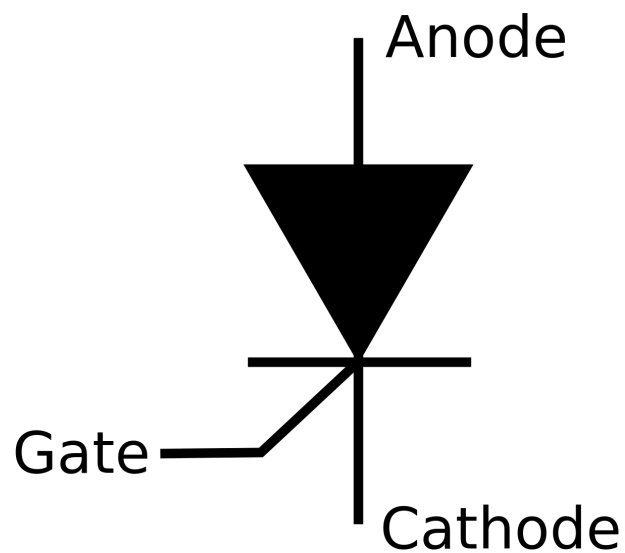


Netzurückwirkungen von Thyristorstellern mit ohmscher Last bei verschiedenen Steuerverfahren

Fachbericht Projekt 6

Windisch, 18.01.2019



Hochschule	Hochschule für Technik - FHNW
Studiengang	Elektro- und Informationstechnik
Autor	Nando Spiegel und Bastian van Dijke
Betreuer	Felix Jenni
Auftraggeber	Intern

Zusammenfassung

Hier könnte Ihre Werbung stehen.

Keywords: Phasenanschnitt, Schwingungspaket, Ohmsche Last

Danksagung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Phasenanschnittsteuerung	2
2.2	Schwingungspaketsteuerung	3
2.3	Leistungsfaktor	4
2.3.1	Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung	4
2.3.2	Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung	5
2.4	Oberschwingungen	5
2.5	Grundlagen	5
2.6	Verzerrte Schwingung	6
2.7	Vorkommen der Oberschwingungen	7
2.8	Auswirkung von Oberschwingungen	8
2.9	Anforderung an die Netzqualität	9
2.10	Gegenmassnahmen bei Oberschwingungen	9
2.10.1	Vermeidung von Störungen	9
2.10.2	Stromnetzeigenschaften	9
2.10.3	Oberschwingungsfilter	9
2.10.4	Änderung der Energieversorgung	9
2.10.5	EMV verträgliche Gebäudeinstallation	10
2.10.6	Subharmonische	10
2.10.7	Fast Fourier Transformation	10
2.11	Normen	10
2.11.1	EN 61000-3-2	11
2.11.2	EN 61000-3-3	12
3	Simulation	15
3.1	Simulation mit PLECS	15
3.2	Simulation mit Matlab	15
4	Messaufbau	16
5	Umsetzung	17
6	Validierung	18

7 Schlusswort	19
Literatur	21
Abbildungsverzeichnis	21
Tabellenverzeichnis	21

1 Einleitung

Das

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Steuerungsarten erläutert, sowie deren Vor- & Nachteile. Durch die Normen welche eingehalten werden müssen, sind bei den Verfahren gewisse Grenzen gesetzt. Damit diese Normen verständlich werden, wird auch beschrieben wie verschiedene Grenzwerte berechnet werden und was diese aussagen.

2.1 Phasenanschnittsteuerung

Bei der Phasenanschnittsteuerung wird das Sinussignal über einen TRIAC geführt. Ein TRIAC sind zwei antiparallel geführt Thyristoren. Dieser zündet ab einem gewissen Zündwinkel nach jedem Nulldurchgang. Je später der TRIAC eingeschaltet wird, desto kleiner wird die mittlere Leistung über der Last. Ein Vorteil gegenüber einem Spannungsteiler ist, dass weniger Leistung gebraucht wird. Der Zündwinkel kann von 0° bis 180° gewählt werden, wobei bei 0° die maximale Leistung und bei 180° keine Leistung über der Last anliegt. Das Problem bei der Phasenanschnittsteuerung ist, dass diese Schaltung Oberwellen verursacht und so ungewünschte Effekte für den Netzbetreiber verursacht. Ein weiteres Problem betrifft den nicht-sinusförmigen Stromverlauf. Da Strom und Spannung nicht den gleichen Verlauf haben, tritt eine Verzerrungsblindleistung auf. Der Strom verläuft zeitlich der Spannung nach und wirkt so wie eine Induktivität. Deshalb wird dieses Verfahren vom EW nur bei kleinen Leistungen toleriert. Bei grossen Leistungen wird deshalb die Schwinungspaketsteuerung benutzt. Auf der Abbildung 2.1 ist ersichtlich, wie der Phasenanschnitt bei einer Netzspannung aussieht. Grau gezeichnet ist die normale Netzspannung und rot ist die Spannung welcher an der Last anliegt. In dieser Abbildung wurde ein Winkel von 135° gewählt und somit ist die Leistung an der Last kleiner als mit der normalen Netzspannung.

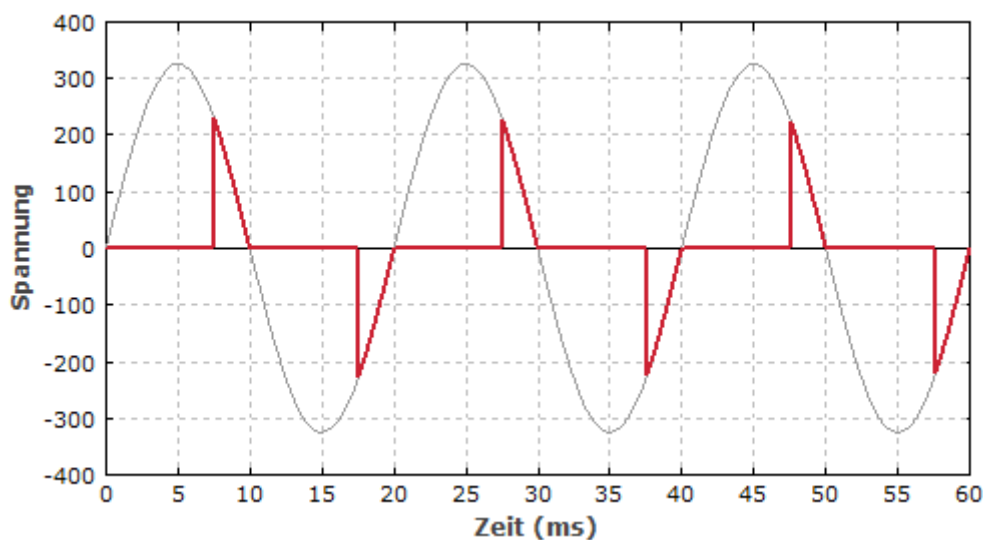


Abbildung 2.1: Phasenanschnitt mit einem Winkel von 135° [1]

