

## DIN IEC/TR 62001-1



ICS 31.160

**Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Systeme –  
Anleitung für die Spezifikation und Auslegung von  
Wechselstromfiltern –  
Teil 1: Übersicht  
(IEC TR 62001-1:2021)**

High-voltage direct current (HVDC) systems –  
Guidance to the specification and design evaluation of AC filters –  
Part 1: Overview  
(IEC TR 62001-1:2021)

Gesamtumfang 108 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

## Inhalt

|                                                                                         | Seite |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Nationales Vorwort.....                                                                 | 8     |
| Einleitung .....                                                                        | 9     |
| 1 Anwendungsbereich .....                                                               | 10    |
| 2 Normative Verweisungen .....                                                          | 10    |
| 3 Begriffe .....                                                                        | 10    |
| 4 Übersicht über die Spezifikationen von Wechselstromfiltern für HGÜ-Systeme.....       | 11    |
| 4.1 Allgemeines .....                                                                   | 11    |
| 4.2 Verantwortungsgrenzen .....                                                         | 12    |
| 4.3 Umfang der Untersuchungen .....                                                     | 14    |
| 4.4 Umfang der Lieferung.....                                                           | 15    |
| 4.5 Vom Auftragnehmer zu liefernde technische Daten.....                                | 15    |
| 4.6 Alternative Vorschläge der Anbieter.....                                            | 16    |
| 5 Zulässige Verzerrungsgrenzen .....                                                    | 16    |
| 5.1 Allgemeines .....                                                                   | 16    |
| 5.2 Spannungsverzerrung .....                                                           | 17    |
| 5.2.1 Allgemeines .....                                                                 | 17    |
| 5.2.2 Definitionen der Kriterien für das Betriebsverhalten.....                         | 17    |
| 5.2.3 Zusammenfassung und Empfehlungen.....                                             | 18    |
| 5.2.4 Festlegung von Grenzwerten .....                                                  | 19    |
| 5.2.5 Vorhandene Oberschwingungswerte .....                                             | 22    |
| 5.2.6 Gelockerte Grenzwerte für kurzzeitige und unregelmäßige Bedingungen .....         | 22    |
| 5.2.7 Behandlung von Zwischenharmonischen Frequenzen .....                              | 23    |
| 5.3 Störungsgrenzwerte für die Betriebsmittel des Hoch- und Höchstspannungsnetzes ..... | 24    |
| 5.3.1 Betriebsmittel des Hochspannungswechselstromübertragungsnetzes.....               | 24    |
| 5.3.2 Oberschwingungsströme in Synchronmaschinen .....                                  | 24    |
| 5.3.3 HGÜ-Anlagen in der Nähe .....                                                     | 25    |
| 5.4 Telefonstörungen.....                                                               | 25    |
| 5.4.1 Allgemeines .....                                                                 | 25    |
| 5.4.2 Ursachen von Telefonstörungen .....                                               | 25    |
| 5.4.3 Definitionen der Kriterien für das Betriebsverhalten.....                         | 25    |
| 5.4.4 Diskussion .....                                                                  | 25    |
| 5.4.5 Festlegung von Grenzwerten .....                                                  | 26    |
| 5.4.6 Vorhandene Oberschwingungswerte .....                                             | 28    |
| 5.4.7 Grenzwerte für vorübergehende Bedingungen .....                                   | 28    |
| 5.5 Besondere Kriterien.....                                                            | 28    |
| 6 Erzeugung von Oberschwingungen .....                                                  | 29    |
| 6.1 Allgemeines .....                                                                   | 29    |
| 6.2 Erzeugung von Oberschwingungen im Stromrichterbetrieb.....                          | 29    |
| 6.2.1 Idealisierte Bedingungen .....                                                    | 29    |

|       |                                                                                                                 |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.2 | Realistische Bedingungen .....                                                                                  | 31 |
| 6.3   | Berechnungsverfahren .....                                                                                      | 33 |
| 6.3.1 | Allgemeines .....                                                                                               | 33 |
| 6.3.2 | Oberschwingungsströme für Berechnungen des Betriebsverhaltens, der Bemessung und für weitere Berechnungen ..... | 33 |
| 6.3.3 | Kombination von Oberschwingungen aus verschiedenen Stromrichterbrücken .....                                    | 34 |
| 6.3.4 | Konsistente Sätze .....                                                                                         | 34 |
| 6.3.5 | Oberschwingungserzeugung für verschiedene Gleichstromleistungsbereiche .....                                    | 35 |
| 6.4   | Empfindlichkeit der Oberschwingungserzeugung gegenüber verschiedenen Faktoren .....                             | 36 |
| 6.4.1 | Gleichstrom, Steuerwinkel und Kommutierungsüberschneidung .....                                                 | 36 |
| 6.4.2 | Auswirkung von Unsymmetrien auf charakteristische Oberschwingungen .....                                        | 37 |
| 6.4.3 | Toleranzen der Parameter der Stromrichterbetriebsmittel .....                                                   | 37 |
| 6.4.4 | Anzapfstufen .....                                                                                              | 37 |
| 6.4.5 | Theoretisch unterdrückte Oberschwingungen .....                                                                 | 38 |
| 6.4.6 | Gegen- und Nullspannungen .....                                                                                 | 38 |
| 6.4.7 | Sättigung des Stromrichtertransformators .....                                                                  | 38 |
| 6.4.8 | Oberschwingungswechselwirkung über den Stromrichter .....                                                       | 39 |
| 6.4.9 | Kurzkupplung-Systeme .....                                                                                      | 39 |
| 6.5   | Extern erzeugte Oberschwingungen .....                                                                          | 40 |
| 7     | Filteranordnungen .....                                                                                         | 40 |
| 7.1   | Überblick .....                                                                                                 | 40 |
| 7.2   | Vor- und Nachteile von typischen Filtern .....                                                                  | 41 |
| 7.3   | Klassifizierung von Filtertypen .....                                                                           | 41 |
| 7.4   | Abgestimmte Filter .....                                                                                        | 42 |
| 7.4.1 | Einstufige abgestimmte Filter .....                                                                             | 42 |
| 7.4.2 | Zweistufige abgestimmte Filter .....                                                                            | 44 |
| 7.4.3 | Dreistufige abgestimmte Filter .....                                                                            | 45 |
| 7.5   | Dämpfungsfilter .....                                                                                           | 46 |
| 7.5.1 | Einstufige abgestimmte Dämpfungsfilter .....                                                                    | 46 |
| 7.5.2 | Zweistufige abgestimmte Dämpfungsfilter .....                                                                   | 49 |
| 7.6   | Filterauswahl .....                                                                                             | 50 |
| 8     | Berechnung des Betriebsverhaltens des Filters .....                                                             | 51 |
| 8.1   | Berechnungsverfahren .....                                                                                      | 51 |
| 8.1.1 | Allgemeines .....                                                                                               | 51 |
| 8.1.2 | Eingabedaten .....                                                                                              | 52 |
| 8.1.3 | Methode .....                                                                                                   | 52 |
| 8.1.4 | Berechnung der Oberschwingungsströme des Stromrichters .....                                                    | 53 |
| 8.1.5 | Auswahl der Filtertypen und Berechnung ihrer Impedanzen .....                                                   | 53 |
| 8.1.6 | Berechnung des Betriebsverhaltens .....                                                                         | 54 |
| 8.2   | Verstimmung und Toleranzen .....                                                                                | 55 |

|        |                                                                                                  |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.2.1  | Allgemeines .....                                                                                | 55 |
| 8.2.2  | Faktoren der Verstimmung .....                                                                   | 55 |
| 8.2.3  | Widerstandsschwankungen .....                                                                    | 56 |
| 8.2.4  | Erstellung von Modellen .....                                                                    | 56 |
| 8.3    | Netzimpedanz für Berechnungen des Betriebsverhaltens .....                                       | 57 |
| 8.3.1  | Allgemeines .....                                                                                | 57 |
| 8.3.2  | Netzmodellierung mit Impedanzhüllkurven .....                                                    | 58 |
| 8.3.3  | Sektordiagramm .....                                                                             | 59 |
| 8.3.4  | Kreisdiagramm .....                                                                              | 60 |
| 8.3.5  | Diskrete Polygone .....                                                                          | 61 |
| 8.3.6  | Modellierung der Nullimpedanz .....                                                              | 62 |
| 8.3.7  | Detaillierte Modellierung des Wechselstromnetzes für die Berechnung des Betriebsverhaltens ..... | 62 |
| 8.4    | Ausfälle von Filter-Batterien und -Teilbatterien .....                                           | 63 |
| 8.5    | Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen .....                                                           | 64 |
| 8.6    | Flexibilität hinsichtlich der Einhaltung der Anforderungen .....                                 | 66 |
| 8.7    | Bemessungswerte der Betriebsmittel von Oberschwingungsfilter .....                               | 66 |
| 9      | Filterschaltung und Blindleistungsmanagement .....                                               | 67 |
| 9.1    | Allgemeines .....                                                                                | 67 |
| 9.2    | Austausch von Blindleistung mit dem Wechselstromnetz .....                                       | 67 |
| 9.2.1  | Allgemeines .....                                                                                | 67 |
| 9.2.2  | Auswirkungen auf Blindleistungskompensation und Filterbetriebsmittel .....                       | 67 |
| 9.2.3  | Bewertung des Blindleistungsaustausches .....                                                    | 68 |
| 9.3    | Blindleistungsvermögen von HGÜ-Stromrichtern .....                                               | 69 |
| 9.4    | Definitionen und Dimensionierung von Filter-Batterien/-Teilbatterien .....                       | 69 |
| 9.4.1  | Allgemeines .....                                                                                | 69 |
| 9.4.2  | Dimensionierung .....                                                                            | 70 |
| 9.5    | Hysterese der Schaltpunkte .....                                                                 | 72 |
| 9.6    | Q-V-Regelung des Stromrichters in der Nähe der Schaltpunkte .....                                | 73 |
| 9.7    | Betrieb bei erhöhten Stromrichtersteuerwinkeln .....                                             | 73 |
| 9.8    | Filtereinschaltreihenfolge und Oberschwingungsbetriebsverhalten .....                            | 73 |
| 9.9    | Abgrenzung der Zuständigkeiten .....                                                             | 74 |
| 9.9.1  | Allgemeines .....                                                                                | 74 |
| 9.9.2  | Kunde .....                                                                                      | 75 |
| 9.9.3  | Auftragnehmer .....                                                                              | 75 |
| 10     | Kundenspezifische Parameter und Anforderungen .....                                              | 75 |
| 10.1   | Allgemeines .....                                                                                | 75 |
| 10.2   | Wechselstrom-Systemparameter .....                                                               | 76 |
| 10.2.1 | Spannung .....                                                                                   | 76 |
| 10.2.2 | Unsymmetrie der Spannung .....                                                                   | 76 |

|         |                                                       |    |
|---------|-------------------------------------------------------|----|
| 10.2.3  | Frequenz .....                                        | 76 |
| 10.2.4  | Kurzschlusspegel .....                                | 77 |
| 10.2.5  | Filterumschaltung .....                               | 77 |
| 10.2.6  | Austausch von Blindleistung .....                     | 77 |
| 10.2.7  | Oberschwingungsimpedanz des Systems .....             | 77 |
| 10.2.8  | Daten des Nullsystems .....                           | 77 |
| 10.2.9  | Erdung des Systems .....                              | 77 |
| 10.2.10 | Isolationspegel .....                                 | 77 |
| 10.2.11 | Kriechstrecken.....                                   | 77 |
| 10.2.12 | Vorhandene Spannungsverzerrung .....                  | 78 |
| 10.3    | Anforderungen an die Oberschwingungsverzerrung .....  | 78 |
| 10.3.1  | Allgemeines.....                                      | 78 |
| 10.3.2  | Redundanzanforderungen .....                          | 78 |
| 10.4    | Umgebungsbedingungen .....                            | 79 |
| 10.4.1  | Temperatur .....                                      | 79 |
| 10.4.2  | Verschmutzung .....                                   | 79 |
| 10.4.3  | Wind .....                                            | 79 |
| 10.4.4  | Eis- und Schneelast (wenn erforderlich) .....         | 79 |
| 10.4.5  | Sonneneinstrahlung .....                              | 79 |
| 10.4.6  | Isokeraunische Niveaus .....                          | 79 |
| 10.4.7  | Erdbebenanforderungen .....                           | 79 |
| 10.4.8  | Akustisches Geräusch .....                            | 80 |
| 10.5    | Elektrische Umgebung .....                            | 80 |
| 10.6    | Anforderungen an Filteranlagen und -komponenten ..... | 80 |
| 10.6.1  | Filteranlagen.....                                    | 80 |
| 10.6.2  | Filterkondensatoren .....                             | 80 |
| 10.6.3  | Prüfanforderungen .....                               | 80 |
| 10.7    | Schutz von Filtern .....                              | 81 |
| 10.8    | Bewertung der Verluste.....                           | 81 |
| 10.9    | Feldmessungen und Überprüfungen .....                 | 81 |
| 10.10   | Allgemeine Anforderungen.....                         | 81 |
| 11      | Zukünftige Entwicklungen .....                        | 81 |
| 11.1    | Allgemeines.....                                      | 81 |
| 11.2    | Nichtstandardisierte Filtertechnik .....              | 82 |
| 11.2.1  | Allgemeines.....                                      | 82 |
| 11.2.2  | Selbsteinstellende Drosseln.....                      | 82 |
| 11.2.3  | Redundanz einzelner Phasen .....                      | 85 |
| 11.2.4  | Eigenständige aktive Filter .....                     | 86 |
| 11.2.5  | Kompakte Konstruktion .....                           | 87 |
| 11.3    | Andere LCC-Stromrichtertechnologie .....              | 88 |

|                        |                                                                                                        |     |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.3.1                 | Allgemeines .....                                                                                      | 88  |
| 11.3.2                 | Serienkompensierte Stromrichter .....                                                                  | 88  |
| 11.3.3                 | Transformatorlose Stromrichter.....                                                                    | 90  |
| 11.3.4                 | Anschluss von Einheiten .....                                                                          | 90  |
| 11.4                   | Veränderung der externen Umgebung.....                                                                 | 91  |
| 11.4.1                 | Erhöhte, bereits vorhandene Oberschwingungsverzerrungen .....                                          | 91  |
| 11.4.2                 | Entwicklungen in der Kommunikationstechnologie .....                                                   | 91  |
| 11.4.3                 | Veränderungen in der Struktur der Stromversorgungsindustrie .....                                      | 92  |
| 11.4.4                 | Netzqualität im Mittelpunkt .....                                                                      | 92  |
| 11.4.5                 | Weniger große Synchrongeneratoren und mehr regenerative und dezentrale<br>Energieerzeugung .....       | 93  |
| Anhang A (informativ)  | Alternative Art des Vergabeverfahrens.....                                                             | 94  |
| Anhang B (informativ)  | Gleichungen zur Berechnung der charakteristischen Oberschwingungen<br>eines Brückenstromrichters ..... | 95  |
| Anhang C (informativ)  | Definition der Parameter für Telefonstörungen .....                                                    | 97  |
| C.1                    | Allgemeines .....                                                                                      | 97  |
| C.2                    | Kriterien nach der europäischen Praxis .....                                                           | 97  |
| C.3                    | Kriterien nach der nordamerikanischen Praxis .....                                                     | 98  |
| C.4                    | Diskussion .....                                                                                       | 99  |
| Anhang D (informativ)  | Äquivalente Frequenzabweichung .....                                                                   | 101 |
| Anhang E (informativ)  | Blindleistungsmanagement.....                                                                          | 102 |
| E.1                    | Blindleistungsvermögen von HGÜ-Stromrichtern .....                                                     | 102 |
| E.1.1                  | Stationäres Leistungsvermögen .....                                                                    | 102 |
| E.1.2                  | Vorübergehendes Leistungsvermögen .....                                                                | 104 |
| E.2                    | Stromrichter-QV-Regelung in der Nähe von Schaltpunkten .....                                           | 105 |
| E.3                    | Spannungssprung beim Schalten eines Filters .....                                                      | 106 |
| Literaturhinweise..... |                                                                                                        | 107 |

