

**Zeitschrift:** Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES

**Band:** 94 (2003)

**Heft:** 15

**Artikel:** Schnelle Kompensation von Harmonischen mit Aktivfiltern

**Autor:** Allmeling, Jost

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857572>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.11.2024

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

# Schnelle Kompensation von Harmonischen mit Aktivfiltern

## Aktivfilter auf der Basis von Wechselrichtern als kostengünstige Alternative zum Netzausbau

Netzunsymmetrien, fluktuierende Ströme und nichtlineare Lasten wie beispielsweise phasenanschnittgesteuerte Antriebe beeinflussen die Versorgungsqualität des speisenden Netzes. Während Aktivfilter auf der Basis von Gleichspannungs-Wechselrichtern für das Niederspannungsnetz bereits kommerziell erhältlich sind, liegen für den Mittelspannungsbereich für Leistungen ab 10 MW erst Prototypen vor, die zudem noch keineswegs optimiert sind. Die dort eingesetzten Halbleiterschalter für grosse Leistungen arbeiten typischerweise mit Schaltfrequenzen von lediglich 0,5 kHz bis 1 kHz. Die Schaltfrequenz hat aber Auswirkungen auf die vom Wechselrichter erzeugten Oberschwingungen und auf die Dynamik, die bei aktiven Filtern von besonderer Bedeutung ist. Im vorliegenden Beitrag wird ein Regelverfahren vorgestellt, das trotz der niedrigen Halbleiterschaltfrequenz eine hohe Dynamik im Wechselrichterstrom zulässt.

An das elektrische Energieversorgungsnetz ist heutzutage eine Vielzahl von Verbrauchern angeschlossen. Sie stellen einerseits unterschiedlich hohe Anforderungen an die Versorgungsqualität und üben andererseits verschiedene Rückwirkungen auf das Netz aus. Diese

### Jost Allmeling

Netzurückwirkungen haben dabei wiederum Einfluss auf die Versorgungsqualität.

- Einige Verbraucher belasten das Netz mit stark fluktuierenden Strömen. Dazu gehören insbesondere Lichtbogenöfen, Schweissanlagen, Hammerschmieden und Sägewerke. Über den Spannungsabfall an der Netzimpedanz rufen die fluktuierenden Ströme Spannungsschwankungen im Netz hervor. Sie machen sich unter anderem als so genannter Flicker bei Glühlampen störend bemerkbar.
- Andere Verbraucher beziehen unsymmetrische Ströme aus dem dreiphasi-

gen Energieversorgungsnetz. Bei dreiphasigen Lichtbogenöfen kann der Lichtbogen in einer Phase abreißen, so dass nur in den verbleibenden zwei Phasen Strom fliesst. Wo eine einphasige Bahnstromversorgung direkt aus zwei Netzphasen ausgekoppelt wird, wird das Netz ebenfalls unsymmetrisch belastet.

- Die Belastung des Netzes durch nichtlineare Lasten wie Computernetzteile, Dimmer und phasenanschnittgesteuerte Antriebe nimmt ständig zu. Sie verursachen durch ihren Strombezug unerwünschte Oberschwingungen in der Netzspannung. Wie auch beim Flicker oder bei den Spannungsunsymmetrien können hier vorgegebene Grenzwerte leicht überschritten werden, so dass der fehlerfreie Betrieb anderer Lasten gefährdet ist.

In der Vergangenheit sind die Energieversorgungsunternehmen all diesen Problemen meistens durch den Ausbau ihrer Netze begegnet. Ziel der Ausbaumass-

nahmen war es, die Netzzinnenimpedanz zu verkleinern, um eine höhere Steifigkeit des Netzes zu erreichen und die Zuverlässigkeit durch parallele Betriebsmittel zu erhöhen. Dabei wurden die Netzkomponenten – in Bezug auf ihre eigentliche Aufgabe, Energie zu übertragen – überdimensioniert. In Zeiten eines liberalisierten Energiemarktes stehen die Unternehmen jedoch zunehmend unter Kostendruck. Die Überdimensionierung der Netze ist nicht länger finanzierbar, weil die Kosten dafür nicht auf die Gesamtheit der Kunden abgewälzt werden können. Aktivfilter auf der Basis von Gleichspannungs-Wechselrichtern bieten sich hier als kostengünstige Alternative zum Netzausbau an.

Für das Niederspannungsnetz sind solche Geräte bereits kommerziell erhältlich. Im Mittelspannungsbereich (10 kV bis 35 kV) gibt es für Leistungen ab 10 MW jedoch erst Prototypen, die noch keineswegs optimiert sind.

Die Schwierigkeit bei leistungselektronischen Aktivfiltern für das Mittelspannungsnetz ist die niedrige Schaltfrequenz der Halbleiterschalter für grosse Leistungen. Bei den heute üblichen IGBT<sup>1)</sup> liegt sie im Bereich von 500 Hz bis 1 kHz. In Niederspannungsanwendungen können die Halbleiter dagegen mit etlichen Kilohertz getaktet werden. Die Schaltfrequenz hat Auswirkungen auf die vom Wechselrichter erzeugten Oberschwingungen und auf die Dynamik, die bei aktiven Filtern von besonderer Bedeutung ist.

