

DIN IEC/TR 62001-4



ICS 31.160

**Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Systeme –
Anleitung für die Spezifikation und Auslegung von
Wechselstromfiltern –
Teil 4: Betriebsmittel
(IEC TR 62001-4:2021)**

High-voltage direct current (HVDC) systems –
Guidance to the specification and design evaluation of AC filters –
Part 4: Equipment
(IEC TR 62001-4:2021)

Gesamtumfang 91 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	7
Einleitung.....	8
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	9
4 Bemessung für den stationären Betrieb.....	9
4.1 Allgemeines	9
4.2 Berechnungsmethode	9
4.2.1 Allgemeines	9
4.2.2 Bereits vorhandene Oberschwingungen des Wechselstromsystems.....	11
4.2.3 Kombination von Stromrichter Oberschwingungen und bereits vorhandenen Oberschwingungen	12
4.2.4 Berechnungen der Betriebsmittelbemessung	12
4.2.5 Anwendung der Spannungsbemessungswerte	16
4.3 Wechselstromnetzbedingungen	16
4.4 Auswirkungen der Verstimmung.....	17
4.5 Netzimpedanz für Bemessungsberechnungen.....	17
4.6 Nichtverfügbarkeit	18
5 Transiente Beanspruchungen und Bemessung	18
5.1 Allgemeines	18
5.2 Untersuchungen zu Schaltstoßspannung	19
5.2.1 Einspeisung und Schalten	19
5.2.2 Fehler außerhalb des Filters.....	21
5.2.3 Fehler innerhalb des Filters	22
5.2.4 Transformator - Einschaltströme	23
5.3 Untersuchungen schneller Kurvenverläufen	23
5.3.1 Allgemeines	23
5.3.2 Blitzeinschläge.....	23
5.3.3 Untersuchungen zu Sammelschienenüberschlägen	23
5.4 Isolationskoordination	23
6 Verluste	25
6.1 Hintergrundinformationen	25
6.2 Verluste der Wechselstromfilterkomponenten.....	25
6.2.1 Allgemeines	25
6.2.2 Filter-/Parallelkondensatorverluste	26
6.3 Drossel- und Widerstandsverluste.....	27
6.3.1 Allgemeines	27
6.3.2 Verluste des Filterwiderstands	28
6.3.3 Verluste von Kompensationsdrosseln.....	29

6.4	Kriterien für die Bewertung der Verluste	29
6.4.1	Allgemeines	29
6.4.2	Grundfrequenz der Sammelschienenspannung des Wechselstromfilters	29
6.4.3	Grundfrequenz und Umgebungstemperatur	29
6.4.4	Oberschwingungsimpedanz des Wechselstromsystems	30
6.4.5	Vom Stromrichter erzeugte Oberschwingungsströme	30
6.4.6	Bereits vorhandene Oberschwingungsverzerrungen	31
6.4.7	Voraussichtliches Belastungsprofil der Stromrichterstation	31
7	Konstruktionsfragen und spezielle Anwendungen	31
7.1	Allgemeines	31
7.2	Aspekte zum Betriebsverhalten	32
7.2.1	Filterung von Oberschwingungen niedriger Ordnung und Resonanzbedingungen im Wechselstromsystem	32
7.2.2	Definition von Störfaktoren zur Erfassung von Oberschwingungen bis zu 5 kHz	33
7.2.3	Dreistufige abgestimmte Filterschaltungen	34
7.2.4	Wechselstrom-Oberschwingungsfilter an der Tertiärwicklung von Stromrichtertransformatoren	34
7.3	Bemessungsaspekte	35
7.3.1	Begrenzung hoher Oberschwingungsströme in Parallelresonanzkreisen von Filtern	35
7.3.2	Transiente Bemessungen von Parallelschaltungen in mehrstufig abgestimmten Filtern	36
7.3.3	Überlastungsschutz der Widerstände von Hochpass-Oberschwingungsfiltern	36
7.3.4	Kurzkupplung-Schaltung von Filtern oder Parallelkondensatoren	36
7.3.5	Kurzzeitige Überlastung - angemessene Festlegung von Anforderungen	37
7.3.6	Niederspannungs-Filterkondensatoren ohne Sicherungen	38
7.4	Filter für Sonderanwendungen	38
7.4.1	Oberschwingungsfilter zur Dämpfung transienter Überspannungen	38
7.4.2	Nichtlineare Filter für Oberschwingungen niedriger Ordnung/transiente Überspannungen	39
7.4.3	Serienfilter für HGÜ-Stromrichterstationen	39
7.4.4	Umstimbare Wechselstromfilter	43
7.5	Auswirkungen einer neuen HGÜ-Station auf eine in der Nähe bestehende Station	43
7.6	Fragen der Redundanz und Ersatzteilversorgung	44
7.6.1	Redundanz von Filtern - Einsparungen bei Bemessung und Verlusten	44
7.6.2	Interne Filterredundanz	45
7.6.3	Ersatzteile	46
8	Schutzmaßnahmen	46
8.1	Überblick	46
8.2	Allgemeines	47
8.3	Gesamtschutz für Banken und Teilbanken	48
8.3.1	Allgemeines	48
8.3.2	Kurzschlusschutz	48
8.3.3	Überstromschutz	48

8.3.4	Thermischer Überlastungsschutz	49
8.3.5	Differentialschutz	49
8.3.6	Erdkurzschlusschutz	49
8.3.7	Überspannungs- und Unterspannungsschutz	50
8.3.8	Spezielle Schutzfunktionen und Oberschwingungsmessungen	50
8.3.9	Sammelschienen- und Leistungsschalterausfallschutz	50
8.4	Schutz der einzelnen Filterkomponenten	50
8.4.1	Unsymmetrieschutz für Filter- und Parallelkondensatoren	50
8.4.2	Schutz von Niederspannungsabstimmkondensatoren	52
8.4.3	Überlastschutz und Erkennung von Filterverstimmungen	52
8.4.4	Temperaturmessung für den Schutz	52
8.4.5	Messung von Grundfrequenzkomponenten	53
8.4.6	Kondensatorsicherungen	53
8.4.7	Schutz und Bemessung von Messwandlern	53
8.4.8	Beispiele für Schutzanordnungen	54
8.5	Personenschutz	54
9	Akustisches Geräusch	57
9.1	Allgemeines	57
9.2	Schallerzeugende Komponenten von Wechselstromfiltern	57
9.3	Schallschutzanforderungen	59
9.4	Geräuschminderung	59
10	Erdbebenanforderungen	60
10.1	Allgemeines	60
10.2	Lastanforderungen	61
10.2.1	Erdbebenlasten	61
10.2.2	Zusätzliche Lasten	62
10.2.3	Qualität des Bodens	62
10.3	Zulassungsverfahren	62
10.3.1	Allgemeines	62
10.3.2	Zulassung durch analytische Methoden	62
10.3.3	Auslegungskriterien	63
10.3.4	Dokumentation für die Zulassung durch analytische Methoden	64
10.4	Beispiele für Verbesserungen bei der mechanischen Auslegung	64
11	Betriebsmittelauslegung und Prüfungsparameter	65
11.1	Allgemeines	65
11.1.1	Technische Informationen und Anforderungen	65
11.1.2	Technische Informationen, die vom Kunden bereitzustellen sind	65
11.1.3	Kundenanforderungen	65
11.1.4	Technische Informationen, die von den Anbietern vorzulegen sind	67
11.1.5	Bemessungswerte	67

11.2	Kondensatoren.....	68
11.2.1	Allgemeines	68
11.2.2	Aspekte der Auslegung	68
11.2.3	Elektrische Daten	71
11.2.4	Prüfungen	72
11.3	Drosseln	73
11.3.1	Allgemeines	73
11.3.2	Auslegungsaspekte.....	73
11.3.3	Elektrische Daten	74
11.3.4	Prüfungen	75
11.4	Widerstände.....	75
11.4.1	Allgemeines	75
11.4.2	Auslegungsaspekte.....	75
11.4.3	Elektrische Daten	76
11.4.4	Prüfungen	77
11.5	Überspannungsableiter	79
11.5.1	Allgemeines	79
11.5.2	Auslegungsaspekte.....	79
11.5.3	Elektrische Daten	80
11.5.4	Überspannungsableiter: Prüfungen	80
11.6	Messwandler.....	81
11.6.1	Spannungswandler	81
11.6.2	Stromwandler.....	81
11.7	Betriebsmittel zum Schalten von Filtern	83
11.7.1	Allgemeines	83
11.7.2	Auslegungsaspekte.....	84
11.7.3	Elektrische Daten	87
11.7.4	Prüfanforderungen	88
Anhang A (informativ) Beispiel für Erdbebenantwortspektren (aus IEEE Std 693-2005)		89
Literaturhinweise.....		90

