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: 80 (1989)

Heft: 16: 5

Artikel: Der Hybridwechselrichter : ein Konzept für hohen Wirkungsgrad bei geringen Netzrückwirkungen

Autor: Jenni, F. / Meyer, M. / Weber, T.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903705

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: 10.12.2025

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

Der Hybridwechselrichter – ein Konzept für hohen Wirkungsgrad bei geringen Netzrückwirkungen

F. Jenni, M. Meyer und Th. Weber

In einer an der ETH durchgeführten Prinzipstudie wurde eine neuartige Umrichterkombination konzipiert, die die Möglichkeit bietet, einen hohen Wirkungsgrad bei geringen harmonischen Verzerrungen im Netz zu erreichen. Mit Hilfe von Prinzipsimulationen wird aufgezeigt, welche Vorzüge ein solcher Hybridwechselrichter beim Einsatz in grösseren Solarzellenanlagen bieten könnte.

Dans une étude scientifique réalisée à l'EPFZ, une nouvelle combinaison d'onduleurs a été conçue. Elle permet d'atteindre un rendement élevé tout en ayant de faibles distorsions harmoniques dans le réseau. Il est montré, à l'aide de simulations hypothétiques, quels pourraient être les avantages d'un tel onduleur hybride utilisé dans de grandes installations photovoltaïques.

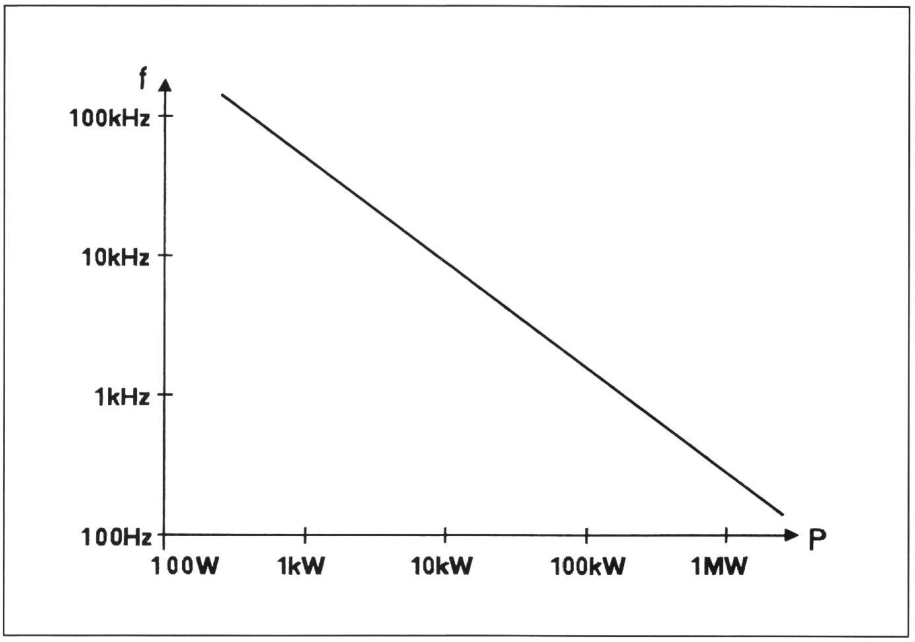
Adresse der Autoren:
Dr. *Felix Jenni, Markus Meyer* und
Dr. *Thomas Weber*, Institut für Automatik und Industrielle Elektronik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Umrichterwirkungsgrad vs. Netzrückwirkungen – Problematik und mögliche Abhilfen

Nachfolgend werden Umrichter, welche einseitig am Netz angeschlossen sind, betrachtet. Die Umrichter können dabei als Gleichrichter Energie vom Netz beziehen oder als Wechselrichter Energie in das Netz einspeisen. Ganz allgemein gilt für solche Umrichter, dass mit zunehmenden Anforderungen an einen möglichst hohen Wirkungsgrad die erzeugten Netzrückwirkungen stark zunehmen. Diese Eigenschaft hat folgenden Grund:

Um auf der Netzseite des Wechselrichters ein gutes Spektrum der Ströme und Spannungen zu erhalten, muss die Taktfrequenz des Wechselrichters möglichst hoch gewählt werden. Eine hohe Taktfrequenz bringt aber grössere Schaltverluste mit sich, was sich wiederum negativ auf den Wirkungsgrad auswirkt. Sind die Maximalwerte der durch den Wechselrichter verursachten Harmonischen im Netz vorgegeben, so müssen normalerweise die Ausgänge der Umrichter noch mit LC-Filtern gefiltert werden. Die Grösse der Filterbauelemente ist wiederum abhängig von der Taktfrequenz der Umrichter. Je tiefer die Taktfrequenz, desto grösser die Filterbausteine (und damit zum Teil auch die Verluste in den Filtern).