Bild 1 zeigt die prinzipielle Anordnung beim Einsatz eines Laststromfilters. Eine störende Last bezieht fluktuierende Ströme  $i_L$  aus dem dreiphasigen Mittelspannungsnetz. Ohne Laststromfilter riefen die ebenfalls fluktuierende Netzstrom  $i_N$  Spannungsschwankungen über der Netzimpedanz hervor, die sich auch in der Spannung am Anschlusspunkt  $u_A$  niederschlagen würden. Zur Kompensation der Spannungsschwankungen wird ein Wechselrichter über Entkopplungsinduktivitäten parallel zur störenden Last geschaltet. Der Wechselrichter ist in 3-



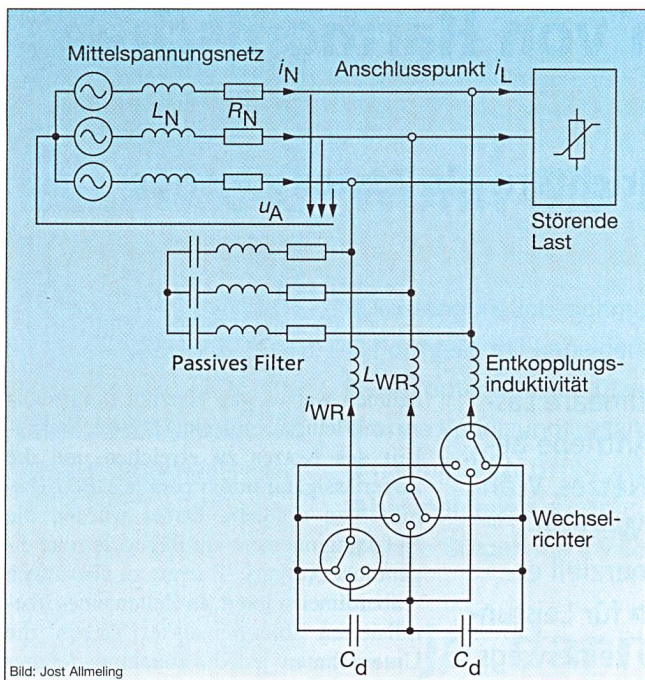


Bild 1 Konfiguration des Laststromfilters

Punkt-Technik ausgeführt, um den Forderungen nach grosser Filterleistung gerecht zu werden und um die resultierende Pulsfrequenz gegenüber der 2-Punkt-Topologie zu erhöhen.

Als Entkopplungsinduktivitäten werden in der Regel die Streuinduktivitäten eines Transformators verwendet. Ein Transformator ist erforderlich, da die Spannungsfestigkeit heutiger Halbleiterschalter nicht ausreicht, um einen Wechselrichter direkt auf dem Mittelspannungsniveau zu betreiben. Ein zusätzliches resonantes passives Filter dient dazu, die durch die Taktung des Wechselrichters hervorgerufenen Stromüberschwingungen vom Netz fernzuhalten. Wegen der niedrigen Taktfrequenz der Halbleiterschalter sind die Stromüberschwingungen recht ausgeprägt, so dass der Auslegung des passiven Filters eine besondere Bedeutung zukommt.

Ziel der Filterung ist es, plötzlich auftretende Änderungen und stationäre Harmonische im Laststrom so zu kompensieren, dass der Netzstrom möglichst nur noch Grundschwingungsanteile enthält. Darüber hinaus kann das Filter die von der Last bezogene Blindleistung bereitstellen. Das zu Grunde liegende Regelprinzip ist relativ einfach: Der Laststrom wird gemessen, und die Grundschwingung des Wirkstroms wird subtrahiert. Das Ergebnis ist der Sollwert für den Wechselrichterstrom  $i_{WR}$  in Bild 1.

Um dem Laststrom möglichst schnell nachfahren zu können, wurde der innere Stromregelkreis mit einem Dead-Beat-Regler<sup>2)</sup> realisiert. Damit die vom Wech-

selrichter erzeugten Stromüberschwingungen nicht in der Messung auftauchen, wird der Strom an den Spitzen und Nulldurchgängen der dreieckförmigen PWM-Trägersignale<sup>3)</sup> abgetastet. Zu den selben Zeitpunkten erwartet der Modulator neue Werte für den Modulationsgrad. Auf Grund der verzögerten Pulserzeugung und der endlichen Rechenzeit hat der geschlossene Regelkreis eine Totzeit  $T_d$ , die dem doppelten Abtastintervall entspricht.

Der Wechselrichter soll nicht nur stochastische Änderungen, sondern auch stationäre Harmonische und Unsymmetrien im Laststrom kompensieren. Dies gelingt mit dem beschriebenen Dead-Beat-Regler nicht vollständig, weil die Totzeit bei periodischen Signalen zu einer bleibenden Regelabweichung führt. Wegen der Phasenverschiebung zwischen Last- und Wechselrichterstrom würden bestimmte Harmonische sogar verstärkt statt vermindert. Es ist daher eine zusätzliche äussere Regelstruktur erforderlich, die den Effekt der Totzeit des Dead-Beat-Regelkreises kompensiert.

## Kompensation im geschlossenen Regelkreis

In einem Mittelspannungsnetz ohne Nullleiter können alle dreiphasigen Spannungen und Ströme in entsprechende Raumzeiger eines stationären Koordinatensystems transformiert werden, ohne dass dabei Information verloren geht. Im Folgenden sollen statt der Dreiphasengrössen stets Raumzeiger verwendet werden. Zur einfacheren mathematischen Behandlung werden die Zeiger als komplexe Grössen dargestellt.

