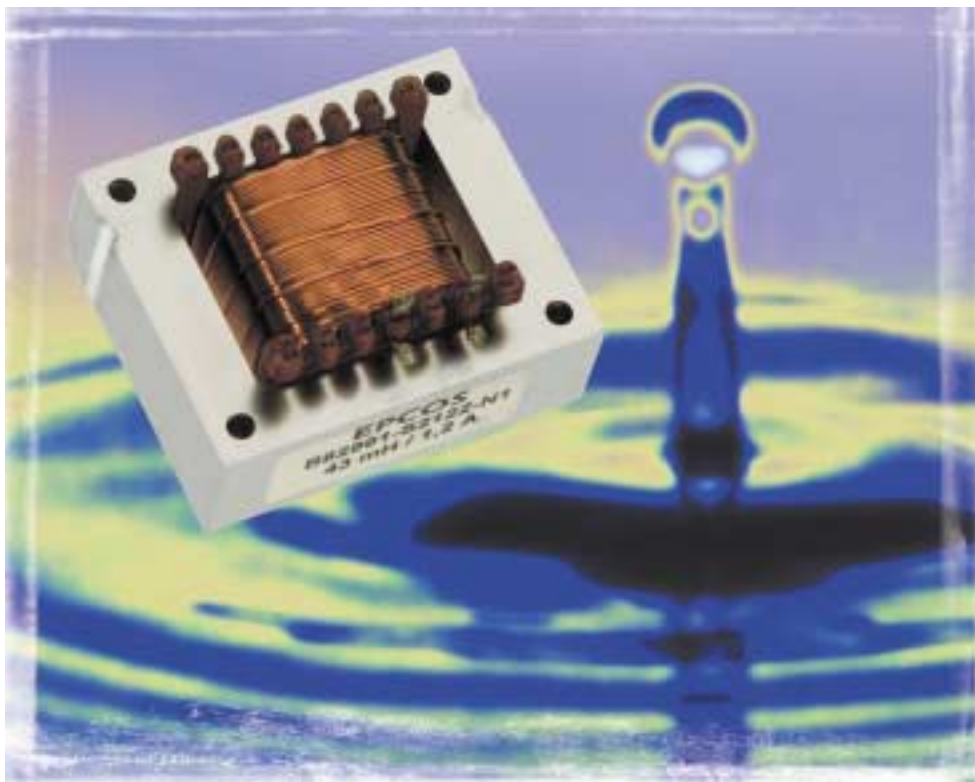


Oberschwingungen im elektrischen Versorgungsnetz

Ursachen, Norm-Grenzwerte und Einhaltung

Die Verbrauchergewohnheiten haben sich gewandelt. Das gilt auch für die Stromverbraucher in unseren Versorgungsnetzen. Und die Folgen? Korrosion am Blitzableiter, am Fundamente der Erde, an Wasserrohren, an Gasrohren und Armierungen. PC-Netzwerke stürzen ab. Neutralleiter werden heiß, im Extremfall bis zum Brand, obwohl doch jeder Elektriker weiß, dass er einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf drei Phasen verteilen muss und schon ist der Neutralleiter stromlos.

Oder etwa neuerdings nicht mehr? EBERHARD RISTIG



Dipl.-Ing. Eberhard Ristig leitet das EMV-Labor bei der Epcos AG.

Die Voraussetzung, von der hier stillschweigend ausgegangen wird, ist nämlich, dass es sich um lineare Lasten handelt, also ohmsche, induktive, kapazitive Lasten und ihre Mischformen, bei denen die Ströme eben sinusförmig verlaufen. Bis vor einiger Zeit gab es gar keine anderen Lasten. Mit dem Einzug der Elektronik aber hat sich dies grundlegend geändert. Elektronik muss mit Gleichstrom versorgt werden, und zwar lückenlos. Gleichrichten durch einfaches Umpolen einer Halbwelle der Sinusspannung genügt zum Betrieb eines Gleich-

