

dossier.

Hawaii als Energieelabor

Technische Entwicklungen | Wenn die Sonne in Hawaii untergeht, nimmt die Leistung der PV-Anlagen ab und Batteriespeicher übernehmen die Stromversorgung. Aber wie können solche nachhaltigen Energiesysteme stabilisiert werden?

Hawaï, un vrai laboratoire

Développements techniques | À Hawaï, au coucher du soleil, alors que la production des installations photovoltaïques diminue, les batteries prennent le relais pour alimenter le réseau électrique. Comment stabiliser de tels systèmes énergétiques durables ?



Bild / Figure: Mat Hayward

BRI-MATHIAS HODGE

Im Vergleich zum Rest der Vereinigten Staaten hatte Hawaii schon immer hohe Stromkosten, da der Bundesstaat das für den Betrieb seiner Kraftwerke benötigte Erdöl über den Pazifik importieren muss. Dies führte dazu, dass erneuerbare Energiequellen wie Windkraft und Photovoltaik in Hawaii früher als an anderen Standorten wirtschaftlich wurden. Auch die Legislative des Bundesstaates Hawaii hat vorausschauend gehandelt und 2001 den ersten «Renewable Portfolio Standard» der Vereinigten Staaten verabschiedet. Dieser schreibt bis 2045 eine hundertprozentige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien vor.

Das Stromnetz Hawaiis besteht aus mehreren separaten Stromsystemen, denn jede Insel verfügt über ein eigenes Netz. Die Kosten für die Verbindung der Inseln über Hunderte von Kilometern mit Unterwasserkabeln wären nämlich zu hoch. Jede Insel steht deshalb vor eigenen Herausforderungen, vom bergigen Vulkangebiet der «Big Island» (Hawaii) bis zur höheren Bevölkerungsdichte auf Oahu, wo sich die Hauptstadt Honolulu befindet. Allen gemeinsam ist jedoch die Herausforderung, dass sie ein Labor sind, in dem eine 100% erneuerbare Stromversorgung erforscht wird. Die zentrale Frage: die Erfindung eines neuen Paradigmas für die Stabilität von Energiesystemen.

Traditionell wurden Stromversorgungssysteme von grossen Synchrongeneratoren gespeist. Auf den Eigenschaften dieser rotierenden Maschinen basierte das Stabilitätsparadigma des Stromnetzes. Synchrongeneratoren, wie sie in Erdgas-, Kohle- und Kernkraftwerken zum Einsatz kommen, sind für die Erzeugung von Wechselstrom (AC) ausgelegt, der dann über grosse Entfernungen transportiert wird. Erneuerbare Energiequellen wie Windkraft, Solarnergie und Batteriespeicher sind für die Erzeugung von Gleichstrom (DC) ausgelegt und verändern das Stabilitätsparadigma des Stromnetzes. Diese Stromquellen sind über Wechselrichter mit dem Wechselstromnetz verbunden. Diese Umwandlung hat weitreichende Auswirkungen auf Energieversorger, die die Stromversorgung aufrechterhalten wollen.

Die dezentrale Einspeisung nimmt zu

Auf den drei grössten Inseln (Oahu, Maui und Hawaii) bezieht Hawaii derzeit 30% bis 60% seines Stroms aus erneuerbaren Energiequellen. Dies sind nicht nur Wind und Sonne, sondern auch Biomasse und Geothermie. Etwa 20% des gesamten Stroms werden aus dezentralen Energiequellen (Distributed Energy Resources, DERs) bezogen, hauptsächlich aus Solaranlagen auf Dächern. Diese Anlagen sind seit Jahren bei Hausbesitzern beliebt, aber ihr Wachstum wurde in den letzten Jahren aufgrund neuer Anforderungen an die Netzanbindung gebremst, denn sie haben die Betriebsweise der Verteilsysteme der Hawaiian Electric Company erheblich verändert. Früher war die Stromerzeugung über grosse Kraftwerke (im MW-Bereich) an Hochspannungsnetze angeschlossen, statt in kleineren Mengen (im kW-Bereich) an Niederspannungsnetze in Kundennähe. Das EVU hat deshalb weniger Transparenz und Kontrolle über diese dezentralen Erzeugungsressour-