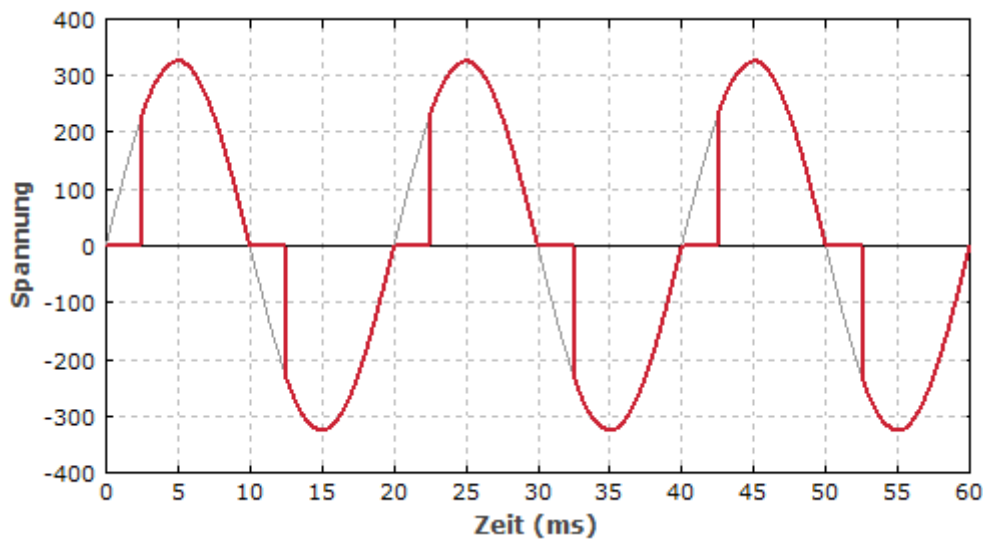


Abbildung 2.2: Phasenanschnitt mit einem Winkel von 45° [1]

Bei der Abbildung 2.2 ist gut ersichtlich, wie früher gezündet wurde. Somit wird die Leistung an der Last grösser.

2.2 Schwingungspaketsteuerung

In diesem Verfahren wird nicht wie der Phasenanschnittsteuerung die Form der Halbwellen verändert, sondern die Zeitdauer der Halbwellen, welche an der Last anliegen. Wichtig sind dabei die Paketdauer T_0 und die Einschaltzeit T_E , wobei letzteres verändert wird. Wenn z.B. eine Paketdauer 10 Halbwellen hat, und die Einschaltdauer 5 Halbwellen ist, liegt die halbe Leistung über der Last an. Anders als bei der Phasenanschnittsteuerung entstehen bei dieser Ansteuerungsart keine harmonische Oberwellen, dafür aber Sub- und Zwischenharmonische. Auf der Abbildung 2.3 ist ersichtlich, wie vier von den total sechs Halbwellen pro Paket eingeschaltet sind. Dies ergibt eine Leistung welche $2/3$ so gross ist wie die Leistung mit der normalen Netzspannung.

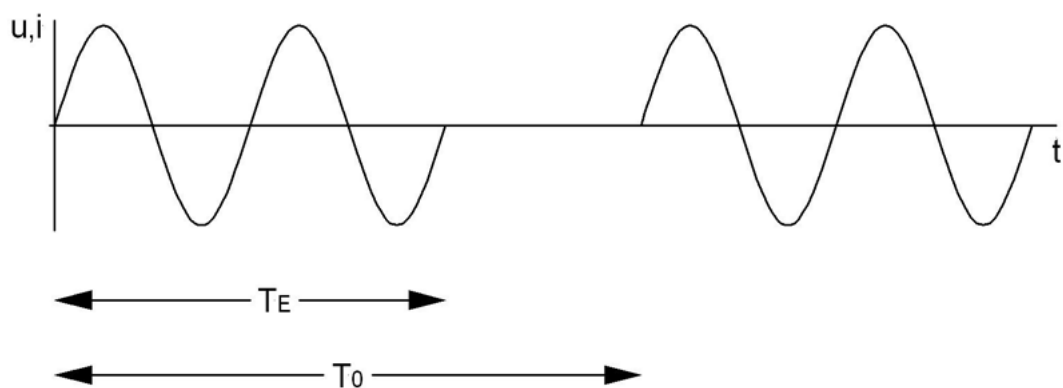


Abbildung 2.3: Schwingungspaketsteuerung $2/3$ der Leistung [2]

Dabei ergibt sich aus dem Verhältnis von Einschaltdauer zu Periodendauer das Tastverhältnis.

$$a = \frac{T_E}{T_0} \quad (2.1)$$

2.3 Leistungsfaktor

Um die zwei Ansteuerungsverfahren miteinander vergleichen zu können, wird der Leistungsfaktor benötigt. Bei der Phasenanschnittsteuerung ist der Leistungsfaktor abhängig von Zündwinkel. Bei der Schwingungspaketsteuerung ist der Leistungsfaktor abhängig vom Einschaltverhältnis. Die genaueren Berechnungen der Faktoren wird in der Formel 2.6 & 2.9 beschrieben.

In der Abbildung 2.4 ist ersichtlich wie der Leistungsfaktor bei den beiden Steuerungsarten aussieht. Bei der Phasenanschnittsteuerung auf der linken Seite sieht man, wie bei einem kleinem Zündwinkel der Leistungsfaktor sehr gross ist. Je grösser der Zündwinkel gewählt wird, desto kleiner wird der Leistungsfaktor. Auf der rechten Seite sieht man den Leistungsfaktor in Abhängigkeit des Einschaltverhältnisses. Je grösser das Einschaltzeitverhältnis, desto grösser der Leistungsfaktor.

