

DIN IEC/TR 62001-5

**DIN**

ICS 31.160

**Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Systeme –  
Anleitung für die Spezifikation und Auslegung von  
Wechselstromfiltern –  
Teil 5: Wechselstromseitige Oberschwingungen und angemessene  
Oberschwingungsgrenzwerte für  
Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)-Systeme mit  
Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC)  
(IEC TR 62001-5:2021)**

High-voltage direct current (HVDC) systems –  
Guidance to the specification and design evaluation of AC filters –  
Part 5: AC side harmonics and appropriate harmonic limits for HVDC systems with voltage  
sourced converters (VSC)  
(IEC TR 62001-5:2021)

Gesamtumfang 130 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

## Inhalt

|                                                                                                        | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Nationales Vorwort.....                                                                                | 9     |
| Einleitung .....                                                                                       | 10    |
| 1 Anwendungsbereich .....                                                                              | 12    |
| 2 Normative Verweisungen .....                                                                         | 12    |
| 3 Begriffe und Abkürzungen .....                                                                       | 12    |
| 3.1 Begriffe .....                                                                                     | 12    |
| 3.2 Abkürzungen .....                                                                                  | 13    |
| 4 Grundlegende Aspekte von Oberschwingungen in VSC HVDC .....                                          | 14    |
| 4.1 Allgemeines .....                                                                                  | 14    |
| 4.2 Unterschiede im harmonischen Verhalten von VSC und LCC .....                                       | 15    |
| 4.3 Probleme bezüglich Oberschwingungen von VSC .....                                                  | 16    |
| 4.4 Betrachteter Frequenzbereich .....                                                                 | 17    |
| 4.5 Ersatzschaltbild des Stromrichter zur harmonischen Analyse .....                                   | 18    |
| 4.6 Zweistufiger Einfluss eines VSC Stromrichters auf die Oberschwingungsverzerrung am PCC .....       | 19    |
| 4.6.1 Allgemeines .....                                                                                | 19    |
| 4.6.2 Stromrichtererzeugte Oberschwingungsemission .....                                               | 19    |
| 4.6.3 Harmonische Vorverzerrung .....                                                                  | 20    |
| 4.6.4 Kombination der Einflüsse von stromrichtererzeugter und vorbestehender<br>Oberschwingungen ..... | 21    |
| 5 Erzeugung von Oberschwingungen .....                                                                 | 22    |
| 5.1 Allgemeines .....                                                                                  | 22    |
| 5.2 Faktoren, die die harmonische Erzeugung beeinflussen .....                                         | 23    |
| 5.2.1 Allgemeines .....                                                                                | 23    |
| 5.2.2 Stromrichtertopologie .....                                                                      | 23    |
| 5.2.3 Steuerung .....                                                                                  | 25    |
| 5.2.4 Leistungselektronikhardware .....                                                                | 26    |
| 5.3 Erzeugung von Oberschwingungen .....                                                               | 29    |
| 5.3.1 Allgemeines .....                                                                                | 29    |
| 5.3.2 Oberschwingungserzeugung von VSC, unter Einsatz von Schaltventilen .....                         | 29    |
| 5.3.3 Oberschwingungserzeugung von VSC mit Ventiltypen mit steuerbaren Spannungsquellen .....          | 38    |
| 5.4 Zwischenharmonische .....                                                                          | 44    |
| 5.5 Einfluss von nicht idealen Bedingungen auf die Erzeugung von Oberschwingungen .....                | 47    |
| 6 VSC HVDC als Oberschwingungsimpedanz .....                                                           | 48    |
| 6.1 Allgemeines .....                                                                                  | 48    |
| 6.2 Passive Impedanz .....                                                                             | 49    |
| 6.3 Aktive Impedanz .....                                                                              | 49    |
| 6.3.1 Allgemeines .....                                                                                | 49    |
| 6.3.2 Ideales VSC Verhalten .....                                                                      | 50    |
| 6.3.3 Einfluss von praktischen Funktionalitäten des Regelungssystems .....                             | 50    |

|        |                                                                             |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3.4  | Beispiel für den Einfluss der Regelung .....                                | 51 |
| 6.4    | Einfluss auf die Verstärkung vorherbestehender Oberschwingungen .....       | 52 |
| 7      | Nachteilige Auswirkungen von Oberschwingungen eine VSC HVDC .....           | 53 |
| 7.1    | Allgemeines .....                                                           | 53 |
| 7.2    | Telefonkommunikationsstörungen .....                                        | 54 |
| 7.2.1  | Allgemeines .....                                                           | 54 |
| 7.2.2  | Erweiterter höherer Frequenzbereich von VSC Oberschwingungen .....          | 54 |
| 7.2.3  | Zwischenharmonische.....                                                    | 54 |
| 7.2.4  | AC Kabel zur Verbindung der HGÜ-Station mit dem PCC .....                   | 55 |
| 7.3    | PLC, Zähler und Rundsteuerung .....                                         | 55 |
| 7.3.1  | Allgemeines .....                                                           | 55 |
| 7.3.2  | Erweiterter höherer Frequenzbereich von Oberschwingungen eines VSC .....    | 56 |
| 7.3.3  | Zwischenharmonische.....                                                    | 56 |
| 7.4    | Störungen von Eisenbahnsignalen .....                                       | 57 |
| 7.5    | Digitale Telekommunikationssysteme .....                                    | 57 |
| 8      | Oberschwingungsgrenzwerte.....                                              | 58 |
| 8.1    | Allgemeines .....                                                           | 58 |
| 8.2    | Schädliche Auswirkungen zu niedriger Grenzwerte .....                       | 58 |
| 8.3    | Normen und Praxis.....                                                      | 59 |
| 8.4    | Wahrnehmung von VSC beim Setzen von .....                                   | 60 |
| 8.5    | Störaussendungs- und Verstärkungsgrenzwerte .....                           | 60 |
| 8.6    | Bedeutung von Normen für VSC.....                                           | 61 |
| 8.7    | Existierende Normen .....                                                   | 61 |
| 8.8    | Höherfrequente Oberschwingungen .....                                       | 62 |
| 8.8.1  | Allgemeines .....                                                           | 62 |
| 8.8.2  | IEEE Std 519-2014 [7].....                                                  | 63 |
| 8.8.3  | Defizite im Zusammenhang mit VSC .....                                      | 64 |
| 8.9    | Geradzahlige Oberschwingungsgrenzwerte .....                                | 64 |
| 8.10   | Zwischenharmonische.....                                                    | 65 |
| 8.10.1 | Allgemeines .....                                                           | 65 |
| 8.10.2 | Behandlung von Zwischenharmonischen in existierenden Normen .....           | 65 |
| 8.10.3 | Diskussion und Empfehlungen.....                                            | 66 |
| 8.11   | Methoden zur Diskretisierung und Gruppierung von Zwischenharmonischen ..... | 68 |
| 8.11.1 | Vorgeschlagene Methode .....                                                | 68 |
| 8.11.2 | Netzqualitätsindizes für interharmonische Gruppierung .....                 | 70 |
| 8.11.3 | Netzimpedanzorte für interharmonische Gruppierung .....                     | 71 |
| 8.12   | Bewertung als harmonische Spannungs- oder Stromquelle.....                  | 73 |
| 8.13   | Bewertung von THD, TIF, THFF, IT .....                                      | 73 |
| 8.14   | Messung und Überprüfung der harmonischen Übereinstimmung .....              | 74 |
| 8.15   | Empfehlungen .....                                                          | 75 |

|        |                                                                                             |     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9      | Techniken zur Abschwächung von Oberschwingungen .....                                       | 77  |
| 9.1    | Allgemeines .....                                                                           | 77  |
| 9.2    | Passive Filterung .....                                                                     | 77  |
| 9.3    | Aktive Dämpfung und aktive Filterung durch Stromrichterregelung .....                       | 78  |
| 9.4    | Optimierung zwischen passiver und aktiver Abschwächung .....                                | 79  |
| 9.5    | Spezifische Probleme und Techniken zur Abschwächung .....                                   | 80  |
| 9.5.1  | Unsymmetrische Phasenreaktanzen oder Spannungen .....                                       | 80  |
| 9.5.2  | Leistungsschwingungen durch Unsymmetrie der AC-Versorgungsspannung .....                    | 83  |
| 9.5.3  | Harmonische Kreuzmodulation zwischen AC- und DC-Seite .....                                 | 85  |
| 9.5.4  | Kreuzmodulation des gleichstromseitigen Grundfrequenzstroms .....                           | 87  |
| 10     | Modellierung .....                                                                          | 87  |
| 10.1   | Bereitstellung von Modellen .....                                                           | 87  |
| 10.2   | Zeit- und Frequenzbereich .....                                                             | 88  |
| 10.3   | Modellierung der Stromrichterregelung für Oberschwingungs- und Resonanzuntersuchungen ..... | 89  |
| 10.4   | Linearisierung des Stromrichters durch einen analytischen Ansatz .....                      | 89  |
| 10.4.1 | Allgemeines .....                                                                           | 89  |
| 10.4.2 | Linearisiertes VSC-MMC-Modell .....                                                         | 90  |
| 10.4.3 | Eingangsimpedanz .....                                                                      | 90  |
| 10.4.4 | Vorteile der analytischen Methode .....                                                     | 90  |
| 10.4.5 | Nachteile der analytischen Methode .....                                                    | 90  |
| 10.5   | Ableitung der Stromrichterimpedanz durch numerischen Ansatz .....                           | 91  |
| 10.5.1 | Methodik .....                                                                              | 91  |
| 10.5.2 | Vorteile der numerischen Methode .....                                                      | 93  |
| 10.5.3 | Nachteile der numerischen Methode .....                                                     | 93  |
| 10.6   | Wahl zwischen analytischen und numerischen Methoden .....                                   | 93  |
| 10.7   | Modellvalidierung .....                                                                     | 94  |
| 10.8   | Modellierung der Netzimpedanz .....                                                         | 94  |
| 11     | Harmonisch Stabilität .....                                                                 | 96  |
| 11.1   | Allgemeines .....                                                                           | 96  |
| 11.2   | Literaturrecherche .....                                                                    | 97  |
| 11.3   | Definitionen .....                                                                          | 98  |
| 11.4   | Theorie .....                                                                               | 99  |
| 11.4.1 | Allgemeines .....                                                                           | 99  |
| 11.4.2 | Passive harmonische Resonanz .....                                                          | 99  |
| 11.4.3 | Aktives Verhalten von Stromrichtern .....                                                   | 101 |
| 11.4.4 | Aktive Impedanz eines VSC mit einer generischen Stromregelung .....                         | 101 |
| 11.4.5 | Harmonische Instabilität .....                                                              | 102 |
| 11.5   | Analysemethoden .....                                                                       | 105 |
| 11.5.1 | Allgemeines .....                                                                           | 105 |

|        |                                                                                               |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.5.2 | Netzimpedanz-Scans .....                                                                      | 105 |
| 11.5.3 | Passivitätsanalyse .....                                                                      | 106 |
| 11.5.4 | Impedanzbasierte Stabilitätsanalyse .....                                                     | 109 |
| 11.5.5 | Modalanalyse im rotierenden Bezugssystem .....                                                | 113 |
| 11.5.6 | Transiente elektromagnetische Simulation .....                                                | 115 |
| 11.5.7 | Empfehlungen .....                                                                            | 116 |
| 11.6   | Systemweite Untersuchungen .....                                                              | 116 |
| 11.7   | Tatsächliche Erfahrungen mit Oberschwingungsstabilität im Zusammenhang mit HGÜ-Systemen ..... | 117 |
| 11.7.1 | Allgemeines .....                                                                             | 117 |
| 11.7.2 | Fall A: VSC-HGÜ-System mit hoher Leistung .....                                               | 117 |
| 11.7.3 | Fall B: Offshore Windpark .....                                                               | 119 |
| 11.7.4 | Fall C: Kurzschluss-Stromrichter in einem 500-kV-Netz .....                                   | 121 |
| 12     | Zusammenfassung .....                                                                         | 123 |
|        | Literaturhinweise .....                                                                       | 125 |

## Bilder

|         |                                                                                                                                                                            |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 1  | – Frequenzbereich der VSC Kurvenform .....                                                                                                                                 | 17 |
| Bild 2  | – Darstellung einer VSC Station zur Oberschwingungsanalyse .....                                                                                                           | 18 |
| Bild 3  | – Oberschwingungsbeitrag des Stromrichters .....                                                                                                                           | 20 |
| Bild 4  | – Verstärkung der Hintergrundharmonischen .....                                                                                                                            | 20 |
| Bild 5  | – Zweipunktstromrichter .....                                                                                                                                              | 24 |
| Bild 6  | – Dreipunktstromrichter .....                                                                                                                                              | 24 |
| Bild 7  | – Modularer Mehrpunktstromrichter (MMC) .....                                                                                                                              | 24 |
| Bild 8  | – Kaskadierter zweipunktstromrichter (CTL) .....                                                                                                                           | 24 |
| Bild 9  | – Regelsungsstruktur des HVDC VSC Stromrichters .....                                                                                                                      | 25 |
| Bild 10 | – Beispiel für Verriegelung .....                                                                                                                                          | 28 |
| Bild 11 | – Spannungsabfall am Halbleiter .....                                                                                                                                      | 29 |
| Bild 12 | – Referenzspannungen und Träger für einen Zweipunktstromrichter mit PWM mit einer Pulszahl 9 .....                                                                         | 30 |
| Bild 13 | – Referenzspannung, Träger und die resultierende Phasenspannung für eine Phase eines Zweipunktstromrichters mit PWM mit einer Pulszahl von 9 .....                         | 30 |
| Bild 14 | – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit PWM mit einer Pulszahl von 39 .....                                                                 | 31 |
| Bild 15 | – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit PWM mit einer Pulszahl von 39 nach Entfernung der Harmonischen Ordnungszahlen des Nullsystems ..... | 31 |
| Bild 16 | – Erweitertes Oberschwingungsspektrum eines Zweipunktstromrichters mit PWM mit einer Pulszahl von 39 nach Entfernung der Harmonischen Ordnungszahlen des Nullsystems ..... | 32 |
| Bild 17 | – Grundsicherungs- und Phasenspannung für eine Phase eines Zweipunktstromrichters mit OPWM .....                                                                           | 33 |
| Bild 18 | – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit OPWM .....                                                                                          | 33 |

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 19 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit OPWM nach Entfernung der Harmonischen Ordnungszahlen des Nullsystems .....             | 34 |
| Bild 20 – Erweitertes Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit OPWM nach Entfernung der Harmonischen Ordnungszahlen des Nullsystems ..... | 34 |
| Bild 21 – Referenzspannungen und Träger für einen Dreipunktstromrichter mit einer Pulszahl 9 .....                                                                    | 35 |
| Bild 22 – Referenzspannungen, Träger und die resultierende Phasenspannung für einen Dreipunktstromrichter mit einer Pulszahl 9.....                                   | 36 |
| Bild 23 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Dreipunktstromrichters mit einer Pulszahl von 39.....                                                             | 36 |
| Bild 24 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Dreipunktstromrichters mit einer Pulszahl von 39 nach Entfernung des Nullsystems .....                            | 37 |
| Bild 25 – Erweitertes Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Dreipunktstromrichters mit einer Pulszahl von 39 nach Entfernung des Nullsystems .....                | 37 |
| Bild 26 – Spannungsquellendarstellung des MMC.....                                                                                                                    | 38 |
| Bild 27 – Erzeugung der Ventilspannung .....                                                                                                                          | 40 |
| Bild 28 – Harmonisches Spektrum für einen Zweig des MMC Stromrichters.....                                                                                            | 40 |
| Bild 29 – Harmonisches Spektrum für einen Zweig des MMC Stromrichters (erweiterter Frequenzbereich).....                                                              | 41 |
| Bild 30 – Referenz und Träger für drei benachbarte Zellen .....                                                                                                       | 42 |
| Bild 31 – Vergrößert – Referenz und Träger für drei benachbarte Zellen und resultierende Spannung .....                                                               | 43 |
| Bild 32 – Referenz und Spannung für einen Zweig .....                                                                                                                 | 43 |
| Bild 33 – Harmonisches Spektrum für einen Zweig eines CTL Stromrichters.....                                                                                          | 44 |
| Bild 34 – Harmonisches Spektrum für einen Zweig eines CTL Stromrichters – erweiterter Frequenzbereich.....                                                            | 44 |
| Bild 35 – Spannungsrealisierung mit optimalem Zeitschritt der Ventilsteuerung .....                                                                                   | 45 |
| Bild 36 – Spannungsrealisierung mit einem alternativen Zeitschritt der Ventilsteuerung .....                                                                          | 46 |
| Bild 37 – Erläuternder Einfluss von Sortier- und Auswahlalgorithmen auf die Erzeugung von Zwischenharmonischen.....                                                   | 46 |
| Bild 38 – Aktive und passive Impedanzelemente .....                                                                                                                   | 49 |
| Bild 39 – Steuerung von AC Spannung oder Strom .....                                                                                                                  | 50 |
| Bild 40 – Veranschaulichender Einfluss der Ansprechzeit der inneren Stromregelschleife (bei 5 % relative Fehler) auf die Mitimpedanz des Stromrichters .....          | 52 |
| Bild 41 – Vorgeschlagene Gruppierungsmethodik .....                                                                                                                   | 68 |
| Bild 42 – Vergleich mit der Gruppierungsmethodik in IEC 61000-4-7 [3].....                                                                                            | 69 |
| Bild 43 – Zentrierte harmonische Untergruppe.....                                                                                                                     | 70 |
| Bild 44 – Harmonische Gruppe.....                                                                                                                                     | 70 |
| Bild 45 – Harmonische Impedanzfrequenzbereiche für LCC .....                                                                                                          | 72 |
| Bild 46 – Harmonische Impedanzfrequenzbereiche VSC mit der vorgeschlagenen Methodik .....                                                                             | 72 |
| Bild 47 – Harmonische Impedanzfrequenzbereiche VSC mit der in IEC 61000-4-7 vorgeschlagenen Gruppierungsmethodik .....                                                | 72 |
| Bild 48 – AC-Filter auf der Primär- (Netzwerk-) seite des Stromrichtertransformators .....                                                                            | 78 |
| Bild 49 – AC-Filter auf der Sekundär- (Stromrichter-) seite des Stromrichtertransformators .....                                                                      | 78 |