Von elektrischen Drehfeldmaschinen ist das Verfahren bekannt, die Ströme und Spannungen in einem Zeiger-Koordinatensystem zu regeln, das synchron mit der Grundschwingungsfrequenz rotiert. Dabei wird der Mitsystemanteil der Dreiphasengrössen auf Gleichgrössen abgebildet. Die stationäre Regelabweichung der Gleichgrössen kann mit dem Integral-

anteil eines PI-Reglers zu Null gebracht werden, wodurch ebenfalls die Regelabweichung in den Dreiphasengrössen verschwindet. Dieses Verfahren wird auch für Netzwechselrichter verwendet.

Häufig möchte man erreichen, dass die Regelabweichung nicht nur für das Mitsystem der Grundschwingung verschwindet, sondern auch für das Gegensystem. Gegensystem-Anteile treten bei unsymmetrischer Belastung des Netzes auf. Im Fall des aktiven Laststromfilters sollen darüber hinaus die dominanten Harmonischen von Gleichrichterlasten (5., 7., 11., 13. und weitere) stationär genau ausgegelt werden.

Wie in Bild 2 dargestellt, wird dazu das komplexe Reglersignal in zusätzliche Koordinatensysteme transformiert, die mit den Kreisfrequenzen und Drehrichtungen der auftretenden Harmonischen rotieren [1,2,3]. Das Gegensystem und die Harmonischen können dann analog zum Mitsystem der Grundschwingung mit einem Integral-Regler auf der entsprechenden Zeigerebene ausgegelt werden. Die Ausgangssignale aller Regler werden nach der Rücktransformation addiert. Da die Transformationen den Proportional-Regler nicht beeinflussen, wurde dieser direkt im stationären Koordinatensystem realisiert.

Der Nachteil der Regelung mit synchronen Koordinatensystemen ist der Rechenaufwand in einem Signalprozessorsystem. Für jede auszuregelnde Harmonische des Mit- und des Gegensystems

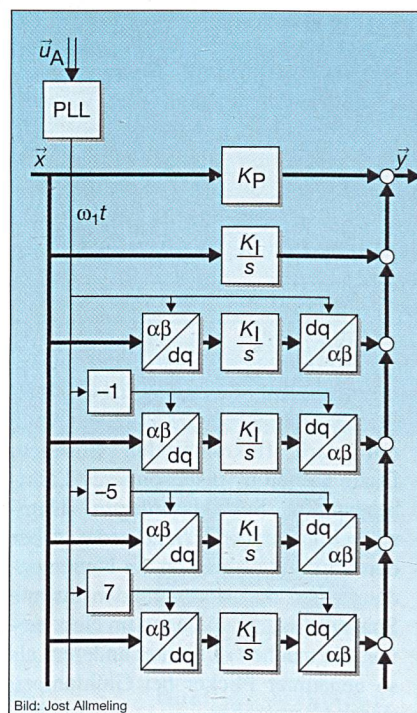


Bild 2 Regler mit mehrfachen rotierenden Koordinatensystemen



sind zwei Koordinatentransformationen erforderlich. Soll das Aktivfilter auch unsymmetrische Belastungen kompensieren, ist die doppelte Anzahl Koordinatensysteme erforderlich, da die Harmonischen sowohl im Mit- als auch im Gegensystem auftreten können.

Anstatt das Reglersignal ständig in verschiedene rotierende Koordinatensysteme zu überführen, kann man die Integral-Regler selbst in das stationäre Koordinatensystem transformieren. Der Rechenaufwand für den Regler wird auf diese Weise erheblich reduziert. Im stationären Koordinatensystem erscheinen die Integratoren  $K_I/s$  als komplexe Oszillatoren (Formel 1), wobei  $\omega_v$  die Kreisfrequenz der  $v$ -ten Harmonischen darstellt.

$$O_v(s) = \frac{K_I}{s - j \cdot \omega_v} \quad (1)$$

Wenn diese Oszillatoren mit Resonanzfrequenz angeregt werden, verhalten sie sich wie Integratoren für die Einhüllende des Eingangssignals. Bild 3 verdeutlicht dieses Verhalten, wobei der Realteil des Zeigers schwarz und der Imaginärteil grau dargestellt ist. Bezogen auf das stationäre Koordinatensystem hat die Regelstruktur aus Bild 2 die in Formel 2 dargestellte Übertragungsfunktion.

$$\frac{\bar{Y}(s)}{\bar{X}(s)} = K_p + K_I \cdot \left( \frac{1}{s} + \frac{1}{s - j\omega_1} + \frac{1}{s + j\omega_1} + \frac{1}{s + j5\omega_1} + \frac{1}{s - j7\omega_1} + \dots \right) \quad (2)$$

Mit dieser Funktion kann in einem geschlossenen Regelkreis der stationäre Fehler von ausgewählten Harmonischen ausgeglichen werden.  $\omega_1$  ist dabei die Kreisfrequenz der Netzgrundschwingung.

