

# Detektion symmetrischer Oberschwingungskomponenten durch generalisierte Integratoren zweiter Ordnung

M. Sc. Benjamin Hoepfner, Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick,  
Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Lehrstuhl für EMV, Magdeburg, Deutschland, benjamin.hoepfner@ovgu.de

## 1 Einleitung

Durch die zunehmende Belastung des Energieversorgungsnetzes durch Oberschwingungsströme und -spannungen ist die Entwicklung von aktiv geregelten, leistungselektronischen Oberschwingungsfiltern in den letzten Jahren weit vorangeschritten. Dabei kann das Prinzip der Einspeisung eines Kompensationsstromes hinsichtlich der Geschwindigkeit sowie Genauigkeit mit einer separaten Regelung einer jeweiligen Oberschwingung durch Auftrennen in die jeweiligen symmetrischen Komponenten enorm erhöht werden [1, 2]. Bekannte Verfahren zur Anteilsbestimmung können in frequenz- und zeitbasierte aufgeteilt werden und sind beispielsweise die Analyse durch eine Diskrete Fourier Transformation (DFT) [3, 4] mit anschließender Bestimmung der Komponenten (frequenzbasiert), die Verwendung synchroner Referenzrahmen (SRF) für jede Harmonische und deren Komponenten [5, 6] mit Einsatz verschiedener Filter im Referenzrahmen (zeitbasiert) oder die Verwendung von frequenzadaptiven Filtern, die gleichzeitig Phasenverschiebungen zur Komponentenbestimmung durchführen (zeitbasiert) [7].

Zu letzteren gehören sogenannte generalisierte Integratoren zweiter Ordnung (Second Order Generalized Integrator - SOGI) und werden dank ihrer Frequenzadaptivität als Eingangsfiler für Phasenregelschleifen verwendet [8]. In dreiphasigen Systemen können durch Einsatz zweier SOGI-Filter (Dual Second Order Generalized Integrator - DSOGI) die symmetrischen Komponenten bestimmt [9] werden. Es liegt also nahe, solche schon in der Regelstruktur befindlichen Filter zu verwenden. Soll eine möglichst hohe Unempfindlichkeit gegenüber anderer Harmonischer erfolgen, können mehrere SOGI Filter zur Bestimmung einer jeweiligen Frequenz eingesetzt werden.

In dieser Arbeit wird gezeigt, wie mehrere SOGI Filter miteinander interagieren und wie mögliche Instabilitäten vermieden werden können. Dabei wird im nächsten Abschnitt auf die symmetrische Komponentenbestimmung mit SOGI eingegangen. Anschließend wird das Verfahren zum Einsatz mehrerer Filter beschrieben und der Einsatz zur Bestimmung der symmetrischen Komponenten verdeutlicht.

## 2 Symmetrische Komponentenbestimmung durch DSOGI-Filter

Mit einer Transformation des dreiphasigen Spannungssystems in ein zweiphasiges (Clarke Transformation), genügt bei der Bestimmung der symmetrischen Komponenten eine Rotation der Phasoren um  $90^\circ$ , um beispielsweise das in den Gleichungen (1-4) gezeigte Mitsystem zu berechnen. Das Gegensystem verhält sich äquivalent.

Durch

$$\begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} = [T_{abc}^+] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, [T_{abc}^+] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix}, a = e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (1)$$

wird das Mitsystem eines Dreiphasensystemes bestimmt [10,11]. Die Transformationsvorschrift für das Zweiphasensystem erfolgt mit

$$[T_{\alpha\beta}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Mit

$$[T_{\alpha\beta}^+] = [T_{\alpha\beta}] [T_{abc}^+] [T_{\alpha\beta}]^{-1} \quad (3)$$

kann eine Drehmatrix zur Bestimmung des Mitsystems im Zweiphasensystem nach Gleichung

$$[T_{\alpha\beta}^+] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\frac{3\pi}{2}} & 0 \\ e^{-j\frac{\pi}{2}} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

gemäß

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^+ \\ v_\beta^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}, q = e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (5)$$

ermittelt werden.

