

Vereinfachter Störfestigkeitstest gegen Oberschwingungen in der Netzspannung

Prof.(i.R.) Dr.-Ing. Ralf Gretsch, Universität Erlangen-Nürnberg
Dipl.-Ing. Frank Deter, Miele & Cie. KG, Abt. OE/LA

1. Oberschwingungspegel und zugehörige Normung

1.1 Zeitliche Entwicklung der Oberschwingungspegel

Etwa ab dem Jahre 1980 hat die Elektronik Einzug in die elektrischen Niederspannungsnetze gehalten, beginnend mit Geräten kleiner Leistung, z.B. Fernseh- und Audiogeräten, Videorekordern, Rechnern, Monitoren und Energiesparlampen. Später kamen aus Energiespargründen leistungsstärkere elektronische Geräte hinzu, insbesondere solche mit drehzahlgeregelten Antrieben, z.B. bei Waschmaschinen, Wäschetrocknern, Staubsaugern, Heizwasser-Umwälzpumpen und Lüftern; hierbei geht der Trend seit längerer Zeit zu Asynchronmotoren mit Frequenzumrichtersteuerung. In jüngerer Zeit nimmt wegen der gewünschten dezentralen Energieversorgung die Zahl von Pulsumrichtern zur Netzeinspeisung aus Photovoltaik-Anlagen und künftig eventuell aus Brennstoffzellen erheblich zu.

Alle diese fast immer einphasigen Verbrauchsgeräte benötigen ein ac/dc-Netzteil, das dann meist einen Zweiweg-Gleichrichter mit Glättungskondensator hat und für das Netz eine nichtlineare Last darstellt: dem Netz wird ein impulsförmiger Strom entnommen, der je Halbperiode für nur etwa 1,5...2,5 ms (15-25% der Zeit!) fließt, und zwar jeweils dann, wenn der Augenblickswert der Netzspannung in der Nähe ihres Scheitelwertes liegt. Ein solcher impulsförmiger Strom enthält neben der Grundschwingung praktisch alle Oberschwingungen (auch hoher Ordnungszahlen!), deren Gesamteffektivwert den der Grundschwingung meist deutlich übersteigt, Bild 1, Kurve i_{sin} . Auch die genannten dc/ac-Pulsumrichter erzeugen Oberschwingungen, allerdings meist höherer Ordnung.

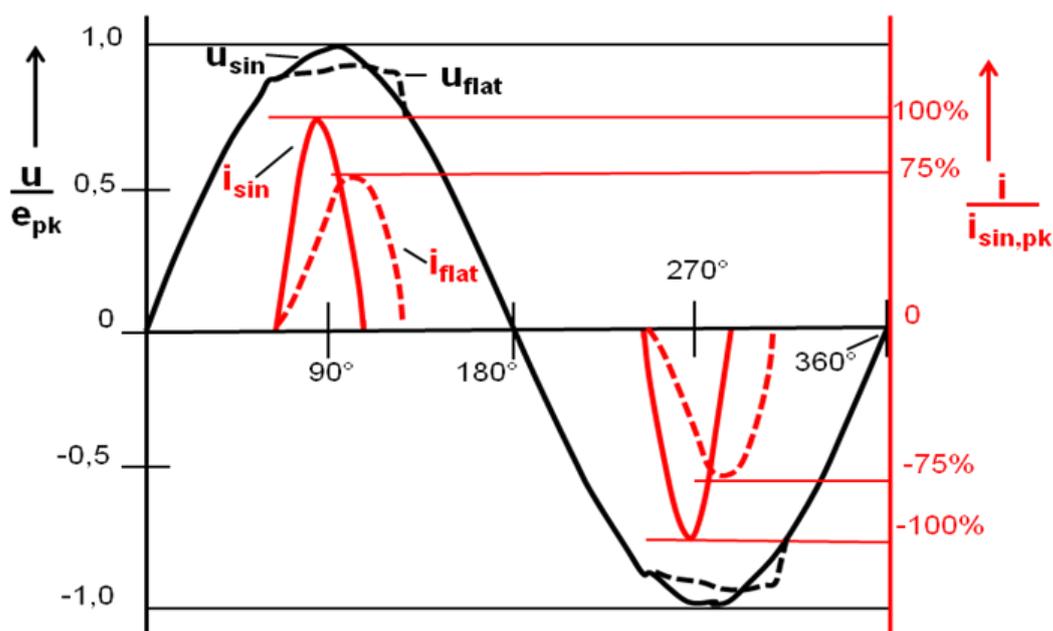


Bild 1: Diodenbrücke mit kapazitiver Glättung an sinusförmiger und „abgeflachter“ Spannung