### Vorfilter mit Fourieranalyse

Eine Alternative, die Totzeit des inneren Dead-Beat-Regelkreises zu kompensieren, ist der Einsatz eines Vorfilters für den Sollwert des Wechselrichterstroms [4,5]. Im Vorfilter werden die Harmonischen analysiert und individuell phasenverschoben. Damit heben sich die von Vorfilter und Dead-Beat-Regelkreis verursachten Phasenverschiebungen gegenseitig auf. Ein Vorfilter kann auch eingesetzt werden, wenn die Oszillatoren im

geschlossenen Regelkreis Netzresonanzen anregen würden. Allerdings garantiert das Vorfilter auf Grund der fehlenden Rückkopplung nicht, dass die stationäre Regelabweichung tatsächlich verschwindet. Wenn Parameterverschiebungen oder Störungen das ideale Totzeit-Verhalten des Dead-Beat-Reglers verschlechtern, bleibt die Kompensation der Harmonischen unvollständig.

Zur harmonischen Analyse kann die Fourieranalyse benutzt werden. Dazu werden die komplexen Fourierkoeffizienten für alle zu filternden Harmonischen berechnet. Die Koeffizienten werden um die Totzeit des Dead-Beat-Regelkreises phasenverschoben und anschließend rücktransformiert. Aus den Bildern 4 und 5 ist das Übertragungsverhalten eines Vorfilters ersichtlich, das nur die 5. Harmonische passieren lässt. In Bild 4 wird dieses Filter mit der 5. Harmonischen angeregt. Die Einhüllende des Ausgangssignals beschreibt zunächst einen rampenförmigen Anstieg. Nach einer Periodendauer der Grundschwingung  $T_1$  erreicht sie die Amplitude des Eingangssignals und bleibt konstant. In Bild 5 wird das selbe Filter mit der 7. Harmonischen angeregt. Während der ersten Grundschwingungsperiode ist im Ausgangssignal eine Schwebung mit geringer Amplitude zu erkennen. Danach ist es erwartungsgemäss Null.

Der Vorteil der Fourieranalyse ist, dass die Harmonischen der Grundschwingung unabhängig voneinander separiert werden können. Es müssen nur diejenigen Harmonischen behandelt werden, für die eine Phasenkorrektur gewünscht wird. Der Nachteil der Fourieranalyse ist der erhebliche Rechenaufwand, selbst wenn mit FFT<sup>4)</sup> gearbeitet wird. Bei jedem neuen Abtastwert sind eine Vielzahl von

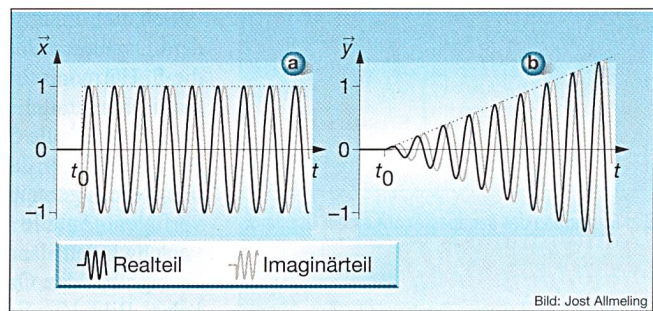


Bild 3 Verhalten des Oszillators bei Anregung mit Resonanzfrequenz

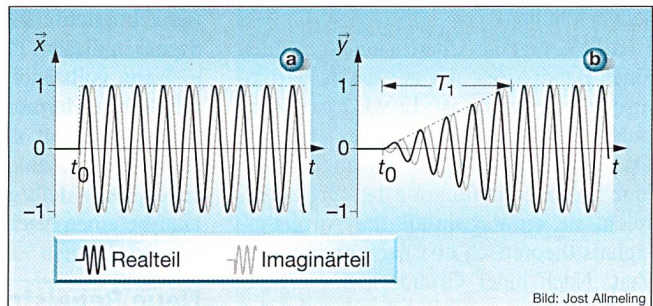


Bild 4 Vorfilter für die 5. Harmonische bei Anregung mit der 5. Harmonischen

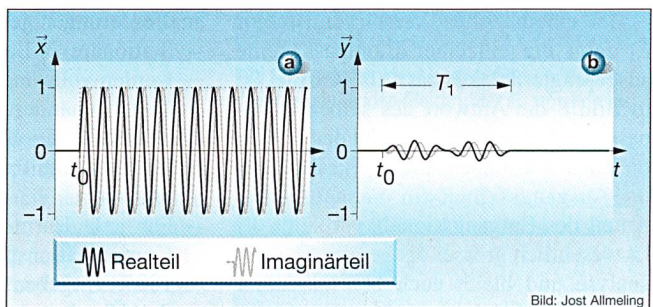


Bild 5 Vorfilter für die 5. Harmonische bei Anregung mit der 7. Harmonischen

Multiplikationen und Additionen erforderlich. Aus diesem Grund wurde die Fourieranalyse im hier beschriebenen Beispiel nicht verwendet.

### Bandpassfilterung

Die harmonische Analyse im Vorfilter kann auch mit Hilfe von Bandpassfiltern erreicht werden. Verglichen mit der Fourieranalyse erfordern Bandpässe nur wenige Operationen pro Abtastwert. Richtig parametrisiert sind sie ähnlich leistungsfähig.