Bilder

Bild 1 – Schaltung zur Bewertung der Bemessung	10
Bild 2 – Einschaltstrom in einem zweifach abgestimmten 12/24-Filter	20
Bild 3 – Spannung am Niederspannungskondensator eines zweifach abgestimmten 12/24-Filters beim Einschalten.....	20
Bild 4 – Spannung an der Hochspannungskondensatorbatterie eines zweifach abgestimmten 12/24- Filters unter Fehlerbedingungen	22
Bild 5 – Typische Anordnungen von Überspannungsableitern	24
Bild 6 – Nichtlineares Filter niedriger Ordnung für die HGÜ-Station Wien Süd-Ost.....	39
Bild 7 – Einstufig abgestimmtes Serienfilter und Impedanzdiagramm.....	40
Bild 8 – Dreistufig abgestimmtes Serienfilter und Impedanzdiagramm	40

Bild 9 – Serien- und Parallelschaltung Kombination von Wechselspannungsfilter in der HGÜ-Station Uruguiana	41
Bild 10 – Umstimmbarer Wechselstromfilterzweig	43
Bild 11 – Beispiel eines Schutzsystems für einen ungeerdeten Parallelkondensator	55
Bild 12 – Beispiel eines Schutzsystems für einen C-Filter	56
Bild 13 – Stromspektrum	58
Bild 14 – Kraftspektrum	58
Bild 15 – Vergleich zwischen intern, schmelzsicherungslos und extern abgesicherten Kondensatoreinheiten	70
Bild A.1 – Erdbebenantwortspektren	89
Tabellen	
Tabelle 1 – Typische Verluste in einer Vollfilmkondensatoreinheit	26
Tabelle 2 – Elektrische Daten für Kondensatoren	71
Tabelle 3 – Elektrische Daten für Drosseln	74
Tabelle 4 – Elektrische Daten für Widerstände	76
Tabelle 5 – Elektrische Daten von Überspannungsableitern	80
Tabelle 6 – Elektrische Daten von Stromwandlern	82
Tabelle 7 – Elektrische Daten für Betriebsmittel zum Schalten von Filtern	87

Nationales Vorwort

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

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

Technische Reports sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

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

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

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

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

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

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

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

Einleitung

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

IEC TR 62001-1 – Überblick

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

IEC TR 62001-2 – 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, Betriebsmittelkonstruktion 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 speziellen Fragen der Auslegung von Wechselstromfiltern für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)Systeme mit Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC).

Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Systeme – Anleitung für die Spezifikation und Auslegung von Wechselstromfiltern – Teil 4: Betriebsmittel

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC TR 62001, der einen technischen Bericht darstellt, beinhaltet eine Anleitung zu den grundlegenden Daten von wechselstromseitigen Filtern für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-(HGÜ)Systemen und deren Komponenten, wie z. B. Bemessungswerte, Leistungsverluste, Auslegungsfragen und spezielle Anwendungen, Schutz, Erdbeschutzanforderungen, Betriebsmittelauslegung und Prüfparametern.

Dieses Dokument deckt die wechselstromseitige Filterung für den Frequenzbereich ab, der im Hinblick auf harmonische Verzerrungen und hörbare Frequenzstörungen von Interesse ist. Er schließt Filter aus, die für die Wirksamkeit im Frequenzbereich der Trägerfrequenzübertragung auf Hochspannungsleitungen (PLC en: power line carrier) und Funkstörungsbereich ausgelegt sind.

Er bezieht sich auf die konventionelle Wechselstromfiltertechnologie und die HGÜ mit netzgeführten Stromrichtern (LCC, en: line commutated converter), aber das meiste davon gilt für alle Filterbetriebsmittel für HGÜ mit Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC, en: voltage sourced converter).

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

In diesem Dokument werden keine Begriffe aufgeführt.

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

- ISO Online browsing platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

4 Bemessung für den stationären Betrieb

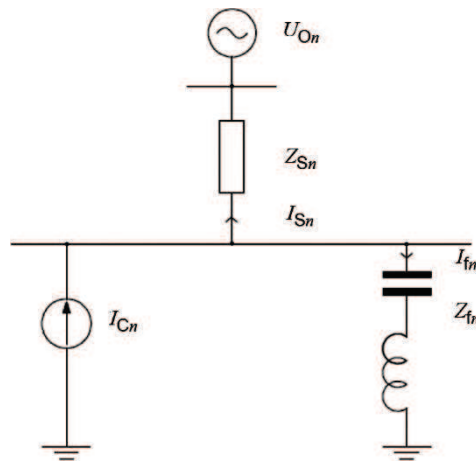
4.1 Allgemeines

Die Berechnung der Bemessungswerte der Betriebsmittel für Oberschwingungsfilter für den stationären Betrieb liegt in der Verantwortung des Auftragnehmers. Abschnitt 4 enthält eine Anleitung zur Berechnung der Bemessungsparameter der Betriebsmittel und zu den verschiedenen Faktoren, die bei den Untersuchungen zu berücksichtigen sind. Es liegt in der Verantwortung des Auftraggebers, die entsprechenden System- und Umgebungsdaten zur Verfügung zu stellen und auch die zu berücksichtigenden Betriebsbedingungen, wie z. B. Filterausfälle und Netzstörungen, zu klären.

4.2 Berechnungsmethode

4.2.1 Allgemeines

Die Bemessung von Filterbetriebsmitteln für ein LCC-HGÜ-System für den stationären Betrieb basiert auf der Berechnung der folgenden Schaltung, die den HGÜ-Stromrichter, die Filterbatterien und das Wechselstromversorgungssystem darstellt. Siehe Bild 1.



ANMERKUNG Die in diesem Bild verwendeten Symbole werden in der Legende zu Formel (1) erläutert.

Bild 1 – Schaltung zur Bewertung der Bemessung

Der im Filter fließende Oberschwingungsstrom setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, dem Anteil des HGÜ-Stromrichters und dem Anteil des Wechselstromversorgungsnetzes.

Mit Hilfe des Überlagerungsprinzips können die Formeln (1) und (2) verwendet werden, um den Beitrag dieser beiden Quellen zum Oberschwingungsstrom des Filters der Ordnung n zu ermitteln.

a) HGÜ-Stromrichter:

$$I_{fn}^i = \frac{Z_{sn}}{Z_{sn} + Z_{fn}} \cdot I_{cn} \quad (1)$$

Dabei ist

I_{fn}^i der Oberschwingungsstrom des Filters aus dem Stromrichter;

I_{cn} der Oberschwingungsstrom des Stromrichters;

I_{sn} der Oberschwingungsstrom des Systems;

Z_{fn} die Oberschwingungsimpedanz des Filters;

Z_{sn} die Oberschwingungsimpedanz des Wechselstromversorgungsnetzes.

b) Wechselstromversorgungsnetz:

$$I_{fn}^{ii} = \frac{U_{on}}{Z_{sn} + Z_{fn}} \quad (2)$$

Dabei ist

I_{fn}^{ii} der Filteroberschwingungsstrom des Systems;

U_{on} die vorhandene Oberschwingungsspannung des Systems.

Die Definition der Oberschwingungsimpedanz des Wechselstromversorgungsnetzes ist in 4.5 beschrieben.

Um Formel (1) und Formel (2) zu lösen, müssen die folgenden unabhängigen Variablen bekannt sein.

