

Einfluss von Leitungsimpedanzen auf verschiedene Verknüpfungspunktspannungen bei der Kompensation von Oberschwingungen durch Active Front-Ends

M. Sc. Benjamin Hoepfner, Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, M. Sc. Anke Fröbel,
Otto-von-Guericke Universität, Institut für Medizintechnik
Lehrstuhl für EMV, Magdeburg, Deutschland, Benjamin.Hoepfner@ovgu.de

1 Einleitung

Zur Minderung der Aussendung von Oberschwingungen wird die netzseitige Kopplung von Frequenzumrichtern zunehmend mit sog. Einspeise-Rückspeiseeinheiten (engl. Active Front-Ends) mit Spannungszwischenkreis ausgestattet, die nahezu rein sinusförmige Ströme generieren. Regenerative Energieerzeugungsanlagen, die durch Wechselrichter mit dem Netz verbunden sind, bedienen sich ebenfalls dieser Schaltungstopologie (in diesem Zusammenhang auch häufig Active Infeed Converter genannt).

Active Front-Ends (bzw. Active Infeed Converter) können durch eine geeignete Regelung nahezu beliebige Stromverläufe realisieren. Folglich ist es theoretisch möglich, genau solche Ströme einzuspeisen, dass im Netz vorhandene Oberschwingungen kompensiert werden. Das Ergebnis wäre eine verbesserte Spannungsqualität im gesamten Energieversorgungsnetz. Deshalb bieten Photovoltaikanlagen ebenso wie öffentliche Ladestationen für Elektrofahrzeuge die Chance, der Oberschwingungsbelastung im gesamten Energieversorgungsnetz entgegen zu wirken [1].

Für die Einprägung von Stromharmonischen¹ ist eine geeignete Messgrundlage erforderlich. Da in den öffentlichen Netzen keine Möglichkeit besteht, die Ströme jedes einzelnen Oberschwingungsverursachers zu erfassen, kann folglich nur die Spannung am Verknüpfungspunkt (Point of common coupling - PCC) U_{PCC} des jeweiligen Active Front-Ends (AFE) zur Generierung des erforderlichen Stromsignals herangezogen werden.

Die in der Versorgungsspannung enthaltenen Harmonischen sind das Ergebnis der Kopplung von Oberschwingungsströmen mit der übergeordneten Netzimpedanz. Die Kompensation dieser Spannungsüberschwingungen würde eine aus Sicht des Netzes gleichzeitige Kompensation der Oberschwingungsströme bedeuten. Eine zusätzliche Leitungsimpedanz trennt jedoch häufig elektrisch den eigentlichen Verknüpfungspunkt zum öffentlichen Netz mit dem Spannungsmesspunkt der Anlage. In diesem Beitrag soll daher der, durch die zusätzliche Leitungsimpedanz entstehende, Fehler bei der Kompensation von Oberschwingungen auf Grundlage einer Spannungsmessung am Verknüpfungspunkt untersucht werden.

2 Betrachtetes Netzwerk

Als Grundlage der Untersuchung soll die in Abbildung 1 dargestellte Netzsituation dienen. Das einphasige dargestellte Netzersatzschaltbild beinhaltet einen Niederspannungsnetz-

¹Die Begriffe Harmonische und Oberschwingungen werden hier (entgegen der geltenden Normen) synonym behandelt

anschluss mit unendlich hoher Kurzschlussleistung, das über eine Netzimpedanz Z_{grid} mit einer Sammelschiene PCC,1 verbunden ist. An dieser sind eine lineare Last Z_{load} und eine Stromquelle zur Einprägung von Oberschwingungen Z_{dist} angeschlossen. Sie sollen eine überschwingungsbehaftete Last darstellen, die durch die Spannung an dem Verknüpfungspunkt Eins gespeist werden. Über eine Leitungsimpedanz Z_{line} ist die Sammelschiene PCC,2 mit der von PCC,1 verbunden. An der Schiene Zwei befindet sich das als Stromquelle I_{afe} mit dem Verknüpfungspunkt verbundene Active Front-End. Der Index k der jeweiligen Elemente steht dabei für die Ordnung der Harmonischen. Dementsprechend wird bei $k = 1$ die Grundschwingungskomponente des Systems betrachtet.