Wird ein komplexer Oszillator wie in Bild 6 rückgekoppelt, entsteht ein komplexer Bandpass, wie in Formel 3 beschrieben.

$$B_v = \frac{O_v(s)}{1 + O_v(s)} = \frac{K_I}{s - j \cdot \omega_v + K_I} \quad (3)$$

Bei Resonanzfrequenz weist ein solcher Bandpass eine Verstärkung von 1 ohne Phasenverschiebung auf. Seine Bandbreite wird vom Verstärkungsfaktor



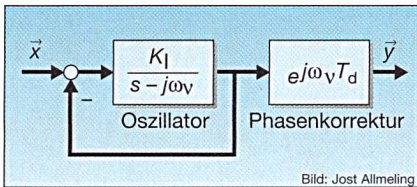


Bild 6 Aufbau des Bandpasses aus einem Oszillator

$K_1$  des Oszillators bestimmt. Zur Kompensation der Totzeit des Dead-Beat-Regelkreises wird das Ausgangssignal phasenverschoben.

Bild 7 zeigt das Übertragungsverhalten eines Bandpasses, der auf die 5. Harmonische abgestimmt ist. Er wird zum Zeitpunkt  $t_0$  mit Resonanzfrequenz angeregt. Da die Einhüllende des Ausgangsvektors eine Exponentialfunktion beschreibt, erreicht sie die Amplitude des Ausgangssignals theoretisch erst nach unendlicher Zeit. Nach einer Grundschwingungsperiode  $T_1$  liegen jedoch die Amplituden von Ein- und Ausgangssignal schon dicht beieinander.

Bei einem hohen Verstärkungsfaktor  $K_1$  zeigt ein einzelner Bandpass keine ausgeprägte Selektivität. Als Beispiel ist in Bild 8 die Antwort des selben Bandpasses auf eine Anregung mit der 7. Harmonischen zu sehen. Man erkennt, dass im Ausgangssignal ein nennenswerter Anteil des Eingangssignals verbleibt. Er ist wesentlich grösser als bei der Fourieranalyse und bleibt auch bei stationärer Anregung erhalten.

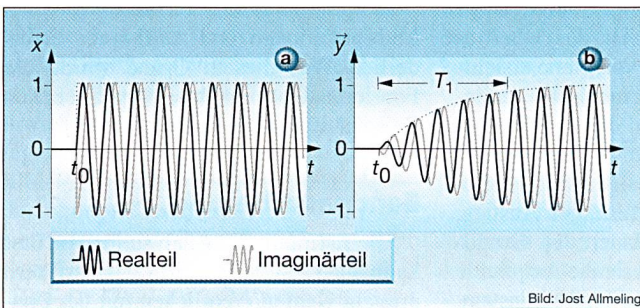


Bild 7 Antwort des Bandpasses für die 5. Harmonische auf Anregung mit der 5. Harmonischen

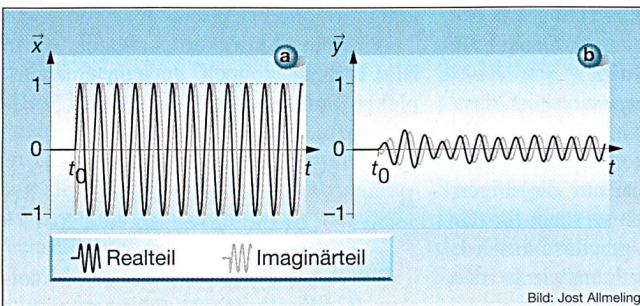


Bild 8 Antwort des einzelnen Bandpasses für die 5. Harmonische auf Anregung mit der 7. Harmonischen

Schaltet man jedoch gemäss Bild 9 dem Oszillator  $O_5$  (gemäss Formel 1) für die 5. Harmonische einen für die 7. Harmonische parallel, erreicht man für beide Frequenzen volle Selektivität. Voraussetzung dafür ist, dass beide Oszillatoren über eine gemeinsame Rückkopplung verfügen. Anteile der 7. Harmonischen verschwinden dann vollständig aus dem Zweig über den Oszillator  $O_5$  und umgekehrt. Bild 10 zeigt das Ausgangssignal des Oszillators  $O_5$ , wenn die Filterstruktur mit einer 7. Harmonischen angeregt wird. Im stationären Zustand nimmt das Signal in diesem Pfad schnell ab.

Wenn vollständige Selektivität für alle möglichen Harmonischen im Eingangssignal gefordert wird, ist eine entsprechend grosse Zahl an Oszillatoren vorzusehen. Dies stellt gegenüber der Fourieranalyse einen Nachteil dar.

## Neue Regelstruktur

An die Regelung eines Laststromfilters werden im Allgemeinen folgende Maximalforderungen gestellt:

- Stationäre Laststrom-Harmonische werden vollständig kompensiert. Nach Laststromänderungen ist innerhalb einer Netzperiode die Ausregelung der Harmonischen weit gehend abgeschlossen.
- Für jede Harmonische lässt sich ein Kompensationsgrad zwischen 0% und 100% vorgeben. So kann bei drohender Überlastung des Wechselrichters

die Kompensation einzelner Harmonischer selektiv abgeschaltet werden.

- Stationäre Harmonische in der Anschlussspannung haben keine Rückwirkungen auf den Wechselrichterstrom.

– Das dynamische Verhalten des inneren Stromreglers bleibt bei stochastischen Laststromänderungen erhalten.

