Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 17

Artikel: Ein kinetisches Energiespeichersystem

Autor: Jaeggi, M. / Folini, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904852

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: 09.12.2025

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

Ein kinetisches Energiespeichersystem

M. Jaeggi und P. Folini

Es wird ein Schwungradsystem zur Energiespeicherung in dezentralen Solar- oder Windenergieanlagen vorgestellt. Das System umfasst einen Rotor aus Kunstfasern, einen Motor/Generator als elektromechanischen Energiewandler sowie einen Frequenz-Spannungswandler als elektrisches Anpassungsglied. Die speicherbare Energie liegt in der Grössenordnung von einigen kWh.

Présentation d'un système à volant pour l'accumulation de l'énergie produite par capteurs solaires ou éoliennes. Le système consiste en un rotor en fibres synthétiques, un groupe moteur/génératrice servant de convertisseur électromécanique de l'énergie, et en un transformateur de fréquence et de tension servant d'organe d'adaptation. L'énergie accumulable est de l'ordre de quelques kWh.

Adresse der Autoren

M. Jaeggi und *P. Folini*, Institut für elektrische Maschinen, ETHZ, 8092 Zürich.

Die Autoren sind Mitarbeiter der Forschungsgruppe Energiespeicherung unter Leitung von Dr. H. K. Asper.

1. Einleitung

Nur über Energie in gespeicherter Form kann der Mensch frei verfügen. Fossile Brennstoffe und auch Kernbrennstoffe sind Formen von gespeicherter Energie, die in prähistorischer Zeit geschaffen wurden. Diese Speicher haben jedoch einen begrenzten Energieinhalt und sind nicht wieder aufladbar. Ihre Verwendung ist zudem mit schwerwiegenden Umweltproblemen behaftet.

Als Alternative bieten sich u.a. die Sonnen- und die Windenergie an, welche zumindest für die Zeitspanne menschlicher Existenz nicht zu erschöpfen sind. Die Leistungen dieser Energiequellen sind zwar nicht beeinflussbar, aber mit geeigneten Speichern kann dieser Nachteil für viele Anwendungen behoben werden. Mit diesen Speichern werden Generator und Verbraucher zeitlich (der Zeitpunkt des Verbrauchs deckt sich nicht mehr zwangsweise mit dem Zeitpunkt des Energieangebots) und in bezug auf ihre Leistungsfähigkeit entkoppelt. Für Energiebereitstellungsanlagen, welche primär mit Sonnenenergie arbeiten, stellt der Speicher ein zentrales Element dar. Auch werden die Energiegestehungskosten von den Speicherkosten stark beeinflusst.

Die Forschungsgruppe für Energiespeicherung an der ETH Zürich konzentriert sich auf die Entwicklung eines kinetischen Energiespeichersystems für Leistungen in der Grössenordnung von einigen Kilowatt. Der Anwendungsbereich liegt bei autonomen Solar- oder Windenergieanlagen als Tag/Nacht-Speicher und ganz allgemein bei elektrischen Energiepuffern. Die Verwendung im mobilen Bereich ist ebenfalls denkbar, vor allem zur Deckung des Spitzenverbrauchs beim Beschleunigen und zur Rekuperation eines Teils der Fahrenergie beim Bremsen.

Der Schwungradenergiespeicher zeichnet sich gegenüber Batterien durch grosse Leistung, unabhängig von der speicherbaren Energie, beliebig viele Lade/Entlade-Zyklen und geringe Wartung aus. Im mobilen Einsatz sind vor allem die ersten beiden Eigenschaften interessant; der Speicher eignet sich aber nicht zur Dekkung der Energie für die volle Fahrautonomie. In Fahrzeugen ist das Gewicht des Speichers beschränkt und somit auch der Energieinhalt.

Die Komponenten einer autonomen Energieversorgung sind schematisch in Figur 1 dargestellt. Die beiden Teile des Speichersystems werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

2. Schwungrad

2.1 Beurteilung von Rotormaterialien

Die Geschichte der Schwungräder beginnt bei den Töpferscheiben aus vorchristlicher Zeit und endet vorläufig bei den Kunstfaserrotoren, die in den letzten zehn Jahren entwickelt wurden.

