

# Offgrid 2.0

**Fuel Save Controller:** Auch im Inselnetz bieten sich der Photovoltaik großartige neue Chancen. Die Kombination mit Dieselgeneratoren senkt unter anderem die Kosten für den Kraftstoffverbrauch. Um mit einem hohen Solarstromanteil die Versorgung und Netzstabilität zu garantieren, gibt es inzwischen neue Regelungsgeräte.

Foto: Donauer Solartechnik



Solardach des Krankenhauses St. Damien im haitianischen Tabarre. Hier übernimmt der von Donauer entwickelte D:Hybrid die Steuerung der 85-KWp-Solaranlage, die parallel zu einem Dieselgenerator mit 200 kVA geschaltet ist. Der Jahresstromverbrauch beträgt circa 788.400 kWh. Das Gerät kann mit allen Wechselrichtern arbeiten, die sich über entsprechende Kommunikationsschnittstellen steuern lassen. Die Photovoltaik trägt damit 18 Prozent der Stromerzeugung des Krankenhauses, wodurch im Schnitt pro Tag 106 Liter Diesel gespart werden.

Dieselgeneratoren sind weit verbreitet. In Inselnetzen sind sie oft das Herzstück, bei netzgebundenen Verbrauchern dienen sie der Notstromerzeugung, die nicht nur selten, sondern in manchen Ländern bis zu 16 Stunden am Tag läuft. Typischerweise stehen die Dieselgeneratoren in Ländern, in denen die Bevölkerung stark wächst und deren Stromverbrauch steigt. Das ist teuer, mit steigender Tendenz. Es gibt also Grund genug, sich nach Alternativen umzusehen.

Der Charme der Photovoltaik ist, dass sie parallel installiert werden kann. Die Kosten von Photovoltaikanlagen haben sich in den letzten drei Jahren halbiert. Sie sind daher jetzt konkurrenzfähig. Der Preis pro Kilowattstunde Stromerzeugung mit Dieselmotoren hängt im Wesentlichen von den laufenden Kosten der Anlage ab (Dieselkraftstoff und Wartung) und in geringerem Maße von den Investitionskosten. In der Kombination mit Photovoltaikanlagen kann die Anzahl der Betriebsstunden dieser Aggregate erheblich gesenkt werden. Pro Kilowatt-

## Das Wichtigste in Kürze

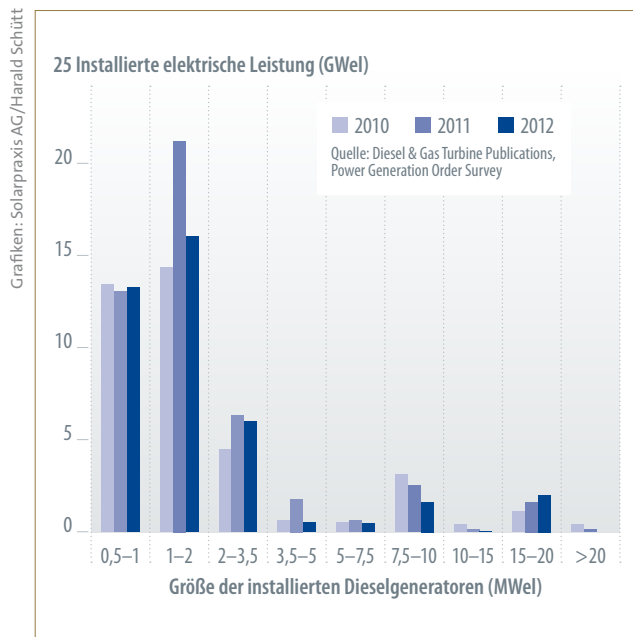
Der jährliche Absatz von Dieselgeneratoren für industrielle Anwendungen liegt zwischen 40 und 50 GWel.

Die durchschnittlichen Kosten für Dieselkraftstoff zur Stromerzeugung in Industrieanlagen betragen 25 bis 35 US-Cent pro Kilowattstunde.