- Der vom Gleichrichter oder Wechselrichter der HGÜ-Station erzeugte Oberschwingungsstrom (I_{cn}). Er wird für alle Oberschwingungen berechnet (siehe IEC TR 62001-1 [1]¹ oder CIGRE Technical Brochure 754 [2] für VSC mit einer Oberschwingungsspannungsquelle). Diese Bewertung sollte die ungünstigsten Betriebsbedingungen berücksichtigen, die im stationären Betrieb auftreten können, d. h. für Zeiträume von mehr als 1 Minute. Der extreme Toleranzbereich von Schlüsselparametern, z. B. Stromrichter-Transformatorimpedanzen oder Betriebsbereich des Stufenschalters, muss berücksichtigt werden. Oberschwingungs-Wechselwirkungsphänomene, wie sie in IEC TR 62001-3 [3] diskutiert werden, sollten ebenfalls berücksichtigt werden.
- Die bereits vorhandene Oberschwingungsspannung des Systems, wie in 4.2.2 beschrieben.
- Die Oberschwingungsimpedanz des Wechselstromnetzes (Z_{sn}), wie in IEC TR 62001-1 [1] beschrieben. Zu beachten ist, dass für die Berechnung von I_{fn}^i und I_{fn}^{ii} unterschiedliche Werte von Z_{sn} definiert werden können, je nachdem, wie die bereits vorhandene Oberschwingungsverzerrung angegeben wird (siehe 4.2.3).

Die Oberschwingungsimpedanz des Filters (Z_{fn}) muss die in Abschnitt 4.4 erörterten Verstimmungs- und Toleranzfaktoren berücksichtigen.

Im Falle einer HGÜ-Übertragungsleitung, die zwei Wechselstromsysteme mit unterschiedlichen Grundfrequenzen verbindet, und insbesondere, wenn es sich bei der Übertragungsleitung einer Kurzkupplung-Station handelt, können beide Stromrichter auf ihren Wechselstromseiten Ströme mit anderen Frequenzen als Oberschwingungen der Grundschwingung erzeugen. Die Grundfrequenzen können entweder nominell unterschiedlich sein, z. B. 50 Hz und 60 Hz, oder sie können nominell identisch sein, sich aber zeitweise um bis zu 1 Hz oder 2 Hz unterscheiden. Diese zusätzlich erzeugten Verzerrungen (Zwischenharmonische) liegen bei Frequenzen die Oberschwingungen der Grundfrequenz des entfernten Wechselstromsystems sind, und werden über die Übertragungsleitung weitergeleitet. Zwischenharmonische Verzerrungen können zu spezifischen Problemen führen, die bei echten Oberschwingungen nicht auftreten, wie beispielsweise zu

- a) Störungen bei Rundsteuersystemen, und
- b) Lichtflimmern aufgrund der niederfrequenten Amplitudenmodulation, die durch die Überlagerung einer Oberschwingungsfrequenz mit einer benachbarten Zwischenharmonischen verursacht wird.

BEISPIEL Ein 10-Hz-Flimmern aufgrund der Wechselwirkung einer 13. Oberschwingung von 650 Hz eines 50-Hz-Systems mit der 11. Oberschwingung von 660 Hz eines 60-Hz-Systems.

Die Auswirkung von Zwischenharmonischen (siehe IEC TR 62001-1 [1]) sollte, auch wenn sie gering ist, bei der Berechnung der Bemessungsdaten von Filterkomponenten ebenfalls berücksichtigt werden.

4.2.2 Bereits vorhandene Oberschwingungen des Wechselstromsystems

Es ist wichtig, dass die Auswirkungen bereits vorhandener Oberschwingungsverzerrungen auf das Wechselstromsystem in die Berechnungen der Filterbemessung einbezogen werden. In vielen frühen HGÜ-Projekten wurde dies nicht durch direkte Berechnung, wie in 4.2.1 gezeigt, sondern durch die Schaffung einer willkürlichen Marge von 10 % bis 20 % Erhöhung der Oberschwingungsströme (I_{cn}) des Stromrichters berücksichtigt. Ein solcher Ansatz spiegelt jedoch möglicherweise die Verzerrungen niedriger Ordnung (typischerweise 3., 5. und 7.), die in vielen Stromnetzen auftreten, nicht angemessen wider. Da moderne Stromrichterstationen nur geringe Mengen solcher Oberschwingungen niedriger Ordnung erzeugen, kann eine einfache Anhebung des Betrags ihren potenziellen Beitrag zur Filterbemessung nicht angemessen widerspiegeln.

Die Modellierung einer Vielzahl von Oberschwingungsstromquellen in einem detaillierten Netzversorgungsmodell ist für die Zwecke der Filterauslegung unpraktisch. Häufig wird eine äquivalente Thévenin-Spannungsquelle hinter der Impedanz des Wechselstromnetzes modelliert, wie in Bild 1 dargestellt, um eine Leerlaufspannungsverzerrung an der Filtersammelschiene zu erzeugen, d. h. das Niveau der Verzerrung vor dem Anschluss der Filter. Die Amplitude der einzelnen Oberschwingungsspannungen kann auf Messungen oder auf den festgelegten Betriebsgrenzen beruhen, wird aber durch einen Wert für die gesamte harmonische

¹ Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis.

Verzerrung begrenzt. Dieser Ansatz ermöglicht eine realistischere Bewertung des Beitrags zur Betriebsmittelbemessung, der durch die Verzerrungspegel der Umgebung verursacht wird.

IEC TR 61001-3 [3] enthält eine ausführliche Diskussion über alternative Möglichkeiten zur Berücksichtigung von bereits vorhandenen Oberschwingungen.

4.2.3 Kombination von Stromrichter Oberschwingungen und bereits vorhandenen Oberschwingungen

Da es keine feste vektorielle Beziehung zwischen I_{fn}^i und I_{fn}^{ii} gibt, besteht eine Möglichkeit darin, dass diese einzelnen Beiträge zur Filterbewertung auf Basis der Effektivwerte (RSS, en: root sum square) bei jeder Oberschwingung summiert werden:

$$I_{fn} = \sqrt{I_{fn}^i{}^2 + I_{fn}^{ii}{}^2} \quad (3)$$

Alternativ kann auch das allgemeine Summationsgesetz aus der IEC 61000-3-6 [4] verwendet werden.

Für bereits vorhandene Oberschwingungen mit relativ geringer Amplitude ist die RSS-Summierung sinnvoll, da einige Oberschwingungen in Phase sein können und andere nicht, und da sich diese Beziehungen mit der Zeit und den Betriebsbedingungen ändern.

Alternativ würde eine lineare Addition eine größere Sicherheit gegen die Möglichkeit bieten, dass die Beiträge bei einer bedeutenden Frequenz annähernd gleichphasig sind, würde aber einen Kostenanstieg mit sich bringen, insbesondere wenn sie für die Spannungsbemessung der Hochspannungskondensatoren verwendet wird.

Eine lineare Addition sollte für jede bereits vorhandene einzelne Oberschwingung in Betracht gezogen werden, die eine so hohe Amplitude erreicht, dass die lineare Addition den Bemessungsstrom der Bauteile erheblich beeinflussen würde. Wenn die beiden Quellen in der Praxis für eine gewisse Zeit gleichphasig sind, könnte das Filter sonst einen Überstromschutz auslösen. Wenn die lineare Addition verwendet werden soll, sollte darauf geachtet werden, dass die Bedingungen, unter denen die beiden Ströme berechnet werden, übereinstimmen, d. h. dass die berechneten Ströme in der Praxis gleichzeitig auftreten können.

4.2.4 Berechnungen der Betriebsmittelbemessung

4.2.4.1 Allgemeines

Der Gesamtfilterstrom wird, wie in 4.2.3 beschrieben, für jede Oberschwingungsordnung von signifikanter Amplitude ermittelt. Traditionellerweise wurde für LCC HGÜ-Systeme die maximale Oberschwingungsordnung im Allgemeinen mit 49 oder 50 angenommen. Mit der zunehmenden Verbreitung von leistungselektronischen Betriebsmitteln können jedoch auch höhere Werte für die maximale Oberschwingungsordnung in Betracht gezogen werden. Für LCC ist es wichtig, dass dieser Bereich abgedeckt wird, um sicherzustellen, dass alle Resonanzbedingungen zwischen den Filtern und dem Wechselstromnetz sowie zwischen verschiedenen Filtern angemessen berücksichtigt werden.

Durch die Berechnung von I_{fn} für jedes angeschlossene Filter kann das Spektrum der Oberschwingungsströme in jedem Zweig des Filters bewertet werden. Aus diesen Stromdaten lassen sich die Bemessungswerte der einzelnen Filterelemente berechnen.

4.2.4.2 Kondensatoren

Aus dem Spektrum der Ströme in der Kondensatorbatterie (I_{fcn}) lässt sich der Effektivwert (RSS) des Gesamtstromes berechnen als

$$I_c = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (I_{fcn})^2} \quad (4)$$

Die Durchführungen der Kondensatoreinheiten sind typischerweise der begrenzende Faktor für den Strom der Kondensatoreinheiten. Die Amplituden des Spektrums der wichtigsten Oberschwingungsströme sollten spezifiziert werden.