Ein wichtiger Entwicklungsschritt war die Optimierung des Energieinhalts von massiven Stahlrotoren, also Rotoren mit isotropen Materialeigenschaften. Die analytischen Untersuchungen brachten eine Optimierung der Rotorform auf konstante Materialspannung, unabhängig vom Radius. Damit wird der Energieinhalt für eine gegebene Rotorgrösse maximal. Die folgende Gleichung gibt den gewichtsspezifischen Energieinhalt für einen isotropen Rotor wieder [1]:

$$W = k\sigma_Z/\varrho \qquad (1)$$

Hierbei ist σ_Z die zulässige Zugspannung und ϱ die Dichte des Materials. Der Faktor k hängt von der Geometrie des Rotors ab und wird deshalb als Formfaktor bezeichnet. Figur 2 zeigt eine Zusammenstellung von verschiedenen Rotorgeometrien und deren Formfaktoren [2]. Anisotrope Materialien, wie Kunstfasern, zeigen im Gegensatz zu isotropen Materialien quer zur Faser ein anderes Verhalten wenn sie belastet werden. Dicke, radial aus-

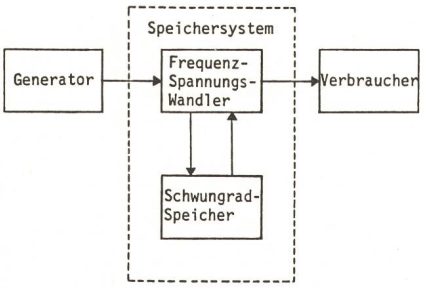

Fig. 1
Blockschema einer autonomen Energieversorgung

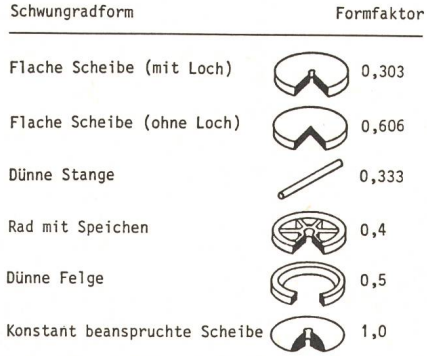

Fig. 2
Formfaktor *k* für verschiedene Schwungradformen

gedehnte Rotoren aus verschiedenen anisotropen Werkstoffen können deshalb bezüglich ihres Energieeinhaltes nicht direkt verglichen werden. Beschränkt man sich jedoch auf sehr dünne Ringe, so kann der Spannungszustand quer zur Faserrichtung vernachlässigt werden, und verschiedene Rotormaterialien können verglichen werden.

Die Energie, die in einem dünnen, rotierenden Ring mit Radius r und Querschnitt q gespeichert ist, beträgt

$$E = \pi \cdot r \cdot q \cdot \sigma_Z = \frac{V}{2} \cdot \sigma_Z \qquad (2)$$

Sie hängt vom Volumen V und der maximal zulässigen Materialspannung σ_Z, aber nicht von der Dichte des Materials ab. Anzustreben ist ein grosser gewichtsspezifischer Energieinhalt (m = Masse des Rotors).

$$W = E/m = \sigma_Z/2\varrho \qquad (3)$$

Kunstfasern (Glas-, Aramid-, Kohlefasern) haben sehr hohe Zugfestigkeiten in Faserrichtung und kleine Dichten. In Figur 3 sind verschiedene Materialien gegenübergestellt [3]. Man sieht, dass Kunstfasern gegenüber Stahl sehr hohe Energiedichten haben; sie erfüllen obiges Kriterium am besten (kreuz-schraffierte Balken in Fig. 3). Die spezifischen Energieinhalte reduzieren sich noch durch Sicherheitsfaktoren, durch die Gehäusemasse und durch den Kunstharzanteil bei Kunstfaserrotoren.

