

AC-gekoppelte Inselnetze zur Integration in wachsende Energieversorgungsstrukturen der Zukunft

Mike Meinhardt, Michael Wollny,
SMA Technologie AG , Hannoversche Straße 1 - 5, 34266 Niestetal
E-Mail: info@SMA.de

Alfred Engler,
ISET e.V., Königstor 59, 34119 Kassel,
E-Mail: aengler@iset.uni-kassel.de

1 Kurzfassung

Das AC-Kopplungskonzept für Inselnetze hat sich in den letzten Jahren in vielen Systemen weltweit bewährt. Es zeichnet sich gegenüber herkömmlichen Konzepten durch eine Reihe von Vorteilen hinsichtlich der Anlagenplanung und des Aufbaus (Design, Installation, Erweiterbarkeit und Kompatibilität) aus und senkt gleichzeitig die spezifischen Systemkosten. Vor allem bei der Elektrifizierung netzferner, entlegener Gebiete erlaubt es den Aufbau einer zukunftssicheren und flexiblen Stromversorgung. Weitere, in Planung befindliche Projekte weltweit zeigen, wie wichtig diese neue Technologie bei der Konfiguration wirtschaftlich arbeitender Inselnetzsysteme bereits ist und zukünftig sein wird. Die Qualität der Stromversorgung in AC-gekoppelten Systemen ist dabei mindestens gleichwertig zu der in öffentlichen Netzen.

2 Die Bedeutung der regenerativen Energien für die Inselnetzversorgung

Die nachhaltige Versorgung der Menschheit mit elektrischer Energie ist eine zentrale Herausforderung, der sich die Ingenieure weltweit stellen. In Anbetracht der aktuellen weltweiten Situation auf dem Rohstoffmarkt und der zunehmenden Verknappung der konventionellen Energiequellen, gewinnt die Nutzung der regenerativen Energiequellen an Bedeutung. Aufgrund der ortsunabhängigen und vorhersagbareren Verfügbarkeit, ist die Solarenergie als Energiequelle in Inselnetzen von hoher Bedeutung.

Bild 1 zeigt die Einsatzbereiche und Relevanz der verschiedenen regenerativen Energien in den unterschiedlichen Leistungsbereichen der elektrischen Energieversorgung. Die in diesem Beitrag betrachteten Inselnetze kommen in den Leistungsbereich von einigen kW bis einigen hundert kW.

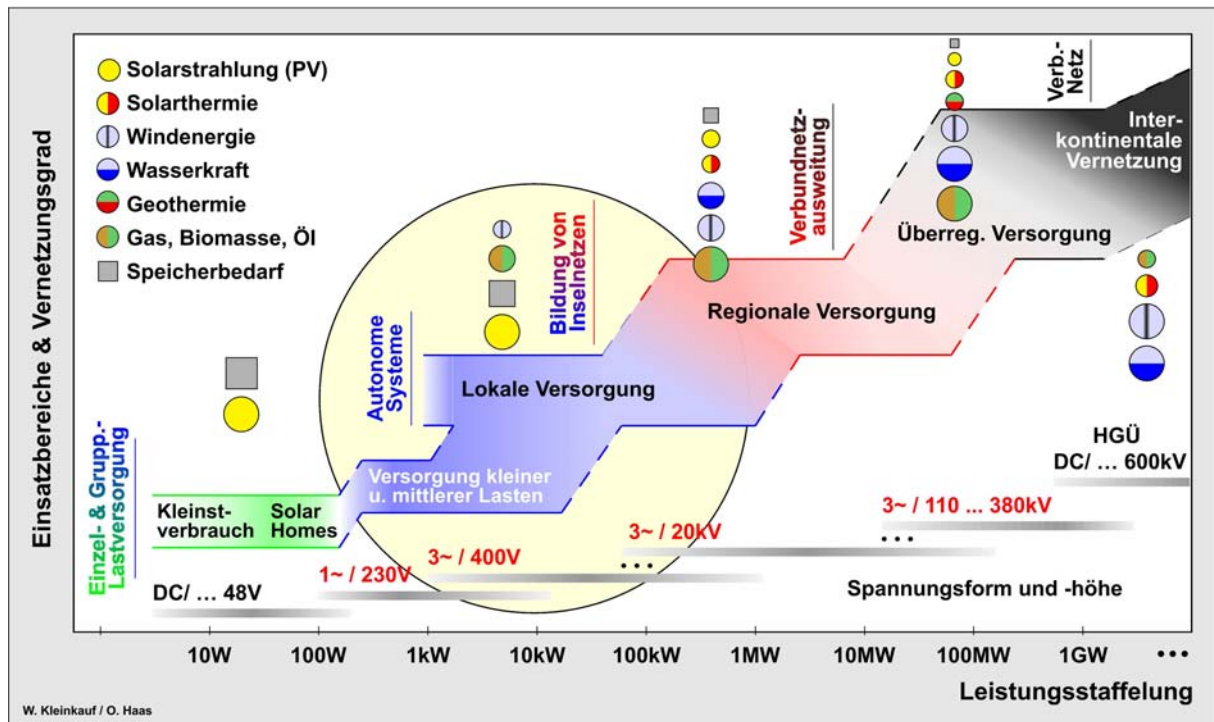


Bild 1: Elektrische Energieversorgung mit erneuerbaren Energien – Einteilung nach Energieträgern, Leistungs- sowie Einsatzbereichen, Vernetzungsgrad und Spannungsebenen [2]

3 Komponenten von Inselsystemen

In entfernt gelegenen Gebieten ohne Anschluss an ein öffentliches Stromnetz sind Inselsysteme mit regenerativen Energiequellen in vielen Fällen die wirtschaftlichste Lösung für eine Basiselektrifizierung. Ergänzend zu photovoltaischen (PV)-Generatoren, Wasserkraft- oder Windturbinen kommen, abhängig von der vorhandenen Infrastruktur, wie Straßen usw., als Erzeuger auch Generatoren mit Verbrennungskraftmaschinen (z. B. Dieselgeneratoren, BHKWs) zum Einsatz. Die zu versorgenden Geräte und Verbraucher sind in den überwiegenden Fällen herkömmliche Wechselstromverbraucher. In seltenen Fällen kommen besondere Gleichstromlasten zum Einsatz (z. B. Lampen, Kühlschränke). Zur Versorgung dieser Wechselstromlasten werden Wechselrichter (auch Batterie- oder Inselwechselrichter genannt) eingesetzt. Man unterscheidet zwischen unidirektionalen Wechselrichtern, Kombi-Stromrichtern und bidirektionalen Wechselrichtern (siehe Bild 2). Für einen optimalen Betrieb des Inselsystems wird im kleinen und mittleren Leistungsbereich (3 bis 30 kW) ein Managementsystem mit Batterie-, Generator- und Lastmanagement eingesetzt. Diese Kontrolleinheit ist oft in der Schlüsselkomponente, dem Batteriewechselrichter, integriert. Dadurch wird der Systembetrieb vereinfacht und Investitionskosten werden gesenkt.