Da die Spannungsbemessung der Hochspannungskondensatoren der wichtigste Faktor bei der Bestimmung der Gesamtkosten der Wechselstromfilter ist, sollte die Frage, welche Formel zur Ermittlung dieser Bemessung verwendet wird, sorgfältig geprüft werden. In der Vergangenheit gab es viele Diskussionen zwischen Versorgungsunternehmen, Beratern und Herstellern über diesen Punkt. Die konservativste Annahme bei der Ermittlung der Gesamtbemessungsspannung wäre die Annahme, dass die Resonanz des Wechselstromsystems bei allen Oberschwingungen auftritt und dass alle Oberschwingungen in Phase sind. Die Verwendung dieser Annahme für einen HGÜ-Filterkondensator würde jedoch zu einem teuren Entwurf mit einer großen Spanne zwischen der Bemessungsspannung und dem, was in der Realität auftreten würde, führen. In der Praxis kann es bei einigen Oberschwingungsfrequenzen zu einer Verstärkung aufgrund der Resonanz des Filter- Wechselstrom-Systems kommen, bei den meisten jedoch nicht. Ebenso können einige Oberschwingungen unter bestimmten Betriebsbedingungen in Phase sein, aber im Allgemeinen haben die Oberschwingungen eine unvorhersehbare Phasenbeziehung. Daher haben HGÜ-Nutzer und -Hersteller andere Ansätze formuliert, um eine angemessene Auslegung zu vertretbaren Kosten sicherzustellen.

Es handelt sich also um eine Abwägung zwischen dem wahrgenommenen Risiko und den Kosten, und aufgrund der Vielfalt der bestehenden Meinungen ist es nicht möglich, hier eine klare Empfehlung abzugeben. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze erörtert. Alle wurden in der Praxis bei verschiedenen HGÜ-Systemen erfolgreich eingesetzt.

Bei dem konservativsten Ansatz kann die maximale Spannung (U_m) als arithmetische Summe der einzelnen Oberschwingungen und der Grundschwingung berechnet werden, d. h.

$$U_m = \sum_{n=1}^{n=N} I_{fcn} \cdot X_{fcn} \quad (5)$$

Dabei ist

X_{fcn} die harmonische Impedanz der Ordnung n der Kondensatorbatterie.

Eine solche Bewertung, insbesondere wenn sie auf der gleichzeitigen Resonanz zwischen den Filtern und dem Wechselstromsystem bei allen Oberschwingungen beruht, ist jedoch übermäßig unrealistisch, da sie davon ausgeht, dass alle Oberschwingungen in Phase sind, und führt zu einer teuren Kondensatorauslegung.

Eine realistischere Methode ist die Verwendung von Formel (5), wobei jedoch davon ausgegangen wird, dass nur eine begrenzte Anzahl von Oberschwingungen als in Resonanz befindlich betrachtet wird (z. B. die beiden größten Beiträge) und alle anderen Oberschwingungen gegen ein leerlaufendes System oder eine feste Impedanz bewertet werden. Bei dieser Methode wird jedoch immer noch davon ausgegangen, dass alle Oberschwingungen in Phase sind, was in der Praxis nicht der Fall sein wird.

In einem weiteren Ansatz wird davon ausgegangen, dass alle Oberschwingungen in Resonanz sind, aber Formel (5) wird so geändert, dass nur die Grundschwingung und die größte Oberschwingung arithmetisch summiert werden. Alle anderen Oberschwingungskomponenten der Spannung werden auf Effektivwert (RSS)-Basis summiert und arithmetisch zur Summe der Grundschwingung und der größten Oberschwingungskomponente addiert, um U_m zu bewerten. Diese "quasi-quadratische" Summierung berücksichtigt also die natürliche Phasenwinkelvielfalt zwischen den einzelnen Oberschwingungskomponenten:

$$U_m = U_1 + U_{no} + \sqrt{\sum_{n=2}^{n=N} U_n^2} \quad (6)$$

Dabei ist

U_1 die Grundschiwingung;

U_{no} die größte Komponente aller Oberschwingungsspannungen;

U_n die einzelnen Oberschwingungskomponenten der Ordnung n mit Ausnahme der größten Komponente.

Dies kann noch einen Schritt weitergehen, indem nur die Grundschiwingung zur RSS-Summe aller Oberschwingungskomponenten hinzugefügt wird, wobei wiederum von Resonanz bei allen Frequenzen ausgegangen wird.

$$U_m = U_1 + \sqrt{\sum_{n=2}^{n=N} U_n^2} \quad (7)$$

Diese Methode ist weniger konservativ als die in Formel (5) oder Formel (6) verwendete, wurde aber in der Praxis weitgehend angewendet und hat sich als angemessen erwiesen. Die Annahme der Resonanz bei allen Oberschwingungen und die Anwendung von ungünstigsten Annahmen bezüglich der Toleranzen in den Berechnungen bieten einen gewissen Freiraum bei der Kondensatorbemessung, von dem angenommen wird, dass die Summierung der Phasoren (komplexe Amplituden) stärker ausfällt als in Formel (7) angenommen wird.

Da Kondensatoren, die nach bestimmten internationalen Normen hergestellt werden, eine Dauerüberspannungsfestigkeit von bis zu 10 % aufweisen, ist es zulässig, für die Kondensatorbatterie eine Bemessungsspannung (U_N) festzulegen, die bis zu 10 % unter U_m liegt, d. h.

$$U_N = U_m / (1,0 - 1,1) \quad (8)$$

Der nach Formel (8) berechnete Wert von U_N sollte jedoch mindestens gleich der maximalen Grundfrequenzspannung an der Kondensatorbatterie sein. Ist dies nicht der Fall, dann sollte die zugewiesene U_N die maximale Grundfrequenzspannung sein.

ANMERKUNG In den obigen Definitionen wird U_n zur Bezeichnung einer Oberschwingungskomponente ($n = 1$ bis N) und U_N zur Bezeichnung der Nennspannung der Kondensatorbatterie (nach IEC 60871-1 [5]) verwendet.

Wenn Niederspannungskondensatorbatterien in Filtern installiert sind, z. B. in Zweifach- oder Dreifach-Frequenzfiltern, sind die wie oben berechneten Bemessungsspannungen möglicherweise nicht geeignet. Für solche Batterien muss die Bemessungsspannung möglicherweise erhöht werden, um sicherzustellen, dass die Batterien den transienten Belastungen standhalten können, wie in 5.4 beschrieben.

Aus dem Spektrum der Oberschwingungsströme lässt sich die entsprechende "thermische" Blindleistung des Kondensators (einphasig) berechnen als

$$Q_c = \sum_{n=1}^{n=N} I_{fcn}^2 \cdot X_{fcn} \quad (9)$$

Die Bemessungsblindleistung des Kondensators (einphasig) basiert auf der Bemessungsspannung (U_N) und der Grundfrequenzimpedanz (X_{fc1}) als

$$Q'_c = U_N^2 / X_{fc1} \quad (10)$$

Aufgrund der arithmetischen oder "quasi-quadratischen" Addition der Oberschwingungsspannungen in Formel (14) ist Q'_c normalerweise größer als Q_c . In Fällen, in denen die Oberschwingungsströme im Vergleich zum Grundschwingungsstrom groß sind, kann Q_c jedoch Q'_c übersteigen. In solchen Fällen muss möglicherweise eine erhöhte Bemessungsspannung angegeben werden, so dass $Q'_c = Q_c$ ist. In der Praxis kann dies durch die Angabe der Beträge der wichtigsten einzelnen Oberschwingungsströme gelöst werden.

4.2.4.3 Drosselspulen

Das Spektrum der Oberschwingungsströme (I_{fn}) und der gesamte RSS-Oberschwingungsstrom müssen dem Hersteller mitgeteilt werden, um sicherzustellen, dass eine angemessene thermische Auslegung erreicht wird und die Grundlage der thermischen Typprüfungen korrekt bewertet wird. Die Bemessung der Drossel basiert auf

$$I_i = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} I_{fn}^2} \quad (11)$$

$$Q_l = \sum_{n=1}^{n=N} I_{fn}^2 \cdot X_{fn} \quad (12)$$

Dabei ist

X_{fn} die Oberschwingungsimpedanz der Ordnung n der Drossel.