|                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Bild 50 –Beispiel für einen Schaltplan einer Stromrichterstation mit asymmetrischen Phasenreaktanzen .....                                                                                                            | 80  |
| Bild 51 –Beispiel für Stromrichteranlage und Regelungsschema .....                                                                                                                                                    | 81  |
| Bild 52 – Stromregelschema .....                                                                                                                                                                                      | 81  |
| Bild 53 –Zeitbereichsantwort von Mit- und Gegensystemspannungen und -strömen und Wirkleistung, wenn der Stromrichter nicht den Effekt von Phasenreaktanzenunsymmetrien kompensiert .....                              | 82  |
| Bild 54 – Zeitbereichsantwort von Mit- und Gegensystemspannungen und -strömen sowie der Wirkleistung bei Stromrichterregelung auf symmetrische Phasenströme .....                                                     | 83  |
| Bild 55 – Leistungsschwingungen zwischen AC- und DC-Seite aufgrund unsymmetrischer Wechselstrombedingungen, wenn der Stromrichter die Energieschwankungen zwischen den Zweigen und den Netzströmen nicht regelt ..... | 84  |
| Bild 56 –Einfluss von Verzerrungen an den AC- und DC-seitigen Spannungen und die Ausbreitung durch die Regelung .....                                                                                                 | 85  |
| Bild 57 – 6. Harmonischer Gehalt in der DC-seitigen Spannung des MMC .....                                                                                                                                            | 86  |
| Bild 58 – Resultierende AC-seitige Spannung bei Änderung der Regelung bei $t = 4 \text{ s}$ .....                                                                                                                     | 86  |
| Bild 59 – VSC HVDC Übertragungssystem.....                                                                                                                                                                            | 89  |
| Bild 60 – VSC Stationsmodell, welches den Kleinsignalansatz verwendet .....                                                                                                                                           | 90  |
| Bild 61 – Modellentwicklung in abnehmender Komplexität.....                                                                                                                                                           | 91  |
| Bild 62 – Schaltfunktionsmodell eines MMC-Zweigs.....                                                                                                                                                                 | 91  |
| Bild 63 – Strategie vom Zeitbereich zum Frequenzbereich .....                                                                                                                                                         | 92  |
| Bild 64 – Schaltungsbeispiel zur Linearisierung eines Netzwerks und eines VSC inklusive Regler .....                                                                                                                  | 92  |
| Bild 65 – Dynamische Wechselwirkungen zwischen Komponenten und Rahmen der Studie.....                                                                                                                                 | 97  |
| Bild 66 – RLC-Schaltung und Zeitbereichsreaktion auf eine Sprungstörung.....                                                                                                                                          | 99  |
| Bild 67 – Anschluss der Stromrichterstation an ein passives Netz .....                                                                                                                                                | 100 |
| Bild 68 – Bode-Diagramm des Stromrichters, des Netzes und der Ersatzimpedanzen.....                                                                                                                                   | 100 |
| Bild 69 – Dynamisches Schema des Stromreglers und der Phasendrossel.....                                                                                                                                              | 101 |
| Bild 70 – Bode-Diagramm der passiven und aktiven Impedanz des Stromrichters .....                                                                                                                                     | 102 |
| Bild 71 – Beispiel für ein Netzwerk bestehend aus einem VSC und einem frequenzabhängigen Wechselstromsystem zur Untersuchung von Wechselwirkungen der Regelung.....                                                   | 103 |
| Bild 72 – Dynamische Wechselwirkung zwischen der aktiven VSC-Impedanz und der passiven Netzwerkimpedanz.....                                                                                                          | 103 |
| Bild 73 – Bode-Diagramm des VSC und der Netzimpedanz, inklusive aktiver Stromrichtereffekte .....                                                                                                                     | 104 |
| Bild 74 – Ergebnisse der EMT-Simulationsstudie des untersuchten Systems .....                                                                                                                                         | 105 |
| Bild 75 –Beispielhafte Ausgabe der Passivitätsanalyse.....                                                                                                                                                            | 108 |
| Bild 76 – Vergleich Passivitätsanalyse des Stromrichtersystems ohne (blaue Linie) und mit (rote Linie) harmonischem Dämpfer.....                                                                                      | 109 |
| Bild 77 –Einfaches Netzwerk, bestehend aus Quelle und Last.....                                                                                                                                                       | 110 |
| Bild 78 –Schleifenverstärkung des einfachen Netzwerks .....                                                                                                                                                           | 110 |
| Bild 79 – Bode-Diagramm der frequenzabhängigen Impedanz eines Stromrichters und des Netzes.....                                                                                                                       | 111 |
| Bild 80 – Kleinsignalardarstellung zweier miteinander verbundener Wechselstromsysteme .....                                                                                                                           | 112 |
| Bild 81 – Beispielhafte Ergebnisse der Impedanzstabilität .....                                                                                                                                                       | 113 |
| Bild 82 – Beispielhafte Ergebnisse der Modalanalyse .....                                                                                                                                                             | 115 |
| Bild 83 – Schaltungskonfiguration des Testfalls mit negativem Widerstand.....                                                                                                                                         | 117 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Bild 84 – Frequenzgang von Netz 1 und Stromrichterstation .....                                                                                      | 118 |
| Bild 85 –Phasenwinkel aus Bild 84 in der y-Achse vergrößert.....                                                                                     | 118 |
| Bild 86 –Wechselspannung an PCC1 und vergrößerter Auszug .....                                                                                       | 119 |
| Bild 87 – Schematische Darstellung der Hauptkomponenten des Netzanschlussystems des Falles B.....                                                    | 120 |
| Bild 88 –Beispiel für einen Frequenzscan im Offshore-Umspannwerk im Fall B .....                                                                     | 121 |
| Bild 89 – Darstellung des Systems im Fall C.....                                                                                                     | 122 |
| Bild 90 –Bode-Diagramm der Stromrichter- und Netzimpedanzen im Fall C und Zeitbereichssimulation mit der im EMT-Tool implementierten Steuerung ..... | 122 |

## **Tabellen**

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 1 – Richtwerte des Summationsexponenten .....                                                                                 | 21  |
| Tabelle 2 – Indikative Planungspegel für Oberschwingungsspannungen (in Prozent der Grundschiwingung) in MS-, HS- und EHV-Netzen ..... | 61  |
| Table 3 – Stromgrenzwerte für ein > 161 kV bemessenes System .....                                                                    | 63  |
| Tabelle 4 – Zusammenfassung der in IEC TR 61000-3-6 [5] empfohlenen Planungspegel für die Spannung .....                              | 66  |
| Table 5 – Phasenreserven an Schnittpunkten.....                                                                                       | 111 |

## Nationales Vorwort

Zum vorliegenden Technischen Report wurde kein Entwurf veröffentlicht.

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 Reporte 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.

Erfahrungen mit diesem Technischen Report sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an [dke@vde.com](mailto:dke@vde.com) in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter [www.dke.de/stellungnahme](http://www.dke.de/stellungnahme) abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Merianstraße 28, 63069 Offenbach am Main.

## Einleitung

Die Reihe IEC TR 62001 ist in fünf Teile gegliedert:

### IEC TR 62001-1 – Überblick

Dieser Teil befasst sich mit den Spezifikationen von AC-Filtern für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)Systeme 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 – Betriebsverhalten

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

### IEC TR 62001-3 – Modellierung

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 – Betriebsmittel

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 – Wechselstromseitige Oberschwingungen und angemessene Oberschwingungsgrenzwerte für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)-Systeme mit Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC)

Dieser Teil befasst sich mit spezifischen Fragen des AC-Filterdesigns im Zusammenhang mit VSC-HGÜ-Systemen. Die rasante Verbreitung, die zunehmende Leistung und der technische Fortschritt der HGÜ-Technologie mit Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) in den letzten Jahren hatten einen revolutionären Einfluss auf die Übertragung elektrischer Energie im großen Maßstab. Im Bereich der Oberschwingungen und Filterung war die Einführung der VSC-Technologie von großer Bedeutung. Die Oberschwingungscharakteristik dieser Stromrichter ist nicht nur kleiner als bei äquivalenten netzgeführten Stromrichtern (LCC) HGÜ-Schaltungen, sondern auch grundsätzlich radikal anders. Aufgrund der Schalt- und Steuerverfahren, die für VSC verwendet werden können, kann die Erzeugung von nicht ganzzahligen Harmonischen (Zwischenharmonischen) ein inhärentes Merkmal des Wandlungsprozesses sein. Auch der interessierende Frequenzbereich hat sich nach oben erweitert.

Die bestehenden nationalen und internationalen Vorschriften und Empfehlungen zu Oberschwingungen wurden ursprünglich unter Berücksichtigung der zum Zeitpunkt ihrer Herstellung relevanten Stromrichtertypen und zugehörigen Oberschwingungen verfasst. Mit dem Aufkommen neuer Umwandlungstechnologien erweisen sich die verfügbaren Richtlinien als unzureichend, um mit neuen harmonischen Profilen umzugehen. Einzelne Regulierungsbehörden beeilen sich, ihre Praktiken an die neue Technologie anzupassen, und dieses Dokument soll ihnen helfen, indem es eine solide Grundlage für angemessenes technisches Wissen bietet.

Die Auswirkungen der VSC-Übertragung für die Erzeugung von Oberschwingungen sind in der Industrie vielleicht nicht weit genug verstanden in Bezug auf die erzeugten Frequenzen und Amplituden und die Notwendigkeit (oder nicht), dedizierte Filter zu haben. Die Modellierung eines VSC als harmonische Spannungsquelle anstelle einer Stromquelle kann auch in seinen Auswirkungen auf Regulierungsmethoden nicht vollständig erkannt werden. Die Erzeugung von Zwischenharmonischen aufgrund der von einigen VSC-HGÜ-Stromrichtern verwendeten Steuertechniken hat ebenfalls tiefgreifende Auswirkungen.

Ein weiteres interessantes Thema ist der Einfluss von VSC-Installationen auf bereits vorhandene (Hintergrund-)Oberschwingungen. Einige VSC-Designs erzeugen jetzt eine so saubere Kurvenform, dass sie quasi-sinusförmig ist, und in vielen Anwendungen sind Oberschwingungsfilter möglicherweise nicht erforderlich, um die vom Stromrichter erzeugten Oberschwingungen abzuschwächen. Der Stromrichter hat jedoch vom Netz

ausgesehen eine harmonische Impedanz, und es ist wichtig, diese harmonische Impedanz beurteilen und ihre Auswirkungen in Bezug auf eine mögliche Verstärkung (oder Dämpfung) der bereits vorhandenen Netzoschwingungen berechnen zu können. In einigen Fällen kann diese Verstärkung bereits vorhandener Oberschwingungen der einzige Grund sein, eine Filterung für einen HGÜ-VSC installieren zu müssen.

Die obigen Aspekte beziehen sich hauptsächlich auf Themen der stationären Netzqualität. Ein separates Thema ist das Zusammenspiel des VSC-HGÜ-Regelungssystems mit physikalischen Resonanzen im angeschlossenen Stromnetz. Der Ausbau der Stromnetze tendiert zu einer zunehmenden Verlegung von Erd- und Seekabeln, insbesondere im Zusammenhang mit der dezentralen erneuerbaren Erzeugung. Darüber hinaus wird der Ausstieg aus der konventionellen Erzeugung zusammen mit dem zunehmenden Ausbau neuer, über Stromrichter gekoppelter Erzeugungsquellen und die sich ändernden Eigenschaften der Netzlasten zu einer Reduzierung der Oberschwingungsdämpfung im System führen. Einige Stromrichterregelkreise können eine Bandbreite von mehreren hundert Hertz aufweisen und können somit mit Netzresonanzen interagieren. Infolgedessen können Schwingungen im Zusammenhang mit harmonischen Systemresonanzen auftreten und neue Abschwächungstechniken und Bewertungsmethoden können zu einer Herausforderung werden. Abhängig von der Systemdämpfung können solche Schwingungen gedämpft werden, im stationären Zustand aufrechterhalten werden oder zunehmen, bis eine Auslösung oder Abschaltung erfolgt. Dieses Phänomen ist weithin als „harmonische Stabilität“ bekannt und obwohl die Eignung dieses Begriffs in Frage gestellt werden kann, wurde er in diesem Dokument übernommen.

# Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Systeme – Anleitung für die Spezifikation und Auslegung von Wechselstromfiltern – Teil 5: Wechselstromseitige Oberschwingungen und angemessene Oberschwingungsgrenzwerte für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)- Systeme mit Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC)

## 1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC TR 62001, bei dem es sich um einen Technischen Bericht handelt, bietet eine Anleitung zum Stand der VSC-Technologie in Bezug auf Oberschwingungen und voraussichtliche zukünftige Entwicklungen, über das Oberschwingungsprofil heutiger und voraussichtlicher zukünftiger VSC-Architekturen und wie sie charakterisiert und modelliert werden – als Spannungsquellen, Stromquellen oder auf andere Weise. Es bewertet auch die Oberschwingungsimpedanz von VSC und die möglichen Auswirkungen auf bereits vorhandene Hintergrundoberschwingungen, die von Lasten oder Erzeugungseinheiten im Versorgungsnetz ausgehen, und berücksichtigt, wie VSC-Oberschwingungen gemäß den aktuellen IEC-Normen und nationalen Vorschriften bewertet werden, und identifiziert Bereiche, in denen Verbesserungen gemacht werden können, Forschung erforderlich sein kann oder andere Gremien konsultiert werden, beispielsweise wenn es um Zwischenharmonische geht. Dieses Dokument kann eine Referenzquelle zu diesem Thema sein, die auch Empfehlungen für diejenigen enthält, die mit der Änderung bestehender Standards zur Anpassung an VSC-HGÜ-Systeme beauftragt sind.

Fragen zu Oberschwingungen auf der DC-Seite der Stromrichter, einschließlich DC-Netzen, werden in diesem Dokument bewusst nicht in diesem Dokument behandelt, sondern in einer separaten technischen Broschüre von CIGRE [1]<sup>1</sup> behandelt.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC TR 62543, *High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC)*

IEC 62747, *Terminology for voltage-sourced converters (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) systems*

## 3 Begriffe und Abkürzungen

### 3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe und Definitionen der IEC 62543 und IEC 62747.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: unter <http://www.iso.org/obp>

#### 3.1.1

#### **Oberschwingung**

ganzzahlige Harmonische und Zwischenharmonische

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Begriffe „harmonisch“ und „zwischenharmonisch“ werden verwendet, um Komponenten eines periodischen Zeitbereichssignals im Frequenzbereich zu beschreiben. Dazu wird das periodische Signal als Fourier-Reihe ausgedrückt. Aus physikalischer Sicht sind Oberschwingungen und Zwischenharmonische nicht zu unterscheiden – sie sind lediglich Signale unterschiedlicher Frequenz.

---

<sup>1</sup> Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis.

Da sich die Definitionen der Begriffe „harmonisch“ und „zwischenharmonisch“ in verschiedenen Normen leicht unterscheiden, ist es wichtig, die in diesem Dokument verwendeten Definitionen in Bezug auf diese Normen zu klären.

Das International Electrotechnical Vocabulary [2] definiert in IEC 161-02-18:1990 eine Harmonische als „eine Komponente der Fourierreihe einer periodischen Größe der Ordnung größer als eins“. Die harmonische Ordnung ist in IEC 161-02-19:1990 definiert als „die ganze Zahl, die durch das Verhältnis der Frequenz einer Harmonischen zur Grundfrequenz gegeben ist“.

IEC 61000-4-7 [3] schließt andere Referenzfrequenzen aus und verbindet die Definition des IEC speziell mit der Netzfrequenz. Aus diesem Grund wird eine Harmonische zu einer „Frequenz, die ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz des Stromnetzes ist“. Darüber hinaus heißt es in IEC 61000-4-7, dass der RMS-Wert einer harmonischen Komponente „der Kürze halber“ einfach als „Harmonische“ bezeichnet wird.

Dieselben oben genannten Normen definieren den Begriff „Zwischenharmonische“ als die Komponenten einer periodischen Größe, deren Ordnung nicht ganzzahlig ist.

Um zu vermeiden, ständig auf „Harmonische und Zwischenharmonische“ zu verweisen, wird in diesem Dokument der Begriff „Oberschwingungen“ verwendet, um sowohl ganzzahlige Harmonische als auch Zwischenharmonische abzudecken, außer wenn es erwünscht ist, einen Aspekt zu unterscheiden, der für eine von beiden spezifisch ist.

