



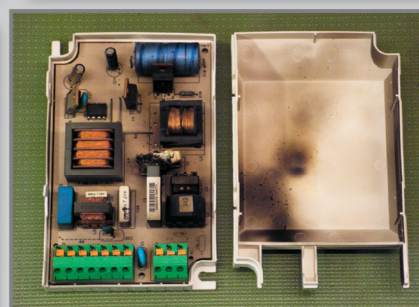
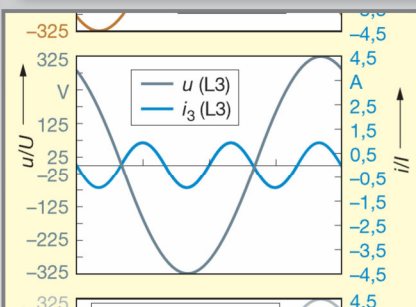
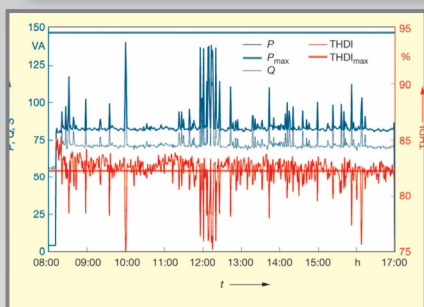
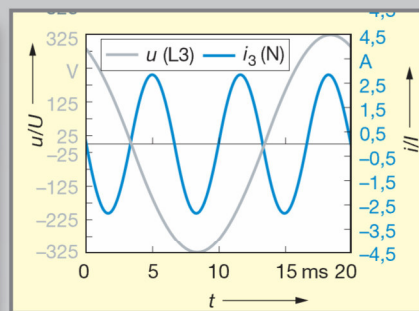
ELEKTRO PRAKTIKER
T H E M A

Analyse und Auswirkungen **Ober- schwingungen**



$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$



Beitragsserie aus der Fachzeitschrift ELEKTROPRAKTIKER

Teil 1: Grundlagen

Teil 2: Quantifizierung (THD) und Auswirkungen

Teil 3: Auswirkungen auf Neutralleiter, Drehfeldmotoren und Trafos

Teil 4: Rückwirkung von Generatoren, Einfluss auf Kondensatoren, Betriebsströme, Auswirkung im Mittelspannungsnetz

Teil 5: Abhilfemöglichkeiten auf Netz- und Geräteseite

Teil 6: Die Normensituation

Teil 7: Schlussbetrachtung

Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen

Teil 1: Grundlagen

S. Fassbinder, Düsseldorf

So genannte Oberschwingungen oder auch Harmonische entstehen vorwiegend beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel an Wechsel- und Drehstromnetzen. Sie stellen für diese Netze eine zusätzliche und neuartige Beanspruchung dar, für die sie folglich auch nicht ausgelegt waren, was schon für Überraschungen wie Korrosion z. B. am Fundamenterder oder an Wasserrohren sorgte. PC-Netzwerke blieben um mehrere Größenordnungen hinter den versprochenen „Gigabits“ zurück und stürzten ab. Manchmal wurden Neutralleiter heiß, in extremen Einzelfällen bis zum Brand, obwohl doch jede Elektrofachkraft weiß, dass sie einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf die drei Außenleiter eines Drehstromnetzes verteilen muss, und schon ist der Neutralleiter stromlos. Eben das aber funktioniert heute nicht mehr unbedingt. Dieser Beitrag bietet daher Detailkenntnisse zu Ursachen, Zusammenhängen und Lösungsmöglichkeiten.

1 Oberschwingungen – was ist das überhaupt?

Manche meinen vielleicht noch immer, Oberschwingungen gingen von Trunkenheit des Personals in der Gastronomie aus – doch mitnichten. Erheblich mehr haben sie mit den aus der Musik bekannten Obertönen zu tun, weswegen sie auch als „Harmonische“ bezeichnet werden, obschon sie im Netz für allerlei Disharmonie sorgen können – aber keineswegs müssen, und darum geht es.

Autor

Dipl.-Ing. Stefan Fassbinder ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.