## **Bilder**

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 1 – Idealisierte Stromkurvenformen auf der Wechselstromseite des Stromrichtertransformators .....                                                                | 30 |
| Bild 2 – Realistische Stromkurvenformen auf der Wechselstromseite des<br>Stromrichtertransformators, einschließlich der Auswirkungen von nicht-idealen Faktoren ..... | 31 |
| Bild 3 – Vergleich des Oberschwingungsanteils der Stromkurvenform unter idealisierten und<br>realistischen Bedingungen .....                                          | 32 |
| Bild 4 – Typischer Verlauf des charakteristischen Oberschwingungsbetrages bei Gleichstrom .....                                                                       | 36 |
| Bild 5 – Einstufiges abgestimmtes Filter und Frequenzgang .....                                                                                                       | 42 |
| Bild 6 – Zweistufiges abgestimmtes Filter und Frequenzgang .....                                                                                                      | 44 |
| Bild 7 – Dreistufiges abgestimmtes Filter und Frequenzgang .....                                                                                                      | 45 |
| Bild 8 – Dämpfungsfilter 2. Ordnung und Frequenzgang .....                                                                                                            | 47 |
| Bild 9 – Dämpfungsfilter 3. Ordnung und Frequenzgang .....                                                                                                            | 48 |
| Bild 10 – C-Filter und Frequenzgang .....                                                                                                                             | 49 |
| Bild 11 – Zweistufiges Dämpfungsfilter und Frequenzgang .....                                                                                                         | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Bild 12 – Ersatzschaltbild für Filterberechnungen .....                                                                                                                                                          | 52  |
| Bild 13 – Allgemeines Sektordiagramm der Impedanz des Wechselstromsystems mit minimaler Impedanz.....                                                                                                            | 59  |
| Bild 14 – Allgemeines Sektordiagramm der Impedanz des Wechselstromsystems mit minimalem Widerstand .....                                                                                                         | 59  |
| Bild 15 – Allgemeines Kreisdiagramm der Impedanz des Wechselstromsystems mit minimalem Widerstand .....                                                                                                          | 60  |
| Bild 16 – Beispiel für Oberschwingungsimpedanzen für Oberschwingungen der Ordnung 2 bis 4.....                                                                                                                   | 61  |
| Bild 17 – Beispiel für Oberschwingungsimpedanzen für Oberschwingungen der Ordnung 5 bis 8.....                                                                                                                   | 61  |
| Bild 18 – Beispiel für Oberschwingungsimpedanzen für Oberschwingungen der Ordnung 9 bis 13.....                                                                                                                  | 62  |
| Bild 19 – Beispiel für Oberschwingungsimpedanzen für Oberschwingungen der Ordnung 14 bis 49.....                                                                                                                 | 62  |
| Bild 20 – Darstellung grundlegender Spannungsqualitätskonzepte mit Zeit-/Ortsstatistiken, die das gesamte System umfassen (entnommen aus IEC TR 61000-3-6:2008).....                                             | 65  |
| Bild 21 – Beispiel für einen Betriebsbereich, in dem die Spezifikationen für die Oberschwingungspegel bei einer Filtersystemlösung nicht eingehalten werden .....                                                | 66  |
| Bild 22 – Definition von Zweigen, Teilbatterien und Batterien.....                                                                                                                                               | 70  |
| Bild 23 – Typische Schaltfolge .....                                                                                                                                                                             | 74  |
| Bild 24 – Blindleistungskomponenten .....                                                                                                                                                                        | 75  |
| Bild 25 – Konstruktionsprinzip einer selbsttätig abstimmbenden Drossel unter Verwendung von Gleichstrom Steuerstrom in einer orthogonalen Wicklung.....                                                          | 83  |
| Bild 26 – Steuerprinzip für selbsttätig abstimmbende Filter .....                                                                                                                                                | 83  |
| Bild 27 – Eine Methode zum Schalten eines einzelnen redundanten Phasenfilters .....                                                                                                                              | 85  |
| Bild 28 – Verschiedene mögliche Konfigurationen von serienkompensierten HGÜ-Stromrichtern .....                                                                                                                  | 89  |
| Bild E.1 – Leistungsvermögensdiagramm eines Stromrichters bei verschiedenen Regelungsstrategien .....                                                                                                            | 102 |
| Bild E.2 – Stromrichterleistungsvermögen bei $\gamma_{\min} = 17^\circ$ , $\gamma_{\max} = 40^\circ$ , $\alpha_{\min} = 5^\circ$ , $\alpha_{\max} = 35^\circ$ und $U_{\text{diomax}} = 1,2U_{\text{dioN}}$ ..... | 103 |
| Bild E.3 – Blindleistungsaufnahme eines Gleichrichters in Abhängigkeit von $\alpha$ bei $U_{\text{dio}} = U_{\text{dioN}}$ , $d_x = 9,4 \%$ und $d_r = 0,2 \%$ .....                                             | 105 |
| Bild E.4 – Blindleistungsaufnahme eines Wechselrichters in Abhängigkeit von $\gamma$ bei $U_{\text{dio}} = U_{\text{dioN}}$ , $d_x = 9,4 \%$ und $d_r = 0,2 \%$ .....                                            | 105 |

## Nationales Vorwort

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium DKE/K 331 „Leistungselektronik“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE ([www.dke.de](http://www.dke.de)) zuständig.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE ([www.dke.de](http://www.dke.de)) und DIN ([www.din.de](http://www.din.de)) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Technische Reports sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom IEC/SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC .

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieses Dokuments bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu diesem Dokument angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees das Dokument

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

## Einleitung

Die IEC TR 62001-Reihe ist in fünf Teile gegliedert:

### IEC TR 62001-1 – Overview

Dieser Teil befasst sich mit den Spezifikationen von Wechselstromfiltern für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)Systemen mit netzgeführten Stromrichtern, den zulässigen Verzerrungsgrenzen, der Erzeugung von Oberschwingungen, den Filteranordnungen, der Berechnung des Filterbetriebsverhaltens, der Filterschaltung und dem Blindleistungsmanagement sowie den kundenspezifischen Parametern und Anforderungen.

### IEC TR 62001-2 – Performance

Dieser Teil befasst sich mit stromabhängigen Beeinflussungskriterien, Feldmessungen und Überprüfung.

### IEC TR 62001-3 – Modelling

Dieser Teil befasst sich mit der Wechselwirkung von Oberschwingungen zwischen Stromrichtern, bereits vorhandenen Oberschwingungen, der Modellierung der Impedanz des Wechselstromnetzes und der Simulation des Betriebsverhaltens von Wechselstromfiltern.

### IEC TR 62001-4 – Equipment

Dieser Teil befasst sich mit stationären und transienten Bemessungsdaten von Wechselstromfiltern und ihren Komponenten, Leistungsverlusten, hörbarem Geräusch, Auslegungsfragen und speziellen Anwendungen, Filterschutz, Erdbebenschutzanforderungen, Gerätekonstruktion und Prüfparametern.

### IEC TR 62001-5<sup>1</sup> – AC side harmonics and appropriate harmonic limits for HVDC systems with voltage sourced converters (VSC)

Dieses Dokument befasst sich mit spezifischen Fragen der Auslegung von Wechselstromfiltern für VSC-HGÜ-Systeme.

Die Teile 1 bis 4 sind mit Schwerpunkt auf netzgeführten Stromrichtern geschrieben.

---

<sup>1</sup> In Vorbereitung. Stand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung: IEC/RPUB 62001-5:2021.

# Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Systeme – Anleitung für die Spezifikation und Auslegung von Wechselstromfiltern – Teil 1: Überblick

## 1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 62001, der einen technischen Bericht darstellt, befasst sich mit der Spezifikation und Entwurfsbewertung des wechselstromseitigen Oberschwingungsbetriebsverhaltens und der wechselstromseitigen Filter für HGÜ-Systeme. Er ist hauptsächlich für die Versorgungsunternehmen und Berater vorgesehen, die für die Erstellung der Spezifikationen für neue HGÜ-Projekte und die Bewertung der von potenziellen Lieferanten vorgeschlagenen Entwürfe.

Dieses Dokument enthält Leitlinien zu den Spezifikationen von Wechselstromfiltern für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)Systemen mit netzgeführten Stromrichtern und zur Berechnung des Filterbetriebsverhaltens.

Der Anwendungsbereich dieses Dokuments umfasst die wechselstromseitige Filterung für den Frequenzbereich, der im Hinblick auf Oberschwingungsverzerrungen und hörbare Frequenzstörungen von Interesse ist. Wird in diesem Dokument ohne Einschränkung auf den Begriff „HGÜ-Stromrichter“ oder „HGÜ-Station“ Bezug genommen, so bezieht sich dies auf die netzgeführte Stromrichter-Technologie (en: line commutated converter (LCC) technology). Er schließt Filter aus, die für die Wirksamkeit im Frequenzbereich der Trägerfrequenzübertragung auf Hochspannungsleitungen (PLC, en: power line carrier) und Funkstörungen ausgelegt sind.

Der Schwerpunkt dieses Dokuments liegt auf der „konventionellen“ Wechselstromfiltertechnologie und der HGÜ mit netzgeführten Stromrichtern (LCC). Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC, en: voltage sourced converter) betreffende Fragen werden in der CIGRE Technical Brochure 754 [1]<sup>2</sup> und in der IEC TR 62001-5 [2] behandelt.

## 2 Normative Verweisungen

In diesem Dokument gibt es keine normativen Verweise.

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokumentes gelten die folgenden Begriffe.

### 3.1

#### Spezifikation

Dokument, das die Gesamtsystemanforderungen für ein Wechselstromfilter und die Wechselstromsystemumgebung, in der es arbeitet, definiert

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein solches Dokument wird normalerweise von den Versorgungsunternehmen an die potenziellen HGÜ-Hersteller herausgegeben. Es gewährleistet auch die Einheitlichkeit der Angebote und legt Richtlinien für die Bewertung der Angebote fest.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der hier verwendete Begriff bezieht sich nicht auf die detaillierten technischen Spezifikationen für einzelne Betriebsmittel, die vom HGÜ-Hersteller als Ergebnis des Filterauslegungsprozesses erstellt werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Spezifikation definiert die technische Grundlage für einen Vertrag zwischen zwei Partnern: dem Kunden (3.2) und dem Auftragnehmer (3.3).

---

<sup>2</sup> Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

**3.2****Kunde**

Organisation, die die HGÜ-Stromrichterstation einschließlich der Wechselstromfilter kauft

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Begriff „Kunde“ umfasst ähnliche Begriffe, die in Spezifikationen verwendet werden können, wie Eigentümer, Auftraggeber, Käufer, Versorgungsunternehmen, Benutzer, Arbeitgeber und Käufer, und umfasst auch einen Berater, der den Kunden vertritt.

**3.3****Auftragnehmer**

Organisation, die die Gesamtverantwortung für die Lieferung der HGÜ-Stromrichterstation als System trägt, einschließlich der Wechselstromfilter

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Auftragnehmer kann seinerseits einen oder mehrere Unterlieferanten für einzelne Betriebsmittel unter Vertrag nehmen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Begriff „Auftragnehmer“ deckt ähnliche Begriffe ab, die in Spezifikationen verwendet werden können, wie z. B. Hersteller oder Lieferant.

Anmerkung 3 zum Begriff: Wo sich der Kontext eindeutig auf die Vorvertragsphase eines Projekts bezieht, wurde das Wort „Bieter“ anstelle von „Auftragnehmer“ verwendet, um einen potenziellen Auftragnehmer oder Anbieter zu bezeichnen.

**3.4****Zweig****Arm**

ein Satz von Bauteilen (Kondensator, Induktivität, Widerstand), entweder in Einzelanordnung oder zusammengeschaltet, die zu Wartungszwecken von der Last getrennt werden können

Siehe: Bild 22

Anmerkung 1 zum Begriff: In zusammengeschalteter Anordnung bildet sie eine kleinste abgestimmte Filtereinheit.

**3.5****Teilbank****Teilbatterie**

ein oder mehrere Zweige, die zur Blindleistungsregelung auf die Last geschaltet (angeschlossen oder abgetrennt) werden können

Siehe: Bild 22

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Schalter muss nicht notwendigerweise über ein Fehlerlöschvermögen verfügen.

**3.6****Bank****Batterie**

eine oder mehrere Teilbatterien, die durch einen Leistungsschalter zusammengeschaltet werden können

Siehe: Bild 22

## **4 Übersicht über die Spezifikationen von Wechselstromfiltern für HGÜ-Systeme**

### **4.1 Allgemeines**

Bei der Installation einer HGÜ-Stromrichterstation in einem Wechselstromsystem ist die Art und Weise, in der sie sich auf die Qualität der Stromversorgung in diesem System auswirken kann, immer ein wichtiges Thema. Eines der wichtigsten Themen im Zusammenhang mit der Netzqualität ist das Oberschwingungsverhalten.

Der netzseitige Strom eines HGÜ-Stromrichters hat eine hochgradig nicht-sinusförmige Kurvenform und kann, wenn er in das angeschlossene Wechselstromsystem fließt, unannehmbare Verzerrungswerte erzeugen. Daher sind wechselstromseitige Filter als Teil der gesamten HGÜ-Stromrichterstation erforderlich, um die Oberschwingungsverzerrung des wechselstromseitigen Stroms und der Spannung auf ein akzeptabel niedriges Niveau zu reduzieren.

HGÜ-Stromrichter verbrauchen auch eine beträchtliche Blindleistung, von der ein großer Teil normalerweise lokal in der Stromrichterstation bereitgestellt wird. Im Parallelbetrieb geschaltete Wechselstromfilter erscheinen als kapazitive Quellen von Blindleistung bei der Grundfrequenz, und normalerweise werden in konventionellen HGÜ-Systemen die Wechselstromfilter verwendet, um den Großteil oder den gesamten Blindleistungsverbrauch des Stromrichters zu kompensieren. Zusätzliche Parallelkondensatoren und Drosseln können ebenfalls verwendet werden, um sicherzustellen, dass das gewünschte Blindleistungsgleichgewicht unter bestimmten Betriebsbedingungen innerhalb bestimmter Grenzen aufrechterhalten wird.

Der Entwurf der Wechselstromfilter muss daher normalerweise diese beiden Anforderungen der Oberschwingungsfilterung und der Blindleistungskompensation für verschiedene Betriebszustände und Laststufen erfüllen. Die Optimierung dieses Entwurfs ist die Aufgabe des Wechselstromfilterentwicklers, und die Rahmenbedingungen, unter denen der Entwurf erfolgt, werden in der Spezifikation festgelegt.

Die Wechselstromfilter sind ein sehr wichtiger Bestandteil einer herkömmlichen HGÜ-Stromrichterstation. Die Grundblindleistung der Wechselstromfilter (ggf. einschließlich Parallelkondensatoren) in jeder Stromrichterstation liegt in der Regel im Bereich von 50 % bis 60 % der Bemessungswirkleistung des Systems. Zusammen mit den erforderlichen Betriebsmitteln der Schaltanlage können die Wechselstromfilter mehr als die Hälfte des gesamten Flächenbedarfs eines HGÜ-Systems beanspruchen. Die Kosten für die Herstellung, Installation und Inbetriebnahme der Betriebsmittel des Wechselstromfilters sind erheblich, und liegen in der Regel in der Größenordnung von 10 % der Gesamtkosten der Station. Darüber hinaus können die Filterauslegungsuntersuchungen umfangreich sein und sich auf viele andere Aspekte der Stationsauslegung (siehe [1], [4], [5]) und auf den gesamten Projektzeitplan auswirken. Nach der Inbetriebnahme werden die Wechselstromfilter aufgrund der Anforderungen an Schaltvorgänge, Wartung, Ersatzteilversorgung und Zuverlässigkeit weiterhin eine sehr wichtige Rolle spielen.

Es ist daher wichtig, dass die Anforderungen an die Wechselstromfilter so festgelegt werden, dass die Auslegung unter Berücksichtigung aller oben genannten Faktoren optimiert wird und gleichzeitig die wesentlichen Funktionen der Störungsbegrenzung und der Blindleistungskompensation erfüllt werden.

Im Allgemeinen wird in diesem Dokument davon ausgegangen, dass der Kauf einer HGÜ-Stromrichterstation, einschließlich der Wechselstromfilter, auf schlüsselfertiger oder ähnlicher Basis erfolgt, wie es bisher bei den meisten HGÜ-Systemen der Fall gewesen ist. Die hier erörterten Aspekte wie die Bereitstellung technischer Informationen, die Zuweisung von Risiken usw. beziehen sich daher im Wesentlichen auf einen solchen umfassenden Ansatz. Würde man den alternativen Ansatz wählen, bei dem die Betriebsmittel einzeln spezifiziert und gekauft werden, müssten diese Aspekte des Dokuments im Zusammenhang mit dem jeweiligen Vorhaben neu überdacht werden, obwohl der rein technische Inhalt des Dokuments weiterhin gelten würde.

