

Oberschwingungen im Generator-Inselbetrieb

Oberschwingungen belasten Generatoren im Notstrombetrieb

In der Praxis bestellen die Betreiber von NS-Verbrauchernetzen, die auch Stromerzeugungsaggregate in ihrem Verbrauchernetz einsetzen, nicht selten eine entsprechende messtechnische Netzanalyse mit allen ihren Merkmalen und dem Messort Notstromschiene an der NSHV-SV.

In diesem Beitrag wird die unterschiedliche Belastungsintensität der leitungsgebundenen Oberschwingungsnetzrückwirkungen auf die treibende Spannung bei der Speisung aus der Transformatorstation sowie bei der Versorgung aus dem Notstromaggregat untersucht. In diesem Zusammenhang wird die Notwendigkeit der Betrachtung der Oberschwingungsbelastung (messtechnisch oder rechnerisch) beider Betriebsarten nachgewiesen.

Die Netzanalyse findet als Langzeitmessung meistens für die Dauer von einer Woche oft nur im Netzbetrieb statt. Sie liefert dabei wertvolle Informationen zum Strom- bzw. Leistungsfluss. Allerdings findet die komplette Bewertung der Spannungsqualität an der NSHV-SV somit nur im Netzbetrieb statt, also bei der Speisung aus der Transformatorstation.

eingespeist werden, sollte man dabei einiges beachten.

Bei der Umschaltung vom Transformator- auf den Generatorinselbetrieb, z.B. wegen des Ausfalls der öffentlichen Stromversorgung, muss man mit einer Zunahme der Oberschwingungsbelastung im Notstromnetz rechnen. Unter der Oberschwingungsbelastung versteht man hierbei die Pegel der Oberschwingungen in der treibenden Spannung an der NSHV-SV. Das bedeutet, dass eine weitere Netzanalyse an der gleichen Stelle (an der NSHV-SV) im Generatorinselbetrieb auch höhere

Werte der Oberschwingungsbelastung aufzeichnen würde.

Manche Betreiber scheuen aber davor zurück, die Umschaltung der Versorgung der NSHV-SV vom Transformator- auf den Generatorinselbetrieb zum Zwecke der Netzanalyse während der üblichen täglichen Arbeitszeit zu realisieren (wenn die volle SV-Last anliegt). Deshalb untersuchen sie die NSHV-SV nur bei deren Speisung aus der Transformatorstation. Das Unterlassen der Netzanalyse bei Speisung der NSHV-SV aus dem Generator im Inselbetrieb birgt die Gefahr, dass die Oberschwingungsbelastung unentdeckt bleibt.