Es ist technisch möglich, bis zu 30 Prozent Dieselkraftstoff durch die Integration von PV-Anlagen ohne Batterien in Dieselerzeugungssysteme zu sparen, ohne die Versorgung oder die Netzstabilität zu gefährden.

Durch die Einbindung von Speichern kann das Hybridsystem künftig noch weiter ausgebaut werden, sobald sich die Investitionskosten verringern und die Lebensdauer sich verlängert. Die Integration von Batterien würde die Obergrenze der Penetrationsrate der Photovoltaik in Inselanlagen zur Stromerzeugung beseitigen.

## Revolution im Netz



Grafik 1: Der Großteil des Marktes (zwischen 80 und 90 Prozent) für Dieselgeneratoren für industrielle Anwendungen bewegt sich im Leistungsbereich zwischen 500 kVA und 3,5 MVA. In diesem Bereich setzen die ersten Hersteller von PV-Diesel-Lösungen mit ihren Angeboten an.

stunde Strom kostet der Brennstoff zwischen 25 und 35 Cent. Da die Betriebskosten von Photovoltaikanlagen verschwindend gering sind, können somit die Gesamtkosten des Systems verringert werden. Der Fokus beim Projektieren von PV-Diesel-Hybridssystemen liegt also in der Minimierung der Betriebszeit der Dieselgeneratoren. Gleichzeitig soll dabei die Stabilität der Stromversorgung und der Lasten garantiert sein. Daher muss sichergestellt werden, dass die Generatoren in ihrem Arbeitsbereich laufen.

### Riesiges Marktpotenzial

Der Markt kann sehr groß werden. Der weltweite Absatz von Dieselgeneratoren war in den letzten drei Jahren zwar sehr schwankend, aber auf hohem Niveau. Von 38 Gigawatt im Jahr 2010 stieg er auf fast 48 Gigawatt 2011, um dann 2012 auf 40 Gigawatt zu sinken (Diesel & Gas Turbine Publications, 36th Power Generation Order Survey). Davon entfielen mehr als 50 Prozent auf netzferne Industrieanlagen oder Netze mit häufigen Versorgungsausfällen.

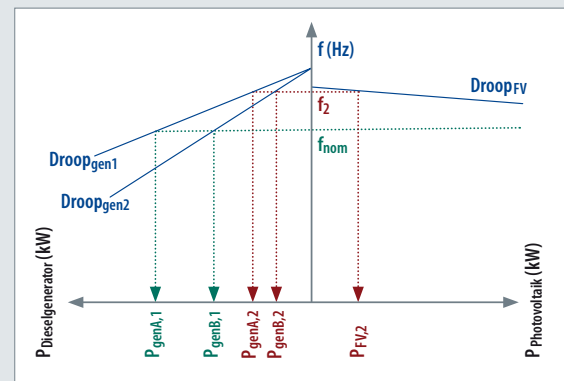
Der wichtigste Faktor für die Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Diesel-Hybridssystemen ist der Kraftstoffpreis, den der Anlagenbetreiber bezahlt und der von der jeweiligen Steuer, von Subventionen je nach Vertriebsart (Einzel- oder Großhandel) sowie von anderen Faktoren abhängig ist. Bei seiner Entscheidung zur Investition stützt sich der Betreiber in der Regel auf den Zeitraum der Kapitalrendite (ROI). Eine Amortisationszeit zwischen drei und sechs Jahren macht die Investition recht attraktiv. Dies ist ab einer Leistung des Dieselgenerators von mehreren hundert kVA möglich.