Um sicherzustellen, dass die Oberflächenbeanspruchung über der Drossel die Auslegungsfähigkeit nicht übersteigt, sollte die Bemessungskriechspannung über der Drossel angegeben werden als

$$U_l = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (I_{fn} \cdot X_{fn})^2} \quad (13)$$

Beim regelmäßigen Schalten und wenn das Filter kurzzeitigen Spannungsschößen ausgesetzt ist, können an den Drosseln sehr hohe transiente Spannungen auftreten. Diese müssen bei der Auslegung der Drossel berücksichtigt und somit in die Betriebsmittelspezifikation aufgenommen werden.

4.2.4.4 Widerstände

Die Wärmebelastung durch den Strom kann aus dem Spektrum der Oberschwingungsströme (I_{fn}) ausgedrückt werden als

$$I_r = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} I_{fn}^2} \quad (14)$$

Die Leistungsbemessung des Widerstands ergibt sich demnach aus der Formel

$$P_r = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} I_{frn}^2 \cdot R} \quad (15)$$

Um sicherzustellen, dass die Widerstandselemente und die Isolation der Batterie keine Überschlüge aufgrund der angelegten Spannung erleiden, sollte die Bemessungskriechspannung über dem Widerstand angegeben werden als

$$U_r = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (I_{frn} \cdot R_{frn})^2} \quad (16)$$

Diese Formel für U_r sollte die Grundlage für die Bestimmung der Kriechstrecke für die Isolation der internen Widerstandshalter bilden (siehe auch 4.2.5). Obwohl die Wahl einer arithmetischen Summierung von Grund- und Oberschwingungsspannungen unangemessen vorsichtig zu sein scheint und im Widerspruch zum allgemeinen Ansatz für die Kriechstrecken von Isolatoren steht, sind die internen Isolatoren ungewöhnlichen Betriebsbedingungen ausgesetzt. Die Auswirkungen der Luftverschmutzung können zu erheblichen Ablagerungen auf den Isolatoroberflächen führen, die nicht durch Regenfälle abgewaschen werden können. Während des normalen Betriebs sind die Isolatoren erhöhten Temperaturen ausgesetzt, typischerweise 100 °C bis 300 °C, was das Risiko von Oberflächenüberschlägen erhöht. Die Wartung wurde in der Regel jährlich durchgeführt, aber einige Kunden arbeiten mit Wartungsintervallen von bis zu 3 Jahren. Daher kann ein konservativer Ansatz auf der oben genannten Grundlage für die interne Isolationskriechstrecke erforderlich sein.

Beim regelmäßigen Schalten von Dämpfungsfiltren und bei kurzzeitigen Spannungsschößen, wie in Abschnitt 5 beschrieben, können die Widerstände sehr hohen Belastungen ausgesetzt sein. Es ist notwendig, dass diese vorhersehbaren Belastungen in die Betriebsmittelspezifikation aufgenommen werden.

4.2.5 Anwendung der Spannungsbemessungswerte

Die oben definierten Spannungsbemessungswerte für die Betriebsmittel können verwendet werden, um das Mindestniveau der höchsten Dauerbetriebsspannung (MCOV, en: maximum continuous operating voltage) für Überspannungsableiter zu definieren. Die volle Beanspruchung der Überspannungsableiter wird anhand der in Abschnitt 5 beschriebenen Untersuchungen ermittelt.

Die Verwendung der arithmetischen oder quasi-arithmetischen Summierung von Grund- und Oberschwingungsspannungen für einzelne Betriebsmittel soll Sicherheit gegen Belastungszustände bieten, die nur für kurze Zeiträume auftreten können.

Es wäre jedoch unangemessen pessimistisch, wenn diese Spannungen die Grundlage für die Berechnung der Kriechstrecken der äußeren Isolierung bilden würden. Die für die Berechnung der Gesamtkriechstrecke zu verwendende Spannung sollte die quadratische Summe der Grund- und Oberschwingungsspannungen im stationären Zustand sein. Auf diese Weise würden an verschiedenen Stellen innerhalb eines Filters mit abgestufter Isolierung unterschiedliche äußere Kriechstrecken ermittelt werden.

4.3 Wechselstromnetzbedingungen

Filterbetriebsmittel sollten für den Betrieb im stationären Spannungsbereich des Wechselstromnetzes bemessen sein, typischerweise 0,95 p.u. (pro Einheit) bis 1,05 p.u. des Nennwerts in einem Hochspannungsnetz. Bei Spannungsausschlägen, die diesen Wert überschreiten, sollte die Dauer der Überspannung angegeben werden.

4.4 Auswirkungen der Verstimmung

Um sicherzustellen, dass die Bemessung der Filterbetriebsmittel für einen lebenslangen Betrieb ausreicht, müssen die folgenden Faktoren berücksichtigt werden.

- Betriebsmitteltoleranzen: Für die Untersuchungen zur Bemessung sollte der äußerste garantierte Toleranzbereich verwendet werden. Im Gegensatz zu anderen hier betrachteten Auswirkungen, die zyklischen Schwankungen unterworfen sind, bleiben alle Auswirkungen aufgrund von Fertigungstoleranzen während der gesamten Lebensdauer des Betriebsmittels bestehen.
- Frequenzschwankungen: Während normale erwartete Frequenzschwankungen für das Betriebsverhalten herangezogen werden sollten, sollten extreme Schwankungen für die Bemessung berücksichtigt werden. Diese extremen Bedingungen können als kontinuierlich oder für bestimmte Zeiträume angegeben werden. Erstere definieren kontinuierliche Bemessung, während letztere kurzzeitige Überlastungen definieren.
- Temperaturschwankungen: Während die maximale und minimale Durchschnittstemperatur für das Betriebsverhalten berücksichtigt werden sollte, sollten die absoluten Höchst- und Tiefsttemperaturen für die Bemessung der Betriebsmittel berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, wirkt sich die Temperatur auf den Kapazitätswert aus und wird somit das Filter verstimmen. Darüber hinaus sind kalte Temperaturbedingungen für Kondensatorbatterien von besonderer Bedeutung, vor allem im Hinblick auf die Einschaltbedingungen.
- Abgriffsposition an Drosseln: An Drosselspulen für abgestimmte Filter sind häufig einstellbare Abgriffe vorgesehen, um Auswirkungen der Kondensator toleranz auszugleichen. Die Auswirkung der Abgriffsposition auf die Abstimmung des Filters und seine anschließende Bemessung sollte berücksichtigt werden.
- Systeme zur Erkennung des Ausfalls von Kondensatoreinheiten haben normalerweise drei Stufen: nur Alarm (1. Stufe), Alarm plus drohende zeitliche Auslösung (2. Stufe) und unverzögerte Auslösung (3. Stufe). Die Bemessung der Kondensatorbatterie ist für den Belastungszustand beim Betrieb in der zweiten Alarmstufe vorgesehen. In einigen Fällen wird nur ein zweistufiges System eingesetzt, und die Bemessung braucht nur die erste Alarmstufe berücksichtigen.
- Wenn mehrere abgestimmte Filtergruppen desselben Typs installiert werden, ist es wichtig, mögliche Kreisströme zwischen den Gruppen aufgrund von Unterschieden in der Abstimmung zu berücksichtigen. Solche Ströme müssen bei der Bemessung von Filterbetriebsmitteln berücksichtigt werden. Bei geeigneter Auslegung des Filters können jedoch Maßnahmen zur Beherrschung dieser Auswirkung, wie z. B. die Verwendung von Parallelschienen, eingesetzt werden.

4.5 Netzimpedanz für Bemessungsberechnungen

Die Darstellung der Oberschwingungsimpedanz (Z_{Sn}) des Wechselstromnetzes für die Bemessung von Betriebsmitteln sollte sich von der Darstellung für Vorhersagen des Betriebsverhaltens unterscheiden. Wie in IEC TR 62001-1 [1] erörtert, kann eine Reihe verschiedener geometrischer Formen verwendet werden, um die Oberschwingungsimpedanz für Untersuchungen des Betriebsverhaltens zu definieren. Diese Daten sollten alle normalen und plausiblen Netzbetriebs- und Lastbedingungen abdecken, die während der Lebensdauer des Betriebsmittels zu erwarten sind. Für Bemessungsuntersuchungen kann ein breiterer Bereich von Netzbedingungen verwendet werden, um sicherzustellen, dass die Bemessungswerte der Betriebsmittel für die voraussichtliche Lebensdauer angemessen sind. Dies kann durch die Festlegung größerer Prüfbereiche und/oder größerer Systemwinkel erreicht werden. Es ist wichtig sicherzustellen, dass realistische Werte für den Mindestwiderstand berücksichtigt werden, um das Auftreten ungedämpfter Resonanzbedingungen zu vermeiden.