1.1 Die Mathematik dahinter

Ihnen liegt das Prinzip zu Grunde, dass sich jeder zwar periodische, nicht jedoch sinusförmige Vorgang durch eine theoretisch unendliche Summe sinusförmiger Vorgänge zusammensetzen lässt, wie der französische Mathematiker Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768 – 1830) im Jahre 1822 herausfand. Während es damals noch fast keinen elektrischen Strom gab, findet diese Entdeckung heute ihre wohl bedeutendste praktische Anwendung in der Elektrotechnik. Die so genannte und unten an zwei Beispielen dargestellte **Fourier-Analyse** einer beliebigen, periodisch verlaufenden Kurvenform besagt demnach, dass eine jede solche Funktion aus sinusförmigen Teilschwingungen besteht. Es sind dies die Grundschiwingung, die den sinusförmigen Anteil gleicher Frequenz (Grundfrequenz) der betreffenden

Funktion hat, und die Oberschwingungen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache hiervon sind. Den ganzzahligen Faktor, um den sich die Frequenz einer Teilschwingung von der Grundschiwingungsfrequenz unterscheidet, nennt man die Ordnung oder Ordnungszahl der jeweiligen Teilschwingung. Die Grundschiwingung hat somit die Ordnungszahl 1.

In Bild 1 wurde ein dreieckförmiger, in Bild 2 ein rechteckiger Stromverlauf einer Frequenz von jeweils 50 Hz aus seiner Grundschiwingung und seinen Oberschwingungen zusammengesetzt. Beiden Fällen sind zwei Beobachtungen gemein:

- In beiden Verläufen sind Harmonische gerader Ordnungszahlen nicht enthalten. Die kleinste jeweils vorkommende Harmonische ist somit die 3. mit ihrer Frequenz von 150 Hz. Dies ist typisch für die meisten technisch vorkommenden Kurvenformen.
- In beiden Fällen nehmen die Amplituden der einzelnen Oberschwingungen von einer Ordnungszahl zur nächsthöheren kontinuierlich ab. Dies ist immer so, abgesehen vom gänzlichen Fehlen der geradzahlgigen Anteile. Folglich kann man für technische Zwecke, abhängig von der erforderlichen Genauigkeit, das Zusammenzählen der Oberschwingungen bei einer bestimmten Ordnungszahl abbrechen. Im Beispiel wurde in beiden Fällen bis zur 17. gerechnet.

Daneben gibt es aber auch einige Abweichungen zwischen beiden Fällen. Zur Veranschaulichung wurden die Werte zusätzlich in Tafel 1 und Tafel 2 einander numerisch gegenüber gestellt. Die Amplituden der beiden Beispielkurven wurden so gewählt, dass sich in jedem Fall ein theoretischer Gesamt-Effektivstrom von 1 A ergibt. Beim voll ausgetasteten Rechteckstrom (der nicht „lückt“, also keine „Pausen“ um die Nulldurchgänge aufweist)

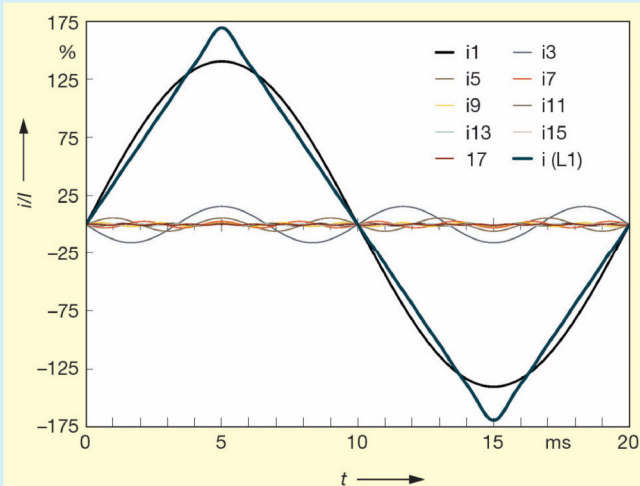


**Mit epPLUS
Fachinformationen finden,
wenn sie gebraucht werden!**

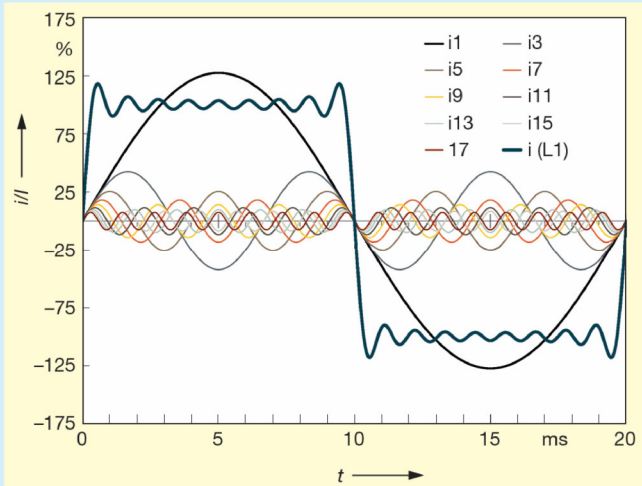
Lesen Sie u.a.:

- ▶ 126 Fachartikel zum Thema Oberschwingungen
- ▶ 32 Fachartikel zum Thema EMV und
- ▶ 149 Fachartikel zum Thema Schutzmaßnahmen und -einrichtungen

Mehr unter www.elektropraktiker.de



❶ Grafische Synthese eines Dreieckstroms (dick, dunkelblau) aus der Grundschwingung (schwarz) und den Oberschwingungen 3 bis 17



❷ Grafische Synthese eines Rechteckstroms (dick, dunkelblau) aus der Grundschwingung (schwarz) und den Oberschwingungen 3 bis 17

Quellen: S. Fassbinder, ep

entspricht dies natürlich einem Scheitelwert von ebenfalls 1 A – denn was heißt schon „Scheitel“ bei einem Rechteck?

