szenarien müsste die Leitung zur PV-Anlage verstärkt werden. Ohne Massnahmen

müsste die WR-Leistung um 80 % reduziert werden, um Grenzwertverletzungen zu vermeiden. Mit der P(U)-Regelung, der Q(U)-Regelung oder den zwei Ront könnte die Spannung so abgesenkt werden, dass der Spannungsgrenzwert nicht überschritten würde. Die blaue Linie repräsentiert den Spannungslevel (108%), ab dem die P(U)- und Q(U)-Regelung aktiv wurden. Bei der Q(U)-Regelung lag die maximale Spannung leicht über diesem Level, weil die Regelung teilweise voll ausgelastet war, also mit maximaler Blindleistung betrieben wurde, und den Spannungsanstieg durch die PV-Anlage dennoch nicht völlig kompensieren konnte. Der Einsatz der Ront senkte nicht nur die Spannungsmaxima, sondern auch die Spannungsminima, also die gesamte Verteilung aller simulierter Spannungen.

Die technisch und wirtschaftlich sinnvollste Option sollte für jede Anlage anhand der spezifischen Netzdimensionierung und Leistungssituation beurteilt werden, unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Netz- und des Anlagenbetreibers. Lokale P(U)- und Q(U)-Regelungen durch Wechselrichter haben den Vorteil, dass sie einfach implementiert werden können und direkt auf den betroffenen Netzknoten wirken. Entweder werden dabei bei der P(U)-Regelung Einspeiseverluste durch die Abregelung der PV-Produktion in Kauf genommen oder es werden bei der Q(U)-Regelung erhöhte Netzverluste und der entsprechende Blindenergiebezug aus der überlagerten Netzebene akzeptiert. Die Spannungshaltung mittels Blindleistungsregelung durch PV-Anlagen könnte künftig u. U. als Systemdienstleistung vergütet werden und eine zusätzliche Einnahmequelle für den Anlagenbetreiber darstellen.

Im Projekt wurde ein eigener Ansatz für die Q(U)-Regelung verwendet. In der Praxis empfiehlt sich die Anwendung einer Q(U)-Regelung gemäss der Branchenempfehlung «NA/EEA-NE7» des VSE oder der Anwendungsregel «AR-N 4105» des VDE. Als Alternative wäre der Einsatz eines Ront zu prüfen. Das Szenario mit Ront wies in der Analyse ähnliche Kosten auf wie das günstigste Szenario mit der Q(U)-Regelung. Dabei würden für Ront zwar einmalige Investitionskosten anfallen, aber die Abregelung der Wirkleistung wegen zu hoher Spannungen könnte reduziert oder ganz vermieden werden.

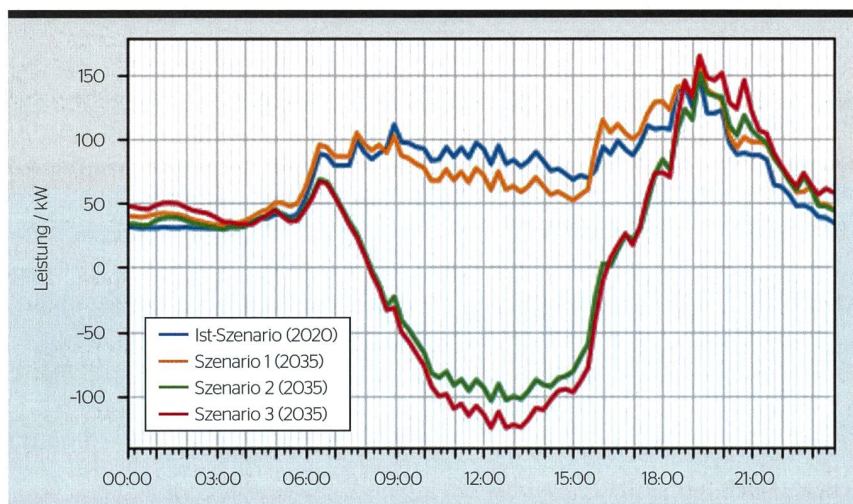


Bild 4 Sommer - Entwicklung des Lastprofils.

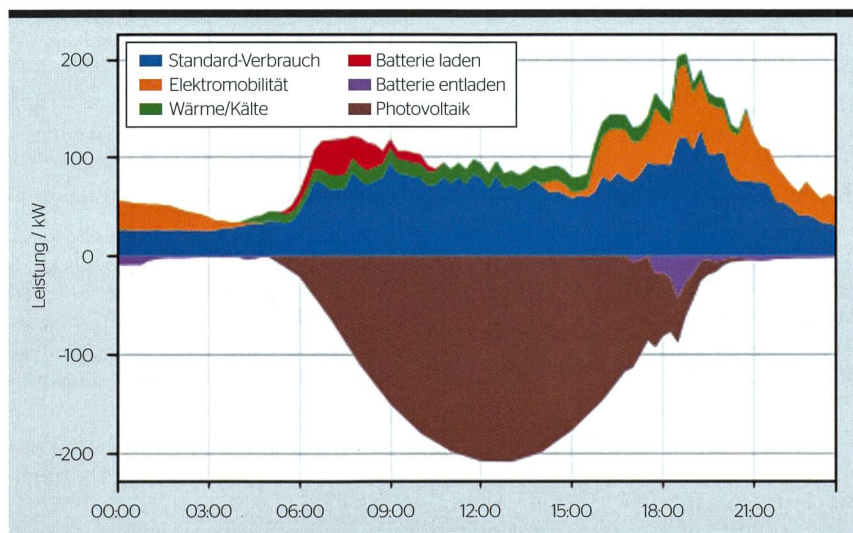


Bild 5 Szenario 3 (2035), Sommer - Gestapelte Leistungskurven.