Wegen der physikalisch bedingten Synchronisation der Stromimpulse mit dem Scheitelwert der Netzspannung differieren die Phasenwinkel der Oberschwingungsströme der Geräte zumindest bei niedrigen Ordnungszahlen nur wenig, so dass sich die Oberschwingungsströme dieser am selben Netz angeschlossenen Geräte kaum gegenseitig kompensieren, sondern nahezu algebraisch addieren. An der (frequenzabhängigen) Netzimpedanz verursacht die Summe dieser Ströme entsprechende Oberschwingungen in der Spannung, die zu einer deutlichen Abflachung ihres Scheitelwertes führen („Flat curve“), Bild 1, Kurve u_{flat} . Deshalb sind weltweit die Oberschwingungspegel ($u_h = U_h/U_1[\%]$) seit 1980 angestiegen, in Deutschland beispielsweise auf der Niederspannungsebene bei der 5. Ordnung von 3% auf über 5% bis 1995 (bei 95% Nichtüberschreitens-Wahrscheinlichkeit).

Seit etwa 1995 sind die in Niederspannungsnetzen gemessenen Pegel jedoch kaum noch angestiegen, teilweise – örtlich unterschiedlich - sogar leicht gesunken. Die Gründe für diese erfreuliche Tatsache sind hauptsächlich:

- Selbstbegrenzung der Scheitelwert-Abflachung: Je flacher die Spannung beim Scheitelwert ist, desto breiter und damit niedriger wird der Stromimpuls (Bild 1, „ i_{flat} “) und umso niedriger werden seine relativen Oberschwingungsströme;
- geräteseitiger Einsatz von Drosseln zwischen Netz und Gleichrichter;
- Kompensation zwischen einphasigen und dreiphasigen Gleichrichtern;
- vermehrter Einsatz rasch schaltender Netzteile mit gesteuerter oder geregelter „sinusähnlicher“ Stromaufnahme, die für geringere relative Oberschwingungsströme und zusätzlich für eine größere Winkeldiversität bei diesen sorgen; dies gilt insbesondere auch für die rasch steigende Zahl von PV-Wechselrichtern.

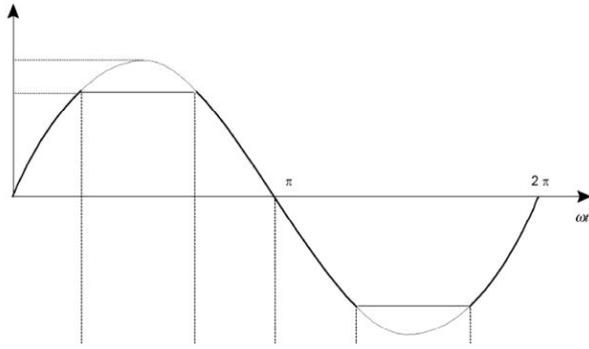
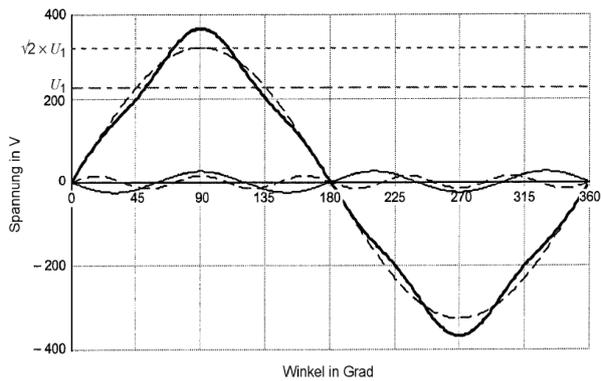
1.2 Internationale Normung für Oberschwingungen

Die geschilderte globale Entwicklung der Oberschwingungspegel ab 1980 hat zur Schaffung internationaler Normen geführt: Es wurden in der Norm IEC 61000-2-2 Verträglichkeitspegel (s. Tab. 1, Spalte 2) vereinbart, die für Oberschwingungen eine Koordinierung zu ihrer Begrenzung einerseits und zum Erreichen einer ausreichenden Störfestigkeit gegen sie andererseits anstreben. Von diesen Pegeln ausgehend entstanden mit IEC 61000-3-2 und IEC 61000-3-12 Normen zur Begrenzung der von Geräten ausgehenden Oberschwingungsströme und mit IEC 61000-4-13 für die vorzusehende Störfestigkeit der Geräte gegen Oberschwingungen in der Netzspannung, Tab. 1.