### 3.2 Abkürzungen

| Abkürzung | Begriff                                                                                                            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DC        | Gleichstrom (en: direct current)                                                                                   |
| DFIG      | Doppeltgespeister Induktionsgenerator (en: doubly-fed induction generator)                                         |
| EHV       | Höchstspannung (en: extra high voltage)                                                                            |
| EM        | elektromagnetisch (en: electro-magnetic)                                                                           |
| EMC       | Elektromagnetische Verträglichkeit (en: electro-magnetic compatibility)                                            |
| EMT       | elektromagnetische Transiente (en: electro-magnetic transient)                                                     |
| EN        | Europäische Norm (en: european norms)                                                                              |
| FCC       | Zwangskommutierter Stromrichter (en: forced commutated converters)                                                 |
| FDM       | Frequenzmultiplexverfahren (en: frequency division multiplexed)                                                    |
| FACTS     | Flexible AC-Übertragungssysteme (en: flexible alternating current transmission system)                             |
| FFT       | Schnelle Fouriertransformation (en: fast fourier transform)                                                        |
| GTO       | abschaltbarer Thyristor (en: gate turn-off thyristor)                                                              |
| HVDC      | Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (en: high voltage direct current)                                             |
| IEC       | Internationale Elektrotechnische Kommission (en: International Electrotechnical Commission)                        |
| IEEE      | Verband der elektrischen und elektrotechnischen Ingenieure (en: Institute of Electrical and Electronics Engineers) |
| IEV       | Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch (en: international electrotechnical vocabulary)                      |
| IGBT      | feldgesteuerter Bipolartransistor (en: insulated gate bipolar transistor)                                          |
| IGCT      | integrierter abschaltbarer Thyristor (en: integrated gate-commutated thyristor)                                    |
| ITU       | Internationaler Telekommunikationsverband (en: International Telecommunication Union)                              |
| LCC       | netzkommutierter Stromrichter (en: line commutated converter)                                                      |
| LTI       | linear zeitunveränderlich (en: linear time invariant)                                                              |
| MIMO      | Mehrfacheingang Mehrfachausgang (en: multiple input multiple output)                                               |
| MMC       | modularer Mehrpunktstromrichter (en: modular multi-level converter)                                                |
| MOSFET    | Metalloxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (en: metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)                 |
| MV        | Mittelspannung (en: medium voltage)                                                                                |

| Abkürzung | Begriff                                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| NLC       | Steuerung des nächstliegenden Spannungsniveaus (en: nearest level control)           |
| OPWM      | Modulation mit optimierten Pulsmustern (en: optimized pulse width modulation)        |
| PCC       | Netzanschlusspunkt (en: point of common coupling)                                    |
| PLC       | Datenübertragung auf Netzleitungen (en: power line carrier)                          |
| PLL       | Phasenregelschleife (en: phase-locked-loop)                                          |
| PM        | Phasenmarge (en: phase margin)                                                       |
| POTS      | analoger Telefondienst (en: plain old telephone service)                             |
| PTC       | amerikanisches Zugbeeinflussungssystem (en: positive train control)                  |
| PSPWM     | phasenverschobene Pulsweitenmodulation (en: phase shifted pulse width modulation)    |
| PWM       | Pulsweitenmodulation (en: pulse width modulation)                                    |
| RLC       | Widerstand Drossel Kondensator (en: resistance (r), inductance (l), capacitance (c)) |
| SCR       | Kurzschlussverhältnis (en: short circuit ratio)                                      |
| SM        | Submodul (en: sub-module)                                                            |
| SSR       | untersynchrone Resonanz (en: subsynchronous resonance)                               |
| THD       | Gesamtverzerrung (en: total harmonic distortion)                                     |
| THFF      | Fernsprechoberschwingungsfaktor (en: telephone harmonic form factor harmonischer)    |
| TIF       | Fernsprechstörfaktor (en: telephone influence factor)                                |
| TOV       | transiente Überspannung (en: transient over voltage)                                 |
| TSO       | Übertragungsnetzbetreiber (en: transmission system operator)                         |
| UHF       | Ultrahochfrequenz (en: ultra high frequency)                                         |
| USA       | Vereinigte Staaten von Amerika (en: United States of America)                        |
| WECS      | Windenergieerzeugungssystem (en: wind energy conversion system)                      |
| VHF       | sehr hohe Frequenz (en: very high frequency)                                         |
| VSC       | Spannungszwischenkreisstromrichter (en: voltage source converter)                    |

## 4 Grundlegende Aspekte von Oberschwingungen in VSC HVDC

### 4.1 Allgemeines

Abschnitt 4 gibt eine Einführung in die Oberschwingungsaspekte von VSC-HGÜ, stellt sie in den Kontext der netzgeführten Stromrichter (LCC)-Technologie und enthält einen vorläufigen Überblick über einige Themen, die später in diesem Dokument erläutert werden. Die behandelten Themen sind die folgenden:

- Zusammenfassung der Unterschiede zwischen dem Oberschwingungsverhalten von VSC- und LCC-Technologien;
- besondere Fragen im Zusammenhang mit Oberschwingungsaspekten von VSC;
- relevanter Frequenzbereich für VSC HGÜ;
- Ersatzschaltbild des VSC-Stromrichters, anhand dessen eine Oberschwingungsanalyse durchgeführt werden kann;
- Auswirkungen des Anschlusses eines VSC an das Netz, sowohl als Oberschwingungsgenerator als auch als Oberschwingungsimpedanz.

## 4.2 Unterschiede im harmonischen Verhalten von VSC und LCC

HGÜ-Stromrichter können in zwei verschiedene Kategorien unterteilt werden. Bis Ende der 1990er Jahre wurden in allen HGÜ-Projekten netzgeführte Stromrichter (LCC) verwendet, die aus 12-pulsigen Thyristorbrücken (oder früheren 6- und 12-pulsigen Quecksilberbogenbrücken) bestanden. Solche Stromrichter sind auf die Netzwechselspannung angewiesen, um den Strom zwischen den Phasen zu kommutieren und die Thyristoren auszuschalten, daher „netzkommutiert“.

Ab Ende der 1990er Jahre hat eine sehr schnelle Entwicklung von HGÜ-Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) stattgefunden. Diese verwenden IGBTs (Insulated-Gate Bipolar Transistors) in verschiedenen möglichen Brückenkonfigurationen mit Kondensatoren zur Energiespeicherung. Diese Stromrichter werden als zwangskommutierte Stromrichter (FCC) bezeichnet, d. h. sie können an jedem Punkt des Netzspannungszyklus nach Bedarf von der Stromrichtersteuerung ein- und ausgeschaltet werden. Zu den vielen Vorteilen dieses Stromrichtertyps zählen die unabhängige Regelbarkeit von Wirk- und Blindleistung, die Schwarzstartfähigkeit und der Wegfall einer separaten kapazitiven Blindkompensation an den Stromrichterstationen. Fortschritte in der Ventilkonstruktion und in der Regeltechnik haben zu einer raschen Erhöhung der Nennleistungen des Stromrichters und einer Reduzierung der Schaltverluste geführt.

Die Hauptunterschiede zwischen LCC und VSC in Bezug auf Oberschwingungen sind wie folgt:

- a) **Blindleistung:** LCCs verbrauchen Blindleistung, d. h. haben einen nachteilenden Leistungsfaktor aufgrund der Phasendifferenz zwischen der angelegten Spannung und dem Strom, die sowohl durch die Steuerwinkelverzögerung als auch durch den Kommutierungseffekt (Überlappungseffekt) verursacht wird. Um den Blindleistungsaustausch mit dem Netz zu steuern, wird eine kapazitive Nebenschlusskompensation so installiert, dass der Netto-Blindleistungsaustausch mit dem Netz innerhalb bestimmter Bänder begrenzt wird. Typischerweise kann ein LCC-HGÜ-System die Installation einer Nebenschluss-Blindleistungskompensation von etwa 40 % bis 60 % des Wertes der Nennwirkleistung erfordern.

Diese Nebenschlusskompensation wird typischerweise als eine Anzahl separater Bänke und Unterbänke implementiert, die in Schritten geschaltet werden, die durch den Blindleistungsverbrauch des Stromrichters und das vom Netzbetreiber festgelegte Netto-Blindleistungsaustauschziel bestimmt werden.

Normalerweise wird der größte Teil dieser Nebenschlusskompensation auf verschiedene Frequenzen abgestimmt, um Oberschwingungsfilter zu bilden. Die für diese Filter- und Kondensatorbänke sowie die dazugehörigen Leistungsschalter benötigte Fläche macht einen beträchtlichen Teil der Gesamtfläche der Stromrichterstation aus.

VSCs für HGÜ-Systeme können so ausgelegt sein, dass die Wirk- und Blindleistungsaufnahme bzw. -erzeugung unabhängig gesteuert wird. Normalerweise ist keine zusätzliche Nebenschluss-Blindleistungskompensation erforderlich.

- b) **Oberschwingungserzeugung:** LCCs erzeugen einen stark verzerrten Wechselstrom, der für die übliche 12-Puls-Konfiguration große Anteile der charakteristischen Oberschwingungen (11, 13, 23, 25, 35 usw.) sowie kleinere Pegel von vielen anderen nicht charakteristische Harmonischen enthält. Die Beträge dieser Harmonischen nehmen mit zunehmender Frequenz schnell ab. Gesetzliche Grenzwerte werden in der Regel nur bis zur 50. Harmonischen angewendet, da höhere LCC-Frequenzen als vernachlässigbar für die Auswirkungen auf das Stromnetz gelten. Es werden keine Zwischenharmonischen erzeugt, es sei denn, die Frequenzen an den beiden Enden des Zwischenkreises sind unterschiedlich (in einem solchen Fall erzeugen Kreuzmodulationseffekte ein Spektrum von Zwischenharmonischen von beiden Stromrichtern). In einer praxisgerechten Näherung kann der Stromrichter bei charakteristischen harmonischen Frequenzen als harmonische Stromquelle angesehen werden, da der erzeugte Strom ziemlich unabhängig von der wechselstromseitigen Impedanz ist, obwohl bei Harmonischen niedriger Ordnung die Kreuzmodulationseffekte zwischen den Wechselstrom- und Gleichstromseiten in Betracht gezogen werden sollten.

VSCs für HGÜ-Systeme erzeugen eine viel weniger verzerrte wechselstromseitige Stromkurvenform. Abhängig von der Stromrichtertopologie und den verwendeten Steuerungsverfahren kann sich die vom Stromrichter erzeugte netzseitige Spannung einer sauberen Grundfrequenz-Sinuskurve annähern. Der Stromrichter kann als harmonische Spannungsquelle hinter einer internen Impedanz und nicht als Stromquelle wie bei LCCs betrachtet werden, da die erzeugte harmonische Spannung lastunabhängig bleibt. Die Oberschwingungspegel können im Vergleich zu LCCs extrem niedrig sein, können jedoch aufgrund des gewählten Pulsmusters einen signifikant höheren Frequenzbereich haben als bei LCCs und

können signifikante Pegel von Zwischenharmonischen enthalten, die eine Folge der angewendeten Steuerstrategie sind.

- c) Oberschwingungsfilter: LCCs erfordern die Installation großer Filterbänke, um die dem angeschlossenen Wechselstromnetz auferlegten harmonischen Verzerrungen zu mindern. Bei der Grundfrequenz liefern diese Filter Blindleistung in das AC-Netz, wie oben erläutert. Die Filterung wird hauptsächlich bei den charakteristischen (und möglicherweise niedrigeren) Oberschwingungsfrequenzen bereitgestellt, sollte jedoch auch die Abschwächung von dazwischenliegenden nicht-charakteristischen Oberschwingungen durch Einführung einer Widerstandsdämpfung in das Filterdesign berücksichtigen. Die Wechselwirkung der Nebenschlussfilterung mit den bereits vorhandenen Oberschwingungen des Wechselstromsystems sollte berücksichtigt werden, um inakzeptable Verstärkungspegel zu vermeiden.

VSC, die Schaltventile verwenden, erfordern im Allgemeinen eine sehr geringe Menge an AC-Oberschwingungsfilterung. VSC, die steuerbare Spannungszwischenkreisventile oder mehrstufige Stromrichter topologien verwenden, erzeugen jedoch so niedrige Oberschwingungspegel, dass eine passive Wechselstromfilterung der Stromrichteremissionen normalerweise als unnötig erachtet wird.

### 4.3 Probleme bezüglich Oberschwingungen von VSC

Die Wahrnehmung und Vermarktung der VSC-HGÜ-Technologie hat zu Recht hervorgehoben, dass einer der Vorteile dieser Technologie in der erheblichen Reduzierung oder sogar Eliminierung des Bedarfs an Wechselstromfiltern und dem damit verbundenen Schalten besteht. Dies ist zwar richtig, bedeutet aber nicht, dass Probleme im Zusammenhang mit Oberschwingungen völlig außer Acht gelassen werden können. Eine sorgfältige Analyse der Oberschwingungserzeugung und der Auswirkungen des Anschlusses der Stromrichterstation an das Wechselstromsystem ist weiterhin während des Entwurfs der Stromrichterstation erforderlich. Es sind noch Studien erforderlich, um zu zeigen, dass die Oberschwingungspegel innerhalb der festgelegten Grenzen liegen und der Stromrichter bereits vorhandene Oberschwingungen nicht unzulässig verstärkt. Darüber hinaus beeinflusst die Erzeugung von Oberschwingungen die Belastungspegel, denen stromrichterbezogene Betriebsmittel ausgesetzt sind.

Die Tatsache, dass VSCs Oberschwingungen in Frequenzbereichen über 2,5 kHz bis 3 kHz erzeugen (jeweils für 50 Hz- bis 60 Hz-Systeme) und breite Frequenzspektren haben, können auch zu Problemen im Zusammenhang mit Oberschwingungen führen. Besondere Themen zu Oberschwingungen, die in bestehenden VSC-HGÜ-Projekten behandelt wurden, sind unter anderem:

- der mögliche Bedarf an kleinen Wechselstromfiltern, entweder zur Minderung von Emissionen oder zur Begrenzung der Verstärkung bereits vorhandener Oberschwingungen;
- Erzeugung von Spannungs- und Stromkurvenformen mit harmonischen Frequenzen, die für ein Wechselstromsystem ungewöhnlich sind und die in der Praxis eine vernachlässigbare physikalische Auswirkung haben können. Diese können jedoch dennoch einige niedrige Grid-Code-Grenzen verletzen, die ursprünglich im Kontext unterschiedlicher Oberschwingungsspektren, die für ältere Technologien typisch sind, formuliert wurden. Solche Frequenzen umfassen Zwischenharmonische und geradzahlige Harmonische;
- Resonanzprobleme in isolierten AC-Systemen mit hohem Kabelanteil, wie sie für Windparks typisch sind, insbesondere Offshore-Anlagen;
- harmonische Wechselwirkung mit anderen Stromrichtersystemen und Filtern, beispielsweise zwischen Windkraftanlagen und dem zugehörigen VSC-HGÜ-Zwischenkonnektor.

Die Bewertung von Problemen im Zusammenhang mit VSC-Oberschwingungen erfordert ein detailliertes Verständnis der Oberschwingungserzeugung des VSC und der spezifischen Anwendung des zu bewertenden VSC. VSC-Lieferanten wenden unterschiedliche Techniken an, um die Spannungsausgabe zu erzeugen, die jeweils zu einer anderen Oberschwingungserzeugung führen. Abschnitt 4 beschreibt die Mechanismen der harmonischen Erzeugung durch verschiedene Topologien von VSCs und gibt einige anschauliche Beispiele ihrer Frequenzspektren.

VSCs sind oft nicht die einzige Verzerrungsquelle, sondern Teil eines größeren Systems, bei dem es zu Oberschwingungsproblemen kommen kann. Beispielsweise sind Offshore-VSC-Anwendungen (d. h. der Anschluss von Offshore-Windparks an Onshore-Netze über HGÜ-Verbindungen unter Verwendung von VSCs) oder der Anschluss an sehr schwache AC-Netze oder DC-Netzanwendungen klassische Beispiele, bei denen die durch VSC HGÜ erzeugten Oberschwingungen nicht unbedingt die Quelle des Problems sind. Bei solchen Anwendungen können kleine Oberschwingungen, die von anderen Stromrichtern, beispielsweise

Windkraftanlagen, erzeugt werden, aufgrund von Resonanzen zwischen induktiven und kapazitiven Impedanzen im System verstärkt werden. Dies kann zusammen mit einer geringen Dämpfung im System zu hohen harmonischen Spannungsverzerrungen an der Auswertungsstelle führen.

#### 4.4 Betrachteter Frequenzbereich

Die Normenreihe IEC 61000 für Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) klassifiziert Oberschwingungen und Zwischenharmonische als niederfrequente leitungsgebundene Phänomene (z. B. IEC 61000-1-2 [4]). Gemäß dem International Electrotechnical Vocabulary (IEV oder IEC 60050 series [2]) ist „Niederfrequenz“ definiert als „Frequenz bis einschließlich 9 kHz“ (IEC 60050-161:2014, 161-01-26). Dennoch regeln die meisten Normen (zum Beispiel IEC TR 61000-3-6 [5], EN 50160 [6] oder IEEE Std 519-2014TM [7]) nur Oberschwingungen und Zwischenharmonische für Frequenzen bis einschließlich der 40. oder 50. Harmonischen (2 kHz bzw. 2,5 kHz für eine 50-Hz-Grundwelle und 2,4 kHz bzw. 3 kHz für eine 60-Hz-Grundwelle). Viele Grid Codes verwenden einen Grenzwert der 50. Harmonischen für die Bewertung der Netzqualität der Oberschwingungen, und dies war der Bereich, der normalerweise für LCC-HGÜ in Betracht gezogen wird.