PQ-Index

Eine Beurteilung und ein Vergleich der Spannungsqualität an allen relevanten Netzknoten ist wegen der grossen Anzahl an PQ-Parametern aufwendig. Allein bei den Spannungsharmonischen sind 24 Einzelwerte (2. bis 25. Harmonische) zu berücksichtigen. Für eine effiziente Bewertung wäre es vorteilhaft, wenn die Spannungsqualität von Netzknoten über eine einzige Kennzahl beurteilt werden könnte. Hierfür wurde eine Methodik entwickelt, die alle PQ-Phänomene pro Netzknoten in einem Index, dem PQ-Index, zusammenfasst [5]. Damit muss bei der Beurteilung der Spannungsqualität pro Netzknoten nur

noch ein bis maximal drei Werte betrachtet werden. Dazu werden alle PQ-Phänomene unter Berücksichtigung der Grenzwerte nach EN 50160 und der (geschätzten) Durchschnittswerte in ein gemeinsames Bezugssystem gebracht und nach den Bedürfnissen der Netzbetreiberin individuell bewertet und gewichtet. Dies erlaubt es, den Einfluss der einzelnen PQ-Parameter auf den PQ-Index zu bestimmen. Die Idee ist, dass der Wert eines PQ-Parameters im Bezugssystem 1 beträgt, wenn der gemessene Pegel des PQ-Parameters genau dem Durchschnittswert entspricht.

Die Werte der PQ-Parameter werden im Bezugssystem auf ein Intervall von 0 bis 2 verteilt, wobei 0 dem Nennwert, 1 dem Durchschnittswert und 2 dem Grenzwert entspricht. Der PQ-Index setzt sich aus den drei Teilindizes PQ_{Avg} , PQ_{Max} und PQ_{99} zusammen. Der Teilindex PQ_{Avg} entspricht dem arithmetischen Mittel aller bezogenen PQ-Parameter und beschreibt die mittlere Spannungsqualität. PQ_{Max} repräsentiert den schlechtesten PQ-Parameter und ermöglicht dadurch eine Erkennung von Grenzwertverletzungen. Der Teilindex PQ_{99} ist eine Kombination aus PQ_{Avg} und PQ_{Max} . Bei diesem Teilindex werden einzelne Ausreisser der PQ-Parameter stark hervorgehoben, während geringe Veränderungen der PQ-Parameter zwar gezeigt, aber nicht überbewertet werden. **Bild 2** und **Bild 3** stellen die Berechnung und die Schwellwerte des PQ-Index dar. Bei der entwickelten Methodik handelt es sich um eine erste Umsetzung des Ansatzes. Sie wird im neuen Projekt QuVert mithilfe weiterer Überlegungen und Messdaten überarbeitet [6].

Lastprofil-Tool

Mit Lastflussberechnungen wird in der Netzplanung beurteilt, ob bei einer Netzvariante Spannungsgrenzwerte verletzt oder Netzbetriebsmittel überlastet werden. Analysen für die Zukunft bedingen Leistungsprofile, welche die Extremsituationen des maximalen Verbrauchs und der maximalen Einspeisung für die jeweiligen Szenarien abschätzen. Weil solche Profile oft nicht zur Verfügung stehen oder nur aufwendig erstellt werden können, wurde im Projekt die Software «LastprofilTool ES 2050» (ES = Energiestrategie) programmiert. Sie ermöglicht

die Erstellung von Profilen für Einspeisung, Verbrauch und Speicherung [7]. Dies erlaubt die Quantifizierung von Entwicklungsszenarien in Verteilnetzen auf Einzelverbraucherebene.

Das Tool erstellt Leistungsprofile basierend auf statistischen Daten der Energieperspektiven 2050 und des Bundesamts für Statistik. Es ist anpassbar und erlaubt auch die Berücksichtigung anderer Energieszenarien. Die Prognosen für Einspeisung, Verbrauch und Speicherung ermöglichen es, Entscheidungen für den Planungshorizont auf einer fundierten Grundlage zu treffen. **Bild 4** zeigt das Sommerprofil einer Trafostation für das Ist-Szenario im Jahr 2020 und drei Szenarien für das Jahr 2035. In **Bild 5** ist dargestellt, aus welchen Erzeugern, Verbrauchern und Speichern sich das Profil des Szenarios 3 (2035) zusammensetzt.