Ein solches Hybrid-Inselsystem benötigt eine Einheit, die das Wechselstromnetz aufbaut. Daran können weitere Generato-

## Regelmechanismus

Funktionsweise der Regelung im Fuel Save Controller bei Dieselgeneratoren, die mit lastabhängiger Frequenz arbeiten: In der Abbildung sieht man die Kennlinien (Droop) von zwei parallel geschalteten Dieselgeneratoren und einen Solarwechselrichter. Die Leistung der Generatoren ist frequenzabhängig, wobei die Steigung beim leistungsstärkeren Generator weniger ausgeprägt ist als beim leistungsschwächeren. Bei der Nennfrequenz des Systems (grüne Linien) verteilt sich so die Last auf die Generatoren proportional zu ihrer Nennleistung, wobei der größere Generator die Leistung  $P_{genA,1}$  liefert und der zweite Generator  $P_{genB,1}$ . In diesem Fall können die Solarwechselrichter ihre gesamte Leistung einspeisen (die grüne Linie überschneidet sich nicht mit der Kennlinie des Solargenerators). Wenn der Verbrauch zurückgeht, steigt die Frequenz des Systems von  $f_{nom}$  auf  $f_2$ , da mehr Energie erzeugt als verbraucht wird (rote Linien). Um Verbrauch und Erzeugung wieder auszugleichen, reduziert der erste Dieselgenerator seine Ausgangsleistung auf  $P_{genA,2}$  und der zweite Generator auf  $P_{genB,2}$ . Der Controller begrenzt die Ausgangsleistung des Wechselrichters gleichzeitig auf  $P_{PV,2}$ . Sollte die Ausgangsleistung des Dieselaggregats bis unter die vorgesehene Mindestlast fallen, sinkt die PV-Leistung auf null.

Arbeitet das Inselnetz nicht mit lastabhängiger Frequenz, sondern mit fester Frequenz, variiert der Controller die Kennlinien und teilt sie den Generatoren mit.



ren angeschlossen werden, indem sie sich auf das vom Dieselgenerator gestellte Wechselstromnetz in Frequenz, Spannung und Phasenlage synchronisieren. Die für das Stromnetz verantwortliche Einheit muss dafür sorgen, dass Spannung und Frequenz innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen bleiben und genauso viel Strom erzeugt wie verbraucht wird. In Hybrid-systemen könnte auch ein Zweirichtung-Wechselrichter mit Akku das Netzmanagement übernehmen. Doch das ist zurzeit noch zu teuer, ihre Lebensdauer ist relativ kurz und außerdem macht es die Systeme deutlich komplexer. Bei den meisten derzeit auf dem Markt erhältlichen Systemen soll die Integration von Batterien so lange aufgeschoben werden, bis die Kosten gesunken und diverse technische Fragen geklärt sind. So ist noch unklar, wie lang die Geräte leben, wie sich ein großer Temperaturbereich auf den Betrieb auswirkt, wie Wartung und Service in abgelegenen Gebieten organisiert werden können und wie das Recycling funktioniert. Daher wählen die meisten Hersteller derzeit Systeme, in denen ein Dieselgenerator die



Photovoltaikanlagen können die Betriebskosten von Industrieanlagen erheblich verringern, wie das Inselnetz in diesem Bergwerk in Südafrika, das SMA mit einem dafür nötigen Fuel Save Controller ausgestattet hat. Dieselgeneratorleistung 2 x 800 kVA, Photovoltaikleistung 1 MWp, Einsparung laut SMA: bis zu 450.000 Liter Diesel pro Jahr.

Netzparameter bestimmt. So muss ständig ein Stromaggregat in Betrieb sein. Gibt es zusätzliche Generatoren, werden sie entsprechend dem Verbrauch und der Photovoltaikerzeugung betrieben.

#### Durchdringungsgrad entscheidend

Wie das Zusammenspiel der Dieselgeneratoren und der Photovoltaikanlage gesteuert werden soll, hängt von dem momentanen oder dem mittleren Durchdringungsgrad der Solarenergie in einem bestimmten Zeitraum ab. Der momentane Durchdringungsgrad ist die Spitzenleistung der Photovoltaikanlage im Verhältnis zur Spitzenlast. Der mittlere Durchdringungsgrad ist die Energieerzeugung geteilt durch die verbrauchte Energie. Das Verhältnis zwischen beiden Durchdringungsgraden hängt von der zeitlichen Verteilung des Verbrauchs und den Wetterbedingungen ab. Um mittlere Durchdringungsgrade von über 20 Prozent zu erhalten,

benötigt man im Allgemeinen momentane Durchdringungsgrade von mehr als 50 Prozent.