Die genaue Angabe der Netzbereichs-impedanz durch den Kunden hat einen direkten Einfluss auf die Bemessungsdaten und damit auf die Kosten der Filterbetriebsmittel.

In einigen Fällen kann die Nullimpedanz des Systems erforderlich sein, um die Unsymmetrie der Spannung auf der Stromrichtersammelschiene nach unsymmetrischen Fehlern, wie z. B. einem Fehler zwischen Leitung und Erde, zu bewerten. Die sich daraus ergebende Gegenspannungskomponente wird für die kurzzeitige (0,1 s bis 1,5 s, je nach Philosophie des Netzschutzes und der Wiedereinschaltautomatik) Bemessung von Oberschwingungsfiltern niedriger Ordnung, hauptsächlich der dritten, verwendet.

4.6 Nichtverfügbarkeit

Das Filterbetriebsmittel ist so bemessen, dass es der erhöhten Oberschwingungsbelastung standhält, die auftritt, wenn eine bestimmte Anzahl von Filtern außer Betrieb ist. Die spezifische Ausfallanforderung ist von Projekt zu Projekt unterschiedlich und hängt von der Anzahl der verfügbaren Filter und dem erforderlichen Grad der Leistungsübertragung ab. In der Regel sollte der Ausfall eines geschalteten Filters oder einer Filtergruppe nicht zu einer Überlastung der verbleibenden Filter führen oder eine Reduzierung der Leistungsübertragung erforderlich machen. Fällt ein Filter oder eine Filtergruppe wegen Wartungsarbeiten aus und kommt es bei einem zweiten Filter oder einer zweiten Filtergruppe zu einer Auslösung, reduziert das Stromrichtersteuerungssystem in der Regel die Gleichstromleistung, um eine Überlastung der Filter und damit Kaskadenauslösungen zu verhindern. In der Spezifikation sollten die spezifischen Ausfallkriterien des Kunden klar definiert werden, die von den Auftragnehmern bei der Ausarbeitung des Angebots zu beachten sind.

Um die Kosten zu vermeiden, die mit der Installation redundanter Filter verbunden sind oder der Bemessung von Filterbetriebsmitteln für Filterausfälle, kann der Kunde eine Reduzierung der übertragenen Gleichstromleistung zulassen, um eine Überlastung der Filter zu vermeiden. Eine solche Strategie kann die Filterkosten erheblich senken, vor allem bei Systemen mit relativ geringer Leistung, bei denen die Anzahl der installierten Filter gering ist.

In Fällen, in denen geschaltete Filter als Teil der Blindleistungsregelung eingesetzt werden, sollte das Filterbetriebsmittel für alle in Frage kommenden Schaltstrategien bemessen sein.

5 Transiente Beanspruchungen und Bemessung

5.1 Allgemeines

Zusätzlich zur stationären Grund- und Oberschwingungsbelastung werden Oberschwingungsfilter transienten Belastungen durch eine Vielzahl von Störgrößen ausgesetzt. Diese Bedingungen müssen untersucht werden, um sicherzustellen, dass die Belastungsfähigkeit des Betriebsmittels ausreicht, um die überlagerte transiente Belastung zu verarbeiten.

Für derartige Untersuchungen wird ein Rechnerprogramm zur Transientenanalyse benötigt, um die Systemparameter zu modellieren, einschließlich nichtlinearer Aspekte wie die Sättigung des Transformators und die Eigenschaften des Überspannungsableiters. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, ob die berechneten Belastungen die Leistungsfähigkeit des Betriebsmittels übersteigen. In solchen Fällen muss die Bemessung des Betriebsmittels erhöht werden, um die vorhergesagte Belastung zu bewältigen. Alternativ können Überspannungsableiter eingesetzt werden, um die transiente Belastung des Betriebsmittels zu begrenzen. Die Untersuchungen sollten darauf abzielen, das Schutzniveau in Bezug auf die Bemessungsspannung des Überspannungsschutzbetriebsmittels und die Bemessungsenergie des Überspannungsableiters zu bestimmen.

Gegebenenfalls müssen die Ergebnisse solcher Untersuchungen Teil der Spezifikationen des Betriebsmittels sein und können auch als Grundlage für die Abnahmeprüfungen dienen.

Bei zweifach abgestimmten Filtern deuten die Ergebnisse von Transientenuntersuchungen in der Regel darauf hin, dass die Bemessungswerte der Niederspannungsfilterkomponenten, die auf einer stationären Belastung beruhen, unzureichend sind und dass höhere Bemessungswerte der Betriebsmittel erforderlich sind, um die transiente Belastungsaufgabe zu erfüllen.

Die Ergebnisse der Transientenuntersuchungen liefern wichtige Informationen für die Spezifikation der einzelnen Filterbetriebsmittel.

Die in Abschnitt 5 beschriebenen transienten Untersuchungen liegen in der Verantwortung des Auftragnehmers; der Kunde sollte jedoch in der Spezifikation Mindestanforderungen für Untersuchungen in der Vertragsphase festlegen. Zum Beispiel sollte der Kunde alle spezifischen Netz- und Systembetriebsbedingungen definieren, die berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollten alle zu untersuchenden Fehler-szenarien zusammen mit Einzelheiten zu allen im Versorgungsnetz betriebenen Selbstabschaltungssystemen angegeben werden.

Obwohl die transienten Untersuchungen in der Vertragsphase durchgeführt und berichtet werden, muss der Anbieter in der Angebotsphase einige Untersuchungen durchführen, um die Kosten für die Betriebsmittel der Station zu ermitteln. Diese Untersuchungen sind erforderlich, um die Isolationswerte der Betriebsmittel und die Bemessungswerte von Überspannungsableiter zu ermitteln. Der Umfang solcher Untersuchungen sollte im Ermessen des Anbieters liegen.

Es gibt zwei Hauptgruppen von Untersuchungen, die durchgeführt werden sollten.

- Die erste, wie in 5.2 beschrieben, umfasst Untersuchungen zu Schaltstoßspannung, wie z. B. routinemäßiges Umschalten von Filtern, Ereignisse mit automatischer Wiedereinschaltung, Systemfehler und Fehlerbehandlung/-beseitigung, die einen Lastabwurf der Gleichspannungsverbindung beinhalten.
- Die zweite Gruppe, die in 5.3 beschrieben wird, umfasst Untersuchungen zu schnellen Kurvenverläufen (en: fast fronted waveform), wie z. B. Blitzeinschläge und Sammelschienenüberschläge, die zu einer schnellen Entladung von Kondensatorbatterien führen.

5.2 Untersuchungen zu Schaltstoßspannung

5.2.1 Einspeisung und Schalten

Für jeden Filtertyp, der im HGÜ-System vorhanden ist, müssen zu Beginn Einspeisungsuntersuchungen durchgeführt werden, um die Höchstwerte für Überstrom, Überspannung und Energie zu ermitteln. Bei Untersuchungen an phasengenaue (en: Point-on-Wave) Schaltverfahren werden die ungünstigsten Bedingungen auf der Basis der höchsten realistischen Systemspannung ermittelt. Bei komplexeren Filterkonfigurationen kann es jedoch vorkommen, dass ein und derselbe phasengenaue Schaltverfahren nicht die ungünstigsten Bedingungen für einzelne Betriebsmittel ergibt. Diese Untersuchungen können auch den Bedarf an schaltbaren Überspannungsschutzvorrichtungen in den Leistungsschaltern (Vorschaltwiderstände, synchronisiertes Schließen usw.) und die Schaltfähigkeit der Leistungsschalter unter Überspannungsbedingungen für den Überspannungsschutz ermitteln.

