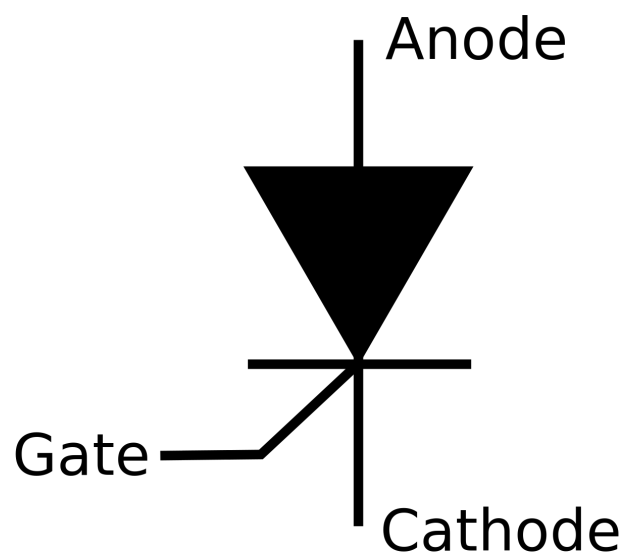


Netzurückwirkungen von Thyristorstellern mit ohmscher Last bei verschiedenen Steuerverfahren

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	10
2.11.2	EN 61000-3-3	12
3	Simulation	14
3.1	Simulation mit PLECS	14
3.2	Simulation mit Matlab	14
4	Messaufbau	15
5	Umsetzung	16
6	Validierung	17

7 Schlusswort	18
Literatur	20
Abbildungsverzeichnis	20
Tabellenverzeichnis	20

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.

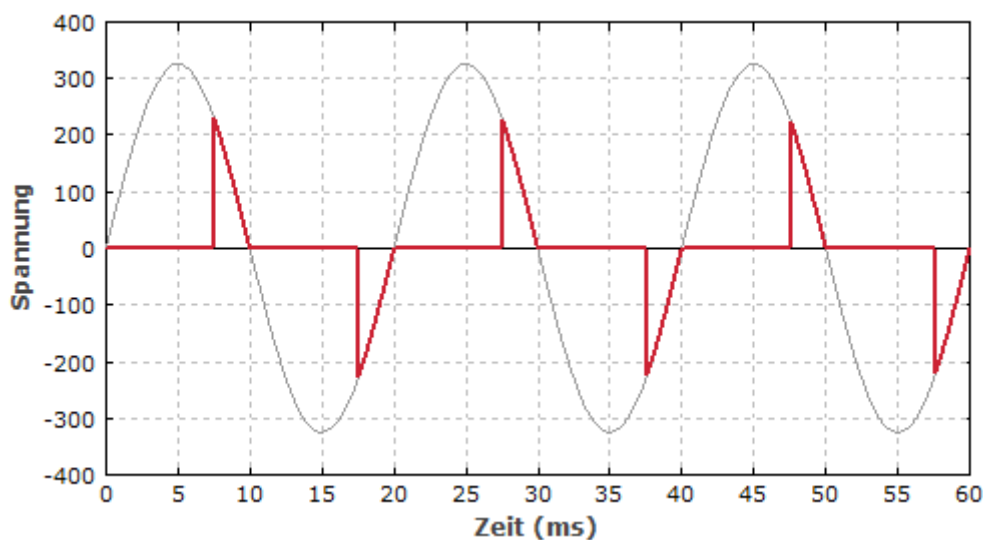
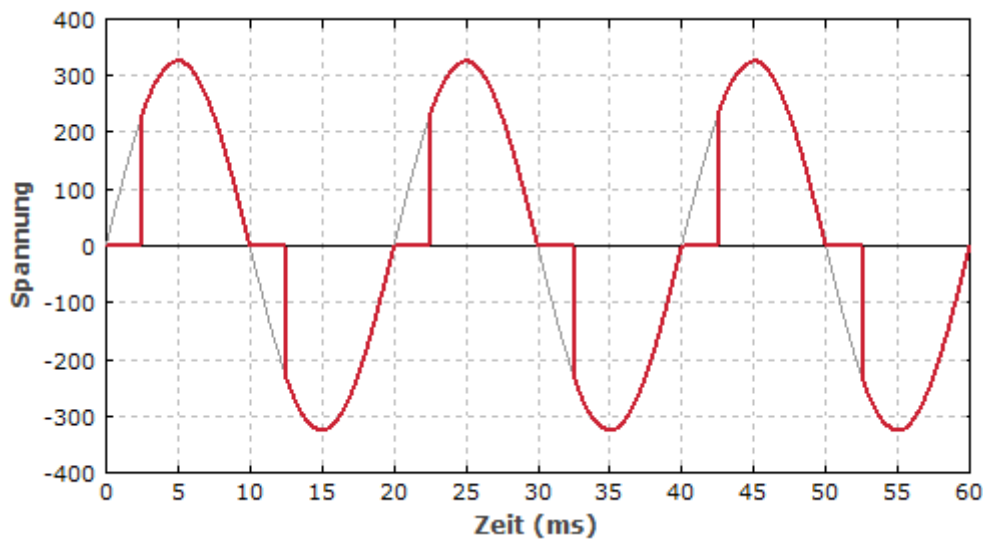