Die meisten Spezifikationen für HGÜ-Projekte werden in einem endgültigen Dokument herausgegeben, nachdem der Kunde und möglicherweise Berater die Einzelheiten des Projekts festgelegt haben. Ein alternativer Ansatz, der verwendet wird, wird in Anhang A erörtert.

## 4.2 Verantwortungsgrenzen

Bevor in einer Spezifikation die Anforderungen an die Auslegung von Wechselstromfiltern im Detail festgelegt werden, sollten zunächst die Verantwortungsgrenzen zwischen dem Kunden und dem Auftragnehmer klar definiert werden.

In dieser Hinsicht gibt es zwei extreme Vorgehensweisen.

- a) Der Kunde definiert die Impedanz des Wechselstromsystems, die Verzerrungsgrenzen und andere Kriterien für das Betriebsverhalten, die durch eine Berechnung zu ermitteln sind, sowie die Berechnungsmethode und die zu berücksichtigenden Parameter. Der Anbieter, und später der Auftragnehmer, führt dann Untersuchungen durch und entwirft Filter auf der Grundlage dieser Informationen und ist dafür verantwortlich, zur Zufriedenheit des Auftraggebers nachzuweisen, dass der vorgeschlagene Filterentwurf alle Anforderungen der Spezifikation erfüllt. Das Risiko, dass die Wechselstromfilter unter den Einsatzbedingungen nicht angemessen funktionieren, liegt hauptsächlich beim Kunden.
- b) Im anderen Extremfall definiert der Kunde nur die maximale tatsächlich gemessene Verzerrung und Störung, die zulässig sein soll (oder noch einfacher, dass es keine Probleme mit Verzerrung oder Störung gibt). Der Kunde kann auch Feldtests vorschreiben, um zu gewährleisten, dass die festgelegten Grenzwerte nicht überschritten werden. Der Anbieter und später der Auftragnehmer trägt dann die volle

Verantwortung für die Bestimmung der Impedanz des Wechselstromsystems, die Festlegung aller relevanten Parameter und die Entwicklung von Wechselstromfiltern, die in der Praxis innerhalb der vom Kunden vorgegebenen (oder vom Auftragnehmer als angemessen vorgeschlagenen) Grenzen funktionieren und allen tatsächlichen Betriebsbedingungen standhalten. Die meisten Risiken liegen in diesem Fall beim Auftragnehmer.

Für einen Kunden, der über relativ wenig eigene Untersuchungskapazität verfügt, könnte Ansatz b) attraktiv erscheinen. Allerdings hat b) mehrere Nachteile, die im Folgenden aufgeführt sind.

- Das bedeutet, dass in der Ausschreibungsphase mehrere potenzielle Auftragnehmer umfangreiche Untersuchungen über die Impedanz des Wechselstromsystems und die Anforderungen an die lokalen Oberschwingungsgrenzen durchführen müssen. Dies ist teuer und in einem kurzen Ausschreibungszeitraum nur schwer zu bewerkstelligen. Daher sollten diese Untersuchungen vom Kunden oder seinem Berater während des längeren Zeitraums durchgeführt werden, der in der Regel vor der Erstellung der Spezifikation zur Verfügung steht.
- Da der Auftragnehmer Risiken berücksichtigen muss, hat dies entsprechende Auswirkungen auf die Preisgestaltung.
- Der Kunde muss sich möglicherweise zwischen völlig unterschiedlichen Entwürfen entscheiden, die von Anbietern angeboten werden, die von ganz unterschiedlichen Annahmen über das Wechselstromsystem ausgehen.
- Es gibt erhebliche praktische Schwierigkeiten beim Nachweis der Konformität im Rahmen von Überprüfungstests.
- Ein finanzieller Gesamtgewinn ist nicht zu erwarten, da der Kunde letztendlich für die vom Anbieter/Auftragnehmer durchgeführten Untersuchungen als Teil des Gesamtauftragspreises zahlen wird.

In der Praxis haben die meisten Spezifikationen einen Ansatz, der irgendwo zwischen diesen beiden Extremen liegt. So kann der Kunde beispielsweise einige Informationen über die Konfiguration des Wechselstromsystems, die Höchst- und Mindestkurzschlussleistung und die erwartete künftige Erweiterung bereitstellen, nicht aber eine vollständige Definition der Oberschwingungsimpedanz des Wechselstromsystems.

Die Entscheidung darüber, wo die Grenze der Verantwortung zu ziehen ist, hängt von der Strategie jedes einzelnen Kunden und von den Informationen und Ressourcen ab, die dem Kunden zur Verfügung stehen. In diesem Dokument wird kein bestimmter Ansatz empfohlen, sondern es werden vielmehr die detaillierten Informationen bereitgestellt, die als Entscheidungshilfe in dieser Hinsicht erforderlich sind.

Es wird jedoch dringend empfohlen, dass diese allgemeine Fragestellung vom Kunden in einem frühen Stadium sorgfältig geprüft wird und dass die Grenzen der Verantwortung und der Bereitstellung in der Spezifikation entsprechend der Entscheidung des Kunden klar definiert werden. Die detaillierteren technischen Anforderungen der Spezifikation sollten dann in Übereinstimmung damit erfolgen. Wird die Verantwortung nicht klar definiert und wird nicht sichergestellt, dass die detaillierten Anforderungen der Spezifikation mit der allgemeinen Definition der Verantwortung übereinstimmen, besteht die Gefahr von Vertragskonflikten, Verzögerungen und einer möglicherweise unbefriedigenden Leistung der Wechselstromfilter.

Im Wesentlichen wird in der Spezifikation festgelegt, ob das Kriterium, nach dem die Wirksamkeit des Filters als zufriedenstellend beurteilt wird, darin besteht

- der Nachweis durch Berechnung von Betriebsparametern unter Verwendung der angegebenen Daten, oder
- Messung im Feld nach der Inbetriebnahme, oder
- eine Kombination der oben genannten Möglichkeiten.

Der rechnerische Nachweis gewährleistet, dass die ungünstigsten Bedingungen berücksichtigt werden können, lässt aber auch Rückschlüsse auf fehlerhafte Daten oder Berechnungsmethoden zu. Messungen im Feld können als endgültiger Beweis für eine korrekte Auslegung angesehen werden, aber es ist unter Umständen nicht möglich, Messungen unter den schwierigsten Umgebungs-, Wechsel- und Gleichstromsystembedingungen durchzuführen, für die die Auslegung vorgenommen wurde. Außerdem werden die Auswirkungen bereits vorhandener Oberschwingungsverzerrungen im Wechselstromsystem berücksichtigt, indem die Oberschwingungspegel bei gesperrten HGÜ-Stromrichtern und bei abgeschalteten und zugeschalteten Wechselstromfiltern gemessen werden, sofern letzteres unter Berücksichtigung der Blindleistungsbilanz möglich ist.

Eine Kombination aus rechnerischem Nachweis und anschließender Messung vor Ort bietet dem Kunden daher die größte Sicherheit, dass die Filterwirkung zufriedenstellend sein wird.

### 4.3 Umfang der Untersuchungen

Abhängig von den unter 4.2 erörterten Verantwortungsgrenzen kann es sein, dass einige Systemuntersuchungen vom Kunden vor der Erstellung der Spezifikation durchgeführt werden müssen oder dass sie in der Verantwortung des Anbieters und später des Auftragnehmers liegen. Solche Untersuchungen im Zusammenhang mit den Wechselstromfiltern würden normalerweise Folgendes umfassen

- Anforderungen an die Blindleistung des Wechselstromsystems,
- Messungen oder Berechnungen der Impedanz des Wechselstromsystems und
- bereits vorhandene Oberschwingungspegel.

Der Umfang der vom Anbieter und Auftragnehmer durchzuführenden Systemuntersuchungen sollte in der Spezifikation deutlich gemacht werden. Ein Mindestmaß an Untersuchungen wird immer erforderlich sein, um sicherzustellen, dass die Filter angemessen funktionieren und allen definierten elektrischen und Umweltbedingungen standhalten.

Diese grundlegenden Untersuchungen umfassen in der Regel folgende Punkte:

- a) Blindleistungsbereitstellung und -regelung;
- b) Resonanz niedriger Ordnung mit dem Wechselstromsystem;
- c) Betriebsverhalten des Wechselstromfilters;
- d) Bemessung des Wechselstromfilters im eingeschwungenen Zustand;
- e) Bemessung des Wechselstromfilters bei transienten Vorgängen, Überspannung und Isolationskoordination;
- f) Verluste des Wechselstromfilters;
- g) Schutz des Wechselstromfilters;
- h) Aufgaben des Schutzschafters des Wechselstromfilters;
- i) Anforderungen an die Entladung des Wechselstromfilters;
- j) Untersuchungen derjenigen Teile der Regelung und des dynamischen Betriebsverhaltens die von den Wechselstromfiltern beeinflusst werden, sowie die Analyse des integrierten Betriebs von Wechselstrom- und HGÜ-Systemen;
- k) Untersuchung des hörbaren Geräusches derjenigen Teile, die von den Wechselstromfiltern beeinflusst werden;
- l) Untersuchung derjenigen Teile von RAM (en: reliability (Zuverlässigkeit), availability (Verfügbarkeit) and maintenance (Wartung)), die von den Wechselstromfiltern beeinflusst werden.

Weitere Untersuchungen zum Betriebsverhalten und zur Bemessung können jedoch von Interesse sein, um die Planung eines wirtschaftlichen und flexiblen Betriebs zu unterstützen und um empfohlene Verfahren für den Fall von Ausfällen, Wartungsarbeiten oder ungewöhnlichen Betriebssituationen festzulegen. Solche Untersuchungen könnten z. B. das Betriebsverhalten und die Bemessung bei Ausfallereignissen umfassen, die in der Spezifikation nicht vorgesehen sind, oder bei weiter gefassten Grenzen des Blindleistungsaustauschs als vereinbart gelten. Diese Situationen können für die Betriebsplaner von erheblichem Interesse sein und haben einen wirtschaftlichen Wert. Der mögliche Bedarf an solchen zusätzlichen Untersuchungen sollte vom Kunden geprüft und, falls gewünscht, in den Umfang der in der Spezifikation geforderten Untersuchungen aufgenommen werden.

Von den wesentlichen Auslegungsuntersuchungen werden einige normalerweise vom Anbieter im Rahmen des Ausschreibungsverfahrens in vollem Umfang durchgeführt (zumindest a), c), d) und j) der obigen Liste). Andere könnten in der Ausschreibungsphase weggelassen oder auf ein Minimum reduziert werden, und Schätzungen könnten auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungen des Anbieters vorgenommen werden. In der Phase der ausführlichen Ausarbeitung werden alle wesentlichen Untersuchungen in vollem Umfang vom Auftragnehmer selbst durchgeführt.

#### 4.4 Umfang der Lieferung

In der Spezifikation sollte der Lieferumfang in Bezug auf die Wechselstromfilterung wie bei allen Aspekten des HGÜ-Systems klar festgelegt werden. Zusätzlich zur Lieferung der Hauptkomponenten des Wechselstromfilters sollte die Verantwortung für die Bereitstellung von Folgendem festgelegt werden:

- Vorbereitung des Standorts;
- bauliche und mechanische Komponenten;
- Erdung;
- Umzäunung;
- Schnittstelle zur Wechselstrom-Schaltanlage;
- Steuerung, Messung, Überwachung und Schutz;
- Betriebsmittel zum Schalten;
- Verkabelung;
- Ersatzteile;
- spezielle Prüfmittel, die für die Inbetriebnahme und Wartung erforderlich sind;
- Errichtung, Inbetriebnahme und Prüfung;
- Messungen des Betriebsverhaltens im Einsatz.

Jegliche Anforderungen an Garantien, z. B. in Bezug auf die Ausfallrate von Kondensatoren, die gemessenen Filterverluste und das Betriebsverhalten, sollten ebenfalls klar festgelegt werden.

#### 4.5 Vom Auftragnehmer zu liefernde technische Daten

In der Ausschreibungsphase eines HGÜ-Projekts müssen die Anbieter dem Kunden in der Regel technische Daten zu den von ihnen vorgeschlagenen Entwürfen vorlegen. Diese Daten werden vom Kunden verwendet, um den vorgeschlagenen Entwurf technisch zu qualifizieren und um Vergleiche zwischen konkurrierenden Anbietern anstellen zu können. In der Leistungsbeschreibung sollte genau festgelegt werden, welche technischen Daten zu liefern sind, da sonst die Gefahr besteht, dass die von verschiedenen Anbietern gelieferten Informationen mögliche Schwachstellen im Entwurf nicht aufzeigen oder keine fairen Vergleiche ermöglichen. Zu den Aspekten, denen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte, gehören die allgemeinen Aspekte:

- 1) Methode und Annahmen für die Berechnungen des Betriebsverhaltens von Filtern;
- 2) Kriterien und Annahmen für die Bemessung von Filtern im stationären Zustand sowie für transiente Beanspruchungen und deren Bemessung;
- 3) Berechnungen sowie die folgenden spezifischen Bereiche, in denen Klarheit erforderlich ist:
  - a) von Stromrichter erzeugte Oberschwingungsströme (in der Spezifikation sollte genau festgelegt werden, unter welchen Bedingungen diese anzugeben sind; sie sollte vorzugsweise Oberschwingungsströme bei mehreren kritischen Bedingungen oder Leistungspegeln und unter allen besonderen Betriebsbedingungen verlangen);
  - b) Impedanzeigenschaften von Filtern (die Spezifikation sollte Informationen über die Impedanz bei und in der Nähe von abgestimmten Frequenzen, unter Bedingungen der Verstimmung und über das gesamte interessierende Spektrum verlangen);
  - c) Parameter für das Betriebsverhalten bei bestimmten Betriebsbedingungen (z. B. bei Volllast und bei Zwischenlasten unmittelbar vor dem Zuschalten einer zusätzlichen Bank).

Nach der Auftragsvergabe und während der Entwurfs- und Beschaffungsphase des Projekts erstellt der Auftragnehmer in der Regel technische Untersuchungsberichte und andere Dokumente, die Aspekte des Filterentwurfs (Leistung, Bemessung, Schaltpläne, Schutz, Isolationskoordination, Auslegung, Bewertung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit) sowie Gerätespezifikationen für die einzelnen Filterkomponenten abdecken. Aus der Spezifikation (oder einem anderen Teil der Vereinbarung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer) sollte klar hervorgehen, ob diese Unterlagen vom Auftraggeber zu genehmigen sind, und wenn ja, sollte ein angemessenes Verfahren festgelegt werden, das dem Auftraggeber genügend Zeit für die Prüfung dieser

Unterlagen, mögliche nachträgliche Änderungen und die Genehmigung im Rahmen des vorgesehenen Projektzeitplans lässt.

## 4.6 Alternative Vorschläge der Anbieter

Der Kunde sollte sich darüber im Klaren sein, dass die Anbieter eines HGÜ-Projekts über umfangreiche Erfahrungen und Fachkenntnisse verfügen und darüber hinaus ständig neue Techniken und Gerätetechnologien entwickeln. Infolgedessen ist es immer möglich, dass ein Anbieter in der Lage ist, eine Filterlösung vorzuschlagen, die für den Kunden vorteilhaft ist, aber aus irgendeinem Grund außerhalb der strengen Grenzen liegt, die durch die Spezifikation gesetzt wurden.

Daher sollten Leistungsbeschreibungen immer die Möglichkeit offenlassen, dass der Anbieter neben der Lösung, die ausdrücklich die festgelegten Anforderungen erfüllt, auch eine alternative Lösung vorschlagen kann.

## 5 Zulässige Verzerrungsgrenzen

### 5.1 Allgemeines

Das Ziel der Auslegung des Wechselstromfilters besteht darin, die nachteiligen Auswirkungen sowohl der einzelnen Oberschwingungen als auch der gesamten Oberschwingungsverzerrung der Spannungs- und Stromkurvenform sowohl an der HGÜ-Verbindungssammelschiene als auch im umgebenden Netz zu begrenzen.