Par rapport au reste des États-Unis, Hawaï a toujours eu des coûts d'électricité élevés, cet État insulaire étant obligé d'importer le pétrole nécessaire au fonctionnement de ses centrales électriques via l'océan Pacifique. La rentabilisation de l'exploitation des énergies renouvelables telles que les énergies éolienne et photovoltaïque (PV) y a donc été plus précoce qu'à d'autres endroits. Le pouvoir législatif de l'État d'Hawaï a d'ailleurs fait preuve de clairvoyance en adoptant en 2001 le premier «Renewable Portfolio Standard» des États-Unis. Celui-ci stipule que d'ici 2045, toute l'électricité devra y être produite à partir d'énergies renouvelables.

Le réseau électrique d'Hawaï est composé de plusieurs systèmes électriques distincts, chaque île disposant de son propre réseau. Les coûts pour une connexion des îles à l'aide de câbles sous-marins sur des centaines de kilomètres seraient trop élevés. Chaque île est donc confrontée à ses propres défis, qu'ils soient liés à la région volcanique montagneuse de «Big Island» (Hawaï) ou à la densité de population plus élevée d'Oahu, où se trouve la capitale, Honolulu. Toutes ont cependant en commun le fait de constituer un laboratoire où l'on étudie un approvisionnement électrique reposant à 100% sur des sources d'énergie renouvelables. La question essentielle: l'invention d'un nouveau paradigme pour la stabilité des systèmes énergétiques.

Traditionnellement, les systèmes d'approvisionnement électrique étaient alimentés par de grands générateurs synchrones. La stabilité du réseau électrique reposait donc sur les propriétés de ces machines rotatives. Or, les générateurs synchrones, tels que ceux utilisés dans les centrales nucléaires, au gaz naturel et au charbon, sont conçus pour produire du courant alternatif (AC), qui est ensuite transporté sur de grandes distances. Les sources d'énergie renouvelables telles que l'éolien, le PV et les systèmes de stockage par batteries sont, elles, conçues pour produire du courant continu (DC) et modifient donc le paradigme en termes de stabilité du réseau électrique. Ces sources d'électricité sont connectées au réseau AC via des onduleurs. Cette conversion du courant DC en courant AC a des conséquences considérables pour les fournisseurs d'énergie, qui doivent maintenir l'approvisionnement en électricité.

L'injection décentralisée gagne du terrain

Sur ses trois plus grandes îles (Oahu, Maui et Hawaï), Hawaï produit actuellement 30 à 60% de son électricité à partir de sources d'énergie renouvelables telles que le vent et le soleil, mais aussi la biomasse et la géothermie. Environ 20% de l'électricité provient de sources d'énergie décentralisées (Distributed Energy Resources, DER), principalement d'installations PV réalisées en toitures. Bien que populaires auprès des propriétaires immobiliers depuis des années, la progression de ces installations a été freinée ces dernières années en raison de nouvelles exigences en matière de raccordement au réseau, ces installations ayant considérablement modifié le fonctionne-



Das Stromnetz stabilisieren

Der Kapolei-Energiespeicher auf Oahu mit einer Leistung von 185 MW und 565 MWh Speichervermögen.

Stabiliser le réseau électrique

Le système de stockage d'énergie Kapolei, sur l'île d'Oahu, d'une puissance de 185 MW et d'une capacité de stockage de 565 MWh.

cen, was die Aufgabe, Stromerzeugung und -nachfrage stets aufeinander abzustimmen, erschwert. Hawaiian Electric schätzt, dass allein auf Oahu über 78 000 PV-Anlagen installiert sind, wobei 43 % der Einfamilienhäuser über eine Solaranlage auf dem Dach verfügen.