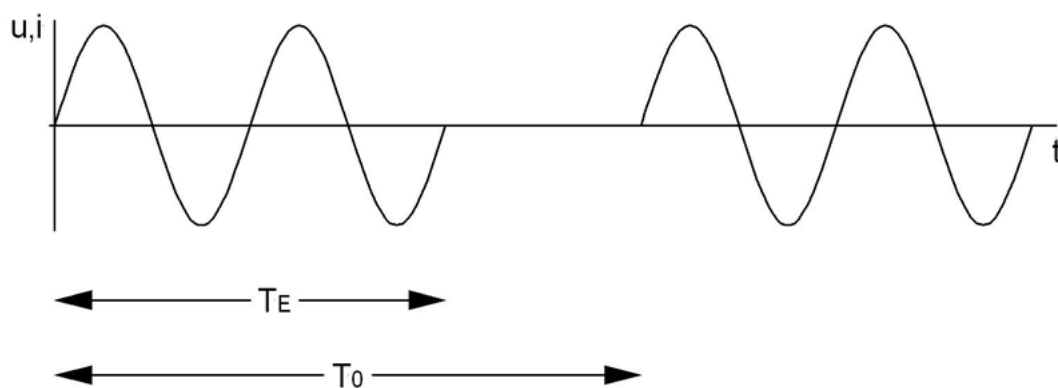
Abbildung 2.1: Phasenanschnitt mit einem Winkel von 135° [1]

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 kleinen 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.

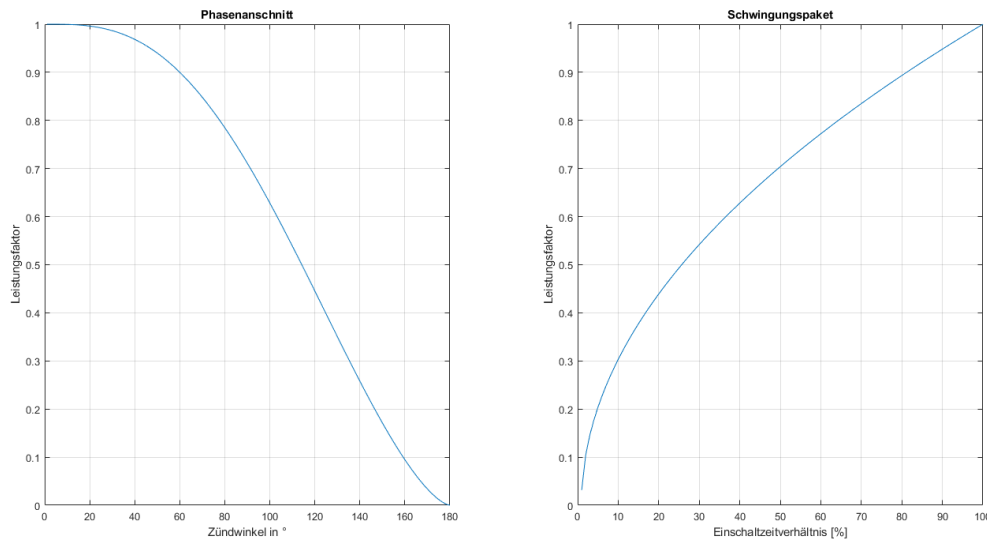


Abbildung 2.4: Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung

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 überschwingungsbehaftetes 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 Grundschwingungen 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