strommotors, aber niemals zur Versorgung eines elektronischen Schaltkreises. Der Nulldurchgang der Wechselspannung und der ihn umgebende Bereich zu niedriger Augenblickswerte werden daher mit einem Kondensator gepuffert, der seinerseits nur über relativ kurze Zeit um den Spannungsscheitelwert herum wieder geladen wird (Stromflusswinkel). Nur in diesem kleinen Zeitbereich fließt noch Strom aus dem Netz, dafür dann aber umso heftiger. Diese unlinearen Stromverläufe lassen sich auch als Summe einer unendlichen Reihe von sinusförmigen Oberschwingungen betrachten, de-

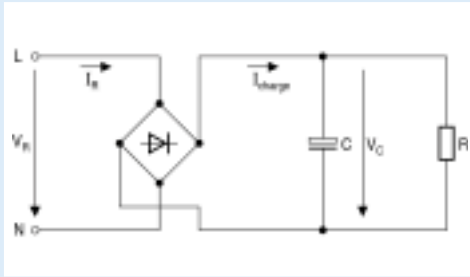
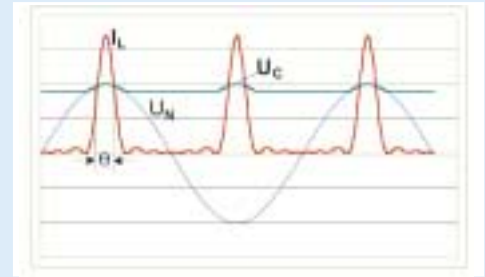


Abb. 1: Prinzipschaltbild eines Netzteils mit Gleichrichtung und Speicherkondensator



Abb. 2: Abweichung der tatsächlichen Stromkurve von der idealen Sinuskurve



ren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind. Diese hören auch auf den Namen Harmonische. Die Wahrheit ist nun jedoch, dass sie allerlei Disharmonie im Netz verursachen können.

Die Auswirkungen dieses Sachverhaltes im Netz und in den angeschlossenen Niederspannungs-Verbrauchern sind vielfältig:

- ▶ Fehlfunktionen in Rundsteueranlagen, in elektronischen Steueranlagen und Kommunikationseinrichtungen durch Oberschwingungsströme in N- und PE-Leitern und durch Verzerrung der (sinusförmigen) Netzspannung

- ▶ Zusätzliche Verlustleistung durch Blindströme in Transformatoren, Motoren, Leitungen, Drosseln und Kondensatoren

Von daher gesehen kann die Begrenzung der Oberschwingungen nicht nur im Interesse der Stromversorger (EVU) liegen.

Als Maßnahmen, mit denen Oberschwingungen in Geräten begrenzt werden können, bleiben den Geräteherstellern die Möglichkeiten:

- ▶ Einbau von Oberschwingungsdrosseln (passiv) in die Netzzuleitungen
- ▶ Einbau von (aktiven) elektronischen Regelungen zur Erzeugung von annähernd sinus-

förmigem Netzstrom in Form von Power-Factor-Controllern (PFC)

Funktion des Netzgerätes

Netzgeräte dienen der Umwandlung der Netzspannung in Gleichspannung, wie sie vom Gerät benötigt wird. Unsere moderne Elektronik mit Halbleitern in Regelschaltungen, Computern usw. kann nur mit Gleichspannung betrieben werden. Die Umwandlung geschieht prinzipiell mit Gleichrichtung und Speicherkondensator (Abb. 1), anschließend regeln ein Transistor, ein Schaltnetzteil oder weitere Schaltungen den Energiebedarf der nachfolgenden Elektronik. Demzufolge entnehmen sehr viele Verbraucher am öffentlichen Stromversorgungsnetz ihren Strom nicht – wie vor Jahren – sinusförmig aus dem Netz, sondern in Form kurzer, hoher Stromimpulse.