Die maximale Taktfrequenz für eine vorgegebene Leistung ist durch die eingesetzten Halbleiter begrenzt. Einen realistischen Zusammenhang zwischen Schaltfrequenz und Leistung für verschiedene Umrichterbaugrössen zeigt Figur 1. Die Kurve beruht auf der Annahme, dass die für den jeweiligen Leistungsbereich optimalen Bauelemente eingesetzt werden (MOS-



Figur 1 Leistung und angemessene Schaltfrequenz bei Umrichtern

FETs bei kleinen Leistungen, GTO-Thyristoren bei grossen Leistungen).

Um vorgegebene Grenzwerte der Netzharmonischen bei gegebener Leistung mit vertretbarem Filteraufwand einhalten zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten: Die einfachste besteht sicher darin, einen schnellgetakteten Umrichter einzusetzen. Gerade bei grösseren Umrichtern wird die benötigte Taktfrequenz jedoch bald unrealistisch hoch, da – bedingt durch den abnehmenden Wirkungsgrad – die im Umrichter anfallenden Verluste nicht mehr abgeführt werden können. Wie dieses Problem mit bekannten Mitteln entschärft werden kann, soll anhand von zwei Schaltungsvarianten kurz vorgestellt werden.

- *Parallelschaltung von mehreren schnell getakteten Wechselrichtern*

Die prinzipiell einfachste Variante ist sicher die Parallelschaltung von mehreren schnell getakteten Wechselrichtern zur Erreichung der geforderten Leistung. Im Teillastbereich kann auf diese Weise der Wirkungsgrad verbessert werden, indem nur gerade die momentan benötigte Anzahl Wechselrichter eingeschaltet werden. Diese Lösung ist aber relativ teuer.

- *Parallelschaltung von mehreren niederfrequent und versetzt getakteten Wechselrichtern*

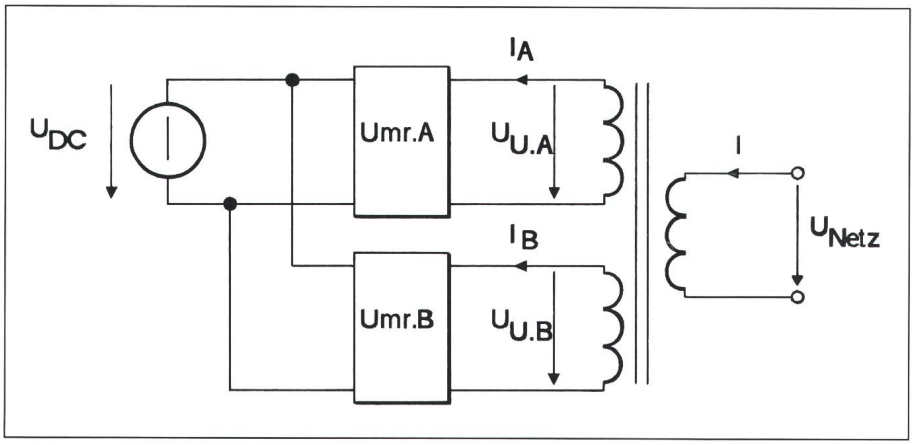
Niederfrequent getaktete Wechselrichter haben normalerweise einen guten Wirkungsgrad. Um geringe Netzrückwirkungen zu erreichen, können nun mehrere niederfrequent getaktete Umrichter mit geschickt versetzter Taktung parallel geschaltet werden. So lassen sich bestimmte Harmonische der einzelnen Wechselrichter gegenseitig auslöschen. Nachteilig an diesem Konzept ist, dass unabhängig von der Last immer alle Umrichter im Betrieb sein müssen, um die geforderten Netzrückwirkungs-Grenzwerte einzuhalten.