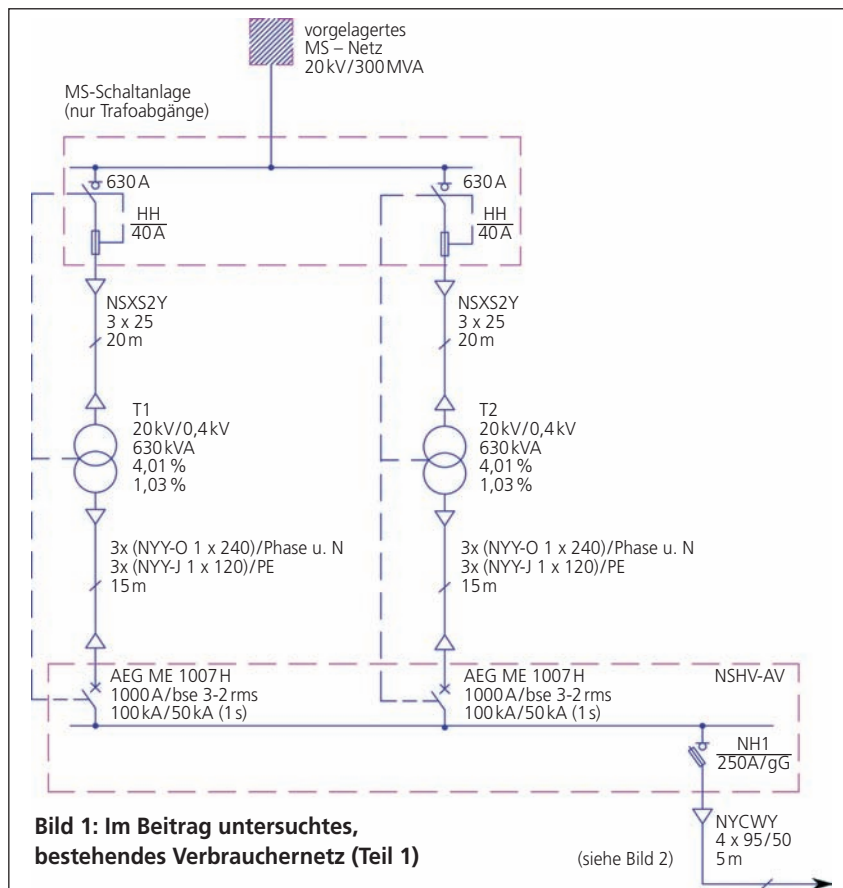
Möglichkeiten der Netzanalyse

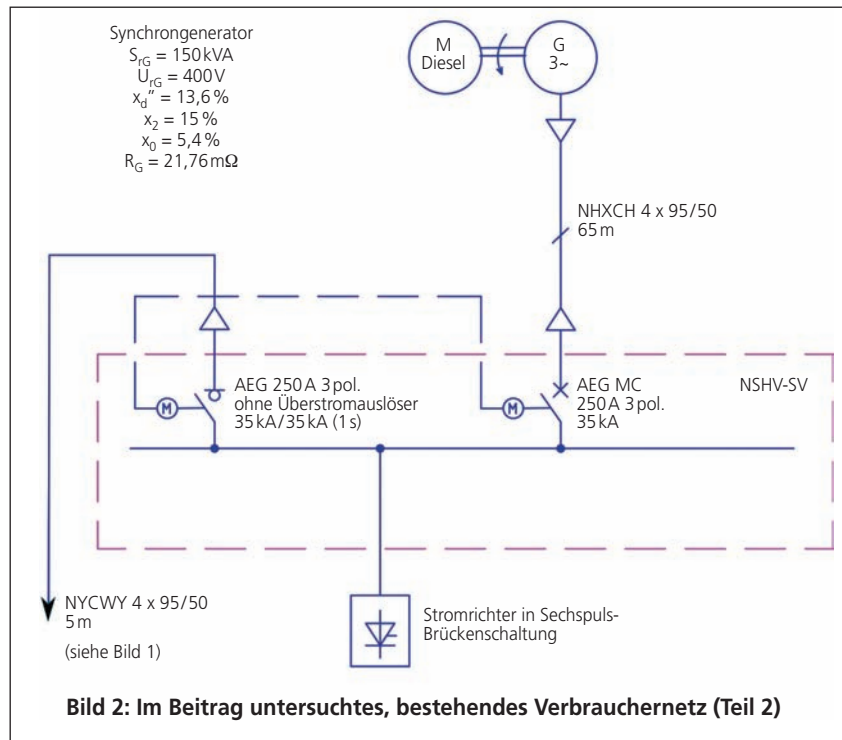
Gibt es überschwingungserzeugende Verbrauchsmittel, die von der NSHV-SV

Fällt aufgrund eines Fehlers die allgemeine Stromversorgung aus, kann es auch vorkommen, dass der einwandfreie Notstrombetrieb wegen der hohen störenden Oberschwingungsbelastung nicht möglich ist. Insbesondere dann, wenn der genannte Oberschwingungsbelastungsanstieg bedeutsam ist,

Anfangskurzschlusswechselstromleistung und Harmonische

Oberschwingungserzeugende Verbraucher stellen keine linearen Lasten dar und nehmen keinen sinusförmigen Strom auf. Ihr Aufnahmestrom ist verzerrt bzw. weicht von der Sinusform ab. Außerdem enthält er neben dem Grundschwingungsstrom auch noch höhere Frequenzanteile, die sogenannten Stromüberschwingungen – auch als Stromharmonische bezeichnet. Ein nicht sinusförmiger, periodischer Wechselstrom lässt sich mittels eines geeigneten mathematischen Verfahrens – z.B. Fourier-Analyse, Fast-Fourier-Transformation oder Fourier-Reihenentwicklung – in seine Grundschwingung sowie unendliche Frequenzanteile als Vielfache seiner Grundschwingung zerlegen.