Diese möglichen nachteiligen Auswirkungen sind wie folgt:

- a) Die Verzerrung der Kurvenform kann zu einer stärkeren Erwärmung und höheren dielektrischen Belastungen sowohl in den Betriebsmitteln des Versorgungsunternehmens als auch in denen anderer Kunden sowie zu Fehlfunktionen elektronischer Betriebsmittel führen.
- b) Der in den Wechselstromleitungen zirkulierende Oberschwingungsstrom kann durch Induktion Störungen in benachbarten Kommunikationsleitungen verursachen, die auf ein akzeptables Niveau begrenzt werden sollten.
- c) Induzierte Spannungen können Probleme verursachen, weil sie die Sicherheit von Menschen gefährden oder zu Fehlfunktionen von benachbarten Kommunikations-, Signal- und Schutzeinrichtungen führen.

Um solche nachteiligen Auswirkungen abzumildern, werden in der Regel in den Kundenspezifikationen zulässige Grenzwerte für die Oberschwingungsverzerrung festgelegt, die vom Entwickler des Wechselstromfilters beachtet werden müssen. Die Definition geeigneter Kriterien für die Festlegung solcher Grenzwerte ist ein komplexes und kontroverses Thema, mit dem sich jeder Kunde, der ein neues HGÜ-System installiert, auseinandersetzen muss. Dieser Abschnitt 5 versucht, die notwendigen Hintergrundinformationen zu liefern und Empfehlungen zu den verschiedenen Ansätzen zu geben, die dem Kunden zur Verfügung stehen.

Ein gängiges Verfahren für die Festlegung von Grenzwerten besteht häufig darin, die Werte anhand von Referenzen in der internationalen Literatur festzulegen, ohne detaillierte Voruntersuchungen am jeweiligen Standort durchzuführen. Dieser Ansatz erfordert nur eine minimale Anzahl von Untersuchungen und ermöglicht einen kurzen Zeitplan. Der Nachteil ist, dass konservative Grenzwerte festgelegt werden müssen, um sicherzustellen, dass es nicht zu übermäßigen Verzerrungen und Telefonstörungen kommt, die hohe zusätzliche Kosten für Korrekturen und/oder Maßnahmen erfordern können.

Allerdings sollten auf Grund

- der verfügbaren leistungsfähigen Berechnungsprogramme,
- der Verfeinerung der Methoden zur Bewertung des Oberschwingungseinflusses, wie in der IEC TR 61000-3-6 [6] und in [7], [8] dargelegt,
- der Sorge der Versorgungsunternehmen und ihrer Kunden um die Netzqualität und
- der Bestrebung nach Kostensenkung durch Optimierung der Betriebsmittelkonstruktion,

geeignete Spezifikationsuntersuchungen durchgeführt werden, um Oberschwingungsgrenzwerte zu erarbeiten, die auf die besonderen Merkmale des HGÜ-Systems und des angeschlossenen Wechselstromnetzes zugeschnitten sind. Abschnitt 5 beschreibt die verschiedenen Kenngrößen, die zur Beherrschung der nachteiligen Oberschwingungseffekte verwendet werden, und erörtert die Überlegungen, die bei der Definition der Kenngrößen und bei der Bestimmung der Grenzwerte berücksichtigt werden. Es werden Grenzwertbereiche für bestehende Systeme sowie allgemeine Leitlinien angegeben. Es wird auf die detaillierten Methoden verwiesen, die für die Bestimmung der spezifischen Grenzwerte empfohlen werden.

Die Definition der zulässigen Grenzwerte wird im Folgenden unter vier Gesichtspunkten erörtert:

- 1) Grenzwerte für Spannungsverzerrungen;
- 2) Grenzwerte für die Betriebsmittel des Hoch- und Höchstspannungsnetzes;
- 3) Grenzwerte für Telefonstörungen;
- 4) besondere Kriterien.

Die Begrenzung von Telefonstörungen durch die Anwendung gewichteter Kenngrößen hatte in der Vergangenheit einen erheblichen Einfluss auf die Art, die Größe und die Kosten von Wechselstromfiltern für HGÜ-Stationen, so dass dieser Aspekt in 5.4 und Anhang C ausführlich behandelt wird.

Der Kunde sollte verstehen, dass es nicht notwendig oder wünschenswert ist, alle in Abschnitt 5 erörterten Verzerrungsgrenzwerte in die Spezifikation aufzunehmen. Einige Kenngrößen sind nur in bestimmten Situationen anwendbar; andere stellen alternative Ansätze zur Definition von Verzerrungen dar. Der Kunde sollte die Anforderungen seines speziellen Systems sorgfältig abwägen und diejenigen Verzerrungskenngrößen und Grenzwerte auswählen, die für seine Anforderungen relevant sind.

Weitere Einzelheiten zur Auswahl geeigneter Grenzwerte sind in IEC 62001-2 [9] und CIGRE Technical Brochure 754 [1] sowie in IEC TR 62001-5 [2] zu finden.

## 5.2 Spannungsverzerrung

### 5.2.1 Allgemeines

Die Hauptanforderungen an die Spezifikation des Betriebsverhaltens von Wechselstromfiltern beziehen sich im Allgemeinen auf die zulässige Spannungsverzerrung, die eine direkt messbare Größe am Verbindungspunkt ist. Durch die Begrenzung der Spannungsverzerrung sollen auch die von den Stromrichtern in das Wechselstromsystem eingespeisten Oberschwingungsströme und die daraus resultierenden Spannungen an anderen Stellen auf ein Niveau begrenzt werden, das dem Versorgungsunternehmen und allen angeschlossenen Kunden des Wechselstromnetzes eine hohe Versorgungsqualität sichert (auf die Gültigkeit dieses Ansatzes wird weiter unten eingegangen).

In Unterabschnitt 5.2 werden die gebräuchlichsten Kenngrößen zur Kontrolle der Spannungsverzerrung beschrieben und einige Hinweise für die Festlegung geeigneter Grenzwerte gegeben.

Unterabschnitt 5.2 fokussiert auf HGÜ mit netzgeführten Stromrichtern (LCC), obwohl viele der Konzepte auch auf Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) – HGÜ anwendbar sind. Die CIGRE Technical Brochure 754 [1] und die IEC TR 62001-5 [2] enthalten viel mehr Details speziell für Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) – HGÜ.

### 5.2.2 Definitionen der Kriterien für das Betriebsverhalten

Die einzelne Oberschwingungsverzerrung  $D_n$  (in %), wird wie folgt berechnet:

$$D_n = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Dabei ist

$U_1$  die Nenn-Grundfrequenzsystemspannung zwischen Außenleiter und Neutraleiter (RMS) und

$U_n$  die an der betrachteten Sammelschiene auftretende Oberschwingungsspannung  $n$ -ter Ordnung zwischen Außenleiter und Neutraleiter.

Die gesamte Oberschwingungsverzerrung THD (auch  $D_{\text{eff}}$  oder Klirrfaktor genannt) wird wie folgt berechnet:

$$D_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=2}^N D_n^2} \quad (2)$$

Dabei ist

$N$  die höchste Oberschwingungsordnung, die berücksichtigt wird.

Die gesamte rechnerische Oberschwingungsverzerrung  $D$  wird wie folgt berechnet:

$$D = \sum_{n=2}^N D_n \quad (3)$$

### 5.2.3 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die einzelne ( $D_n$ ) und die gesamte Oberschwingungsverzerrung (THD) sind allgemein anerkannte Kenngrößen für die Spannungsverzerrung in Wechselstromnetzen, während die gesamte rechnerische Oberschwingungsverzerrung ( $D$ ) umstritten ist, auch wenn sie in einer Reihe von HGÜ-Systemen [10] [11] anstelle der gesamten Oberschwingungsverzerrung (THD) oder zusätzlich zu dieser verwendet wurde. Die gesamte Oberschwingungsverzerrung (THD) entspricht der Leistung der Oberschwingungen und steht daher in engerem Zusammenhang mit der Schwere der Störung im Hinblick auf die Erwärmungseffekte. Die gesamte rechnerisch addierte Verzerrung ( $D$ ) entspricht keiner physikalisch nachweisbaren Störung, obwohl sie ein Indikator für die maximal mögliche Abweichung der Kurvenform von einer Sinuskurve und für die maximal möglichen Spitzenwerte der Oberschwingungsspannung ist. Außerdem ist die gesamte Oberschwingungsverzerrung (THD) in den Gremien der IEC anerkannt (siehe IEC TR 61000-3-6 [6] und IEEE Std 519<sup>TM</sup> [11]) und wird folglich in diesem Dokument als Kriterium empfohlen.

Die in der Definition der Oberschwingungsverzerrung verwendeten Oberschwingungsspannungen sind im Allgemeinen die Spannungen mit dem höchsten Wert in jeder Phase. Dies ist bei Verwendung der konventionellen Berechnungsmethode kein Problem, da davon ausgegangen wird, dass die von HGÜ-Stromrichtern erzeugten Oberschwingungen entweder ein Mit- oder ein Gegensystem bilden und somit in allen Phasen gleich sind, und die Impedanz des Wechselstromsystems als symmetrisch angenommen wird. Die Erzeugung von Nullstrom durch HGÜ-Stromrichter ist sehr gering, und es gibt keine Berichte über Probleme im Zusammenhang mit der Ursache von Oberschwingungsspannungen im Nullsystem. In realen Systemen sind die Beträge der Oberschwingungsspannungen in den drei Phasen jedoch aufgrund von Asymmetrien im Netz und nicht idealen Bedingungen für die Oberschwingungserzeugung unterschiedlich. Die Analyse des Oberschwingungsverhaltens unter Verwendung eines dreiphasigen Modells von Übertragungsleitungen würde im Allgemeinen Unterschiede zwischen den dreiphasigen Verzerrungsparametern zeigen.

Die maximal berücksichtigte Oberschwingungsordnung  $N$  wird normalerweise auf 49 oder 50 festgelegt, da der Betrag des von HGÜ-Systemen erzeugten Stroms mit der Frequenz abnimmt und die auf die unteren Spannungsebenen übertragenen Oberschwingungsspannungen aufgrund der Eigenschaften von Leistungstransformatoren und Lasten bei diesen Frequenzen im Allgemeinen mit zunehmender Frequenz sehr niedrig werden.

Einige Kunden ziehen es vor, in der Gleichung für die Definition der Spannungsverzerrung den ungünstigsten Wert aus dem Bereich der Systembetriebsspannungen als Spannungsreferenz ( $U_1$ ) zu verwenden und nicht die Nennspannung des Systems (d. h. den Spannungswert, der mit der in der Berechnung verwendeten Oberschwingungserzeugung des Stromrichters übereinstimmt und für den die höchste prozentuale Verzerrung

berechnet wird; dies ist im Allgemeinen die Mindestspannung aus dem geltenden Bereich). Das Argument für diesen Ansatz ist, dass er die tatsächliche prozentuale Verzerrung, die in der Realität auftritt, besser wiedergibt. Unabhängig davon, welche Referenzspannung für die Definition der Spannungsverzerrung verwendet werden soll, muss sie in der Spezifikation eindeutig angegeben werden, um unterschiedliche Interpretationen durch verschiedene Anbieter zu vermeiden, und weil sie das Filterdesign spürbar beeinflussen kann.

Siehe auch die Erläuterung zu den Systembedingungen in 8.1.6, unter denen die gesamte Oberschwingungsverzerrung berechnet werden sollte. Der Bereich der Netzwechselspannungen, in dem die Verzerrungskriterien erfüllt werden sollen, muss ebenfalls klar definiert werden.

## 5.2.4 Festlegung von Grenzwerten

### 5.2.4.1 Allgemeines

Die meisten großen Energieversorgungsunternehmen haben ihre eigenen Oberschwingungsnormen, einschließlich Regeln zur Kontrolle der Oberschwingungsaussendung von einzelnen störenden Lasten. Im Allgemeinen wird die Festlegung dieser Normen in erheblichem Maße von den Erfahrungen mit einer Reihe von Oberschwingungsproblemen und den zu deren Lösung ergriffenen Maßnahmen beeinflusst. Sie sind daher in der Regel empirisch und konservativ, da sie selten auf einer detaillierten Untersuchung und dem Verständnis des Systemverhaltens beruhen. Wenn eine große HGÜ-Anlage geplant ist, sollte eine individuelle Analyse durchgeführt werden, um Verzerrungsgrenzwerte zu erhalten, die eine rationalere Grundlage haben und sich auf die besonderen Umstände des betreffenden HGÜ-Systems beziehen.

### 5.2.4.2 Bestimmung von Grenzwerten ohne detaillierte Untersuchungen

Eine Möglichkeit, die Grenzwerte für die Spannungsverzerrung zu bestimmen, besteht darin, sich auf bestehende Systeme zu beziehen, bei denen ein akzeptables Betriebsverhalten festgestellt wurde. Die folgenden Bereiche der spezifizierten Grenzwerte wurden aus CIGRE-Untersuchungen [10] [11] über Wechselstrom-OberschwingungsfILTER für zahlreiche HGÜ-Systeme in verschiedenen Ländern entnommen:

- a) die spezifizierten Grenzwerte für  $D_n$  liegen im Bereich von 0,5 % bis 1,5 % (in der Regel 1 %);
- b) die spezifizierten Grenzwerte für THD liegen im Bereich von 1 % bis 4 % (kein typischer Wert);
- c) die spezifizierten Grenzwerte für  $D$  liegen im Bereich von 2 % bis 4 % (in der Regel 4 %).

Diese Zahlen beziehen sich auf die durch den HGÜ-Stromrichter verursachte Verzerrung und schließen andere bereits vorhandene Verzerrungen nicht ein. Außerdem beziehen sie sich im Allgemeinen auf die ungünstigsten normalen Betriebsbedingungen des HGÜ-Systems im Vergleich zu den extremeren Bedingungen, die die Nennwerte der Komponenten bestimmen. Bei der Betrachtung solcher Werte, wie sie in früheren Projekten verwendet wurden, ist es auch wichtig, die Wechselstrom-Netzdarstellung zu berücksichtigen, die für die Berechnung dieser Kenngrößen festgelegt wurde.

Wenn ein Kunde

- 1) den Zeitplan für die Beschaffung verkürzen möchte,
- 2) nicht über die geeigneten Berechnungsprogramme oder Wechselstromsystemdaten verfügt oder
- 3) keine schwerwiegenden Folgen der Oberschwingungsverzerrung erwartet,

dann kann der Kunde Verzerrungsgrenzwerte festlegen, die auf solchen Richtwerten beruhen, die aus den Erfahrungen mit bestehenden Systemen stammen. Wechselstromfilteranlagen, die nach diesen Grenzwerten ausgelegt sind, haben im Allgemeinen zufriedenstellend funktioniert. Ohne detaillierte Studien muss jedoch ein technisches Urteilsvermögen angewandt werden, um die für andere Projekte festgelegten Grenzwerte an die spezifischen Merkmale des Wechselstromsystems anzupassen, an das das HGÜ-System angeschlossen werden soll. Daher sollten bei der Festlegung der Leistungsanforderungen für ein bestimmtes HGÜ-System auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungen mit bestehenden Systemen die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- lokale Vorschriften über Oberschwingungsgrenzen;
- Spannungsebenen (für höhere Spannungsebenen werden in der Regel strengere Grenzwerte empfohlen);
- Nähe von Lastbereichen;

- Nähe von Generatoren;
- andere Oberschwingungsquellen in der Umgebung;
- Vorhandene Oberschwingungsverzerrung;
- Netzstruktur (lange Leitungen und Kondensatorbatterien können zu einer Verstärkung der Oberschwingungsspannung an abgelegenen Orten führen, große vermaschte Netze werden wahrscheinlich einen geringeren Oberschwingungspegel an die Lastbereiche übertragen usw.).

Die CIGRE-Studien [10] [11] enthalten viele Einzelheiten über die bestehenden Anlagen, die für diese Aufgabe hilfreich sein können. Die angenommenen Grenzwerte sollten eher konservativ sein, um die Folgen übermäßiger Verzerrungen zu vermeiden, die, sollten sie auftreten, letztlich zu Einschränkungen des Betriebs der HGÜ-Übertragung führen können. Es besteht jedoch auch die Gefahr, dass dieser Ansatz zu einer Auslegung führt, die in der Praxis unverträglich teuer ist.

Angesichts dessen wird vorgeschlagen, die Wirtschaftlichkeit des Filterentwurfs zu untersuchen, indem man einen alternativen Filterentwurf vorschlägt, der z. B. auf dem 1,5- oder 2-fachen der Grundanforderungen basiert. Die Kostenreduzierung, sofern sie deutlich ausfällt, ist ein Hinweis auf die Notwendigkeit, vor der Wahl eines endgültigen Entwurfs detailliertere Untersuchungen durchzuführen.

