



Doctoral Thesis

## Schnelle Regelung eines Aktivfilters mit niedriger Taktfrequenz für das Mittelspannungsnetz

**Author(s):**

Allmeling, Jost

**Publication Date:**

2001

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004297846> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 14428

# Schnelle Regelung eines Aktivfilters mit niedriger Taktfrequenz für das Mittelspannungsnetz

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

vorgelegt von  
JOST ALLMELING  
Dipl.-Ing.  
geboren am 1. Juli 1972  
in Hamburg, Deutschland

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. G. Andersson, Referent  
Prof. em. Dr. H. Stemmler, Korreferent  
(Leiter der Dissertation)

2001

# Kurzfassung

Störende Lasten wie Lichtbogenöfen und Thyristorgleichrichter beziehen fluktuierende und Oberschwingungsbehaftete Ströme aus dem Energieversorgungsnetz. Diese nicht sinusförmigen Ströme rufen einen Spannungsabfall über der endlichen Innenimpedanz des Netzes hervor und verzerren so die Kurvenform der Netzspannung in der Umgebung. Der störungsfreie Betrieb von empfindlichen Verbrauchern ist dadurch gefährdet.

Aktive Filter dienen der Verbesserung der Spannungsqualität in Verteilungsnetzen. Um die Einspeisung von nicht sinusförmigen Lastströmen zu reduzieren, werden sie parallel zu störenden Lasten geschaltet. Das in dieser Arbeit untersuchte Aktivfilter besteht aus einem PWM-gesteuerten 3-Punkt-Wechselrichter mit Kondensatoren auf der Gleichspannungsseite. Der Wechselrichter ist mit dem Netzanschluss über einen Transformator verbunden. Die Konfiguration gleicht der eines statischen Blindleistungskompensators.

Die Aufgabe des Aktivfilters ist die Kompensation von transienten und harmonischen Anteilen im Laststrom, so dass nur noch Grundschwingungsanteile im Netzstrom verbleiben. Darüberhinaus kann das Aktivfilter die von der Last aufgenommene Blindleistung bereitstellen. Das Regelprinzip für das Aktivfilter ist relativ einfach: Der Laststrom wird gemessen, der Grundschwingungs-Wirkanteil wird von der Messung subtrahiert und das Ergebnis wird als Sollwert für den Wechselrichterstrom benutzt.

Im Niederspannungsnetz basieren die meisten Aktivfilter auf IGBT-Wechselrichtern, die mit Schaltfrequenzen von 10 kHz oder mehr arbeiten. Die von diesen Wechselrichtern erzeugten Oberschwingungen werden mit kleinen passiven Filtern unterdrückt. Der Wechselrichter kann als nahezu ideal steuerbare Spannungsquelle betrachtet werden. In Mittelspannungsanwendungen mit Bemessungsleistungen von mehreren MVA ist die Schaltfrequenz heutiger Wechselrichter dagegen auf einige hundert Hertz begrenzt. Moderne Hochleistungs-IGCTs können mit etwa 1 kHz schalten. Daher sind große passive Filter erforderlich, um den vom Wechselrichter erzeugten Stromrippel zu glätten. Bei schnellen Regelungen repräsentiert der Wechselrichter darüberhinaus keine ideale Spannungsquelle mehr, da der PWM-Modulator eine nennenswerte Totzeit aufweist.

In dieser Arbeit wird ein schneller Dead-Beat-Algorithmus für

PWM-gesteuerte Wechselrichter entwickelt. Dieser Algorithmus beschleunigt das Nachfahren des Laststroms und verbessert die Stabilität des Aktivfilters. Normalerweise wird der Wechselrichterstrom zur überschwingungsfreien Strommessung synchron mit den Spitzen der dreieckförmigen Trägersignale abgetastet. Hier wird das Abtasten zeitlich verschoben, um die Verzögerungszeiten im Regelkreis zu minimieren. Die nun in der Messung vorhandenen Stromüberschwingungen können berechnet und vom Wechselrichterstrom subtrahiert werden. Auf diese Weise erhält man eine überschwingungsfreie Schätzung des Wechselrichterstroms.