Bei relativ niedrigen momentanen Durchdringungsgraden unter 20 Prozent ist die Einbindung der Photovoltaikanlage ziemlich einfach. Die Solarstromerzeugung kann als „negative Last“ betrachtet werden. Dann ist keine zusätzliche Steuerung nötig, da die Dieselgeneratoren automatisch ihre Leistung entsprechend drosseln, wenn weniger Leistung nachgefragt wird.

Allerdings gibt es einen Effekt, der bei steigender Photovoltaikleistung immer relevanter wird. Wenn Solarstrom in das Inselnetz fließt, können unter Umständen einige Dieselgeneratoren längere Zeit abgeschaltet werden. Dadurch verringert sich die Systemträgheit. Das wiederum erhöht die Tendenz zu Frequenzschwankungen. Daher müssen die Solarwechselrichter in solchen Systemen höhere Anforderungen erfüllen als sol-

pv magazine group und Solarpraxis laden ein:

Offgrid-Workshop: [www.pv-magazine.de/forumsolarpraxis](http://www.pv-magazine.de/forumsolarpraxis)



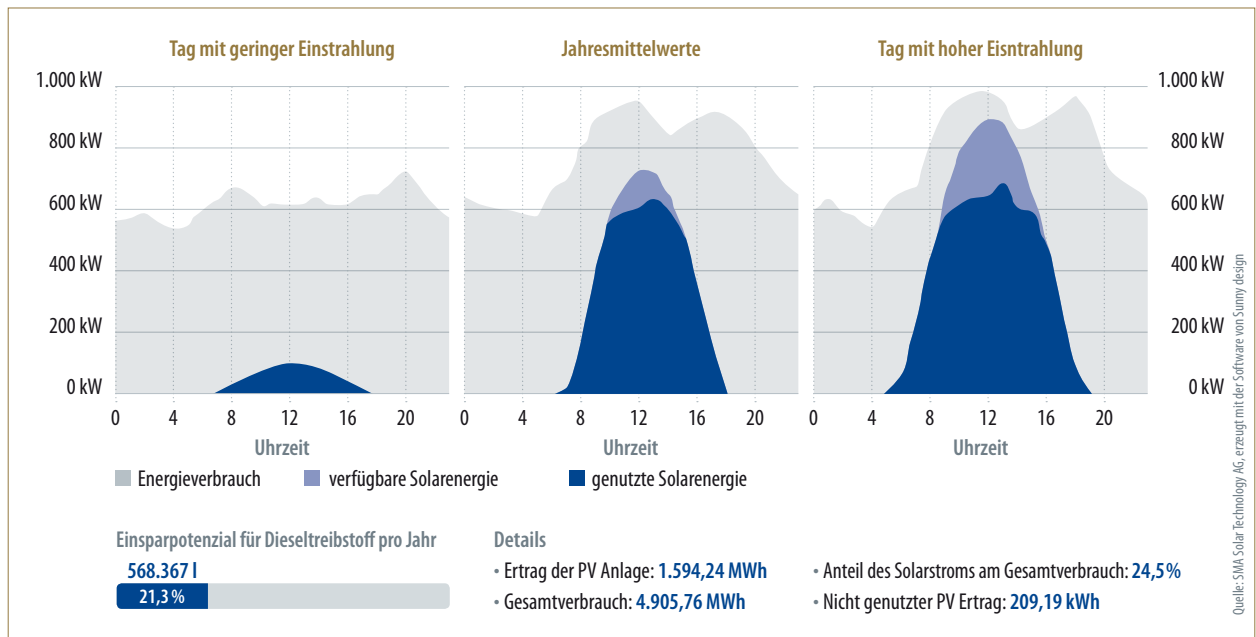
## Die neue Flexibilität in der PV-Anlagen-Gestaltung

Delta präsentiert den neuen SOLIVIA 10 TL mit erweitertem Eingangsspannungsbereich und einem Spitzenwirkungsgrad von 98,3 %.