Die Leistungsbeschreibung könnte den Anbietern auch die Möglichkeit geben, (neben den Hauptvorschlägen) alternative Entwürfe vorzuschlagen, die zwar unter Umständen die vorgegebenen Grenzwerte überschreiten, aber wesentlich einfachere und wirtschaftlichere Filter bieten.

#### 5.2.4.3 Bestimmung von Grenzwerten mit detaillierten Untersuchungen

Die Bestimmung geeigneter Verzerrungsgrenzwerte mit Hilfe detaillierter Untersuchungen erfordert mehr Arbeit in der Phase der Erstellung der Leistungsbeschreibung, führt aber wahrscheinlich zu einem kostengünstigeren Entwurf des Wechselstromfilters mit einer optimalen Filterlösung in Bezug auf die Oberschwingungseigenschaften des Wechselstromsystems und vermeidet ein unnötig komplexes Filterkonzept, das die Auslegung und den Betrieb des HGÜ-Systems übermäßig einschränken könnte. Die Methode kann angewandt werden, um entweder die von IEEE oder IEC empfohlenen Grenzwerte einzuhalten. Die CIGRE hat ein Fachdokument über die Begrenzung der Oberschwingungsverzerrung für Mittel- und Hochspannungsnetze [12] veröffentlicht, das auf der elektromagnetischen Verträglichkeit basiert.

Ein Ziel der Begrenzung der Oberschwingungsaussendung in Hoch- und Höchstspannungsnetzen ist es, die Störpegel in den Niederspannungsnetzen unter den Verträglichkeitsgrenzen (mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 %) zu halten. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Versorgungsunternehmen die Aussendungsgrenzwerte der Betriebsmittel in den verschiedenen Teilen des Wechselstromnetzes auf die wirtschaftlichste Weise koordinieren. Das Versorgungsunternehmen muss daher alle möglichen Ausendungsquellen, sowohl bestehende als auch künftige, und deren frequenzabhängigen Übertragungsfaktoren auf die anderen Spannungsebenen in Betracht ziehen. Es sollte auch die künftigen Ausbaustufen des Wechselstromnetzes berücksichtigen.

Im Allgemeinen wird ein umfangreiches Programm von Oberschwingungsmessungen durchgeführt, um Daten für diese Aufgabe zu sammeln. Ein solches Programm sollte zur Festlegung geeigneter Planungsstufen für das Hoch- und Höchstspannungsnetz und zu Regeln für den Anschluss störender Lasten führen, die allgemein für das gesamte Stromversorgungsnetz gelten.

Eine solche Untersuchung bildet die Grundlage für die Festlegung rationeller Oberschwingungsaussendungsgrenzwerte für den Anschluss von HGÜ-Systemen. Bei derart großen Störlasten empfiehlt es sich, zusätzliche Untersuchungen durchzuführen, um die Planungsstufen an die besonderen Gegebenheiten am Verbindungspunkt des Netzes anzupassen. Die folgenden Untersuchungen werden empfohlen.

- Die Bestimmung (durch Berechnung) des Verhältnisses zwischen der Oberschwingungsspannung am Verbindungspunkt und der Oberschwingungsspannung an den wichtigsten Hoch-, Mittel- oder Niederspannungsstationen in der Umgebung. Dies sollte über den gesamten betrachteten Frequenzbereich und für alle zu erwartenden normalen Netzkonfigurationen und Belastungsstufen durchgeführt werden. Die Tiefe des Eindringens von Oberschwingungen in das Netz ist wahrscheinlich frequenzabhängig, wie in Absatz 2 dieses Unterabschnitts erläutert.

- Die Messung der tatsächlichen Oberschwingungswerte am Verbindungspunkt und an den wichtigsten Hoch-, Mittel- oder Niederspannungsschaltanlagen in der Umgebung (siehe 5.2.5 für weitere Einzelheiten).

Die Ergebnisse sollten nach den allgemeinen Abstimmungsgrundsätzen analysiert werden, um geeignete Emissionsgrenzwerte festzulegen.

Eine solche Bewertung der Quellen von Oberschwingungsaussendungen und eine Analyse des Netzes zur Festlegung geeigneter Planungsstufen kann bei einem großen vermaschten Netz einen enormen Arbeitsaufwand erfordern, und darüber hinaus ist es schwierig, für die künftige Einbindung von Oberschwingungsquellen und die Entwicklung des Netzes zu planen. Wenn das Versorgungsunternehmen noch keine Normen und Verfahren entwickelt hat oder keine detaillierten Kenntnisse über die Oberschwingungseigenschaften des Netzes vorhanden sind, kann die in [12] beschriebene Methode angewandt werden.

In [11] wird eine vereinfachte Methode zur Bestimmung der Aussendungsgrenzwerte einer bestimmten HGÜ-Anlage für Hoch- und Höchstspannungsnetze vorgestellt. Es werden einfache Regeln zur Aufteilung der zulässigen Oberschwingungsaussendung auf die verschiedenen Nutzer des Stromnetzes vorgeschlagen. Bei den meisten großen HGÜ-Anlagen werden die zulässigen Grenzwerte entsprechend der Bemessungsleistung (MVA) der Anlage und der Netzversorgungsfähigkeit am Punkt der gemeinsamen Einspeisung aufgeteilt.

Die in [6] [12] beschriebene Methode berücksichtigt das Vorhandensein wichtiger Störeinrichtungen in der Nähe der betrachteten Unterstation und liefert von der Oberschwingungsordnung abhängige Summenfaktoren für die Berechnung der gesamten Oberschwingungswerte. Außerdem werden einige Leitlinien für die Anwendung in praktischen Situationen gegeben (bereits vorhandener Pegel, unrealistisch niedrige Aussendungsgrenzwerte usw.). Bei den Untersuchungen des Oberschwingungslastflusses sollte auch versucht werden, Verstärkungs- oder Resonanzsituationen zu ermitteln, die Probleme mit Oberschwingungsspannungen aus der Ferne verursachen können, die an der HGÜ-Verbindungssammelschiene nicht erkennbar sind. Diese Fernwirkungen werden durch Anwendung geeigneter Faktoren für die jeweiligen Oberschwingungen in den einzelnen Aussendungsgrenzwerten für die HGÜ-Verbindungssammelschiene kontrolliert.

Dabei ist zu beachten, dass die so festgelegten Grenzwerte mit den besonderen Netzbedingungen zusammenhängen, was bei der Auslegung der Wechselstromfilter berücksichtigt werden sollte. So kann beispielsweise ein strengerer Grenzwert, der zur Beherrschung eines Verstärkungsproblems festgelegt wurde, einem begrenzten Teil der gesamten Netzbereichsimpedanzkurve entsprechen, die am Einspeisepunkt berechnet wird. Ähnlich verhält es sich, wenn zwei wichtige Oberschwingungsquellen in der Nähe sind: Der Aussendungsgrenzwert wird zwischen ihnen aufgeteilt, aber die Impedanzkurve für jede sollte davon ausgehen, dass die Filteranlage der anderen vorhanden ist. Wenn diese Aspekte von Bedeutung sind, können den Anbietern mehrere Aussendungsgrenzwerte zur Verfügung gestellt werden, die an verschiedene Oberschwingungsimpedanzorte gekoppelt sind.

Der folgende alternative Ansatz wäre grundsätzlich möglich. Bei Netzen mittlerer Größe könnte der Kunde in Erwägung ziehen, den Anbietern den vollständigen Datensatz des Stromnetzes zur Verfügung zu stellen. Der Grenzwert für den Oberschwingungsbeitrag des HGÜ-Stromrichters könnte dann an allen verschiedenen Mittel- oder Niederspannungssammelschienen individuell festgelegt werden. Bei diesem Ansatz stellt der Kunde alle erforderlichen Daten für die Filteroptimierung zur Verfügung: Wechselstromsystemkonfigurationen, Leitungssystemdaten, dezentral installierte Filter, Erdwiderstand, frequenzabhängige Ersatzschaltbilder an den Endknoten, Toleranzen, usw. Die Daten sollten auch die zukünftige Entwicklung des Netzes berücksichtigen. Dieser Ansatz würde den Anbietern mehr Arbeit abverlangen, und sie müssten möglicherweise zusätzliche Rechenprogramme entwickeln, aber er würde die oben erwähnten Unstimmigkeiten vermeiden. Es würde auch einen beträchtlichen Aufwand für den Kunden bedeuten, um alle erforderlichen Daten vorzubereiten, und die für das Ausschreibungsverfahren erforderliche Zeit verlängern. Wenn der Anbieter nicht genau festlegt, wie jede Komponente des Netzes modelliert werden soll, könnte jeder Anbieter unterschiedliche Oberschwingungsimpedanzen ableiten, je nachdem, welche Darstellung für die Netzkomponenten, insbesondere für Lasten, Transformatoren und Übertragungsleitungen, verwendet wird.

### 5.2.5 Vorhandene Oberschwingungswerte

Messungen der aktuell vorhandenen Oberschwingungswerte sind wichtig, um die Simulationsuntersuchungen zu ergänzen. Sie werden häufig aus folgenden Gründen benötigt:

- zur Beurteilung der aktuell vorhandenen Oberschwingungswerte, einschließlich der statistischen Merkmale;
- um die Eigenschaften der Oberschwingungsquellen zu bestimmen;
- um Simulationsmodelle zu überprüfen.

Oberschwingungsmessungen im Nahbereich der HGÜ-Systeminstallation liefern die gesamten Oberschwingungswerte an, die von allen Quellen erzeugt werden, sowohl innerhalb des Hoch- und Höchstspannungsnetzes als auch aus den Mittel- und Niederspannungsnetzen. Die Analyse der Messergebnisse in Kombination mit den Simulationsergebnissen wird hilfreich sein, um die beiden Beiträge abzugrenzen. Die bereits vorhandenen Oberschwingungsbeiträge aller individuell störenden Lasten in den Nieder- und Mittelspannungsnetzen und anderer unbekannter Quellen lassen sich sonst in Wirklichkeit nicht ohne weiteres ermitteln.

Es kann auch sinnvoll sein, die Messungen auf bestimmte Betriebsbedingungen auszurichten, wenn diese die Oberschwingungswerte beeinflussen können. So kann beispielsweise eine hohe Betriebsspannung den durch die Sättigung von Transformatoren verursachten Oberschwingungsbeitrag erhöhen. Es gibt auch Hinweise darauf, dass durch Korona auf Höchstspannungs-Wechselstrom-Übertragungsleitungen ein erheblicher Anteil der dritten Stromoberschwingung erzeugt werden kann.

Idealerweise sollten die Messungen die Oberschwingungswerte und die Quellenimpedanz liefern, um die Oberschwingungsquellen angemessen zu erfassen, da die Einführung einer großen Wechselstromfilteranlage wahrscheinlich die Oberschwingungswerte in ihrer Umgebung beeinflussen wird. Es ist anzumerken, dass die neue Wechselstromfilteranlage für das Stromversorgungsnetz von Vorteil sein könnte, und das Versorgungsunternehmen könnte sogar in Erwägung ziehen, das Betriebsverhalten der Wechselstromfilter am HGÜ-Stromrichter mit dem zusätzlichen Ziel zu spezifizieren, den bereits bestehenden Oberschwingungszustand des Stromversorgungsnetzes bei einer oder mehreren bestimmte/n Oberschwingungsordnung/en zu verbessern.

Als Alternative zur Angabe der Höhe der bereits vorhandenen Oberschwingungen haben einige Versorgungsunternehmen in ihren Spezifikationen gefordert, dass die berechneten Oberschwingungen, die vom HGÜ-Stromrichter erzeugt werden, um eine Marge von z. B. 10 % erhöht werden sollten. Dies ist ein sehr willkürlicher Ansatz, der zwar einen gewissen Spielraum für bereits vorhandene Oberschwingungen zulässt, aber wahrscheinlich nicht der Realität entspricht.

### 5.2.6 Gelockerte Grenzwerte für kurzzeitige und unregelmäßige Bedingungen

Für ungewöhnliche Bedingungen während kurzer Zeiträume (weniger als 1 h) empfiehlt IEEE Std 519 [11], dass die Grenzwerte um 50 % überschritten werden dürfen.

Die IEC TR 61000-3-6 [6] geht auf diese Frage nicht ein. Sie erwähnt zwar, dass bei der Bewertung der Oberschwingungseinspeisung durch störende Lasten die ungünstigsten normalen Betriebsbedingungen berücksichtigt werden sollten, einschließlich solcher mit Ausfällen, die für einen beträchtlichen Teil der Zeit gelten können, sie enthält jedoch keine Grenzwerte für kurzzeitige und unregelmäßige Bedingungen, bei denen die Oberschwingungseinspeisung offensichtlich kontrolliert werden sollte, z. B. unter dem Aspekt der Betriebsmittelauslegung.

Wenn solche kurzzeitigen und unregelmäßigen Betriebsbedingungen für das HGÜ-System möglich sind, sollten gelockerte Grenzwerte festgelegt werden, wie sie z. B. im IEEE-Standard 519 [11] vorgeschlagen werden, wenn dies nicht zu einem Verstoß gegen die geltenden gesetzlichen Grenzwerte führt. Diese können mit spezifischen Oberschwingungsimpedanzorte verbunden sein.

### 5.2.7 Behandlung von Zwischenharmonischen Frequenzen

Im Falle einer HGÜ-Verbindung, die zwei Wechselstromsysteme mit unterschiedlichen Grundfrequenzen verbindet, und insbesondere, wenn es sich um eine Kurzkupplungs-Station handelt, können beide Stromrichter auf ihren Wechselstromseiten Ströme mit anderen Frequenzen als Oberschwingungen der Grundwelle erzeugen (die Grundwellenfrequenzen können entweder nominell unterschiedlich sein, z. B. 50 Hz und 60 Hz, oder sie können nominell identisch sein, aber zeitweise um bis zu 1 Hz oder 2 Hz abweichen)

Diese zusätzlich erzeugte Störung liegt bei Frequenzen, die Oberschwingungen der Grundfrequenz des entfernten Wechselstromsystems sind, und wird durch die in IEC TR 62001-3 [13] beschriebenen Mechanismen über die Verbindung übertragen. Diese Übertragung kann als Oberschwingungsdurchdringung oder Übergang von einem Wechselstromsystem in das andere betrachtet werden. Da die Frequenzen dieser übertragenen Komponenten zwischen den eigenen Oberschwingungsfrequenzen des Stromrichters liegen, werden sie oft als „Zwischenharmonische“ bezeichnet. Manchmal wird auch der Begriff „nicht-ganzzahlige Oberschwingungen“ verwendet.

Der Betrag dieser Zwischenharmonischen ist im Vergleich zu den vom lokalen Wandler erzeugten charakteristischen Oberschwingungen gering, kann aber dennoch bedeutend sein, zumal für sie im Allgemeinen keine spezifische Filterung vorgesehen ist, abgesehen von der breitbandigen Wirkung von Hochpasszweigen.

Zwischenharmonische Frequenzen können zu besonderen Problemen führen, die es bei echten Oberschwingungen nicht gibt, wie z. B. Störungen bei Rundsteuersystemen und Lichtflimmern aufgrund der niederfrequenten Amplitudenmodulation, die durch die Überlagerung einer Oberschwingungsfrequenz mit einer benachbarten Zwischenharmonischen verursacht wird, z. B. ein 10-Hz-Flimmern aufgrund der Wechselwirkung einer 13. Oberschwingung von 650 Hz eines 50-Hz-Systems mit einer 11. Oberschwingung von 660 Hz eines 60-Hz-Systems.

Von Interesse ist hier, wie die Störungseffekte, die sich aus solchen Zwischenharmonischen ergeben, in den Kriterien des Betriebsverhaltens berücksichtigt werden sollten. Wenn sich die verschiedenen Gleichungen zur Definition des Oberschwingungsverhaltens, wie sie in 5.2.2 angegeben sind, speziell auf „Oberschwingungen“ beziehen, könnte eine formale Betrachtung alle anderen Frequenzen ausschließen. Ein Auftragnehmer könnte somit die Auswirkungen der Zwischenharmonischen bei seiner Berechnung (und anschließenden Messung) der Parameter des Betriebsverhaltens ignorieren.

