

## Rechengang zum Beitrag „Oberschwingungen im Inselbetrieb – Oberschwingungen belasten Generatoren im Notstrombetrieb

Zur Veranschaulichung der Problematik wird das im Bild 1 (siehe „de“ 21/2009, S. 32ff.) dargestellte Verbrauchernetz (ein bestehendes Netz) mathematisch untersucht. Zur Untersuchung wird absichtlich ein Stromrichter in 6puls Brückenschaltung mit der Grundscheinleistung 69,282 kVA, dem Grundscheinleistungstrom 100A und dem in der Tabelle 1 enthaltenen Oberschwingungsspektrum, an die NSHV-SV angeschaltet.

Die mathematische Oberschwingungsanalyse wird im Frequenzbereich durchgeführt. Die Betriebsmittel werden gemäß ihren Ersatzschaltbildern als komplexe Impedanzen dargestellt. Die Oberschwingungsströme des Stromrichters werden dabei als konstante eingepreßte Ströme betrachtet.

Der Generator und die MS-Einspeisung stellen für diese Oberschwingungsuntersuchung Verbraucher dar, deren 50Hz-Quellenspannungen als kurzgeschlossen zu betrachten sind. Die Ersatzschaltungen des Generators sowie der MS-Einspeisung beziehen sich auf ihre subtransienten Kurzschlussdaten.

Da zur Bewertung von Oberschwingungen im Netz meist nur das Amplituden- bzw. Effektivwertspektrum verwendet wird, wird hierbei angenommen, dass die Phasenverschiebungen der einzelnen Oberschwingungen null sind. (Das Phasenspektrum bzw. die Phasenlage der Oberschwingungen zur Grundscheinleistung ist aber für die Überlagerungen der Oberschwingungen sehr wichtig.

Es können eine Auslöschung von Oberschwingungen mit der entgegengesetzten Phasenlage oder eine Summation von Oberschwingungen mit der gleichen Phasenlage erfolgen und somit die resultierende Oberschwingungsbelastung vermindert bzw. vergrößert werden.)

Tabelle 1:

<b>n</b>	5	7	11	13	17	19	23	25	(Ordnungszahl)
<b>I<sub>n</sub></b>	27	11	9	6	5	4	3	3	(Harmonische in Ampere)

Untersucht bzw. ermittelt werden die vom Stromrichter hervorgerufenen Oberschwingungspegel in der treibenden Spannung an der NSHV-SV sowohl im Netz- als auch im Generatorinselbetrieb.

### Auszüge aus der Oberschwingungsberechnung im Netzbetrieb

#### MS-Einspeisung:

$$S''_{kQ} = 300MVA \quad U_{nQ} = 20 \times 10^3 V \quad U_{rTHV} = U_{nQ} \quad U_n = 400V$$

$$U_{rTLV} = U_n \quad t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \quad c_1 = 1,1$$

$$Z_{Qt} = \frac{c_1 \times U_{nQ}^2 \times 1}{S''_{kQ} \times 1 \times 10^6} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad X_{Qt} = 0,995 \times Z_{Qt} \quad R_{Qt} = 1 \times 10^{-1} \times X_{Qt}$$

Ergänzung zum Beitrag „Oberschwingungen im Inselbetrieb – Oberschwingungen belasten Generatoren im Notstrombetrieb“ in „de“ 21/2009, S. 32ff.

$$Z_{Qt} = \sqrt{R_{Qt}^2 + X_{Qt}^2} \times e^{ja \tan\left(\frac{X_{Qt}}{R_{Qt}}\right)} = |R_{Qt} + jX_{Qt}| \times e^{ja \tan\left(\frac{X_{Qt}}{R_{Qt}}\right)}$$

MS-Kabel:

$$l_1 = 20m \quad r'_1 = \frac{1}{2} \times 0,741 \times 1 \times 10^{-3} \times \frac{1}{t_r^2} \Omega/m \quad x'_1 = \frac{1}{2} \times 0,212 \times 1 \times 10^{-3} \times \frac{1}{t_r^2} \Omega/m$$

$$R_1 = r'_1 \times l_1 \quad X_1 = x'_1 \times l_1$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \times e^{ja \tan\left(\frac{X_1}{R_1}\right)} = |R_1 + jX_1| \times e^{ja \tan\left(\frac{X_1}{R_1}\right)}$$