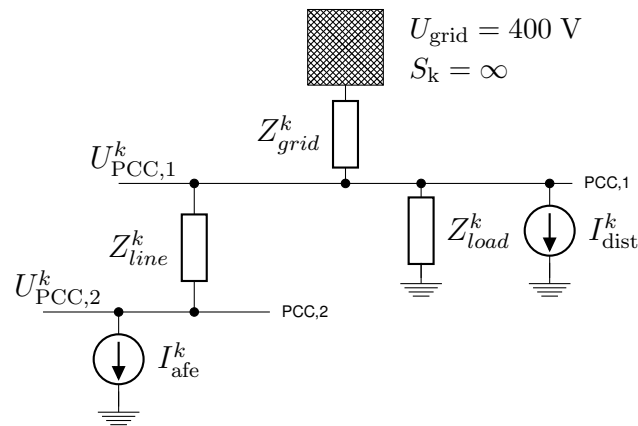


Abbildung 1: Singleline-Diagramm der Versuchsanordnung

Diese Anordnung ist dem verwendeten Ersatzschaltbild aus [1] angelehnt und erweitert es um eine zusätzliche Leitungsimpedanz. Ziel ist es, durch Messung der Spannung $U_{PCC,2}^k$ den Active Font-End einen Strom I_{afe}^k so einspeisen zu lassen, dass die Spannung am Verknüpfungspunkt Eins nur noch die Grundschwingungskomponente enthält. So wird die Netzimpedanz entsprechend der in der DIN EN 61000-3-3 [2] vorgegebenen Bezugsimpedanz von $Z_{grid} = 0,24\ \Omega + j0,15\ \Omega$ bezogen auf 50 Hz je Außenleiter gewählt. Die lineare Last ist rein ohmsch und hat gegenüber [1] einen höheren Widerstand von $Z_{load} = 2,5\ \Omega$, um den Einfluss der eingepprägten Stromharmonischen zu vergrößern. Diese bilden sich aus Oberschwingungen der siebten und elften Ordnung, die entsprechend ihres Drehsystems (die siebte Harmonische entspricht dem Mitsystem, die elfte dem Gegensystem) ohne Phasenverschiebung zur Spannung und mit einer Amplitude von $I_7 = 20\text{ A}$ und $I_{11} = 10\text{ A}$ in das Netz eingepragt werden. Die hinzugefügte Leitungsimpedanz ist mit den längenbezogenen Impedanzwerten von $Z'_{line} = (0,206 + j\omega t \cdot 0,2553 \cdot 10^{-3})\text{ m}\Omega/\text{m}$ so bemessen, dass sie denen eines in der Niederspannung häufig verwendeten NAYY Kabels mit einem Querschnitt von 150 mm^2 entsprechen. Kapazitäten der Leiter gegen Nullpotential und der Leiter untereinander werden aufgrund der Untersuchungen im niederen Frequenzbereich außer Acht gelassen.

3 Mathematische Beschreibung des Netzwerkes

Von Interesse sind die Spannungen an den Verknüpfungspunkten in Abhängigkeit von den eingespeisten Stromharmonischen. Durch Aufstellen der Abhängigkeiten aller Quellen lassen sich nach dem Superpositionsprinzip wie in [3] die nachfolgenden Gleichungen (1) und (2) beschreiben. Sie zeigen die Gesamtspannungen an den jeweiligen Sammelschienen.

$$U_{\text{PCC},1}^k = U_N \cdot \frac{Z_{\text{load}}^k}{Z_{\text{grid}}^k \cdot Z_{\text{load}}^k} + \frac{Z_{\text{load}}^k \cdot Z_{\text{grid}}^k}{Z_{\text{load}}^k + Z_{\text{grid}}^k} \cdot (I_{\text{dist}}^k + I_{\text{afe}}^k) \quad (1)$$

$$U_{\text{PCC},2}^k = U_N \cdot \frac{Z_{\text{load}}^k}{Z_{\text{grid}}^k \cdot Z_{\text{load}}^k} + \frac{Z_{\text{load}}^k \cdot Z_{\text{grid}}^k}{Z_{\text{load}}^k + Z_{\text{grid}}^k} \cdot I_{\text{dist}}^k + \left(\frac{Z_{\text{load}}^k \cdot Z_{\text{grid}}^k}{Z_{\text{load}}^k + Z_{\text{grid}}^k} + Z_{\text{line}}^k \right) \cdot I_{\text{afe}}^k \quad (2)$$