Nicht nur der spezifische Energieinhalt sondern auch das viel bessere Berstverhalten begünstigen die Kunstfasern beim Bau von Schwungrädern. Bei einem katastrophalen Defekt zerbrechen Stahlrotoren in wenige Teile, welche dann mit entsprechend hoher Energie weggeschleudert werden. Das Gehäuse muss aus Sicherheitsgründen sehr massiv gebaut werden. Beim Kunstfaserrotor wird die Energie durch Zerstörung der Materialstruktur aufgefangen. Die äusseren Schichten von solchen berstenden Rotoren werden durch Reibung an der Gehäusewand in kleinste Faserteile zerlegt.

2.2 Kunstfaserrotoren

Ein Kunstfaserverbund (vernetzt mit Epoxyharz oder auch unvernetzt) stellt ein anisotropes Material dar. Für die Berechnung der Spannungen in einem radial ausgedehnten Ring (Fig. 4) müssen die unterschiedlichen Materialeigenschaften quer zur Faser, also radial berücksichtigt werden [4].

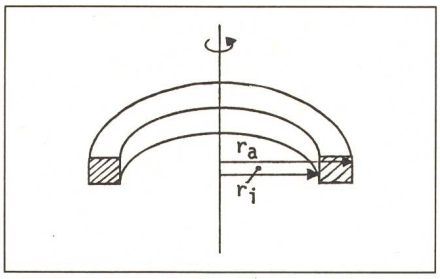

Fig. 4 Rotor mit endlicher Querschnittausdehnung im Vergleich zum Drehachsenabstand

Zudem sind die radialen Spannungen in Rotoren mit $r_i/r_a \ll 1$ nicht mehr vernachlässigbar; gerade sie können in vernetzten Kunstfaserrotoren zum Bruch führen. Die Bruchspannung senkrecht zur Faserrichtung ist bei diesen anisotropen Materialien wesentlich kleiner als in Faserrichtung. Durch Wahl der Faser, des Expoxyharzes und durch konstruktive Massnahmen kann der Spannungsverlauf im Rotor beeinflusst werden.

Figur 5 zeigt einen analytisch berechneten Spannungsverlauf für ein vernetztes Faserschwungrad entsprechend Figur 4. Die Spannungen sind normiert mit $\sigma_0 = \varrho \cdot \omega^2 \cdot r_a$. Man sieht, dass mit zunehmendem Scharparameter $\beta = r_i/r_a$ die Beanspruchung in radialer Richtung abnimmt, während sie in Umfangsrichtung zunimmt. Das Verhältnis β ist ein wichtiger Optimierungsparameter beim Entwurf von Schwungrädern.

Um eine möglichst hohe Energiedichte zu erzielen, wird der an der ETH Zürich in Entwicklung stehende Rotorring nicht vernetzt, sondern aus gewobenen Kunstfaserbändern aufgewickelt. Das Epoxyharz ist eigentlich nur Ballast, welcher für die Formgebung wichtig ist, nicht aber für die Speicherung von Energie. Dieser unvernetzte Rotor kann jedoch wegen den losen und flexiblen Faserbändern nicht ausgewuchtet werden. Um den Rotor trotzdem bei hohen Drehzahlen

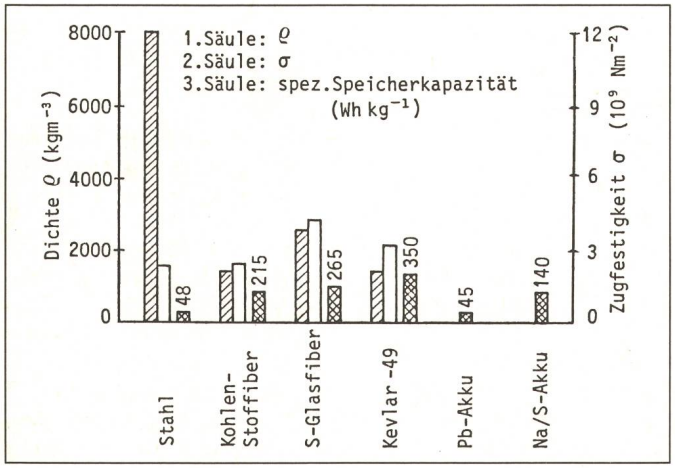

Fig. 3
Vergleich der Eigenschaften verschiedener Materialien für kinetische Energiespeicher