Die fortschrittliche 2-MPP-Tracker-Lösung ermöglicht eine asymmetrische Auslegung der PV-Anlage und bietet damit mehr Flexibilität zum Erreichen eines höheren Ertrags, insbesondere bei Ost-/Westdach-Installationen.

[www.solar-inverter.com](http://www.solar-inverter.com)

## Revolution im Netz



Grafik 2: Simulation der Betriebsparameter eines Hybridsystems, bestehend aus einem 1,45-Megawatt-Dieselmotor und einer Solaranlage mit einem Megawatt Nennleistung für ein Bergwerk in Chile. Man kann beobachten, wie der Controller die Ausgangsleistung der Wechselrichter reduziert, um das System stabil zu halten und einen optimalen Betrieb der Dieselmotoren zu gewährleisten.

che in netzgekoppelten Systemen und über einen größeren Frequenz- und Spannungsbereich stabil arbeiten.

### Controller für hohen Durchdringungsgrad

Bei höheren Durchdringungsgraden als 20 Prozent (mittlerer Durchdringungsgrad) wird die Fluktuation der Solarstromerzeugung zunehmend zu einer Herausforderung, vor allem wenn man den Wunsch hat, möglichst viel des erzeugten Solarstroms so zu nutzen, dass der Dieselmotor sinkt. Die Dieselmotoren müssen sicherstellen, dass zu jedem Zeitpunkt die Produktion im Gleichgewicht zum Verbrauch ist. Wenn viel Solarstrom fließt, laufen die Dieselmotoren mit sehr niedriger Last. Dabei darf die Mindestlast nicht unterschritten werden. Außerdem sinkt der Kraftstoffverbrauch der Dieselmotoren nicht linear mit sinkendem Verbrauch. Bei niedrigeren Lasten arbeiten sie weniger effizient als bei hohen. So steigt bei einer Last des Dieselmotors von 30 Prozent der Kraftstoffverbrauch um bis zu 20 Prozent pro erzeugter Kilowattstunde im Vergleich zu einem Dieselmotor unter Volllast. Das führt außerdem zu einem größeren Motorenverschleiß und einem erhöhten Wartungsbedarf durch Ablagerungen im Abgassystem und in den Kolben, die durch unvollständige Verbrennung, Knallen in den Kolben, Kraftstoffverunreinigung und Kondensation von Wasser im Schmieröl verursacht werden.

Bei moderneren Motoren mit Common-Rail-Einspritzung, die zunehmend eingesetzt werden, ist das allerdings etwas besser als bei den Motoren mit mechanischer Einspritzung. Für solche Dieselmotoren ist es ausreichend, wenn sie immer mit mindestens 30 Prozent Last betrieben werden.

Kombiniert man die Dieselmotoren mit einer Photovoltaikanlage, muss eine zusätzliche Kontrolleinheit dafür sorgen, dass diese 30 Prozent Mindestlast eingehalten werden. Solch ein

Gerät wird zum Beispiel von SMA unter dem Namen „Fuel Save Controller“ vertrieben. Andere Hersteller haben sogenannte SPS-basierte Modelle im Angebot, die über eine Kommunikationsschnittstelle (meistens Modbus) mit Solarwechselrichtern und Dieselmotoren verbunden sind und kontinuierlich die Netzparameter (Strom/Spannung) an der Anschlussstelle der Lasten überwachen. Sowie sich die Last des Dieselmotors der Mindestlast nähert, reduziert der Controller die Ausgangsleistung der Solarwechselrichter, um die Last der Motoren über der Mindestauslastung zu halten. Die Dieselmotoren reagieren indirekt, da sie die Last abzüglich der Photovoltaikleistung versorgen.