Sollen alle Spannungsharmonischen am Verknüpfungspunkt Zwei zu Null kompensiert werden, müssen die Spannungsharmonischen, entstanden durch den Oberschwingungsstrom, in entgegengesetzter Phasenlage zu den Spannungsharmonischen liegen, die durch die Stromharmonischen des AFEs entstehen. Alle Grundschwingungskomponenten werden folglich nicht betrachtet [4]. Da die Spannung am Verknüpfungspunkt Zwei gemessen und somit deren Spannungsharmonische kompensiert werden sollen, folgt aus Gleichung (2) mit der genannten Bedingung folgende Gleichung (3).

$$0 = \frac{Z_{\text{load}}^k \cdot Z_{\text{grid}}^k}{Z_{\text{load}}^k + Z_{\text{grid}}^k} \cdot I_{\text{dist}}^k + \left(\frac{Z_{\text{load}}^k \cdot Z_{\text{grid}}^k}{Z_{\text{load}}^k + Z_{\text{grid}}^k} + Z_{\text{line}}^k \right) \cdot I_{\text{afe}}^k, \quad \forall k > 1 \quad (3)$$

In dem verwendeten Beispiel ist eine komplette Kompensation der Spannungsharmonischen am Verknüpfungspunkt Eins dann erfolgt, wenn das Verhältnis zwischen den Oberschwingungsströmen der Lasten und den kompensierenden Oberschwingungsströmen des Active Front-Ends gleich Minus Eins ist. Wird dieses aus Gleichung (3) gebildet, so ist erkennbar, dass eine ideale Kompensation nur dann erfolgen kann, wenn die Leitungsimpedanz gleich null ist.

$$\frac{I_{\text{dist}}^k}{I_{\text{afe}}^k} = - \left(1 + Z_{\text{line}}^k \cdot \left(\frac{1}{Z_{\text{grid}}^k} + \frac{1}{Z_{\text{load}}^k} \right) \right) \quad (4)$$

Somit kann als erstes Ergebnis dieser Untersuchung konstatiert werden, dass bei fehlender Messung der Spannung des Verknüpfungspunktes, an welchem Spannungsharmonische kompensiert werden sollen oder der Ströme aller Oberschwingungsverursacher, es nicht möglich ist, eine vollständige Negierung der Spannungsoberschwingungen und somit auch Stromoberschwingungen zum übergeordneten Netz zu erwirken, wenn das Aktiv Front-End durch eine Leitungsimpedanz elektrisch vom Verknüpfungspunkt entfernt ist.

4 Netz- und Simulationsmodell

4.1 Vollständiges Netzmodell

Zur weiteren Untersuchung soll ein Modell in der Simulationssoftware „PSIM“ verwendet werden, die für Simulationen von Netzwerken und leistungselektronischen Schaltungen ausgelegt ist. Dazu wird das einphasige Schaltbild aus Abbildung 1 in ein dreiphasiges System überführt. Das Aktive Front-End, welches dort als Stromquelle dargestellt ist,

setzt sich aus einer dreiphasigen Brückenschaltung mit Zwischenkreiskondensator zusammen, das über eine Glättungsdrossel an den Verknüpfungspunkt angeschlossen ist. Die Zwischenkreisspannung beträgt im verwendeten Modell $U_{DC} = 850 \text{ V}$ bei einer Zwischenkreiskapazität von $C_{DC} = 2 \text{ mF}$. Beide Werte entsprechen denen üblicher Wechselrichter. Die Abbildung 2 zeigt das verwendete Netzmodell.