Bei der Dreieckform beträgt der Faktor immer $1/\sqrt{3}$, wie sich in Formelsammlungen nachlesen lässt. In den beiden Tafeln wurden jeweils die Effektivwerte der darzustellenden Summenkurven im Bereich bis zur Ordnungsnummer 17 zusammengezählt. Die Addition erfolgt „pythagoräisch“; der Gesamt-Effektivwert errechnet sich also, wie immer bei der Überlagerung mehrerer Frequenzen, indem man die einzelnen Werte quadriert, die Quadrate addiert und aus der Summe wieder die Wurzel zieht. Ein Minuszeichen bedeutet lediglich, dass die betreffende Harmonische mit einer negativen Halbschwingung beginnt, obwohl die Grundschwingung mit einer positiven Sinus-Halbschwingung anfängt. Beim Quadrieren scheiden die Minuszeichen dann dahin: Auf den Effektivwert des Gesamtstroms wirken sie sich nicht aus. Die so errechneten Effektivwerte wurden farblich hervorgehoben. Folgende Unterschiede fallen dabei auf:

- Man erkennt, dass in Tafel ❶, auf 3 Komastellen genau gerechnet, mit 17 Harmonischen dieser Wert genau erreicht wird, in Tafel ❷ dagegen nicht. Man hätte hier noch weitere Oberschwingungen berücksichtigen müssen, um zur gleichen Genauigkeit zu gelangen.
- Man erkennt das Gleiche auch in den Diagrammen: In Bild ❷ sind die gleichen Oberschwingungen enthalten wie in Bild ❶; in Bild ❷ jedoch ist jede einzelne von ihnen stärker vertreten als diejenige entsprechender Ordnung in Bild ❶.
- Auch optisch ist dieser Unterschied wahrnehmbar: Während in Bild ❶ die Synthese der Dreieckskurve recht gut gelungen ist, fehlt in Bild ❷ noch ziemlich viel bis hin zu etwas, was sich mit einigem Recht „Rechteck“ hätte nennen dürfen.

1.2 Die anschauliche Vorstellung

Und das ist kein Zufall; fügt sich doch die ‚Zielkurve Dreieck‘ schon einigermaßen ‚harmonisch‘ in die Sinuskurve der Grundschwingung hinein. Was nun noch in Form von Oberschwingungen beschrieben werden muss, ist die Differenz zwischen beiden – und das ist hier nicht besonders viel.

Ganz anders sieht die Sache im zweiten Fall aus: Das Rechteck ist weit davon entfernt, Ähnlichkeiten mit seiner eigenen Grundschwingung, also einer Sinusschwingung gleicher Frequenz und ähnlicher Amplitude, aufzuweisen. Entsprechend groß ist die durch Oberschwingungen aufzufüllende Differenz. Tatsächlich sind die Oberschwingungen kein Gedankenkonstrukt der Mathematiker, sondern existieren wirklich und wahrhaftig physisch im Draht, wo sie sich messen und durch entsprechende Schaltungen auch z. B. voneinander trennen lassen, sodass sie von

dort an einzeln in separaten Drähten weiter fließen.

Umgekehrt bedeutet dies aber wiederum nicht, dass sich – noch vor der Trennstelle – ein Elektron im selben Moment von links nach rechts bewegt, in dem sich ein anderes von rechts nach links bewegt, auch wenn eine Oberschwingung zum selben Zeitpunkt einen negativen Augenblickswert haben kann, in dem eine andere gerade positiv ist.