Das routinemäßige Umschalten von Filtern mit anderen, bereits in Betrieb befindlichen Filterbanken ist die häufigste transiente Belastung für die Filterkomponenten. Die Anzahl der Schaltvorgänge pro Jahr kann je nach System sehr unterschiedlich sein. Beispielsweise kann ein HGÜ-Fernleitungssystem, das für die Erzeugung und Übertragung von elektrischer Energie ausgelegt ist, ein sehr seltenes Umschalten von Filtern erfordern, während ein HGÜ-Kurzkupplung-System mit Blindleistungsregelung ein häufiges Umschalten von Filtern erfordert. Eine Schätzung der Anzahl der Schaltvorgänge ist erforderlich, um die transienten Ergebnisse zu erfassen, und sollte vom Auftragnehmer in die Spezifikationen der einzelnen Betriebsmittel aufgenommen werden. Häufiges Schalten von Filtern ist für Kondensatorbatterien von besonderer Bedeutung, da die hohe dielektrische Belastung während des transienten Ereignisses Auswirkungen auf die Lebensdauer des Betriebsmittels hat. Normen für Kondensatorbatterien wie IEC 60871 (alle Teile) [5] und IEEE Std 18™ [6] geben Hinweise auf die zulässigen Werte für transiente Spannungen und Ströme und die Anzahl der Schaltvorgänge pro Jahr.

Ähnlich wie bei den Untersuchungen zur Ersteinpeisung werden Untersuchungen an phasengenaue (en: Point-on-Wave) Schaltverfahren der routinemäßigen Umschaltungen erforderlich sein, um die ungünstigsten Bedingungen zu ermitteln. Die Untersuchungen sollten den Fall berücksichtigen, dass jeder Filtertyp der Reihe nach als letzter geschaltet wird, z. B. wenn alle anderen Filter bei der maximalen realistischen Systemspannung in Betrieb sind. Wenn Parallelkondensatorbatterien als Teil der Blindleistungsregelstrategie installiert sind, muss der besondere Fall der Parallelschaltung untersucht werden. In diesem Fall können die hohen Einschaltströme in eine Batterie, die durch die Entladung einer unter Spannung stehenden Kondensatorbatterie verursacht werden, zu Schäden an das Kondensatorbetriebsmittel führen. Solche Untersuchungen würden zeigen, dass Strombegrenzungsdröseln als Teil der Kondensatorbank installiert werden müssen.

Die Untersuchungen müssen den Bereich der Kurzschlusspegel (SCL, en: short-circuit levels) berücksichtigen, der am Verbindungspunkt der Filter gilt. Normalerweise gibt es keine einfache Wechselbeziehung zwischen SCL und der Amplitude der Spitzenströme und -spannungen am Filterbetriebsmittel.

Typische Beispiele für transiente Kurvenformen, die beim routinemäßigen Umschalten von Filtern auftreten, sind in Bild 2 und Bild 3 dargestellt:

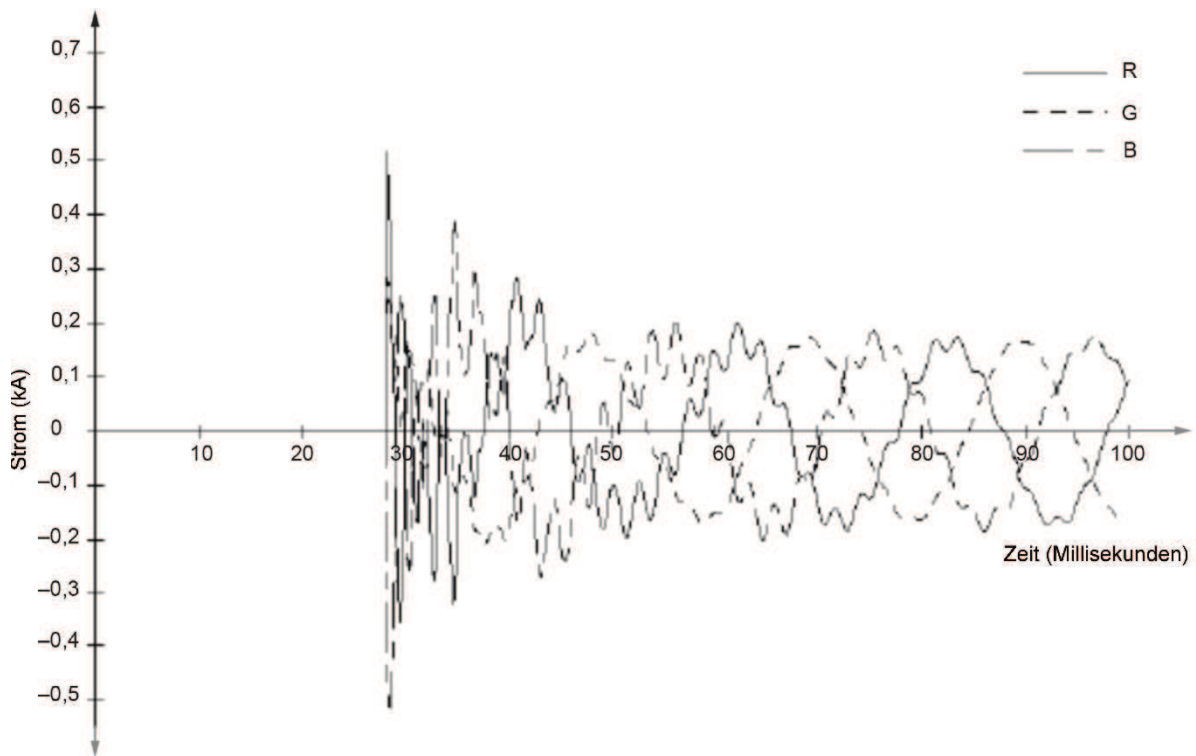


Bild 2 – Einschaltstrom in einem zweifach abgestimmten 12/24-Filter

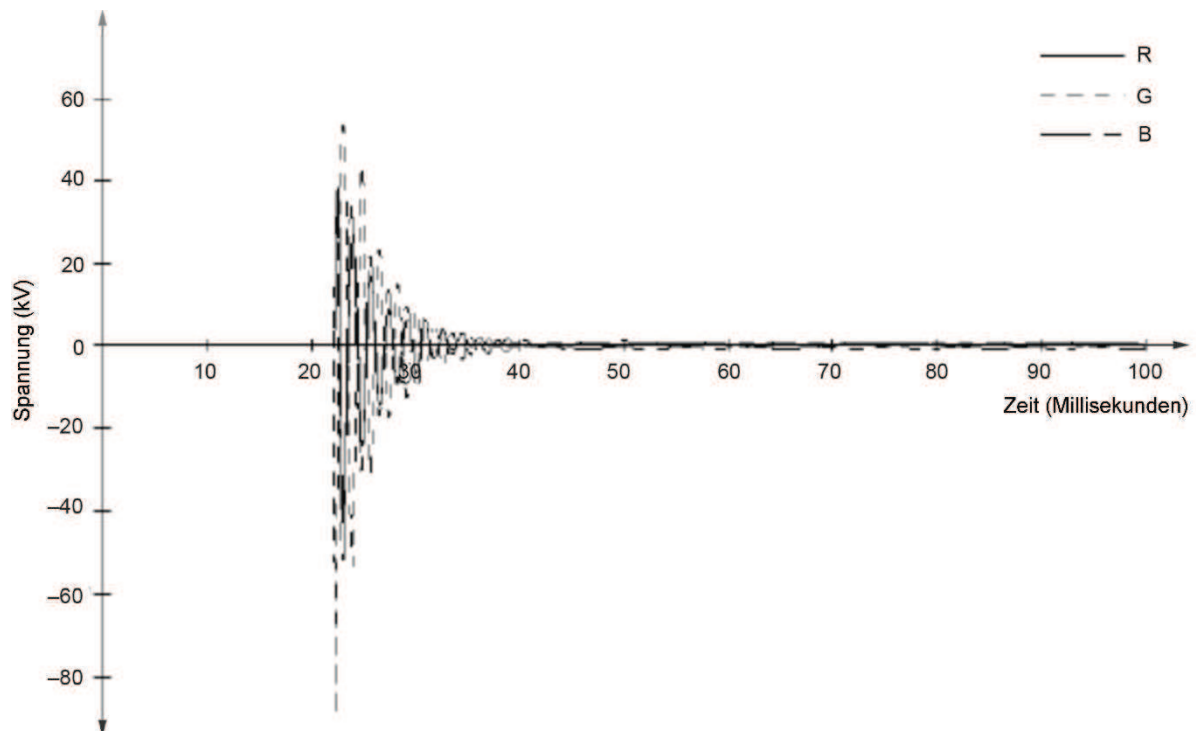


Bild 3 – Spannung am Niederspannungskondensator eines zweifach abgestimmten 12/24-Filters beim Einschalten