Bild 2: Bidirektionaler Batteriewechselrichter Sunny Island® 4500 [www.SMA.de]

4 Systemdesign von Inselssystemen

Die Inselssysteme können entsprechend ihrer Spannungsart (DC oder AC) klassifiziert werden. Nachfolgend wird ein Überblick über die unterschiedlichen Systemdesigns gegeben.

4.1 DC-gekoppeltes System / Solar-Home-System

Bei DC-gekoppelten Systemen sind im Allgemeinen alle Verbraucher (z. B. Lampen) und Erzeuger auf der DC-Ebene verbunden. Unterstützt durch einen zusätzlichen einfachen Wechselrichter kleiner Leistung, kann der Nutzer das DC-System auch zum Betrieb von ausgewählten AC-Verbrauchern einsetzen. Bis heute wurden verbreitet Solar-Home-Systems im Leistungsbereich bis maximal 200 W weltweit installiert, vorwiegend in den ländlichen Regionen von Asien, Afrika und Südamerika.

Vorteile dieses Systemkonzepts sind aufgrund der geringen Systemleistung die geringen Kosten für ein System. Nachteilig ist insbesondere die sehr eingeschränkte Nutzbarkeit, denn die anschließbaren Verbraucher haben primär konsumptiven Charakter. Ein Betrieb von Produktionsmaschinen, mit denen ein wirtschaftlicher Nutzen (Hilfe zur Selbsthilfe) erzielt werden kann, ist in Solar Home-Systems meist nicht möglich. Zudem sind diese Systeme nur mit sehr großem Aufwand nachträglich erweiterbar.

4.2 Gemischt AC- und DC-gekoppeltes System

Diese Technologie entstand aus den Anforderungen, AC-Verbraucher (mittlerer Leistungsbereich) mit DC-Erzeugern zu koppeln und außerdem die Batterie über ein auf der AC-Seite gekoppeltes Verbrennungsaggregat aufladen zu können. Zudem können die Verbraucher auch direkt vom AC-Generator versorgt werden (siehe dazu Bild 3). Kernstück einer solchen Anlage ist ein sogenannter Kombi-Stromrichter, der einen Gleichrichter zur Batterieladung und einen Wechselrichter in einem Gerät vereint. Diese Anlagenkonfiguration dient der Versorgung von entfernt gelegenen Verbrauchern mit einem höheren Energiebedarf im Vergleich zu den Solar-Home-Systemen (z. B. Farmhäuser, kleinere Betriebe oder Bauernhöfe). Dieser Anlagentyp wurde in der Vergangenheit häufig für einphasige autonome AC-Stromversorgungen im Leistungsbereich unterhalb von 30 kW eingesetzt. Nachteile sind die aufwändigen DC-Verkabelungen, der hohe Aufwand für Planung und Auslegung dieser Systeme und die sehr eingeschränkte Erweiterbarkeit.

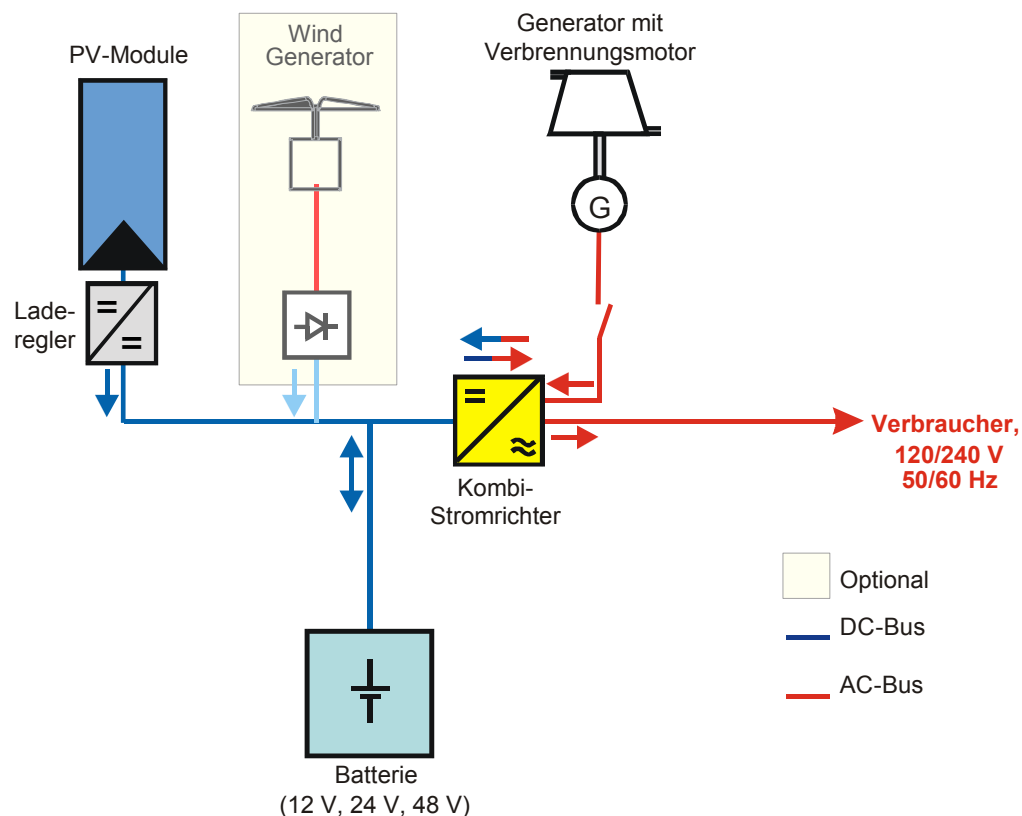


Bild 3: Kleines System mit AC-Leistung und DC-gekoppelten Komponenten und Kombi-Stromrichter