Hinter der Trennstelle dagegen können sehr wohl die Augenblickswerte der einzelnen Ströme in den einzelnen Leitern unterschiedliche Vorzeichen haben. Vergleichbar ist diese Situation derer in den drei Neutralleitern, werden diese separat zum Sternpunkt zurück geführt statt bis zum Punkt der Aufteilung in Einphasen-Stromkreise einen gemeinsamen Neutralleiter zu legen. Die typischen Merkmale und Auswirkungen einer jeden der einzelnen Frequenzen sind aber auch vorher schon, im

Tafel ❶ Rechnerische Synthese eines Dreieckstroms aus der Grundschwingung und den Harmonischen 3 bis 17

Errechnete Werte		Quadratwerte			Fourier-Koeffizienten (Scheitelwerte)
Echt-Effektivwert: $I_{\text{eff}} = 1,0000 \text{ A}$ Betrags-Mittelwert: $I_{\text{AV}} = 0,8660 \text{ A}$		Dreieck	gesamt	nur für THD	
Grundschwingung:	$I_1 = 0,9927 \text{ A}$	$I_1^2 =$	0,9855 A ²	0,0000 A ²	1,4039 A
3. Oberschwingung:	$I_3 = -0,1103 \text{ A}$	$I_3^2 =$	0,0122 A ²	0,0122 A ²	-0,1560 A
5. Oberschwingung:	$I_5 = 0,0397 \text{ A}$	$I_5^2 =$	0,0016 A ²	0,0016 A ²	0,0562 A
7. Oberschwingung:	$I_7 = -0,0203 \text{ A}$	$I_7^2 =$	0,0004 A ²	0,0004 A ²	-0,0287 A
9. Oberschwingung:	$I_9 = 0,0123 \text{ A}$	$I_9^2 =$	0,0002 A ²	0,0002 A ²	0,0173 A
11. Oberschwingung:	$I_{11} = -0,0082 \text{ A}$	$I_{11}^2 =$	0,0001 A ²	0,0001 A ²	-0,0116 A
13. Oberschwingung:	$I_{13} = 0,0059 \text{ A}$	$I_{13}^2 =$	0,0000 A ²	0,0000 A ²	0,0083 A
15. Oberschwingung:	$I_{15} = -0,0044 \text{ A}$	$I_{15}^2 =$	0,0000 A ²	0,0000 A ²	-0,0062 A
17. Oberschwingung:	$I_{17} = 0,0034 \text{ A}$	$I_{17}^2 =$	0,0000 A ²	0,0000 A ²	0,0049 A
Summe der Quadrate:		$\sum I_n^2 =$	1,0000 A ²	0,0144 A ²	
Wurzel hieraus:			1,0000 A	0,1202 A	
THDR (r: root mean square):			0,120 A/0,999 A = 12,0 %		
THDF (f: fundamental):			0,120 A/0,992 A = 12,1 %		

Blitz- und Überspannungsschutz

NEU!



Lesen Sie darin praxisnahe Fachartikel zu den Themen:

- Normen und Vorschriften: Blitzschutz-Normenreihe DIN EN 62305:2011 Fundamentender – Neuausgabe der DIN 18014
- Blitzschutzmaßnahmen: Erfahrungen beim Prüfen von Blitzschutzsystemen
- Blitz- und Überspannungs-Schutzgeräte und
- Leser fragen – Experten antworten darunter: Überspannungsschutz hinter einer FI-Schutteinrichtung
- u. v. m.

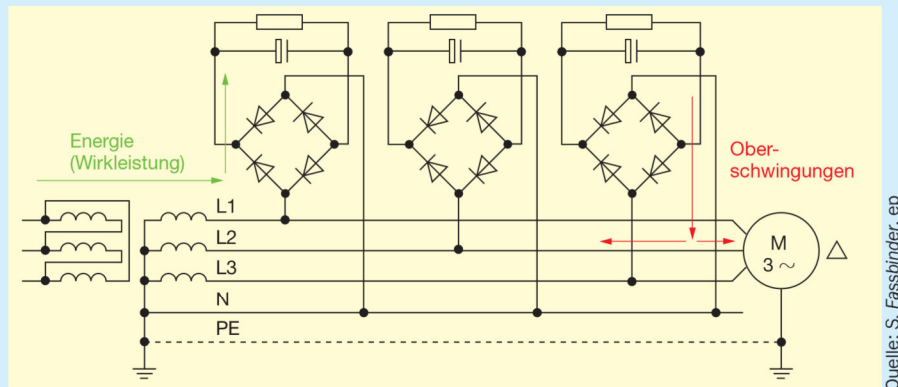
Auch als digitale Version erhältlich!

15,- €

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/sonderhefte

oder über den Bestellschein hinten im Heft.



Quelle: S. Fassbinder, ep

3 Überspannungen fließen „stromaufwärts“

gemeinsamen Draht vor der Aufteilung, gleichzeitig nachweisbar. Das macht die Vorstellung dessen, was wirklich im Draht abläuft, ein wenig schwierig.