Offensichtlich ist für die Bestimmung der symmetrischen Komponenten im Zweiphasensystem lediglich eine Rotation von 90° notwendig.

Abbildung 1 zeigt die Struktur eines generalisierten Integrators zweiter Ordnung.

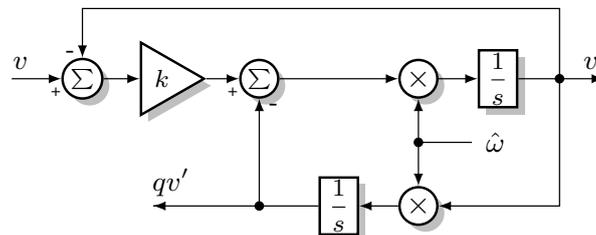


Abbildung 1: Second Order Generalized Integrator

Die Übertragungsfunktionen zu den beiden Ausgängen sind [8]

$$G(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{k\hat{\omega}s}{s^2 + k\hat{\omega}s + \hat{\omega}^2}, \quad (6a)$$

$$G_q(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k\hat{\omega}^2}{s^2 + k\hat{\omega}s + \hat{\omega}^2}. \quad (6b)$$

In Abbildung 2 sind die Übertragungsfunktionen der beiden Ausgänge des SOGI-Filters dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für die Übertragungsfunktion  $\frac{qv'(s)}{v(s)}$  bei einer eingestellten Mittenfrequenz  $\frac{\hat{\omega}}{2\pi}$  (hier 50 Hz) eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  vorliegt mit Hilfe derer die symmetrischen Komponenten der gewählten Frequenz nach Gleichung (5) unter Verwendung einer zweiten SOGI Struktur bestimmt werden können.

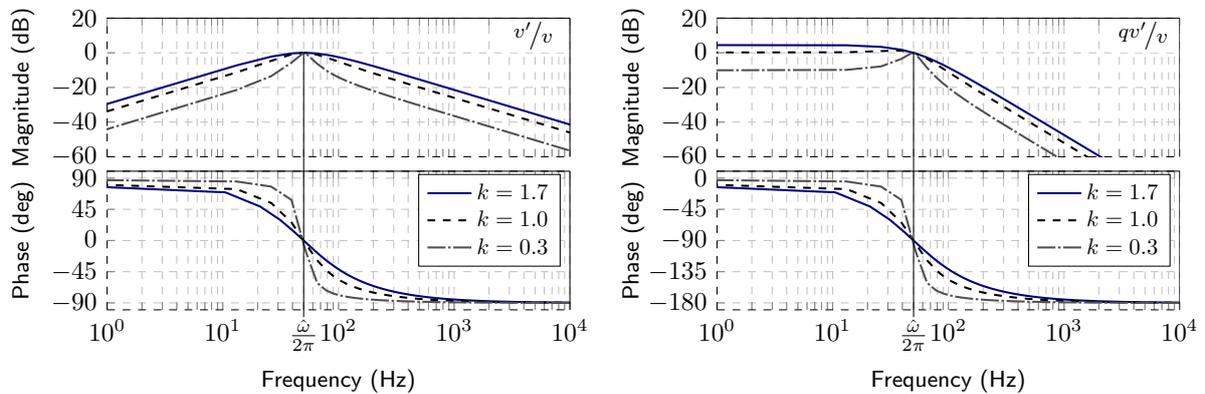


Abbildung 2: Übertragungsfunktionen des SOGI-Filters für verschiedene Verstärkungsfaktoren [12]