Der Aufnahme­strom eines ober­schwin­gung­er­zeu­gen­den Ver­brau­chers ruft an der Netz­impedanz einen ober­schwin­gungs­be­haf­te­ten Span­nungs­fall hervor, wel­cher die treiben­de Span­nung über­lagert und somit eben­so ver­zerrt. Diese ver­zerrte treiben­de Span­nung liegt als Klem­men­span­nung für wei­tere, paral­lel ge­schaltete Ver­brau­cher an. Sie ruft auch an linearen Ver­brau­chern einen nicht sinus­för­mi­gen Strom­fluss hervor. Unter linearen Ver­brau­chern ver­steht man ohmsche, induk­tive und kapazitiv Lasten sowie ihre Misch­for­men, deren Auf­nah­me­strö­me beim An­legen einer sinus­för­mi­gen Span­nung sinus­för­mig ver­laufen. Das Aus­maß der Ver­zerrung der treiben­den Span­nung hängt sowohl von dem ver­zerrten Auf­nah­me­strom als auch von der An­fangs­kurz­schluss­wech­sel­strom­lei­stung bzw. der Netz­impedanz an der An­schluss­stelle des ober­schwin­gung­er­zeu­gen­den Ver­brau­chers ab.

Verzerrung der treibenden Spannung

Die Rück­wir­kung der Ober­schwin­gun­gen im Strom auf die treiben­de Span­nung bzw. die Ver­zerrung der treiben­den Span­nung ist um­so klei­ner, je grö­ßer die Kurz­schluss­lei­stung bzw. je klei­ner die Netz­impedanz am An­schluss­punkt des ober­schwin­gung­er­zeu­gen­den Ver­brau­chers sind. Dies be­deutet, dass bei einer höhe­ren

Netz­impedanz bzw. einer klei­neren Kurz­schluss­lei­stung und dem glei­chen Ober­schwin­gungs­strom eine höhe­re Ober­schwin­gungs­span­nung zu er­war­ten ist.

Im Netz­be­trieb ist die Kurz­schluss­lei­stung wesent­lich grö­ßer als im Ge­ne­ra­tor­in­sel­be­trieb. Aus die­sem Grund ver­zerren die glei­chen ober­schwin­gungs­be­haf­te­ten Strö­me die Ge­ne­ra­tor­span­nung wesent­lich stär­ker, als die Netz­span­nung. Zur Ver­anschau­lichung der Pro­ble­ma­tik wird das in den **Bil­dern 1 und 2** dar­ge­stellte, beste­hende Ver­brau­cher­netz mathematisch un­ter­sucht. Zur Un­ter­suchung wird ein Strom­rich­ter in Sechspuls-Brückenschaltung mit einer Grund­schwin­gungs­schein­lei­stung von 69,282 kVA, dem Grund­schwin­gungs­strom 100 A und dem in der **Tabelle 1** ent­hal­te­nen Ober­schwin­gungs­spek­trum, an die NSHV-SV ge­schaltet.

Die mathematische Ober­schwin­gungs­ana­lyse wird im Fre­quenz­be­reich durch­ge­führt. Die Be­triebs­mit­tel­dar­stellung er­folgt ge­mäß ihrer Er­satz­schalt­bil­der als komplexe Impedanzen. Die Ober­schwin­gungs­strö­me des Strom­rich­ters werden dabei als konstante ein­ge­präg­te Strö­me be­trach­tet.

Der Ge­ne­ra­tor und die MS-Ein­spei­ung stellen für diese Ober­schwin­gungs­un­ter­suchung Ver­brau­cher dar, deren 50-Hz-Quellen­span­nungen als kurz­ge­schlossen zu be­trach­ten sind. Die Er­satz­schaltun­gen des Ge­ne­ra­tors sowie der

OBERSCHWINGUNGSSPEKTRUM STROMRICHTER

n (Ordnungszahl)	5	7	11	13	17	19	23	25
I_n (Harmonische in A)	27	11	9	6	5	4	3	3

Tabelle 1: Oberschwingungsspektrum an der NSHV-SV

HARMONISCHE IM NETZBETRIEB

n (Ordnungszahl)	5	7	11	13	17	19	23	25
$ u_n $ (Harmonische in %)	0,36	0,2	0,26	0,21	0,22	0,2	0,18	0,198

Tabelle 2: Harmonische der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Netzbetrieb

HARMONISCHE IM GENERATOR-INSELBETRIEB

n (Ordnungszahl)	5	7	11	13	17	19	23	25
$ u_{nG} $ (Harmonische in %)	8,8	4,8	6,2	5,1	5,5	4,9	4,5	4,9

Tabelle 3: Harmonische der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Generator-Inselbetrieb

OBERSCHWINGUNGSGRENZWERTE

n (Ordnungszahl)	5	7	11	13	17	19	23	25
$ u_n $ (Harmonische in %)	6	5	3,5	3	2	1,76	1,4	1,27

Tabelle 4: Relative Grenzwerte des Verträglichkeitspegels von Oberschwingungen in der treibenden Spannung für EMV-Umgebungs-kategorie gemäß EN 61 000-2-2 (DIN VDE 0839-2-2) sowie EN 61 000-2-4 (DIN VDE 0839-2-4)

MS-Einspeisung beziehen sich auf ihre subtransienten Kurzschlussdaten.