1.3 Störfestigkeitsprüfung gegen Oberschwingungen nach IEC 61000-4-13

Die Norm IEC 61000-4-13 für die Störfestigkeit enthält unterschiedliche Prüfschärfeklassen für die Geräte, je nachdem, in welcher Netzumgebung diese eingesetzt werden sollen. Für öffentliche Niederspannungsnetze gilt Klasse 2; sie ist die bei weitem gebräuchlichste und soll hier näher betrachtet werden.

Das zu prüfende Gerät wird nacheinander mit einer Spannung entsprechend einer „Flat curve“, Bild 2a, und einer „Over swing curve“, Bild 2b, betrieben. Anschließend folgt die Prüfung nach der sog. „Meisterkurve“, bei der der Grundschwingung (U_1 mit Frequenz $f_1 = 50\text{Hz}$) eine sinusförmige Spannung zwischen $(2,25\dots9)\% U_1$ überlagert wird, deren Frequenz innerhalb von etwa 15 min schrittweise von $0,33 \times f_1$ (16,5 Hz) bis $40 \times f_1$ (2 kHz) gesteigert wird. Das Gerät hat die Prüfung bestanden, wenn in keinem Fall eine Abweichung vom normalen Betrieb auftritt.

**Bild 2a:** Flat curve nach IEC 61000-4-13**Bild 2b:** Over swing curve nach IEC 61000-4-13**Flat curve (Bild 2a)**

Bei der „Flat curve“ wird die Spannung im Bereich ihres Maximums auf 90% des Scheitelwertes der Grundschwingung begrenzt; diese Zeitfunktion bildet näherungsweise den Spannungsverlauf in realen Netzen nach, Bild 1, die stark durch Geräte mit Zweiweg-Gleichrichter und Glättungskondensator belastet sind. Die Prüfspannung enthält nur geringe relative Oberschwingungsanteile ($u_3 = 3,1\%$; $u_5 = 2,2\%$; $u_7 = 1,2\%$; $u_{\geq 9} < 0,4\%$), die deutlich kleiner als die Verträglichkeitspegel sind. Insofern wird hierbei nicht wirklich auf Störfestigkeit gegen Oberschwingungen geprüft, die durchaus in öffentlichen Niederspannungsnetzen in Höhe des Verträglichkeitspegels vorkommen, sondern es wird festgestellt, ob ein Gerät mit ac/dc-Netzteil auch mit einer reduzierten Gleichspannung am Ladekondensator ($0,9 \times \sqrt{2} \times U_{\text{prüf}}$) noch störungsfrei arbeitet. Als Erleichterung für das Bestehen der Prüfung kann gelten, dass die vor dem „Abschneiden“ sinusförmige Prüfspannung $U_{\text{prüf}}$ dabei von 230 V auf 239 V angehoben wird, um den Gesamteffektivwert der abgeschnittenen Spannung bei 230 V zu halten; bezogen auf 230 V entspricht dies nur einer Begrenzung auf 93,5%.

Over swing curve (Bild 2b)

Bei der „Over swing curve“ werden der Grundschwingung U_1 die Oberschwingungen 3. und 5. Ordnung überlagert, und zwar so, dass sich ihre Scheitelwerte addieren; mit $U_3 = 8\% U_1$ und $U_5 = 5\% U_1$ ergibt sich eine Erhöhung um 13%. Die Korrektur von U_1 auf 229 V, um auch hier den Gesamteffektivwert von 230 V einzuhalten, wirkt sich dabei praktisch nicht aus. Eine ähnliche Zeitfunktion kann in realen Netzen im Resonanzfall auftreten, oder wenn Niederspannungsnetze über Transformatoren mit unterschiedlichen Schaltgruppen (Yd und Yy) an dasselbe Mittelspannungsnetz angeschlossen sind. Diese Prüfspannung zielt ebenfalls auf Geräte mit ac/dc-Versorgung; diesmal erhöht sich allerdings die Gleichspannung am Ladekondensator ($1,13 \times \sqrt{2} \times U_{\text{prüf}}$). Für eine echte Prüfung auf Störfestigkeit gegen Oberschwingungen fehlen jedoch die Spannungsharmonischen höherer Ordnung.

Meisterkurve

Bei der Meisterkurve wird der Grundschwingung nur jeweils eine sinusförmige Spannung überlagert, deren Frequenz in kleinen Schritten erhöht wird; die Höhe dieser Spannung übersteigt die zugehörigen Verträglichkeitspegel erheblich (Tab. 1, Spalte 2). Es ist dies also eine scharfe Prüfung auf Störfestigkeit sowohl gegen Oberschwingungen wie auch gegen Zwischenharmonische. Die Meisterkurve bildet die Wirkung der Rundsteuerung ab; in realen Netzen tritt dabei immer nur eine überlagerte Spannung auf, nicht aber eine Kombination mit mehreren Frequenzen. In der Regel sind die tatsächlichen Rundsteuerspannungen deutlich kleiner als die Prüfpegel.