Oberschwingungsgrenzen für Frequenzen zwischen 2,5 kHz oder 3 kHz bis 9 kHz sind nicht genormt und werden bei Bedarf im Einzelfall berücksichtigt.

Dieses Dokument berücksichtigt, dass VSCs eine pulsweitenmodulierte Steuerung (synchron oder asynchron zur Grundfrequenz des Netzes) oder andere Schalttechnologien verwenden können, die höhere Frequenzen als die herkömmliche Netzqualitätsgrenze der 50. Harmonischen erzeugen können.

Betrachtet man VSCs als nichtlineare Betriebsmittel, erzeugen die Stromrichter nicht-sinusförmige Kurvenformen. Andere erzeugte Frequenzen als die Grundfrequenz sind unerwünscht und das Ergebnis einer nicht idealen Umwandlung.

Bild 1 zeigt den Frequenzbereich, der in der von einem VSC in einem typischen HGÜ-Schema erzeugten Spannungskurvenform enthalten sein kann, mit einem Hinweis darauf, welche Phänomene für die Erzeugung von Frequenzen in verschiedenen Bändern verantwortlich sind. Diese werden in den folgenden Absätzen weiter erörtert.

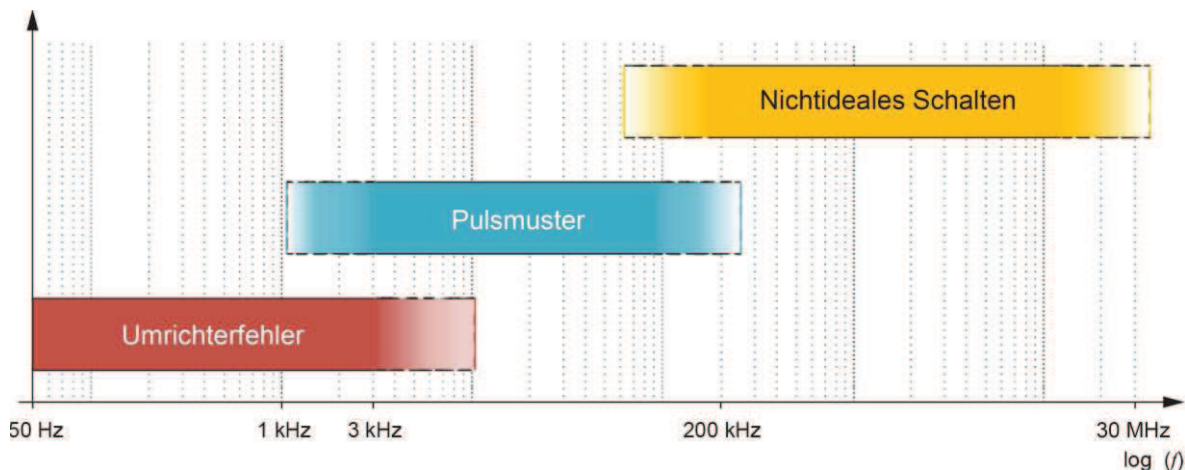


**Bild 1 – Frequenzbereich der VSC Kurvenform**

Im untersten Frequenzbereich entsteht die Erzeugung durch sogenannte Stromrichterfehler, wie Messtoleranzen, Bauteiltoleranzen und Nicht-Idealitäten in der Steuerung. Die Auswirkungen der Nicht-Idealitäten sind bis zu höheren Frequenzen sichtbar, aber die Beträge nehmen mit zunehmender Frequenz stark ab.

Das Schaltmuster ist abhängig von der Stromrichtertopologie und der angewandten Modulationsstrategie. Bei Stromrichtern vom Zellentyp wie dem MMC hängen die erzeugten Frequenzen stark von der Anzahl der Submodule ab – je mehr Submodule, desto höher die Frequenzen des Spektrums. Bei einer klassischen zweistufigen Topologie dominieren die Schaltfrequenz und ihre ganzzahligen Harmonischen das Spektrum im

Schaltfrequenzbereich. Bei höheren Frequenzen nimmt die Auswirkung des Pulsmusters typischerweise um ungefähr 20 dB pro Dekade ab und wird schließlich vernachlässigbar.

Der Effekt mit der größten Auswirkung auf den höchsten Frequenzbereich ist das nicht ideale Schalten der leistungselektronischen Betriebsmittel. Die Kommutierung des Stroms von einem Bauteil zum anderen führt zu Spannungs- und Stromüberschwingern, die zu noch höheren Frequenzinhalten führen als durch die Schaltmuster verursacht.

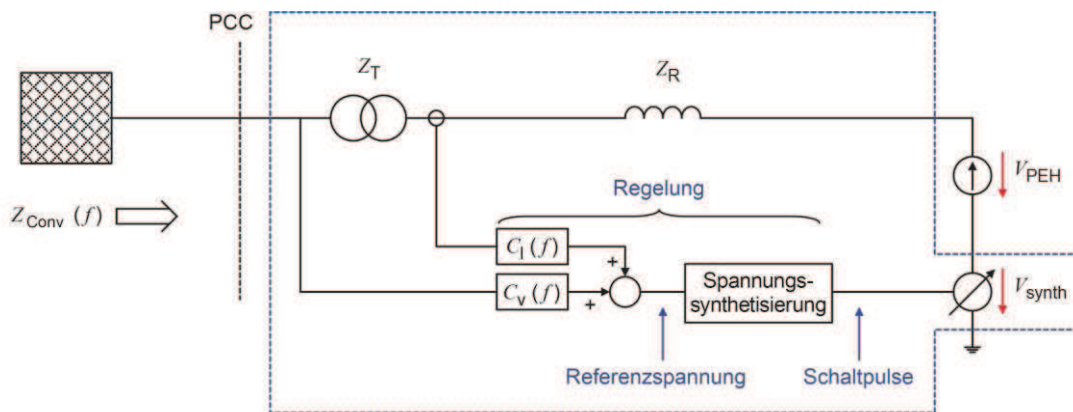
Das Hauptaugenmerk dieses Dokuments liegt auf dem Frequenzbereich bis zur 50. Harmonischen Ordnung, der von den oben in 4.4 aufgeführten Normen abgedeckt wird, da die meisten Probleme in Bezug auf Harmonische (z. B. Netzqualitätsprobleme oder Steuerungsinteraktionen) ihren Ursprung in diesem Frequenzbereich haben.

Wo es jedoch hilfreich ist, bestimmte Phänomene zu erklären, die sich aus dem Stromrichterbetrieb ergeben, wird ein breiterer Frequenzbereich betrachtet. Wenn die Oberschwingungserzeugung bei Frequenzen über etwa 3 kHz auf einem signifikanten Niveau bleibt, kann es wünschenswert sein, die Auswirkungen auf die Netzqualität zu berücksichtigen. Bei der Berechnung der Bemessungsspannungen von Stromrichterkomponenten sollten auch solche Frequenzen berücksichtigt werden.

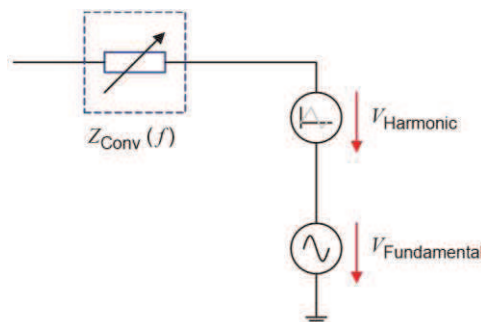
Es sollte beachtet werden, dass die Modellierung des angeschlossenen Wechselstromnetzes mit höheren Frequenzen unsicherer wird, da Sekundäreffekte (wie Streukapazität, Skineffekt und Wirbelstromverluste) beeinflussend werden und somit die Analyse des zu untersuchenden Systems zunehmend komplexer wird.

#### 4.5 Ersatzschaltbild des Stromrichters zur harmonischen Analyse

Die Darstellung des Stromrichters zur Oberschwingungsanalyse – Bild 2 a) – und ein Ersatzschaltbild des Stromrichters zur Oberschwingungsanalyse – Bild 2 b) – basierend auf [8] sind in Bild 2 unten dargestellt.



a) Darstellung des Stromrichters zur Oberschwingungsanalyse



b) Ersatzschaltbild des Stromrichters zur Oberschwingungsanalyse

**Bild 2 – Darstellung einer VSC Station zur Oberschwingungsanalyse**

Der Stromrichter wird durch eine Spannungsquelle dargestellt, die aus zwei Teilen besteht. Die Spannung  $V_{\text{synth}}$  repräsentiert die Synthese des Referenzspannungssignals. Die Referenzspannung umfasst nicht nur die Grundschiwingung, sondern kann auch im höheren Frequenzbereich aktiv sein, um die Impedanz des Stromrichters zu definieren.  $V_{\text{PEH}}$  stellt die Spannung dar, die durch das nicht ideale Verhalten der Hardware der Leistungselektronik (z. B. Spannungsabfall über den Halbleiterbauelementen) entsteht.

Das Referenzsignal für die Spannungssynthese wird durch die Übertragungsfunktion des Stromreglers  $CI(f)$  und die Spannungsrückkopplungsübertragungsfunktion  $C_v(f)$  definiert. Die Übertragungsfunktionen umfassen auch die Darstellung von Strom- und Spannungswandlern, die Abtastung der Steuerungshardware, Verzögerungen und alle anderen relevanten Parameter.

Die Stromrichterimpedanz setzt sich aus passiver und aktiver Stromrichterimpedanz zusammen. Die passive Impedanz wird durch Transformator ( $Z_T$ ) und Drossel ( $Z_R$ ) definiert. Die Impedanz jedes passiven Filters sollte ebenfalls berücksichtigt werden. Die aktive Impedanz hängt von der Stromrichtersteuerung ab. Die Bestimmung der Stromrichterimpedanz wird in Abschnitt 6 dargestellt.

## 4.6 Zweistufiger Einfluss eines VSC Stromrichters auf die Oberschwingungsverzerrung am PCC

### 4.6.1 Allgemeines

Um die Gesamtverzerrung am Netzanschlusspunkt (PCC) zu bestimmen, die durch einen VSC-HGÜ-Stromrichter verursacht wird, müssen zwei Aspekte berücksichtigt werden:

- Stromrichtererzeugte Oberschwingungsemission;
- Vorhandene (Hintergrund-)Oberschwingungen, einschließlich ihrer möglichen Verstärkung durch den Stromrichter.

Die Untersuchung und Behandlung der durch diese Faktoren verursachten Gesamtoberschwingungserzeugung ist der für LCC-HGÜ-Stromrichter (oder jede nichtlineare Last) sehr ähnlich. In dieser Hinsicht gibt es jedoch zwei wesentliche Unterschiede zwischen LCC und VSC. Zum einen verfügt eine LCC-HGÜ-Station über eine umfangreiche passive Shunt-Filterung und Blindkompensation, die die Oberschwingungsimpedanz des Stromrichters selbst weitgehend verdecken. Zweitens sind die vom Stromrichter erzeugten Oberschwingungen bei VSC-HGÜ tendenziell weniger bedeutend, und daher wird die mögliche Verstärkung bereits vorhandener Oberschwingungen ein relativ wichtiger Aspekt. Das komplexe Verhalten des VSC als Reaktion auf Oberschwingungen im Versorgungsnetz sollte verstanden und berücksichtigt werden.

Bei der Berechnung des Gesamtverzerrungsfaktors können Netz- und Stromrichter-Oberschwingungsquellen im Allgemeinen als unabhängig voneinander betrachtet werden. Diese Annahme ermöglicht eine separate Analyse beider Effekte unter Verwendung unterschiedlicher Modelle und Werkzeuge und ist für die meisten Zwecke gültig.

Im Folgenden wird das Netz mit seiner Impedanz  $Z_{\text{Net}}(f)$  als ideale harmonische Spannungsquelle dargestellt. Für die Berechnungen sowohl der Emissionen als auch der Verstärkung der bereits vorhandenen AC-Netzoerschwingungen wird dieselbe harmonische Impedanz verwendet. Angemessene Annahmen darüber, welche Größe bereits vorhandener Oberschwingungsspannungen und welche Werte der AC-Netzipedanz bei solchen Berechnungen verwendet werden sollten, sind ein komplexes Thema, das auch für LCC-Stromrichter relevant ist und in [9], [10] bis [14] ausführlich diskutiert wird.

### 4.6.2 Stromrichtererzeugte Oberschwingungsemission

Der Einfluss des harmonischen Beitrags des Stromrichters auf die gesamte harmonische Verzerrung am PCC kann mithilfe des in Bild 3 gezeigten Modells analysiert werden.

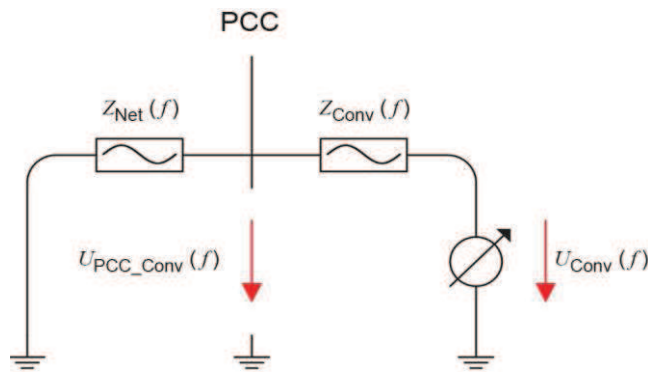


Bild 3 – Oberschwingungsbeitrag des Stromrichters

Der Stromrichter wird als ideale harmonische Spannungsquelle  $U_{Conv(f)}$  dargestellt. In einer typischen Auslegungsstudie wird die Stromrichterimpedanz  $Z_{Conv(f)}$  vom HGÜ-Hersteller definiert und die Netzimpedanz  $Z_{Net(f)}$  würde vom Netzbetreiber für den relevanten Frequenzbereich bereitgestellt. Die Netzimpedanz kann je nach Konfiguration und Lastpegeln einen weiten Bereich möglicher Werte aufweisen. Ein geeigneter Berechnungsalgorithmus ist erforderlich, um aus spezifizierten Netzimpedanzorten das Worst-Case-Netzwerk zu bestimmen, d. h. die Impedanz, die die Verzerrung am PCC für jede einzelne Frequenz maximiert.

Die harmonische Verzerrung am PCC wird dann berechnet durch:

$$|U_{PCC_{Conv}}(f)| = \left| \frac{Z_{Net}(f)}{Z_{Net}(f) + Z_{Conv}(f)} \right| \times |U_{Conv}(f)| \quad (1)$$

oder, ausgedrückt in Leitwerten, als:

$$|U_{PCC_{Conv}}(f)| = \left| \frac{Y_{Conv}(f)}{Y_{Net}(f) + Y_{Conv}(f)} \right| \times |U_{Conv}(f)| \quad (2)$$

**ANMERKUNG** Ein Ersatz- (Norton-)Stromquellenmodell könnte verwendet werden, mit einer internen Impedanz, die parallel zu einer harmonischen Stromquelle angeordnet ist. Ein solches Modell bietet jedoch für die meisten Anwendungen keine besonderen Vorteile und wird in nachfolgenden Analysen in diesem Dokument nicht erwähnt.

#### 4.6.3 Harmonische Vorverzerrung

Der Einfluss vorbestehender (Hintergrundharmonischen) auf die gesamte harmonische Verzerrung bei PCC kann mit Hilfe des in Bild 4 gezeigten Modells analysiert werden.

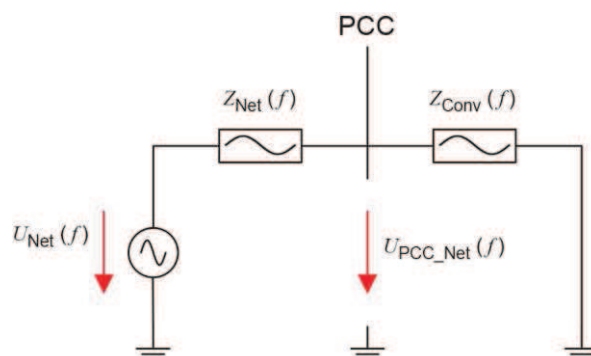


Bild 4 – Verstärkung der Hintergrundharmonischen

$Z_{\text{Conv}}(f)$  stellt die Impedanz des Stromrichters dar und wird in Abschnitt 6 und Abschnitt 10 ausführlich behandelt. Die harmonische Spannungsverzerrung am PCC aufgrund bereits vorhandener Oberschwingungen wird dann definiert durch:

$$\left| U_{\text{PCC-Net}}(f) \right| = \left| \frac{Z_{\text{Conv}}(f)}{Z_{\text{Net}}(f) + Z_{\text{Conv}}(f)} \right| \times |U_{\text{Net}}(f)| \quad (3)$$

#### 4.6.4 Kombination der Einflüsse von stromrichtererzeugter und vorbestehender Oberschwingungen

Es gibt keine feste Beziehung zwischen den Phasenwinkeln der vom Stromrichter erzeugten Oberschwingungen und den vorbestehenden Oberschwingungen. Daher muss eine Bewertung des harmonischen Verhaltens am PCC die Summation der beiden unter Berücksichtigung ihrer zufälligen Phasenbeziehung berücksichtigen. Eine resultierende harmonische Verzerrung kann berechnet werden, indem die harmonischen Spannungen am PCC, die aus der Erzeugung durch den Stromrichter resultieren, und diejenigen, die aus der Modifikation der vorbestehenden Harmonischen resultieren, mit Methoden auf der Grundlage der einschlägigen Normen, z. B. des „allgemeinen Summengesetzes“ in IEC TR 61000 3-6 [5], wie in Gleichung (4) ausgedrückt, aufsummiert werden:

$$U_{\text{hPCC}}(f) = \sqrt[\alpha]{\sum i U_{\text{hi}}^\alpha} = \left( |U_{\text{PCC-Conv}}(f)|^\alpha + |U_{\text{PCC-Net}}(f)|^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

wobei die vorgeschlagenen Richtwerte des Exponenten  $\alpha$  frequenzabhängig sind, wie in Tabelle 1 gezeigt.

