

Moderne Regelverfahren für aktive harmonische Filter

Dr.-Ing. Peter Matthes
emacon consulting GmbH, Dresden, Deutschland

Dr.-Ing. Frank Müller, Dipl.-Ing. Ludwig Schlegel
M&P Motion Control and Power Electronics GmbH, Dresden, Deutschland

1 Einleitung

Mit zunehmendem Einsatz leistungselektronischer Verbraucher und dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien rückt das Thema Qualität der elektrischen Versorgungsnetze und seine Sicherstellung immer weiter in den Fokus.

Die Folgen schlechter Netzqualität sind sehr unterschiedlich. In der Theorie ist ein ideales Netz

- jederzeit verfügbar
- hat eine konstante Frequenz von 50Hz,
- hat ideal sinusförmige Ströme und Spannungen,
- hat eine konstante Netzspannung und
- keine Spannungseinbrüche oder Komplettunterbrechungen.

In der Realität wird durch den zunehmenden Einsatz von Leistungselektronik das Netz nichtlinear belastet, was

- zu Verzerrungen der Kurvenform führt (Oberschwingungen),
- sichtbare Schwankungen der Beleuchtung verursacht (Flicker) und
- Über- und Unterschreitung der Spannungstoleranzen bewirkt.

Solche Netzurückwirkungen wirken sich störend auf andere Verbraucher aus und gefährden die Verfügbarkeit elektrotechnischer Anlagen. Eine zentrale Bedeutung haben dabei die von der Grundschwingung abweichenden höheren Frequenzanteile (Oberschwingungen), die zur Verzerrung der Kurvenform von Strom und Spannung führen.

Eine Möglichkeit zur Kompensation von Oberschwingungen sind aktive harmonische Filter, die an einem geeignet gewählten Knotenpunkt einen Kompensationsstrom einspeisen und die Verzerrungsanteile des Netzstromes kompensieren.

2 Prinzip aktiver harmonischer Filter

Aktive Netzfilter (Abb. 1) sind in der Regel parallel zur Last angeschlossen. Über Messung und Auswertung des Last- oder Netzstromes wird der Oberschwingungsanteil des Stromes in der Last bestimmt. Diese Strominformation wird einer Auswerteeinheit im aktiven Filter übergeben, die daraus den Kompensationsstrom berechnet. Der Kompensationsstrom wird dabei so geregelt, dass auf der Einspeiseseite nur noch ein sinusförmiger Strom fließt und der Oberschwingungsanteil des Laststromes durch das aktive Filter bereit gestellt wird.

Die Verzerrung des Netzstromes (THD_i) wird reduziert, was in der Folge auch die Verzerrung (THD_u) der Spannung am Anschlusspunkt verringert und die Spannungsqualität verbessert.

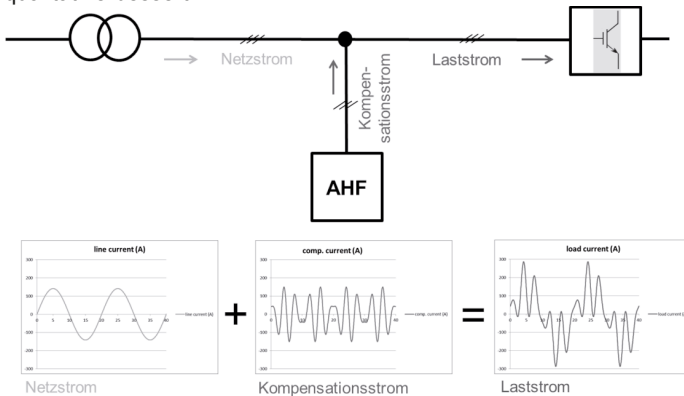


Abb. 1: Funktionsweise eines aktiven Netzfilters

Hauptaufgabe bei der Regelung eines aktiven, stromgeführten Netzfilters ist somit die Analyse des Laststromes. Der Laststrom muss in Echtzeit in

- Wirkstromanteil,
- Blindstromanteil und
- Oberschwingungsanteil aufgeteilt werden,

wobei für alle Frequenzen die Phasenlage und Amplitude ermittelt werden müssen.

Bisher wurden hier Verfahren basierend auf der Fouriertransformation (FFT – fast fourier transform) eingesetzt. Je nach Performanz und Genauigkeitsanforderungen wird über eine oder mehrere Perioden der externe Strom erfasst und dann eine FFT zur Bestimmung der Amplitude und Phasenlage der einzelnen Oberschwingungen durchgeführt.