2. Störphänomene in realen Netzspannungs-Verläufen

Nach der bestehenden Norm 61000-4-13 wird die Störfestigkeit gegen einzelne Spannungsharmonische hinreichend geprüft; nur unzureichend werden jedoch solche Kombinationen abgeprüft, die aus vielen dieser Oberschwingungen bestehen und die Spannungsverläufe entsprechen, die in den Netzen tatsächlich vorkommen. Deshalb werden nachfolgend zwei Modifikationen der genormten Prüffunktionen „Flat curve“ und „Over swing curve“ vorgestellt, die

- außer der Spannungsabflachung, Bild1, bzw. einem Überspringen weitere tatsächlich vorkommende „Ereignisse“ im Netzspannungsverlauf nachbilden,
- dazu Oberschwingungen möglichst in Höhe der Verträglichkeitspegel verwenden,
- für Geräte „kritische“ Beanspruchungen darstellen und somit verborgene Mängel aufdecken helfen, die sich sonst erst beim Betrieb am realen Netz zeigen.

2.1 Kommutierungseinbrüche in der Netzspannung

Kommutierungseinbrüche werden durch leistungsstarke Stromrichter verursacht. Sie treten beim Umschalten des Stromflusses von einem zum nächsten Phasenleiter auf. Dabei kann die Spannung je Periode mehrfach kurzzeitig für $\approx 0,3 \dots 0,5$ ms bis zu $\approx 25\%$ ihres Scheitelwertes einbrechen, Bild 3. Dadurch werden gelegentlich Resonanzen angeregt mit der Folge, dass die Spannungseinbrüche in Schwingungen mit Frequenzen bis zu 2,5 kHz binnen 1...2 ms ausklingen. Solche Schwingungen können aber auch durch Phasenanschnittsteuerungen angestoßen werden.

Die Spannungseinbrüche - gerade auch in Verbindung mit den Schwingungen - können elektronische Steuerungen „ausser Tritt“ bringen; insofern sollte dieses „Phänomen“ in die Störfestigkeitsprüfung aufgenommen werden.

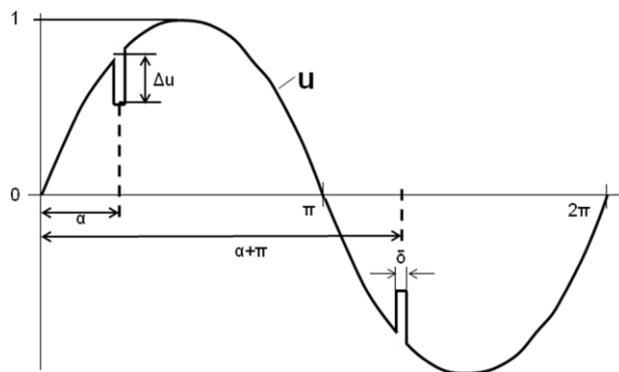


Bild 3: Kommutierungseinbrüche in der Spannung

Die auf den Scheitelwert „1“ bezogene Oberschwingungs-Amplitude der Ordnung h beträgt für

- ungerade $h = 2n + 1$:

$$u_{h,\text{peak}} = 4 \Delta u \cdot \sin(h \cdot \delta / 2) / (\pi \cdot h) ,$$

- gerade $h = 2n$: $u_{h,\text{peak}} = 0$.

Der Winkel der Oberschwingung der Ordnung h beträgt

$$\varphi_h = \pi/2 - h \cdot (\alpha + \pi) .$$

Die Oberschwingungsanalyse solcher kurzen Spannungseinbrüche zeigt, dass Harmonische höherer Ordnung ($h \geq 15$) darin mit hohem Anteil enthalten sind. Wenn beispielsweise je Halbperiode ein Spannungseinbruch mit der Tiefe $\Delta u = 24\%$ und der Breite $\delta = 5^\circ$ in der Prüfspannung enthalten ist, dann kommen die zugehörigen Oberschwingungen für $h \geq 15$ in die Nähe ihres Verträglichkeitspegels oder überschreiten ihn, für $h=3n$ (n : ganzzahlig) sogar deutlich; die Einhaltung der Winkel φ_h ist dabei unabdingbar. Auf diese Weise ist es möglich, mit der Nachbildung der Kommutierungseinbrüche die drei in Kap. 2 genannten Ziele a) bis c) zu erreichen. Die bestehende „Flat curve“ kann sehr einfach in dieser Weise modifiziert werden.