Oberspannungen entstehen durch nichtlineare Lasten. Dies sind – wiederum anschaulich dargestellt – solche, deren Impedanzen nicht konstant sind, sondern sich mehrmals je Periode des Wechselstromnetzes ändern. Man denke z. B. an eine einfache Diode:

In dem Moment, in dem sich der Strom umkehrt, ändert sich die Impedanz nahezu schlagartig von einem sehr niedrigen zu einem sehr hohen Wert oder umgekehrt.

Dies und viele ähnliche Zusammenhänge werden Gegenstände der folgenden Ausführungen sein.

2 Spannungen oder Ströme?

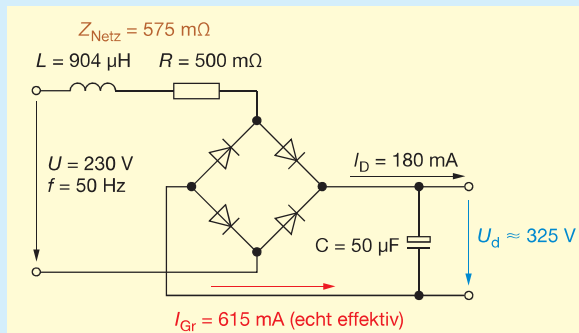
Die Spannung, die Kraftwerks-Generatoren, in der Regel Drehstrom-Synchronmaschinen, erzeugen, ist im Prinzip sinusförmig. Dies ergibt sich ganz einfach daraus, dass diese Spannung durch eine Rotationsbewegung

erzeugt wird. Der vermehrte Einsatz kleinerer dezentraler Einheiten – Stichwort Energiewende – ändert daran zunächst einmal wenig, solange diese Maschinen direkt am Netz laufen (Blockheizkraftwerke). Bei solchen, die über elektronische Umrichter (Wind) bzw. Wechselrichter (Sonne) einspeisen, bemüht man sich mit ebenfalls elektronischen Mitteln, die Sinusform so gut wie möglich – nein, eher so schlecht wie es gerade mal ausreicht, um die Mindestforderungen in den Normen zu erfüllen – wieder herzurichten (Abschnitt 5.2.2).

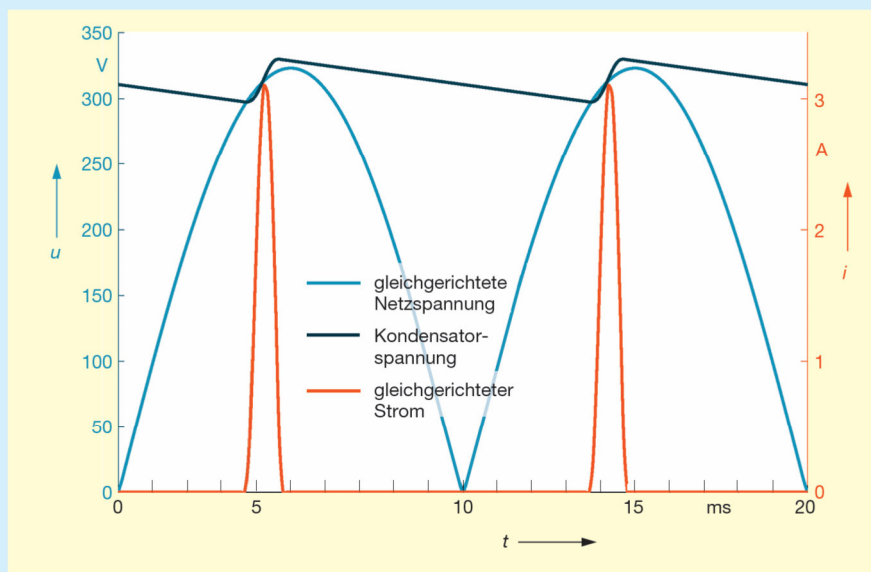
Tatsache bleibt jedoch, solange es noch rotierende Maschinen im Kraftwerkspark gibt, dass die magnetisch erzeugte Spannung proportional zur Änderungs-Geschwindigkeit des magnetischen Flusses in der Hauptwicklung der betreffenden Maschine ist. Der magnetische Fluss in der Hauptwicklung ist proportional zum Kosinus des Winkels zwischen dieser und der Erregerwicklung. Die Änderungs-Geschwindigkeit dieses magnetischen Flusses ist somit proportional zum Sinus des Winkels zwischen den Wicklungen. Fertig ist die Sinusspannung – sofern die Drehzahl keinen schnellen Schwankungen

Tafel 2 Rechnerische Synthese eines Rechteckstroms aus der Grundschiwingung und den Harmonischen 3 bis 17