Zusammen mit einem Lastflussberechnungs-Tool wie Neplan, PowerFactory oder ZNP light ermöglicht dieses Tool die Analyse des Spannungsniveaus und der Auslastung von Netzbetriebsmitteln diverser Netzvarianten. Damit unterstützt es die Bewertung von Netzoptimierungen, die Planung von Netzverstärkungen und die Erkennung von Hotspots im Netz. Das LastprofilTool ES 2050 wurde in Projekten der BFH umfangreich eingesetzt. Es ist online verfügbar und kann, wie auch das BFH-eigene Lastflussberechnungs-Tool ZNP light, kostenlos bei den Autoren per E-Mail angefragt werden.

Netzimpedanz und PLC

Die frequenzabhängige Netzimpedanz ist einerseits für die Ausbreitung der harmonischen Ströme und die Ausprägung der Oberschwingungsspannungen verantwortlich und unterstützt andererseits die Analyse von Störungen der Powerline Communication (PLC) im Verteilnetz. Im Projekt wurden Messungen der fNI von 50 Hz bis zu 500 kHz durchgeführt. Im Fokus waren der Einfluss von PV-Wechselrichtern, der Impedanzverlauf in Trafostationen und Verteilboxen, Wechselwirkungen zwischen Geräten und die Gerätestabilität abhängig von der fNI. Bei diesen Arbeiten wurde die BFH durch die Forschungsgruppe von Dominique Roggo der Fachhochschule Westschweiz (HES-SO Valais-Wallis) unterstützt. Hierzu flossen auch Erkenntnisse aus dem Projekt Remi-

gate ein, in dem die HES-SO den Einfluss verteilter Energieproduktion auf die Powerline Communication untersuchte [8].

Empfehlungen für Planung und Betrieb

Die formulierten Empfehlungen und Methoden für die Netzplanung und den Netzbetrieb umfassen Tipps zur Planung von PQ-Messkampagnen, zur Ausbreitung von PQ-Phänomenen, zum Einfluss von nichtlinearen Geräten auf die Spannungsqualität sowie weitere Themen. Zudem sind Ratschläge für die Spannungsregelung und das Demand-Side-Management dokumentiert. Aspekte hinsichtlich der frequenzabhängigen Netzimpedanz und der Powerline Communication wurden erörtert. Die Resultate sollen die Netzbetreiber dabei unterstützen, Fragen zur Spannungsqualität und zur frequenzabhängigen Netzimpedanz professionell zu beantworten. Das Labor für Elektrizitätsnetze der Berner Fachhochschule steht ihnen bei Bedarf gerne zur Seite.

Referenzen

- [1] «EN 50160, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen», 2020.
- [2] «Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen», VSE, OE, VDE FNN und CSRES, 2021.
- [3] P. Noth, «Effizientes Spannungsqualitäts-Messmanagement», BFH, 2018.
- [4] S. Schori, L. Heiniger, T. Raitz Novais, R. Buntschu, M. Höckel, «Projekt OptiQ, Bericht WP 5, Zielnetzimpedanz», BFH, 2020.
- [5] L. Heiniger, «Projekt OptiQ, WP 5, PQ-Index, Berücksichtigung der Entwicklung der Spannungsqualität in der Zielnetzplanung», BFH, 2020.
- [6] Berner Fachhochschule, «Projekt QuVert», www.bfh.ch/de/forschung/forschungsbereiche/bfh-zentrum-energiespeicherung/projekte
- [7] T. Raitz Novais, «Projekt OptiQ, WP 5, LastprofilTool ES 2050: Tool zur Beurteilung der zielorientierten Netzplanung auf Basis der Energiestrategie 2050», 2020.
- [8] D. Roggo, L. Capponi, F. Decorvet, C. Pellodi, «Remigate: Reduction of electromagnetic interferences in smart grid applications: Site tests and assessment», BFE, 2018.

Link

→ Schlussbericht und Berichte der Arbeitspakete 1 bis 5: www.bfh.ch/de/forschung/forschungsbereiche/bfh-zentrum-energiespeicherung/projekte

Autor

Stefan Schori ist Managing Co-Director und Gruppenleiter Elektrizitätsnetze am BFH-Zentrum Energiespeicherung.
→ Berner Fachhochschule, 2503 Biel
→ stefan.schori@bfh.ch

Michael Höckel ist als Professor für Energiesysteme für ein breites Spektrum an Forschungsgebieten verantwortlich.
→ michael.hoeckel@bfh.ch

Ein besonderer Dank gilt dem BFE, Innosuisse und den Projektpartnern BFH, HES-SO Valais-Wallis, AEW Energie AG, BKW Energie AG, Energie Service Biel/Bienne, Energie Thun AG, EWZ, Repower AG und Services Industriels de Genève sowie Schaffner International AG.



Qualité de la tension dans la planification du réseau

Aides et recommandations | L'évolution de la qualité de la tension dans le réseau de distribution est déterminée par le type, le nombre, la puissance et l'utilisation des appareils et installations ainsi que par le dimensionnement du réseau. Dans le projet OptiQ, des aides et recommandations ont été développées afin de permettre la prise en compte de la qualité de la tension lors de la planification du réseau cible.