In den letzten Jahren hat die Installation von hybriden PV-Batterie-Kraftwerken zugenommen. Das grösste davon ist das Kuihelani Solar+Storage-Kraftwerk auf Maui, das den kommerziellen Betrieb vor einem Jahr aufgenommen hat. Es verfügt über eine Solarleistung von 60 MW und ein 240-MWh-Lithium-Ionen-Speichersystem.

Eine weitere Schwierigkeit ist die Variabilität und Unsicherheit erneuerbarer Energiequellen. Sie treibt den Bau dieser neuen Hybridkraftwerke voran. Selbst im Paradies scheint nicht immer die Sonne: In Hawaii produziert eine PV-Anlage durchschnittlich nur etwa 20 % ihrer maximalen Leistung über das gesamte Jahr; das Stromnetz muss oft auf andere Energiequellen oder zunehmend auf Batterien zurückgreifen. Umgekehrt bedeutet dies auch, dass es Zeiten gibt, in denen zu viel Solarenergie zur Verfügung steht, nämlich um die Mittagszeit. Dies führt zur ungewöhnlichen Situation, dass Solarenergie im hawaiianischen System zwar nur etwa 20 % der jährlichen Strommenge erzeugt, aber zu bestimmten Zeiten mehr als 100 % produzieren könnte. Genau diese Zeiten sind aus Sicht der Stabilität kritisch.

ment des systèmes de distribution de la Hawaiian Electric Company. Auparavant, la production d'électricité était raccordée aux réseaux haute tension via de grandes centrales électriques (de l'ordre du MW), plutôt qu'en plus faibles quantités (de l'ordre du kW) aux réseaux basse tension, à proximité des clients. Le fournisseur d'électricité a donc moins de visibilité et de contrôle sur ces sources de production décentralisées, ce qui complique le maintien permanent de l'équilibre entre production et demande d'électricité. Hawaiian Electric estime qu'il existe plus de 78 000 installations PV rien qu'à Oahu, 43 % des toits des maisons individuelles en étant équipés.

Ces dernières années, l'installation de centrales hybrides PV/batteries a augmenté. La plus grande est la centrale Kuihelani Solar+Storage sur l'île de Maui, dont la mise en service commerciale a été réalisée il y a un an. Elle dispose d'une puissance PV de 60 MW et d'un système de stockage lithium-ion de 240 MWh. La construction de telles centrales est motivée par la variabilité des sources d'énergie renouvelables et l'incertitude qui y est liée. Même au paradis, le soleil ne brille pas toujours: à Hawaï, une installation PV produit en moyenne seulement 20 % de sa puissance maximale sur l'ensemble de l'année; le réseau électrique doit donc souvent recourir à d'autres sources d'énergie ou, de plus en plus, à des batteries. À l'inverse, cela signifie également qu'il y a des moments où



Sonnenenergie nutzen

2009 weihte Sopogy das 2-MW-Mikro-CSP-Solarthermiekraftwerk auf der Insel Holaniku ein.

Utiliser l'énergie solaire

En 2009, Sopogy a inauguré cette microcentrale solaire thermique CSP (Concentrated Solar Power) de 2 MW sur l'île Holaniku.

Für eine zuverlässige Stromversorgung müssen Energiesysteme so ausgelegt sein, dass sie unerwarteten Ereignissen wie Geräteausfälle und Wetterbedingungen standhalten. Daher ist der Umgang mit potenziellen Notfällen ein wichtiger Aspekt der Planung und des Betriebs eines Stromversorgungssystems. Um dies in grossem Massstab zu erreichen, müssen wichtige Systemmesswerte, wie Frequenz und Spannung, in relativ engen Bereichen gehalten werden. Wenn sie diese Bereiche verlassen, werden Schutzvorrichtungen aktiviert, um einzelne Geräte zu schützen oder die Ausbreitung von Problemen zu verhindern.