Die in Bild 11 skizzierte neuartige Regelstruktur wird all diesen Anforderungen gerecht. Einige Harmonische werden mit Oszillatoren im geschlossenen Regelkreis kompensiert, an-

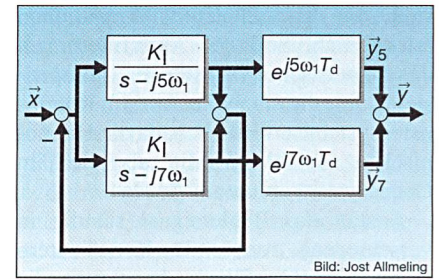


Bild 9 Bandpass-Struktur mit zwei Oszillatoren für die 5. und 7. Harmonische

dere mit Bandpässen im Vorfilter. Ein wesentliches Merkmal besteht darin, dass die Differenz aus Soll- und Iststrom nicht zentral, sondern für jede Harmonische separat gebildet wird.

## Funktionsweise des Reglers

Der Laststrom wird über einen direkten Pfad unmittelbar auf den Eingang des inneren Stromregelkreises geführt. So kann der Wechselrichterstrom den stochastischen Änderungen des Laststroms mit der vollen Dynamik des Dead-Beat-Regelkreises folgen. Die Oszillatoren haben bei einem Laststrom-Sprung zunächst kaum einen Einfluss, weil sie sich erst im Laufe einer Netzperiode auf den veränderten Laststrom einstellen.

Die Oszillatoren der Integrator-Struktur befinden sich innerhalb eines geschlossenen Regelkreises. Die Rückkopplung bewirkt, dass jeweils diejenige Harmonische, auf die der Oszillator abgestimmt ist, aus dem Signal am Oszillatoreingang verschwindet. Dadurch sind im stationären Zustand die betroffenen Harmonischen des Wechselrichter- und des Laststroms in Phase. Der Kompensationsgrad lässt sich mit den Verstärkungsgliedern  $V_1 \dots V_n$  zwischen 0 und 1 einstellen. Um die Einstellgeschwindigkeit und Stabilität des Regelkreises zu optimieren, wurden zusätzliche Phasenkorrekturen in die Oszillatorpfade eingebaut.

Die Gegenspannung ( $u_A$  in Bild 1) am Anschlusspunkt stellt für den Wechselrichterstrom eine Störgrösse dar. Ohne die Integrator-Struktur würden sich Harmonische in der Gegenspannung im Wechselrichterstrom niederschlagen. Ist aber in der Integrator-Struktur ein entsprechend abgestimmter Oszillator vorhanden, wird die betroffene Harmonische stationär ausgeglet. Dies gilt auch für die Grundschwingung der Gegenspannung, für die ein eigener Oszillator vorgesehen ist.

In die Bandpass-Struktur werden all diejenigen Oszillatoren aufgenommen, die im geschlossenen Regelkreis Netzresonanzen anregen würden und sich des-



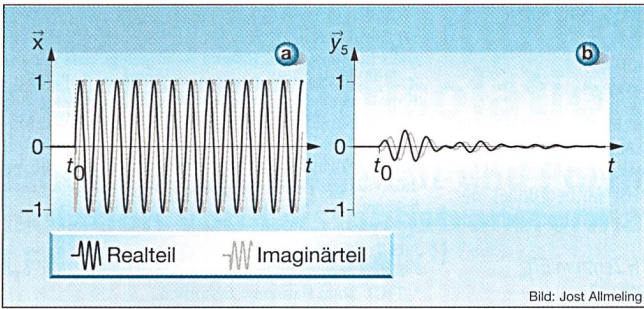


Bild 10 Verhalten des Oszillators für die 5. Harmonische in der Bandpass-Struktur bei Anregung mit der 7. Harmonischen

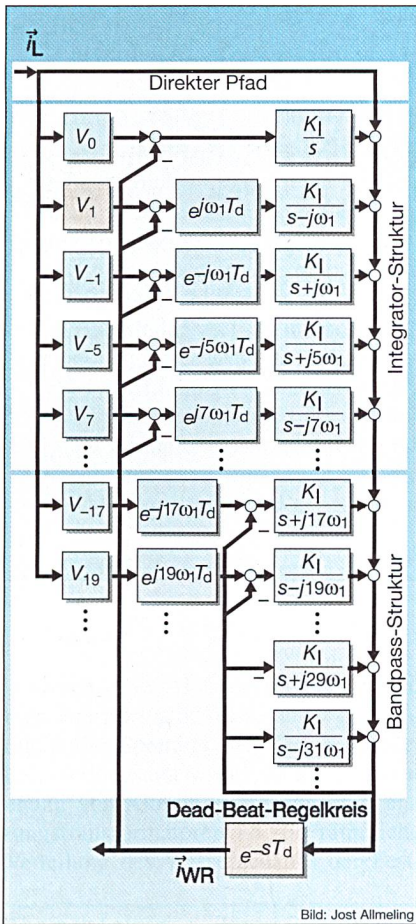


Bild 11 Struktur für die Ausregelung der Harmonischen im Laststromfilter

halb nicht für die Integrator-Struktur eigenen. Da es sich bei der Bandpass-Struktur um ein Vorfilter handelt, ist für die einzelnen Harmonischen zwingend eine Phasenkorrektur erforderlich, um die Totzeit des Dead-Beat-Regelkreises zu kompensieren. Alle Bandpässe verfügen über eine gemeinsame Rückführung, die auch die Signale des direkten Pfades und der Integrator-Struktur umfasst. Dadurch erreicht man volle Selektivität aller Oszillatoren.