**Tabelle 1 – Richtwerte des Summationsexponenten**

| Harmonische Ordnungszahl     | $\alpha$ |
|------------------------------|----------|
| $h < 5$                      | 1        |
| $5 \leq h \leq 10$           | 1,4      |
| $h > 10$                     | 2        |
| QUELLE: IEC TR 61000-3-6 [5] |          |

Es ist jedoch anzumerken, dass [5] betont, dass diese Werte nur in Abwesenheit genauerer Informationen verwendet werden sollten. Wenn es einen technischen Grund gibt, warum einige Harmonische eine mehr oder weniger übereinstimmende Phasenbeziehung haben sollten, als durch diese Exponenten impliziert, kann eine andere geeignete Summation angewendet werden.

In IEC TR 61000-3-6 [5] sind das allgemeine Summengesetz und die obigen Exponenten nur für ganzzahlige Harmonische angegeben. Da die Zwischenharmonischen aus dem Stromrichter und aus dem Netz als unkorreliert angenommen werden, ähnlich den höherfrequenten Harmonischen, ist es sinnvoll zu berücksichtigen, dass für Zwischenharmonische ein Exponent von  $\alpha = 2$  verwendet werden kann. Dieser Ansatz entspricht der in IEC 61400-21 [15] verwendeten Methode für die Netzqualitätseigenschaften von netzgekoppelten Windenergieanlagen.

Für die Bewertung der Bemessung betroffener Komponenten kann ein konservativerer Ansatz wünschenswert sein. Es sollte berücksichtigt werden, dass die Phasenwinkel einiger einzelner Oberschwingungen des Stromrichters und der bereits vorhandenen Oberschwingungen zusammenfallen können. Wenn einzelne Oberschwingungen eine signifikante Amplitude in Bezug auf die Bemessung irgendwelcher Komponenten aufweisen, sollte ihre mögliche Phasenkoinzidenz angemessen berücksichtigt werden.

## 5 Erzeugung von Oberschwingungen

### 5.1 Allgemeines

VSCs sind Betriebsmittel, die idealerweise jeden Satz von Dreiphasenspannungen erzeugen können, indem sie einem Referenzsignal als Ergebnis einer primären Steuerstrategie folgen. Das Referenzsignal ist typischerweise eine kontinuierliche Funktion, beispielsweise eine dreiphasige Grundfrequenz-Sinusfunktion.

Ein VSC versucht typischerweise, dem Referenzsignal zu folgen, indem er Kondensatoren zu- und wegschaltet. Dies führt zu einer Ausgangsspannung, die eine abgestufte Funktion ist. Die Abweichung der gestuften Kurvenform von der kontinuierlichen Referenz führt bei sich wiederholenden Mustern zu ganzzahligen Harmonischen oder zu Zwischenharmonischen, wenn das gleiche Muster nicht in jeder Grundswingungsperiode wiederholt wird. Um die Zwischenharmonischen bei der Analyse der resultierenden Kurvenformen korrekt zu erfassen, ist es daher wichtig, ein geeignetes Zeitfenster für die Analyse der schnellen Fourier-Transformation (FFT) zu berücksichtigen, das länger als eine Grundswingungsperiode sein kann [3].

Eine Reihe verschiedener Topologien und Schaltstrategien können verwendet werden, um die gewünschten Hochspannungsausgänge zu erzeugen. 5.2 stellt die Hauptfaktoren dar, die die Oberschwingungserzeugung beeinflussen, die allen Topologien gemeinsam sind. Einige der vorhandenen werden in 5.3 diskutiert, dass die Oberschwingungen beschreibt, die von verschiedenen VSC-Topologien und Schaltmustern erzeugt werden. 5.4 behandelt Aspekte der Erzeugung von Zwischenharmonischen, während 5.5 die Auswirkungen verschiedener nicht idealer Bedingungen betrachtet.

VSCs erzeugen unabhängig von ihrer Topologie und ihrem Schaltmuster Oberschwingungen in einem weiten Frequenzbereich. Um die Art der harmonischen Erzeugung zu zeigen, wird in Abschnitt 5 ein umfangreiches Spektrum harmonischer Frequenzen gezeigt. Dies sollte als allgemeine Information behandelt werden, um die Art des gegebenen harmonischen Spektrums zu beschreiben, um beispielsweise zu veranschaulichen, wo für ein bestimmtes Schaltmuster die höchsten Beträge im Frequenzbereich liegen. Durch den Vergleich verschiedener Topologien oder Schaltmuster kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass unterschiedliche Frequenzbereiche erforderlich sind, um die Natur ihrer jeweiligen harmonischen Spektren zu zeigen. Daher können in den folgenden Unterabschnitten unterschiedliche Frequenzbereiche für unterschiedliche Stromrichtertypen und Schalttechniken gezeigt werden.

Der zu berücksichtigende Frequenzbereich für eine praktische Oberschwingungs-Netzqualitätsanalyse ist im Allgemeinen sehr viel eingeschränkter. Dennoch wird empfohlen, dass der HGÜ-Hersteller dem Kunden das „Big Picture“ zur Verfügung stellt, d. h. einen allgemeinen Überblick über das Spektrum der Oberschwingungserzeugung. Dies hat den Vorteil, dass zwischen dem HGÜ-Anbieter und dem Kunden ein gegenseitiges Verständnis zum Thema entsteht. Darüber hinaus ist der Kunde informiert und kann so auf mögliche zukünftige Probleme eingehen, die durch die Erzeugung von Oberschwingungen außerhalb des Standardbereichs der Oberschwingungsanalyse entstehen können.

Die Kenntnis des „Big Picture“ der Oberschwingungserzeugung ermöglicht auch in frühen Projektphasen Vorsorgemaßnahmen zu treffen, um nachteilige oder ungewollte Wechselwirkungen mit empfindlichen Betriebsmitteln im AC-Netz zu vermeiden, zum Beispiel PLC-Sender/Empfänger mit Resonanzfrequenzen außerhalb des normalen Oberschwingungsbereichs oder Systeme zur automatischen Zählerablesung (AMR). Ein Dialog zwischen dem Kunden und dem HGÜ-Lieferanten wird empfohlen, um Informationen über solche sensiblen Betriebsmittel auszutauschen.

Die in den nachfolgenden Unterabschnitten dargestellte Analyse bezieht sich auf die Phasenwerte der erzeugten Harmonischen. Die Erzeugung aus den drei Phasen kann unsymmetrisch sein, d. h. Mit- und Gegensystemkomponenten enthalten. Jegliche Nullsystemharmonischen auf der Stromrichterseite des Transformators werden durch die Konfiguration des Stromrichtertransformators (entweder Yd oder Yy ohne Sternpunktterdung auf der Stromrichterseite) blockiert.

## 5.2 Faktoren, die die harmonische Erzeugung beeinflussen

### 5.2.1 Allgemeines

Bei der Berechnung der Oberschwingungserzeugung sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen:

- Stromrichtertopologie.
  - Stromrichterregelung;
  - Erzeugung der Referenzspannung;
- Umsetzung der Referenzspannung;
- Leistungselektronikhardware:
  - Verriegelungszeit;
  - Spannungsabfall am Halbleiter.

Die Topologie des VSC-Stromrichters hat den größten Einfluss auf die Oberschwingungserzeugung. In 5.2.2 werden vier verschiedene Stromrichtertopologien vorgestellt, und in 5.3 sind Beispiele für Oberschwingungsberechnungen dieser Topologien zu finden.

Die durch die Verriegelungszeit und den Halbleiterspannungsabfall erzeugten Oberschwingungen sind auf physikalische Effekte zurückzuführen, die letztendlich von der Stromrichtertopologie und den Halbleitertypen abhängen. 5.2.4 beschreibt, warum diese auftreten und wie sie zum harmonischen Gesamtprofil beitragen.

Die in dem größten Teil von 5.2 beschriebene Oberschwingungserzeugung bezieht sich auf idealisierte Betriebsbedingungen des Stromrichters. Die Auswirkungen von nicht-idealem Verhalten, Asymmetrien, bereits existierenden Oberschwingungen, gleichstromseitiger harmonischer Wechselwirkung und anderen Faktoren werden in 5.5 diskutiert.

### 5.2.2 Stromrichtertopologie

Nach IEC 62747 lassen sich VSC-Stromrichtertopologien in zwei Typen einteilen:

- VSC Stromrichter, die geschaltete Ventiltypen verwenden:
  - Zweipunktstromrichter (Bild 5);
  - Dreipunktstromrichter (Bild 6);
- VSC Stromrichter, steuerbare Spannungsquellenventiltypen verwenden:
  - Modularer Mehrpunktstromrichter (MMC) (Bild 7);
  - Kaskadierter Zweipunktstromrichter (CTL) (Bild 8).

Die Stromrichtertopologien unterscheiden sich in der Anordnung des Energiespeichers (Kondensator) und dem Schaltmuster der Halbleiter.

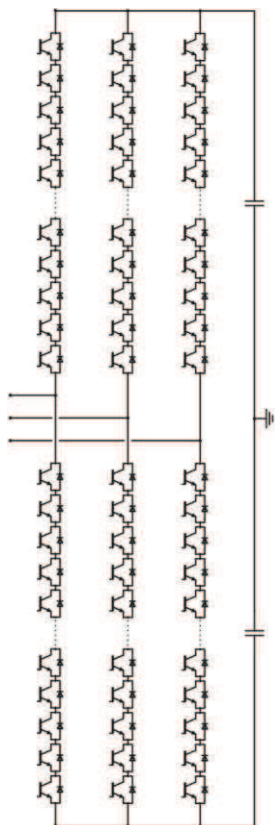


Bild 5 – Zweipunktstromrichter

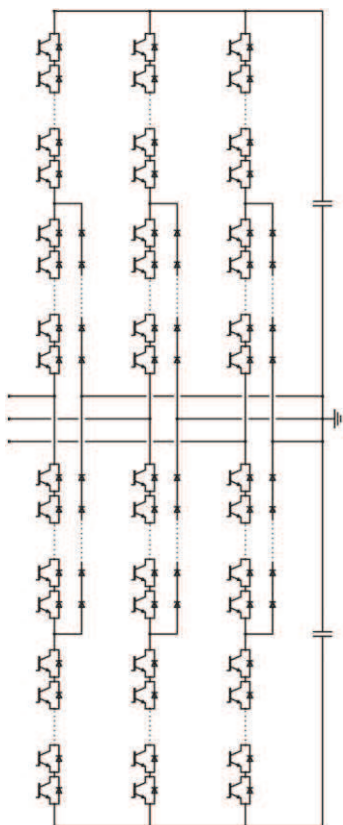


Bild 6 – Dreipunktstromrichter

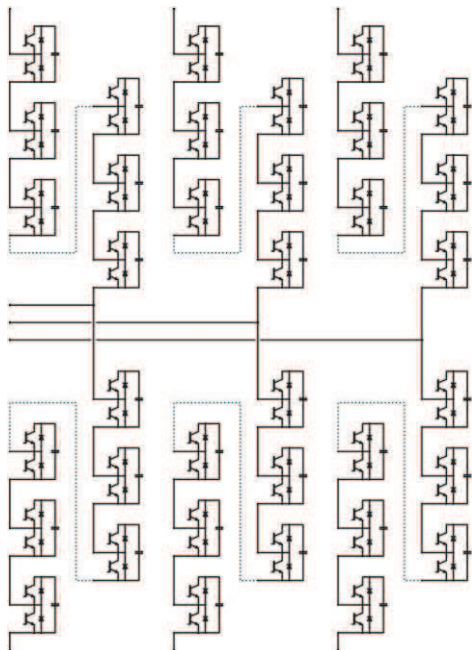


Bild 7 – Modularer Mehrpunktstromrichter (MMC)

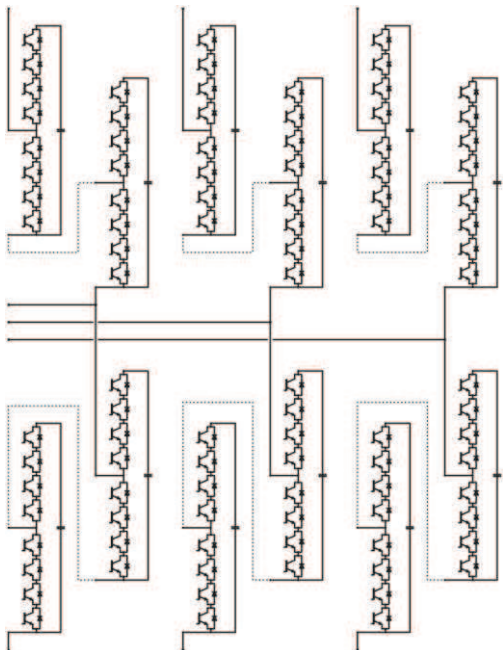


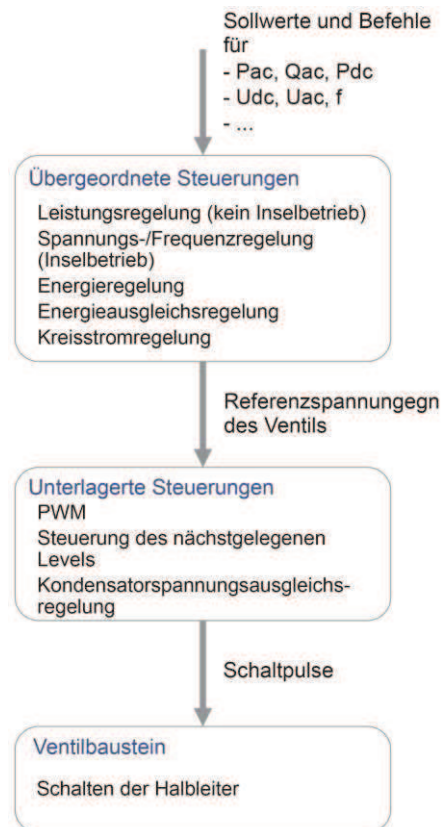
Bild 8 – Kaskadierter zweipunktstromrichter (CTL)

## 5.2.3 Steuerung

### 5.2.3.1 Allgemeines

Gemäß der CIGRE Technical Brochure 604 [16] lassen sich die für die Oberschwingungserzeugung relevanten Stromrichtersteuerungen in drei Bereiche einteilen, wie in Bild 9 dargestellt:

- Übergeordnete Steuerungen.
- Unterlagerte Steuerungen.
- Ventilbaustein.



QUELLE: [16]

**Bild 9 – Regelungsstruktur des HVDC VSC Stromrichters**

Die übergeordnete Steuerung umfasst die Spannungs-/Stromregelung an den Stromrichterklappen und die Steuerung des Stromrichterinternen Strom- und Energieausgleichs. Da die internen Strom- und Energieausgleichssteuerungen des Stromrichters von der Stromrichtertopologie abhängen, sind die übergeordneten Steuerungen topologieabhängig.

Der Ausgang der übergeordneten Steuerungen ist die Referenz für Wechsel- oder Ventilspannung. Aufgabe der unterlagerten Steuerungen ist es dann, durch Erzeugung der Halbleiterschaltsignale eine Nachbildung der Referenzspannung zu erzeugen. Dieser Teil des Regelsystems, und wie es Oberschwingungen erzeugt, wird in 5.2.3.3 näher beschrieben.

In dem Ventilbaustein kann die Halbleiterschaltung Störungen in einem hohen Frequenzbereich erzeugen; dies ist jedoch nicht Gegenstand dieses Dokuments.

### 5.2.3.2 Überlagerte Steuerungen (Erzeugung der Referenzspannung)

Oberschwingungen, die bei der Umsetzung von Referenzspannungen erzeugt werden, werden normalerweise durch das Schalten der Ventile verursacht. Sowohl die Stromrichtersteuerung als auch das Messsystem tragen zum Oberschwingungsausgabe bei. Daher sollten sowohl die Steuerungssoftware als auch die Hardware bei der Analyse der Oberschwingungserzeugung berücksichtigt werden.

Aufgrund der Komplexität der Steuerungssoft- und -hardware sowie von Fragen des geistigen Eigentums sind in der öffentlichen Literatur nur wenige Veröffentlichungen und nur allgemeine Analysen zum Thema Oberschwingungen, die von der Stromrichtersteuerung erzeugt werden, zu finden. Ohne detaillierte Systemkenntnisse kann keine generelle Empfehlung bezüglich der erforderlichen Analyse gegeben werden.

Da keine allgemeinen Regeln für die Analyse der Oberschwingungserzeugung angegeben werden können, sollten verschiedene Betriebszustände des Stromrichters analysiert werden, um den Einfluss auf die Oberschwingungserzeugung des Stromrichters zu bestimmen. Beispiele für die Betriebsparameter und Eigenschaften des Stromrichters, die relevant sein könnten, sind

- voller Betriebsbereich (Wirk-/Blindleistung und Betrieb bei unterschiedlichen Modulationsindizes),
- Gegensystemspannung im Wechselstromnetz,
- Regelmodus Wirk-/Blindleistung oder (Nicht-Inselbetrieb) oder Spannung/Frequenz (Inselbetrieb),
- Bauteiltoleranzen,
- Einfluss von Messfiltern und
- Kreuzmodulation.