Der Hybridumrichter

Das dritte Umrichterkonzept – es soll als Hybridumrichter bezeichnet werden – ist eine Kombination aus diesen beiden Umrichtervarianten. Dieses Konzept wurde am Institut für Automatik und Industrielle Elektronik der ETH Zürich entworfen und besteht aus einer Parallelschaltung von zwei Umrichtern: Der erste ist ein langsam getakteter Umrichter, mit einer Baugrösse von etwa 80% der Gesamtleistung. Dieser Umrichter wird als Hauptumrichter bezeichnet. Der zweite Umrichter wird relativ schnell getaktet und hat eine Baugrösse von etwa 20% der Gesamtleistung. Bezeichnet wird er als Kompensationsumrichter. Ausgehend von der Kurve in Figur 1 zeigt sich, dass die maximalen Schaltfrequenzen der beiden Umrichter etwa umgekehrt proportional zu ihren jeweiligen Leistungen gewählt werden können. Am folgenden Beispiel soll diese Aussage quantitativ erläutert werden:

Ein Hybridumrichter ist für eine Gesamtleistung von 500 kVA ausgelegt. Der Hauptumrichter darf bei einer Leistung von S_1 = 400 kVA mit einer Frequenz von f_1 = 550 Hz betrieben werden. Der Kompensationsumrichter mit einer Leistung von S_2 = 100 kVA darf dagegen mit f_2 = 1500 Hz getaktet werden.

Die Blockschaltung eines solchen einphasigen Hybridumrichters ist in Figur 2 dargestellt.



Figur 2 Einphasige Prinzipdarstellung des Hybridumrichters

Funktion und Betriebsarten des Hybridumrichters

Der Beschreibung soll ein etwas provokativer Wunschkatalog vorangestellt werden: Danach sollte ein optimaler Umrichter

- in jedem Betriebspunkt einen optimalen Wirkungsgrad aufweisen,
- eine minimale Anzahl von Harmonischen, welche in das Netz zurückwirken, erzeugen,
- keine oder nur sehr kleine Netzfilter am Umrichterausgang benötigen,
- in jedem Betriebsfall funktionieren und, last but not least,
- fast nichts kosten.

Die Anforderungen lassen sich in dieser Form sicher nicht erfüllen. Die nachfolgende Funktionsbeschreibung zeigt aber, dass sich mit dem Hybridumrichter zumindest ein Teil der Forderungen erfüllen lässt.

Der Hauptumrichter (Umrichter A) wird so ausgelegt, dass er mit einem sehr guten Wirkungsgrad die Grundschwingung der Ausgangsspannung erzeugt. Bei maximaler Ausgangsspannung kann er mit Grundschwingungstaktung (f_{Takt} = 50 Hz) betrieben werden. Muss der Modulationsgrad variiert werden, so wird mindestens Dreifachtaktung (f_{Takt} = 150 Hz) benötigt. Um das Spektrum der Stromharmonischen, die vom Hauptumrichter erzeugt werden, auf ein tragbares Mass zu reduzieren, wird voraussichtlich eine Fünffachtaktung (f_{Takt} = 250 Hz) notwendig. Denkbar sind auch weitere Varianten, wie die Verwendung zweier grundfrequenzgetakteter Umrichter, wobei der Modulationsgrad durch die gegenseitige Phasenlage der beiden Teilstromrichter eingestellt wird. Das Spektrum des Hauptumrichters bestimmt die Ansprüche an den Kompensationsumrichter. (Ein weiterer Vorteil eines nicht allzu schlechten Spektrums ist, dass der Hauptumrichter im Notfall auch ohne Kompensationsumrichter betrieben werden kann.)