Zur Regelung der Wirk- und Blindleistungsaufnahme des Aktivfilters kann der

auf die Grundschwingung abgestimmte Oszillator eingesetzt werden. Da Wirk- und Blindstrom des Wechselrichters unterschiedliche Sollwerte haben, muss der Grundschwingungsstrom im Glied  $V_1$  in diese beiden Komponenten zerlegt werden.  $V_1$  ist demnach

nicht bloss ein konstanter Faktor, sondern eine komplexe Funktion. Auf Grund der beschränkten Kapazität der Gleichspannungskondensatoren  $C_d$  (Bild 1) kann der Wechselrichter volle Wirkleistung nur während einer halben Netzperiode abgeben. Der Sollwert für den Wirkstrom wird deshalb zu Null gesetzt. Eine externe PI-Regelung sorgt dafür, dass die Gleichspannung nach Abweichungen langsam auf ihren Sollwert zurückgeführt wird.

### Labormodell

Um zu zeigen, dass der in dieser Arbeit entwickelte Regelalgorithmus für den praktischen Einsatz geeignet ist und in Echtzeit implementiert werden kann, wurde ein Labormodell des Laststromfilters aufgebaut. Der 3-Punkt-Wechselrichter wurde mit IGBT<sup>5)</sup>-Modulen realisiert, die mit 900 Hz getaktet werden. Als störender Verbraucher dienen ein Thyristor-Gleichrichter, der periodisch ein- und ausgeschaltet wird, sowie eine zweiphasige RL-Last.

Die Regelung wurde mit Hilfe von Simulink und der Toolbox PLECS implementiert und getestet. Zur Ansteuerung des Labormodells wird ein dSPACE-System eingesetzt, das die Ausführung des Simulink-Modells auf einem Signalprozessor ermöglicht. Die Auswahl der kompensierten Harmonischen entspricht Bild 11. Auf Grund der Resonanzfrequenz des passiven Filters befinden sich die Oszillatoren ab der 17. Harmonischen in der Bandpass-Struktur.

Bild 12 zeigt das Verhalten des Aktivfilters mit einer dreiphasigen Gleichrichterlast. Der starke Rippel im Wechselrichterstrom wird durch das passive Filter kurzgeschlossen, so dass er sich nicht im Netzstrom niederschlägt. Zum Zeitpunkt  $t = 20$  ms wird die Last eingeschaltet. Der Sprung des Laststromes wird dabei zu einem langsamen Anstieg im Netzstrom abgeflacht. Wegen des anfänglichen Phasenfehlers treten zunächst im Netzstrom

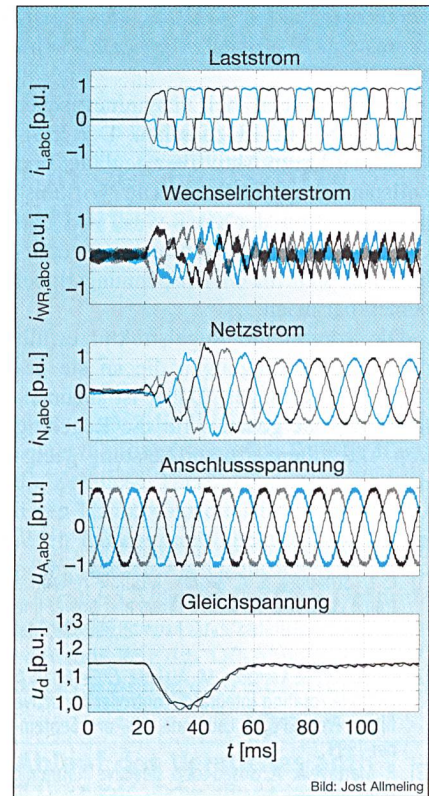


Bild 12 Verhalten des Laststromfilters mit einem dreiphasigen Dioden-Gleichrichter als störende Last

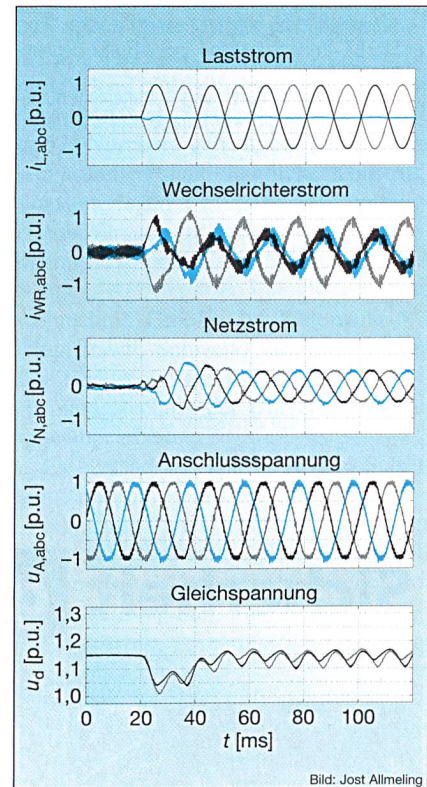


Bild 13 Verhalten des Laststromfilters bei einer un-symmetrischen störenden Last

kleine Spitzen auf. Nach zwei Grundschwingungsperioden ist der Netzstrom jedoch nahezu sinusförmig. Im stationären Zustand reduziert das Aktivfilter den



Verzerrungsfaktor (THD<sup>6</sup>) des Laststroms von 22,5% auf zulässige 3,9% im Netzstrom.

Das Verhalten bei unsymmetrischer Last ist in Bild 13 zu sehen. Der Laststrom wird vom Aktivfilter geglättet und vollständig symmetriert. Die Wirkleistungspulsung der Last wird von den Gleichspannungskondensatoren gepuffert, was sich im Gleichspannungsrippel bemerkbar macht.