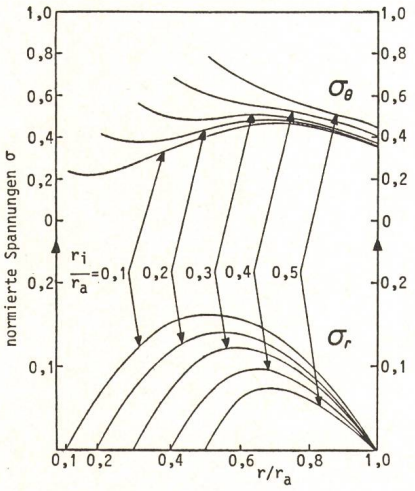

Fig. 5 Berechnete tangentiale und radiale Spannungen (σ_θ resp. σ_r) als Funktion des radialen Abstandes

laufen lassen zu können, musste eine spezielle Aufhängung gewählt werden (Fig. 6).

Der Rotor ist an einer weichen, biegsamen Welle frei aufgehängt; er kann seine Drehachse quasi selbst festlegen. Dabei müssen, wie bei jedem schwingungsfähigen Gebilde, Instabilitäten im Nutzungsbereich verhindert werden. Die kardanische Aufhängung mit ihrer Dämpfung an den Drehachsen gibt die Möglichkeit, kritische Schwingungszustände im Arbeitsbereich des Rotors zu verhindern.

3. Frequenz-Spannungswandler

3.1 Prinzip des Wechselrichters

Beinahe alle heute verwendeten elektrischen Geräte arbeiten mit 220 V, 50 Hz Wechselstrom, wie er im öffentlichen Netz der Elektrizitätswerke angeboten wird. Damit die Energie aus den Solarzellen in einem Schwungrad gespeichert werden kann, muss sie zuerst in eine Wechselspannung variabler Frequenz und Spannung umgewandelt werden. Diese Umwandlung kann auf verschiedene Arten erfolgen, z.B. durch eine Motor/Generator-Gruppe, einen Thyristorwechselrichter oder einen Transistorwechselrichter.

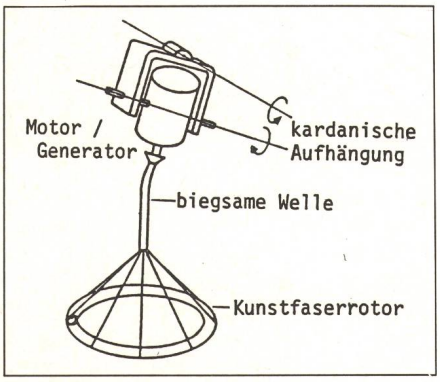

Fig. 6 Aufhängungskonzept für nicht auswuchtbare Rotoren

Die in dezentralen Energieversorgungssystemen vorkommenden Leistungen liegen in der Grösse einiger kW. Deshalb ist die Verwendung von Transistoren als aktive Bauelemente möglich. Der für das Schwungradspeichersystem gewünschte Frequenzbereich des nachfolgend beschriebenen Wechselrichters beträgt 0...1000 Hz, der Spannungsbereich 0...220 V. Um die zur Verfügung stehende Energie wirtschaftlich nutzen zu können, ist sowohl ein hoher Wirkungsgrad als auch eine möglichst preiswerte Lösung zu suchen.

Sowohl im Inselbetrieb als auch im Netzbetrieb sollen die vom Wandler erzeugten Oberwellen minimal sein. Es muss also eine möglichst gute Annäherung des Ausgangssignals an die Sinusform angestrebt werden.