STEFAN SCHORI, MICHAEL HÖCKEL

De nombreux gestionnaires de réseau sont confrontés à la tâche complexe de réaliser une planification efficace du réseau cible. Divers outils, méthodes et documentations ont été développés dans le cadre du projet OptiQ, soutenu par l'Office fédéral de l'énergie et Innosuisse (SCCER-FURIES), dans l'objectif de soutenir le lancement et la réalisation d'une planification du réseau cible. Les solutions élaborées tiennent compte non seulement du flux de puissance et de la rentabilité, mais aussi de l'expression des paramètres de qualité de la tension conformément à la norme EN 50160 [1]. La qualité de la tension, également appelée PQ (Power Quality), comprend entre autres les paramètres suivants: valeur efficace de la tension, tensions harmoniques, taux global de distorsion harmonique de la tension (THD_v), sévérité du papillotement de longue durée et déséquilibre de la tension d'alimentation. Les effets et l'évolution des para-

mètres PQ susmentionnés ainsi que de l'impédance du réseau dépendant de la fréquence (fNI) dans le réseau de distribution doivent être suffisamment pris en compte dans la planification et l'exploitation du réseau. C'est pourquoi les perturbations de réseau et l'impédance du réseau dépendant de la fréquence ont été mesurées dans des conditions réelles dans les réseaux de distribution, puis simulées et analysées à l'aide de modèles.

Localiser les nœuds de réseau les plus critiques

L'évaluation des données à long terme dans les réseaux moyenne et basse tension n'a pas révélé de détérioration générale de la qualité de la tension au fil du temps. On peut considérer que la qualité de la tension dans de tels réseaux dispose généralement d'une grande réserve par rapport aux valeurs limites selon la norme EN 50160. Ceci est dû à la mise en œuvre des règles pour l'éva-

luation des raccordements (p. ex. les règles D-A-CH-CZ) par les gestionnaires de réseau de distribution [2]. En raison des faibles valeurs limites, il est le plus probable de voir apparaître des dépassements de ces dernières pour les 15^e et 21^e harmoniques de tension.

Dans le réseau moyenne tension, une corrélation moyenne à élevée entre les valeurs mesurées dans la sous-station et dans les postes de transformation a été observée pour tous les phénomènes PQ. Les perturbations se sont par conséquent propagées dans l'ensemble du réseau. Les connexions de forte puissance ont constitué une exception: elles ont présenté en partie d'autres caractéristiques des phénomènes PQ. Dans le réseau basse tension, il s'est avéré que les tensions harmoniques critiques pouvaient être causées par des installations à forte puissance, mais aussi par la somme de nombreuses charges non linéaires raccordées à différents points de connexion. Les niveaux élevés des

tensions harmoniques ne peuvent donc pas être limités dans chaque cas par des mesures individuelles. Toutefois, lorsque les niveaux sont proches de la valeur limite, il convient d'évaluer si des perturbations sont causées avant de procéder à des adaptations du réseau ou des installations. Une surveillance permanente au niveau des nœuds de réseau critiques peut alors s'avérer utile afin d'optimiser les coûts et les bénéfices, ce qui permet d'éviter des mesures inutiles telles qu'un renforcement du réseau.

Afin de ne surveiller, pour des raisons de coûts, que les nœuds de réseau les plus critiques avec des appareils de mesure PQ, il est nécessaire de détecter ce que l'on appelle les hotspots PQ. Une approche simple permettant d'identifier les hotspots PQ potentiels a été élaborée dans le cadre du projet [3]. Elle consiste à calculer la variation relative de la tension d pour des charges symétriques aux nœuds du réseau selon la formule ci-dessous. Il faut tenir compte du fait que le point de raccordement au réseau, soit l'endroit où le client est physiquement relié au réseau de distribution, est déterminant pour l'évaluation des hotspots PQ.

$$d = \frac{\Delta U}{U_v} \times 100 \approx \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi) \times 100$$

- d Variation relative de la tension en %
- ΔU Variation de la tension composée en V
- U_v Tension composée nominale en V
- ΔS_A Variation de la puissance apparente en kVA
- S_{kV} Puissance de court-circuit (triphasé, symétrique) en kVA
- ψ_{kV} Angle de l'impédance du réseau en °
- φ Angle de la variation de charge en °

Pour l'hypothèse du pire scénario, la valeur 1 peut être adoptée pour le terme en cosinus. La puissance de court-circuit S_{kV} peut en général être déterminée par la plupart des gestionnaires de réseau de distribution. Mais il est plus difficile de déterminer la variation de la puissance apparente ΔS_A . Par conséquent, différentes méthodes ont été développées pour quantifier ΔS_A et calculer d . L'analyse de différentes valeurs seuils pour d a montré qu'en considérant les nœuds de réseau avec une valeur d supérieure à 3%, il est possible de déterminer la majorité de toutes les connexions de réseau potentiellement critiques. L'algorithme utilisé pour déterminer les hotspots PQ potentiels est décrit en détail dans le rapport final. Cette approche aide à localiser les nœuds de réseau les plus critiques en