Aufgrund der hohen Anzahl relevanter Betriebsparameter und möglicher Kombinationen dieser Parameter kann eine umfassende Berechnung der Oberschwingungserzeugung für alle möglichen Betriebsbedingungen praktisch nicht durchführbar sein. Abhängig von den Projektanforderungen und implementierten Regelfunktionen sollte der HGÜ-Lieferant mit dem Kunden geeignete Methoden vereinbaren, mit denen ein ausreichend hohes Maß an Vertrauen in die berechnete Oberschwingungserzeugung sichergestellt werden kann.

Im Gegensatz zur Wirkung anderer Quellen können, die von übergeordneten Steuerungen erzeugten Oberschwingungen durch Anpassungen der Steuerungssoftware verändert werden, was bei Bedarf während der Inbetriebnahmephase eines Projektes implementiert werden kann.

### 5.2.3.3 Untergeordnete Steuerungen (Umsetzung der Referenzspannung)

Die Umsetzung der Referenzspannung erfolgt über Schalten von Halbleitern nach einem in den unterlagerten Steuerungen implementierten Schaltmuster. Die für VSC HGÜ üblicherweise verwendeten Schaltmuster sind

- Pulsweitenmodulation (PWM),
- Phasenverschobene Pulsweitenmodulation (PSPWM), und
- Steuerung des nächstliegenden Spannungsniveaus (NLC)

Stromrichtertopologien mit verteilten Energiespeichern (MMC und CTL) erfordern auch Regelalgorithmen für den Kondensatorspannungsausgleich zwischen den verteilten Energiespeichern. Schaltmuster und Strategien zum Ausgleichen der Kondensatorspannung hängen stark von der Stromrichtertopologie ab. Eine Erläuterung zu den resultierenden Oberschwingungen sind in 5.3 zu finden, wo die verschiedenen Topologien vorgestellt werden.

## 5.2.4 Leistungselektronikhardware

### 5.2.4.1 Allgemeines

Von der Hardware der Leistungselektronik erzeugte Oberschwingungen hängen von den Spannungs- und Stromwerten des Stromrichterventils ab. Zur Ermittlung der Oberschwingungserzeugung im ungünstigsten Fall müssen alle relevanten Betriebspunkte berücksichtigt werden. Der HGÜ-Hersteller kann am besten

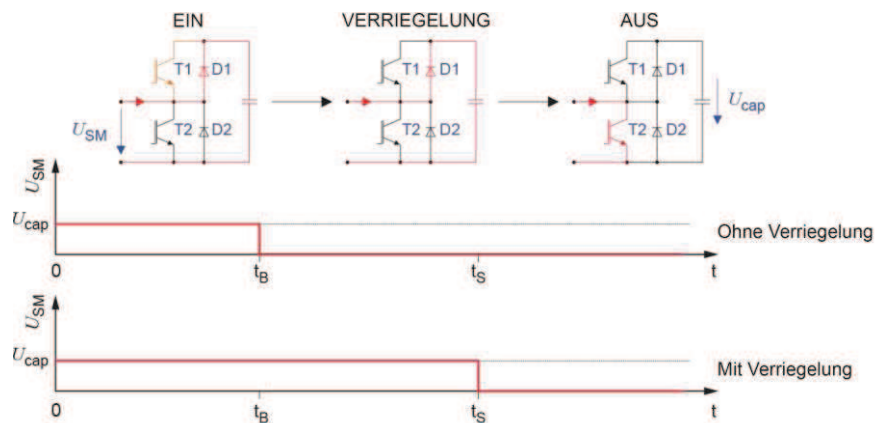
bestimmen, welche Betriebspunkte am relevantesten sind, um die Erzeugung von Oberschwingungen im ungünstigsten Fall zu bestimmen.

Der Effekt der Verriegelungszeit (Ausblendzeit) und der Spannungsabfälle am Halbleiter werden unten diskutiert.

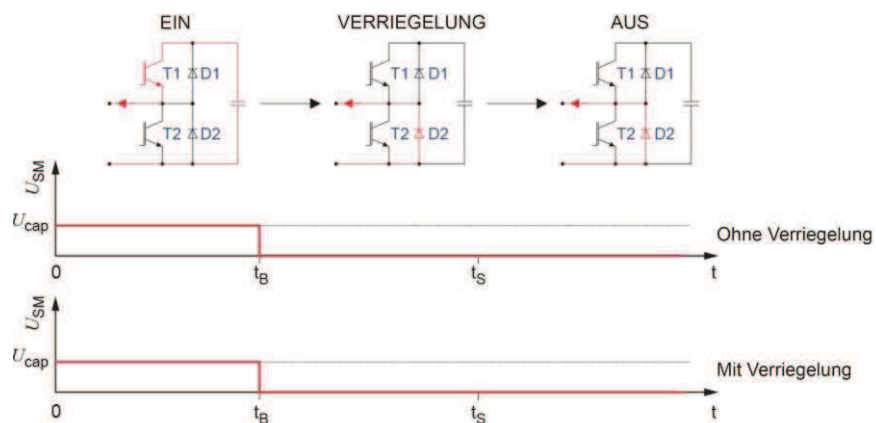
#### 5.2.4.2 Verriegelungszeit

In der VSC-Terminologie bezeichnet „Verriegelung“ die Zeitverzögerung (alternativ „Ausblend“-Zeit) zwischen den Schaltereignissen der einzelnen IGBTs in einer Halbbrücke. Die Verriegelungszeit wird benötigt, um einen unbeabsichtigten Kurzschluss des Kondensators zu vermeiden.

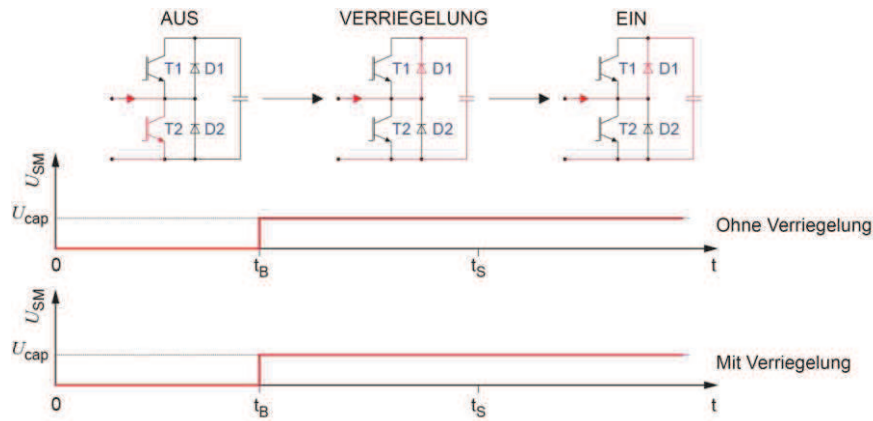
Eine Demonstration der Verriegelungszeit ist in Bild 10 a) bis Bild 10 d) visualisiert. Mit dem Stromfluss durch die Diode D1 gilt das Submodul als eingeschaltet, mit der Kondensatorspannung an den Submodulklemmen. Während der Diodenleitung ist der parallele IGBT T1 im eingeschalteten Zustand, um eine Änderung der Stromrichtung zu ermöglichen. Zum Abschalten des Submoduls wird der IGBT T1 abgeschaltet und nach einer definierten Ausblendzeit der IGBT T2 eingeschaltet. Während der Verriegelungszeit liegt die Submodulspannung ungewollt an den Submodulklemmen an.



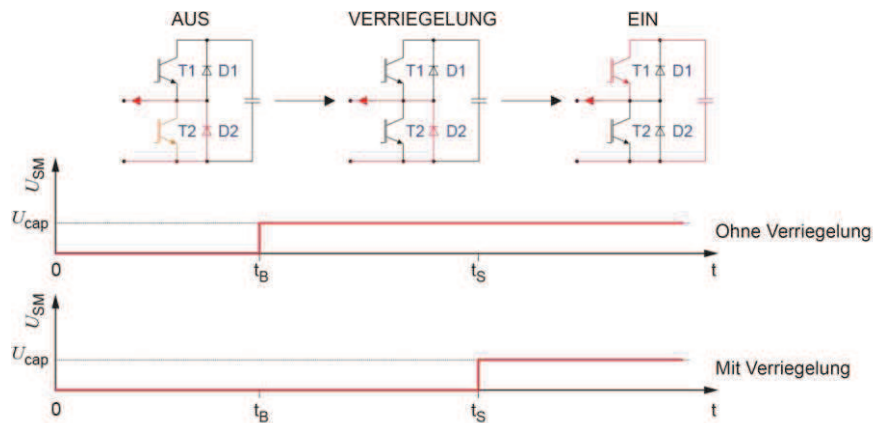
a) Verriegelungszeit während des ersten Teils des Schaltzyklus des Transistors



b) Verriegelungszeit während des zweiten Teils des Schaltzyklus des Transistors



c) Verriegelungszeit während des dritten Teils des Schaltzyklus des Transistors



d) Verriegelungszeit während des vierten Teils des Schaltzyklus des Transistors

Bild 10 – Beispiel für Verriegelung

### 5.2.4.3 Spannungsabfall am Halbleiter

Der Stromfluss im Modul verursacht einen Spannungsabfall an den Diodenklemmen (bezeichnet als Emitter-Kollektor-Spannung  $V_{EC}$ ) und einen Spannungsabfall an der IGBT-Klemme (Kollektor-Emitter-Spannung  $V_{CE}$ ). Obwohl der dadurch bedingte Spannungsabfall in jedem einzelnen Submodul sehr gering ist (0,9 V bis 4 V), kann die Summation der Submodulspannungen einen Spannungsabfall verursachen, der bei der Oberschwingungsanalyse berücksichtigt werden sollte.

Der Gesamtspannungsabfall hängt von der Anzahl der Dioden und IGBTs im Strompfad und damit von der Stromrichtung und dem Betriebspunkt des Stromrichters ab.

Wenn  $I_m$  der Modulstrom und  $N_{SM\_On}$  und  $N_{SM\_Off}$  die Anzahl der Submodule im EIN- und AUS-Zustand sind, ergibt sich der Gesamtspannungsabfall des Stromrichtermoduls nach Bild 11 zu:

$$V_{Drop\_pos} = N_{SM\_On} \cdot V_{EC} + N_{SM\_Off} \cdot V_{CE}$$

$$I_m > 0 \text{ A}$$

$$V_{Drop\_neg} = N_{SM\_On} \cdot V_{CE} + N_{SM\_Off} \cdot V_{EC}$$

$$I_m \leq 0 \text{ A}$$

Eine Übersicht über die Zustände und den daraus resultierenden Spannungsabfall zeigt Bild 11.

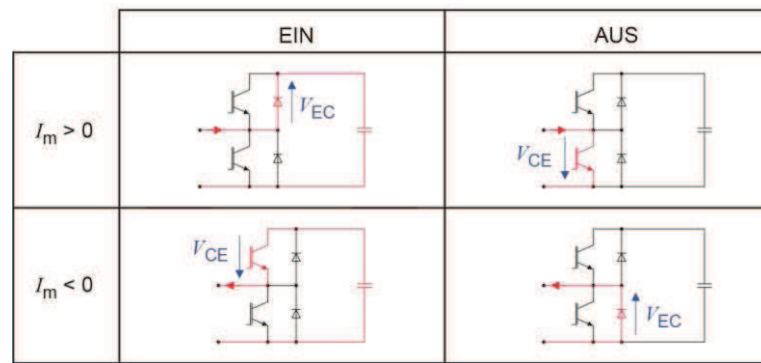


Bild 11 – Spannungsabfall am Halbleiter

### 5.3 Erzeugung von Oberschwingungen

#### 5.3.1 Allgemeines

Beispielhafte Oberschwingungs-Ausgangsprofile für die verschiedenen in 5.2.2 beschriebenen Stromrichtertypen sind unten in 5.3.2 und 5.3.3 dargestellt.

Für einen besseren Vergleich zwischen den verschiedenen Topologien könnten genaue harmonische Informationen wünschenswert sein; jedoch ist es schwierig, solche Informationen für die VSC-Technologie bereitzustellen. Die erzeugten Oberschwingungen hängen hauptsächlich von der Stromrichtersteuerung ab, die von vielen Faktoren beeinflusst wird. Darüber hinaus können aufgrund der schnellen Entwicklung der VSC-Technologie alle bereitgestellten Oberschwingungswerte sehr schnell veraltet sein.

Es sollte daher betont werden, dass diese Kurven als Beispiele für einen weiten Bereich möglicher harmonischer Spannungserzeugung betrachtet werden sollten, der von vielen Faktoren abhängig ist. Sie sollten nicht als typisch oder repräsentativ für eine bestimmte Technologie angesehen oder zitiert werden.

Alle Diagramme zeigen Oberschwingungsspannungen, die intern von den Stromrichterventilen erzeugt werden und nicht den Oberschwingungspegeln entsprechen, die am Netzanschlusspunkt erwartet werden.

In allen Diagrammen werden harmonische Spannungen in p.u. der Gleichspannung dargestellt, um die von den Stromrichterventilen erzeugten internen harmonischen Spannungspegel besser zu visualisieren.

Zur besseren Visualisierung sind die Plots für 2- und 3-Level-Stromrichter mit linearer Skalierung auf der y-Achse und für MMC- und CTL-Stromrichter mit logarithmischer Skalierung dargestellt.

Bei einigen Plots sind die Harmonischen und Zwischenharmonischen nicht zu unterscheiden. Es wurde nicht versucht, eine klarere Unterscheidung zu treffen, da in der Realität verschiedene Stromrichter und Regler andere Frequenzen als die gezeigten erzeugen können.

#### 5.3.2 Oberschwingungserzeugung von VSC, unter Einsatz von Schaltventilen

##### 5.3.2.1 Zweipunktstromrichter mit PWM

Es wird ein Träger mit Dreieckskurven verwendet. Die Pulszahl ist definiert als das Verhältnis der Frequenz des Trägers und der Grundfrequenz. Indem die Impulszahl zu einer durch 3 teilbaren ungeraden ganzen Zahl gemacht wird, wird eine Symmetrie zwischen den drei Phasen sowie eine Symmetrie zwischen der positiven und der negativen Halbperiode für jede Phase erreicht. Dies wird in Bild 12 und Bild 13 gezeigt, die eine Impulszahl von 9 haben (eine so kleine Zahl ist nicht typisch, wird aber hier zur besseren Veranschaulichung gewählt).

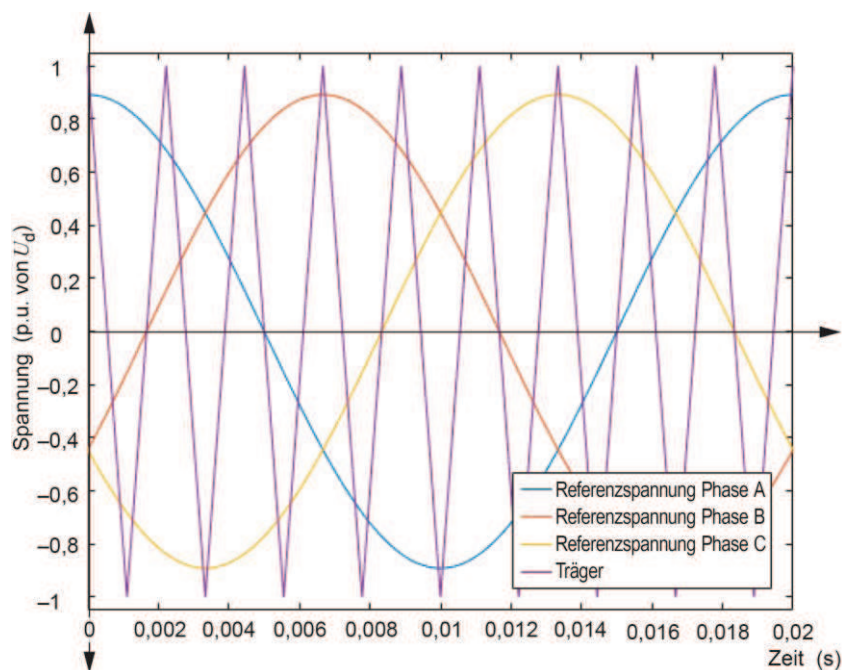


**Bild 12 – Referenzspannungen und Träger für einen Zweipunktstromrichter mit PWM mit einer Pulszahl 9**

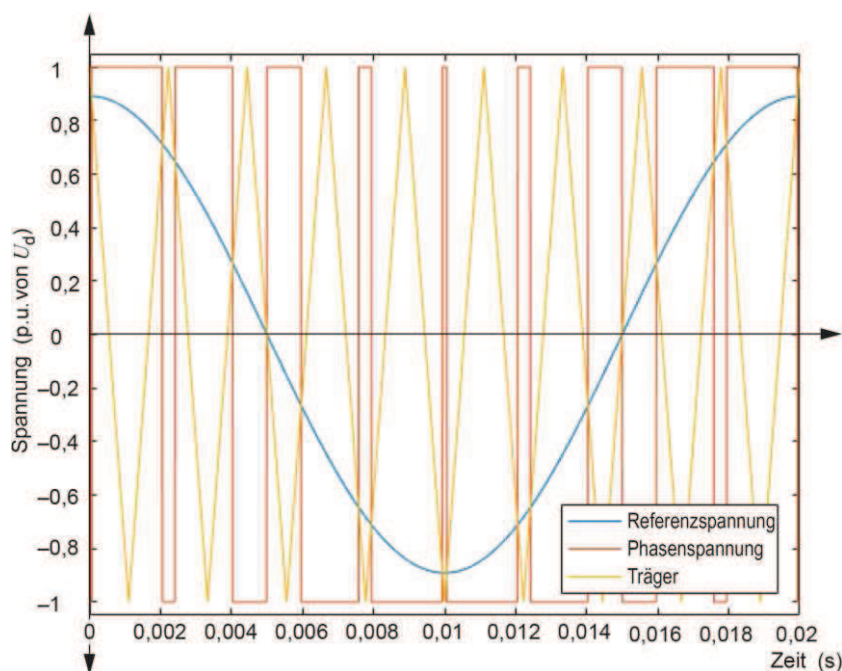


**Bild 13 – Referenzspannung, Träger und die resultierende Phasenspannung für eine Phase eines Zweipunktstromrichters mit PWM mit einer Pulszahl von 9**

Das PWM-Ausgangsspannungsmuster besteht aus einer Grundfrequenz, die der Referenz entspricht, plus Spannungsüberschwingungen.