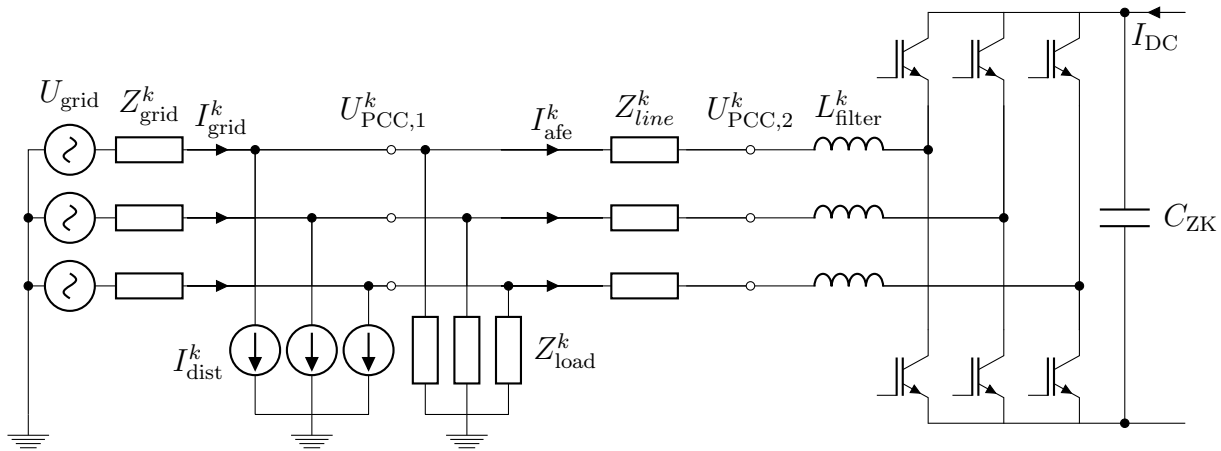


Abbildung 2: Beispielnetz mit Anschluss eines Active Front-Ends

4.2 Simulationsmodell

Zur Bestimmung der notwendigen Gate-Signale für alle sechs IGBTs der Brückenschaltung, wird eine Regelung verwendet, die auf der etablierten d/q -Transformation nach [5] basiert. Mit Hilfe dieser Transformation, werden die sinusförmigen Leiter-Erdspannungen in ein Gleichspannungssystem transformiert, wodurch es möglich ist, lineare Regelstrecken aufzubauen und entsprechende Regler zu verwenden. Darüber hinaus lassen sich höherfrequente Oberschwingungen, die nach wie vor dem Gleichspannungssystem überlagert sind, leicht mit Hilfe von Filtern separieren. Abbildung 3 zeigt die verwendete Anordnung.

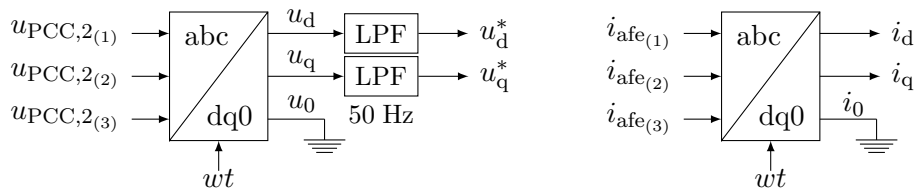


Abbildung 3: Bestimmung der verwendeten Ströme und Spannungen in d/q -Koordinaten

Durch die Eigenschaft der Gleichgrößen für die Grundswingungskomponenten der Spannung und Ströme als Ergebnis der Transformation, können die sich ergebenden d- und q-Komponenten der Spannung durch einen Tiefpassfilter so gefiltert werden, dass die enthaltenen Harmonischen nicht mehr Bestandteil des Signals sind. Weiterhin gilt, dass bei dreiphasigen Systemen ohne Neutralleiter die dritte Komponente der Transformation wie dargestellt entfällt. Um die Transformation durchführen zu können, wird der Phasenwinkel der anliegenden Versorgungsspannung benötigt. Dieser kann durch eine sog. Phasenregelschleife (engl.: phase locked loop - PLL) ermittelt und geregelt werden [6]. Da der Phasenwinkel durch die Netzspannung bestimmt wird, liefert die q-Komponente der Transformation der Spannungen automatisch den Wert Null. Weicht diese davon ab, kann über eine Regelung der Winkel angepasst werden.

Dazu ist jedoch eine möglichst reine Grundschwingungskomponente der Spannung notwendig, weswegen diese durch einen Bandpassfilter hoher Güte vorher gefiltert werden kann. Die verwendete PLL ist in Abbildung 4 dargestellt.

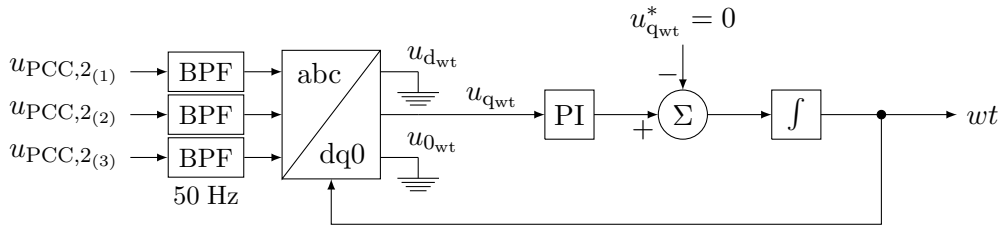


Abbildung 4: Phasenregelschleife zur Bestimmung des Phasenwinkels der Spannung

Mit dem Wissen über d- und q- Komponenten der gemessenen Spannung, welche die Oberschwingungen beinhalten und den d- und q- Komponenten, die die Spannung besitzen sollte, wenn sie keinerlei Oberschwingungen enthält, kann eine geeignete Regelstrecke erstellt werden. Die gezeigte Strecke ist für den d- und q- Anteil äquivalent, weshalb sie nur einmal für beide Komponenten in Abbildung 5 dargestellt wird.