Durch Transformation der Übertragungsfunktion in den Zeitbereich und einer Anregung mit  $v(t) = \hat{V} \sin(\omega t)$ , wobei die Amplitude  $\hat{V}$  mit 1V angenommen wird, lässt sich mit

$$v'(t) = \frac{k\hat{\omega}\omega}{\sqrt{k^2\hat{\omega}^2\omega^2 + (\hat{\omega}^2 - \omega^2)^2}} \sin(\omega t - \delta) - A \sin\left(\sqrt{1 - k^2/4} \hat{\omega} t - \phi_1\right) e^{-\frac{k\hat{\omega}t}{2}} \quad (7)$$

und

$$qv'(t) = \frac{k\hat{\omega}\omega}{\sqrt{k^2\hat{\omega}^2\omega^2 + (\hat{\omega}^2 - \omega^2)^2}} \cos(\omega t - \delta) - A \cos\left(\sqrt{1 - k^2/4} \hat{\omega} t - \phi_2\right) e^{-\frac{k\hat{\omega}t}{2}} \quad (8)$$

eine Filterwirkung sowie eine Abhängigkeit des transienten Verhaltens des Filters durch den Verstärkungsfaktor  $k$  erkennen, der offensichtlich seine Bandbreite beeinflusst [12]. Dabei ist  $\omega$  die Frequenz des Eingangssignals und  $\hat{\omega}$  eine feste oder stetig nachzuführende Mittenfrequenz auf die das Filter eingestellt wird.

### 3 Einsatz multipler frequenzadaptiver SOGI Filter

#### 3.1 Prinzip multipler SOGI Filter

Ist eine hohe Dämpfung der umliegenden Harmonischen gewünscht, könnte eine sehr kleine Bandbreite, also ein sehr kleines  $k$  gewählt werden. Nach Gleichungen (7) sowie (8) würde das jedoch mit einer großen Zeitkonstanten des transienten Anteils einhergehen. Das Filter bräuchte unerwünscht lange, um auf Veränderungen zu reagieren. Eine

weitere Möglichkeit ist der Einsatz paralleler, zum Hauptfilter arbeitende, Filter. In [13] wird ein System multipler SOGI-Filter (MSOGI) vorgestellt, um das Eingangssignal für eine Frequenzregelschleife zu filtern. Abbildung 3 verdeutlicht das Prinzip.