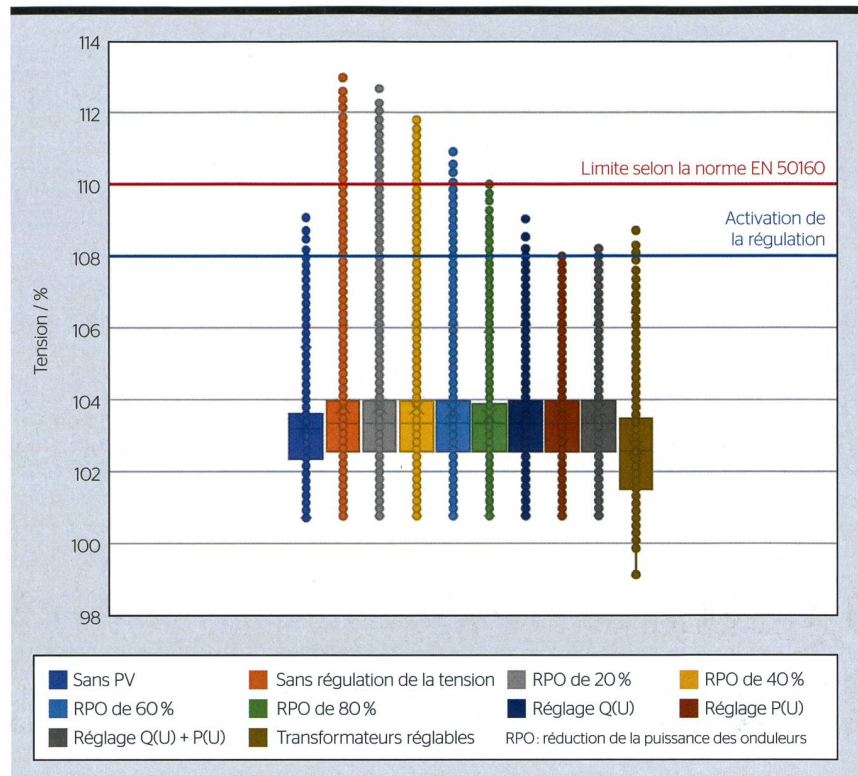


Figure 1 Box plots de toutes les valeurs de tension simulées sur une année.

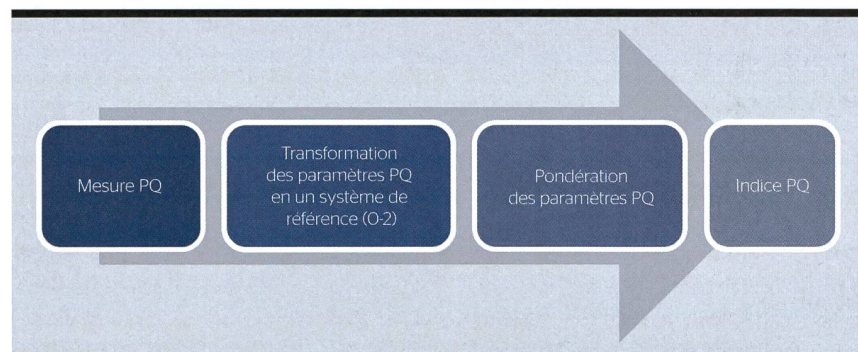


Figure 2 Calcul de l'indice PQ.

termes de qualité de la tension afin de faire un choix approprié pour la surveillance en continu.

Régulation de la tension

La valeur efficace de la tension est un paramètre central dans l'évaluation de la qualité de la tension. Elle ne doit pas s'écarter de plus de +10% et -15% de la tension nominale. Le développement des installations photovoltaïques entraîne une augmentation considérable de la tension dans les réseaux basse tension. Pour que la valeur limite supérieure de tension ne soit pas dépassée, des mesures peuvent s'avérer nécessaires. Des simulations ont donc été réalisées sur une installation photovoltaïque d'une puissance

nominale de 240 kVA afin d'étudier l'influence qu'auraient un réglage des puissances active et réactive en fonction de la tension (réglages P(U) et Q(U)), deux transformateurs de réseau local réglables (TR) en parallèle ainsi qu'une réduction de la puissance des onduleurs (RPO) sur les valeurs efficaces de la tension dans le réseau électrique [4]. La figure 1 résume toutes les valeurs de tension simulées qui sont apparues au point de raccordement de l'installation photovoltaïque pendant toute la durée des simulations, soit un an, par rapport à la tension nominale de 400 V. La valeur limite de 110% n'a été respectée ni dans le scénario avec une installation photovoltaïque sans mesures de réduction de la tension,

Indice PQ	PQ est :
0 < Indice PQ ≤ 0,5	trop bon
0,5 < Indice PQ ≤ 1,5	bon
1,5 < Indice PQ ≤ 2	critique
2 < Indice PQ	mauvais

Figure 3 Valeurs seuils de l'indice PQ.