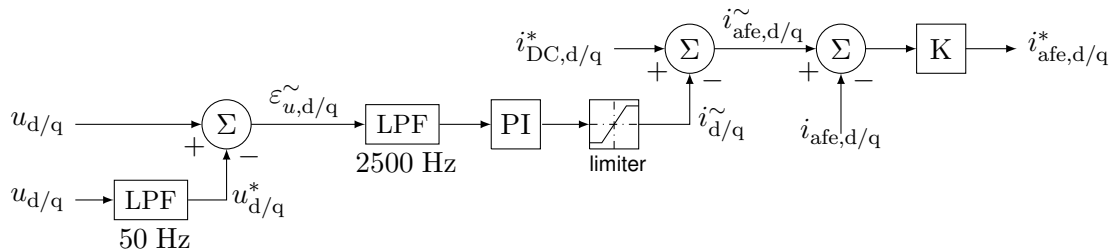


Abbildung 5: Regelschleife zur Bestimmung des Aktive Front-End Stromes

Der Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 50 Hz liefert das Grundschwingungssignal der Spannung, welches vom überschwingungsbehafteten Spannungssignal subtrahiert wird. Da die Differenz beider Signale noch alle höherfrequenten Anteile aus der Taktfrequenz des AFEs, werden diese durch einen weiteren Tiefpassfilter mit der Grenzfrequenz von 2,5 kHz herausgefiltert. Ein PI-Regler ist nun in der Lage das Signal, welches die Verzerrung beinhaltet zu regeln. Zusätzlich wird aus Stabilitätsgründen ein Limiter verwendet, der besonders durch Schalthandlungen entstehende Oberschwingungen und entsprechend hohe Reglersignale begrenzt. In Addition mit umgekehrter Phasenlage mit dem Soll-Signal zur Aufrechterhaltung der Zwischenkreisspannung und somit der Grundschwingungskomponente des Stromes des AFEs, ergibt sich der Strom, der vom Aktive Front-End zur Einspeisung oder Entnahme von Energie zusammen mit der Kompensation der Spannungsüberschwingungen notwendig ist. Auf die Darstellung der Regelstrecke der Grundschwingungskomponente $i_{DC,d/q}^*$ zur Aufrechterhaltung der Zwischenkreisspannung soll aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet werden. Die Regelsignale $i_{afe,d}^*$ und $i_{afe,q}^*$ können dann über die Rücktransformation in ein 3 phasiges, sinusförmiges System durch eine Pulsweitenmodulation als Schaltsignale an die jeweiligen IGBTs weiter geleitet werden. In der Simulation wurde dazu ein 20 kHz Signal verwendet.

4.3 Simulationsergebnisse

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen sowohl den Zeitverlauf der Spannung am Verknüpfungspunkt Eins als auch den Stromverlauf des Active Front-Ends.

Aufgrund der Phasensymmetrie wird nur die erste Phase dargestellt. Es sind in den Zeitverläufen genau die Zeitpunkte zu erkennen, an denen eine Veränderung der Regel- oder Netzsituation eintritt. Die ebenfalls enthaltenen Spektren der Spannungen und Ströme, wurden über mindestens 5 Perioden gebildet, nachdem sich alle Ausgleichsvorgänge eingestellt haben. Da in der Simulation mit der siebten und elften Oberschwingung eingespeist wird, begrenzt sich das dargestellte Spektrum auf den unteren Frequenzbereich. Im Bereich der Schaltfrequenz finden sich ebenfalls Oberschwingungsströme und Spannungen, die hier jedoch nicht untersucht werden. Bei der Berechnung des THD_U und des THD_I finden diese bedingt durch die Simulationssoftware Berücksichtigung, tragen jedoch kaum zu den Werten bei. Die Abbildung 6 zeigt die Netzsituation vor und nach hinzufügen eines Kompensationsstromes bei einer Leitungsimpedanz von $Z_L = 0 \Omega$. Im Spektrum ist eine Spannungsverzerrung zu erkennen, während das Aktive Front-End einen nahezu sinusförmigen Strom in einspeist. Ab dem Zeitpunkt von $t = 0,3 \text{ s}$ wird die Filterfunktion aktiviert und der Strom ist verzerrt. Die Spannung hingegen ist deutlich sinusförmiger als vor dem Zeitpunkt. Beides ist auch im Spektrum zu erkennen.