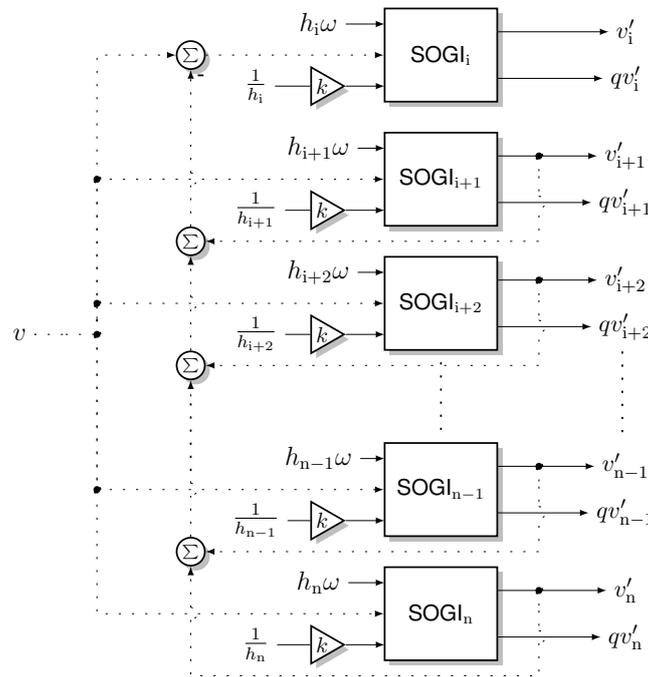


Abbildung 3: Multiple SOGI Filter

Die Eingangsgröße  $v$  wird einer Anzahl  $n$  SOGI Filtern zugeführt, deren Mittenfrequenz jeweils auf einen zu filternden Frequenzanteil  $h_i\omega$  gestimmt wird, wobei  $h_i$  die Ordnung der betrachteten Harmonischen und  $\omega$  deren Grundfrequenz darstellt. In Abbildung 3 könnte beispielsweise  $\text{SOGI}_1$  die 50 Hz Komponente,  $\text{SOGI}_2$  die 150 Hz Komponente usw. sein. Die Summe der unerwünschten Anteile werden der Eingangsgröße  $v$  abgezogen und dem Filter für die gewünschte Frequenz zugeführt. Dieser filtert seinerseits weitere Anteile heraus und führt die unter Kapitel 2 vorgestellte Rotation zur Bestimmung der symmetrischen Komponenten durch. Da sich mit steigender Ordnung der Harmonischen die Bandbreite nach Gleichungen (6a) und (6b) des Filters erhöht, muss der Verstärkungsfaktor  $k$  eines jeden Filters durch die jeweilige Ordnung geteilt werden, so dass die Bandbreite für jedes Filter identisch ist.

Mithilfe der Gleichungen (6a) und (6b) können die Übertragungsfunktion des Gesamtsystems für beide Ausgänge des SOGI Filters mit

$$G_{\text{ges},i}(s) = \frac{v'_i(s)}{v(s)} = G_i(s) \left( 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n G_j(s) \right), \quad (9a)$$

$$G_{q,\text{ges},i}(s) = \frac{qv'_i(s)}{v(s)} = G_{q,i}(s) \left( 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n G_j(s) \right) \quad (9b)$$

beschrieben werden.

Der Index  $i$  steht hierbei für die Frequenz, die das Filter passieren soll und  $j$  für die Frequenzen, die von den zusätzlichen Filtern gedämpft werden sollen. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die Übertragungsfunktion für  $G_{\text{ges},i}(s)$  an einem Beispiel zur Filterung einer Grundschwingung von 50 Hz und den vier nächsten dazugehörigen, ungeraden Harmonischen bei einem Verstärkungsfaktor von eins ( $i = 1, n = 4, k = 1$ ).

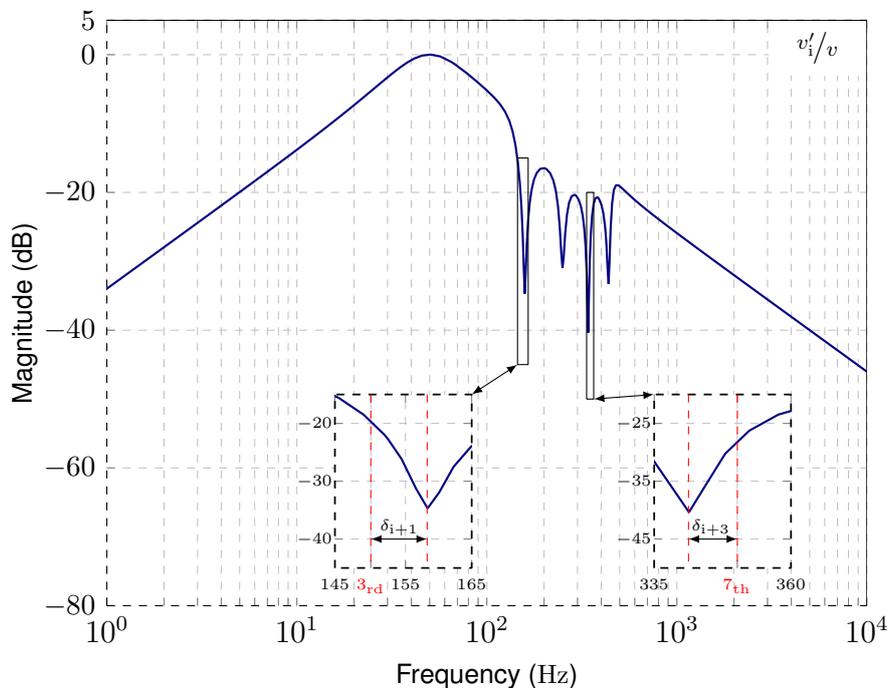


Abbildung 4: MSOGI-Übertragungsfunktion für  $w = 2\pi 50\text{Hz}$ ,  $i = 1, n = 4, k = 1$