4.3 Modular erweiterbares AC-gekoppeltes System

Bei den modularen AC-gekoppelten Systemen werden alle Verbraucher und Erzeuger auf der AC-Seite verbunden (siehe Bild 4). Dadurch können flexible, erweiterbare Stromversorgungssysteme einfach geplant und mit Standard-Installationsmaterial, das auch in herkömmlichen Wechselspannungsnetzen eingesetzt wird, aufgebaut werden. Außerdem kann das System durch zusätzliche Komponenten oder konventionelle Stromerzeugungsaggregate einfach erweitert und damit dem wachsenden Energiebedarf angepasst werden. Bei entsprechender Funktionalität der Stromrichter und Verbrennungsaggregate solcher AC-gekoppelten Inselnetze, ist ein Anschluss an ein eventuell vorhandenes öffentliches Netz möglich.

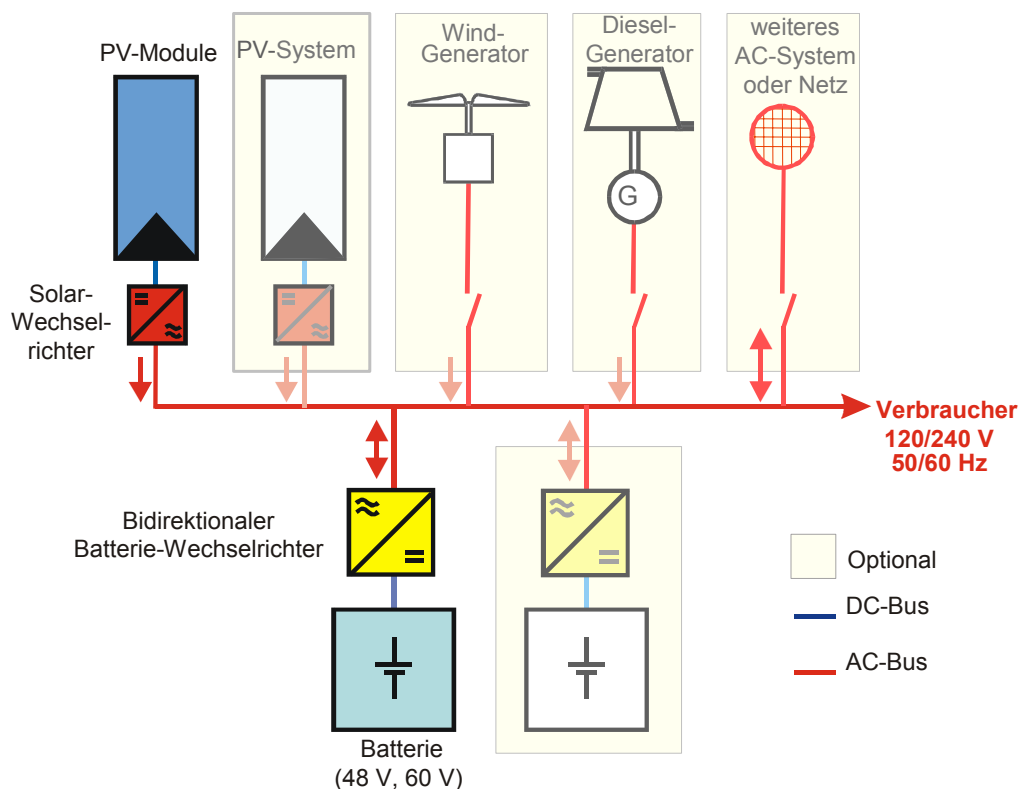


Bild 4: Erweiterbare, modular strukturierte Hybrid-Anlage mit AC-gekoppelten Komponenten

Herzstück eines AC-gekoppelten Systems ist der bidirektionale Batteriewechselrichter, der für eine gleichbleibend gute Spannungsqualität auf dem AC-Bus und damit für eine „saubere Schnittstelle“ für alle angeschlossenen Komponenten sorgt. Er gewährleistet zu jedem Zeitpunkt das Gleichgewicht von erzeugter und verbrauchter Leistung. Im Falle eines Überschusses von erzeugter Leistung speichert er diese in den Batterien. Wird mehr

Leistung verbraucht als erzeugt, wird die Batterie entladen. Im Falle von AC-gekoppelten Systemen wird dies über die Einbindung von Frequenz- und Spannungskennlinien in die Wechselrichterregelung realisiert (vergl. Kapitel 6). Der weltweit erste Wechselrichter dieses Typs ist der Sunny Island[®] 4500 (siehe Bild 2), von dem mehrere Geräte zur Leistungserhöhung einfach parallel geschaltet werden können.

Die modulare, AC-gekoppelte Systemtechnik zeigt ein großes Marktpotenzial in allen Ländern, in denen ein öffentliches Stromnetz in ländlichen Regionen fehlt. Der Leistungsbereich dieser Inselssysteme reicht von einigen kW bis hin zu mehreren hundert kW und kann ein- oder dreiphasig realisiert werden. Wie oben beschrieben, verfügt das modulare System über eine Reihe von Vorteilen hinsichtlich der Anlagenplanung und des Aufbaus (Design, Installation, Erweiterbarkeit und Kompatibilität) und senkt gleichzeitig die spezifischen Systemkosten.

5 Wachstum und Vernetzung von AC-gekoppelten Inselssystemen

Die Erweiterbarkeit und Vernetzbarkeit sind zentrale Eigenschaften von AC-gekoppelten Inselnetzen für den Aufbau einer nachhaltigen Stromversorgung. Bild 5 zeigt eine Strategie zur schrittweisen Elektrifizierung einer Siedlung bzw. Region mit wachsendem Energie- und Leistungsbedarf auf der Basis des vorgestellten modularen AC-gekoppelten Energieversorgungskonzeptes.