Der Controller muss auch bei einem plötzlichen Lastabfall oder wenn eine Sicherung abschaltet, schnell reagieren. Denn wenn die Solarstromerzeugung die Last im System übersteigt, schalten die Dieselmotoren im besten Fall automatisch ab. Sollte dies aus irgendeinem Grund nicht geschehen, speist der Solarstrom den Dieselmotor, der dann als Motor arbeiten würde. Das kann irreparable Schäden am Verbrennungsmotor verursachen. Und der Controller muss also schnell genug reagieren. Sollte es nötig sein, sehr schnell zu reagieren, schaltet der Controller die Wechselrichter automatisch ab. Dies geschieht jedoch selten, meistens reicht es, die Wechselrichterleistung zu reduzieren.

Der Controller verfügt dabei über eine Logik zur Lastenoptimierung im System. Das Ziel ist, die Photovoltaikanlage nicht mehr abzuregeln als nötig. Wie das geht, hängt von der Betriebsart der Dieselmotoren ab. Diese können mit einer lastabhängigen Frequenz/Umdrehungszahl arbeiten. Das heißt, wenn die Last hoch ist, sinkt die Frequenz im System. Oder sie können mit einer festen Umdrehungszahl bei einer Nennfrequenz arbeiten. Das kommt am häufigsten vor, da Ver-

braucher in der Regel keine Frequenzschwankungen wollen. Im ersten Fall kann man den Droop-Mechanismus verwenden, um die Wechselrichterlast zu verringern. Unabhängig davon, ob bei der Lastenaufteilung im System ein taktsynchroner oder ein Droop-Mechanismus benutzt wird, sollten die Inverter bei der Erhöhung der PV-Penetrationsrate ihre Ausgangsleistung regeln/begrenzen können, sei es durch Kommunikationsschnittstellen oder als Reaktion auf Frequenzschwankungen im Netz.

### An Regelleistung denken

Die Leistungsbegrenzungskapazität der Solarwechselrichter wird auch verwendet, um im System genug Regelleistung zur Verfügung zu haben. Diese ist unabdingbar, wenn das Inselnetz zuverlässig funktionieren soll. In Dieselerzeugungssystemen ist die Differenz zwischen aktueller Leistung und Maximalleistung der Generatoren schnell abrufbare Regelleistung. Eine häufige Anforderung für die Festlegung der notwendigen Regelleistung ist die sogenannte N-1-Regel. Sie besagt, dass die Versorgung beim Ausfall eines der Dieselgeneratoren aufrechterhalten ist. Das bedeutet, dass die Gesamtkapazität der Dieselgeneratoren bei einer ausgefallenen Einheit immer noch die gesamte Last decken muss. Dafür werden in der Regel ein oder mehrere Generatoren als Back-up eingesetzt. Zusätzlich wird eine Leistungsreserve eingeplant, so dass die Gesamtkapazität der Dieselgeneratoren, die gleichzeitig in Betrieb sein können, immer größer als der maximale Leistungsbedarf ist. Die Faustregel verlangt hier 110 Prozent der geschätzten Höchstlast.

Die Einbindung von Solarenergie mit ihren naturgemäßen Schwankungen erhöht den Bedarf an Regelleistung darüber hinaus. Der zusätzliche Bedarf hängt davon ab, wie schnell die Solarleistung variiert, zum Beispiel wenn eine Wolke vorbeizieht. Das hängt unter anderem von den Wetterbedingungen und der Größe der Solaranlage ab. Bisher gab es erst wenige Studien zu dem Thema. Diejenigen, die es in verschiedenen Regionen gab, kommen immerhin zu einem ähnlichen Ergebnis: Meistens fällt die Leistung innerhalb von zehn Minuten nicht unter 70 Prozent der Nennleistung. Wenn man davon ausgeht, dass zehn Minuten ausreichen, um ein zusätzliches Dieselaggregat einzuschalten und zu synchronisieren, ist ein Anteil zwischen 20 und 30 Prozent von der durchschnittlich prognostizierten AC-Nennleistung der PV-Anlage noch zu erwarten und kann deswegen als sichere Leistung berücksichtigt werden. Die nötige Regelleistung kann reduziert werden, wenn man den Solargenerator im Vergleich zur Nennleistung des Wechselrichters überdimensioniert.