Aus den gewonnenen Daten wird der Sollwert für den Stromregler bestimmt. Oberschwingungen können gewichtet werden, so dass einzelne Frequenzen ausgeblendet oder unterschiedlich stark kompensiert werden können. Es ist möglich, mit diesem Verfahren eine sehr gute statische Genauigkeit zu erreichen. Schnelle Lastwechsel hingegen können kaum ausgeregelt werden. Aufgrund der langen Messwerterfassung und Analyse von mindestens einer Netzperiode (20ms), sind Reaktionszeiten im ms- oder μ s-Bereich praktisch ausgeschlossen.

3 Neue Lösungsansätze

Die durch das Grundprinzip der FFT bedingte relativ langsame Reaktionszeit ist ein Hinderungsgrund für den Einsatz aktiver Filter bei schnell veränderlichen Lastprozessen,

wie sie z.B. beim Schweißen auftreten. Um diese Geschwindigkeitsnachteile auszugleichen, wurde ein grundlegend anderes Regelverfahren für die hier betrachteten stromgeführten aktiven Filter gesucht. Es sollte nach wie vor die gezielte Kompensation nur bestimmter Oberschwingungen ermöglichen, aber eine wesentlich bessere Dynamik bei sehr guter statischer Genauigkeit bieten.

3.1 Regelungsstruktur

Nach Abwägung verschiedener Verfahren und Ansätze zeigte sich, dass ein aus dem Bereich Regelung elektrischer Maschinen bekanntes Verfahren mit Abwandlungen auch für aktive Filter geeignet ist: Das Verfahren der Park- und Clark-Transformation, welches auf rotierenden Koordinatensystemen beruht.

Während sich das rotierende Koordinatensystem der Park-Transformation bei Motoren mit Rotordrehzahl dreht, wird es bei aktiven Netzfiltern mit Netzfrequenz gedreht. Zur Erfassung des Netzwinkels und der Netzfrequenz wird eine Phase Locked Loop (PLL) eingesetzt.

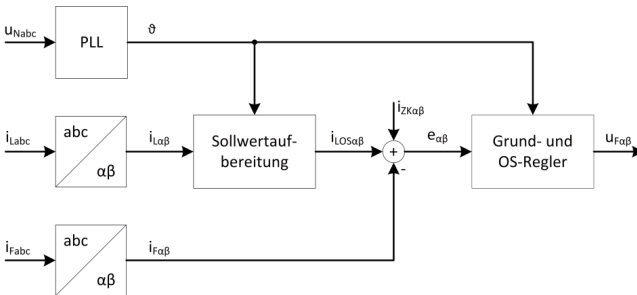


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau der Regelung eines aktiven Netzfilters

Abb. 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Regelung. Über die Erfassung der Netzspannung U_{Nabc} wird der Netzwinkel ϑ bestimmt. Der Laststrom I_{Labc} und der Filterstrom I_{Fabc} werden mit der Clark-Transformation in das $\alpha\beta$ -Koordinatensystem transformiert.

Im Modul Sollwertaufbereitung werden mit Hilfe von digitalen Filtern die Oberschwingungs- und Blindstromanteile des Laststromes bestimmt. Darüber hinaus lassen sich hier der Anteil der zu kompensierenden Blindleistung und die Lastsymmetrierung über Filter genau einstellen. An der Summationsstelle wird die Regelabweichung $e_{\alpha\beta}$ aus dem Sollwert des Zwischenkreisreglers $i_{zk\alpha\beta}$, dem Oberschwingungssollwert $i_{LOS\alpha\beta}$ und dem Filterstromistwert $i_{F\alpha\beta}$ gebildet. Die Grund- und Oberschwingungsregler bestimmen aus $e_{\alpha\beta}$ die Stellgröße $u_{Fa\beta}$ für den Modulator des Leistungsteils.

Abb. 3 zeigt die Struktur der Grund- und Oberschwingungsregler. Für die Grundschwingung wird die Regelabweichung $e_{\alpha\beta}$ mit dem Netzwinkel in dq-Koordinaten transformiert. Dort können dann herkömmliche Gleichgrößenregler verwendet werden. Die Stellgrößen

der Regler werden zurück in das $\alpha\beta$ -Koordinatensystem transformiert und gehen in die Gesamtstellgröße ein.

Für die Oberschwingungen (Harmonische) wird analog vorgegangen. Nur wird die Park-Transformation dort nicht mit dem Netzwinkel ϑ durchgeführt sondern mit seinem Vielfachen entsprechend der Ordnung der Harmonischen.