Die erforderlichen Schritte und Erweiterungsstrategien sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Ausgangssituation (keine elektrische Versorgung)
2. Kleine PV-Batteriesysteme (AC-Kopplung)
3. Erweitertes PV-Batteriesystem (AC-Kopplung)
4. Hybrid-System durch Integration eines Verbrennungsaggregats
5. Integration weiterer Verbraucher AC-gekoppelter, räumlich verteilter Erzeuger (z. B. PV-Systeme inkl. Wechselrichter und Wind- / Wasserturbinen)
6. Anschluss eines weiteren Dorfes und Erweiterung des Netzes bzw. Anschluss an ein vorhandenes öffentliches Netz

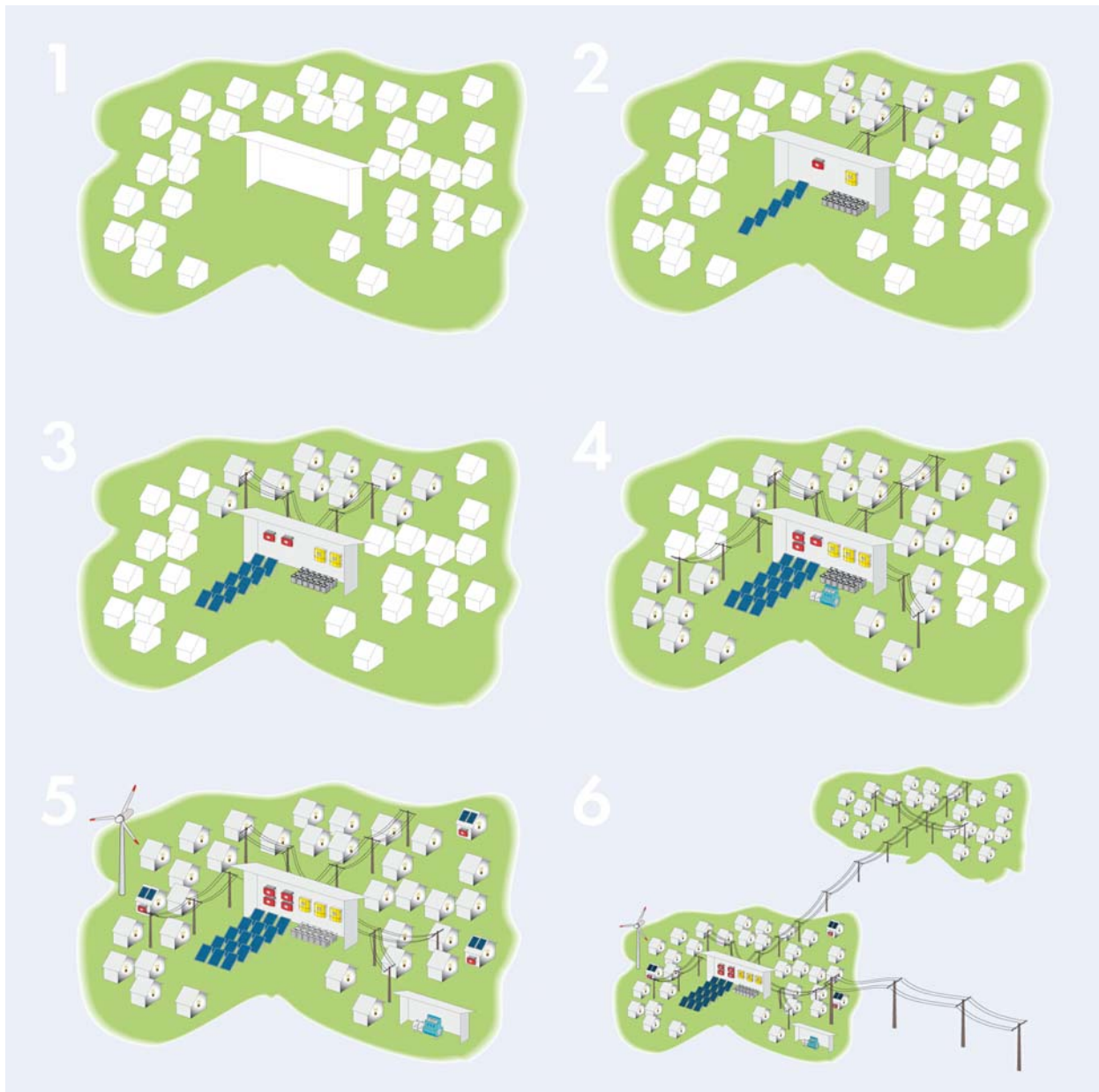


Bild 5: Erweiterungsstrategie für ein AC-gekoppeltes, wachsendes Energieversorgungssystem

6 Bidirektionaler Batteriewechselrichter mit Frequenz- und Spannungskennlinien

Für die Realisierung modular erweiterbarer, elektrischer Energieversorgungssysteme auf der Basis einzelner Inselsysteme, müssen verschiedene Anforderungen erfüllt werden. Zentrale Anforderung an die Systemtechnik stellt dabei die Synchronisation und Koordination

mehrerer Stromrichter dar, die in der Vergangenheit (wie auch im Falle von Kombi-Stromrichtern) üblicherweise mit einer Festfrequenz von 50 Hz bzw. 60 Hz arbeiteten.

Wie das Verbundnetz zeigt, können rotierende Generatoren hingegen problemlos parallel arbeiten. Dieses ist insbesondere in der Abhängigkeit ihrer Frequenz von der Leistung begründet. Der resultierende „frequenzvariable“ Betrieb ermöglicht eine Synchronisation und Kopplung der Generatoren oder bidirektionalen Wechselrichter ohne zusätzliche, aufwändige Kommunikations- oder Synchronisationseinrichtungen. Stationär stellt sich eine gemeinsame Frequenz ein. Dieses Prinzip wurde mit dem SELFSYNC[®]-Verfahren [3, 4] für bidirektionale Wechselrichter umgesetzt, welche sich mit diesem Regelungsverfahren maschinenähnlich verhalten. Die Regelung der Wechselrichter erfolgt bei SELFSYNC[®]-Verfahren, wie in konventionellen Netzen üblich, mit Frequenz- und Spannungsstatiken. Diese sind in Bild 6 dargestellt. Dabei bestimmt die Frequenz die Wirkleistung und die Spannung die Blindleistung.