2.2 Unsymmetrie der Spannung - nicht klapp-symmetrische Halbperioden

Zwei Arten von Strom- und Spannungs-Unsymmetrien sind zu unterscheiden,

- die des Drehstrom- bzw. Drehspannungssystems, wenn nämlich die Zeitfunktionen der Ströme bzw. Spannungen in den drei Leitern nach Verschiebung um jeweils ein Drittel der Netzperiode nicht gleich sind (hier nicht betrachtet),
- die bei Einphasenstrom bzw. -spannung, wenn die Zeitfunktionen in positiver und negativer Halbperiode nicht klapp-symmetrisch sind (hier betrachtet).

Abweichungen von der Klappsymmetrie werden durch Einweg-Gleichrichtung, Bild 4, nicht symmetrische Pulspaket- und Phasenan- bzw. -abschnittsteuerung, Bild 5, und prinzipiell auch von schnell regelnden Pulsrichter und Thyristorsteuerungen verursacht, insbesondere dann, wenn deren Regelung fehlerhaft arbeitet.

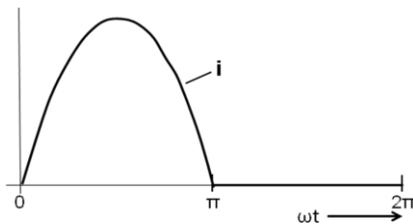


Bild 4: Einweg-Gleichrichtung

Bsp: Oberschwingungen
der Einweggleichrichtung:
 $h=2n: I_h/I_1=4/[\pi(h^2-1)]$
 $h=2n+1: I_h/I_1=0$

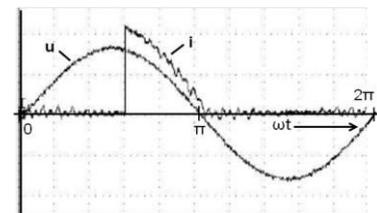


Bild 5: Unsymmetrischer Phasenanschnitt

Während bei vorhandener Klappsymmetrie in Strom und Spannung nur ungeradzahliges Oberschwingungen entstehen, treten nun ausschliesslich oder zusätzlich geradzahliges Harmonische sowie meist auch Gleichanteile auf; letztere werden hier nicht betrachtet. Beim Schalten mit einfacher oder doppelter Netzfrequenz (Diode, Triac, Thyristor) entstehen hauptsächlich $2n$ -fache Harmonische niedriger Ordnung; Pulsrichter erzeugen - insbesondere bei fehlerhafter Regelung - eher Harmonische höherer Ordnung. Vor allem diese können bei möglichen Resonanzen im Netz, die oft durch Kompensationskondensatoren oder LC-Filter verursacht werden, die für geradzahliges Ordnungen geltenden Verträglichkeitspegel nach IEC 61000-2-2 erreichen - selten im öffentlichen Netz, gelegentlich in Industrienetzen.

Geradzahliges Oberschwingungen können zu unterschiedlich hohen Netzspannungsscheitelwerten in den positiven und negativen Halbperioden führen; dadurch überlagert sich der Ausgangsgleichspannung von ac/dc-Netzgeräten ein netzfrequenter Anteil („Ripple“), der zu Funktionsstörungen im versorgten Gerät führen kann. Der größte Einfluss auf die Unterschiede beim Scheitelwert und bei der Halbperiodendauer ergibt sich bei Oberschwingungswinkeln $\varphi_h = \pi/2$ oder $\varphi_h = -\pi/2$ mit $h=2n$.

Auch unterschiedlich lange Zeiten zwischen den Nulldurchgängen können durch geradzahliges Oberschwingungen verursacht werden; ist beispielsweise die 2. Spannungsharmonische bei den Nulldurchgängen der Grundschwingung stets positiv, so verlängert sich der positive Bereich der Zeitfunktion auf Kosten des negativen. Mit der Netzfrequenz synchronisierte Steuerungen können dadurch „außer Tritt“ geraten; das kann z.B. bei Lampen mit Dimmern zu Lichtflacker führen oder sogar zu Defekten bei Motoren, die über Phasenanschnitt gesteuert werden.

Gleiches Vorzeichen der $2n$ -fachen Harmonischen führt zu maximalen Abweichungen der Halbperiodendauer; mit steigender Zahl n abwechselndes Vorzeichen ergibt dagegen maximale Abweichungen zwischen positivem und negativem Scheitelwert.

Zur vollständigen Prüfung der Störfestigkeit von Geräten sollten daher die geradzahliges Oberschwingungen in die Prüfspannung aufgenommen werden, und zwar in Höhe des Verträglichkeitspegels in die modifizierte „Over swing – Kurve“. Damit werden auch bezüglich Unsymmetrie die drei in Kap.2 genannten Ziele a) bis c) erreicht.