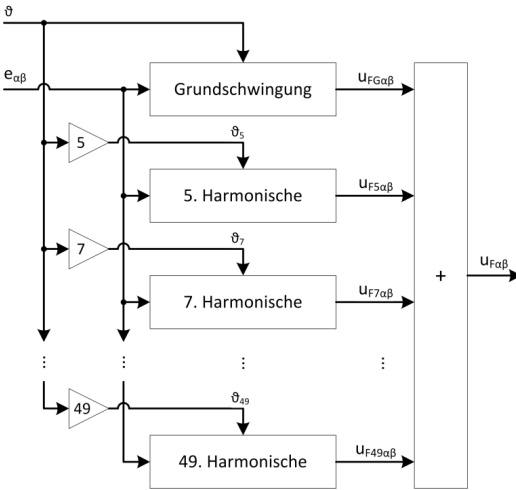


Abb. 3: Struktur der parallelen Stromregler

Insgesamt ergibt sich eine Regelstruktur mit über 100 parallel arbeitenden Reglern. Das Regelverfahren ist sehr robust. Durch analytische Betrachtungen, Simulationen und Feldversuche ist es gelungen für die Reglerparameter Werte zu finden, die nahezu unabhängig von den Netzeigenschaften und der Anzahl der aktiven Oberschwingungsregler sind. Die verteilte Implementierung der Regelung auf einer Mehrprozessor-Struktur bietet genügend Rechenleistung, um die Vorteile der „FFT-Regelung“ und der Regelung mit Vektordrehern zu kombinieren.

Das vorgestellte Filter ist in der Lage, einen Kompensationsstrom (fast) verzögerungsfrei innerhalb weniger μs einzuspeisen. Das ist die Voraussetzung, um auf schnelle Laständerung, beispielsweise bei Schweißvorgängen, reagieren zu können.

3.2 Schutzfunktionen

Je nach Anwendungsfall kann es erforderlich sein, den ausgegebenen Strom pro Oberschwingung zu begrenzen. Das Regel-Verfahren ermöglicht deshalb die Einstellung eines

- individuellen Kompensationsgrades und die
- Strombegrenzung jeder einzelnen Harmonischen.

Das Filter kann so vor Überlast geschützt werden, Resonanzstellen ausblenden und die Kompensationsleistung präzise auf die einzelnen Oberschwingungen verteilen. Sollte im Netz eine kritische Resonanzstelle auftreten, so muss ein aktives Filter diese Stelle durch ein selektives Resonanz-Monitoring erkennen.

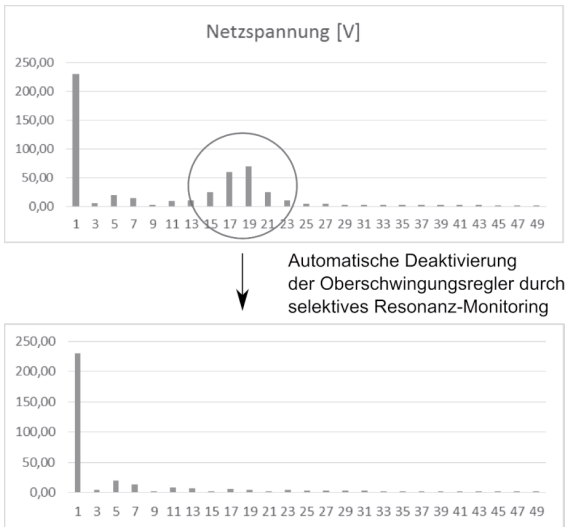


Abb. 4: Funktionsweise des selektiven Resonanz-Monitorings

Dabei werden die Oberschwingungsamplituden der Netzspannungen für jede auftretende Frequenz über eine Bewertungsmatrix analysiert. Wird für einzelne Frequenzen eine Resonanz erkannt, werden die Stellgrößen der Regler in diesem Bereich auf unkritische Werte limitiert (Abb. 4). Der Nutzer erhält über das Bediengerät des Filters ein Feedback, dass wegen Resonanzerscheinungen im Netz ein Teil der Stellgröße limitiert wurde.

3.3 Leistungsteil

Zum Einsatz kommt ein Leistungsteil in 3-Level-Topologie. Durch den Einsatz eines solchen 3-Level-Inverters statt des klassischen 2-Level-Inverters ist eine erhebliche Verbesserung des Wirkungsgrades möglich.