Es kann zu vertraglichen Konflikten kommen, wenn in der Leistungsbeschreibung (wie in der Vergangenheit geschehen) festgelegt wird, dass der Auftragnehmer diese Zwischenharmonischen in seinem Entwurf berücksichtigt, die Kriterien für das Betriebsverhalten jedoch widersprüchlich als „Oberschwingungen 1 bis 49“ oder ähnlich definiert werden.

Solange dies nicht ausdrücklich geklärt ist, könnte es auch zu Meinungsverschiedenheiten zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer darüber kommen, ob der Begriff „Oberschwingungen“ die so genannten „nicht ganzzahligen Oberschwingungen“ einschließen sollte, da der Begriff „Oberschwingungen“ klassischerweise ganzzahlige Vielfache der Grundwelle impliziert und z. B. in IEEE Std 519 [11] als solche definiert sind.

In IEC TR 61000-2-1 [14] werden Quellen von Zwischenharmonischen und einige mögliche Auswirkungen erörtert. IEC TR 61000-3-6 [6] befasst sich mit den Auswirkungen von Zwischenharmonischen auf Niederspannungssysteme und weist auf die Notwendigkeit spezifischer Grenzwerte aufgrund möglicher Störungen von Rundsteuersystemen, Beleuchtungsflimmern und anderer Probleme hin. Sie empfiehlt einen Planungswert von 0,2 % für einzelne Zwischenharmonische. Andere geltende Normen oder Richtlinien müssen gegebenenfalls berücksichtigt werden.

Wenn die vorgeschlagene HGÜ-Verbindung zwei Systeme mit nominell oder potenziell unterschiedlichen Frequenzen verbindet, sollte der Kunde daher die möglichen Auswirkungen der Zwischenharmonischen Störung berücksichtigen. Dies kann durch eine Änderung der verschiedenen festgelegten Definitionen der Kriterien des Betriebsverhaltens von Oberschwingungen geschehen, um bedeutende, vom Stromrichter erzeugte Zwischenharmonische zu erfassen, oder durch einen spezifischen Grenzwert für Zwischenharmonische, der möglicherweise mit der Verhinderung von Interferenzen mit Rundsteuerungsanlagen oder mit der Kontrolle von Flicker verbunden sein muss.

### 5.3 Störungsgrenzwerte für die Betriebsmittel des Hoch- und Höchstspannungsnetzes

#### 5.3.1 Betriebsmittel des Hochspannungswechselstromübertragungsnetzes

Die Festlegung von Oberschwingungsaussendungsgrenzwerten wie in 5.2 beschrieben, um die Kompatibilitätsanforderungen im Stromversorgungsnetz zu erfüllen, gewährleistet in der Regel auch einen sicheren Oberschwingungswert für die Betriebsmittel des Hoch- und Höchstspannungsversorgungsnetzes. Wenn jedoch andernfalls sehr großzügige Grenzwerte zulässig sind, z. B. aufgrund der räumlichen Trennung der HGÜ-Betriebsmittel im Stromversorgungsnetz, muss der tatsächliche Grenzwert für die Oberschwingungsaussendung möglicherweise im Hinblick auf die empfindlichen Netzbetriebsmittel wie Parallelkondensatoren, Kabel und Leistungstransformatoren festgelegt werden. Kabel und Kondensatoren können an Systemresonanzen beteiligt sein, die zu hohen dielektrischen Spannungen oder Überlastungen führen. Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Betriebsmittel sollten einschlägige Normen herangezogen werden. Insbesondere ist die Norm IEEE C57.12.00 [15] zu beachten, die den maximal zulässigen Effektivwert (RSS, en: root-sum-square) der 3., 5. oder 7. Oberschwingungen an Sammelschienen definiert, an die Transformatoren angeschlossen sind.

#### 5.3.2 Oberschwingungsströme in Synchronmaschinen

Die charakteristischen und nicht charakteristischen Oberschwingungsströme, die in die Statoren von Synchronmaschinen (Generatoren und Synchronkondensatoren) fließen, die in der Nähe von Stromrichterstationen installiert sind, können zu einer Überhitzung von Stator und Rotor und zu Schwingungen führen, die diese beschädigen können. Um solche Schäden zu vermeiden, sollten diese Oberschwingungsströme nicht höher sein als die vom Maschinenhersteller angegebenen Grenzwerte. Es ist daher erforderlich, dass die Filterspezifikation neben den anderen Anforderungen an das Betriebsverhalten eindeutig vorschreibt, dass das Filter so ausgelegt sein muss, dass es diese Ströme sicher beherrscht.

Eine Möglichkeit, die Filteranforderungen zur Kontrolle der Überhitzungsgefahr zu spezifizieren, besteht darin, zu fordern, dass die entsprechende Gegenphasenkomponente  $I_{2eq}$  (wie in [9] definiert) des in der Maschine fließenden Oberschwingungsstroms zusammen mit der erwarteten Höhe des tatsächlichen Gegenstroms geringer ist als die Gegenphasenkomponente zur Betriebsfähigkeit der Maschine, wie sie in IEC 60034-1 [16] oder ähnlichen Normen festgelegt ist.

Der Anbieter sollte alle Werte der Oberschwingungsströme dem Kunden mitteilen, die bei der Berechnung des  $I_{2eq}$  berücksichtigt wurden. Während der Angebotsanalyse sollte der Kunde diese Werte mit dem Maschinenhersteller besprechen, um ihre Angemessenheit hinsichtlich der Erwärmung von Stator und Rotor zu überprüfen. Eventuell weitere notwendige Einschränkungen sollten mit den Anbietern besprochen werden.

Die Oberschwingungsströme, die in die Statorwicklung der Synchronmaschine fließen, induzieren ein pulsierendes Luftspaltmoment, das die rotierenden Teile des Turbinengeneratorsatzes zu Schwingungen anregt. Bei Dampfturbinengeneratoren sollte besonders auf den Betrag der Ströme der 5. Oberschwingung in Gegensystem und der 7. Oberschwingung in Mitsystem geachtet werden, da sie ein pulsierendes Drehmoment auf dem Rotor bei der 6. Oberschwingung hervorrufen, das mit einer mechanischen Resonanzfrequenz zusammenfallen kann, bei der es zu Torsionsschwingungen der Rotorelemente und zur Durchbiegung der Turbinenschaufeln kommt. Ermüdung der Turbinenwelle und der Turbinenschaufeln kann die Folge sein. Wenn eine Begrenzung erforderlich ist, um diese Oberschwingungsströme durch das Wechselstromfilter zu reduzieren, sollte die Spezifikation den maximalen Grenzwert für diese Oberschwingungsströme oder andere vom Maschinenhersteller angegebene Oberschwingungsströme angeben, die bei der Auslegung des Filters zu berücksichtigen sind (IEC 60919-3 [5]).

Damit der Anbieter die in den Generatoren fließenden Oberschwingungsströme berechnen kann, sollte die Spezifikation die erforderlichen Daten enthalten, z. B. Modelle der Systemkonfiguration, frequenzabhängige Reaktanzen von Generatoren und Transformatoren, zu berücksichtigende Betriebsbedingungen usw.

Eine andere Möglichkeit, die Filteranforderungen unter dem Gesichtspunkt der Erwärmung und der Schwingungen der Synchronmaschine zu spezifizieren, besteht darin, dass der Kunde eine Untersuchung durchführt, um die maximal zulässige Oberschwingungsspannung bzw. den maximal zulässigen Oberschwingungsstrom an der Stromrichtersammelschiene zu bestimmen, die die schlechtesten Generator-Kriterien erfüllt. Bei dieser Methode entfällt die Notwendigkeit, das gesamte Netz in einem einzigen Leitungsdiagramm darzustellen,

Einzelheiten zu den Betriebsbedingungen und -konfigurationen, die Methode der Modellierung usw. anzugeben. Der Kunde ist dann für diese Berechnungen verantwortlich. Er stellt den Anbietern auch ein Ersatzschaltbild zur Verfügung, das die Generatoren darstellt, oder bezieht sie in die Gesamtnetzimpedanzkurve ein.

### 5.3.3 HGÜ-Anlagen in der Nähe

Ein bestehendes HGÜ-System in der Nähe der neuen HGÜ-Anlage sollte überprüft werden. Ein solches HGÜ-System wurde höchstwahrscheinlich ohne ausreichende Berücksichtigung einer solchen neuen Anlage ausgelegt. Das Aufstellen der neuen HGÜ-Station wird sich erheblich auf die Netzimpedanz der bestehenden Anlage auswirken und stellt eine neue Oberschwingungsquelle dar. In diesem Fall wird der Auslegungsbericht der bestehenden Anlage, einschließlich aller HGÜ-Systemdaten und Auslegungsannahmen, den Anbietern für die neue Anlage zur Verfügung gestellt. Eine Entwurfsvorgabe für das neue Wechselstromfilter besteht darin, dass die Bemessung und das Betriebsverhalten der vorhandenen Wechselstromfilter nicht beeinträchtigt werden dürfen. Die CIGRE Technical Brochure 798 [17] befasst sich eingehend mit diesem Thema.

## 5.4 Telefonstörungen

### 5.4.1 Allgemeines

Störungen der analogen Fernmeldeübertragung (nicht der Glasfaser- oder Digitalübertragung) sind in einigen Gebieten aufgrund der von HGÜ-Systemen erzeugten Oberschwingungsverzerrungen ein Problem. Eine Umfrage [10] hat gezeigt, dass die meisten großen HGÜ-Systeme bis dahin eine Begrenzung der Telefonstörungen erforderten. Der Einfluss von HGÜ-Systemen auf den Betrag von Telefonstörungen wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst, so dass die auferlegten Grenzwerte in der Vergangenheit sehr unterschiedlich waren.

Die Auswirkungen der angegebenen Kenngrößen der Telefonstörungen auf die Komplexität und die Kosten der Wechselstromfilter können erheblich sein. Daher wird eine Analyse der Anforderungen und Grenzwerte für jedes spezifische HGÜ-System empfohlen.

Abschnitt 5.4 gibt einen Überblick über die gebräuchlichsten Kriterien zur Festlegung von Grenzwerten für Telefonstörungen in HGÜ-Systemen, mit typischen Kriterienbereichen, und enthält einige Leitlinien für die Festlegung von Grenzwerten. Eine ausführlichere Behandlung ist in IEC 62001-2 [9] enthalten.

### 5.4.2 Ursachen von Telefonstörungen

Die Verweise [7], [8] geben einen kurzen Überblick über den grundlegenden Mechanismus der Telefonstörung, der zum Verständnis der Empfehlungen in diesem Dokument ausreicht.

### 5.4.3 Definitionen der Kriterien für das Betriebsverhalten

Die Anforderungen an das Betriebsverhalten von Wechselstromfiltern bei Telefonstörungen werden in der Regel durch Faktoren angegeben, die aus den Oberschwingungsspannungen und -strömen mit einer geeigneten Gewichtung berechnet werden. Die Definitionen dieser Größen finden sich in Anhang C.

### 5.4.4 Diskussion

Eine wichtige Einschränkung der Kriterien für die Telefonstörung – Fernsprechstörfaktor (TIF) oder Fernsprechoberschwingungsfaktor (THFF) –, die an der Wechselstromschiene der HGÜ-Station berechnet werden, besteht darin, dass sie sich nicht direkt auf den Einfluss der Telefonstörung beziehen, der durch die verschiedenen Leitungen des Wechselstromnetzes verursacht wird. Tatsächlich steuern diese Oberschwingungsspannungskriterien direkt nur die elektrostatischen Störungen auf den Wechselstromübertragungsleitungen in der Nähe der HGÜ-Unterstation, während der vorherrschende Kopplungsmechanismus im Allgemeinen die elektromagnetischen Störungen sind, die durch die Oberschwingungsstromspeisung verursacht werden.

Obwohl die Steuerung der Fernsprechstörfaktoren der Spannung den Oberschwingungsstrom bis zu einem gewissen Grad begrenzt und starke Verstärkungen vermeidet, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Störungen verringert wird, hängen die in das Netz eingespeisten Oberschwingungsströme auch entscheidend von der Netzimpedanz bei jeder Oberschwingung ab. Daher sollten die Fernsprechstörfaktoren der Spannung nur für eine grobe Abschätzung des Einflusses eines bestimmten HGÜ-Systems auf die Telefonstörung verwendet werden.

Auch die anderen Kriterien wie IT (Produkt aus Effektivstrom und TIF) oder der Ersatzstörstrom  $I_{eq}$ , die auf den Oberschwingungsströmen am Verbindungspunkt des HGÜ-Systems und des Stromversorgungsnetzes basieren, sind nicht unbedingt völlig zufriedenstellend. Sowohl die C-Bewertung (en: C-message) als auch die psophometrische Bewertung und die Kopplungsbewertung geben den Oberschwingungen höherer Ordnung mehr Gewicht, und bei solch hohen Frequenzen kann das Stromprofil entlang der Übertragungsleitungen sehr variabel sein. Ein niedriger Oberschwingungsstrom an einem Ende einer Übertragungsleitung schließt einen hohen Oberschwingungsstrom am anderen Ende nicht aus. Darüber hinaus ist bei einem vermaschten Stromversorgungsnetz oder bei mehreren ankommenden Übertragungsleitungen von verschiedenen Knotenpunkten der Oberschwingungsstromfluss in den Übertragungsleitungen eine komplexe Funktion der Oberschwingungsimpedanz der Netzelemente und der möglichen Netzkonfigurationen [12]. Verstärkungen sind auch an entfernten Standorten möglich. Dieses Problem ist in Anbetracht des betroffenen Frequenzbereichs nicht leicht zu lösen. Die Ableitung von Fernstörpegeln aus einem an der Wechselstromsammelschiene der HGÜ-Station berechneten Grenzwert ist daher problematisch.

Schließlich sind die vom HGÜ-System erzeugten Oberschwingungsströme überwiegend symmetrischer Art. Der Haupteinfluss der Übertragungsleitungen auf die Telefonstörung ergibt sich aus der Umwandlung von symmetrischen Strömen in Restströme (Nullsystem), was hauptsächlich auf die Unsymmetrie der Übertragungsleitungen zurückzuführen ist [8] [18]. Die Wechselwirkungsimpedanz zwischen symmetrischen Systemen und Nullsystemen ist eine Funktion der Asymmetrie der Übertragungsleitung, des Erdwiderstands und der Frequenz. Darüber hinaus werden die in den Übertragungsleitungen fließenden Oberschwingungsströme des Nullsystems durch die Nullimpedanz des Stromversorgungssystems beeinflusst.

Die Auswahl geeigneter Grenzwerte für sämtliche Kenngrößen, die für ein bestimmtes Projekt verwendet werden, hängt stark von der Dichte und Länge der Telefonleitungen in der Einflusszone der Übertragungsleitungen, dem spezifischen Erdwiderstand, dem Abstand zwischen den Strom- und Kommunikationsleitungen, der Art der Kommunikationsleitung und der Störfestigkeit des Telefonsystems ab.

Siehe auch die Diskussion in 8.1.6 über die Systembedingungen, unter denen die Telefonstörparameter berechnet werden sollten.

## 5.4.5 Festlegung von Grenzwerten

### 5.4.5.1 Festlegung von Grenzwerten ohne detaillierte Untersuchungen

Die angemessenen Anforderungen für Telefonstörungen sind im Vergleich zu den Anforderungen in Bezug auf die Spannungsverzerrung von Projekt zu Projekt sehr unterschiedlich. Daher sollte die Bestimmung der Anforderungen des Betriebsverhaltens für ein bestimmtes HGÜ-System auf der Grundlage früherer Erfahrungen mit bestehenden Systemen auf der Grundlage vergleichbarer Anforderungen mit Sorgfalt ausgewählt werden. Die wichtigsten Parameter, die sich auf den Einfluss der Telefonstörungen auswirken und bei einem Vergleich mit früheren HGÜ-Systemen zu berücksichtigen sind, sind

- die Dichte der Telefonleitungen in der Nähe der Wechselstrom-Übertragungsleitungen,
- der spezifische Erdwiderstand entlang der Wechselstrom-Übertragungsleitungen,
- die Länge der Telefonleitungen und der mittlere Abstand zu den Wechselstrom-Übertragungsleitungen,
- die Struktur des Wechselstromnetzes (lange Leitungen und Kondensatorbatterien können zu einer Verstärkung des Oberschwingungsstroms führen, große vermaschte Stromnetze führen wahrscheinlich zu einer Streuung des Stromes, wodurch der Einfluss einzelner Wechselstromübertragungsleitungen verringert wird, usw.), und
- die Art und die Eigenschaften der Kommunikationsleitungen (Kabel und/oder Freileitungen).