Eine Möglichkeit, einen Sinus anzunähern, besteht darin, eine konstante Gleichspannung zu zerhacken. Durch Verändern des Tastverhältnisses lässt sich der Mittelwert der Ausgangsspannung verändern (Pulsbreitenmodulation). Wird dieses Verhältnis im Rhythmus einer Sinusschwingung verändert, erhält man eine je nach Zerhackerfrequenz mehr oder weniger gute Sinusapproximation. Die stärkste unerwünschte Schwingung, welche im Ausgangssignal zu finden ist, ist die Zerhackerfrequenz [5]; sie muss mit einem Ausgangsfilter unterdrückt werden.

Für den hier beschriebenen Wandler wurde versucht, ein anderes Prinzip der Sinussynthese [6] anzuwenden: Der Sinus soll durch eine Treppenfunktion angenähert werden (Fig. 7). Dabei stellt sich die Frage, wie die Stufenhöhe und die Stufenbreite gewählt werden soll, um eine optimale Annäherung zu erreichen. Die Stufenbreite wurde für alle Stufen gleich gewählt. Für die Stufenhöhe zeigte sich, dass folgende Beziehung optimale Resultate liefert:

$$U_i = \hat{U} \cdot \sin\theta_i,\ i = 0 \rightarrow k \qquad (4)$$

Hierbei ist $\hat{U}$ die Scheitelspannung, k die Anzahl Stufen in einer Viertelperiode und θ_i entsprechend gleich

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{i}{k} \qquad (5)$$

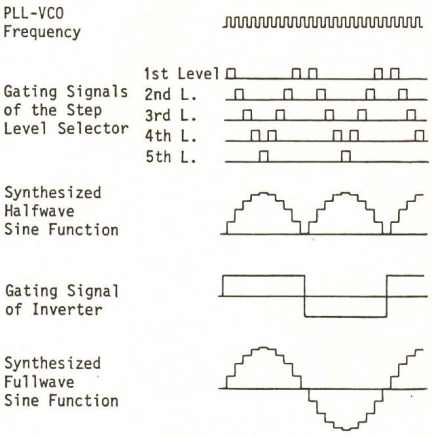

Fig. 7 Sinusapproximation mit Treppenfunktion

PLL-VCO Sollfrequenzgeber: Phasenregelkreis mit spannungsgeführtem Oszillator (Phase Locked Loop, Voltage Controlled Oscillator)

Bezüglich der Anzahl der Stufen zeigt es sich, dass mit fünf Stufen bereits 99,18% der Gesamtleistung in der Grundwelle enthalten ist. Für viele Anwendungen ist dies genügend. Zusammengefasst ergeben sich folgende Daten:

Ausgangsspannung:	220 V AC
Anzahl Stufen:	5
Anzahl Stufen pro Periode:	20
Stufeneinschaltdauer:	Periode/20
Stufenhöhe: 1. Stufe (i = 1):	96 V
2. Stufe (i = 2):	183 V
3. Stufe (i = 3):	252 V
4. Stufe (i = 4):	297 V
5. Stufe (i = 5):	312 V

Wichtig ist ferner die galvanische Trennung von Ausgang und Eingang.

3.2 Der DC/AC-Wandler «Solar 1200»

Im Solar 1200 wird das beschriebene Prinzip der Sinussynthese mittels Stufenapproximation angewandt. Der Wandler kann in vier Funktionsblöcke unterteilt werden: DC/DC-Steller, Stufenschalter, Halbwellenumschalter sowie Überwachung und Regelung. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Blöcken ist aus Figur 8 ersichtlich. Im folgenden wird auf die einzelnen Blöcke näher eingegangen.