ni dans les scénarios avec une réduction de la puissance des onduleurs jusqu'à 60%. Dans ces scénarios, la ligne jusqu'à l'installation photovoltaïque devrait être renforcée. En l'absence de mesures, il faudrait réduire la puissance de l'onduleur de 80% pour éviter des dépassements de la valeur limite. Avec le réglage P(U), le réglage Q(U) ou les deux transformateurs réglables, la tension pourrait être abaissée de manière à ce que la valeur limite de tension ne soit pas dépassée. La ligne bleue représente le niveau de tension (108%) à partir duquel les

réglages P(U) et Q(U) sont devenus actifs. Dans le cas du réglage Q(U), la tension maximale était légèrement supérieure à ce niveau, car le réglage était partiellement utilisé à pleine capacité, c'est-à-dire avec une puissance réactive maximale, et ne pouvait néanmoins pas compenser totalement l'augmentation de tension due à l'installation photovoltaïque. L'utilisation des transformateurs réglables a permis de réduire non seulement les maxima de tension, mais aussi les minima, soit la répartition globale de toutes les tensions simulées.

L'option la plus judicieuse sur les plans technique et économique devrait être évaluée pour chaque installation en fonction du dimensionnement spécifique du réseau et de la puissance, en tenant compte des contraintes du gestionnaire du réseau et de l'installation. Les réglages P(U) et Q(U) locaux au moyen d'onduleurs ont l'avantage d'être faciles à mettre en œuvre et

d'agir directement sur le nœud de réseau concerné. Il faut toutefois accepter soit des pertes d'injection dues au réglage de la production photovoltaïque dans le cas du réglage P(U), soit des pertes de réseau accrues et le prélèvement d'énergie réactive correspondante du niveau de réseau supérieur dans le cas du réglage Q(U). Le maintien de la tension au moyen du réglage de la puissance réactive par les installations photovoltaïques pourrait éventuellement être rémunéré à l'avenir en tant que service système et constituer une source de revenus supplémentaire pour le gestionnaire de l'installation.

Dans le cadre du projet, une approche spécifique a été utilisée pour le réglage Q(U). Dans la pratique, il est recommandé d'appliquer un réglage Q(U) conformément à la recommandation de la branche «RR/IPE-NR7» de l'AES ou à la règle d'application «VDE-AR-N 4105» de la VDE. Comme alternative, il faudrait envisager l'utilisation d'un transformateur réglable. Dans l'analyse, le scénario avec les transformateurs réglables a présenté des coûts similaires à ceux du scénario le plus avantageux avec le réglage Q(U). Cela entraînerait certes des coûts d'investissement uniques pour les transformateurs réglables, mais permettrait de réduire, voire d'éviter complètement, le réglage de la puissance active en raison de tensions trop élevées.

L'indice PQ

L'évaluation et la comparaison de la qualité de la tension sur tous les nœuds pertinents est complexe en raison du grand nombre de paramètres PQ. Rien que pour les harmoniques de tension, 24 valeurs individuelles (de la 2^e à la 25^e harmonique) doivent être prises en compte. Pour une estimation efficace, il serait préférable de pouvoir évaluer la qualité de la tension des nœuds à l'aide d'un seul indicateur. Une méthodologie a été développée à cet effet. Elle regroupe tous les phénomènes PQ par nœud dans un indice, l'indice PQ [5]. Ainsi, lors de l'évaluation de la qualité de la tension, il ne faut plus considérer qu'une à trois valeurs au maximum par nœud. Pour ce faire, tous les phénomènes PQ sont placés dans un système de référence commun, en tenant compte des valeurs limites selon la norme EN 50160 et des valeurs moyennes (estimées), puis évalués et pondérés individuellement en fonction des besoins du

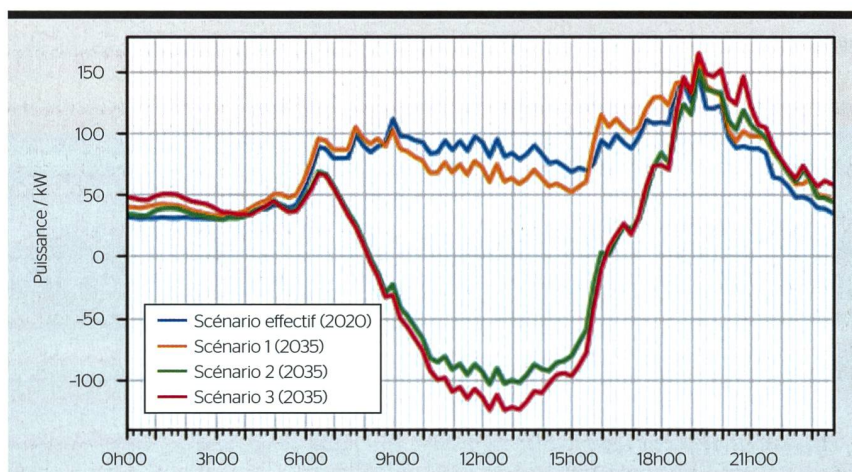


Figure 4 Évolution du profil de charge d'un poste de transformation (en été).

