



BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN  
University of Applied Sciences

**Untersuchung der Oberschwingungsbelastung  
eines 8 MW-Antriebes mit 24-pulsigem  
Netzgleichrichter am MS-Netz**

**Bachelorarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Engineering

eingereicht an der  
Beuth Hochschule für Technik  
Fachbereich VII

von: Marcus Wienke  
geb. am 23.03.1983, in Berlin

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Joachim Specovius

Gutachter: Prof. Dr. Aurich

Berlin, den 22. September 2013

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>1</b>
<b>FORMELZEICHEN</b> .....	<b>2</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>4</b>
1.1 DAS PROJEKT.....	5
1.2 AUFGABENSTELLUNG.....	7
1.3 BERECHNUNGSSOFTWARE .....	8
1.4 WAS SIND OBERSCHWINGUNGEN?.....	9
<b>2 RICHTLINIEN UND NORMEN</b> .....	<b>17</b>
2.1 DIN EN 50160 (STAND FEBRUAR 2011).....	18
2.2 DIN EN 61000-3-2 (VDE 0838 TEIL 2-4) (STAND MÄRZ 2010).....	20
2.3 DIN EN 61000-3-12 (STAND JUNI 2012) .....	20
2.4 DIN EN 61000-2-4 (VDE 0839 TEIL 2-4) (STAND MAI 2003).....	21
2.5 D-A-CH-CZ TECHNISCHE REGELN ZUR BEURTEILUNG VON NETZRÜCKWIRKUNGEN (STAND 2007) .....	23
2.5.1 <i>D-A-CH-CZ Ergänzungsdokument Hochspannungsverteilternetze (1. Ausgabe 2012)</i> .....	23
2.6 TECHNISCHE ANSCHLUSSBEDINGUNGEN HS-NETZ (VOM 02.12.2011).....	25
<b>3 FUNKTIONSWEISE FREQUENZUMRICHTER</b> .....	<b>26</b>
<b>4 BEURTEILUNG DER OBERSCHWINGUNGSBELASTUNG DER KUNDENANLAGE</b> .....	<b>29</b>
4.1 NETZVERKNÜPFUNGSPUNKT AN DAS NETZ DES VNB.....	29
4.2 EINFLUSS VON BETRIEBSMITTELN AUF DIE OBERSCHWINGUNGEN.....	32
4.2.1 <i>Frequenzumrichter</i> .....	32
4.2.2 <i>Transformatoren</i> .....	33
4.2.3 <i>Kabel</i> .....	36
4.2.3.1 <i>Skin-Effekt</i> .....	38
4.3 KOMPENSATIONSANLAGE.....	39
4.3.1 <i>Resonanzuntersuchung</i> .....	41

4.3.2	<i>Resonanzerscheinungen</i> .....	41
<b>5</b>	<b>NETZANALYSE</b> .....	<b>44</b>
5.1	UNTERSUCHUNG DER OBERSCHWINGUNGSBELASTUNG NACH D-A-CH-CZ- RICHTLINIE .....	45
5.1.1	<i>Vereinfachte Beurteilung nach Stufe 1 der D-A-CH-CZ</i> .....	46
5.1.1.1	Bestimmung der Eingangsdaten .....	46
5.1.1.2	Berechnung des Leistungsverhältnisses .....	46
5.1.2	<i>Detaillierte Beurteilung nach Stufe 2 der D-A-CH-CZ</i> .....	48
5.1.2.1	Bestimmung der detaillierten Eingangsdaten .....	49
5.1.2.2	Berechnung der Oberschwingungslast.....	51
5.1.2.3	Berechnung des Oberschwingungslastanteils.....	51
5.1.2.4	Beurteilung nach Diagramm oder Gleichung.....	51
5.1.3	<i>Berechnung der Emissionsgrenzwerte für OS-Ströme</i> .....	52
5.1.4	<i>Emissionsgrenzwerte für Oberschwingungs-Spannungen</i> .....	55
5.2	ABSCHÄTZUNG DER OBERSCHWINGUNGSSTRÖME.....	56
5.2.1	<i>Auswertung</i> .....	57
5.3	DETAILLIERTE BERECHNUNG DER OBERSCHWINGUNGSSTRÖME.....	58
5.3.1	<i>Variante 1a</i> .....	62
5.3.2	<i>Variante 1b</i> .....	65
5.3.3	<i>Variante 1c</i> .....	66
5.3.4	<i>Variante 2a</i> .....	67
5.3.5	<i>Variante 2b</i> .....	70
5.3.6	<i>Variante 3a</i> .....	71
5.3.7	<i>Variante 4a</i> .....	74
5.3.8	<i>Variante 4b</i> .....	79
5.4	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE .....	81
5.5	REDUZIERUNG DER OS DURCH STRUKTURELLE ÄNDERUNGEN .....	82
5.5.1	<i>Verwendung eines 36-pulsigen Netzgleichrichters</i> .....	83
5.5.2	<i>Verwendung verschiedener FUs für die Verdichter</i> .....	85
5.5.3	<i>Verwendung größerer Netz- oder Zwischenkreisdrosseln</i> .....	87
<b>6</b>	<b>FILTERMAßNAHMEN GEGEN OS-BELASTUNGEN</b> .....	<b>88</b>

6.1	PASSIVE FILTER .....	88
6.1.1	ANWENDUNG DER PASSIVEN FILTER IN KUNDENANLAGE.....	88
6.2	AKTIVE FILTER .....	89
6.3	FILTER-MAßNAHME FÜR DEN UGS .....	90
6.3.1	<i>Dimensionierung des Aktivfilters</i> .....	90
<b>7</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG .....</b>	<b>92</b>
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN .....</b>	<b>96</b>
<b>10</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>99</b>
<b>11</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>100</b>
<b>12</b>	<b>SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....</b>	<b>102</b>

### 8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde vom Verfasser die netzseitige Oberschwingungsbelastung der Kundenanlage eines UGS untersucht. Drei über Frequenzumrichter gesteuerte Verdichter und somit als Oberschwingungsstromerzeuger einzustufende Betriebsmittel, machten eine Betrachtung der OS-Belastung notwendig.