2.3 Mehrfache Nulldurchgänge in der Netzspannung

In Netzen mit schwach gedämpften Resonanzen (Schwachlastbetrieb!) kann es vorkommen, dass Spannungs-Oberschwingungen den positiven und/oder negativen Nulldurchgang der Grundschwingung so überlagern, dass drei oder mehr Nulldurchgänge sehr kurz nacheinander erfolgen. Dies ist der Fall, wenn beim Nulldurchgang der Grundschwingung ($\omega t = 0$) deren Steigung $du_1/dt = \omega_1 \cdot \sqrt{2} \cdot U_1$ kleiner ist als die Summe der Steigungen aller Oberschwingungen $\sum du_h/dt \leq \omega_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sum(hU_h)$ und diese Summe entgegengesetztes Vorzeichen hat.

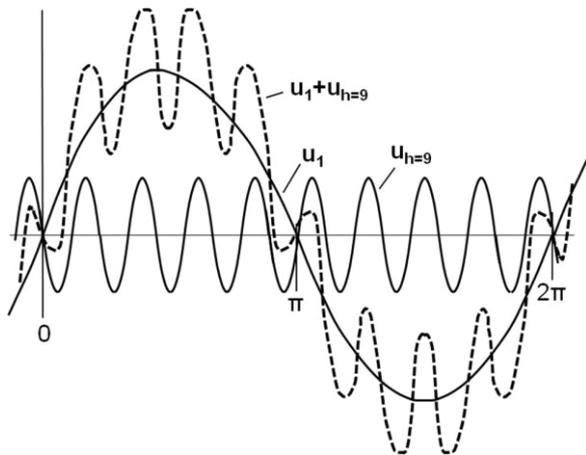


Bild 6: Zwei 3-fache Spannungsnulldurchgänge
Symmetrischer Fall wegen $h = 2n+1 = 9$

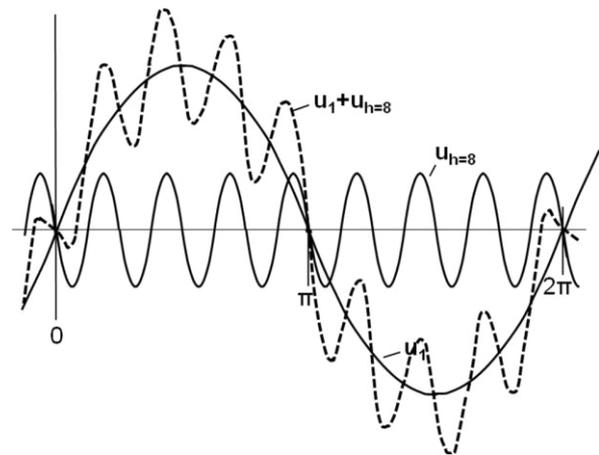


Bild 7: Ein 3-facher Spannungsnulldurchgang
Unsymmetrischer Fall wegen $h = 2n = 8$

Der Betrag von $\sum du_h/dt$ wird maximal, wenn für alle Harmonischen $\varphi_h = 0$ oder $\varphi_h = \pi$ gilt. Wenn beispielsweise alle geraden Harmonischen der Ordnung $h = 10 \dots 50$ in Höhe ihrer Verträglichkeitspegel auftreten und die Phasenlage $\varphi_h = \pi$ haben, wird bei $t = 0$ die Summe $\sum du_h/dt = -2,1 \cdot \omega_1 \sqrt{2} U_1$, d.h. die negative Steigung beträgt das 2,1-fache der positiven, und es gibt mindestens einen 3-fachen Nulldurchgang je Netzperiode!

Werden die mehrfachen Nulldurchgänge durch ungerade Harmonische verursacht, dann tritt wegen der Klappsymmetrie dieser Effekt bei allen Nulldurchgängen in gleicher Weise auf, Bild 6; bei geraden Ordnungen ist der Verlauf bei positivem und negativem Nulldurchgang unterschiedlich, Bild 7. In beiden Bildern ist zur Verdeutlichung jeweils nur eine Oberschwingung mit niedriger Ordnungszahl ($h = 8$ bzw. 9) mit entsprechend (unrealistisch) hoher Amplitude angenommen.

Bei mehrfachen Nulldurchgängen in der Spannung können mit der Netzfrequenz synchronisierte Steuerungen, wie in 2.2 bereits beschrieben, „außer Tritt“ geraten und mit der Netzfrequenz synchronisierte Uhren erheblich „vorgehen“.