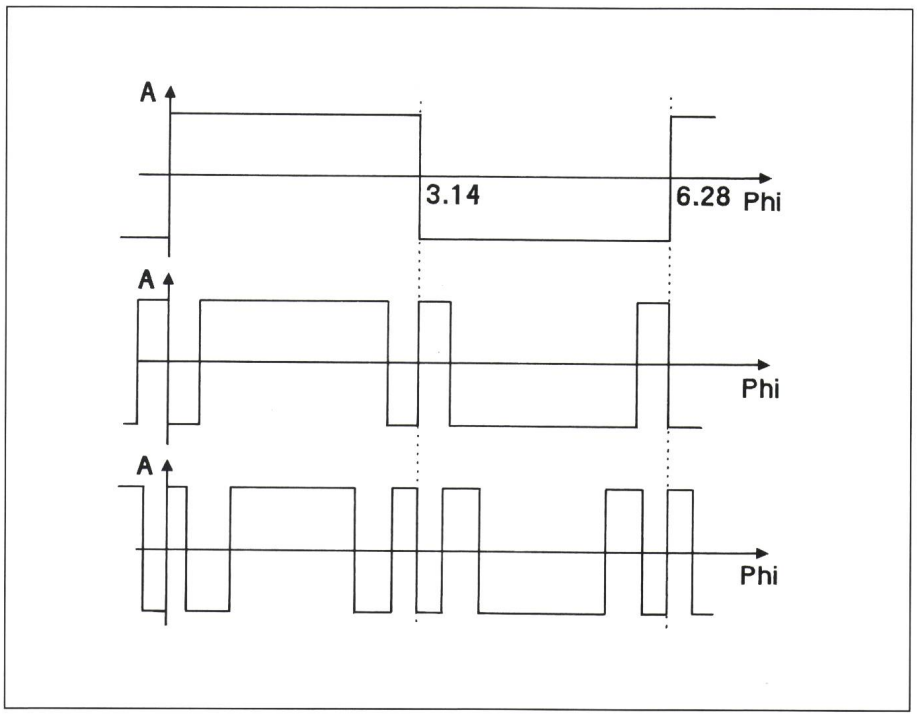
Zur Illustration sind für die drei Taktungsarten die Schaltmuster in Figur 3 dargestellt.

Der Kompensationsumrichter (Umrichter B) wird mit einer möglichst hohen Schaltfrequenz betrieben. Damit erzeugt dieser Umrichter allein ein sehr gutes Spektrum der Ströme und Spannungen im Netz.

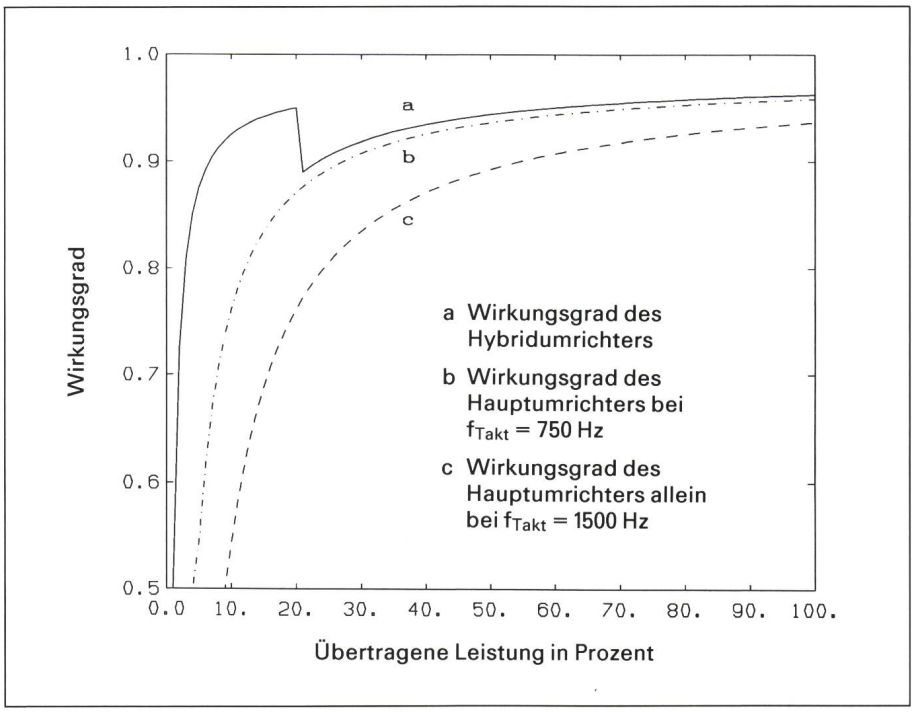
Mit der Umrichterkombination sind nun, abhängig vom Betriebsbereich, zwei interessante Betriebsarten möglich:

- Bis zu 20% der Gesamtleistung kann der Kompensationsumrichter allein betrieben werden. Damit wird auch bei kleiner Last schnell ein guter Wirkungsgrad bei gutem Netzverhalten erreicht.
- Bei Leistungen über 20% wird der Hauptumrichter zugeschaltet und mit dem Kompensationsumrichter werden die Verzerrungen des langsam getakteten Umrichters kompensiert. Damit erreicht man auch in dieser Betriebsart ein gutes Netzspektrum bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad. (Diese Betriebsart begründet die Bezeichnungen Haupt- und Kompensationsumrichter.)