DC/DC-Steller: Dieser hat die Aufgabe, aus der am Eingang zur Verfügung stehenden Gleichspannung die für die Stufenerzeugung notwendigen Spannungen (95 ...312 V) zu erzeugen. Der Eingangsstrom wird zerhackt und durch einen Transformator auf die entsprechenden Spannungsniveaux angehoben. Nach dem Abgriff am

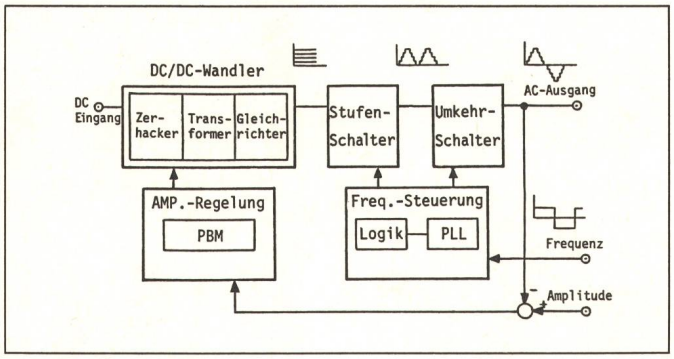

Fig. 8
Blockschaltbild des Solar 1200
PBM Pulsbreiten-modulator

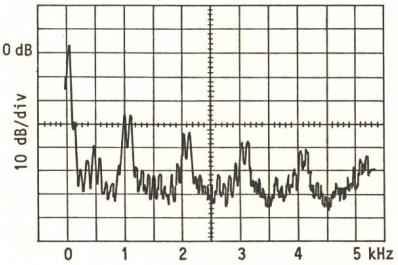

Fig. 11 Spektrum der Ausgangsspannung
vertikal: 10 dB/Div.
horizontal: 500 Hz/Div.

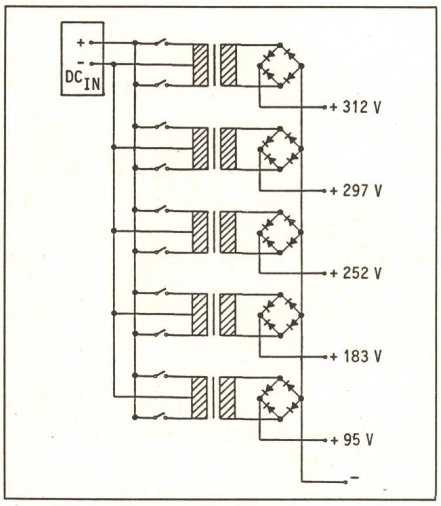

Fig. 9 Zerhacker mit fünf Trafos

Transformator werden die Ströme wieder gleichgerichtet. Dieses Prinzip erlaubt eine galvanische Trennung zwischen Ein- und Ausgangsklemme. Der Trafo besitzt sehr kleine Abmessungen, da er mit hoher Frequenz (> 20 kHz) betrieben wird. Es ist grundsätzlich möglich, einen Trafo mit fünf Sekundärabgriffen oder fünf Trafos mit je einem Zerhacker und einer Sekundärwicklung (Fig. 9) zu verwenden. Diese zweite Art hat den Vorteil, dass die Spannungsstabilisierungen der einzelnen Stufen voneinander unabhängig sind. Allerdings muss dieser Vorteil mit einem höheren Materialaufwand erkauft werden. Im Solar 1200 kam deshalb die Variante mit einem einzigen Trafo zur Anwendung. Infolge der laufenden Preisreduktionen, die bei Leistungshalbleitern zu beobachten sind, ist es wahrscheinlich, dass bei einem späteren Ausbau die Lösung mit den fünf Transformatoren vorgezogen wird.

Stufenschalter: Die fünf Spannungsebenen, die am Ausgang des beschriebenen DC/DC-Wandlers zur Verfügung stehen, müssen vom Stufenschalter in der richtigen Reihenfolge an den Halbwellenumschalter gelegt werden. Sie sind am negativen Pol miteinander verbunden, es ist also pro Stufe nur ein Schalter notwendig (Fig. 10). Am Ausgang des Stufenschalters erscheint eine Halbwellenspannung.

Halbwellenumschalter: Um aus der Halbwellenspannung die gewünschte Sinusform zu erhalten, muss jede zweite Halbwelle invertiert werden. Dies geschieht mittels einer Vollbrücke. Diese besteht aus vier Schaltern, welche von der Steuerlogik im richtigen Rhythmus ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Überwachung, Regelung: Am Ausgang sind bei Inselbetrieb vor allem zwei Grössen wichtig, die Amplitude und die Frequenz.