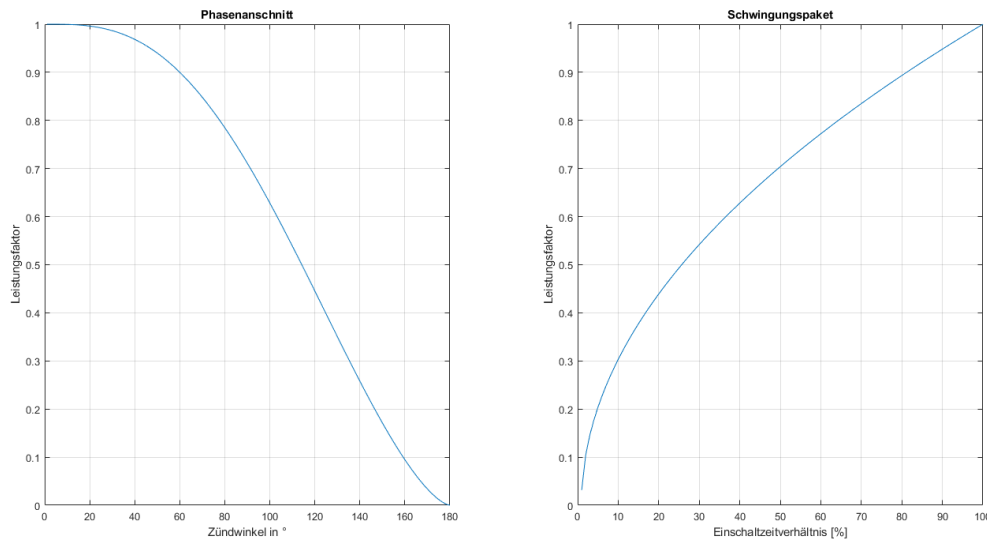


Abbildung 2.4: Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung

2.3.1 Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung

Der Leistungsfaktor ist definiert als das Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung.

$$\lambda = \frac{P_{\alpha}}{S} \quad (2.2)$$

Die Schein- und Wirkleistung können mit den folgenden Formeln beschrieben werden.

$$S = I_L \cdot U_{UN} \quad P_{\alpha} = I_L^2 \cdot R_L \quad (2.3)$$

Werden die Formeln 2.3 in die Formel 2.2 eingesetzt ergibt sich folgende Gleichung.

$$\frac{P_{\alpha}}{S} = \frac{I_L \cdot R_L}{U_{UN}} \quad (2.4)$$

Der Laststrom wird mit folgender Formel beschrieben.

$$I_L = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha)} \cdot \frac{U_{UN}}{R_L} \quad (2.5)$$

Wenn die Formel für den Laststrom in die Gleichung 2.4 eingesetzt wird, lassen sich die Spannung und der Widerstand wegkürzen und übrig bleibt folgende Formel.

$$\lambda = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha)} \quad (2.6)$$

2.3.2 Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung

Das Einschaltverhältnis wird mit a beschrieben und wird mit der Formel 2.1 beschrieben. Die Schein- und Wirkleistung werden mit den folgenden Formeln beschrieben.

$$S_a = \sqrt{a} \cdot P \quad P_a = a \cdot P \quad (2.7)$$

Wenn die beiden Formeln für die Wirk- und Scheinleistung in die Gleichung für den Leistungsfaktor eingesetzt wird ergibt sich daraus folgende Gleichung.

$$\lambda = \frac{P_a}{S_a} = \frac{a \cdot P}{\sqrt{a} \cdot P} \quad (2.8)$$

Die Wirkleistung lässt sich wegkürzen und so ergibt sich folgende Formel.

$$\lambda = \sqrt{a} \quad (2.9)$$

2.4 Oberschwingungen

Im Idealfall würde bei einer Stromversorgung überall eine perfekte sinusförmige Spannung vorliegen. Jedoch sieht dies in der Realität anders aus. Die Kurve der Spannung und des Stromes weichen massiv von einer Sinusfunktion ab. Man bezeichnet diese verzerrten Schwingungsformen im Allgemeinen als Oberschwingungsbehaftetes Signal.

Schon früh erkannte man diese Oberschwingungsverzerrungen am Netz, jedoch ist es erst heute ein ernstzunehmendes Problem für die Versorgungsbetriebe, die Verteilnetzbetreiber und für den Endkunden. Früher waren die grössten Herausforderungen, die Auswirkungen von Oberschwingungsverzerrungen auf elektrische Maschinen zu erkennen. Man stellte ausserdem fest, dass Störungen in den Telefonleitungen auftraten, welche den Ton der Sprache beeinträchtigte. Allerdings kann man sagen, dass Oberschwingungsverzerrungen früher ein geringeres Gefahrenpotential darstellten als heute. Die heutigen Maschinen wurden neuerdings so konstruiert, dass sie weniger Oberwellen erzeugen. Auch bei den Verteilnetzen wurde darauf geachtet, dass sie nicht mehr an der Lastobergrenze arbeiten und so ein reineres Sinussignal verwenden. Seit einigen Jahren steigt, die weltweite Nachfrage nach energieeffizienten Lösungen, die nur über vermehrten Einsatz von Leistungselektronik realisierbar sind.

2.5 Grundlagen

Die Bedeutung Oberschwingung kommt aus dem Themenbereich «physische Eigenwertprobleme» also Wellen, deren Frequenz ganzzahlige Vielfache der Grundschnwingungen sind. In der Musikwelt kann man Oberschwingungsfrequenzen vor allem bei Saiteninstrumenten, wie zum Beispiel bei einer Gitarre oder einer Geige beobachten.

Die meisten elektrischen Geräte halten sich nach der perfekten Welle Ausschau. Bei Wechselstrom definiert die Perfektion eine perfekte Sinuskurve. Die daraus verwendete elektrische Spannung wechselt gleichmässig zwischen der positiven und negativen Halbwelle hin und her. Bei einer Frequenz von 50 Hz beträgt dies genau 50-mal pro Sekunde. Der Begriff Welle ist mit dem Zusammenhang von Oberschwingungen nicht ganz korrekt. Eine Welle hat eine räumliche

und zeitliche Ausdehnung, jedoch haben die hier betrachteten Schwingungen nur eine zeitliche Ausdehnung. Die Oberschwingungsanteile in einem Wechselstromsystem sind also definiert als sinusförmige Anteile einer periodischen Schwingung, deren Frequenz einem ganzzahligen Vielfachen (Ordnungszahl) der Grundfrequenz entspricht. In der unteren Tabelle erkennt man, welche Ordnungszahl (n) zu welcher Frequenz (f_h) gehört. Es ist ersichtlich, dass zum Beispiel die 5. Oberschwingung eine Frequenz von 250 Hz hat. Die Berechnung der Oberschwingungsfrequenz ist in der unterstehenden Formel 2.10 dargestellt.

$$f_h = n \cdot \text{Grundfrequenz} \quad (2.10)$$

Ordnungszahl n	Oberschwingungs- frequenz (Hz) f_h
1	50
3	150
5	250
7	350
11	550
13	650
...	...
n	$50 \cdot n$