Aufgrund der typischerweise kleinen Netzkoppelinduktivitäten in den Stromrichtern, die zu sehr hohen Streckenverstärkungen führen, ist eine sehr präzise und schnelle Regelung notwendig. Dies setzt eine entsprechende Rechenleistung im Wechselrichter voraus. Mit dem entwickelten Verfahren für den kommunikationslosen Parallelbetrieb wurden gute Ergebnisse bezüglich Stabilität und Leistungsaufteilung erzielt. [5]

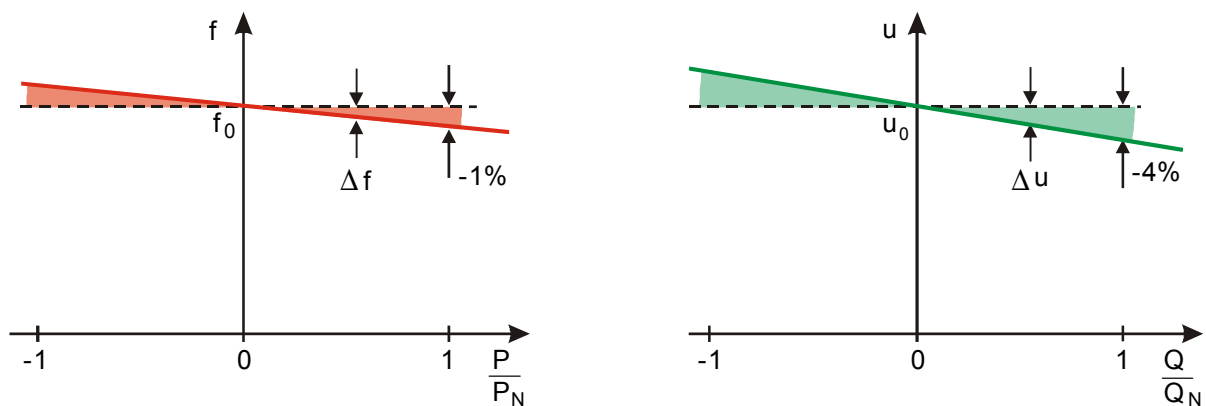


Bild 6: Frequenz- und Spannungsstatiken für die Regelung von bidirektionalen Wechselrichtern

7 Betriebsverhalten von AC-gekoppelten Inselnetzen beim Einsatz des Frequenz- und Spannungsstelllinien-Regelungsverfahrens

In AC-gekoppelten Inselnetzen werden die Spannungsqualität und das Verhalten des Energieversorgungssystems maßgeblich durch die Regelungseigenschaften der

bidirektionalen Wechselrichter bestimmt. Wenn diese Inselnetze erfolgreich an bestehende andere Stromversorgungsnetze gekoppelt werden sollen, müssen einige Grundvoraussetzungen hinsichtlich Kompatibilität erfüllt werden. Im Weiteren wird nachgewiesen, dass folgende Kriterien erfüllt werden müssen, die zur Beurteilung der Kompatibilität herangezogen werden können:

- Wirksamkeit herkömmlicher Schutzkonzepte (z. B. Bereitstellung von Kurzschlussleistung zum Auslösen von Sicherungsorganen)
- Einhaltung international gültiger Normen für Netzspannungsqualität
- Leistungsaufteilung auf mehrere verteilte Erzeuger entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit

7.1 Leistungsaufteilung

Die Leistungsaufteilung zwischen Wechselrichtern beim Einsatz des Frequenz- und Spannungskennlinien-Regelungsverfahrens wird in [5] im Detail vorgestellt. Es kann beispielsweise nachgewiesen werden, dass identische Kennlinien in den Wechselrichtern zu einer exakt gleichen Leistungsaufteilung führen. Dies gilt sowohl im stationären als auch dynamischen Betriebsfall, wie er beispielsweise bei der Versorgung nichtlinearer Lasten vorliegt (Fön im Halbwellenbetrieb). Sollen mehrere Wechselrichter, die innerhalb eines Inselnetzes oder in gekoppelten Teilnetzen angeordnet sind, unterschiedliche Leistungsbeiträge liefern, kann dies durch eine entsprechende Steigung der Frequenzkennlinie eingestellt werden. Eine vertikale Verschiebung der Frequenzkennlinien kann zum Leistungsaustausch zwischen den Stromrichtern genutzt werden. Dies kann z. B. beim Batteriemangement notwendig werden.

7.2 Spannungsqualität

Die netzkompatible Gestaltung der Wechselrichter ermöglicht einen gleichberechtigten Parallelbetrieb mit verschiedenen Stromerzeugern. Diese können Asynchron- oder Synchrongeneratoren enthalten.

Kleine Windkraftanlagen (wie z. B. aeroSmart[®]) sind wichtige erneuerbare dezentrale Erzeuger. Die Einhaltung der Grenzwerte für die relevanten Netzkenngößen nach EN 50160 ist bei dem Betrieb von Windkraftanlagen mit Asynchrongeneratoren an einem stromrichter-basierten Versorgungssystem möglich. In Bild 7 ist eine Messung mit dem Netzanalysator Euroquant[®] (Firma Haag) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass alle in der EN 50160 geforderten Grenzwerte für Spannungsschwankungen, Flicker, Frequenz und Harmonische beim Parallelbetrieb von über Spannungskennlinien geregelten Stromrichtern mit Windgeneratoren unter dem zulässigen Grenzwert bleiben.