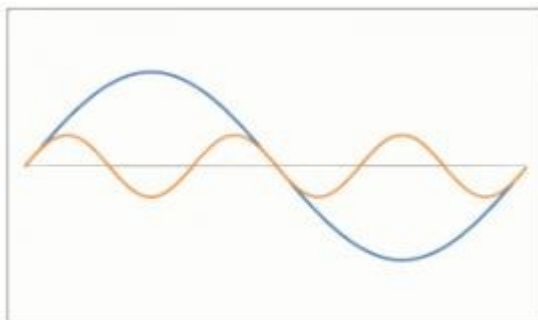


Abbildung 2.5: Grundschwingung mit 3. Ordnung [4]

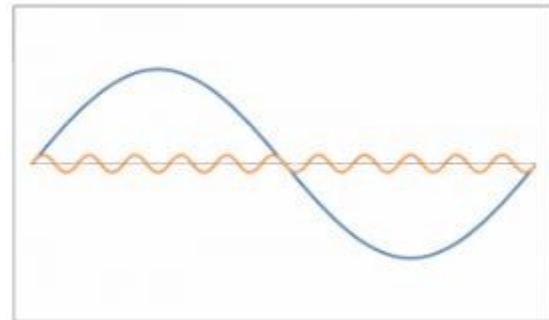


Abbildung 2.6: Grundschwingung mit 11. Ordnung [4]

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.

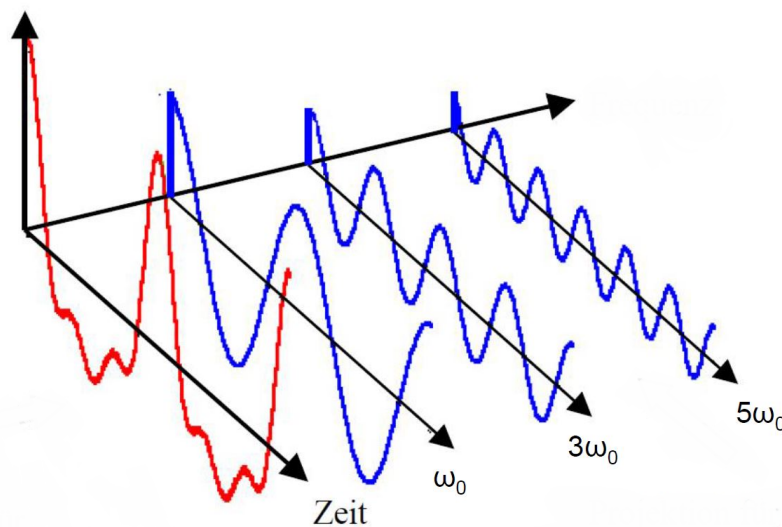


Abbildung 2.7: Addition der verschiedenen Oberwellen [5]

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 verzernten Sinusschwingung führen. Dies bedeutet so viel wie, eine verzernte 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 Netzzückwirkungsverhaltens 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

Im folgenden Text werden auf alle Normen eingegangen, welche für diese Arbeit als wichtig empfunden wurde. Es sind dies vor allem Normen für die Elektromagnetische Verträglichkeit. Dazu gehören auch die Grenzwerte der Oberschwingungsströme, die Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen in öffentlichen Niederspannungsnetzen... Die angewandten Normen sind in diesem Bericht nicht im Detail erläutert. Nur die für uns wichtigen Teile werden kurz beschrieben. Für weitere Segmente können die Normen nachgelesen werden.