Transformatoren:

$$S_{rT} = 630kVA \quad u_{kr} = 4,01\% \quad P_{kr} = 6,489kW$$

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \times \frac{U_{rTLV}^2}{2 \times S_{rT} \times 1 \times 10^3}$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{kr}}{S_{rT}} \times 1 \times 10^2$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100} \times \frac{U_{rTLV}^2}{2 \times S_{rT} \times 1 \times 10^3} \quad X_T = (Z_T^2 - R_T^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$Z_{Tk} = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} \times e^{ja \tan\left(\frac{X_T}{R_T}\right)} = |R_T + jX_T| \times e^{ja \tan\left(\frac{X_T}{R_T}\right)}$$

NS-Kabel zwischen den Transformatoren und der NSHV-AV:

$$l_2 = 15m \quad r'_2 = \frac{1}{6} \times (0,083 - 0,006) \times 1 \times 10^{-3} \Omega/m \quad x'_2 = \frac{1}{6} \times 0,079 \times 1 \times 10^{-3} \Omega/m$$

$$R_2 = r'_2 \times l_2 \quad X_2 = x'_2 \times l_2$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \times e^{ja \tan\left(\frac{X_2}{R_2}\right)} = |R_2 + jX_2| \times e^{ja \tan\left(\frac{X_2}{R_2}\right)}$$

Ergänzung zum Beitrag „Oberschwingungen im Inselbetrieb – Oberschwingungen belasten Generatoren im Notstrombetrieb“ in „de“ 21/2009, S. 32ff.

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

$$l_3 = 5m \quad r'_3 = 0,197 \times 1 \times 10^{-3} \Omega/m \quad x'_3 = 0,082 \times 1 \times 10^{-3} \Omega/m$$

$$R_3 = r'_3 \times l_3 \quad X_3 = x'_3 \times l_3$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} \times e^{ja \tan\left(\frac{X_3}{R_3}\right)} = |R_3 + jX_3| \times e^{ja \tan\left(\frac{X_3}{R_3}\right)}$$

Die fünfte Harmonische in der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Netzbetrieb:

$$u_5 = \frac{\left[ \begin{array}{l} |R_{Qt} + j5X_{Qt}| \times e^{ja \tan\left(\frac{5\text{Im}(Z_{Qt})}{\text{Re}(Z_{Qt})}\right)} + |R_1 + j5X_1| \times e^{ja \tan\left(\frac{5\text{Im}(Z_1)}{\text{Re}(Z_1)}\right)} + \\ |R_T + j5X_T| \times e^{ja \tan\left(\frac{5\text{Im}(Z_{Tk})}{\text{Re}(Z_{Tk})}\right)} + |R_2 + j5X_2| \times e^{ja \tan\left(\frac{5\text{Im}(Z_2)}{\text{Re}(Z_2)}\right)} + \\ |R_3 + j5X_3| \times e^{ja \tan\left(\frac{5\text{Im}(Z_3)}{\text{Re}(Z_3)}\right)} \end{array} \right] \times I_5 \times e^{j0}}{\frac{U_n \times e^{j0} \times 1 \times 10^{-2}}{\sqrt{3}}}$$

$$u_5 = 2,9775 \times 10^{-2} + j3,5736 \times 10^{-1}\% \quad |u_5| = 0,3586\%$$

Alle Harmonischen in der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Netzbetrieb befinden sich in der Tabelle 2.

Tabelle 2:

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

Der Verzerrungsfaktor (Total Harmonic Distortion) für die treibende Spannung an der NSHV-SV im Netzbetrieb:

Ergänzung zum Beitrag „Oberschwingungen im Inselbetrieb – Oberschwingungen belasten Generatoren im Notstrombetrieb“ in „de“ 21/2009, S. 32ff.