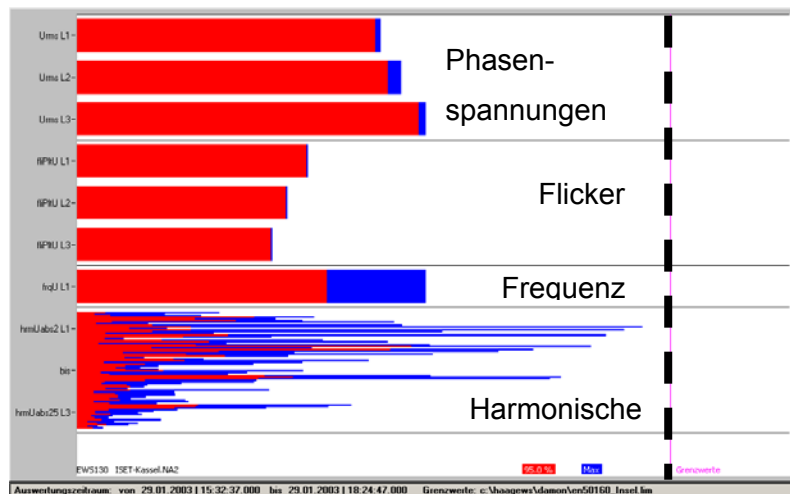


Bild 7: Einhaltung aller Grenzwerte nach EN 50160 bei dem Betrieb von einer kleinen Windkraftanlage an einem autonomen Versorgungssystem auf Basis von Wechselrichtern mit Frequenz- und Spannungskennlinien (Messung mit HAAG Euroquant®)

7.3 Beherrschung von Kurzschlüssen und anderen Fehlerfällen

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die schnelle und präzise Synchronisation der parallel geschalteten Wechselrichter. Im Fall eines Kurzschlusses ermöglicht dies beispielsweise allen Wechselrichtern ein gleichzeitiges Einspeisen eines bestimmten „Kurzschlussstroms“. Bei der Messung in Bild 8 erkennt man die gleichen Strombeiträge I1 und I2. Nach dem Auslösen des entsprechenden Sicherungsautomaten kehrt die Spannung U zurück - die Wechselrichter bilden wieder gemeinsam das Netz.

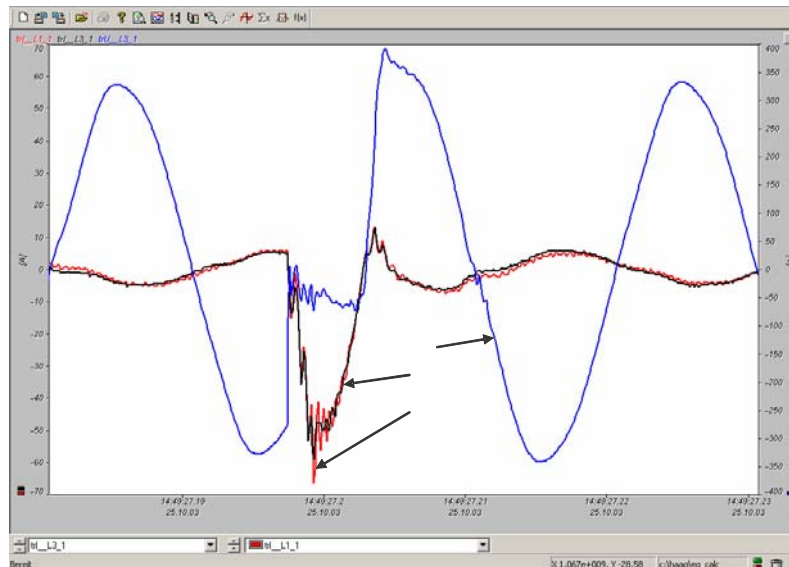


Bild 8: Strom und Spannungsverläufe beim Auslösevorgang einer Sicherung bei Kurzschluss in einem AC-gekoppelten Inselnetz

Der Auslösevorgang in Bild 8 dauerte weniger als 10 ms. Dieser wäre in einem verteilten Versorgungssystem mit anderen Regelverfahren selbst mit schneller Kommunikationstechnik schwer koordinierbar gewesen. Die Wechselrichter mit Kennlinien ermöglichen hier ein sicheres Auslösen von Sicherungen und so die Verwendung der Standard-Installationstechnik in autonomen Versorgungssystemen.

Bei der Kopplung verschiedener Teilnetze über Überstromschutzeinrichtungen kann bei einem Fehler in einem Teilnetz und schneller Trennung eine unterbrechungsfreie Versorgung der Lasten im nicht vom Fehler betroffenen Teilnetz ermöglicht werden. Dies führt zu einer erhöhten Versorgungszuverlässigkeit.

8 Praktische Anwendungen von AC-gekoppelten Inselnetzen am Beispiel der VR China

8.1 Die fortschreitende Industrialisierung in der VR China

Durch die zunehmende Industrialisierung in China während der letzten Jahre kommt einer langfristigen und verlässlichen Energieversorgung eine immer größere Bedeutung zu. Trotz großer Anstrengungen der chinesischen Regierung sind noch immer rund 30 Mio. Menschen in über 20.000 Dörfern und 7 Millionen Familien in der Landwirtschaft nicht elektrifiziert. Davon betroffen sind vor allem weite Landstriche der west- und südwestlich gelegenen Provinzen sowie einige Inseln entlang der ostchinesischen Küste. In diesen Landesteilen werden auch mittel- und langfristig viele Haushalte nicht an das öffentliche Netz

angeschlossen. Gründe hierfür sind im Wesentlichen die ungünstigen topographischen Bedingungen, die niedrige Besiedlungsdichte und der damit verbundene geringe Energieverbrauch. Aufgrund der teilweise großen räumlichen Entfernung ist ein Anschluss an das existierende Verbundnetz heute aus ökonomischen Gesichtspunkten nicht vertretbar. Der sukzessive Aufbau der Stromversorgungsstrukturen im ländlichen China lässt sich am Einfachsten durch den Einsatz von AC-gekoppelten Inselnetzen realisieren. Auch in Europa entstanden zum Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts sogenannte „Mini-Grids“, die zuerst unabhängig voneinander aufgebaut wurden und lokale Regionen oder einzelne Städte mit Elektrizität versorgten. Als Folge der positiven wirtschaftlichen Entwicklung wurden diese kleinen Inselnetze später zu den heutigen Verbundnetzen zusammengeschaltet.