Geräte sollten daher auch auf Störfestigkeit gegen das Phänomen „Mehrfache Nulldurchgänge“ geprüft werden. Für die Nachbildung unsymmetrischer Nulldurchgänge sorgen die geradzahigen Oberschwingungen bis zur doppelten Höhe des Verträglichkeitspegels in der modifizierten „Flat curve“; symmetrische Nulldurchgänge werden durch ungeradzahige Oberschwingungen höherer Ordnung ($h \geq 13$) meist in Höhe des Verträglichkeitspegels in der modifizierten „Over swing curve“ nachgebildet. Damit werden – verteilt auf beide Kurven – auch bezüglich mehrfacher Nulldurchgänge die drei in Kap.2 genannten Ziele a) bis c) erreicht.

3. Prüfspannungen zur Nachbildung realer Netzspannungs-Verläufe

Das Störverhalten von Geräten gegen einzelne Spannungsharmonische wird derzeit durch Anwendung der in der Meisterkurve vorgegebenen hohen Pegelwerte zuverlässig geprüft. Mit der Kombination verschiedener Harmonischer werden durch die „Flat curve“ und die „Over swing curve“ nur diese zwei von den in der Netzspannung vorkommenden „Phänomenen“ geprüft, wobei die dazu verwendeten Oberschwingungen die Verträglichkeitspegel deutlich unterschreiten, Tab. 1, Spalten 2 und 3. Deshalb wird vorgeschlagen, diese beiden Zeitfunktionen so zu modifizieren, dass alle Oberschwingungs-Ordnungen darin vorkommen, und zwar jeweils in einer der beiden Kurven mindestens in Höhe der Verträglichkeitspegel. Die Beträge und Winkel der dazu nötigen Harmonischen sind in Tab. 1, Spalten 4 und 5 enthalten.

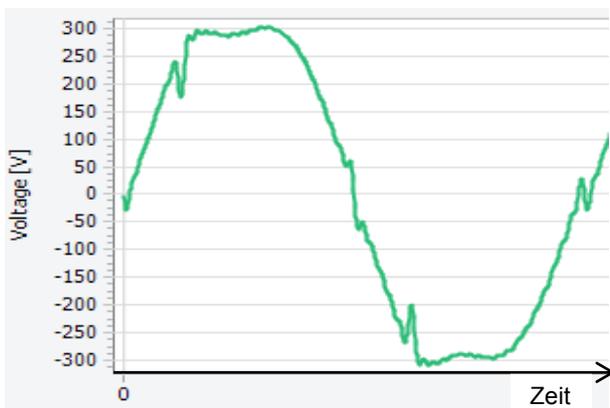


Bild 8: Modifizierte „Flat curve“

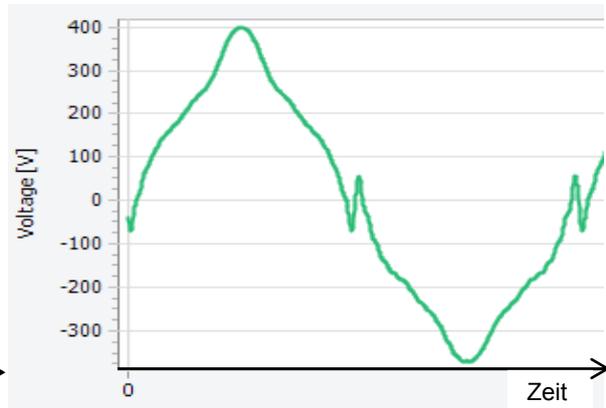


Bild 9: Modifizierte „Over swing curve“

3.1 Modifizierte „Flat curve“ zur Störfestigkeitsprüfung

Die modifizierte „Flat curve“, Bild 8, repräsentiert reale sehr ungünstige Netzspannungsverläufe und enthält

- Abflachung („Clipping“) auf 90% des Scheitelwertes von 325V etwa entsprechend der aktuellen Prüfklasse 2, hauptsächlich realisiert mit den ungeraden Ordnungszahlen $h = 3 \dots 7$ meist unterhalb der Verträglichkeitspegel,
- Kommutierungseinbrüche bei $\alpha = 45^\circ$ (deutlich vor „Clipping“-Beginn) mit $\delta = 5^\circ$ Breite und $\Delta u = 24\%$ Tiefe, realisiert mit den ungeraden Ordnungen $h = 9 \dots 49$ teils unterhalb, teils oberhalb der Verträglichkeitspegel, wobei steigend ab $h = 9$ der Oberschwingungswinkel φ_h zyklisch $-135^\circ, +135^\circ, +45^\circ, -45^\circ$ beträgt,
- unsymmetrische mehrfache Nulldurchgänge, realisiert mit geraden Ordnungen $h = 2 \dots 50$ in Höhe des doppelten Verträglichkeitspegels und Winkeln $\varphi_h = 180^\circ$, so dass bei $t = 0$ die maximale negative Steigung $\Sigma du_h/dt$ erreicht wird.