Tabelle 2.1: Oberschwingungsfrequenzen

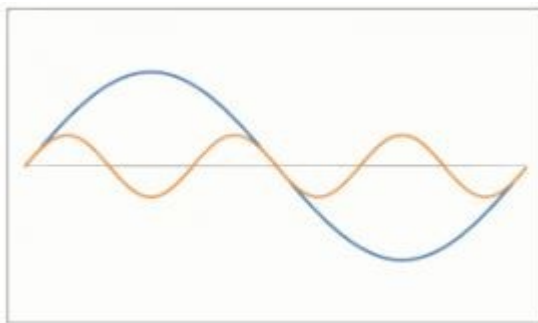


Abbildung 2.5: Grundschwingung mit 3. Ordnung [4]

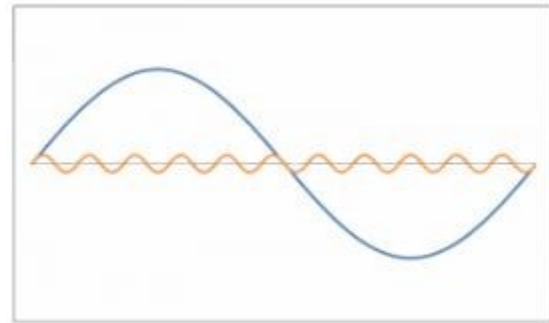


Abbildung 2.6: Grundschwingung mit 11. Ordnung [4]

Die folgenden zwei Abbildungen 2.5 & 2.6 zeigen eine Grundschwingung bei 50 Hz (blau) und die jeweilige 3. und 11. Ordnung der Grundfrequenz (gelb).

2.6 Verzerre Schwingung

Eine verzerrte Schwingung entsteht durch Überlagerungen von verschiedenen sinusförmigen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden. Man kann eine solche Schwingung mit unterschiedlichen Oberschwingungskomponenten, auch Komposition genannt, zusammensetzen, indem man eine Sinusschwingung mit mehreren Oberschwingungen zusammenaddiert. Das folgende wellenförmige verzerrte Signal lässt sich zu einer Grundschwingung mit ihren mehreren harmonischen Oberschwingungen zerlegen. Bei der untenstehenden Graphik 2.7 ist diese ersichtlich, wobei die rote Kurve das verzerrte Signal ist. Die blauen Sinusschwingungen sind die Zerlegungen in die Grundschwingung der 3. und 5. harmonische Oberschwingung. Addiert man wiederum die drei blauen Kurven miteinander erhält man das verzerrte rote Signal.

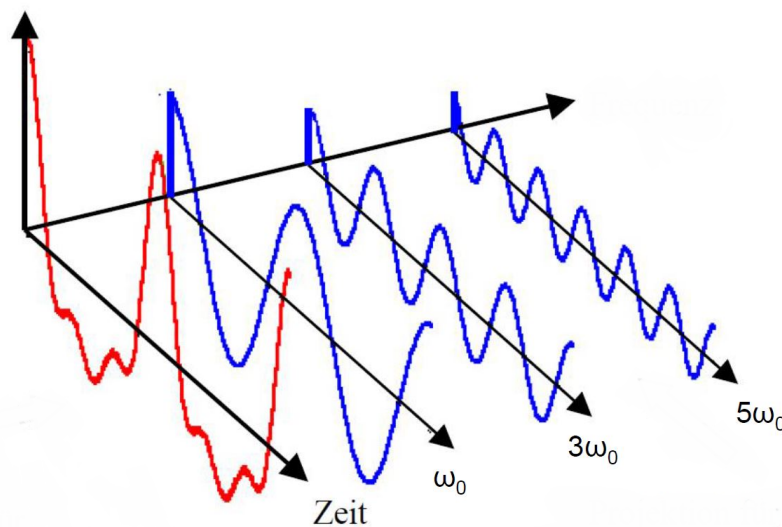


Abbildung 2.7: Addition der verschiedenen Oberwellen [5]

Die erste Person, welcher diese Methode vorgestellt hat, war der französische Mathematiker Jean Baptiste Fourier. Noch heute trägt die Fourier-Transformation diese Bezeichnung. Mit diesem Zusammenhang kann die Überlagerung von einer perfekten Sinuskurve zu einer verzerrten Sinusschwingung führen. Dies bedeutet so viel wie, eine verzerrte Sinusschwingung lässt sich immer als Überlagerung einer Grundschwingung mit anderen Oberschwingungen unterschiedlicher Frequenzen und unterschiedlichen Amplituden darstellen. Anhand eines Amplitudenspektrums lassen sich die Oberschwingungen gut visualisieren. Bei den Oberschwingungen gibt es ungerade oder gerade harmonische Schwingungen. Die ungeraden Oberwellen sind die charakteristischen Oberschwingungsanteile in den heutigen Stromversorgungsnetzen. Sie stellen Wellenformen dar, die bezogen auf die Zeitachse symmetrisch sind. Aufgrund der meist dreiphasigen Symmetrie der heutigen Infrastrukturen sind nahezu alle Signale symmetrisch, obwohl es zu Verzerrung kommt. Geradzahlige Oberschwingungen können nur aus Wellenformen entstehen, die nicht symmetrisch bezogen auf die Zeitachse sind.

evt. noch
Bild mit
Amplitu-
denspek-
trum einfü-
gen

2.7 Vorkommen der Oberschwingungen

Oberschwingungsströme erzeugt fast jedes elektrische Gerät. Doch welches Gerät welche Stromverzerrung erzeugt wird später erklärt. Ein wichtiger Bezugspunkt zu den individuellen Oberschwingungsgrößen ist die gesamte harmonische Verzerrung. Man nennt ihn auch den THD-Wert (Total Harmonic Distortion). Diesen Wert gilt es besonders zu verstehen, damit man ihn rechnerisch analysieren kann. Er gibt das Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen zum Effektivwert der Grundschwingung an. Man verwendet ihn üblicherweise im Nieder-, Mittel-, aber auch im Hochspannungsnetz. Normalerweise wird die Verzerrung des Stromes als THDi, beschrieben in der Formel 2.12 und die Verzerrung der Spannung als THDu, ersichtlich in der Formel 2.13 angegeben. Der Total Harmonic Current (THC) ist der gesamte Oberschwingungsstrom. Er wird verwendet, um den Gesamteffektivwert der Oberschwingungsströme der Ordnung 2 bis 40 zu quantifizieren, die zu einer Verzerrung der Stromkurve beitragen. Man erkennt dies in der Formel 2.11. Diesen Wert braucht man vor allem, um die erforderlichen Eigenschaften zur Auswahl eines effizienten aktiven Oberschwingungsfilters zu bestimmen. Bei der folgenden

Formel handelt es sich um den Gesamten Oberschwingungsstrom.