Errechnete Werte		Quadratwerte			Fourier-Koeffizienten (Scheitelwerte)
Echt-Effektivwert: $I_{\text{eff}} = 0,9887 \text{ A}$		Rechteck	gesamt	nur für THD	
Betrags-Mittelwert: $i_{\text{AV}} = 1,0000 \text{ A}$					
Grundschiwingung:	$I_1 = 0,9003 \text{ A}$	$I_1^2 =$	0,8106 A ²	0,0000 A ²	1,2732 A
3. Oberschiwingung:	$I_3 = 0,3001 \text{ A}$	$I_3^2 =$	0,0901 A ²	0,0901 A ²	0,4244 A
5. Oberschiwingung:	$I_5 = 0,1801 \text{ A}$	$I_5^2 =$	0,0324 A ²	0,0324 A ²	0,2546 A
7. Oberschiwingung:	$I_7 = 0,1286 \text{ A}$	$I_7^2 =$	0,0165 A ²	0,0165 A ²	0,1819 A
9. Oberschiwingung:	$I_9 = 0,1000 \text{ A}$	$I_9^2 =$	0,0100 A ²	0,0100 A ²	0,1415 A
11. Oberschiwingung:	$I_{11} = 0,0818 \text{ A}$	$I_{11}^2 =$	0,0067 A ²	0,0067 A ²	0,1157 A
13. Oberschiwingung:	$I_{13} = 0,0693 \text{ A}$	$I_{13}^2 =$	0,0048 A ²	0,0048 A ²	0,0979 A
15. Oberschiwingung:	$I_{15} = 0,0600 \text{ A}$	$I_{15}^2 =$	0,0036 A ²	0,0036 A ²	0,0849 A
17. Oberschiwingung:	$I_{17} = 0,0530 \text{ A}$	$I_{17}^2 =$	0,0028 A ²	0,0028 A ²	0,0749 A
Summe der Quadrate:		$\sum I_n^2 =$	0,9775 A ²	0,1669 A ²	
Wurzel hieraus:			0,9887 A	0,4086 A	
THDR (r: root mean square)			0,408 A / 0,988 A = 41,3 %		
THDF (f: fundamental)			0,408 A / 0,900 A = 45,4 %		



④ Schaltung und Parameter zu Bild 5



Quellen: S. Fassbinder, ep

⑤ Sich rechnerisch ergebende Kurvenverläufe der Kondensatorspannung und des gleichgerichteten Netzstroms aus Bild 3

unterliegt und das Feld homogen ist. Für Ersteres sorgt das Massenträgheitsmoment; um Zweiteres bemüht man sich bestens, aber letztlich gleichen sich kleine Unregelmäßigkeiten bei der Vielzahl an Maschinen gegenseitig aus.

Fazit: Die induzierte Spannung, also sozusagen ‚die Leerlaufspannung des Netzes‘, kommt dem Schönheits-Ideal der Sinusschwingung [lat. sinus = Busen] schon sehr nahe. Die Abweichung läge, liefe denn das Netz jemals leer, deutlich unter 1 %.

Oberschwingungen treten zunächst nur im Strom auf: Wie beschrieben, verändert eine nicht lineare Last ihre Impedanz abhängig vom Punkt der Phase (z. B. Dimmer, Abschnitt 3.2) bzw. vom Augenblickswert der Spannung (Abschnitt 3.1) oder des Stroms (z. B. eine Diode, einzeln für sich betrachtet, oder eine Gas-Entladung). Dadurch werden die Stromverläufe gegenüber dem Verlauf der sie treibenden Spannung verzerrt. Nur durch die nie ganz vermeidbaren Impedanzen im Netz, also über die Spannungsfälle, übertragen sich diese Verzerrungen auch auf die Spannung.

Folgende Punkte sind in diesem Zusammenhang hervorzuheben:

- Nur bei falschem mechanischem oder elektrischem Aufbau der Netze (s. Abschnitt 6) stellen die verzerrten Ströme an sich schon ein Problem dar. Nur indirekt wird hierdurch auch die Kurve der Spannung ‚verbeult‘. Das Ausmaß dieser Verformungen wird teilweise durch Normen ‚geregelt‘ [1], sofern man dies denn so nennen kann.
- Eine Äußerung wie „Dieses Netz hat so und so viel Verzerrungsgehalt“ muss sich immer auf die Spannung beziehen. Beim Strom ist die pauschale Angabe eines Wertes für den Verzerrungsgehalt unmöglich. Dieser hängt vielmehr von den am jeweiligen Endstromkreis betriebenen Verbrauchern ab.
- Umgekehrt beeinflussen die Parameter des Netzes das Ausmaß an Harmonischen im speisenden Strom einzelner Endgeräte. **Der Oberschwingungsgehalt ist also auch in Bezug auf das einzelne Gerät keine fixe, unabhängige Größe!**
- Oberschwingungen fließen also gleichsam ‚stromaufwärts‘ vom Endgerät hin zur speisenden Energiequelle (Bild ③) – entgegen der (bislang in der konventionellen Stromversorgung üblichen) Energierichtung vom Großkraftwerk zum Kleingerät!