Die Simulation in Figur 4 illustriert den Wirkungsgrad der Kombination Hauptumrichter-Kompensationsumrichter. Der Hauptumrichter wird hier mit einer Taktfrequenz von 250 Hz und der Kompensationsumrichter mit einer Frequenz von 1500 Hz geschaltet. Zum Vergleich ist die Wirkungsgradkurve des Hauptumrichters allein, für eine - theoretische - Taktfrequenz von 1500 Hz aufgetragen. Diese Taktfrequenz würde benötigt, um ohne zusätzliche Filter ein zur Hybridvariante vergleichbares Netzspektrum zu erzeugen. Das Resultat zeigt, dass der Wirkungsgrad der Kombination vor allem bei kleinen Leistungen wesentlich besser ist als bei Verwendung eines einzigen Hauptumrichters mit höherfrequenter Taktung.



Figur 3 Schaltmuster des Umrichters bei verschiedenen Pulszahlen pro Periode
Oberste Kurve: Grundschwingungstaktung
Zweite Kurve: Dreifachtaktung
Dritte Kurve: Fünffachtaktung



Figur 4 Umrichterwirkungsgrad in Abhängigkeit von der übertragenen Leistung

Ströme in den beiden Umrichtern

Die Funktion der Umrichterkombination lässt sich am eindrücklichsten anhand einer Rechnersimulation der Umrichterströme aufzeigen. Der Simulation liegt ein dreiphasiges Modell mit folgender Betriebsart zugrunde:

Der Hauptumrichter wird so moduliert, dass er näherungsweise die Grundschwingung des verlangten Stromes erzeugt. Mit dem Kompensationsumrichter werden die vom Hauptumrichter erzeugten Verzerrungen soweit wie möglich eliminiert. In der Simulation in Figur 5 wird der Sollwert des Stromes (I) und der Strom (I_A) im Hauptumrichter berechnet. Die Differenz der beiden Ströme (I_B) muss vom Kompensationsumrichter geliefert werden. In der Praxis wird der Kompensationsumrichter natürlich die verlangten Ströme nicht exakt generieren, doch lassen sich zumindest die niederfrequenten Verzerrungen damit eliminieren.

Möglicher Einsatz des Hybridumrichters in einer Solaranlage

Das vorgestellte Konzept eines Hybridumrichters würde beim Einsatz in grossen photovoltaischen Solaranla-

gen wie etwa dem derzeit in Planung befindlichen Projekt Phalk 500 im Berner Jura mit einer projektierten Leistung von 500 kW diverse Vorteile bieten:

● Ein beträchtlicher Teil der Energie fällt bei einer Solaranlage bei kleiner Leistung an. Durch den stark verbesserten Umrichterwirkungsgrad in diesem Bereich wird der Wirkungsgrad der ganzen Anlage wesentlich verbessert.

● Das Prinzip des Hybridumrichters ergibt kleine Verzerrungen in den Netzströmen und Spannungen. Dadurch wird ein eventuell benötigter Netzfilter im Leistungskreis wesentlich kleiner, als das bei einem einzigen fünffach getakteten Umrichter der Fall wäre.