$$THC = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2} \quad (2.11)$$

Die gesamte harmonische Verzerrung des Stromes gibt, wie der Name schon sagt, die gesamte Verzerrung des Stromes an. Der Wert ist definiert als Quotient des Effektivwerts der Oberschwingungsströme im Verhältnis zum Grundschwingungsstrom. Typischerweise wird die Summe aller Strom Oberschwingungsanteile in Bezug auf den Grundschwingungsstrom bis einschliesslich der 40. Oberschwingung berechnet. Die Oberschwingungsströme, welche durch Lasten in Netzwerken erzeugt werden, müssen durch die Impedanzen der Transformatoren oder Drosseln fliessen. An diesen Impedanzen kommt es zu nichtlinearen Spannungsabfällen. Es werden Oberschwingungsspannungen erzeugt die im ganzen Netz verbreitet werden. Diese können an Endgeräten eine Verzerrung der Versorgungsspannung verursachen. Somit ist die harmonische Verzerrung des Stromes (THDi) eine direkte Ursache für die Verzerrung der Spannung (THDu = Total Harmonic Distortion of Voltage). Sie gibt das Ausmass der Verzerrung der Versorgungsspannung an. Auch dieser Wert ist definiert als Quotient des Effektivwertes der Spannungs Oberschwingungsanteile bis zur 40. Oberschwingung bezogen auf den Effektivwert der Grundschwingung. Folgende Formel zeigt wie man die Totale Verzerrung des Stromes in Prozent berechnet ist.

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_{(1)}} * 100\% \quad (2.12)$$

Parallel dazu zeigt die untere Formel die Totale Verzerrung der Spannung in Prozent.

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{(1)}} * 100\% \quad (2.13)$$

Je niedriger der THDu-Wert ist, desto besser ist die Spannungsqualität. Die Norm besagt, dass der gesamte Oberschwingungsgehalt den Wert von 8% nicht überschreiten darf. Dazu kommt, dass heute üblicherweise für die Verzerrung die THD-Werte angegeben sind und nicht wie früher die Oberschwingungsgehalte (Klirrfaktore).

Wenn man sich mit den Oberschwingungsproblematik befasst, ist es wichtig, den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung zu verstehen. Dadurch ist es möglich eine geeignete Lösung für das reduzieren von Oberschwingungen zu finden. Je nach Eigenschaft der Oberschwingungserzeuger und der Eigenschaft eines Gerätes am elektrischen Netz, verbreiten sich Oberschwingungsströme in einem System unterschiedlich. Verschiedene Spannungsverzerrungen sind die Folgen.

2.8 Auswirkung von Oberschwingungen

Falls Oberschwingungen oder andere Netzzrückwirkungen bei Betriebsmitteln auftreten, können die Funktionen von den Geräten beeinträchtigt oder sogar zerstört werden. Ein Beispiel dafür wäre, im Falle einer Kurzzeitunterberechnung bei Schaltnetzteil, würden sie mit extrem hohen Einschaltspitzen reagieren. Diese Spitzen könnten das 20-fache der Nennlast erreichen. Im einphasigen Verbrauch in einem Dreiphasigen-Wechselstromsystem fliesst der ganze Rückleitstrom über den Sternpunkt des Transformators zurück. Gäbe es viele Schaltnetzteile in einem System, würden sich die Rückleiterströme nicht mehr aufheben, sondern sie würden sich addieren. Die Folgen davon wäre eine Sternpunktverschiebung. Oberschwingungen können bei Glühlampen die Glühfadentemperatur erhöhen und somit die Lebensdauer verkürzen. Auch bei Dreh- oder

Wechselstrommotoren und -generatoren führen Stromüberschwingungen zu zusätzlicher Erwärmung. Bei Schutzgeräten wie Distanzschutz, Überstromschutz oder Differentialschutz können Überschwingungen den Aufbau und die Wirkungsweise des Schutzgerätes beeinflussen. Sind die Abstände zwischen Freileitungen und Telefonleitungen zu gering, können die Überschwingungen die Sprachübertragung stören. Dabei gibt es vor allem ein Auge auf die 20. bis zur 30. Ordnung der Überschwingung zu werfen.

2.9 Anforderung an die Netzqualität

Um die Anforderungen der Netzqualität zu gewährleisten müssen die Normen eingehalten werden. Auf welche Normen bei dieser Arbeit genau geachtet wurde, wird zu einem späteren Zeitpunkt erläutert. Zweck der Normen sind es die verschiedenen Merkmale wie zum Beispiel Frequenz, Höhe, Kurvenform oder die Symmetrie der drei Leiterspannungen einzuhalten. Durch Lastspannung, Störeinflüsse von bestimmten Anlagen oder Auftreten von Fehlern können diese Merkmale während des Normalbetriebes des Netzes geändert werden.

2.10 Gegenmassnahmen bei Überschwingungen

Es kann durchaus vorkommen, dass in der Praxis harmonische Überschwingungen festgestellt wurden, welche die zulässigen Grenzwerte überschreiten. Es gibt jedoch Möglichkeiten diese zu verhindern und so die Netzqualität zu verbessern. Im folgenden Abschnitt werden auf ein paar Varianten eingegangen.

2.10.1 Vermeidung von Störungen

Das Vermeiden von Störungen ist die einfachste Art um eine Verbesserung der Netzqualität sicher zu stellen. Der Gesetzgeber liefert dafür Normen der Elektromagnetischen Verträglichkeit, welche den gesetzlichen Grundlagen entsprechen. Sie sind zwingend einzuhalten.

2.10.2 Stromnetzeigenschaften

Könnte man die Netzimpedanz verringern wäre eine Reduktion der Überschwingungen möglich. Dies ist jedoch generell nicht umsetzbar und somit kann man Kurzschlussleistung des Netzes nicht beliebig erhöhen. Die wirtschaftlichen und technischen Grenzen sind hierzu massgebend.

2.10.3 Überschwingungsfilter

Zur Begrenzung von Überschwingungen werden heutzutage meistens mehrere aufeinander abgestimmte passive Filter eingesetzt. Das einsetzen von den Filtern muss jedoch für jede konkrete Installation neu erstellt werden, um eine Verbesserung des Netzzurückwirkungsverhaltens zu erhalten.

Die Industrie entwickelte wegen diesem Problem aktive Überschwingungsfilter. Sie können sich, auch bei späteren Erweiterungen der Installation, an die neue Situation anpassen und müssen nicht ersetzt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Flexibilität des Filters ist es, dass die Nenngrösse einfach vom aktuellen Bedarf gewählt werden kann.