Diese Topologie ermöglicht den Einsatz von IGBT-Halbleitern mit geringerer Sperrspannung und dadurch deutlich geringeren Verlusten. Auch können höhere Schaltfrequenzen (hier: 24kHz) realisiert werden, wodurch die ausgangsseitigen passiven Filterelemente deutlich kleiner dimensioniert werden können.

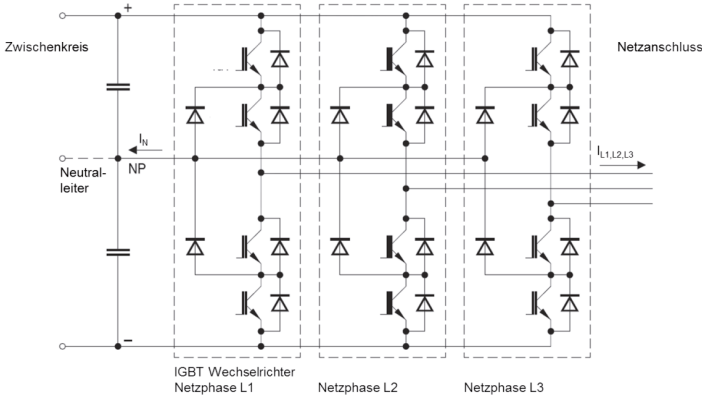


Abb. 5: IGBT Leistungsteil des aktiven Filters in 3-Level-Topologie

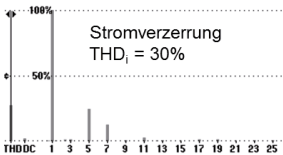
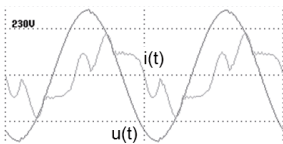
4 Fallbeispiele

Aktive Filter finden Einsatz in verschiedenen Branchen zur Lösung unterschiedlicher Probleme. Von Vorteil dabei ist, dass sich ein aktives harmonisches Filter selbstständig auf veränderte Netzparameter anpassen kann.

4.1 Oberschwingungskompensation bei elektrischen Antrieben

In einer Kläranlage werden zahlreiche elektrische Antriebe eingesetzt. Darunter Drehstromantriebe direkt am Netz sowie über Frequenzumrichter angeschlossene Antriebe. Das Lastprofil ist gekennzeichnet durch unterschiedliche Lastzustände, die sich je nach ankommender Fracht im Sekundentakt ändern können.

Ausgangssituation (unkompensiert)



Kompensation durch aktives Filter

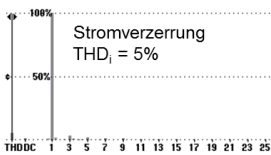
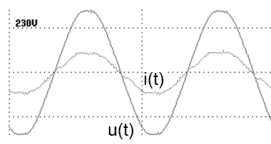


Abb. 6: Oberschwingungs- und Blindleistungskompensation in einer Kläranlage

Ohne aktives harmonisches Filter tritt im vorgestellten Beispiel ein hoher Anteil an 5. und 7. Harmonischer im Strom auf. Durch die Grundschwingungsblindleistung direkt ans

Netz angeschlossener Drehstromantriebe ist eine deutliche Phasenverschiebung des Stromes gegenüber der Netzspannung gegeben.

Durch den Einsatz des aktiven Filters kann die Stromverzerrung THD_i auf ca. 5% reduziert werden. Die Blindleistung wird ebenfalls kompensiert. Der Gesamtstrom sinkt.

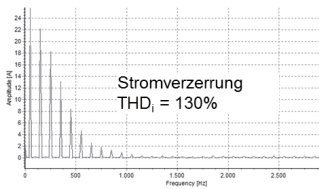
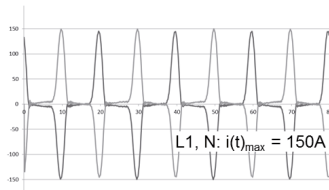
4.2 Lastsymmetrierung bei Schiefast

Bei unsymmetrischem Anschluss von Lasten kann zwischen den 3 Phasen eine Schiefast entstehen. Ursachen können die

- unsymmetrische Aufteilung einphasiger Verbraucher auf die 3 Phasen oder der
- Anschluss von Verbrauchern zwischen 2 Phasen (z.B. Schweißgeräte) sein.

In der Folge treten in den einzelnen Phasen stark unterschiedliche Lastströme auf. Diese belasten das Versorgungsnetz und den Anschluss des Verbrauchers unsymmetrisch und reduzieren die mögliche Anschlussleistung.