Die Struktur der Telefonanlage und die örtlichen Gegebenheiten sind in der Regel die wichtigsten Parameter, die sich auf die Grenzwerte für Telefonstörungen auswirken können.

In Nordamerika beispielsweise sind typische Faktoren, die zu berücksichtigen sind, dass die Teilnehmer ländlicher Gebiete im Allgemeinen entlang der regionalen Hauptverkehrsstraßen liegen, wobei die Bevölkerungsdichte in der Nähe von Dörfern, die von solchen Straßen durchquert werden, zunimmt. Daneben gibt es auch Nebenstraßen, die in der Regel eine geringere Bevölkerungsdichte aufweisen. Die Hochspannungsleitungen durchqueren in der Regel diese ländlichen Gebiete. Die Telefonleitungen sind lang (bis zu 25 km oder mehr), da es nur wenige Teilnehmer gibt.

Lange Telefonleitungen sind aufgrund der stärkeren Kopplung und des niedrigeren Telefonsignalpegels, der zu einer erhöhten Empfindlichkeit des Teilnehmers gegenüber Störungen führt, anfälliger für Telefonstörungen. In hügeligen Gebieten kann der Erdwiderstand sehr hoch sein, was zu einer erhöhten Wechselwirkungsimpedanz führt. Die gemeinsame Nutzung von Masten mit Stromverteilungsleitungen, die ein Erdseil enthalten, kann zu sehr niedrigen effektiven Erdwiderständen führen und so die Abschirmung von Telefonleitungen in Gebieten mit geringem Erdwiderstand verbessern. Es empfiehlt sich daher eine Rücksprache mit der Telefongesellschaft, um sich ein Bild von den jeweiligen Eigenschaften der Telefonstruktur und den örtlichen Gegebenheiten zu machen.

Fernsprechstörfaktor (TIF) und Fernsprechoberschwingungsfaktor (THFF) können als Kriterien für Projekte verwendet werden, für die keine detaillierten Untersuchungen durchgeführt werden, wobei zu bedenken ist, dass diese Kriterien nur eine grobe Schätzung des Einflusses von Telefonstörungen liefern.

Das IT-Kriterium kann ebenfalls verwendet werden, allerdings mit den in 5.4.4 erörterten Vorbehalten bezüglich der Frequenzabhängigkeit. Dies wird in [9] ausführlicher behandelt.

Die IT-Grenzwerte werden in der Regel pro Leitung angegeben, was bei mehreren Wechselstrom-einspeisungen zur HGÜ-Stromrichterstation nicht dasselbe ist wie für die gesamte Station. In den CIGRE-Untersuchungen von HGÜ-Projekten [10] wurden bei den Projekten, die das IT-Kriterium spezifizierten, Grenzwerte zwischen 25 000 und 50 000 für den gesamten Oberschwingungsstrom im Wechselstromnetz festgelegt. In neueren Projekten wurden ebenfalls Werte in diesem Bereich verwendet.

Es wird vorgeschlagen, die Wirtschaftlichkeit des Filterentwurfs zu untersuchen, im Vergleich zu den Kosten alternativer Abhilfemaßnahmen, indem man einen alternativen Filterentwurf vorschlägt, der z. B. auf dem 1,5- oder 2-fachen der Grundanforderungen basiert. Die Kostenreduzierung, sofern sie deutlich ausfällt, ist ein Hinweis auf die Notwendigkeit, vor der Wahl eines endgültigen Entwurfs detailliertere Untersuchungen durchzuführen.

#### 5.4.5.2 Bestimmung der Grenzwerte mit detaillierten Untersuchungen

Bei größeren HGÜ-Projekten oder in Fällen, in denen Telefonstörungen ein wichtiges Problem darstellen könnten, wird dringend empfohlen, eine induktive Abstimmungsuntersuchung durchzuführen. Eine solche Untersuchung wird wahrscheinlich zu einem optimalen Filterentwurf in Bezug auf Telefonstörungen führen, die Gesamtkosten der Installation senken und eine unangenehme Situation im Hinblick auf Beschwerden der Telefongesellschaften vermeiden. Das Verfahren der induktiven Abstimmung wird in 8.5 beschrieben.

Der erste Schritt besteht in der Berechnung eines Bereichs von Ersatzstörströmen, die verschiedene Telefonstörpegel widerspiegeln. Die Auswertung eines solchen Bereichs ermöglicht die Festlegung geeigneter Grenzwerte für den Ersatzstörpegel, bei dem die Mehrkosten für die Verbesserung der Filterung den Zusatzeinsparungen bei der erforderlichen Entstörung der Telefonleitungen entsprechen. Dies erfordert eine vorläufige Schätzung der Kosten für Abhilfemaßnahmen und der Kosten für eine verbesserte Filterung, die von Telefongesellschaften bzw. Herstellern von HGÜ-Systemen eingeholt werden. In der Praxis kann es sich als schwierig erweisen, diese Daten in diesem Stadium zu erhalten. Optionale Auslegungsgrenzwerte, die einen Bereich abdecken, der den verfügbaren Kostenschätzungen entspricht, könnten festgelegt werden, um dem Anbieter bei der Auswahl des optimalen Grenzwertes als Teil des Entwurfs zu helfen.

Ein Ersatzstörstromgrenzwert kann als eine Reihe von  $I_{eq}$ -Werten angegeben werden, die für jede Hoch- oder Höchstspannungsübertragungsleitung in der Nähe des HGÜ-Projekts charakteristisch sind. Bei langen Übertragungsleitungen, bei denen die Dichte der Telefonleitungen entlang der Leitung variiert, kann es sinnvoll sein, den Telefonstörpegel als ein Profil von  $I_{eq}$  entlang der Übertragungsleitung auszudrücken. Der Umfang der für die Untersuchung zu berücksichtigenden Übertragungsleitungen hängt von der Belastung innerhalb des Stromversorgungsnetzes durch Oberschwingungsströme ab, die von der Konfiguration des jeweiligen

Stromversorgungsnetzes abhängt. Daher werden Planungsuntersuchungen empfohlen, um das Ausmaß der Belastung durch Oberschwingungsströme zu ermitteln.

Bei diesem Ansatz muss der Kunde die erforderlichen Daten für die Filteroptimierung bereitstellen: Wechselstromsystemkonfigurationen, Leitungssystemdaten, dezentral installierte Filter, Erdwiderstand, frequenzabhängige Ersatzschaltbilder an den Endknoten (symmetrische Komponenten und Nullkomponenten, falls erforderlich), Anschlussart der Leistungstransformatoren, usw. Bei einem vermaschten System mit vielen Leitungen, kann dies unpraktikabel sein, aber wenn eine HGÜ-Station nur von einer oder vielleicht zwei Wechselstromspeisungen versorgt wird, kann die Verwendung eines äquivalenten Störstromkriteriums die beste Kenngröße für Telefonstörungen sein. Der Ansatz erfordert auch mehr Arbeit für die Anbieter, und sie müssen möglicherweise zusätzliche Rechenprogramme entwickeln.

#### **5.4.6 Vorhandene Oberschwingungswerte**

Zwei verschiedene Quellen von Oberschwingungsstrom können zur Oberschwingungsaussendung aus dem HGÜ-System hinzukommen und zum Gesamtstörpegel in den Telefonleitungen beitragen. Dabei handelt es sich um andere Oberschwingungsstromquellen innerhalb des Hoch- oder Höchstspannungsnetzes und um Oberschwingungsstrom, der in den Verteilungsleitungen fließt. Wie bei der Verzerrung der Oberschwingungsspannung sind Messungen des tatsächlichen Oberschwingungsstroms wichtig, um die Simulationsuntersuchungen zu ergänzen und den Störpegel in den Leitungen zu bewerten. Nach den bisherigen Erfahrungen ist es wahrscheinlicher, dass die von den Verteilungsleitungen ausgehenden Störungen den größeren Beitrag darstellen.

Aus dem in 5.2.4 genannten Grund sollten bei den Messungen im Hoch- oder Höchstspannungsnetz die Auswirkungen berücksichtigt werden, die die Einführung einer großen Wechselstromfilteranlage auf die bereits vorhandenen Oberschwingungsstrompegel haben kann. Die Messungen sollten die Oberschwingungspegel und die Quellenimpedanz liefern, um die Oberschwingungsquellen angemessen zu identifizieren.

Handelt es sich bei einer der vorhandenen Quellen um eine nahe gelegene HGÜ-Anlage, kann eine gemeinsame Untersuchung erforderlich sein, um die Filteranforderungen für beide Anlagen zu prüfen.

#### **5.4.7 Grenzwerte für vorübergehende Bedingungen**

Die Telefongesellschaft kann für vorübergehende Bedingungen einen höheren Störpegel akzeptieren. Dementsprechend sind in den Spezifikationen mehrerer HGÜ-Systeme höhere Telefonstörpegel auf der Gleichstromseite für seltene und kurzzeitige Betriebsarten oder Bedingungen zugelassen. Ein Beispiel für die Praxis ist die Zulassung des Zwei- bis Dreifachen des normalen Pegels in Abhängigkeit von der erwarteten Häufigkeit des Auftretens und der Dauer. Daher sollten gelockerte Grenzwerte festgelegt werden, wenn solche vorübergehenden Bedingungen für das HGÜ-System vorgesehen sind. Beispiele für solche Bedingungen sind

- Kurzzeitige Überlastbedingungen,
- Wechselspannung außerhalb des normalen Dauerbetriebsbereiches,
- Betrieb bei extremer Frequenzabweichung oder Spannungsunsymmetrie,
- unregelmäßige Wechselstromnetz-Konfigurationen,
- Ausfall von Filterzweigen und
- anormale Gleichstrom-Betriebsbedingungen wie hohe Steuerwinkel zur vorübergehenden Blindleistungsregelung oder Betrieb mit reduzierter Spannung.

Solche vorübergehenden Grenzwerte sollten so früh wie möglich mit den Telefongesellschaften vereinbart werden. Einige Telefongesellschaften sind jedoch möglicherweise nicht bereit, selbst bei solch seltenen und vorübergehenden Ereignissen höheren Störpegel zu tolerieren.

### **5.5 Besondere Kriterien**

Die folgenden besonderen Bedingungen sollten bei der Erstellung der Spezifikation ebenfalls berücksichtigt werden. Normalerweise haben sie keinen direkten Einfluss auf die in der Spezifikation angegebenen Grenzwerte oder auf die konsequente Auslegung der WechselspannungsfILTER, da die anderen bereits besprochenen Störungskriterien in der Regel zu einer ausreichenden Oberschwingungsminderung führen, so dass die

folgenden Faktoren kein Problem darstellen. Der Kunde sollte sich jedoch potenzieller Probleme bewusst sein und gegebenenfalls die folgenden Punkte berücksichtigen:

- Sicherheit des Personals durch induzierte Spannung auf Telekommunikationsleitungen;
- Fehlfunktion von Telekommunikationsgeräten (z. B. Telefonklingeln);
- Auswirkungen auf Datenübertragungs- und Eisenbahnsignalanlagen;
- Auswirkungen auf Mess- und Steuereinrichtungen von Wechselstrom-Schutzrelais.

Selbst wenn ein mögliches Risiko besteht, lassen sich diese Probleme in der Regel wirtschaftlicher lösen, wenn an den gestörten Geräten selbst Abhilfemaßnahmen getroffen werden.

## 6 Erzeugung von Oberschwingungen

### 6.1 Allgemeines

Die Auslegung der Wechselstromfilter erfordert die Kenntnis der von den Stromrichtern erzeugten Oberschwingungsströme. Diese Ströme werden vom Auftragnehmer auf der Grundlage seiner Kenntnisse über die Stromrichterbetriebsmittel und deren Wechselwirkung mit den angeschlossenen Wechsel- und Gleichstromsystemen berechnet.

Abschnitt 6 befasst sich mit der Erzeugung von Oberschwingungen von LCC HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Systemen mit netzgeführten Stromrichtern). Weitere Einzelheiten zu VSC HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Systemen mit Spannungszwischenkreis-Stromrichtern) sind in [1] zu finden.

Die in die Spezifikation aufzunehmenden Informationen über die Erzeugung von Oberschwingungen hängen von der umfassenden Aufteilung der Verantwortung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer ab, wie in Abschnitt 4 erläutert. Wenn das Betriebsverhalten der Wechselstromfilter durch Tests vor Ort garantiert werden soll, kann der Auftraggeber die Verantwortung für die Methoden zur Berechnung der erzeugten Oberschwingungen dem Auftragnehmer überlassen. Wenn jedoch die Erfüllung der vertraglichen Anforderungen eines angemessenen Betriebsverhaltens durch Berechnung nachgewiesen werden soll, ist die Berechnungsmethode von entscheidender Bedeutung, und die Anforderungen des Kunden sollten in der Spezifikation klar zum Ausdruck gebracht werden. Wichtige Aspekte, die dabei zu berücksichtigen sind, werden in 6.3 genannt.

In jedem Fall sollte sich der Kunde der verschiedenen technischen Faktoren in diesem Zusammenhang bewusst sein und auf Diskussionen in der Bewertungsphase vorbereitet sein. In Abschnitt 6 werden daher die wichtigen Aspekte genannt, die die Berechnung der Oberschwingungserzeugung beeinflussen.

### 6.2 Erzeugung von Oberschwingungen im Stromrichterbetrieb

#### 6.2.1 Idealisierte Bedingungen

Die Erzeugung von Oberschwingungen lässt sich am besten verstehen, wenn man von einer idealisierten Bedingung ausgeht, bei der es keine Asymmetrien bei den Transformatorimpedanzen oder den Zündwinkeln zwischen den Phasen gibt, der Gleichstrom gleichförmig ist und die Wechselspannung sinusförmig und symmetrisch ist.

Idealisierte Kurvenformen der Phasenströme auf der Wechselstromseite von Stromrichtertransformatoren einer netzgeführten 12-Puls-Brücke sind in Bild 1 dargestellt. Die dargestellten Kurven zeigen den Strom von einem Stern-Stern-Transformator, den Strom aus der Stern-Dreieck-Schaltung und die Summe der beiden Ströme.

Gleichungen für die Berechnung der Oberschwingungen von Stromrichtern sind in den Lehrbüchern und Normen (IEC TR 60146-1-2 [19]) leicht verfügbar. Eine solche Gleichung ist in Anhang B angegeben.

Die Fourier-Analyse des Oberschwingungsanteils der idealisierten Stern-Stern- und Stern-Dreieck-Kurvenformen unter Berücksichtigung aller drei Phasen zeigt, dass

- nur Oberschwingungen  $5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots 6k \pm 1$  vorhanden sind ( $k$  ist eine beliebige positive ganze Zahl) – diese werden als „6-pulsige“ oder „6-pulsige charakteristische“ Oberschwingungen bezeichnet –,
- Oberschwingungen  $5, 11, 17, 23, \dots 6k - 1$  gegenphasig sind,
- Oberschwingungen  $7, 13, 19, 25, \dots 6k + 1$  phasenrichtig sind,
- der Betrag jeder Oberschwingungskomponente sowohl bei der Stern-Stern- als auch bei der Stern-Dreieck-Kurvenformen der gleiche ist,
- der Winkel jeder Oberschwingungskomponente bei den Oberschwingungen  $11, 13, 23, 25, \dots 12k \pm 1$  sowohl in der Stern-Stern- als auch in der Stern-Dreieck-Kurvenformen gleich ist, und
- der Winkel jeder Oberschwingungskomponente in den Stern-Stern- und Stern-Dreieck-Kurvenformen bei den Oberschwingungen  $5, 7, 17, 19, \dots (12k-6) \pm 1$  um  $180^\circ$  phasenverschoben ist.