Die vorgestellte Regelstruktur erfüllt unter Laborbedingungen die an sie gestellten Erwartungen. Daher ist anzunehmen, dass sie genauso für die Regelung von Aktivfiltern grosser Leistung geeignet ist.

### Referenzen

- [1] C. D. Schauder, S. A. Moran: Multiple reference frame controller for active filters and power line conditioners. United States Patent 5,309,353, Mai 1994
- [2] M. Bojrup, P. Karlsson, M. Alakula, L. Gertmar: A multiple rotating integrator controller for active filters. Proc. EPE 99, Lausanne, CD-Rom, September 1999
- [3] P. Mattavelli: A closed-loop selective harmonic compensation for active filters. IEEE Trans. on Industry Applications, Band 37, Nr. 1, S. 81-89, Januar/Februar 2001
- [4] O. Simon, H. Spaeth, K. Jüngst, P. Komarek: Experimental setup of a shunt active filter using a superconducting magnetic energy storage. Proc. EPE 97, Trondheim, Band 1, S. 447-452, September 1997
- [5] S. Mariethoz, A. Rufer: Vers le traitement numérique de l'énergie - le filtrage actif d'harmoni-

ques par DSP. Bulletin ASE/AES, Band 90, Nr. 25, S. 28-32, Dezember 1999

### Angaben zum Autor

Dr. **Jost Allmeling** arbeitet als wissenschaftlicher Assistent am Power Systems Laboratory der ETH Zürich, wo er 2001 seine Dissertation zum Thema Aktivfilter abgeschlossen hat. Er ist Mitbegründer der Plexim GmbH, eines jungen Spin-off-Unternehmens der ETH.

Power Systems Laboratory, ETH Zentrum/ETL, CH-8092 Zürich, jost@eeh.ee.ethz.ch

<sup>1</sup> IGCT: Integrated Gate Commutated Thyristor

<sup>2</sup> Dead-Beat-Regler: Zeitdiskreter Regelalgorithmus für endliche Einstellzeit. Er wird so ausgelegt, dass das geregelte System nach einer sprungförmigen Sollwertänderung in einem Minimum von Abtastintervallen den Sollwert erreicht und beibehält. Die Einstellungsgeschwindigkeit variiert in der Praxis stark mit der Genauigkeit des Streckenmodells. Im vorliegenden Fall ist die Induktivität der Entkopplungsdrosseln jedoch recht genau bekannt.

<sup>3</sup> PWM: Pulsweitenmodulation

<sup>4</sup> FFT: Fast Fourier Transform

<sup>5</sup> IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

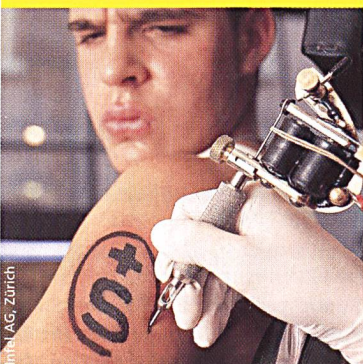
<sup>6</sup> THD: Total Harmonic Distortion

## Compensation rapide des harmoniques avec des filtres actifs

### Des filtres actifs à base de convertisseurs - une alternative économique à l'extension de réseau

Les asymétries de réseau, courants fluctuants et charges non-linéaires, comme dans les entraînements à coupure de phase, ont des répercussions sur la qualité d'alimentation du réseau. Tandis que des filtres actifs basés sur des convertisseurs à tension continue sont déjà disponibles dans le commerce pour le réseau basse tension, il n'y a pour le domaine moyenne tension à des puissances dès 10 MW que des prototypes qui en outre sont loin d'être optimisés. Les commutateurs à semi-conducteurs qui y sont employés pour les puissances élevées ne fonctionnent dans le cas typique qu'avec des fréquences de commutation de 0,5 kHz à 1 kHz. Cette fréquence a cependant des répercussions sur les harmoniques générées par le convertisseur et sur la dynamique qui est d'une importance particulière dans le cas des filtres actifs. L'article présente un procédé de réglage permettant une dynamique élevée du courant de convertisseur malgré la basse fréquence de commutation des semi-conducteurs.

## Sicherheit geht unter die Haut.



Sichere Produkte kommen nicht von ungefähr.  
Sichere Produkte sind gekennzeichnet.



**Achten Sie auf das Sicherheitszeichen** des Eidgenössischen Starkstrominspektorats (ESTI). Für eine sichere und störungsfreie Anwendung des Produkts ist dies der sichtbare Nachweis, der durch Prüfung und Marktüberwachung sichergestellt wird. Infos finden Sie unter [www.esti.ch](http://www.esti.ch)



**Das Konformitätszeichen des SEV** bietet Ihnen zusätzlich die Gewissheit, dass die Herstellung der Produkte kontinuierlich überwacht wird. Infos finden Sie unter [www.electrosuisse.ch](http://www.electrosuisse.ch)



Eidgenössisches Starkstrominspektorat  
Inspezione federale des installations à courant fort  
Ispektorato federale degli impianti a corrente forte  
Inspektorat federal d'implants da current ferm

[www.esti.ch](http://www.esti.ch)  
Luppenstrasse 1  
8320 Fehraltorf  
Tel. 01 956 12 12

**Sicher ist sicher.**