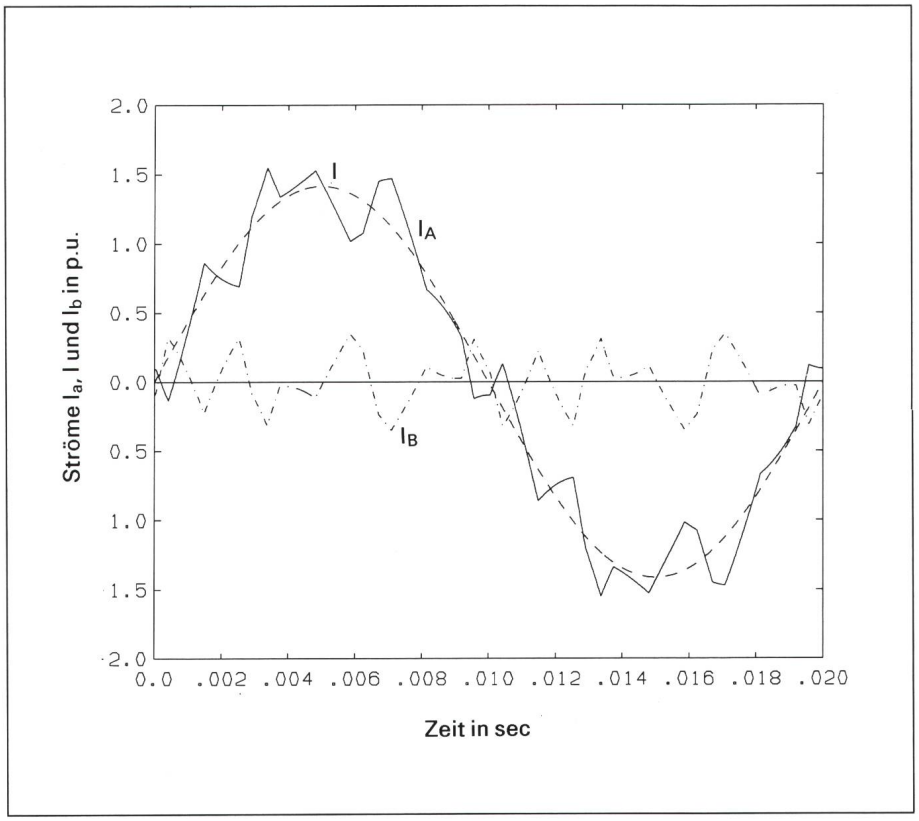
● Durch den Einsatz von zwei Umrichtern ist der Betrieb der Anlage auch bei Ausfall eines Umrichters in beschränktem Mass möglich. Fällt der Hauptumrichter aus, so steht der Kompensationsumrichter bis zu etwa 20% der Nennleistung immer noch zur Verfügung. Berücksichtigt man wiederum, dass ein nennenswerter Teil der Energie bei kleinen Leistungen anfällt, sieht man, dass mit dem Kompensationsumrichter die Anlage während wesentlich mehr als 20% der Zeit mit maximaler Leistung betrieben werden kann. Fällt dagegen der Kompensationsumrichter aus, so kann der Hauptumrichter mit bis zu 80% der Nennleistung betrieben werden. Allerdings treten bei diesem Betrieb stärkere Netzrückwirkungen auf.

● Mit diesem Umrichterkonzept ist selbstverständlich Netz- und Inselbetrieb möglich.

Speziell im Hinblick auf das Projekt Phalk 500 sind die zwei folgenden Punkte zu erwähnen:

● Eine weitere sehr wichtige Eigenschaft des Hybridumrichters ist, dass eine schrittweise Inbetriebnahme der Umrichter möglich wäre. In einer ersten Stufe bestünde die Möglichkeit, zuerst den Hauptumrichter (evtl. mit zusätzlichen Netzfiltern) und nachträglich die Kombination Hauptumrichter-Kompensationsumrichter in Betrieb zu nehmen. Diese Möglichkeit ist wichtig, weil die Realisierung eines Hybridumrichters noch diverse Vorarbeiten bedingen würde.

● Bei Phalk 500 handelt es sich um eine Pilotanlage, bei der auch neue Konzepte untersucht werden sollen. Der Einsatz eines Hybridumrichters wäre in diesem Rahmen sicher ein Novum.



Figur 5 Ströme im Hybridumrichter

I Sollwert des Stromes

I_A Strom des Hauptumrichters

I_B Stromsollwert des Kompensationsumrichters

Folgerungen und Ausblick

Die vorgestellte Variante eines Hybridumrichters wurde in Form einer Vorabklärung untersucht. Die Abklärung zeigt vielversprechende Eigenschaften und interessante Daten. Im Hinblick auf eine Realisierung sind noch umfangreiche Untersuchungen in bezug auf die optimale Auslegung der beiden Umrichter nötig. Vor allem die Regelung bzw. Steuerung des Kompensationsumrichters wird noch einige interessante und anspruchsvolle Aufgaben für Industrie und/oder Hochschulen stellen.