Offenbar können mit dieser Methode gezielt zusätzliche Frequenzanteile gedämpft werden, die dem gewünschten Signal überlagert sind. Die Abbildung 4 zeigt jedoch auch, dass sich die Nullstellen des Gesamtsystems durch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Übertragungsfunktionen verschieben. So ist am Beispiel der dritten Harmonischen eine Frequenzverschiebung  $\delta_{i+1}$  um etwa 10 Hz von der gewünschten Mittenfrequenz zu beobachten. In Folge dieser Verschiebung wird dritte Harmonische um etwa 13 dB weniger gedämpft als es möglich wäre.

### 3.2 Anpassung der Frequenzverschiebung

Um den Dämpfungsverlust als Folge der Frequenzverschiebung zu minimieren, muss die Mittenfrequenz eines jeden Filters angepasst werden. Die Übertragungsfunktion des gesamten Systems hat hierbei die Ordnung  $2n - 1$  und lässt sich bei einer höheren Anzahl von eingesetzten Filtern schwer analytisch bestimmen.

Eine numerische Lösung der Gleichungen (9a) und (9b) ist jedoch möglich. Durch bestimmen der Nullstellen der Übertragungsfunktion mit

$$G_{\text{ges},i}(s_x) = G_{\text{ges},i}(j\omega_x) = 0 \quad (10)$$

ist es möglich die sich einstellenden Frequenzen an den Nullstellen zu bestimmen. Durch Subtraktion dieser mit der Sollfrequenz kann die Abweichung  $\delta_x$  für jede Nullstelle  $x$  nach

$$\delta_x = \omega_x - \omega_{x,\text{soll}} \quad (11)$$

bestimmt werden. Zur Bereinigung der Frequenzabweichung müssen die Mittenfrequenzen der zusätzlichen Filter um die Abweichung  $\delta_x$  der jeweiligen Frequenz verschoben werden. Abbildung 5 zeigt die Anpassung durch Subtraktion der Abweichung.