Da man zur Bewertung von Oberschwingungen im Netz meist nur das Amplituden- bzw. Effektivwertspektrum heranzieht, wird hierbei angenommen, dass die Phasenverschiebungen der einzelnen Oberschwingungen null sind. Das Phasenspektrum bzw. die Phasenlage der Oberschwingungen zur Grundschwingung ist aber für die Überlagerungen der Oberschwingungen sehr wichtig. Es können sowohl Auslöschungen von Oberschwingungen mit der entgegengesetzten Phasenlage als auch Summationen von Oberschwingungen mit der gleichen Phasenlage auftreten, was somit die resultierende Oberschwingungsbelastung vermindert bzw. vergrößert.

Berechnungen zu einer existierenden Anlage

Untersucht bzw. ermittelt werden die vom Stromrichter hervorgerufenen Oberschwingungspegel in der treiben-

den Spannung an der NSHV-SV sowohl im Netz- als auch im Generatorinselnbetrieb. Die Auszüge aus der Oberschwingungsberechnung im Netzbetrieb haben wir für Sie ins Internet gestellt. »de«-Leser mit einem Abonnement können sich diese direkt herunterladen unter:

→ www.de/online.info/fachthemen/elektroinstallation/planung

Dort findet sich für den interessierten Leser der komplette Rechengang folgender Komponenten:

- MS-Einspeisung,
- MS-Kabel
- Transformatoren
- NS-Kabel zwischen den Transformatoren und der NSHV-AV

MEHR INFOS

Rechengang und weiterführende Literaturhinweise im Internet www.de-online.info/fachthemen/elektroinstallation/planung

- NS-Kabel zwischen der NSHV-AV und der NSHV-SV.

Aus diesem Rechengang ergibt sich die fünfte Harmonische der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Netzbetrieb:

$$u_5 = 2,9775 \cdot 10^{-2} + j 3,5736 \cdot 10^{-1} \% \\ |u_5| = \underline{\underline{0,3586\%}}$$

Alle Harmonischen in der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Netzbetrieb befinden sich in der Tabelle 2. Der Verzerrungsfaktor (Total Harmonic Distortion) für die treibende Spannung an der NSHV-SV im Netzbetrieb ergibt sich zu:

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{v=5,7}^{25} (|u_v|)^2}}{u_1 \cdot 10^{-2}} = \underline{\underline{0,6676\%}}$$

Den Ergebnissen aus der Oberschwingungsberechnung im Generatorinselnbetrieb lagen folgende berechnete Netzkomponenten zugrunde:

- Synchronmaschine
- Kabel zwischen dem Generator und der NSHV-SV

Für die fünfte Harmonische in der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Generatorinselnbetrieb ergibt sich aus der Berechnung:

$$u_{5G} = 4,0411 \cdot 10^{-1} + j 8,7917 \cdot 10^0 \% \\ |u_{5G}| = \underline{\underline{8,801\%}}$$

Alle Harmonischen in der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Generatorinselnbetrieb befinden sich in der Tabelle 3. Der Verzerrungsfaktor (Total Harmonic Distortion) für die treibende Spannung an der NSHV-SV im Generatorinselnbetrieb:

$$THDu_G = \frac{\sqrt{\sum_{v=5,7}^{25} (|u_{vG}|)^2}}{u_1 \cdot 10^{-2}} = \underline{\underline{16,2699\%}}$$

Die zulässigen relativen Grenzwerte für die Verträglichkeitspegel der von uns betrachteten einzelnen Oberschwingungen in der treibenden Spannung der EMV-Umgebungs-kategorie 2 nach der DIN VDE 0839-2-2 bzw. EN 61 000-2-2 sowie der DIN VDE 0839-2-4 bzw. EN 61 000-2-4 befinden sich in der Tabelle 4.