Ausgangssituation (Schiefast)



Lastsymmetrierung durch aktives Filter

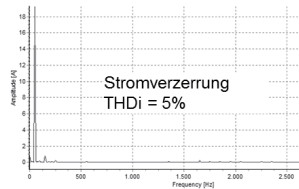
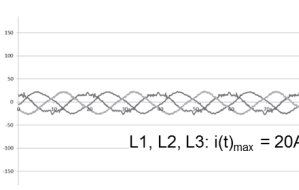


Abb. 7: Lastsymmetrierung und Oberschwingungskompensation bei Schiefast

Durch Einsatz eines aktiven harmonischen Filters werden eine Symmetrierung dieser Lasten und eine gleichmäßige Aufteilung der Wirkleistung auf die 3 Netzphasen erreicht. Der Netzstrom wird von $150A_{\text{peak}}$ auf ca. $20A_{\text{peak}}$ reduziert. Gleichzeitig werden die auftretenden Oberschwingungen kompensiert.

4.3 Resonanzdämpfung

In elektrischen Verteilnetzen können sich durch die immer vorhandenen induktiven und kapazitiven Komponenten (Kondensatoren) Resonanzfrequenzen ausbilden. Kondensatoren sind Bestandteil von zentralen Blindstromkompensationsanlagen und dezentralen Kompensationseinrichtungen, beispielsweise an Lampen.

Wenn Resonanzfrequenzen in einem kritischen Bereich auftreten ($< 1\text{kHz}$), so können sie durch im Netz vorhandene Leistungselektronik angeregt werden. Dies muss vermieden werden, da dadurch Einrichtungen und Anlagen überlastet oder zerstört werden können. Ein stromgeführtes aktives harmonisches Filter kann die Resonanzstelle nicht direkt beheben, kann aber durch geeignete Konfiguration die Anregung einer solchen Resonanz durch leistungselektronische Einrichtungen verhindern. Dabei muss durch geeignete Schutzeinrichtungen sicher gestellt werden, dass das Filter selbst nicht in die Resonanzstelle einspeist.

Im Beispiel ist als Ausgangssituation eine starke Verzerrung der Netzspannung zu erkennen, entstanden durch eine Resonanzfrequenz im Bereich der 3. (150Hz) und 5. Harmonischen (250Hz). Diese Resonanz wird verursacht durch Lampen in einem Straßentunnel mit parallel geschalteten Kondensatoren. Die Anzahl der je nach Außenheligkeit in Betrieb befindlichen Lampen beeinflusst direkt die Resonanzfrequenz. Diese wird angeregt durch die Frequenzrichter der Lüftungsanlage.

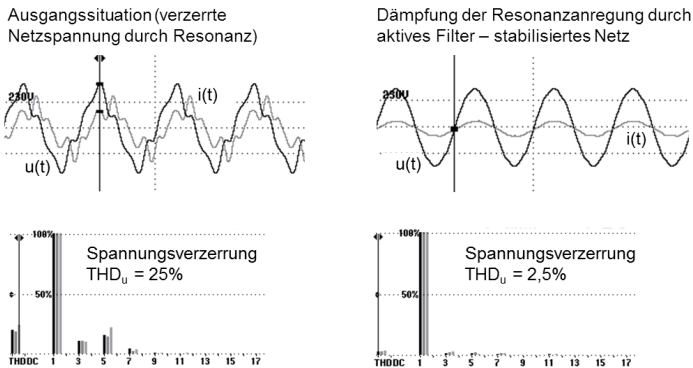


Abb. 8: Resonanzdämpfung und Verbesserung der Spannungsform

Als Abhilfemaßnahme kompensiert das aktive Filter die Oberschwingungen der Frequenzrichter, die damit nicht mehr die Resonanz anregen können. Ergebnis ist eine stark verbesserte Netzspannung, deren Verzerrungsanteil THD_u von 25% auf 2,5% reduziert wird. Das Netz wird stabilisiert und Flicker können vermieden werden.

5 Zusammenfassung

Aktive harmonische Filter können einen entscheidenden Beitrag zur Sicherstellung der Netzqualität leisten können. Mit ihnen können Oberschwingungen und Blindleistung kompensiert, Flicker reduziert und Schiefasten symmetriert werden.

Aktive Filter reagieren schnell auf Veränderungen des Laststromes und sind gleichzeitig robust gegen Variation der Streckenparameter (Netzimpedanz).

Es ist zu erwarten, dass ihr Einsatz in der kommenden Zeit weiter zunehmen und ihr Beitrag zur Sicherstellung der Netzqualität wachsen wird.