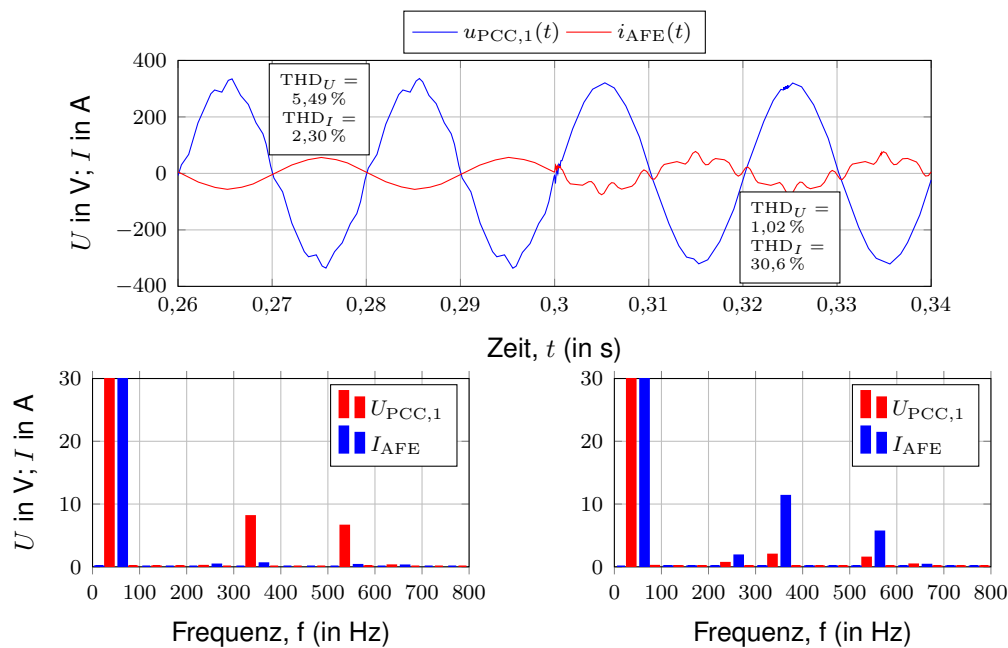


Abbildung 6: Vergleich ohne- und mit Spannungskompensation, $Z_L = 0 \Omega$

Sowohl der Zeitfunktion, also auch dem Spektrum und dem THD_U ist zu entnehmen, dass die Spannung nicht vollständig kompensiert wird. Das liegt daran, dass das Aktive Front-End selbst Erzeuger von Oberschwingungen ist. Erkennbar ist dies in beiden Spektren. So ist die fünfte Harmonische vor- und nach der Kompensation vertreten. Sie wird sogar leicht verstärkt durch die Implementierung der Filterfunktion.

In Abbildung 7 wird die Funktion der Filterung beibehalten und zum Zeitpunkt $t = 0,54 \text{ s}$ eine Leitungsimpedanz $Z_L = (0,206 + 0,0802j) \Omega$ hinzugeschaltet, was einer Leitungslänge von 1 km entspricht. Dabei ist erkennbar, dass die Einprägung der Stromharmonischen des AFEs abnimmt und demzufolge die Spannungsverzerrung steigt. Allerdings steigt sie nicht auf das Maß an, dass sie vor der Filterung hatte. Es lässt sich also sagen, dass trotz hinzufügen einer Leitungsimpedanz die Spannungsform verbessert wird. Deutlich wird dies auch beim Abschalten der Filterfunktion des AFEs, was in Abbildung 8 gezeigt wird. Ab dem Zeitpunkt $t = 0,92 \text{ s}$ wirkt das AFE als Stromquelle mit reiner Grundschwingung.