- Da die inneren Impedanzen der Netze in der Regel um eine bis zwei Größenordnungen niedriger sind als die der Verbrauchsmittel, ist der Gehalt an Oberschwingungen in der Spannung normalerweise deutlich kleiner als im Strom.
- Lässt sich das Auftreten von Strom-Oberschwingungen durch geeignete Auslegung des Netzes oft deutlich reduzieren, so wird dies stets mit einer zunehmenden Verzerrung der Spannung erkauft und umgekehrt, wie später besonders deutlich im Abschnitt 5.5 gezeigt werden wird.

Entsprechend wichtig ist es zum Verständnis der Zusammenhänge und Auswirkungen und zur Auswahl der passenden Gegenmaßnahmen – ebenso wie zur Beurteilung, ob Maßnahmen überhaupt erforderlich und angemessen sind – nachfolgend das Zusammenspiel von Spannungs- und Strom-Harmonischen detailliert darzustellen.

3 Wann, wie und wo Oberschwingungen entstehen

Im Kraftwerk also schon mal nicht. Im PV-Wechselrichter auch nicht, wenn alles gut geht. Oberschwingungen gehen von bestimmten Lasten aus. Solche Lasten gab es vor der Einführung der Elektronik kaum – ausgenommen Entladungslampen, aber bei diesen wurden die Auswirkungen der Unlinearität durch die ohnehin erforderliche Reihenschaltung mit einer großen Induktivität weitgehend unterdrückt. Außerdem wurden die Oberschwingungen, so sie denn auftraten, nicht als Störungen wahrgenommen, da es die hierdurch gestörten Anlagen, vorwiegend Datennetze, auch noch nicht gab.

3.1 Gleichrichterschaltungen mit Glättungskondensatoren

Elektronik muss in nahezu allen Fällen mit Gleichstrom versorgt werden, und zwar lückenlos. Gleichrichten durch einfaches Umpolen einer Halbschwingung der Sinusspannung mittels eines Brückengleichrichters genügt zum Betrieb eines Gleichstrommotors, aber kaum jemals zur Versorgung eines elektronischen Schaltkreises.

Der Nulldurchgang der Wechselspannung und der ihn umgebende Bereich zu niedriger Augenblickswerte werden daher mit einem Kondensator gepuffert (Bild ④), der seinerseits nur während einer relativ kurzen Zeit um den Spannungs-Scheitelwert herum (Stromflusswinkel) wieder geladen wird. Nur in diesem kleinen Zeitbereich fließt noch Strom aus dem Netz, dafür dann aber umso heftiger (Bild ⑤). Die dabei auf der Wechselstromseite des Gleichrichters entstehenden Ströme haben mit einer Sinusform nicht mehr viel gemein, bestehen also neben ihrer Grundschwingung aus einer theoretisch unendlichen Vielzahl von Oberschwingungen ganzzahliger Vielfacher von (in diesem Fall) 50 Hz mit beträchtlichen Amplituden.

Das dargestellte Beispiel entspricht dem Verhalten eines elektronischen Vorschaltgeräts (EVG) der ersten Stunde, hier für die am häufigsten eingesetzte T8-Leuchtstofflampe mit einer Nennleistung von 58 W. Zwar arbeiten heutige EVG schon lange nicht mehr nach diesem Prinzip, nicht einmal mehr im Bestand, doch in anderen Geräten, wie etwa Kompakt-Leuchtstofflampen (KLL) im Bereich bis 25 W sowie in vielen Schaltnetzteilen von Fernsehgeräten, PCs und Monitoren, ist dies noch Stand der Technik.

Man muss die 58-W-Lampe z. B. nur durch 3 oder 4 Lampen zu je 18 W ersetzen und mit einzelnen EVG betreiben, um die Vorgaben für größere Lampen zu umgehen – und schon ist normativ wieder alles im Lot. Diese Lösung kann billiger sein als der Einsatz eines Mehrfach-EVG, das dann die oberhalb von 25 W Nennleistung anzuwendenden, relativ strengen Grenzwerte erfüllen muss – nicht preiswerter oder kostengünstiger, aber billiger.

Dennoch wollen wir beim EVG alten Typs als Beispiellast bleiben, da hier ein direkter Vergleich mit der konventionellen Technik möglich ist, denn die selbe Leuchtstofflampe kann auch mit einem konventionellen induktiven Vorschaltgerät (KVG) bzw. einem verbesserten, Verlust geminderten Vorschaltgerät (VVG) betrieben werden.