Der Wechselrichter soll nicht nur möglichst schnell den stochastischen Laststromänderungen nachfahren, sondern auch stationäre Harmonische im Laststrom kompensieren. Mit dem Dead-Beat-Regler alleine gelingt das nur unvollständig, weil die unvermeidbare Totzeit einen bleibenden Phasenfehler zwischen Laststrom und Wechselrichterstrom hervorruft. Bei höheren Frequenzen würde der Wechselrichter bestimmte Laststromharmonische sogar vergrößern. Daher ist eine äußere Regelschleife erforderlich, die den Phasenfehler kompensiert.

Diese Arbeit stellt verschiedene Strategien zur Filterung stationärer Harmonischer vor und vergleicht sie miteinander. Dazu gehören die Regelung in rotierenden Koordinatensystemen, integrierende Oszillatoren und die harmonische Analyse in einem Vorfilter. Aufbauend auf den integrierenden Oszillatoren wird eine Regelstruktur entworfen, die die selektive Kompensation stationärer Harmonischer ermöglicht. Dabei bleibt das Folgeverhalten des inneren Stromregelkreises bei transienten Laststromänderungen erhalten.

Um die praktische Realisierbarkeit der neuen Regelalgorithmen zu zeigen, wurde ein Labormodell des Aktivfilters mit einer Nennleistung von 10 kVA aufgebaut. Der Wechselrichter arbeitet mit einer Halbleiter-Schaltfrequenz von 900 Hz, um das Verhalten von Hochleistungs-IGCTs nachzubilden. Die Messungen an der Laboranlage zeigen eine große Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen am Digitalrechner.

## Abstract

Disturbing loads like arc furnaces and thyristor rectifiers draw fluctuating and harmonic currents from the utility grid. These non sinusoidal currents cause a voltage drop across the finite internal grid impedance, and the voltage waveform in the vicinity becomes distorted. Hence, the normal operation of sensitive consumers is jeopardized.

Active filters are a means to improve the power quality in distribution networks. In order to reduce the injection of non sinusoidal load currents shunt active filters are connected in parallel to disturbing loads. The active filter investigated in this thesis consists of a PWM controlled three-level VSI with a DC link capacitor. The VSI is connected to the point of common coupling via a transformer. The configuration is identical with an advanced static var compensator.

The purpose of the active filter is to compensate transient and harmonic components of the load current so that only fundamental frequency components remain in the grid current. Additionally, the active filter may provide the reactive power consumed by the load. The control principle for the active filter is rather straightforward: The load current is measured, the fundamental active component is removed from the measurement, and the result is used as the reference for the VSI output current.

In the low voltage grid, active filters may use inverters based on IGBTs with switching frequencies of 10 kHz or more. The harmonics produced by those inverters are easily suppressed with small passive filters. The VSI can be regarded nearly as an ideally controllable voltage source. In medium voltage applications with power ratings of several MVA, however, the switching frequency of today's VSIs is limited to some hundred Hertz. Modern high power IGCTs can operate at around 1 kHz. Therefore, large passive filters are needed in order to remove the current ripple generated by the VSI. Furthermore, in fast control schemes the VSI no longer represents an ideal voltage source because the PWM modulator produces a considerable deadtime.

In this thesis a fast dead-beat algorithm for PWM operated VSIs is developed. This algorithm improves the load current tracking performance and the stability of the active filter. Normally, for a harmonics free current measurement the VSI current would be sampled synchronously with the tips of the triangular carriers. Here, the current acquisition is shifted in order to minimize the delays in the control loop. The

harmonics now included in the measurement can be calculated and subtracted from the VSI current. Thus, an instantaneous current estimation free of harmonics is obtained.

The VSI not only has to track stochastic transients as fast as possible but also to compensate stationary harmonics in the load current. With the dead-beat control alone a complete compensation cannot be achieved because the inherent dead time causes a persistent phase error between load current and VSI current. At higher frequencies the VSI would even amplify certain load current harmonics. Therefore, an outer control loop is required that compensates for the the phase error.

This thesis presents and compares different strategies for filtering stationary harmonics such as rotating reference frames, integrating oscillators and harmonic analysis in a prefilter. Based on integrating oscillators a control structure is derived that allows selective harmonics compensation. The fast tracking performance of the inner control loop is maintained for load current transients.

To demonstrate the feasibility of the new control algorithms a 10 kVA laboratory model of the active filter has been set up. The VSI operates at a semiconductor switching frequency of 900 Hz according to the capability of high power IGCTs. The measurements made in the laboratory show good correspondence with the simulation results on a microcomputer.