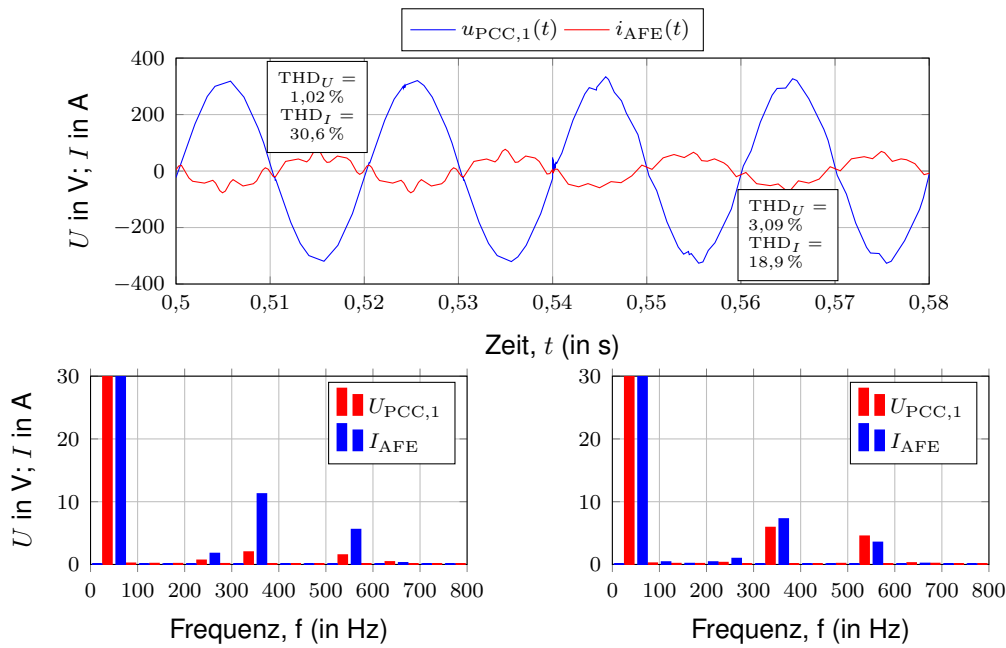


Abbildung 7: Leitungszuschaltung bei Kompensation, $Z_L = (0, 206 + 0, 0802j) \Omega$

Die Spektren und THD Werte der Abbildung 8 zeigen, dass bei Ausschalten der Filterfunktion bei hoher Leitungsimpedanz, es zu einem signifikanten Rückgang der ausgesendeten Stromoberschwingungen und einer Erhöhung der Spannungsharmonischen kommt.

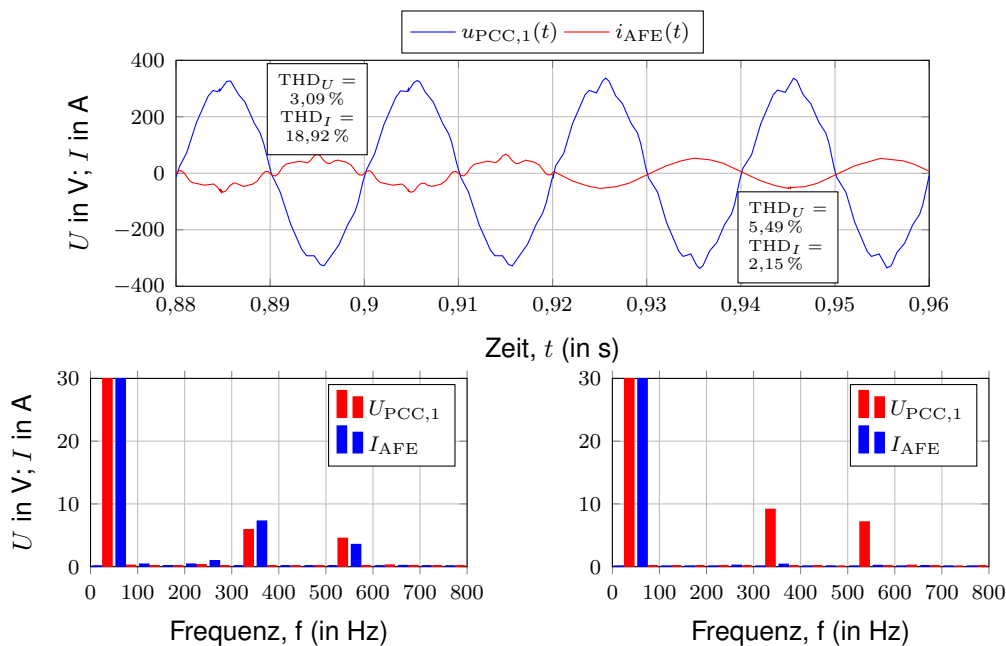


Abbildung 8: Vgl. mit- und ohne Spannungskompensation, $Z_L = (0, 206 + 0, 0802j) \Omega$