2.10.4 Änderung der Energieversorgung

Stark nichtlineare Betriebsmittel und empfindliche Verbraucher die zusammen an einer Gruppe angeschlossen sind, können aufgetrennt und an separate Gruppen über jeweils einen separaten Transformator eingespeist werden. Eine solche Änderung der Energieversorgung sollte aber auch immer unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet werden.

2.10.5 EMV verträgliche Gebäudeinstallation

Um Schäden durch Oberschwingungen zu vermeiden müssen bei Gebäuden die Installation EMV-verträglich sein. Folgende Punkte sollten dabei zwingend beachtet werden:

- Es sollte ein konsequentes TN-S-Netz mit getrenntem Neutral- und Schutzleiter aufgebaut werden. Die beiden Leiter sollten nur eine Verbindung zwischen einem Punkt haben.
- Um Schäden an einer Anlage zu vermeiden wäre ein Überspannungsschutz für Kompensationsanlagen von Vorteil.
- Wie schon erwähnt, wären getrennte Stromkreisgruppen für allgemeine und IT-Betriebsmittel vorteilhaft.
- Leitende oder metallene Teile, wie zum Beispiel Trasse, Rohre oder Lüftungskanäle sollten zwingend mit dem Potentialausgleich verbunden werden.

Auch die Energieversorgung bei der Gebäudeinstallation sollte EMV-verträglich sein. Folgende Punkte sollten dabei eingehalten werden.

- Das Erdungssystem sollte niederohmig und stromfähig installiert sein.
- Im Schutzleiter- und Potenzialausgleich-Systeme sollten keine Arbeitsströme zugelassen sein.
- Bei Mehrfacheinspeisung dürfen keine Mehrfacherdung des Neutralleiters zugelassen werden.
- Der Kabelquerschnitt sollte für die Oberschwingungen ausgelastet sein.

2.10.6 Subharmonische

Da nicht nur harmonische Oberwellen verglichen werden, werden hier noch die Subharmonische erklärt und was der Unterschied zu den harmonischen Oberwellen ist.

2.10.7 Fast Fourier Transformation

Damit die beiden Spektren der Oberwellen verglichen werden können, wird diese in einem FFT Diagramm aufgezeigt. Wie diese zu lesen sind und was sie aussagen, wird hier beschrieben.

2.11 Normen

Bei der Formulierung Normen handelt es sich um eine Herausgabe von Regeln, Merkmale oder Leitlinien, die von verschiedenen Organisatoren und deren Expertengruppen bestimmt wurden. Die gesicherten Ergebnisse, welche auf Wissenschaft, Technik und Erfahrung basieren wurden zum Beispiel in den EN-Normen festgehalten und sorgfältig dokumentiert. Sie sollen einen optionalen Vorteil für die Gesellschaft und bestimmte Qualitäten erhalten. Im folgenden Text gibt es eine kurze Zusammenfassung der Normen, die für diese Arbeit als wichtig empfunden wurde und auf die man eingegangen ist und mit den gemessenen Werten verglichen hat. Es handelt sich dabei vor allem um die Spannungsqualität welche aus verschiedenen Blickwinkeln angeschaut wird. Die Normen EN 61000-3-2 und EN 61000-3-3 (Grenzwerte für Oberschwingungsströme, Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker im öffentlichen Netz) beschreiben, welche Art ein Elektrogerät sein soll, damit die ins Stromnetz hinein übertragenen Störungen in Grenzen gehalten werden. Eine weitere Norm, welche betrachtet wurde ist die EN 61000-2-2. Bei dieser Norm handelt es sich um die Elektromagnetische Verträglichkeit bei Umgebungsbedingung für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in die öffentlichen Versorgungsnetzen.

Die betrachteten Normen sind in diesem Bericht nicht im Detail erläutert. Nur die für uns

wichtigen Teile sind Zusammengefasst. Für weitere Segmente können die Normen nachgelesen werden.

2.11.1 EN 61000-3-2

Diese Norm wendet man auf elektrische und elektronische Geräte (Betriebsmittel und Einrichtungen) bis zu einem Eingangsstrom von 16A je Leiter an. Ausserdem ist der Anschluss des Gerätes an das öffentliche Niederspannungs-Verteilnetz vorgesehen. Die Norm definiert die Grenzwerte der Oberschwingungsanteile des Eingangsstromes bis zur 40. Harmonischen, die durch ein Gerät hervorgerufen werden können, das unter festgelegten Bedingungen geprüft wird. Da heutzutage die Zahl der nichtlinearen Verbraucher am öffentlichen Versorgungsnetz zunehmend steigt, steigt auch der Anteil des Oberschwingungsgehalts der Versorgungsspannung. Schaltnetzwerke, Audio-Verstärker, Beleuchtungseinrichtung aber auch Waschmaschinen, Mikrowellenöfen oder auch Klimageräte sind typische Verursacher von solchen Oberschwingungen. Die nichtsinusförmige (und somit überschwingungsbehaftete) Stromentnahme verursacht an der Netzimpedanz Spannungsabfälle. Das Resultat ist eine Abweichung des Spannungsverlaufs von dem idealen Sinus des Netzes. Um normgerechte und reproduzierbare Messungen der Stromüberschwingungen durchführen zu können, muss ein ideales überschwingungsfreies Netz zur Verfügung stehen. Laut der Norm EN 61000-3-2 darf die Prüfquelle einen bestimmten Oberwellengehalt nicht überschreiten. Es muss sichergestellt werden, dass ausschliesslich die vom Verbraucher erzeugte Stromüberschwingung gemessen werden. Beginnt man mit der Prüfung muss der Prüfling so eingestellt werden, dass der höchste Gesamt-Oberschwingungsstrom (maximal total harmonic current) unter üblichen Betriebsbedingungen erreicht wird. Für die Quellenanforderung gelten folgende Spezifikationen, die zwingend, während des zu prüfenden Geräts, eingehalten werden müssen:

- Spannungsgenauigkeit $\pm 2 \%$
- Frequenzgenauigkeit $\pm 0.5 \%$
- Phasenwinkelstabilität $\pm 1.5^\circ$
- $U_{peak} = 1.4-1.42 U_{eff}$ und zwischen 87° und 93° nach dem Nulldurchgang erreicht werden, dies muss jedoch nicht eingehalten werden, sofern Klasse A oder B geprüft wird.
- Die relativen Oberschwingungsanteile der Prüfspannung dürfen folgende Werte nicht überschreiten
 - 0.9 % für die 3. Harmonische Oberschwingung
 - 0.4 % für die 5. Harmonische Oberschwingung
 - 0.3 % für die 7. Harmonische Oberschwingung
 - 0.2 % für die 9. Harmonische Oberschwingung
 - 0.2 % für die geradzahlige Oberschwingung 2 bis 10. Ordnung
 - 0.1 % für die Oberschwingung 11 bis 40. Ordnung