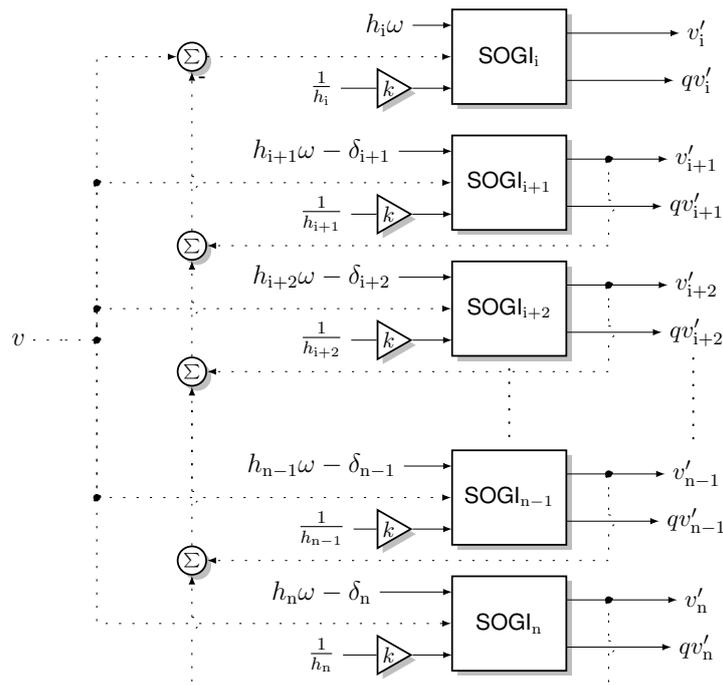


Abbildung 5: Multiple SOGI Filter

Die nachfolgenden Abbildung 6 zeigt den Vergleich zwischen der unangepassten Übertragungsfunktion  $G_{\text{ges},i}(s)$  und der angepassten Übertragungsfunktion  $G_{\text{ges},i,\delta}(s)$ . Es ist erkennbar, dass die Nullstellen der angepassten Übertragungsfunktion deutlich näher an den gewünschten Frequenzstellen liegen als ohne Anpassung. Dadurch kann eine sehr hohe Dämpfung für diese Anteile gewährleistet werden. Dass die gewünschten Frequenzen nicht exakt getroffen werden lässt sich durch iterative Bestimmung der Abweichungen erklären. Durch Anpassung aller Abweichungen verändert sich die Charakteristik eines jeden Filters, der seinerseits erneut Einfluss auf die benachbarten Frequenzen hat. Ist eine genauere Lösung nötig, kann eine zweite Iteration der Gleichungen (10) und (11) vorgenommen und zusätzlich zur Anpassung addiert werden.

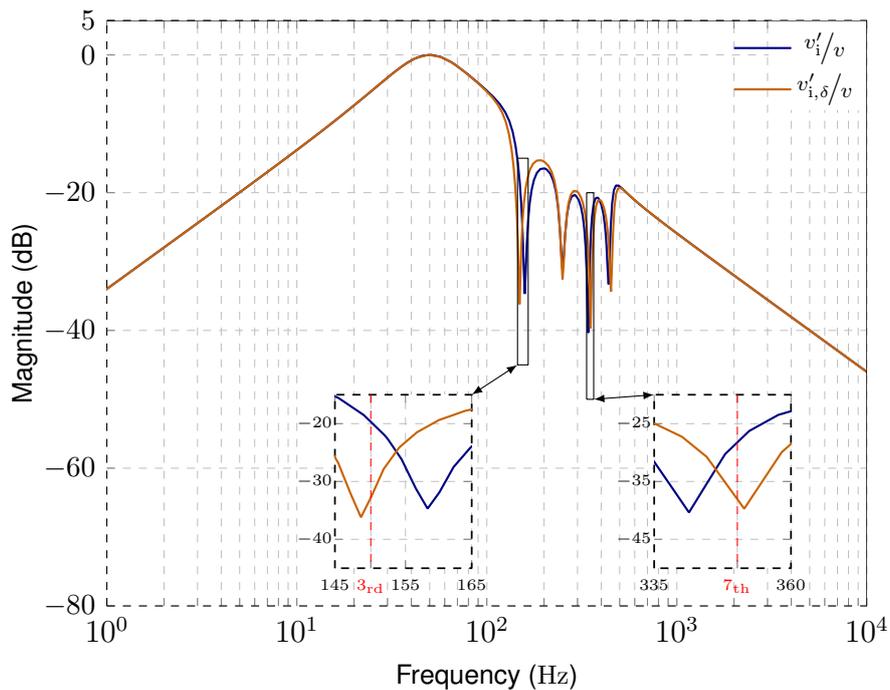


Abbildung 6: MSOGI-Übertragungsfunktionen für  $\omega = 2\pi 50\text{Hz}$ ,  $i = 1$ ,  $n = 4$ ,  $k = 1$ , angepasst (orange) und unangepasst (blau)

### 3.3 Symmetrische Komponenten durch multiple DSOGI Filter

Die in den Abschnitten 3.1 und 3.2 getroffenen Annahmen können auf den Einsatz eines dualen SOGI Filters zur Bestimmung der symmetrischen Komponenten angewendet werden. Gezeigt wurde die Filterung eines einphasigen Signals  $v$ , das aber auch die  $\alpha$ - bzw.  $\beta$ -Komponente eines dreiphasigen Signals darstellen kann. Der Filteraufwand für eine Komponente bleibt dabei gleich und verdoppelt sich in Summe für beide Komponenten. Mit Hilfe von Gleichung (5) lässt sich nach der Filterung mit einem multiplen DSOGI Filter das gewünschte Mitsystem nahezu störungsfrei bestimmen.