Als Ergebnis der Simulation lässt sich sagen, dass eine zusätzliche Leitungsimpedanz zwischen dem Verknüpfungspunkt zum Netz und dem Anschlusspunkt des Active Front-Ends zu einem schlechteren Ergebnis bei der Kompensation von Harmonischen auf Basis der Spannungsmessung am Anschlusspunkt führt und bestätigt damit den im Kapitel 3 gezeigten Zusammenhang. Allerdings konnte auch festgestellt werden, dass bei der Verwendung einer Leitung mit realen Kabelparametern und großer Leitungslänge dennoch eine Verbesserung der Spannungsform eintritt.

5 Zusammenfassung

Active Front-Ends besitzen die Möglichkeit neben Grundschwingungsströmen auch Oberschwingungsströme in das Netz einzuspeisen, so dass eine Kompensation von im Netz enthaltenen Harmonischen nahe liegt. Da jedoch nur deren Spannung am Anschlusspunkt zur Verfügung steht, ist dies die einzige Information des Netzes, die das Gerät erhalten kann. Ist der eigentliche Netzanschlusspunkt zudem durch eine Leitungsimpedanz vom AFE getrennt, tritt ein impedanzabhängiger Fehler bei der Kompensation auf. In diesem Beitrag wird der Einfluss der Netzimpedanz anhand eines Beispielnetzes berechnet und dabei ein sich einstellender Fehler nachgewiesen. Anschließend wird ein Verfahren zur Regelung des Stromes erläutert, mit dem die am Anschlusspunkt verfügbare Spannung von Harmonischen befreit werden kann. In einem Simulationsmodell, das mit typischen Netz- und Wechselrichterparametern arbeitet, wird die Regelung validiert und dabei der Einfluss der Netzimpedanz aufgezeigt. Ergebnis ist, dass mit Hilfe der zusätzlichen Einspeisung von Oberschwingungsströmen, die Netzanschlussspannung in Abhängigkeit von der Leitungsimpedanz verbessert werden kann. Eine in der Simulation verwendete Impedanz, die einem 1 km langem Niederspannungskabel entspricht, hat zwar einen Einfluss auf die Kompensationsgüte, sie schließt eine Kompensation jedoch nicht aus. Ein Rückgang der Spannungsverzerrung ist auch bei hoher Leitungslänge zu verzeichnen. Es besteht deshalb für Betreiber von bspw. Photovoltaikanlagen oder öffentlichen Lade-stationen die Möglichkeit, eine zusätzliche Netzdienstleistung anzubieten mit der in Zeiten geringer Auslastung weiterhin gewirtschaftet werden kann. Netzbetreiber haben dabei den Vorteil, dass ohnehin im Netz vorhandene Mittel zur Verbesserung ihrer Spannungsquali-tät beitragen können und zusätzliche Filter nicht notwendig sind. Künftige Forschungen sind hinsichtlich des Kompensationsalgorithmus und der mathema-tischen sowie simulativen Betrachtung verschiedener Netzsituationen, anzustreben.

Literatur

- [1] D'ARCO, S. ; PIEGARI, L. ; TRICOLI, P.: Harmonic compensation with active front-end converters based only on grid voltage measurements. In: *3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)* (2014), S. 1–6
- [2] NORM: DIN EN 61000-3-3:2014-03. In: *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-3: Grenzwerte - Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen für Geräte mit einem Bemessungsstrom ≤ 16 A je Leiter, die keiner Sonderanschlussbedingung unterliegen*. 2014
- [3] D'ARCO, S. ; OCHOA-GIMENEZ, M. ; PIEGARI, L. ; TRICOLI, P.: Harmonics and Interharmonics Compensation With Active Front-End Converters Based Only on Local Voltage Measurements. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64 (2017), Nr. 1, S. 796–805.
- [4] MENNTI, D. ; BURGIO, A. ; SORROENTINO, N. ; PINNARELLI, A.: Implementation of the shunt harmonic voltages compensation approach. In: *Electric Power System Research, Volume 81, Issue 3* (2011), S. 798–804
- [5] AKAGI, H. ; AREDES, M. ; WATANABE, E.: *Instantaneous Power Theory*. IEEE computer soc pr, 2007
- [6] KAURA, V. ; BLASKO, V.: Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. In: *Proceedings of Applied Power Electronics Conference. APEC '96*, IEEE