3.2 Modifizierte „Over swing curve“ zur Störfestigkeitsprüfung

Die modifizierte „Over swing curve“, Bild 9, repräsentiert ebenfalls reale sehr ungünstige Netzspannungsverläufe und enthält

- Überschwingen („Over swing“) des Spannungs-Scheitelwertes um etwa 21% über den der Grundschwingung, gemittelt über die positive und negative Halbschwingung, hauptsächlich realisiert mit den ungeraden Ordnungszahlen $h = 3 \dots 11$, und zwar mindestens in Höhe der Verträglichkeitspegel,

- Unsymmetrie von etwa 4%, so dass die Spannung in der positiven Halbperiode um etwa 25%, in der negativen um 17% überschwingt, realisiert mit den geraden Ordnungszahlen $h = 2...50$ in Höhe der Verträglichkeitspegel bei abwechselnden Winkeln $\varphi_h = -90^\circ$ bzw. $+90^\circ$,
- symmetrische 3-fache Nulldurchgänge, realisiert mit den ungeraden Ordnungen $h = 13...49$ mindestens in Höhe der Verträglichkeitspegel und Winkeln $\varphi_h = 180^\circ$, so dass bei $t = 0$ die maximale negative Steigung $\Sigma du_h/dt$ erreicht wird.

Ordnung h	Verträglichkeitspegel Klasse 2 [IEC 61000-2-2] $(U_h/U_1) / \%$	Störfestigkeitstest Klasse 2 [IEC 61000-4-13] $(U_h/U_1) / \%$ [Flat] [Over][Meister]			Modifizierte Prüffunktion „Flat Top“ $(U_h/U_1) / \%$ $\varphi_h / ^\circ$		Modifizierte Prüffunktion „Overswing“ $(U_h/U_1) / \%$ $\varphi_h / ^\circ$	
		ungerade $h \neq 3n$						
5	6	2,2	4	9	3,1	180	6	0
7	5	1,2	-	9	0	0	5	180
11	3,5	0,17	-	8,2	1,3	135	3,5	180
13	3	0,32	-	6,9	1,3	45	3	180
17	2	0,06	-	5,3	1,2	-135	2	180
19	$f_{CL,1} =$ $2,27 \times 17/h - 0,27$	≈ 0	-	4,7	1,2	135	1,8	180
23-25		≈ 0	-	3,9-3,6	1,1	s. Text	1,4-1,3	180
29-37 (49)		≈ 0	-	3,1-2,4	1,0-0,5	s. Text	1,1-0,5	180
ungerade $h = 3n$								
3	5	3,1	6	9	7,4	0	8	180
9	1,5	0,28	-	9	1,3	-135	1,5	0
15	0,4	≈ 0	-	6	1,2	-45	1,5	180
21	0,3	≈ 0	-	4,3	1,2	45	1,6	180
27-39 (45)	0,2	≈ 0	-	3,3- 2,3	1,0- 0,6	s. Text	1,2-0,6	180
gerade								
2	2	-	-	3? 9?	4,0	180	2	-90
4	1	-	-	9	2,0	180	1	90
6	0,5	-	-	9	1,0	180	0,5	-90
8	0,5	-	-	9	1,0	180	0,5	90
10-40 (50)	$f_{CL,2} =$ $0,25 \times 10/h + 0,25$	-	-	9 - 2,3	1,0- 0,6	180	0,5-0,3	-90

Tab. 1: Oberschwingungen - Verträglichkeitspegel, Normwerte zur Störfestigkeitsprüfung nach IEC 61000-4-13 und Werte für die zwei empfohlenen modifizierten Prüffunktionen „Fette“ Werte erreichen oder überschreiten den jeweiligen Verträglichkeitspegel.

4. Zusammenfassung

- Ein Störfestigkeitstest gegen Spannungs-Oberschwingungen wird für die an das Niederspannungsnetz angeschlossenen Geräte immer wichtiger.
- Es wird eine neue Testmöglichkeit vorgeschlagen, bei der im Vergleich zu den Prüfungen nach IEC 61000-4-13 mit den modifizierten Kurvenformen „flat top“ und „overswing“ sehr viel Zeit gespart werden kann.
- Die einzelnen Oberschwingungen dieser Kurvenformen werden mit Amplituden mindestens in Höhe der Verträglichkeitspegel mit einer solchen Phasenlage zur Spannungs-Grundschiwingung addiert, dass die wichtigsten Phänomene der Netzspannung realistisch nachgebildet werden. Es ist beabsichtigt, diese modifizierten Kurven zur Ergänzung der IEC 61000-4-13 bei IEC SC77A vorzuschlagen.