Während der Messung werden für jede Oberschwingungsanordnung die Effektivwerte der Oberschwingungsströme in jedem Zeitfenster der diskreten Fouriertransformation (DFT) bestimmt. Diese Werte müssen $\leq 150 \%$ der anwendbaren Grenzwerte sein. Danach wird der arithmetische Mittelwert der in den DFT-Zeitfenstern gemessenen Werte über die gesamte Beobachtungsdauer berechnet. Die erhaltenen Mittelwerte für die einzelnen Oberschwingungsströme müssen kleiner oder gleich den vorgegebenen Grenzwerten sein. Die Beobachtungsdauer wählt man so, dass die Wiederholpräzision der Messung besser als $\pm 5 \%$ Prozent ist. In der Norm 61000-3-2 sind 4 Geräteklassen definiert, bei denen die Oberschwingungen des Eingangsstromes die Werte nicht überschreiten dürfen. Da es sich bei dem Projekt um symmetrische, dreiphasige, ohmsche Lasten handelt fällt dies unter die Klasse A. Dazu kommen folgende Einrichtungen, die die Klasse A beinhaltet:

- Symmetrische dreiphasige Geräte
- Haushaltsgeräte (ausser die, die in Klasse D fallen)
- Elektrowerkzeuge (ausser tragbare Elektrowerkzeuge)
- Beleuchtungsregler (Dimmer) für Glühlampen
- Audio-Einrichtungen

Falls es Geräte gibt, die nicht in die Klassen B bis D fallen, müssen sie automatisch als Geräte der Klasse A definiert werden.

Die Grenzwerte für den Höchstwert des Oberschwingungsstromes für Klasse A Geräte sind wie folgt definiert: Siehe Tabelle Basti

Ein weiterer wichtiger Wert, ist die jeweilige Beobachtungsdauer der Endgeräte. Es wurden 4 verschiedene Arten von Geräteverhalten definiert und dabei die Beobachtungsdauer bestimmt. Dies sieht man in der folgenden Tabelle: Siehe Tabelle Nando

Am Ende der Prüfung muss ein Prüfbericht abgegeben werden, der alle relevanten Informationen zu den Prüfbedingungen, die Beobachtungsdauer der Prüfung sowie die Wirkleistung oder den Grundschwingungsstrom und den Leistungsfaktor beinhalten.

2.11.2 EN 61000-3-3

Auch diese Norm wird für Geräte und Einrichtungen mit einem Nenn-Eingangsstrom von bis zu 16 A je Aussenleiter, die zum Anschluss an das öffentliche Niederspannungsnetz vorgesehen sind und keiner Sonderanschlussbedingung unterliegen angewendet. Ausserdem werden die Spannungsänderungen, die Spannungsschwankungen und die Flicker begrenzt. Falls Geräte und Einrichtungen diese Norm erfüllen, dürfen sie ohne weitere Prüfung an jeden Anschlusspunkt des öffentlichen Netzes angeschlossen werden. Die Nennleistung, welche die Geräte und Einrichtungen aufweisen sollten, sind ohne Einschränkungen kleiner als 11 kW bei Drehstromgeräten, 3.7 kW bei Einphasengeräten und 6.4 kW bei Zweiphasengeräten. Diese Norm trifft man unter anderem beifolgenden Geräten an:

- Haushaltsgeräte und tragbare Elektrowerkzeuge
- Motorbetriebene Geräte (Waschmaschine, Staubsauger, Elektrowärmegerät und Kocheinrichtungen)
- Beleuchtungseinrichtungen
- Automatische elektrische Steuerungen für Hausgebrauch und ähnliche Anwendungen
- Drehzahlgeregelte Antriebe
- Funk-Einrichtungen
- Lichtbogenschweisseinrichtungen
- Medizinische Geräte und Einrichtungen
- Mikrowellengeräte

Unter dem Begriff Elektrische Einrichtung versteht man eine Anlage, welches aus einem oder mehreren voneinander unabhängigen Geräten besteht. Sie bilden dann eine elektrische Einrichtung, wenn nur durch deren Zusammenwirken der bestimmungsgemässe Zweck der Einrichtung erzielt werden kann. Ein Beispiel wäre, bei einer elektrischen Einrichtung, der Treppenlichtautomat und die Glühlampe. Nur der Treppenlichtautomat ohne Beleuchtung erfüllt den technischen Zweck nicht. Ein weiteres Beispiel wäre der motorische Antrieb. Aber auch hier gilt, dass der Motor ohne mechanische Last den technischen Nutzen nicht erfüllen würde. Bei einem elektrischen Gerät handelt es sich zum Beispiel um einen Backofen und die dazu gehörigen einzelne Kochmodule eines Multifunktions-Herdes.

Die Norm schreibt eine Prüfung der zu beurteilenden Geräten an einer Prüfungsimpedanz vor. Die Impedanz Z_{ref} ist im unteren Bild ersichtlich und entspricht den folgenden Werten. Es gibt

bei der Bezugsimpedanz keine Unterscheidung im Anwendungsbereich zwischen Haushaltsgeräten und gewerblich genutzten Geräten. Stattdessen wird die Langzeit-Flickerstärke eingeführt und auf 65 % der Kurzzeit-Flickerstärke begrenzt.

Mit Hilfe des Flickerwertes kann man die Störeffindlichkeit des menschlichen Auges, auf Helligkeitsschwankungen bei der Beleuchtung, durch einen messbaren Wert ermitteln. Dieser Wert ist eine dimensionslose Zahl, welche das Störeffinden des Menschen ausdrückt, wenn er sich mit einer 60W Glühbirne beleuchtet. Die Helligkeit variiert dabei auf Grund von Spannungsschwankungen. Erhält man den Wert 0 so bedeutet dies, dass es am besten ist. Es gibt praktisch keine Schwankungen der Spannungshöhe und somit ist auch kein Flackern der Lampe ersichtlich. Der Flickerwert 1 wurde die Helligkeitsschwankung bei den meisten Versuchspersonen als störend wahrgenommen. Es ist jedoch nicht aussagend, bei einer zu messenden Stelle, eine Person nach ihrer persönlichen empfinden zu befragen, um so einen Flickerwert zwischen 0 und 10 zu erhalten. Die Messwerte würden so Person- und ortsabhängig sein. Ausserdem wären sie nicht mehr reproduzierbar. Aus diesem Grund setzten sich Forscher mit Studenten als Versuchspersonen zusammen und Beurteilten unterschiedlich flackerndes Licht. Man entwickelte einen Algorithmus und ein entsprechendes Formelwerk für das Durchschnittsempfinden der Erkenntnisse. Nun wurde ein geeignetes Messgerät entwickelt, welches den Flickerwert berechnen konnte. Man nennt dies auch das Flickermessverfahren. Die ausführliche Bestimmung ist in der Norm EN 61000-4-15 beschrieben.