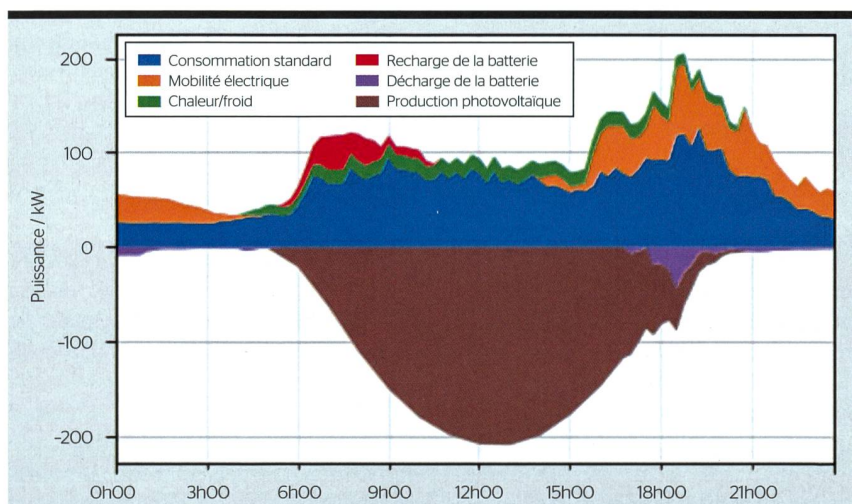


Figure 5 Scénario 3 (2035), en été : courbes de puissance superposées.

gestionnaire du réseau. Cela permet de déterminer l'influence des différents paramètres PQ sur l'indice PQ. L'idée est que la valeur d'un paramètre PQ dans le système de référence est de 1 si le niveau mesuré du paramètre PQ correspond exactement à la valeur moyenne.

Les valeurs des paramètres PQ sont réparties dans le système de référence sur un intervalle de 0 à 2 – 0 correspondant à la valeur nominale, 1 à la valeur moyenne et 2 à la valeur limite. L'indice PQ se compose de trois sous-indices: PQ_{Avg} , PQ_{Max} et PQ_{99} . Le sous-indice PQ_{Avg} correspond à la moyenne arithmétique de tous les paramètres PQ référencés et décrit la qualité moyenne de la tension. PQ_{Max} représente le plus mauvais paramètre PQ et permet ainsi de détecter les dépassements de valeurs limites. Le sous-indice PQ_{99} est une combinaison de PQ_{Avg} et PQ_{Max} . Dans ce sous-indice, certaines valeurs aberrantes des paramètres PQ sont fortement mises en évidence, tandis que de faibles variations des paramètres PQ sont certes indiquées, mais pas surestimées. La figure 2 et la figure 3 présentent le calcul et les valeurs seuils de l'indice PQ. La méthodologie développée est une première mise en œuvre de l'approche. Elle sera retravaillée dans le nouveau projet QuVert à l'aide de réflexions et de données de mesure supplémentaires [6].

Un outil pour établir les profils de charge

Lors de la planification du réseau, les calculs de flux de charge permettent d'évaluer si une variante de réseau enfreint les valeurs limites de tension ou si les moyens d'exploitation du réseau sont surchargés. Les analyses pour l'avenir nécessitent des profils de puissance qui évaluent les situations extrêmes de consommation maximale et d'injection maximale pour chaque scénario. Comme de tels profils ne sont souvent pas à disposition ou ne peuvent être établis qu'au prix de gros efforts, le logiciel «LastprofilTool ES 2050» (ES pour Energiestrategie, ou stratégie énergétique) a été programmé dans le cadre du projet. Il permet d'établir des profils d'injection, de consommation et de stockage [7], et ainsi de quantifier les scénarios de développement des réseaux de distribution au niveau des consommateurs individuels.

L'outil établit des profils de puissance basés sur les données statistiques des Perspectives énergétiques 2050 et de

l'Office fédéral de la statistique. Il est adaptable et permet aussi de prendre en compte d'autres scénarios énergétiques. Les prévisions d'injection, de consommation et de stockage permettent de prendre des décisions fondées sur une base solide pour l'horizon de planification. La figure 4 présente le profil de charge d'un poste de transformation en été pour le scénario effectif en 2020 et trois scénarios pour l'année 2035. La figure 5 montre de quels producteurs, consommateurs et systèmes de stockage est composé le profil du scénario 3 (2035).

Associé à un outil de calcul des flux de charge tel que Neplan, PowerFactory ou ZNP light, cet outil permet d'analyser le niveau de tension et la charge des moyens d'exploitation de diverses variantes de réseau. Il soutient ainsi l'évaluation des optimisations de réseau, la planification des renforcements de réseau et la détection des hot spots sur le réseau. Le LastprofilTool ES 2050 a été largement utilisé dans divers projets de la Haute école spécialisée bernoise (BFH). Il est disponible en ligne et peut, tout comme l'outil de calcul des flux de charge ZNP light de la BFH, être commandé gratuitement par courriel en contactant les auteurs de cet article.