Nach der DIN VDE 839-2-2 bzw. EN 61 000-2-2 beträgt der zulässige Grenzwert des Verzerrungsfaktors (Total Harmonic Distortion) für die treibende Spannung der EMV-Umgebungs-kategorie 2 $THDu = 8\%$.

Auswertung der Ergebnisse

Vergleicht man die Werte der Tabellen 2 bis 4, so stellt man Folgendes fest:

- Alle Harmonischen in der treibenden Spannung sowie der Verzerrungsfaktor für die treibende Spannung an der NSHV-SV im Netzbetrieb nehmen Werte an, welche die genannten Grenzwerte unterschreiten bzw. nur deren Bruchteile darstellen.
- Alle Harmonischen (außer der 7. Harmonischen) in der treibenden Spannung sowie der Verzerrungsfaktor für die treibende Spannung an der NSHV-SV im Generatorinselbetrieb nehmen Werte an, welche die genannten Grenzwerte überschreiten.

Somit ist die Zunahme der Oberschwingungsbelastung im Notstrombetrieb nachgewiesen. Die Netzanalyse im Netzbetrieb würde in unserem Beispiel – in vollem Maße unauffällige Pegel – der Oberschwingungen in der treibenden Spannung an der NSHV-SV ermitteln. In unserem Beispiel wurden Oberschwingungen der 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23. und 25. Ordnung betrachtet. Diese Oberschwingungen werden von den sechspulsigen Brückenschaltungen hervorgerufen.

Schäden an Generator und SV-Verbrauchern

Die Oberschwingungsbelastung kann generell im Notstrombetrieb – wie unsere Untersuchung gezeigt hat – zur

erheblichen Verzerrung der Generatorspannung führen. Im Extremfall verursacht sie eine Zerstörung des Spannungsreglers sowie eine thermische Überlastung der Wicklungen des Ständers und Läufers. Die sensiblen notstromberechtigten Verbraucher können im Notstrombetrieb in ihrer Funktion gestört und im Extremfall sogar zerstört werden.

Ein weiteres Problem für den Generator stellen Wechselstromverbraucher wie Netzteile, Energiesparleuchten etc. dar. Diese einphasigen Lasten verursachen Oberschwingungen im Strom, deren Ordnungszahl durch 3 teilbar ist. Diese Oberschwingungen sind im Nullsystem enthalten und können sich im Gegensatz zu den anderen, die sich im Mit- bzw. Gegensystem befinden, nicht aufheben. Sie addieren sich arithmetisch und können zur thermischen Überlastung sowohl des Generatorsternpunktes als auch des Neutralleiters führen. Eine Abhilfe zur Dämpfung dieser Oberschwingungen kann eine Sternpunkt-drossel schaffen. Die Drossel übt aber einen negativen Einfluss aus auf die Einhaltung des Schutzes bei indirektem Berühren durch die automatische Abschaltung der Stromversorgung. Dies sollte rechnerisch mittels einer entsprechenden Kurzschlussstromberechnung gemäß der DIN VDE 0102 für unsymmetrische Kurzschlüsse zur Einhaltung des Schutzes gegen elektrischen Schlag gemäß der DIN VDE 0100 Teil 410 untersucht werden.

Das Beispiel dieses Beitrags hat nur exemplarischen Charakter und soll auf die möglichen Probleme aufmerksam machen, die bei bestehender Oberschwingungsbelastung nur im Notstrombetrieb auftreten.

Fazit

Bei vorhandenen und von der Notstromschiene zu versorgenden Oberschwingungserzeugenden Lasten, liefert die Netzanalyse im Netzbetrieb selbstverständlich Werte der Oberschwingungen im Strom an der NSHV-SV. Derjenige, der diese Netzuntersuchung durchführt, sollte den Betreiber darüber informieren, dass Oberschwingungen im Strom an der Notstromschiene messtechnisch festgestellt sind und somit die Gefahr einer Störung im Generatorinselbetrieb besteht. Außerdem sollte er dem Betreiber eine Netzanalyse – zur exakten Ermittlung der Oberschwingungsbelastung – im Generatorinselbetrieb empfehlen.

Scheut der Betreiber trotzdem vor einer Messung an der Notstromschiene im Generatorinselbetrieb zurück, sollte eine rechnerische Abschätzung des Anstiegs der Oberschwingungsbelastung im Notstrombetrieb vorgenommen werden. Diese rechnerische Abschätzung ist aber leider nicht immer möglich.

Dipl.-Ing. Dragan Sofic, EAB Rhein
Main GmbH, Neu-Isenburg