Problematisch ist der kurze hohe Stromimpuls, der für alle angeschlossenen Netzgeräte zum selben Zeitpunkt anfällt, nämlich um das Maximum der Netzspannung. Die Stromspitzen bewirken an der netzeigenen Impedanz Abweichungen der Netzspannungskurve von der Sinusform. Der Speicherkondensator gibt seine Energie an die nachfolgende Schaltung ab, dadurch sinkt die Spannung an ihm; erst zum Zeitpunkt, wenn die Netzspannung U_N größer als die Kondensatorspannung U_C ist, fließt ein Ladestrom. Die Dauer des Stromflusses (der Stromflusswinkel Θ) und die Höhe der Stromspitze hängen vom Ladungsabfluss aus dem Kondensator (Speicherkapazität des Elektrolyt-Kondensators C) und der Lastschaltung sowie den Impedanzen des Ladekreises auf der Netzseite (Zuleitungen, Sicherungen, Gleichrichter usw.) ab. Sicher ist, dass der Ladestrom von der idealen Sinuskurve abweicht und damit einen erheblichen Klirrfaktor aufweist (Abb. 2). Der Stromimpuls kann nach der Theorie von J.-B. Fourier als Überlagerung von Sinusschwingungen berechnet werden, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung (50 Hz) sind – und das sind dann die harmonischen Oberschwingungen (100 Hz, 150 Hz usw.) (Abb. 3).

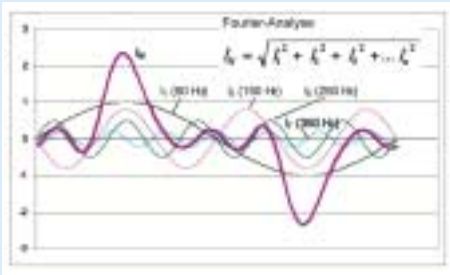


Abb. 3: Darstellung der Überlagerung der Grundschwingung von ihren ganzzahligen Vielfachen

Für die nachfolgenden Geräte gelten keine Grenzwerte:

- ▶ Geräte mit einer Bemessungsleistung von 75 W oder weniger, die keine Beleuchtungseinrichtungen sind
- ▶ professionell genutzte Geräte mit einer Gesamt-Bemessungsleistung, die größer als 1 kW ist
- ▶ symmetrisch gesteuerte Heizelemente mit einer Bemessungsleistung, die kleiner oder gleich 200 W ist
- ▶ unabhängige Beleuchtungsregler (Dimmer) für Glühlampen mit einer Bemessungsleistung, die kleiner oder gleich 1 kW ist

Messungen der Harmonischen des Eingangsstromes

In einer typischen Schaltung (siehe Abb. 1) wurden Richtwerte der Harmonischen in Abhängigkeit von der aufgenommenen Leistung ermittelt, indem die Kap-Werte des Speicherkondensators und die Last verändert wurden. Der Anteil der Harmonischen 5. und 7. Ordnung steigt bei höherer Speicherkapazität; die Stromkurve erreicht höhere Spitzenstromwerte, ist also steiler und der Stromflusswinkel wird kleiner.

Tabelle 1: Berechnung der Oberschwingungen

	P	J _{eff}		P _s		J ₁ (50 Hz)	J ₃ (150 Hz)	J ₅ (250 Hz)	J ₇ (250 Hz)		
	[W]	[A]	[A]	[VA]		[A] Grad	[A] Grad	[A] Grad	[A] Grad	[A] Grad	[A] Grad
100 µF	100	0,95	4,13	218	0,46	0,45 14	0,43 -138	0,39 71	0,34 -80		
	164	1,4	5,4	321	0,51	0,75 18	0,69 -127	0,59 90	0,46 -51		
200 µF	103	1,13	5,5	260	0,4	0,45 9	0,45 -154	0,43 44	0,4 -118		
	172	1,69	7,55	389	0,44	0,76 12	0,74 -145	0,68 59	0,61 -97		

Grad bezogen auf den Nulldurchgang der Netzspannung
 positiver Winkel = Strom der Oberschwingung stellt sich induktiv dar
 negativer Winkel = Strom der Oberschwingungen stellt sich kapazitiv dar