Um eine Berechnung durchführen zu können, wurde zunächst die Kundenanlage vom 110 kV-Netz bis zu den 0,4 kV-Verbrauchern in DIgSILENT PowerFactory nachgebildet und sämtliche relevanten Parameter (z.B. Kabellängen, Bemessungsleistungen, Daten der Transformatoren etc.) in die Software eingearbeitet. Auch die vom Hersteller gelieferten Daten bezüglich der Oberschwingungsanteile der Package Units (Frequenzumrichter mit Stromrichtertransformatoren) wurden eingearbeitet.

Beim Erstellen der Oberschwingungs-Lastflussberechnung mussten verschiedene Varianten betrachtet werden, da zwei Möglichkeiten des Anschlusses der Kundenanlage an das Freileitungsnetz des VNB möglich sind.

Dafür wurden zu den jeweiligen Varianten Berechnungsfälle angelegt und die Oberschwingungsbelastung in den jeweils nach Norm zu betrachtenden Verknüpfungspunkten mit dem Netz des VNB untersucht.

Um die Oberschwingungsbelastung bewerten zu können, war im Vorfeld die Berechnung von Grenzwerten für die einzelnen Ordnungszahlen der Oberschwingungsströme notwendig. Dies erfolgte auf Grundlage der D-A-CH-CZ-Richtlinie (speziell das Ergänzungsdokument für die Anbindung an das Hochspannungsverteilernetz) nach welcher zunächst eine grobe Abschätzung der OS-Belastung für die Kundenanlage und schließlich mit den gegebenen Daten des VNB sowie der Kundenanlage eine detaillierte OS-Betrachtung erfolgen konnte. Dabei wurden Grenzwerte für die OS-Ströme berechnet.

Es wurden die in PowerFactory berechneten Oberschwingungsströme mit den Grenzwerten verglichen und für verschiedene Varianten eine Beurteilung durchgeführt.

Auch für die Oberschwingungsspannungen wurden die Grenzwerte erarbeitet und mit den am Verknüpfungspunkt auftretenden Oberschwingungsspannungen verglichen und bewertet.

Die Oberschwingungs-Lastflussberechnung machte deutlich, dass bei allen untersuchten Varianten (Einschleifung aus Netz 1 oder Netz 2 und Doppelstich) bei der

Verwendung von Frequenzumrichtern mit 24-Puls Netzgleichrichter die geforderten Grenzwerte überschritten werden. Eine Begrenzung der Leistung der Verdichter zum Zweck der Reduzierung der OS-Belastung ist nicht praktikabel, da die Leistung zu stark reduziert werden müsste.

Das Ergebnis der Berechnungen machte deutlich, dass Maßnahmen für die Reduzierung der OS-Belastung bei sämtlichen Varianten ergriffen werden müssen.

Der Oberschwingungsgehalt verändert sich bei den Schaltungsvarianten nur geringfügig. Auffällig ist beim Vergleich, dass sich auftretende Resonanzstellen verschieben und somit die Ordnungszahl der Harmonischen, welche die Grenzwerte überschreiten, sich bei den betrachteten Varianten unterscheiden.

Strukturelle Veränderungen, wie die Verwendung von 36-Puls Frequenzumrichtern, zeigten, dass das Einhalten der Grenzwerte dadurch erzielt werden kann. Alternativ zu den strukturellen Veränderungen der Kundenanlage kann auch bei Verwendung der Frequenzumrichter mit 24-Puls Netzgleichrichter durch geeignete Oberschwingungsfiler die OS-Belastung deutlich reduziert werden und somit das Einhalten der Grenzwerte nach D-A-CH-CZ-Richtlinie erreicht werden. Jedoch sind dabei nicht alle Filter-Maßnahmen für den UGS geeignet, so dass nur aktive Filter als Maßnahme detaillierter betrachtet wurden.

Ein Vergleich der Kosten zeigte, dass speziell für die Anlage des UGS die Verwendung von Frequenzumrichtern mit 36-Puls Netzgleichrichter aufgrund der geringeren Kosten zu empfehlen sind. Neben den Kosten sind auch die eingeschränkten Platzverhältnisse im Betriebsgebäude zu berücksichtigen.

Die Untersuchung der OS-Belastung des UGS machte deutlich, dass für die betrachtete Kundenanlage eine strukturelle Veränderung empfehlenswert ist.

Die erhöhte Oberschwingungsbelastung des UGS kann dabei durch Verwendung von Frequenzumrichtern mit 36-Puls Netzgleichrichter oder auch durch Kombination von 24-Puls und 36-Puls Netzgleichrichtern reduziert und die Grenzwerte nach D-A-CH-CZ eingehalten werden.

Es wurde auch gezeigt, dass bei den verschiedenen Möglichkeiten das UW des UGS an die Freileitungsanlage des VNB anzuschließen keine relevanten Unterschiede bei der OS-Belastung auftreten. Somit ist die Einschleifung auf Grund der Vorteile, wie zum Beispiel flexible Schaltungsmöglichkeiten der Kupplungsschalter oder eine energieoptimierte Fahrweise der parallel geschalteten Transformatoren, der Variante

des Doppelstichs zu bevorzugen. In der Arbeit sind die relevanten Berechnungen für eine OS-Betrachtung der Anlage des UGS durchgeführt und notwendige Maßnahmen betrachtet worden.