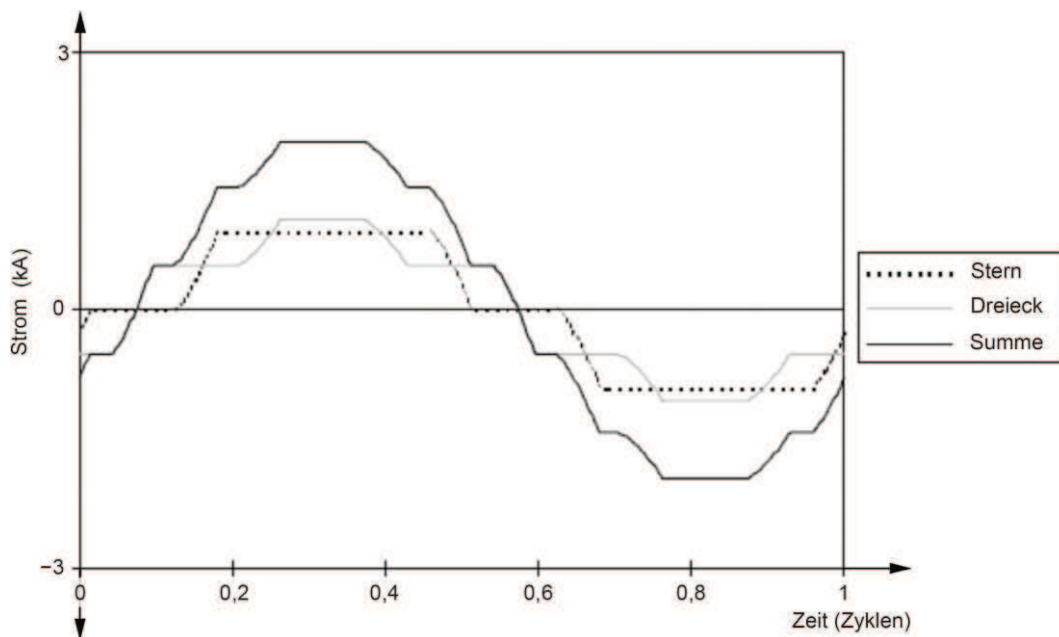


**Bild 1 – Idealisierte Stromkurvenformen auf der Wechselstromseite des Stromrichtertransformators**

Parameter:

$F = 50 \text{ Hz}$  – Frequenz des Wechselstromnetzes;

$U_{ac} = 230 \text{ kV}$  – Spannung des Wechselstromnetzes;

$U_d = 500 \text{ kV}$  – Gleichspannung;

$I_d = 1\,000 \text{ A}$  – Gleichstrom;

$X_l = 14 \%$  – Streureaktanz;

$A = 15^\circ$  – Verzögerungswinkel der Zündung.

Die in Bild 1 dargestellten idealisierten Stromkurvenformen entstehen durch die Übertragung von Gleichstrom von einer Phase des Stromrichtertransformators auf die nächste Phase durch den Schaltvorgang der Thyristorventile. In dem betrachteten idealisierten Szenario wird der Gleichstrom bei jeder gegebenen Gleichstrom-Betriebsbedingung durch die theoretisch unendliche Glättungsdrossel konstant gehalten. Bei jedem Betriebszustand ist daher auch der Oberschwingungsanteil konstant. Da die Oberschwingungsströme konstant und unter diesen idealisierten Bedingungen unbeeinflusst von der angeschlossenen wechselstromseitigen Impedanz sind, wird der Stromrichter in der Oberschwingungsanalyse häufig als Oberschwingungsstromquelle behandelt.

### 6.2.2 Realistische Bedingungen

Den Betrag der charakteristischen Oberschwingungen der in 6.2.1 beschriebenen idealisierten Kurvenformen wird nur durch den Betrag der angelegten Wechselspannung, den Betrag des Gleichstroms, die Kommutierungsreaktanz und den Zündwinkel beeinflusst. Bei der realistischeren Kurvenform beeinflussen jedoch viele zusätzliche Faktoren die Beträge und Phasenwinkel der Oberschwingungen. Zu diesen Faktoren gehören:

- das Vorhandensein von Restwelligkeit und Grundfrequenz im Gleichstrom,
- Oberschwingungen in der Wechselspannung,
- Unsymmetrie, d. h. Grundfrequenz Gegenkomponente, in der Wechselspannung,
- Unsymmetrie zwischen den Zündwinkeln der Stern-Stern- und der Stern-Dreieck-Ventilgruppen,
- Unterschiede im Schaltzeitpunkt der einzelnen Zündimpulse für jedes Thyristorventil,
- Unsymmetrie zwischen den angelegten Wechselspannungen der Stern-Stern- und der Stern-Dreieck-Ventilgruppen aufgrund von Unterschieden in den Wicklungsverhältnissen oder Anzapfungen des Stromrichtertransformators,
- Unsymmetrie der Kommutierungsreaktanz zwischen den Phasen des Stromrichtertransformators und
- Unsymmetrie der Kommutierungsreaktanz zwischen Stromrichtertransformatoren, die 12-Pulsgruppen bilden.

Einige der oben genannten Faktoren, wie Gleichstrom, durchschnittlicher Zündwinkel und durchschnittliche Kommutierungsreaktanz, sind bestimmbar. Andere, wie die Schwankungen der Zündwinkel der einzelnen Thyristorventile und die Oberschwingungsverzerrungen auf den Wechselstromsammelschienen, weisen eine fast zufällige Charakteristik auf.

Eine realistischere Darstellung der Kurvenformen des Phasenstroms auf der Wechselstromseite der Stromrichtertransformatoren, die auch den Einfluss der oben genannten Faktoren berücksichtigt, ist in Bild 2 dargestellt.

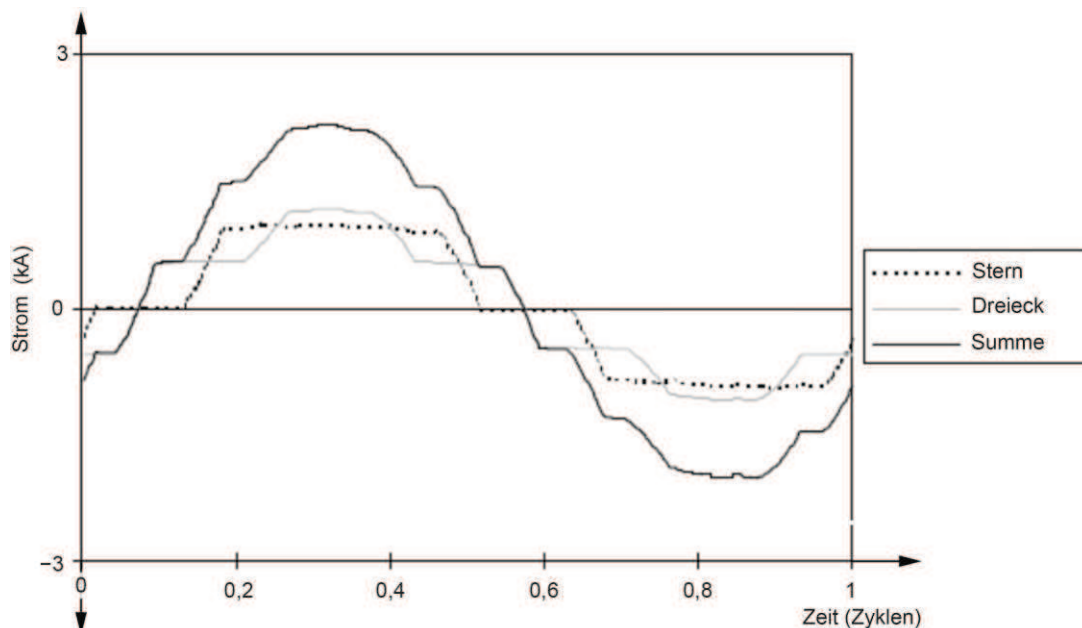


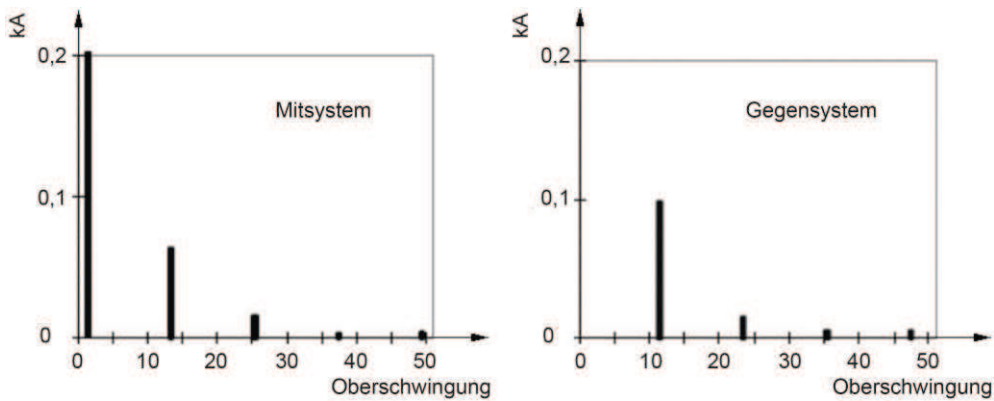
**Bild 2 – Realistische Stromkurvenformen auf der Wechselstromseite des Stromrichtertransformators, einschließlich der Auswirkungen von nicht-idealen Faktoren**

Parameter wie in Bild 1, jedoch mit

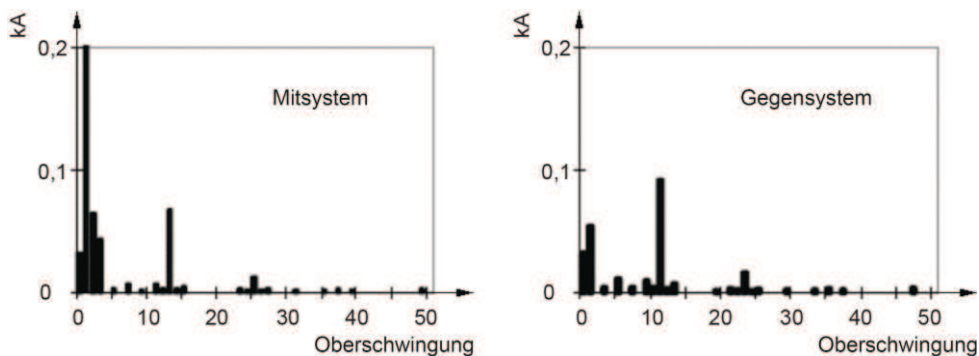
- 1 % Grundschrwingung Gegensystemspannung,
- 1 % der zweiten Oberschwingung Mitsystemspannung,
- 5 % (von  $X_l$ ) Streureaktanz-Unsymmetrie zwischen den Phasen,

- $\pm 0,5^\circ$  Unsymmetrie der Zündung zwischen Stern- und Dreieckgruppen und
- 50-Hz- und 100-Hz-Komponenten im gleichstromseitigen Strom.

Bild 3 a) und b) vergleicht den Oberschwingungsanteil von Bild 2 mit dem idealisierten Oberschwingungsanteil von Bild 1 und zeigt eine geringe Auswirkung auf den Betrag der charakteristischen Oberschwingungen und das Auftreten von nichtcharakteristischen Oberschwingungen aller Ordnungen. Nichtcharakteristische Oberschwingungen entstehen aufgrund nicht idealer Betriebsbedingungen und wurden bereits ausführlich dokumentiert [12].



a) Oberschwingungsteil der Stromkurvenform in Bild 1 (idealisierte Bedingungen)



b) Oberschwingungsteil der Stromkurvenform in Bild 2 (realistische Bedingungen)

**Bild 3 – Vergleich des Oberschwingungsanteils der Stromkurvenform unter idealisierten und realistischen Bedingungen**

Einige der aufgelisteten Faktoren haben einen nichtlinearen Einfluss auf den Oberschwingungsanteil in der resultierenden Wechselstromkurvenform. Der Oberschwingungsanteil kann sogar eine zyklische Funktion einiger der Variablen sein, wenn der Parameter von einem Extrem zum anderen variiert wird.

Aus den obigen Ausführungen wird ersichtlich, dass eine Analyse der Stromkurvenform für eine beliebige Betriebsbedingung keine aussagekräftige Definition des von einer Stromrichterstation zu erwartenden Oberschwingungspegels liefert. Um ein vollständiges Bild zu erhalten, sollte die Kurvenform ermittelt und der Oberschwingungsanteil für jede mögliche Betriebsbedingung bestimmt werden, wobei alle oben genannten Faktoren zu berücksichtigen sind. Es ist eine Vielzahl möglicher Kombinationen von Faktoren und damit eine Vielzahl von Oberschwingungsspektren möglich.

## 6.3 Berechnungsverfahren

### 6.3.1 Allgemeines

Eine typische Verfahrensweise zur Berechnung der Oberschwingungsströme besteht darin, die Stromkurvenform, die sich aus einer bestimmten Kombination aller Parameter ergibt, mathematisch zu berechnen und dann eine trigonometrische Fourier-Analyse dieser Kurvenform durchzuführen, um den Oberschwingungsanteil abzuleiten. Anschließend wird einer oder mehrere der Parameter innerhalb eines bestimmten Bereichs variiert und eine weitere Fourier-Analyse durchgeführt. Dieser Vorgang wird für eine sehr große Anzahl von Kombinationen aller Variablen wiederholt. Wenn ein Parameter (wie z. B. die Kommutierungsreaktanzen) einen zufälligen Wert innerhalb eines Bereichs hat, kann eine zufällige Auswahl des Werts z. B. mit Hilfe eines Monte-Carlo-Verfahrens vorgenommen werden. Die Oberschwingungsströme, die sich aus jeder Fourier-Analyse ergeben, werden verglichen, und die höchsten Werte, die sich aus allen Fällen ergeben, werden dann verwendet.

Die verschiedenen Anbieter können unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Oberschwingungserzeugung verwenden. Für die Zwecke der Angebotsauswertung kann in der Spezifikation eine Standardmethode festgelegt werden, wenn der Kunde dies wünscht. Die Spezifikation sollte jedoch auch dem Anbieter die Möglichkeit geben, alternativ die von ihm bevorzugte Methode vorzuschlagen, wobei eindeutig festgelegt werden sollte, welche Faktoren zu berücksichtigen sind.

Insbesondere sollte in der Spezifikation angegeben werden, ob statistische Methoden verwendet werden können, um die Werte der Oberschwingungsströme aufgrund der zufälligen Unterschiede zwischen den Phasen von Parametern wie Zündwinkeln und Kommutierungsreaktanzen abzuleiten, und wenn ja, welcher Grad an Gewissheit garantiert werden sollte. In der Regel wird verlangt, dass den Betrag einer nicht charakteristischen Oberschwingung, der in den Berechnungen verwendet wird, in nicht mehr als etwa 1 % aller möglichen Fälle überschritten wird oder dass der beispielsweise nicht weniger als 90 % des Extremwertes beträgt, der unter Verwendung der ungünstigsten Parameterkombination berechnet wurde.

Die Auswirkungen der Wechselwirkung von Oberschwingungen in den Stromrichtern können mit solchen Berechnungsmethoden, die von bestimmten Betriebsbedingungen ausgehen, nur schwer berücksichtigt werden.

### 6.3.2 Oberschwingungsströme für Berechnungen des Betriebsverhaltens, der Bemessung und für weitere Berechnungen

Der Frequenzbereich und die Beträge der Oberschwingungsströme, die in den Berechnungen verwendet werden, können abhängig von ihrer Endanwendung sehr unterschiedlich sein. Die für die Berechnung der Filterbemessung verwendeten Oberschwingungsströme können aufwändiger sein als andere Oberschwingungsströme, die für die Berechnung des Betriebsverhaltens, der Verluste oder des hörbaren Geräusches des Filters verwendet werden.

Die Spezifikation sollte in dieser Hinsicht eindeutig sein. Die wichtigsten Faktoren, die sich bei der Berechnung der Oberschwingungsströme für das Betriebsverhalten, die Bemessung, die Verluste usw. unterscheiden können, sind

- der Bereich der Wechselspannungsschwankungen im Versorgungsnetz,
- die Schwankungsbreite der Wechselstromfrequenz, sowohl im eingeschwungenen Zustand als auch im transienten Zustand (dies hat eine relativ geringe Auswirkung, da nur die Kommutierungsreaktanzen betroffen ist),
- die Höhe der Phasengegenspannung des Wechselstromsystems,
- Höhe der Abweichungen von den Bemessungswerten (z. B. Toleranzen der Phasenreaktanzen),
- Überlast- und Kurzzeitbetriebsbedingungen des Stromrichters,
- Betrieb des Stromrichters mit reduzierter Spannung oder hoher Blindleistung, falls zutreffend,
- die Frage, ob die Oberschwingungsströme bei Nennwechselspannung der Sammelschiene oder bei einem beliebigen Betriebspunkt innerhalb des angegebenen Spannungsbereichs zu berechnen sind, und
- die Zeit, während der bestimmte Bedingungen bestehen können (z. B. Bedingungen, die weniger als 1 min andauern, werden bei den Berechnungen des Betriebsverhaltens nicht berücksichtigt).