Die Frequenz kann entweder mit einem internen Taktgenerator oder extern vorgegeben werden (Fig. 8). Diese Sollfrequenz wird einem Phasenregelkreis (engl. PLL = Phase-Locked Loop) zugeführt, welcher die Steuersignale für die Stufenschalter liefert. Die Frequenzkontrolle basiert auf einer digitalen Ablaufsteuerung.

Die Amplitudenregelung geschieht mittels Spitzenwertgleichrichtung des Ausgangssignals und steuert über den Pulsbreitenmodulator das Tastverhältnis des Zerhackers. Da die einzelnen Treppenstufen in einem festen Verhältnis zueinander stehen, ist der Oberwellengehalt des Ausgangssignals beinahe lastunabhängig. In Figur 11 ist das Spektrum der Ausgangsspannung dargestellt.

Im netzgeführten Betrieb wird die Sollfrequenz durch das Netz bestimmt. Der Phasendetektor der PLL arbeitet ohne Phasenfehler, so dass die Synchronisation mit dem Netz ohne weiteres möglich ist. Die Spannungsregelung muss für den Betrieb am starren Netz durch eine Stromregelung ersetzt werden. Den Wandler für Netzrückspeisung umzubauen ist Thema einer gegenwärtig laufenden Studienarbeit.

Schalter: Im Solar 1200 kommen insgesamt 11 Leistungsschalter zum Einsatz, die Ströme von etwa 7 A und Spannungen zwischen 100 V und 450 V schalten müssen. Dazu werden Power MOSFET verwendet, weil die benötigte Ansteuerleistung, speziell im quasistationären Betrieb, sehr klein ist gegenüber bipolaren Transistoren. Thyristoren fallen ausser Betracht, da sie einerseits kein gesteuertes Ausschalten ermöglichen, andererseits zu langsam sind.

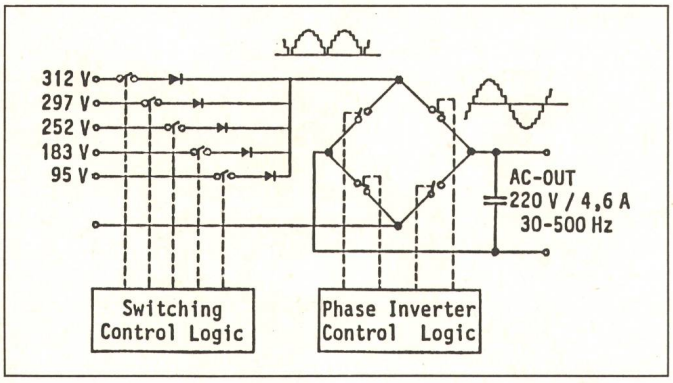

Fig. 10
Stufenschalter zur Erzeugung des Wechselstromes

Literatur

[1] *K. Löffler:* Die Berechnung von rotierenden Scheiben und Schalen. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1961.

[2] *J. W. Biermann:* Performance of flywheel energy storage systems. Proceedings of the second European Symposium on Flywheel Energy Storage, Torino/Italy, May 9...13, 1983.

[3] *R. F. Post* and *S. F. Post:* Flywheels. Scientific American 229(1973)6, p.17...23.

[4] *S. G. Lekhnitskii:* Anisotropic plates. London, Gordon and Breach, 1968.

[5] *M. Blatter* und *F. Wicki:* Universeller Solarzellen-Umrichter für 220 V/380 V mit hohem Wirkungsgrad. SEV-Informationstagung über Photovoltaische Energieumwandlung, Zürich, 15. April 1982. Zürich, SEV, 1982, S. 47...58.

[6] *H. K. Asper, P. Folini* and *H. Müller:* 1 kW high-efficiency DC/AC converter using sinewave synthesis. Proceedings of the second European Symposium on Flywheel Energy Storage, Torino/Italy, May 9...13, 1983.