2.11.1 EN 61000-3-2

Bei dieser Norm handelt es sich um Grenzwerte für Oberschwingungsströme von (Geräten mit einem Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter) Der Zweck dieser Norm ist es, die Grenzwerte für Oberschwingungen von Geräten festzulegen, die in den Anwendungsbereich dieser Norm fallen. Es sollte sichergestellt werden, dass unter Berücksichtigung der Aussendungen anderer Geräte bei Übereinstimmung mit den Grenzwerten, die Oberschwingungs-Störpegel nicht die festgelegten Verträglichkeitspegel überschreiten. Falls Geräte diese Anforderungen der Norm nicht erfüllen, kann der Anschluss an bestimmten Arten ans Niederspannungsnetz gleichwohl erlaubt werden,

dann wenn die Bedienungsanleitung eine Anforderung enthält, dass das jeweils zuständige Energieversorgungsunternehmen nach einer Anschlussgenehmigung gefragt werden muss.

Anwendungsbereich

Dieser Teil gilt für die Begrenzung der Oberschwingungsströmen, die in das öffentliche Niederspannungsnetz eingespeist werden. Ausserdem legen sie die Grenzwerte der Oberschwingungsanteile des Eingangsstromes fest, die durch ein Gerät hervorgerufen werden können, das unter festgelegten Bedingungen geprüft wird. Die Oberschwingungsanteile wie im Anhang A gezeigt gemessen. Die Prüfbedingung für die Messung von Oberschwingungsströme sind für die verwendeten Geräten in Anhang C angegeben.

Klassifizierung von Geräten

Um zu unterscheiden welche Betriebsmittel welche Oberschwingungsströme zu Begrenzen haben, wurden die Geräte in vier verschiedene Klassen von A bis D unterteilt. Da es sich bei dem Projekt um ein symmetrische, dreiphasige, ohmsche Last handelt fällt dies unter die Klasse A. Dazu kommen folgende Einrichtungen die die Klasse A auch noch beinhaltet:

- Haushaltsgeräte, ausgenommen Geräte, die in die Klasse D fallen
- Elektrowerkzeuge, ausgenommen tragbare Elektrowerkzeuge
- Beleuchtungsregler
- Audio-Einrichtung

Die weiteren drei Klassen werden hier nicht weiter aufgezählt, da sie für die Projektarbeit nicht relevant sind. Ausserdem fallen alle Geräte die nicht speziell aufgelistet sind sowieso in die Klasse A.

Allgemeine Anforderung

Alle Anforderungen und Grenzwerte sind auf die Klemmen des Leistungseingangs von Geräten anzuwenden, die zum Anschluss an 50-Hz oder 60-Hz-Netze mit 220/380 V, 230/400 V, 240/415 V vorgesehen sind. Für alle anderen Fälle liegen derzeit keine Anforderungen und Grenzwerte vor.

Für symmetrische Steuerprinzipien, die wahrscheinlich Oberschwingungen niedriger Ordnung ($n \leq 40$) im Eingangsstrom verursachen, dürfen unter der Bedingung für die Leistungssteuerung von Heizelemente verwendet werden, dass die Vollschrwingungs-Eingangsleistung kleiner oder gleich 200 W ist oder dass die Grenzwerte der Tabelle 3 nicht überschreiten.

Für die Prüfanordnung muss eine Aussendungsmessung durchgeführt werden. Dabei muss das Bedienelement für den Benutzer so eingestellt werden, dass der erwartete höchste gesamt Oberschwingungsstrom (THC) unter üblichen Betriebsbedingungen erreicht wird. Der Versuch muss nicht so aufgebaut werden, dass es den ungünstigsten Fall für den gesamt Oberschwingungsstrom (THC) abdeckt. Die Grenzwerte für Oberschwingungsströme gelten nur für die Aussenleiter-Netzströme und nicht für die Ströme im Nulleiter.

Messverfahren

Bei dem Messverfahren muss die Prüfung mit den Allgemeinen Anforderungen durchgeführt werden. Diese beinhalten die Wiederholpräzision der Messung, der Anlauf und Stillsetzen eines Gerätes, die Anwendung der Grenzwerte für einzelne Oberschwingungsströme und den Prüfbericht der gesamten Informationen. Ausserdem ist die Festlegung der Dauer der Prüfung ein

weiterer wichtiger Aspekt des Messverfahrens. In der Tabelle 4 sind die vier verschiedene Arten von Geräteverhalten dargestellt.