Neue Wege zur Netzstabilität

Die Frequenz in Wechselstromsystemen fungiert als Signal, das widerspiegelt, wie gut der Netzbetreiber die Erzeugung und Last ausgleicht. Bei zu hoher Stromerzeugung steigt die Frequenz, bei zu hoher Nachfrage sinkt sie. Grossflächige Schutzsysteme nutzen dieses Frequenzsignal, um zu entscheiden, wann Probleme verhindert werden müssen. Wenn die Frequenz zu schnell sinkt, schaltet das System bestimmte Lasten ab, um die Synchronisation der Generatoren im System zu schützen und einen Ausfall des gesamten Netzes zu verhindern. Eine physikalische Eigenschaft von Synchrongeneratoren, die einen Frequenzabfall verhindert, ist die Trägheit des Rotors. Dieser kann über 100 t wiegen und liefert daher viel Energie, um zum Stillstand zu kommen.

Da weltweit immer mehr wechselrichterbasierte Generatoren in Betrieb genommen werden, um fossil betriebene Synchrongeneratoren zu ersetzen, haben Bedenken zum

l'énergie solaire disponible est excessive, notamment à midi. Cela mène à une situation inhabituelle dans laquelle, même si l'énergie solaire ne représente qu'environ 20 % de la quantité d'électricité produite annuellement dans le système hawaïen, elle pourrait produire plus que la consommation d'électricité à certains moments. Ce sont justement ces derniers qui sont critiques en termes de stabilité.

Pour garantir un approvisionnement fiable en électricité, les systèmes énergétiques doivent être conçus de manière à résister à des événements imprévus tels que des pannes de matériel et des conditions météorologiques défavorables. La gestion des situations d'urgence potentielles constitue donc un aspect important de la planification et de l'exploitation d'un système d'approvisionnement en électricité. Pour y parvenir à grande échelle, les paramètres importants du système, tels que la fréquence et la tension, doivent être maintenus dans des plages relativement étroites. Lorsqu'elles en sortent, les dispositifs de protection sont activés afin de protéger les équipements individuels ou d'empêcher la propagation des problèmes.

De nouvelles voies vers la stabilité du réseau

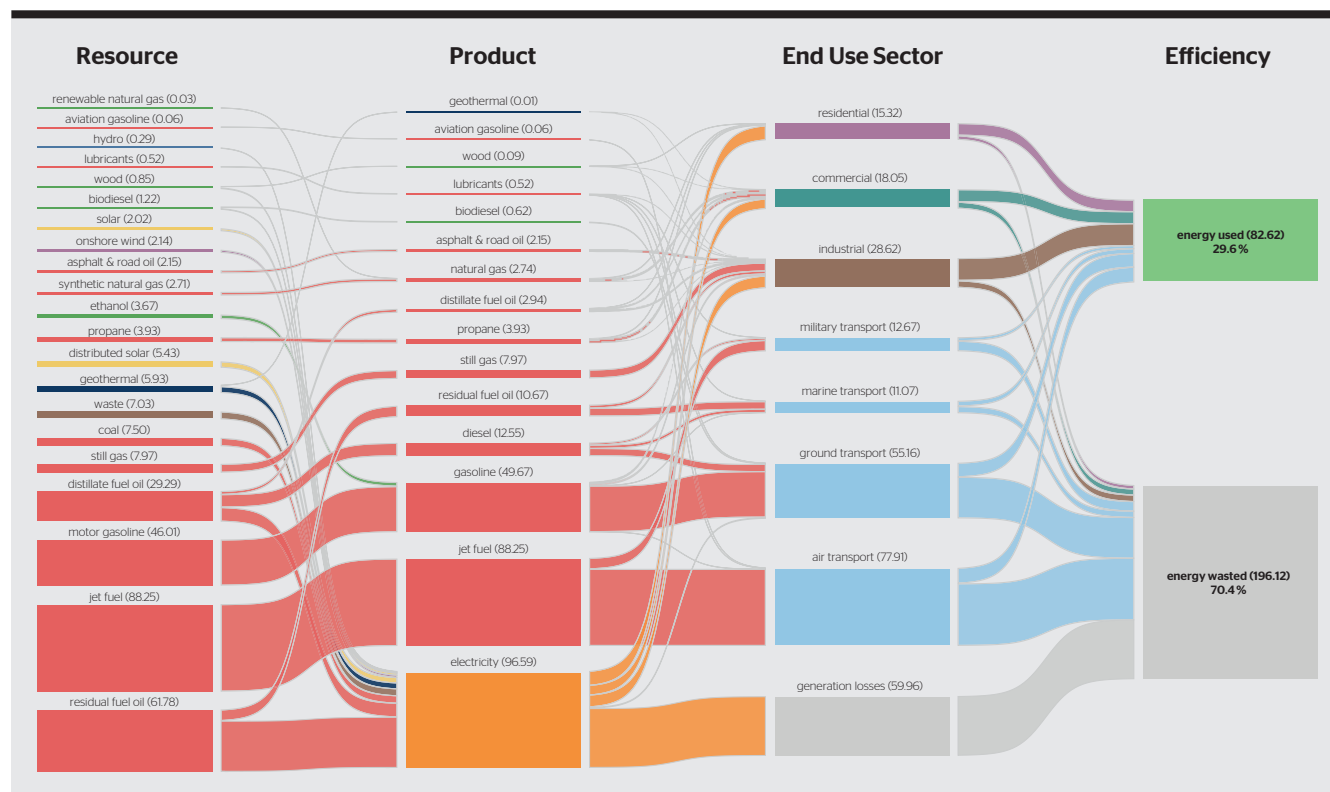
Dans les systèmes à courant alternatif, la fréquence sert de signal reflétant la capacité de l'opérateur du réseau à équilibrer la production et la charge. La fréquence augmente si la production d'électricité est trop élevée, et elle diminue si la demande est trop élevée. Les systèmes de protection à grande échelle utilisent ce signal de fréquence pour déterminer quand il faut prévenir les pro-