Der Controller muss sicherstellen, dass immer ausreichend Regelleistung vorhanden ist. Stellt der fest, dass die freien Kapazitäten der in Betrieb befindlichen Dieselgeneratoren nicht ausreichend sind, so muss er zeitweise die Leistung der Solarwechselrichter reduzieren. Dann übersteigt die von den Dieselgeneratoren versorgte Last den Schwellenwert, ab dem ein zusätzlicher Generator aktiviert wird. Wenn der Controller jedoch feststellt, dass der Bedarf an Regelleistung durch weniger Dieselaggregate als gerade in Betrieb gedeckt werden kann, kann er eine frühere Abregelung der Photovoltaikleistung oder eine etwaige Überdimensionierung der Photovoltaikanlage nutzen, um vorübergehend die Photovoltaikleistung

zu erhöhen. Somit sinkt die von den Dieselgeneratoren getragene Last unter den Ausschaltwert, und ein Dieselgenerator schaltet aus. Wenn der Controller effizient arbeitet, begrenzt er das Starten und Herunterfahren von Dieselgeneratoren auf ein Minimum.

Bei hoher Solarstromerzeugung und niedrigem Verbrauch steigt auch das Risiko von Überspannungen im System. Bei Hybridsystemen ist die Spannungsregelung durch Bereitstellung von Blindleistung weniger effizient als bei konventionellen Stromnetzen, da die Leitungen ein niedriges Verhältnis  $X/R$  von Blind- und Wirkwiderstand haben. Der Controller überwacht daher die aktuellen Werte der verbrauchten Wirk- und Blindleistung und steuert den Solarwechselrichter bei Bedarf so, dass er Blindleistung abgibt. Das regelt die Systemspannung, und die Dieselaggregate müssen selbst nicht mehr so viel Blindleistung zur Verfügung stellen. Die Solarwechselrichter sollten sowohl induktive als auch kapazitive Blindleistung erzeugen können (bei einem Leistungsbereich von  $+0,8/-0,8$ ), um eine störungsfreie Synchronisation des Generators ans Netz zu sichern.

### Gut geeignet für Industrie mit begrenztem Netzzugang

Die Einbindung von Solaranlagen ist insbesondere für industrielle Anwendungen, die bislang durch Dieselaggregate versorgt wurden, eine äußerst interessante Option, zum Beispiel für Minen, gewerbliche Einrichtungen mit einem hohen Verbrauch für Kühlanlagen, Rechenzentren, Wasseraufbereitungs- oder Entsalzungsanlagen. Das ist vielleicht sogar einer der vielversprechendsten Märkte für die Photovoltaikindustrie.

Der Controller kann übrigens auch in netzgekoppelte PV-Anlagen integriert werden, die durch häufige Netzausfälle Notstromaggregate verwenden. Sei werden im Übrigen bereits weiterentwickelt. Die Hersteller arbeiten bereits an Anlagen mit Batterien, die in Photovoltaik-Diesel-Hybridsysteme eingebunden werden können. Eine Entwicklung ist, dass nicht die Dieselaggregate, sondern die Batteriewechselrichter die Netzfürung übernehmen. Dann gibt es gar keine Begrenzung der Photovoltaik-Penetrationsrate in Inselssystemen mehr. Steht schon Offgrid 3.0 vor der Tür?

Alberto Gallego



#### Der Autor

Alberto Gallego arbeitet bei der RENAC als Projektleiter im Bereich Solarenergie.

Die Renewables Academy AG (RENAC) mit Sitz in Berlin ist spezialisiert auf Aus- und Weiterbildung bei erneuerbaren Energien (Photovoltaik, Hybridtechnologien, Windkraft, Bioenergie, Netzintegration oder ländlicher Elektrifizierung) und Energieeffizienz. Seit seiner Gründung 2008 hat das international ausgerichtete Unternehmen Teilnehmer aus über 100 Ländern geschult. Praxisorientierte Hands-on-Workshops finden in RENACs Trainingscenter in Berlin oder mit dem mobilen Trainingscenter auch weltweit statt. Weitere Informationen unter: [www.renac.de](http://www.renac.de)