3.2 Phasen-Anschnittdimmer

Es müssen aber nicht immer Gleichrichter, Schaltnetzteile oder Umrichter in irgendeiner Form sein. Nehmen wir beispielsweise die weit verbreitete Methode des Phasen-Anschnitts zur Helligkeits-Einstellung von Glühlampen. Glühlampen stellen für sich allein rein ohmsche und somit lineare Lasten dar und lassen bei symmetrischer Aufteilung auf die Außenleiter den Neutralleiter stromlos. Mittels Dimmer gedrosselt, ergeben sich aber ganz andere Verhältnisse. Nun ist die Last im ersten Teil jeder Halbschwingung abgeschaltet, ihre Impedanz also praktisch unendlich, und im zweiten Teil ist die Impedanz gleich dem Widerstand der ohmschen Last. So wird die Sinuskurve des Stroms zerschnitten, und es liegt eine Oberschwingungslast vor. Die Grenze zwischen den beiden Teilen (Zeitabschnitten) lässt sich, dem Prinzip des Dimmers entsprechend, verschieben. Für die Phasen-Abschnitt-dimmer, die zur Zeit im Zuge des Auslaufs von Glühlampen und deren Ersatz durch verschiedene elektronisch angesteuerte Leuchtmittel den Abschnittdimmer ersetzen, gilt spiegelverkehrt genau das gleiche. Die folgenden Betrachtungen gelten also entsprechend. Mehr hierzu im Abschnitt 5.2. Davon abgesehen verliert die Sache endgültig ihre Übersichtlichkeit, wenn die zu dimmende Last selbst eine verzerrende, elektronische ist [2].

3.3 Transformatoren

Elektronik mag neu sein; Oberschwingungen sind es keineswegs. Vielmehr fehlten, wie schon ausgeführt, die Betriebsmittel, die sich

davon gestört fühlten.

So haben z. B. Transformatoren schon immer Oberschwingungsströme verursacht, da die Magnetisierungskennlinien der verwendeten ferromagnetischen Werkstoffe alles andere als linear sind (sonst gäbe es den Begriff überhaupt nicht; die „Magnetisierungskennlinie“ wäre gar kein Thema). Somit werden die Magnetisierungsströme von Transformatoren gegenüber der Sinusspannung stark verzerrt. Da aber alles relativ ist und ein guter Transformator einen sehr geringen Magnetisierungsstrom (Leerlaufstrom) aufweist, fällt dieser Effekt auch heute noch kaum ins Gewicht. Nur bei Kleintransformatoren können sie beträchtlich werden (>20 % des Nennstroms), doch diese sind eben klein. Bei Ringkerntransformatoren ebenso wie im Bereich der Verteiltransformatoren liegen die Magnetisierungsströme im Bereich von nur 1 %. Diese dürfen dann getrost stark verzerrt sein; das fällt kaum auf.

3.4 Reihenschlussmotoren

Noch ein altherwürdiger Verbraucher, der Reihenschlussmotor, lässt sich als Beispiel nennen: Wie alle Elektromotoren, so wirkt auch dieser gleichzeitig als Generator und erzeugt eine Gegenspannung, die den Strom begrenzt (was zu den bekannten, stark überhöhten Anlaufströmen von Elektromotoren führt, solange diese Gegenspannung noch fehlt – auch eine altbekannte Form von Netzurückwirkung).

Nun ist der Reihenschlussmotor aber eigentlich ein Gleichstrommotor, der bei Bedarf auch an Wechselstrom läuft. Dadurch, dass die Erregerwicklung mit dem Anker in Reihe verschaltet ist, fällt der Erregerstrom, sobald der Ankerstrom sinkt. Beide reagieren gekoppelt auf Änderungen der Last ebenso wie der speisenden Spannung. Hierdurch ergibt sich eine näherungsweise quadratische Spannungs-Strom-Kennlinie, und damit weist die Stromkurve, über eine Periode der Wechselspannung betrachtet, tendenziell eine ähnliche Verformung auf wie die Verbraucher nach Abschnitt 3.1, nur wesentlich milder. Aber auch das hat bislang nichts und niemanden wirklich gestört.

Literatur

- [1] DIN EN 61000-3-2 (VDE 0838-2):2010-03: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter).
- [2] Nähere Informationen dazu: S. Fassbinder, R. Kleger: LED dimmen – praktischer Erfahrungsbericht. In: ET Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik. Geplante Veröffentlichung in Ausgabe 09- oder 10-2013. ■

Fortsetzung



**Im nächsten Teil geht es um
Quantifizierung (Stichwort THD) und
Auswirkungen von Oberschwingungen**