Rückgang der Trägheit zur Unterstützung der Netzstabilität zu verstärkten Forschungsanstrengungen und Investitionen geführt. Der Grund: Fast alle bisher in grossen Stromnetzen installierten Wechselrichter haben eine sogenannte netzfolgende Regelung. Diese Art von Regler nutzt Messungen vom Netzanschlusspunkt, um das Verhalten des Netzes zu ermitteln und dieses nachzuahmen. Netzfolgende Generatoren erzeugen im Gegensatz zu Synchrongeneratoren nicht selbstständig eine sinusförmige Wechselspannung. Die netzfolgende Regelung ist bei relativ geringen momentanen Leistungen der Wechselrichter-generatoren eine praktikable Strategie, aber ein grosses Stromnetz könnte nicht nur mit netzfolgenden Wechselrichtern betrieben werden, da es kein Signal gäbe, dem sie folgen könnten. Die Grenzen für die Anzahl der netzfolgenden Geräte, die ein System gleichzeitig aufnehmen kann, variieren je nach System und Erzeugungsmix. Als nützlicher Richtwert gilt jedoch, dass das Stromnetz derzeit zu jedem Zeitpunkt bis zu 75% der Erzeugung aus solchen Wechselrichtern zulässt.

Die Insel Maui ist ein interessantes Fallbeispiel, da dort bereits mehr als 95% der Wechselrichter netzfolgend betrieben werden. Wie funktioniert das? Indem die Teile des Synchrongenerators, die zur Unterstützung des Netzes beitragen können (der Generator), vom fossil betriebenen Antrieb abgekoppelt werden. Durch den Einbau einer Kuppelung können diese Kraftwerke einerseits bei Bedarf mit

blèmes. Si la fréquence baisse trop rapidement, le système coupe certaines charges afin de protéger la synchronisation des générateurs du système et d'éviter une panne de l'ensemble du réseau. Une caractéristique physique des générateurs synchrones, qui empêche une chute de fréquence, est l'inertie du rotor. Celui-ci peut peser plus de 100 t et fournit donc beaucoup d'énergie pour s'arrêter.