Finanziert durch die Deutsche Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und das chinesische Finanzministerium (MoF) werden in ausgewählten chinesischen Provinzen über 200 Dorfstromanlagen im Zeitraum von 2003 bis 2006 installiert werden. Die Anlagen wurden als AC-gekoppelte Inselnetze sowohl einphasig als auch dreiphasig als reine PV-Batterie- oder PV-Dieselsysteme geplant. [6]



Bild 9: PV-Generator und Technikhaus für AC-gekoppelte Dorfstromversorgung in der Provinz Yunnan

8.2 AC-gekoppelte PV-Batterie-Dorfstromversorgung

Bei mehr als 2.500 Sonnenstunden pro Jahr ist für Dörfer mit weniger als 30 Haushalten eine reine PV-Batterie-Stromversorgung ohne Dieselgenerator vorgesehen. Die einzelnen PV-Generatoren haben je nach Dorfgröße und Infrastruktur eine Größe zwischen 4,5 kWp und 16,5 kWp. Wie in Bild 10 gezeigt, bestehen die in diesen Dörfern zum Einsatz kommenden Anlagen neben zwei PV-Generatoren und PV-Wechselrichtern aus mindestens zwei Inselwechselrichtern Sunny Island 4500 inklusiv Batterieeinheit. Zudem ist in allen Anlagen ein Gerät zur Überwachung und zum Daten-Monitoring installiert.

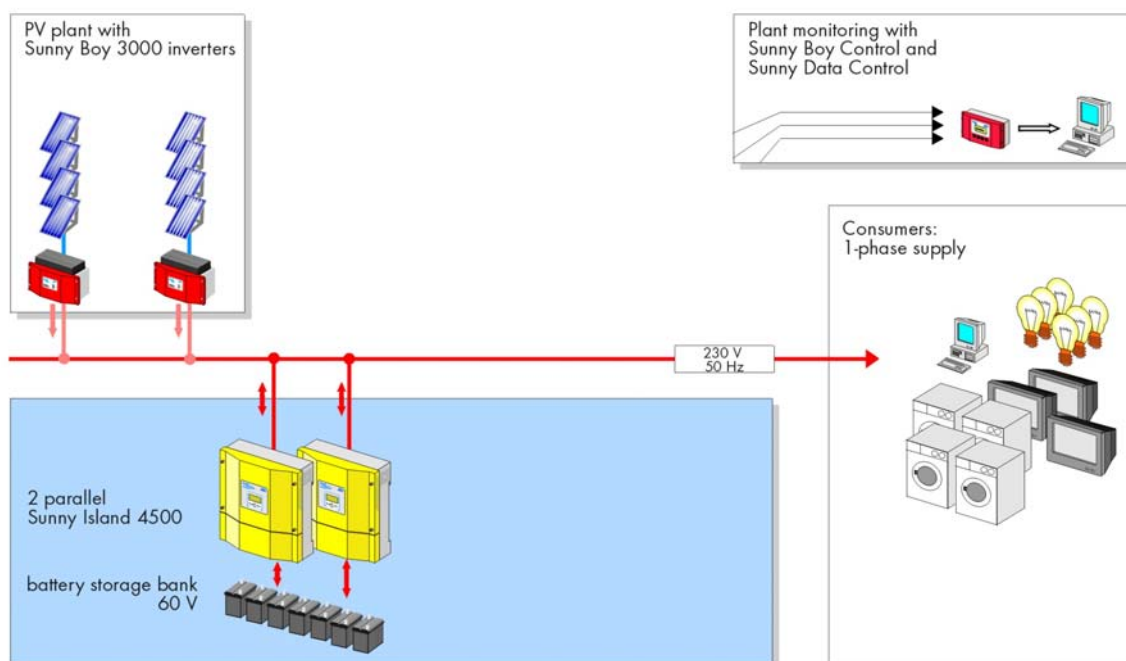


Bild 10: Beispiel eines einphasigen AC-gekoppelten PV-Batteriesystems für China

8.3 AC-gekoppelte PV-Diesel-Batterie-Dorfstromversorgung

Bei ca. 50 % der ausgewählten Dörfer sind mehr als 30 Haushalte zu versorgen. Hier wird neben der Solarenergie, die den Hauptanteil der Stromerzeugung liefern soll, zusätzlich ein Dieselgenerator in die Dorfstromversorgung mit eingebunden. Neben den klimatischen Unterschieden in den beiden Provinzen, mit Temperaturen um -30 °C in den Wintermonaten, was eine Vorheizung des Dieselgenerators nötig macht, und geographischer Lage der Dörfer über 3000 m über NN und hohen Umgebungstemperaturen, sind zusätzliche Maßnahmen, wie Lastabschaltung bei kritischem Batteriezustand oder Energiesparmodus bei schlechter

Sonneneinstrahlung, implementiert worden. Der Systemmanager Sunny Island übernimmt hierbei das gesamte Insel- und Energiemanagement, um eine lange Lebensdauer der Batterien und der Systemkomponenten zu gewährleisten.

Das im Sunny Island® Wechselrichter integrierte intelligente Batterie-, Last- und Inselmanagement, wie etwa der Betrieb des Dieselgenerators im Bereich des optimalen Wirkungsgrades, tragen dazu bei, die zur Verfügung stehende Energie sinnvoll zu verwalten bzw. den Verbrauch von Dieselmotorkraftstoff zu minimieren.

Durch eine regelmäßige Ausgleichladung, die temperaturkompensierte Ladespannung und die Überwachung des Ladezustands wird eine Tiefentladung der Batterie vermieden und gleichzeitig ihre Lebensdauer verlängert. Für die Dörfer kommen vier Basissysteme zur Anwendung.

Je nach Verbraucherstruktur sind die PV-Diesel-Batteriesysteme in verschiedenen Konstellationen errichtet worden. Eine der größten Anlagen zur Versorgung von ca. 80 Haushalten umfasst, wie in Bild 11 dargestellt, sechs PV-Generatoren inklusiv Solarwechselrichter mit insgesamt 18 kWp, einen dreiphasigen Dieselgenerator mit max. 30 kVA und zwei dreiphasige Batteriewechselrichter-Cluster mit zugeordneten 60 V Bleibatterie à 1600 Ah.