Grenzwerte für Oberschwingungsströme

Um die Anwendbarkeit der Grenzwerte für Oberschwingungsströme eines Gerätes zu bestimmen, wurde ein Flussdiagramm erstellt. Die Prüfergebnisse des Instrumentes können mit dem Diagramm verglichen werden und so die Übereinstimmung mit der Norm gewährleisten. Es gibt jedoch Arten von Geräten bei denen die Grenzwerte bei dieser Norm nicht festgelegt ist. Ein Beispiel wäre ein professionell genutztes Gerät mit einer Gesamt-Bemessungsleistung, die grösser als ein 1KW ist.

Bei den Geräten der Klasse A dürfen die Oberschwingungen des Eingangsstromes die Werte in der folgenden Tabelle nicht überschreiten.

2.11.2 EN 61000-3-3

Bei der folgenden Norm betrachtet man die Grenzwerte und die Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker die in das öffentlichen Niederspannungs- Versorgungsnetzen eingeführt werden. Die Geräte und Einrichtungen werden unter festgelegten Bedingungen geprüft. Dieser Teil der Norm gilt für elektrische Geräte die mit einem Bemessungs- oder Eingangsstrom bis zu 16 A pro Leiter haben und zum Anschluss an das öffentliche Niederspannungs- Verteilnetz mit einer Nennspannung von 220 V - 250 V mit einer Frequenz von 50 Hz vorgesehen sind. Sie unterliegen ausserdem keinen besonderen Anschlussbedingungen. Die Grenzwerte beziehen sich bei dieser Norm vor allem auf die Spannungsschwankungen, die von Verbrauchern wahrgenommen werden, die an der Schnittstelle zwischen Netzinhaber und Kundenanlage des Gerätenutzer angeschlossen werden. Daher können Störgrößen in der Stromversorgung entstehen, die die Grenzwerte überschreiten. Dies kommt vor, wenn die tatsächliche Impedanz am Anschlusspunkt des Gerätes innerhalb der Kundenanlage die Prüfimpedanz überschreiten. Die angegebenen Grenzwerte dieser Norm beinhalten vor allem auf dem abwechslungsreichen Empfinden von Flickern im Licht von 230V /60 W- Glühlampen, der durch Schwankungen des Netzes hervorgerufen wird.

Ein wichtiger Begriff für das Verständnis dieses Dokumentes ist der Flicker oder auch das Flimmern genannt. Es beschreibt den Eindruck von visueller Empfindlichkeit der Augen. Dies tritt meistens durch elektrische Spannungsschwankungen im Netz auf. Man nimmt dies Leuchtdichtschwankungen optisch bei Leuchtmitteln wie Leuchtstofflampen oder Glühlampen wahr. Mit dem Flicker kann man ausserdem die Spannungsqualität des öffentlichen Netzes und die Netzrückwirkung des Verbrauches in ein solches Netz beurteilen.

Ermittlung von Spannungsänderung, Spannungsschwankung und Flicker

In diesem Abschnitt geht es darum die relative Änderung der Spannung, die Kurzzeitflickerwerte und die Langzeitflickerwerte zu ermitteln. Für die relative Änderung der Spannung muss die Differenz von

Grenzwerte

Die folgenden Grenzwerte müssen für Spannungsschwankungen und Flicker an den Versorgungsklemmen des Prüflings angewendet werden. So fern die Prüfungen, welche durchgeführt wurden, die Grenzwerte dieser Norm einhalten, können als Typen geprüft angesehen werden. Die Prüfbedingung für die Grenzwerte beinhaltet folgende Bestimmungen:

- Der Kurzzeitflickerwert P_{st} darf nicht grösser als 1.0 sein
- Der Langzeitflickerweg P_{it} darf nicht grösser als 0.65 sein
- T_{max} , der
-

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/sechstemen-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
-----	---------------------------	---