Étant donné que de plus en plus de générateurs à onduleurs sont mis en service dans le monde entier pour remplacer les générateurs synchrones à combustible fossile, les inquiétudes relatives au recul de l'inertie pour le soutien de la stabilité du réseau ont mené à des investissements ainsi qu'à un renforcement des efforts réalisés dans la recherche. La raison : presque tous les onduleurs installés jusqu'à présent dans les grands réseaux électriques sont équipés d'un système de régulation suivant l'état du réseau. Ce type de régulateur utilise les mesures effectuées au point de raccordement au réseau pour déterminer le comportement du réseau et l'imiter. Contrairement aux générateurs synchrones, ces générateurs ne produisent pas eux-mêmes une tension alternative sinusoïdale. La régulation suivant l'état du réseau constitue une stratégie viable lorsque les puissances instantanées des générateurs à onduleurs sont relativement faibles, mais un grand réseau électrique ne pourrait pas fonctionner uniquement avec des onduleurs en suivi du réseau, car il n'y aurait aucun signal à suivre. Le nombre maximal de dispositifs



Energieflüsse in Hawaii im Jahr 2022 (in TBtu, British thermal units). Das einzige Kohlekraftwerk wurde im September 2022 stillgelegt. Flux énergétique (en TBtu, British thermal units) dans l'État d'Hawaï en 2022. La seule centrale à charbon a été mise hors service en septembre 2022.

Bild | Figure: Hawaii State Energy Office

fossilen Brennstoffen betrieben werden. Andererseits, wenn erneuerbare Energien im Überfluss vorhanden sind, wird der Synchrongenerator im Wesentlichen in einen sehr grossen Motor umgewandelt. Dieser kann Wirkleistung aus dem Netz aufnehmen und in Blindleistung umwandeln, um die Spannung zu stützen und das Netz zusätzlich durch Trägheit zu stabilisieren. Die Umrüstung ausgemusterter fossiler Kraftwerke auf Synchrongeneratoren ist eine der kostengünstigsten Massnahmen der Netzbetreiber weltweit, um die Stabilität des Stromnetzes der Zukunft zu gewährleisten.

Netzbildende Wechselrichter als Lösung

Eine weitere vielversprechende Lösung zur Erhöhung der Stabilität wird auf der kleineren Insel Kauai demonstriert, die etwa 70 000 Einwohner und 30 000 Touristen beherbergt. Hier ist ein Hybridkraftwerk, bestehend aus einer 13-MW-Solaranlage und 52-MWh-Batterien, mit einer neuen, netzbildenden Steuerungssoftware für die Wechselrichter ausgestattet. Die Anlage wird derzeit einem Stress-Test unterzogen, wenn andere Generatoren ausfallen. Netzbildende Wechselrichter nutzen fortschrittliche Regelalgorithmen und schnelle Leistungselektronik, um einen Teil der Spannungs- und Frequenzunterstützung zu liefern, die traditionell von Synchrongeneratoren bereitgestellt wird. Entscheidend ist, dass sie unabhängig voneinander eine sinusförmige Spannungsform bilden, sodass netzfolgende Wechselrichter ihrer Führung folgen können. Diese vielversprechende Technologie wird seit Jahrzehnten in Mikronetzen eingesetzt, aber diese kleinen Systeme ermöglichen eine direkte, schnelle Kommunikation, die in kontinentgrossen Stromnetzen nicht möglich ist. Für grosse Stromnetze müssen diese Wechselrichter autonom arbeiten können, um die Netzstabilität zu gewährleisten. Kauai ist derzeit eines der grössten Stromnetze, in denen diese Technologie getestet wird. Sie wird bald auch auf den anderen hawaiianischen Inseln eingeführt.

Seit zwei Jahrzehnten ist Hawaii in den USA führend beim Übergang zu nachhaltigeren Stromsystemen. Die Erfahrungen mit diesen relativ kleinen Netzen haben bereits technische und regulatorische Entscheidungen in anderen US-Bundesstaaten und Ländern beeinflusst. Diese paradisische Inselgruppe ist auf diese Weise ein Labor, um die Welt zu 100 % erneuerbaren Stromsystemen zu führen.