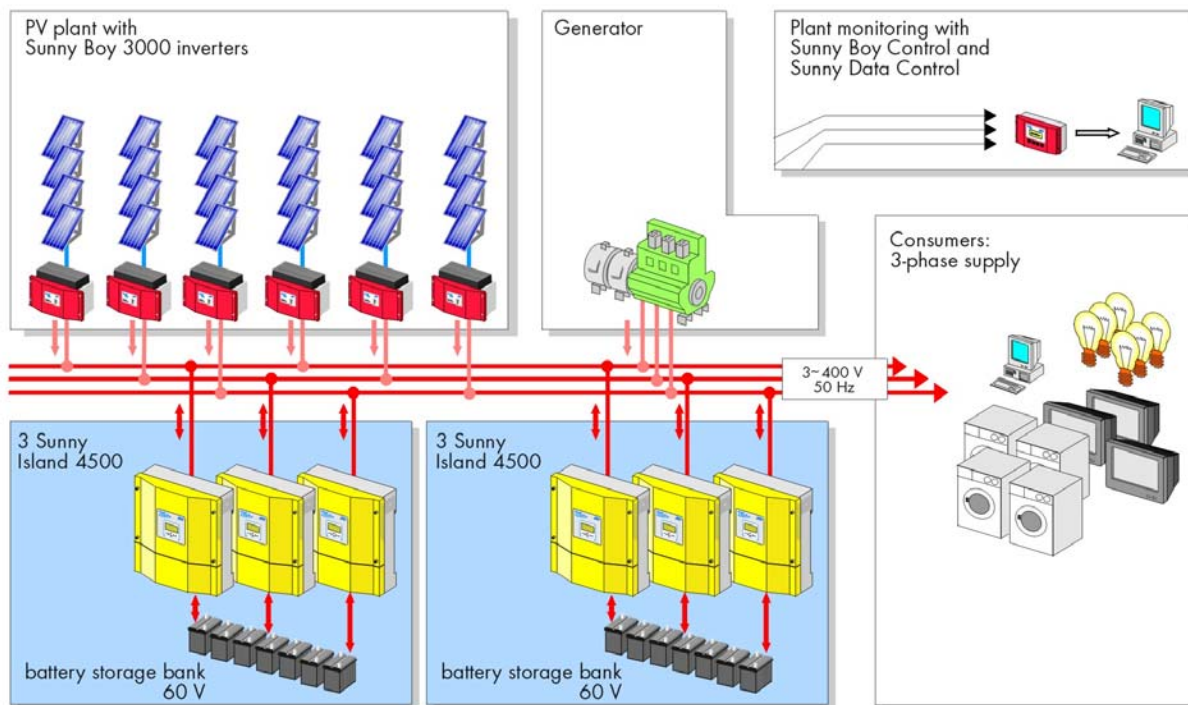


Bild 11: Beispiel eines dreiphasigen AC-gekoppelten PV-Diesel-Batteriesystems für China

9 Zusammenfassung

Die AC-Kopplung hat sich in den letzten Jahren in vielen Systemen weltweit bewährt. Vor allem bei der Elektrifizierung netzferner, entlegener Gebiete erlaubt sie den Aufbau einer zukunftssicheren und flexiblen Stromversorgung. Weitere, in Planung befindliche Projekte weltweit zeigen, wie wichtig diese neue Technologie bei der Konfiguration wirtschaftlich arbeitender Inselnetzsysteme bereits ist und zukünftig sein wird. Viele weitere geplante oder in der Diskussion befindliche internationale Projekte zeigen, dass diese Systemtechnik ihre Stellung in den nächsten Jahren noch deutlich ausbauen wird. Durch die Modularität ist es einfacher geworden, die Systeme ohne großen Planungsaufwand sowohl bei den Stromlieferanten als auch bei den Verbrauchern den jeweiligen Erfordernissen anzupassen. Systemintegratoren wie Shell Solar GmbH oder Schott Solar GmbH bringen diese neuen Technologien mit ihren langjährigen Erfahrungen in Verbindung und setzen diese erfolgreich ein.

Für die einfache Realisierung von AC-gekoppelten Stromversorgungssystemen mit verteilten verschiedenartigen Erzeugern hat sich das Wechselrichterregelverfahren, basierend auf den Frequenz- und Spannungskennlinien, hervorragend bewährt. Begleitende wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass die hiermit definierbare, hochdynamische Leistungsaufteilung zwischen den Erzeugern ohne aufwändige Kommunikation möglich ist. Beim Aufbau der AC-gekoppelten Inselnetze können daher herkömmliche Schutz- und Sicherheitskonzepte zum Einsatz kommen. Die in europäischen Verbundnetzen geforderte Spannungsqualität kann ebenfalls gewährleistet werden.

10 Literatur

- [1] Kleinkauf, W.; Ibrahim, M.; Cramer, G.: PV System Technologies: State-of-the-Art and Trends in Decentralised Electrification, Zeitschrift: RE-Focus Januar Februar 2004
- [2] Kleinkauf, W.; Haas, O.; Heier, S.; Strauß, P.: Zukunftsaspekte erneuerbarer Energien und die Rolle der Photovoltaik. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung – Schwerpunkt: Dez. Energiesysteme. VDI-Verlag, März 2001 (VDI-Berichte ; 1594), S. 3–16
- [3] Engler, A.: Regelung von Batteriestromrichtern in modularen und erweiterbaren Inselnetzen. Dissertation.de, Berlin, Mai 2002, ISBN 3-89825-439-9.
- [4] Engler, A.: Vorrichtung zum gleichberechtigten Parallelbetrieb von ein- oder dreiphasigen Spannungsquellen. German patent No. 101 40 783.1 (pending);

European patent No. 02 018 526.26. (pending); US Patent No. US 6,693,809 B2, Feb. 17, 2004 (granted); Japanese patent No. 2002-240991 (pending).

- [5] Engler, A. Hardt, C. Strauß, P. Vandenberg, M.: Parallel Operation of Generators for Stand-Alone Single Phase Hybrid Systems. EPVSEC, Munich, October 2001.
- [6] Wollny, M.; Zeller, V.: Die AC-Kopplung für netzferne Dorstromversorgungen in China, 20. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 9. - 11. März 2005