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{v=3,7}^{25} (u_v)^2}}{u_1 \times 1 \times 10^{-2}} \quad THDu = 0,6676\%$$

### Auszüge aus der Oberschwingungsberechnung im Generatorinselbetrieb

#### Synchronmaschine:

$$S_{rG} = 150 \times 10^3 \text{ VA} \quad x''_d = 13,6\% \quad U_{rG} = 400 \text{ V}$$

$$X''_d = \frac{x''_d}{100} \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad R_G = 0,15 \times X''_d$$

$$Z_G = \sqrt{R_G^2 + X''_d{}^2} \times e^{j \tan^{-1} \left( \frac{X''_d}{R_G} \right)} = |R_G + jX''_d| \times e^{j \tan^{-1} \left( \frac{X''_d}{R_G} \right)}$$

#### Kabel zwischen dem Generator und der NSHV-SV:

$$l_4 = 65 \text{ m} \quad r'_{4} = 0,197 \times 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}} \quad x'_{4} = 0,082 \times 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$R_4 = r'_{4} \times l_4 \quad X_4 = x'_{4} \times l_4$$

$$Z_4 = \sqrt{R_4^2 + X_4^2} \times e^{j \tan^{-1} \left( \frac{X_4}{R_4} \right)} = |R_4 + jX_4| \times e^{j \tan^{-1} \left( \frac{X_4}{R_4} \right)}$$

#### Die fünfte Harmonische in der Generatorinselbetrieb:

treibenden Spannung an der NSHV-SV im

$$u_{5G} = \frac{\left[ |R_G + j5X''_d| \times e^{j \tan^{-1} \left( \frac{5 \operatorname{Im}(Z_G)}{\operatorname{Re}(Z_G)} \right)} + |R_4 + j5X_4| \times e^{j \tan^{-1} \left( \frac{5 \operatorname{Im}(Z_4)}{\operatorname{Re}(Z_4)} \right)} \right] \times I_5 \times e^{j0}}{\frac{U_{rG} \times e^{j0} \times 1 \times 10^{-2}}{\sqrt{3}}}$$

$$u_{5G} = 4,0411 \times 10^{-1} + j8,7917 \times 10^0 \%$$

$$|u_{5G}| = 8,801\%$$

Alle Harmonischen in der treibenden Spannung an der NSHV-SV im Generatorinselbetrieb befinden sich in der Tabelle 3.

Tabelle 3:

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

Der Verzerrungsfaktor (Total Harmonic Distortion) für die treibende Spannung an der NSHV-SV im Generatorinselbetrieb:

$$THDu_G = \frac{\sqrt{\sum_{v=5,7}^{25} (u_{vG})^2}}{u_1 \times 1 \times 10^{-2}} \quad THDu_G = 16,2699\%$$

Die zulässigen relativen Grenzwerte für die Verträglichkeitspegel der von uns betrachteten einzelnen Oberschwingungen in der treibenden Spannung der EMV- Umgebungsklasse 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 3.

Tabelle 4:

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

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN VDE 0839 Teil 2-2 Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen; Deutsche Fassung EN 61000-2-2,
- [2] DIN VDE 0839 Teil 2-4 Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in Industrieanlagen; Deutsche Fassung EN 61000-2-4,
- [3] DIN EN 50160 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen,
- [4] Blume, Schlabbach; Stephanblome: Spannungsqualität in elektrischen Netzen,
- [5] Danek, H.D.: Kondensatoren in Oberschwingungsbehafteten Netzen,
- [6] Fassbinder, S.: Netzbelastung durch Oberschwingungen,
- [7] Fender, Dorner, Weida: Netzzrückwirkungen, Notstromanlagen,
- [8] Fricke, Vaske: Elektrische Netzwerke,
- [9] Grapentin, M.: EMV in der Gebäudeinstallation. Probleme und Lösungen,
- [10] Hormann, Just, Schlabbach: Netzzrückwirkungen,
- [11] Just, Hofmann: Blindstromkompensation in der Betriebspraxis,
- [12] Lambda Engineering (Daldrup, M.): Netzqualität planen (2006, VDE Seminar),
- [13] Kloss, A.: Oberschwingungen, Netzzrückwirkungen der Leistungselektronik
- [14] Schulz, D.: Netzzrückwirkungen Theorie, Simulation, Messung und Bewertung,
- [15] Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen (D-A-CH-CZ)
- [16] TÜV Süddeutschland: Besonderheiten beim Einsatz von Stromerzeugungsaggregaten,
- [17] VWEW: Grundsätze für die Beurteilung von Netzzrückwirkungen