Ein Beispiel zur Erkenntnis der Flickenforscher ist, dass die Frequenz, mit der eine Helligkeitsänderung auftritt, massgeblichen Einfluss auf das Störeffinden hat. Eine Helligkeitsänderung mit einer Frequenz von etwa 8.8 Hz wurde als am störendsten empfunden. Kleiner oder höherer Frequenzen stören dagegen nicht mehr so stark. Daraufhin entwickelte man ein Flickermeter, welches die Abhängigkeit der Empfindung von der Flickerfrequenz, die Abhängigkeit der Helligkeit der Glühlampe von der Spannungshöhe, das Verhalten der Glühbirne selbst und diverse andere Faktoren berücksichtigt. Das Flickmeter liefert alle 10 Minuten einen Wert, der mit Pst bezeichnet wird. Das P steht dabei für perceptibility units = Wahrnehmungseinheiten und ftßteht für short time. Der Wert, welcher man behandelt ist also der Kurzzeit-Flickerwert. Die EN 50160 Norm sagt aus, dass man 12 aufeinander folgende Pst-Werte zusammenfassend zu einem Plt-Wert (= long time-Flicker = Langzeit-Flicker) verrechnen kann. Genauer bedeutet dies, dass man die 12 Pst-Werte, die über 2 Stunden gemessen wurden, zusammenrechnet und daraus den Durchschnitt nimmt. Jeder einzelne Pst-Wert geht mit einer 3. Potenz in die Bewertung ein. Der Plt-Wert ist also der kubische Mittelwert der 12 Pst-Werte. Formel Die Quellenspannung U_{l10}, U_{l20}, U_{l30} entspricht der Nennspannung. Alle Spannungen werden auf die Nennspannung U_n normiert: Der Prüfkreis besteht aus der Prüfspannungsquelle, dem zu prüfenden Gerät (Prüfling) und einer Messeinrichtung z.B. Strommesser, Spannungszange oder einem Flickermeter.

relative Spannungsänderung:

$$d = \frac{\Delta U}{U_n} \quad (2.14)$$

relative Spannungsänderungsverlauf

$$d(t) = \frac{\Delta U(t)}{U_n} \quad (2.15)$$

relative konstante Spannungsabweichung

$$d_c = \frac{\Delta U_c}{U_n} \quad (2.16)$$

grösste relative Spannungsänderung

$$d_{max} = \frac{\Delta U_{max}}{U_n} \quad (2.17)$$

relative Spannungsschwankung

$$d(t) = \frac{\Delta U(t)}{U_n} \quad (2.18)$$

Mit Hilfe dieser Norm können Typenprüfung für bestimmte Geräte vorgenommen werden. Das Ziel dieser Typenprüfung ist es, die Übereinstimmung mit den Grenzwerten festzustellen. Diese werden unter Laborbedingungen an einem Bezugsnetz betrieben. Bei den festgelegten Betriebsbedingungen werden die erzeugten Spannungsschwankungen in Bezug auf die Bezugsimpedanzen gemessen und beurteilt. Falls Geräte die Grenzwerte dieser Norm einhalten, kann davon ausgegangen werden, dass sie zu keinerlei Beschwerden im Netz Anlass geben. Die elektromagnetische Verträglichkeit ist daher gewährleistet.

3 Simulation

Die beiden Steuerungsarten wurden mit Plecs und Matlab simuliert um genauer analysieren zu können, wie sich diese verhalten.

3.1 Simulation mit Plecs

Es wurde mit Plecs die Phasenanschnitt- und Schwinungspaketsteuerung und die Komination aus beiden Verfahren erstellt. Hier werden die Simulationen aufgezeigt sowie auch das FFT der einzelnen Verfahren.

3.2 Simulation mit Matlab

Um die Plecs-Simulation zu verifizieren, wurde die Verfahren auch mittels Matlab simuliert. In diesem Kapitel werden aufgezeigt wie dies gemacht wurde sowie die Resultate mit Plecs verglichen.

4 Messaufbau

Die Kombination aus beiden Verfahren wurde im Labor aufgebaut um das Verhalten in Realität beobachten zu können. Hierbei wird das Schema und der Messaufbau aufgezeigt.

5 Umsetzung

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie das fertige Produkt aufgebaut ist.

6 Validierung

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, welche Schritte gemacht wurden um sicherzustellen, dass das fertige Produkt auch funktioniert.

7 Schlusswort

Hier könnte Ihre Werbung stehen.

Ehrlichkeitserklärung

Wir erklären eidesstattlich, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet haben. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Nando Spiegel

Bastian van Dijke

Windisch, am 18.01.2019

Literatur

- [1] Dr. Rüdiger Paschotta. (2018). Phasenanschnittsteuerung, Adresse: <https://www.energie-lexikon.info/phasenanschnittsteuerung.html> (besucht am 15. Apr. 2019).
- [2] WolfgangS. (2006). Schwingungspaketsteuerung, Adresse: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schwingungspaketsteuerung.png> (besucht am 15. Apr. 2019).
- [3] Wikipedia. (2006). Circuit symbol for a triac, Adresse: <https://de.wikipedia.org/wiki/Triac#/media/File:Triac.svg> (besucht am 24. Apr. 2019).
- [4] Alexander Kamenka. (2019). OBERSCHWINGUNGEN KAPITEL 1: OBERSCHWINGUNGEN – DIE GRUNDLAGEN, Adresse: <https://www.ihks-fachjournal.de/sechsthemen-um-oberschwingungen-und-netzqualitaet-in-stromversorgungsnetzen/> (besucht am 4. Mai 2019).
- [5] C.Beneduce, *Analysis 3, Vorlesungsscript Teil 3*, 6. Mai 2019.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Phasenanschnitt mit einem Winkel von 135° [1]	2
2.2	Phasenanschnitt mit einem Winkel von 45° [1]	3
2.3	Schwingungspaketsteuerung 2/3 der Leistung [2]	3
2.4	Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung	4
2.5	Grundschiwingung mit 3. Ordnung [4]	6
2.6	Grundschiwingung mit 11. Ordnung [4]	6
2.7	Addition der verschiedenen Oberwellen [5]	7

Tabellenverzeichnis

2.1	Oberschwingungsfrequenzen	6
-----	---------------------------	---