Literatur | Littérature complémentaire

- Hawaiian Electric's Integrated Grid Plan, Mai 2023.
hawaiipowered.com/igpreport/IGP-Report_Final.pdf
- Rick Wallace Kenyon et al., «Stability and control of power systems with high penetrations of inverter-based resources: An accessible review of current knowledge and open questions», *Solar Energy*, 2020. doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.053
- Benjamin Kroposki, Andy Hoke, «A Path to 100 Percent Renewable Energy», *IEEE Spectrum*, May 2024. doi.org/10.1109/MSPEC.2024.10523014



Autor | Auteur

Prof. Dr. **Bri-Mathias Hodge** ist Professor an der University of Colorado in Boulder | est professeur à la University of Colorado, à Boulder.
→ University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA
→ brimathias.hodge@colorado.edu

en suivi du réseau qu'un système peut accueillir simultanément varie en fonction du système et du mix de production. Toutefois, on considère généralement que le réseau électrique peut actuellement accepter à tout moment jusqu'à 75 % de production injectée via de tels onduleurs.

L'île de Maui constitue un cas intéressant, car plus de 95 % des onduleurs y sont déjà exploités en suivant l'état du réseau. Comment cela fonctionne-t-il? En découplant les parties du générateur synchrone qui peuvent contribuer à soutenir le réseau (le générateur) de l'entraînement à combustible fossile. Grâce à l'installation d'un système d'accouplement, ces centrales électriques peuvent, d'une part, être alimentées par des combustibles fossiles si nécessaire. D'autre part, lorsque les énergies renouvelables sont disponibles en abondance, le générateur synchrone est essentiellement transformé en un très gros moteur. Celui-ci peut absorber de la puissance active du réseau et la convertir en puissance réactive afin de maintenir la tension et stabiliser le réseau via l'inertie. La conversion des centrales fossiles mises hors service en générateurs synchrones constitue l'une des mesures pour garantir la stabilité du réseau électrique de demain les plus rentables pour les opérateurs de réseau à travers le monde.

Des onduleurs formant le réseau

Une autre solution prometteuse pour accroître la stabilité du réseau est mise en œuvre sur la petite île de Kauai, qui compte environ 70 000 habitants et 30 000 touristes. Une centrale hybride, composée d'une installation PV de 13 MW et de batteries d'une capacité totale de 52 MWh, y est équipée d'un nouveau logiciel de contrôle permettant aux onduleurs de former le réseau. Cette installation est actuellement soumise à un test de résistance en cas de défaillance d'autres générateurs. Les onduleurs formant le réseau utilisent des algorithmes de régulation avancés et une électronique de puissance rapide pour fournir une partie du soutien de la tension et de la fréquence traditionnellement assuré par des générateurs synchrones. Il est essentiel qu'ils forment indépendamment les uns des autres une tension sinusoïdale afin que les onduleurs en suivi du réseau puissent suivre leur signal. Cette technologie prometteuse est utilisée depuis des décennies dans les microréseaux, mais ces petits systèmes permettent une communication directe et rapide qui n'est pas possible dans les réseaux électriques à l'échelle d'un continent. Pour les grands réseaux électriques, ces onduleurs doivent donc pouvoir fonctionner de manière autonome pour garantir la stabilité du réseau. Kauai constitue actuellement l'un des plus grands réseaux électriques où cette technologie est testée. Celle-ci sera bientôt introduite sur les autres îles hawaïennes.

Depuis deux décennies, Hawaï se situe à la pointe de la transition vers des systèmes électriques plus durables. L'expérience acquise avec ces réseaux relativement petits a déjà influencé des décisions techniques et réglementaires dans d'autres États américains ainsi que dans d'autres pays. Cet archipel paradisiaque constitue ainsi un vrai laboratoire, dont l'objectif est de mener le monde vers des systèmes électriques 100 % renouvelables.