Bestimmungen der Norm EN 61000-3-2

Die EN 61000-3-2 ist Bestandteil der EMV-Normen (zu Fachgrundnorm EN 50081 Ausendung) und fällt unter die EMV-Richtlinie und damit unter die CE-Kennzeichnung elektrischer Geräte. Ab 1.1.2001 müssen alle Geräte, die in den Verkehr gebracht werden (Achtung: nicht nur Neuentwicklungen!), der Norm genügen. Da das Ausmaß der Forderungen aus der EN 61000-3-2 von der Industrie erst sehr spät erkannt wurde, erfolgte auch der Aufschrei erst nach Inkrafttreten der Norm, so dass jetzt mit einem Anhang A14 eine Klärung im Herbst 2000 herbeigeführt wurde, damit die größten Unsicherheiten zum 1.1.2001 ausgeräumt werden können und die Gerätehersteller Rechtssicherheit erhalten.

Geltungsbereich

- ▶ Betrieb am öffentlichen Niederspannungs-Wechselstromnetz (private Netze, große Betriebe, Kliniken usw. ausgenommen)
- ▶ Eingangsstrom des Gerätes bis 16 A je Phase
- ▶ Ausnahmen (Gerät hält die EN 61000-3-2

nicht ein) sind prinzipiell möglich, müssen jedoch dem zuständigen Netzbetreiber (Elektrizitäts-Versorgungsunternehmen) angezeigt werden

- ▶ außerhalb Europas (USA, Japan usw.) gibt es ähnliche Bestrebungen, die jedoch noch in der Diskussion sind (Entwurf IEC 61000-3-2:6/2000)

Geräteklassen (nach EN 61000-3-2/A14:10/2000) und Grenzwerte der Oberschwingungen

Klasse A

- ▶ symmetrische dreiphasige Geräte
- ▶ Haushaltsgeräte (ausgenommen Geräte, die in die Klasse D fallen)
- ▶ Elektrowerkzeuge (ausgenommen tragbare Elektrowerkzeuge)
- ▶ Beleuchtungsregler (Dimmer) für Glühlampen
- ▶ Audio-Einrichtungen und Geräte, die nicht in eine der drei anderen Klassen fallen

Klasse B

- ▶ tragbare Elektrowerkzeuge (Werte aus Tabelle 2 mit 1,5 multiplizieren)

Klasse C

- ▶ Beleuchtungseinrichtungen

Klasse D

- ▶ Personalcomputer (PCs) und Bildschirme (Monitore) für Personalcomputer
- ▶ Fernseh- sowie Rundfunkempfänger, deren Leistung kleiner oder gleich 600 W ist

Die in Tabelle 4 angegebenen Grenzwerte gelten für Geräte der Klasse D mit einer Eingangswirkleistung > 75 W. Hersteller, deren Geräte in den Geltungsbereich der Norm fallen, müssen mit den Geräten Grenzen für die Höhe der Oberschwingungen nach den zugeordneten Klassen einhalten.

Nach Tabelle 4 (Klasse-D-Geräte) ist die Abhängigkeit des Oberschwingungsanteils im Strom von der Leistung des Gerätes dargestellt. Die Reduzierung des Anteils der 3. Oberschwingung stellt die größten Anforderungen an die zusätzliche Schaltung, da Anteile höherer Oberschwingungen automatisch stärker reduziert werden.

Abhilfe

Die Abhilfe, d.h. die Reduzierung der Harmonischen unter den Grenzwert nach EN 61000-3-2 (eine PFC – PowerFactorControl-Schaltung), kann generell auf zwei Wegen verfolgt werden.