## 4 Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt, dass mit Hilfe eines frequenzadaptiven Filters symmetrische Komponenten beliebiger Oberschwingungen aus einem dreiphasigen Signal ermittelt werden können. Dabei kann es nötig sein, Frequenzen, die nahe der gewählten Mittenfrequenz des Filters liegen, mit zusätzlichen frequenzadaptiven Filtern zu eliminieren. Die Nullstellen der zusätzlichen Filter beeinflussen sich jedoch im Gesamtsystem, so dass eine Anpassung erfolgen muss. Diese Anpassung wird durch eine Nullstellenbestimmung und nachträglicher Anpassung der Filterfrequenzen realisiert. Das Ergebnis ist ein frequenzadaptives Filtersystem das nahezu vollständig Harmonische einer Grundschwingung eliminiert und dabei Signale zur Bestimmung symmetrischer Komponenten bereitstellt.

## Literatur

- [1] RAO, U. K. ; MISHRA, M. K. ; GHOSH, A.: Control Strategies for Load Compensation Using Instantaneous Symmetrical Component Theory Under Different Supply Voltages. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 23 (2008), Oct, Nr. 4, S. 2310–2317. – ISSN 0885–8977
- [2] MATTHES, P ; MÜLLER, F.: Moderne Regelverfahren für aktive harmonische Filter. In: *emv - Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit* (2016), S. 233 – 240
- [3] SOZANSKI, K. ; JARNUT, M.: Three-phase active power filter using the sliding DFT control algorithm. In: *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005. – ISSN null, S. 10 pp.–P.10
- [4] CHEN, H. ; LIU, H. ; XING, Y. ; HU, H.: Enhanced DFT-Based Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 34 (2019), Aug, Nr. 8, S. 8017–8030
- [5] CAMPOS-GAONA, D. ; PEÑA-ALZOLA, R. ; MONROY-MORALES, J. L. ; ORDONEZ, M. ; ANAYA-LARA, O. ; LEITHEAD, W. E.: Fast Selective Harmonic Mitigation in Multifunctional Inverters Using Internal Model Controllers and Synchronous Reference Frames. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64 (2017), Aug, Nr. 8, S. 6338–6349
- [6] KESLER, M. ; OZDEMIR, E.: Synchronous-Reference-Frame-Based Control Method for UPQC Under Unbalanced and Distorted Load Conditions. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58 (2011), Sep., Nr. 9, S. 3967–3975
- [7] MASSOUD, A. M. ; FINNEY, S. J. ; WILLIAMS, B. W.: Review of harmonic current extraction techniques for an active power filter. In: *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, 2004, S. 154–159
- [8] CIBOTARU, M. ; TEODORESCU, R. ; BLAABJERG, F.: A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator. In: *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006, S. 1–6
- [9] RODRÍGUEZ, P. ; TEODORESCU, R. ; CANDELA, I. ; TIMBUS, A. V. ; LISERRE, M. ; BLAABJERG, F.: New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In: *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006, S. 1–7
- [10] FORTESCUE, C. L.: Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. In: *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers* 37 (1918), June, Nr. 6, S. 629–716
- [11] LYON, W.: *Application of the method of symmetrical components*. Mc Graw-Hill y, 1937
- [12] HOEPFNER, B. ; VICK, R.: Symmetrical Components Detection With FFDSOGI-PLL Under Distorted Grid Conditions. In: *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 2019. – ISSN null, S. 1–6
- [13] RODRIGUEZ, P. ; LUNA, A. ; CANDELA, I. ; MUJAL, R. ; TEODORESCU, R. ; BLAABJERG, F.: Multiresonant Frequency-Locked Loop for Grid Synchronization of Power Converters Under Distorted Grid Conditions. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58 (2011), Jan, Nr. 1, S. 127–138