Die Spannungsüberschwingungen bei Verwendung einer Impulszahl von 39 sind in Bild 14 dargestellt.

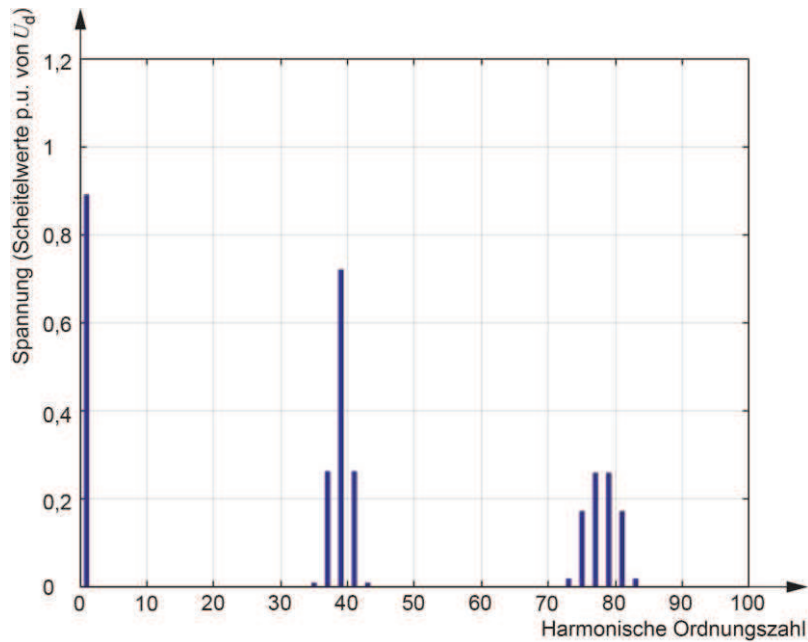


**Bild 14 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit PWM mit einer Pulszahl von 39**

Mit der gegebenen Wahl der Trägerfrequenz wird eine Symmetrie der drei Phasen erreicht und daher werden die erzeugten durch 3 teilbaren Harmonischen ein Nullsystem sein.

In Bild 14 ist zu erkennen, dass die höchste Spitze des ersten Pulsbandes nach der Grundschwingung eine Nullsystemharmonische (39. Ordnung) ist. Das Spektrum der restlichen Harmonischen ohne die Nullsystemordnungen ist in Bild 15 dargestellt.

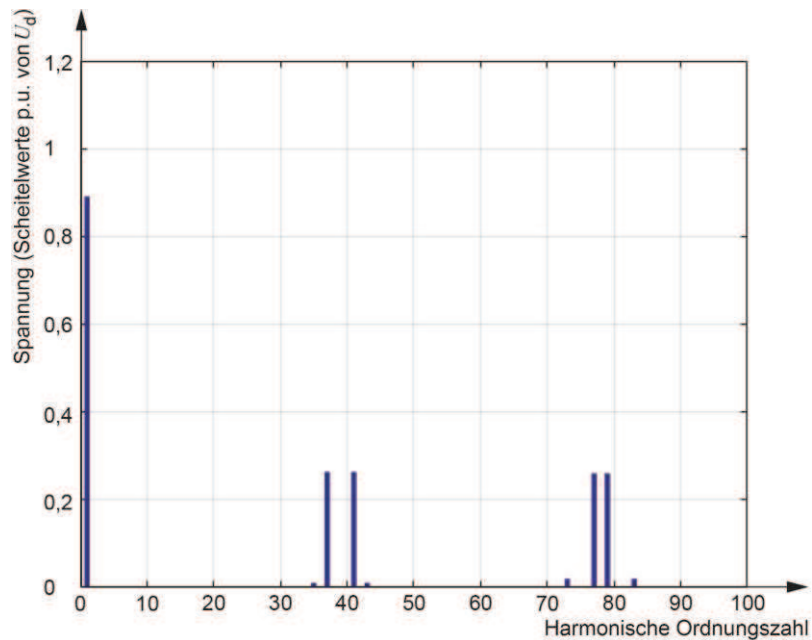
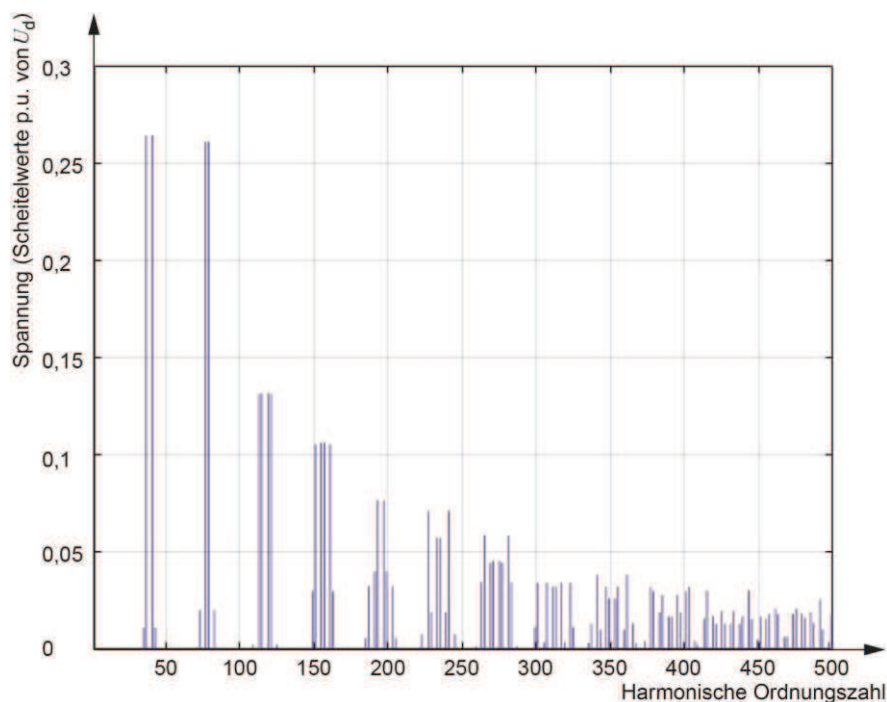


**Bild 15 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit PWM mit einer Pulszahl von 39 nach Entfernung der Harmonischen Ordnungszahlen des Nullsystems**

Das Frequenzspektrum setzt sich weiter oben im Frequenzspektrum fort, wie in Bild 16 dargestellt.



ANMERKUNG Die Grundschiwingung ist nicht dargestellt.

**Bild 16 – Erweitertes Oberschwingungsspektrum eines Zweipunktstromrichters mit PWM mit einer Pulszahl von 39 nach Entfernung der Harmonischen Ordnungszahlen des Nullsystems**

### 5.3.2.2 Zweipunktstromrichter mit optimierter PWM (OPWM)

OPWM ist ein Steuerverfahren, das die Schaltzeitpunkte so berechnet, dass alle unerwünschten Oberschwingungen bis zu einer bestimmten Oberschwingungsordnung eliminiert werden und gleichzeitig die richtige Größe für die Grundschiwingungsspannung erhalten wird. Die Optimierung liegt darin, die minimal mögliche Schaltfrequenz zu verwenden, um dies zu erreichen; wodurch Schaltverluste minimiert werden. Für eine ähnliche Technik wird auch der Begriff Selective Harmonic Elimination (SHE, selektive Oberschwingungseliminierung) verwendet.

Bei einer äquivalenten Impulszahl von 23 können alle Mit- und Gegensystemharmonischen bis einschließlich der 31. ausgelöscht werden. Die Spannungen im Zeitbereich und das harmonische Spektrum sind in Bild 17 und Bild 18 dargestellt.

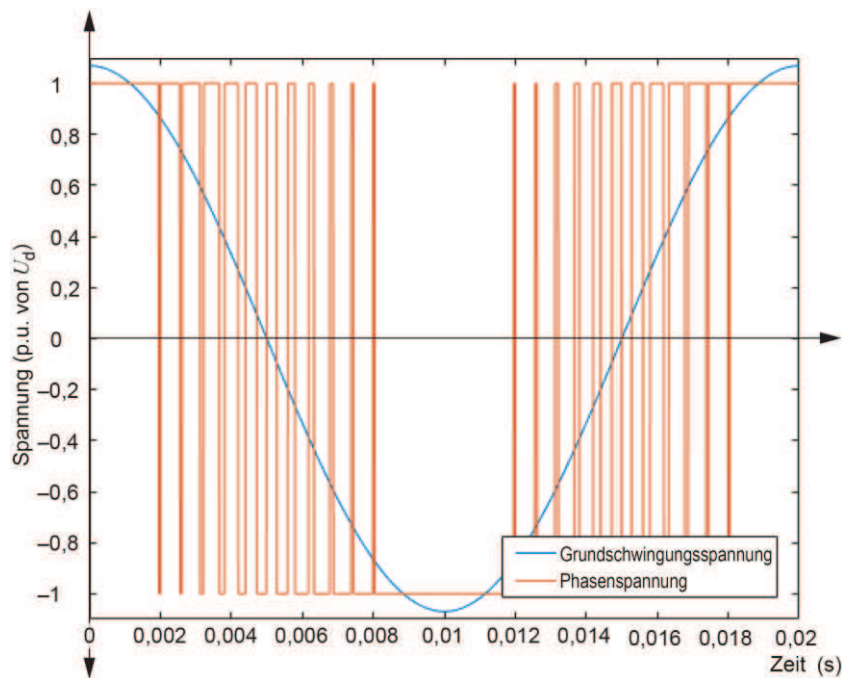


**Bild 17 – Grundswingungs- und Phasenspannung für eine Phase eines Zweipunktstromrichters mit OPWM**

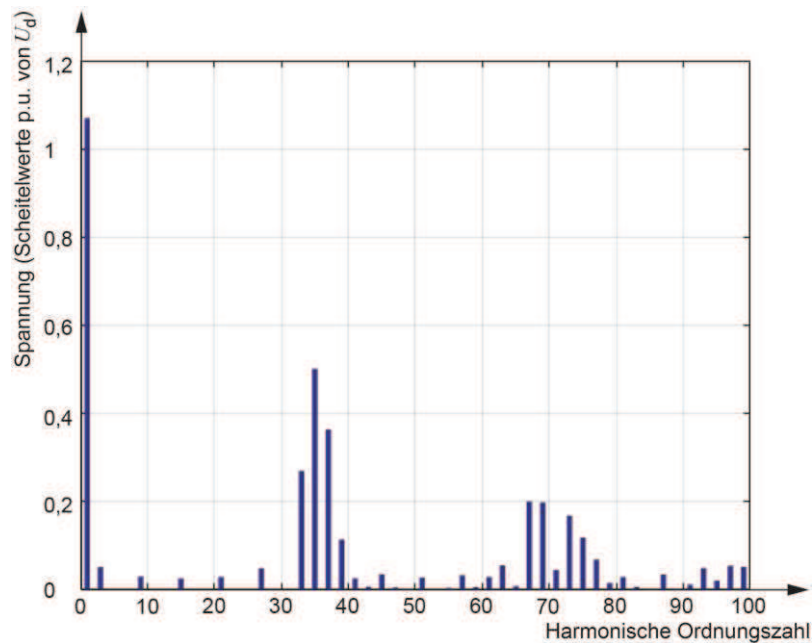


**Bild 18 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit OPWM**

Die Spannungsüberschwingungen unterhalb der 35. Ordnung in Bild 18 sind ein Nullsystem. Bild 19 zeigt das Spektrum ohne Nullsystem.

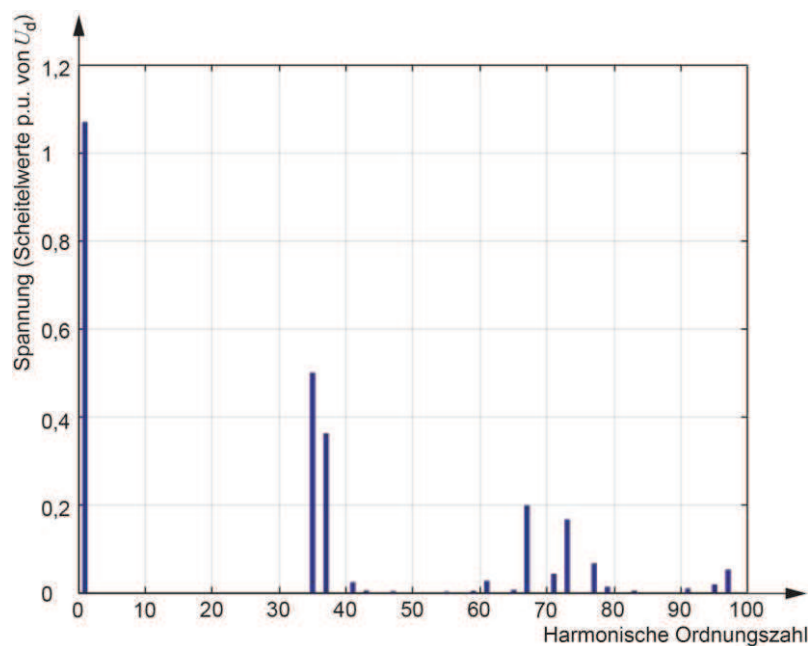
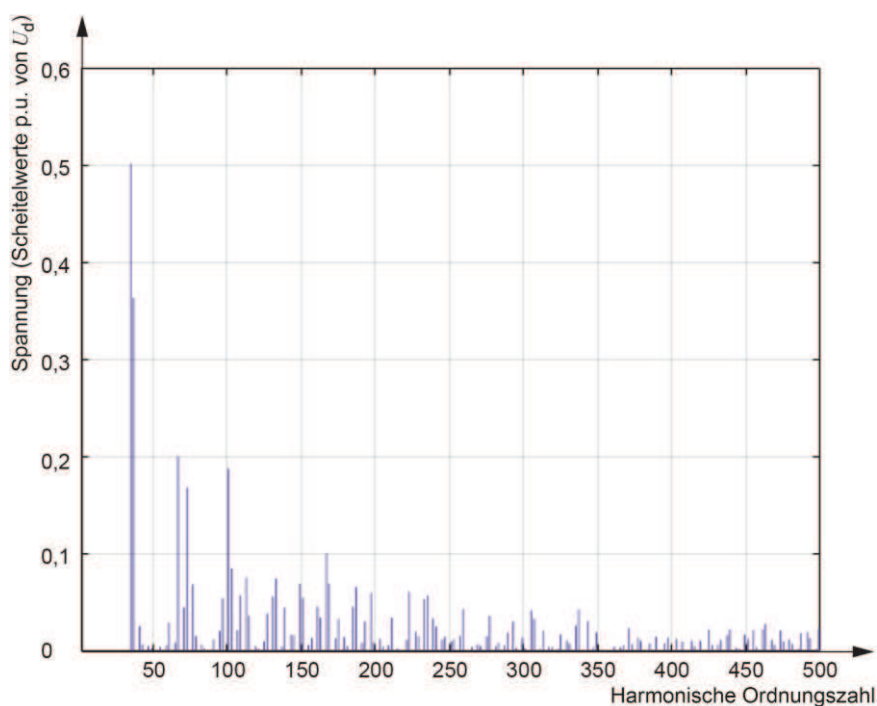


**Bild 19 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit OPWM nach Entfernung der Harmonischen Ordnungszahlen des Nullsystems**

Das harmonische Spektrum bis zur Ordnung 500 ist in Bild 20 dargestellt.



ANMERKUNG Die Grundschwingung ist nicht dargestellt.

**Bild 20 – Erweitertes Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Zweipunktstromrichters mit OPWM nach Entfernung der Harmonischen Ordnungszahlen des Nullsystems**

### 5.3.2.3 Dreipunktstromrichter

Der Topologieunterschied zu einem Zweipunktstromrichter besteht darin, dass jede Phase mit dem Pluspol, dem Mittelpunkt oder dem Minuspol verbunden werden kann, sodass jede Phase jederzeit 3 verschiedene Spannungspegel einnehmen kann.

Es wird ein separater Träger für den oberen und den unteren Teil verwendet. Die Phasenspannungen werden während der einen Hälfte der Grundschwingungsperiode zwischen  $U_d$  und 0 und während der anderen Hälfte zwischen  $-U_d$  und 0 umgeschaltet.

Typischerweise wird der Referenzspannung auch ein drittes harmonisches Signal hinzugefügt, um die Amplitude der Grundspannung gegenüber der Gleichspannung zu erhöhen. Die resultierende erzeugte Spannung der dritten Harmonischen ist ein Nullsystem und dringt daher nicht in das Wechselstromsystem ein.