Entweder passiv durch Einschalten eines Speicherelementes (einer Induktivität) oder aktiv mit einer elektronischen Regelschaltung (gesteuertem Gleichrichter oder Hochsetzsteller). Im ersten Fall einer PFC-Schaltung (die Drossel wird vor der Gleichrichterbrücke eingefügt) speichert die Drossel Energie aus dem Netz zwischen und schwächt die Steilheit der Stromimpulse (siehe Abb. 1). Auf diese Art lassen sich insbesondere bestehende Geräte leicht nachrüsten (kaum Entwicklungsaufwand). Hinzu kommt, dass diese Art der Verminderung des Anteils der Harmonischen einen relativ hohen Wirkungsgrad besitzt (98–99 %). Für höhere Leistungsklassen vor allem bei einphasigen Geräten wird die Drossel sehr groß und damit schwer und platzintensiv.

Im zweiten Fall einer PFC-Schaltung kann der Eingangskondensator durch einen Hochsetzsteller vom Netz abgekoppelt werden, so dass sich der Eingangsstrom elektronisch regeln lässt. Bauteilkosten und Platzbedarf (Kühlung der Halbleiter) liegen höher als bei der Lösung mit Drossel.

Beide Vorschläge bedingen zusätzlichen, von den Gegebenheiten des Gerätes und wirtschaftlichen Überlegungen bestimmten Aufwand. Es ist obendrein zu berücksichtigen, dass der Anteil der Harmonischen je nach Stromverbrauch des Gerätes (siehe Abb. 1) stark schwankt. Stand-by, halbe Last bzw. Vollast ergeben in einer festen Schaltung unterschiedlichen Strom-

Tabelle 2: Stromgrenzwerte für Oberschwingungen (Klasse A)

Ordnungszahl der Harmonischen	maximal zulässiger Strom der Harmonischen [A]
ungeradzahlige Harmonische	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15 n 39	1,15 · 15/n
geradzahlige Harmonische	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
8 n 40	0,23 · 8/n

Tabelle 3: Stromgrenzwerte für Oberschwingungen (Klasse C)

Ordnungszahl der Harmonischen	maximal zulässiger Strom der Harmonischen als % des Hz-Anteils im Eingangsstrom
2	2
3	30 · λ
5	10
7	7
9	5
11 n 39	3
λ Leistungsfaktor des Gerätes	
$\lambda = \frac{\text{Wirkungsleistung } P_w}{\text{Scheinleistung } P_s}$	

bedarf bzw. eine geänderte Stromkurve. Dann hängt die Wirksamkeit der PFC-Schaltung stark von der Dynamik ab, das bedeutet z.B., die Induktivität muss im proportionalen Bereich ausgesteuert werden – bei Sättigung des Kernes hat die Induktivität keine Wirkung. In vielen Fällen liegen Ströme der 3. Harmonischen weit oberhalb des Grenzwertes. Als allgemeiner Richtwert muss eine Induktivität > 40 mH – sie kann auf zwei Wicklungen in L und N aufgeteilt werden – für die Reduzierung des Anteils der 3. Oberschwingungen in der Stromkurve vorgegeben werden.

Der EI-Eisenblechkern stellte sich in der Herstellung großer Mengen des PFC-Bauelementes als wirtschaftlich günstigste Lösung heraus, jedoch werden die Grenzwerte der ungeradzahligen Harmonischen deutlich überschritten. Erst beim Einbau der PFC-Drossel (Oberschwingungsdrossel) in das Fernsehgerät werden die Grenzwerte eingehalten, jedoch muss darauf geachtet werden, dass das magnetische Streufeld des Kernes nicht die Bildablenkung beeinflusst.

Diesen Beitrag finden Sie auch im Internet unter www.publish-industry.net.

Praktische Ausführung der PFC an zwei Fernsehgeräten

1. Fernsehgerät (konstante Stromaufnahme)
2. Fernsehgerät mit Reserve für höhere Stromaufnahme (zusätzliche Lautsprecher)

more @ click DV41501

Tabelle 4: Stromgrenzwerte für Oberschwingungen (Klasse D)

Ordnungszahl der Harmonischen	maximal zulässiger Strom der Harmonischen pro Watt des Gerätes [mA/W]	maximal zulässiger Strom der Harmonischen [A]
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
11 n 39	3,86/n	siehe Tabelle 1