Impédance du réseau et CPL

L'impédance du réseau dépendant de la fréquence (fNI) est, d'une part, responsable de la propagation des courants harmoniques et de l'expression des tensions harmoniques. D'autre part, elle soutient l'analyse des perturbations de la Powerline Communication (PLC, ou communication par courants porteurs en ligne, CPL) dans le réseau de distribution. Dans le cadre du projet, des mesures de la fNI ont été effectuées entre 50 Hz et 500 kHz. L'accent a été mis sur l'influence des onduleurs photovoltaïques, l'évolution de l'impédance dans les postes de transformation et les cabines de distribution, les interactions entre les appareils et la stabilité des appareils en fonction de la fNI. Pour ces travaux, la BFH a été soutenue par le groupe de recherche de Dominique Roggo de la HES-SO Valais-Wallis. Les connaissances acquises dans le cadre du projet Remigate, dans lequel la HES-SO a étudié l'influence de la production distribuée d'énergie sur la communication par courants porteurs en ligne, ont également été prises en compte [8].

Recommandations pour la planification et l'exploitation

Les recommandations et méthodes formulées pour la planification et l'exploitation du réseau comprennent des conseils pour la planification des campagnes de mesure de la PQ et traitent de la propagation des phénomènes de PQ, de l'influence des appareils non linéaires sur la qualité de la tension ainsi que d'autres thèmes. De plus, des conseils pour la régulation de la tension et la gestion de la demande (demand side management) sont documentés. Les aspects relatifs à l'impédance du réseau dépendant de la fréquence et à la communication par courants porteurs en ligne ont aussi été abordés. Les résultats doivent aider les gestionnaires de réseau à répondre de manière professionnelle aux questions relatives à la qualité de la tension et à l'impédance du réseau dépendant de la fréquence. Le Laboratoire des réseaux électriques de la Haute école spécialisée bernoise se tient volontiers à leur disposition en cas de besoin.

Références

- [1] « EN 50160: Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution », 2020.
- [2] « Règles techniques pour l'évaluation des perturbations de réseaux », AES, OE, VDE FNN et CSRES, 2021.
- [3] P. Noth, « Effizientes Spannungsqualitäts-Messmanagement », BFH, 2018.
- [4] S. Schori, L. Heiniger, T. Raitz Novais, R. Buntschu, M. Höckel, « Projekt OptiQ, Bericht WP 5, Zielnetzimpedanz », BFH, 2020.
- [5] L. Heiniger, « Projekt OptiQ, WP 5, PQ-Index, Berücksichtigung der Entwicklung der Spannungsqualität in der Zielnetzplanung », BFH, 2020.
- [6] Haute école spécialisée bernoise, « Projekt QuVert », bfh.ch/de/forschung/forschungsbereiche/bfh-zentrum-energiespeicherung/projekte
- [7] T. Raitz Novais, « Projekt OptiQ, WP 5, LastprofilTool ES 2050: Tool zur Beurteilung der zielorientierten Netzplanung auf Basis der Energiestrategie 2050 », 2020.
- [8] D. Roggo, L. Capponi, F. Decorvet, C. Pellodi, « Remigate: Reduction of electromagnetic interferences in smart grid applications: Site tests and assessment », BFE, 2018.

Lien

→ Rapport final et rapports des lots de travaux 1 à 5. bfh.ch/de/forschung/forschungsbereiche/bfh-zentrum-energiespeicherung/projekte

Auteurs

Stefan Schori est managing co-director et responsable du groupe Réseaux électriques au Centre BFH Stockage d'énergie.

→ Haute école spécialisée bernoise BFH, 2503 Bienne
→ stefan.schori@bfh.ch

Michael Höckel est professeur de systèmes énergétiques et responsable d'un large éventail de domaines de recherche.

→ michael.hoeckel@bfh.ch

Les auteurs tiennent tout particulièrement à remercier l'OFEN, Innosuisse et les partenaires du projet que sont la BFH, la HES-SO Valais-Wallis, AEW Energie AG, BKW Energie SA, Energie Service Biel/Bienne, Energie Thun AG, EWZ, Repower AG, les Services industriels de Genève ainsi que Schaffner International AG.

Avec le soutien de la Suva

Adhérer à la
Charte: [charte-
securite.ch](http://charte-securite.ch)

Ma promesse: dans notre entreprise, la sécurité n'est pas négociable.

Linus Gähwiler, responsable du département technique du bâtiment et
membre de la direction, CKW

La vie est plus belle sans accident!

Les membres de la Charte de la sécurité, par leur signature, adhèrent sans compromis aux mesures de sécurité prévues et mettent activement en œuvre les règles vitales ou leurs propres mesures de sécurité. Ils veillent ainsi à améliorer la sécurité au travail et l'économicité au sein de leurs entreprises. Adhérez vous aussi, en ligne, à la Charte de la sécurité: www.charte-securite.ch

CHARTE
STOP EN CAS DE DANGER / SÉCURISER / REPRENDRE LE TRAVAIL