Das Prinzip ist in Bild 21 für die Pulszahl 9 dargestellt.

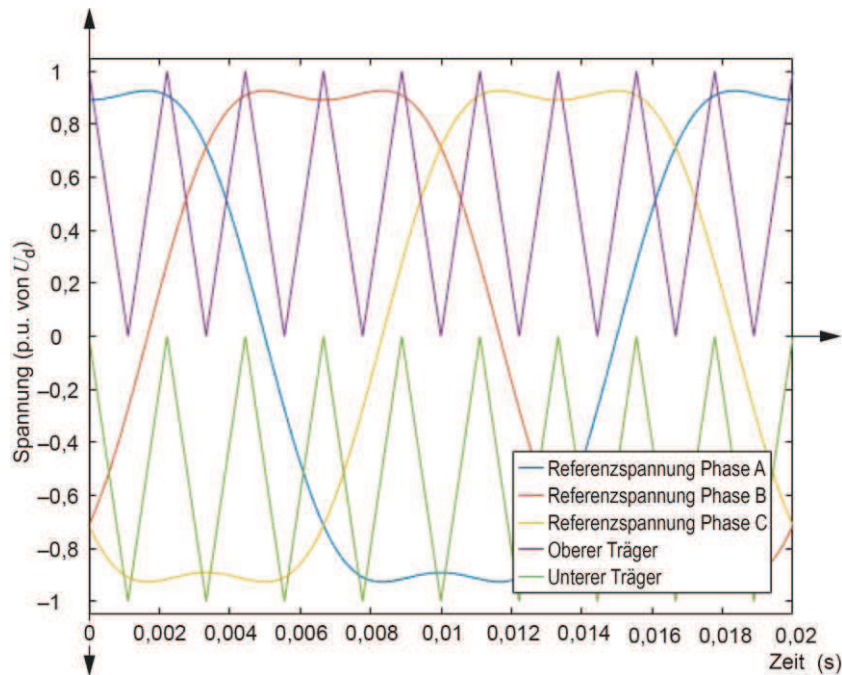


**Bild 21 – Referenzspannungen und Träger für einen Dreipunktstromrichter mit einer Pulszahl 9**

Wie in Bild 21 zu sehen ist, weist der Dreipunktstromrichter die gleichen Symmetrien zwischen den Phasen und der oberen und unteren Halbschwingung auf wie ein Zweipunktstromrichter. Daher werden auf der Wechselstromseite nur natürliche Oberschwingungen, d. h. die 5., 11., 17., ... Gegensystem-Oberschwingung und die 7., 13., 19., ... Mitsystem-Oberschwingung erzeugt. Durch 3 teilbare Oberschwingungsordnungen sind ein Nullsystem und werden vom Transformator abgeblockt. Bild 22 zeigt die resultierende Spannung für eine Phase.

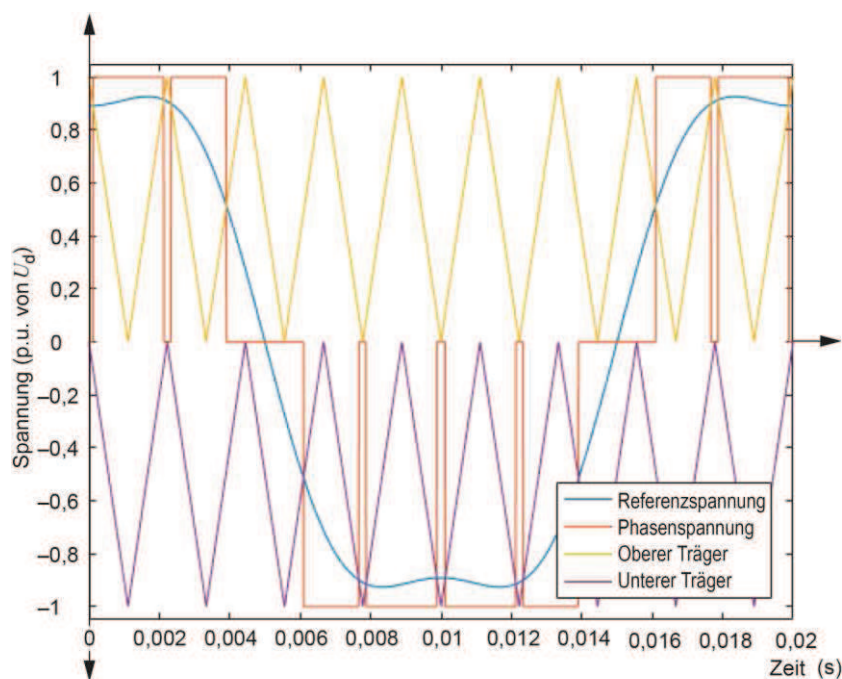


**Bild 22 – Referenzspannungen, Träger und die resultierende Phasenspannung für einen Dreipunktstromrichter mit einer Pulszahl 9**

Bei gleicher Impulszahl wie beim Zweipunktstromrichter mit PWM in 5.3.2.1, d. h. 39 (Bild 14), ist das Spannungsspektrum in Bild 23 dargestellt.

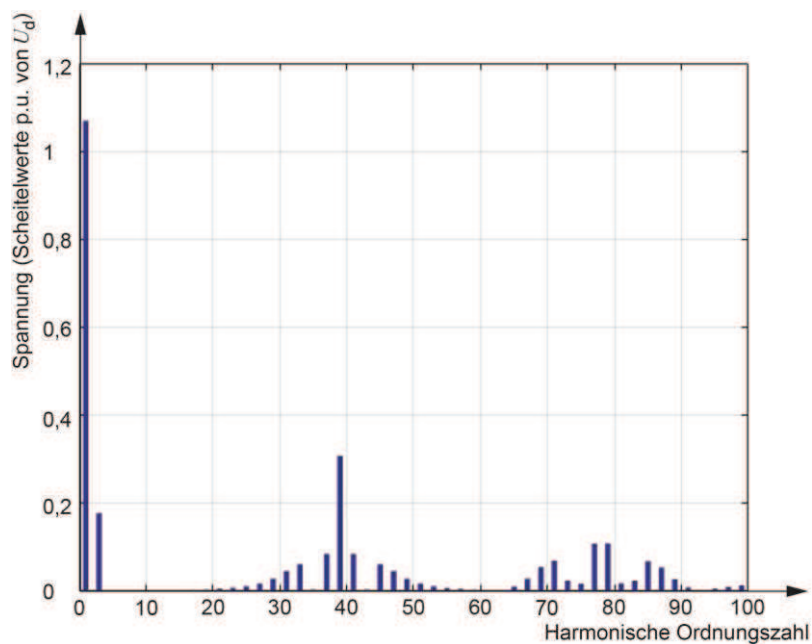


**Bild 23 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Dreipunktstromrichters mit einer Pulszahl von 39**

Die höchsten Peaks sind wiederum im Nullsystem. Bild 24 zeigt das Spektrum nach Entfernen des Nullsystems.

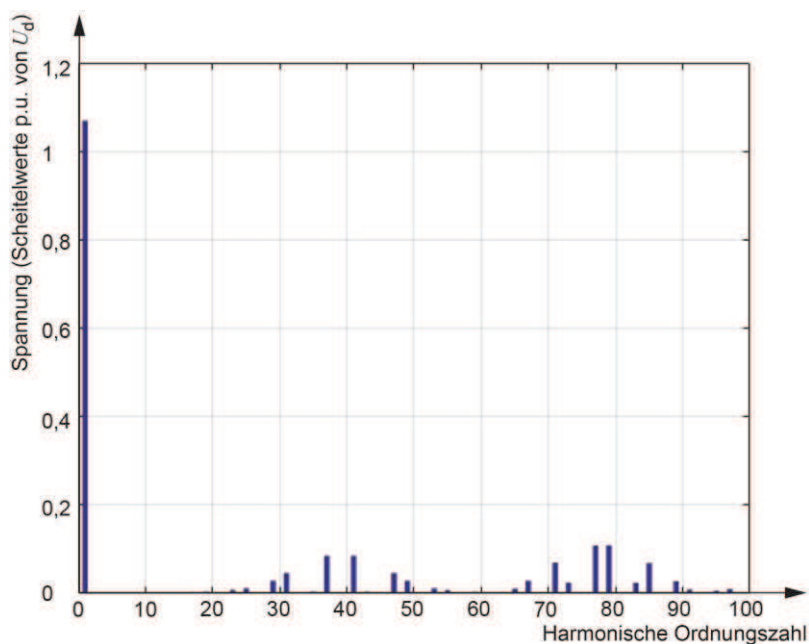


**Bild 24 – Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Dreipunktstromrichters mit einer Pulszahl von 39 nach Entfernung des Nullsystems**

Der erweiterte Frequenzbereich ist in Bild 25 dargestellt.

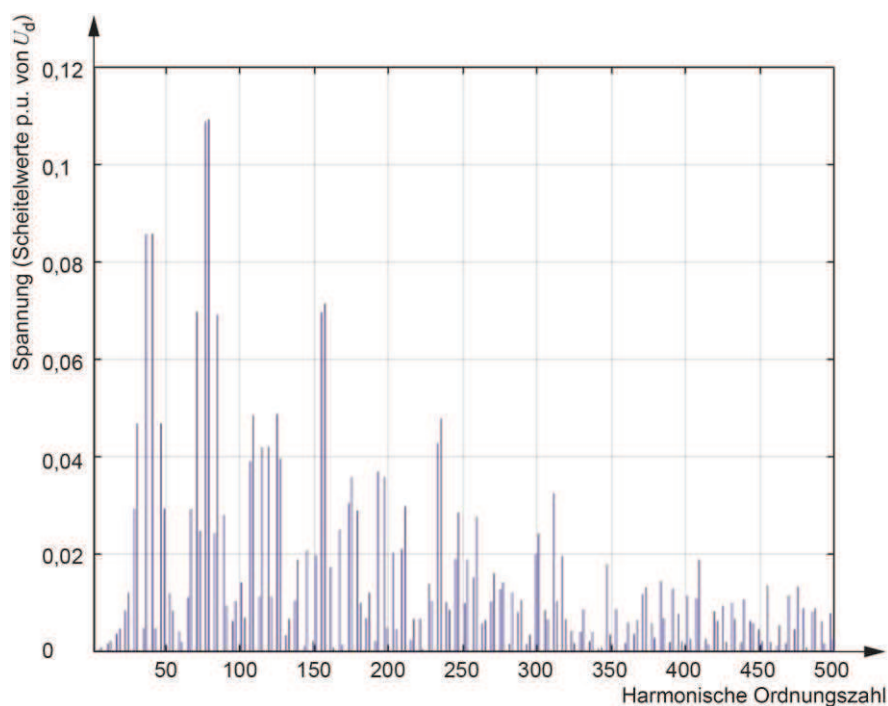


**Bild 25 – Erweitertes Oberschwingungsspektrum Leiter-Erde eines Dreipunktstromrichters mit einer Pulszahl von 39 nach Entfernung des Nullsystems**

### 5.3.3 Oberschwingungserzeugung von VSC mit Ventiltypen mit steuerbaren Spannungsquellen

#### 5.3.3.1 Allgemeines

Aufgrund der verteilten Stromrichterenergie kann ein VSC vom Typ steuerbarer Spannungsquellen durch sechs unabhängige Spannungsquellen dargestellt werden, wie in Bild 26 dargestellt. Zusätzlich zu dem Hauptzweck der Erzeugung von Wechsel- und Gleichspannungen für Wirk- und Blindleistungsfluss kann die Steuerung der Spannungsquelle für andere Zwecke verwendet werden, wie z. B. die Dämpfung von AC-Oberschwingungen oder den Energieausgleich des Stromrichters.

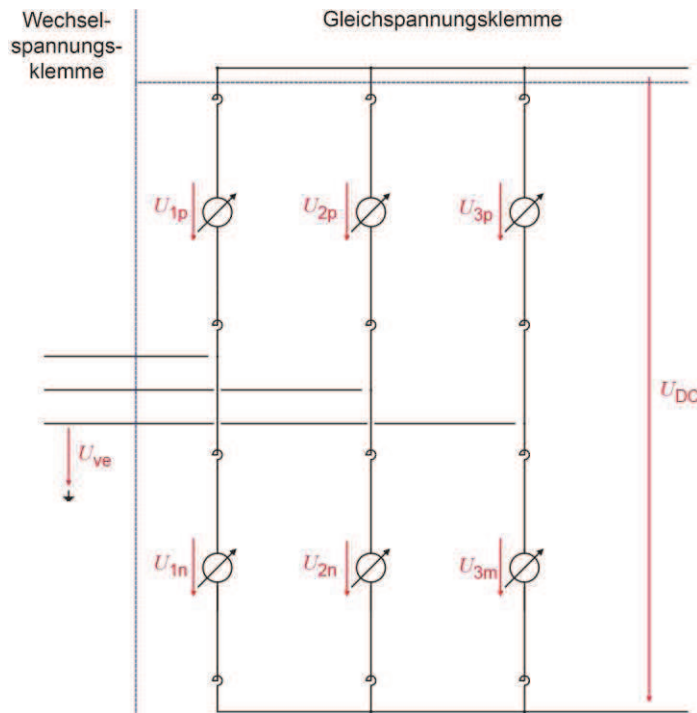


**Bild 26 – Spannungsquellendarstellung des MMC**

Die erforderliche Spannungsebene für jede einzelne Spannungsquelle wird von der Stromrichtersteuerung (Begriff nach IEC 62747 [16]) erzeugt und an die Ventilsteuerung gesendet.

#### 5.3.3.2 Herleitung der Oberschwingungen an den Stromrichterklennen

Für die Oberschwingungsanalyse muss jedes Stromrichterventil als unabhängige Oberschwingungsspannungsquelle betrachtet werden. Für die Oberschwingungsbestimmung an den AC- und DC-Klemmen des Stromrichters können die Spannungsquellen mit einer Transfermatrix,  $T_{B6\text{-Klemme}}$ , wie unten gezeigt übertragen werden:

$$\begin{pmatrix} U_{ve,1} \\ U_{ve,2} \\ U_{ve,3} \\ U_{DC,1} \\ U_{DC,2} \\ U_{DC,3} \end{pmatrix} = [T_{B6\text{-Klemme}}] \cdot \begin{pmatrix} U_{1p} \\ U_{2p} \\ U_{3p} \\ U_{1n} \\ U_{2n} \\ U_{3n} \end{pmatrix}$$

### 5.3.3.3 Modularer Mehrpunktstromrichter (MMC)

Jede Spannungsquelle verfügt über eine eigene Ventilsteuerung, die völlig unabhängig von anderen Steuergeräten arbeiten kann. Der Hauptzweck der Ventilsteuereinheit besteht darin, durch Schalten der Submodule den erforderlichen Spannungspegel aufzubauen. Die Entscheidung zum Umschalten basiert auf dem implementierten Musteralgorithmus. Die Schaltsignale werden dann an die Ventilbasiselektronik gesendet, die die einzelnen Halbleiter schaltet.

Die Stromrichtersteuerung kann die Oberschwingungserzeugung des MMC-Stromrichters beeinflussen. Normalerweise wird die Stromrichtersteuerung verwendet, um das Oberschwingungsverhalten zu verbessern, indem bestimmte Oberschwingungen an der AC-Klemme des Stromrichters ausgelöscht werden. Aufgrund der begrenzten Arbeitsgeschwindigkeit des Stromrichters und der Ventilsteuereinheit ist die maximale Oberschwingungsordnung, die von der Stromrichtersteuerung beeinflusst werden kann, begrenzt. Diese Begrenzung ist eine Funktion der Steuerungshardware und muss daher vom Stromrichterlieferanten definiert werden.

Eine übliche Schaltmustertechnik, die für die Stromrichtersteuerung von MMC-Stromrichtern verwendet wird, ist die Nearest Level Control (NLC). Die NLC-Technik kann komplexe Kriterien für das Schalten von Submodulen auswerten, was eine Verbesserung des Stromrichterverhaltens beispielsweise hinsichtlich Verlusten oder Oberschwingungen ermöglicht.

Um die MMC-Performance mit NLC zu beschreiben, werden der NLC-Algorithmus und die folgenden Parameter für die Auswertung der Oberschwingungserzeugung benötigt:

- Zeitschritt der Stromrichterregelung  $\Delta t_{CC}$ ;
- Zeitschritt der Ventilsteuerung  $\Delta t_{VC}$ ;
- Submodulspannung bei Schalthandlungen  $V_{SM}$ .

Die Ergebnisse der Spannungserzeugung durch den MMC-Stromrichter sind in Bild 27 dargestellt. Das ideale Spannungsreferenzsignal (rote Linie) wird durch das Stromrichtersteuerreferenzsignal (blaue Linie) in Abhängigkeit von der in der Steuerungshardware verwendeten Abtastrate angenähert. Die Modulspannung selbst (grüne Linie) wird beim Schalten der Submodule durch die Ventilsteuerung erzeugt.

In Bild 27 ist zu erkennen, dass die Stromrichtersteuerung und die Ventilsteuerung in unterschiedlichen Zeitschritten arbeiten. Die maximale Anzahl von Schaltereignissen während eines Zeitschritts der Stromrichtersteuerung hängt von der Hardware der Stromrichter- und Ventilsteuerung ab.

Je nach Submodulzustand und Stromrichtung können die Submodule entweder geladen oder entladen werden. Daher bleibt die Modulspannung zwischen den Schaltvorgängen nicht konstant, sondern ändert sich in Abhängigkeit von der Anzahl der eingeschalteten Submodule und dem Modulstrom.