5.2.2 Fehler außerhalb des Filters

Fehler im Wechselstromnetz können sowohl einzeln auftretende Fehler, wie beispielsweise Leiter- Leiter-Fehler und Dreiphasenfehler, als auch Erdungsfehler, ob einphasig, zweiphasig oder dreiphasig, umfassen. Bei solchen Fehlern kann es zu einer Abschaltung der Gleichstromlast kommen, z. B. durch Blockieren der Stromrichter, was zu einer hohen unbeeinflussten Einschwingspannung führt. Diese Spannung, die durch das Vorhandensein von Filtern noch verstärkt wird, wird durch die Überspannungsableiter des Systems begrenzt und ist normalerweise die Grundlage für deren Energiebemessung. Bei der Untersuchung solcher Fehlerbehandlungs- und Lastabweisungsszenarien ist es wichtig, die Betriebsstrategie des HGÜ-Systems in Bezug auf die Fehlerklärungsdauer der Leistungsschalter, die Auslösestrategie der Filter und die Entriegelung der Stromrichter genau darzustellen. Normalerweise werden Oberschwingungsfilter während dynamischer Überspannungen (DOV, en: dynamic overvoltage) nicht geschaltet, um eine Einschränkung des Betriebs nach einer dynamischen Überspannung zu vermeiden. Wenn die Filter jedoch ausgeschaltet werden, bedeutet dies eine erhebliche Belastung für den Leistungsschalter und auch für etwaige Entladungsspannungstransformatoren (DVT, en: discharge voltage transformer), sofern vorhanden.

Werden bei den Leistungsschaltern der ankommenden Übertragungsleitungen einphasige Wiedereinschaltssysteme verwendet, muss die Strategie für den Fall wiederholter erfolgloser Wiedereinschaltversuche untersucht werden. In solchen Fällen kann die schrittweise Wiedereinschaltung der Filter zu erheblichen Überströmen und Überspannungen an den Betriebsmitteln führen und insbesondere die Energiepegel der Filter-Überspannungsableiter bestimmen. Wenn dreiphasige automatische Wiedereinschaltssysteme verwendet werden, die zu einer Trennung der Stromrichterstation führen, muss dies ebenfalls untersucht werden, um die Auswirkungen auf die Bemessung der Überspannungsableiter zu bestimmen. Wenn an den Filterbänken Entladungsspannungstransformatoren installiert sind, können sie die Gleichspannung an den Kondensatorbänken schnell entladen, so dass die Filter wieder eingeschaltet werden können.

Die Dauer solcher transienten Untersuchungen müsste so gewählt werden, dass alle Schaltervorgänge abgedeckt sind und dass der ungünstigste Fall von Überlastbedingungen und Energieaufnahme des Überspannungsableiters erreicht wurde. Es wird jedoch anerkannt, dass es unpraktisch ist, lange Schalterausschaltzeiten, z. B. mehrere Minuten, in digitalen Untersuchungen darzustellen, so dass ein verkürzter Zeitraum als Ausschaltzeit für festgefahrene Leistungsschalterbedingungen modelliert werden kann.

Bild 4 zeigt eine Kombination von Fehlerbedingungen: Bei 25 ms wird der HGÜ-Stromrichter blockiert, was zu einer starken Überspannung an der Kondensatorbatterie des Hauptfilters führt; bei 70 ms wird ein dreiphasiger Sammelschienenfehler simuliert, der bei 100 ms gelöscht wird, einer reduzierten Zeitspanne, um die Rechenzeit zu minimieren, was zu einer starken transienten Überspannung an der Kondensatorbatterie führt.

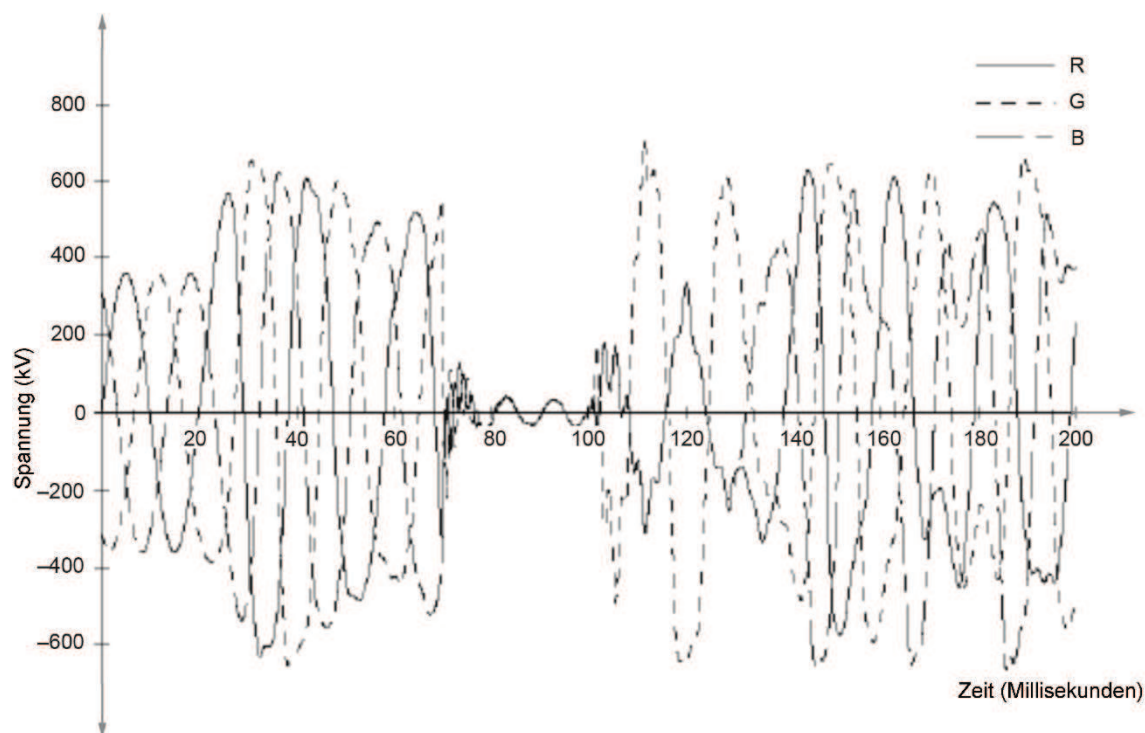


Bild 4 – Spannung an der Hochspannungskondensatorbatterie eines zweifach abgestimmten 12/24-Filters unter Fehlerbedingungen

5.2.3 Fehler innerhalb des Filters

Die Auswirkungen von Fehlern innerhalb des Filters hängen von der Art des Filters und der elektrischen Auslegung des Filters ab. Bei Anwendung eines einfach abgestimmten Filters wird beispielsweise bei einem Leitungs-Erdschluss an der Hochspannungsanschlussklemme der Kondensatorbatterie die am Kondensator unmittelbar anliegende Gleichspannung direkt über die Niederspannungsdrossel und einen eventuellen Überspannungsableiter angelegt, wie in 5.3.1 näher erläutert. Ein Leitungs-Erdschluss an der Niederspannungsanschlussklemme des Kondensators würde die Drossel einfach umgehen und zu einer sehr geringen Änderung des Stroms in der Kondensatorbatterie führen, die die vorherrschende Filterimpedanz darstellt.

Wäre die Filterkonfiguration umgekehrt, z. B. die Drossel an der Hochspannungsanschlussklemme und der Kondensator an den Nullleiter angeschlossen, würde ein Leitungs-Erdschluss von der Hochspannungsanschlussklemme der Drossel zu einer ähnlichen transienten Belastung der Drossel führen wie in 5.2.2 beschrieben. Ein Leitungs-Erdschluss von der Niederspannungsanschlussklemme der Drossel, z. B. der Hochspannungsanschlussklemme des Kondensators, würde jedoch aufgrund der geringen Impedanz der Drossel im Vergleich zum Kondensator zu einem beträchtlichen Fehlerstrom in der Drossel führen. Um sicherzustellen, dass die Drossel einen solchen internen Filterfehler übersteht, wäre eine Kurzschlussprüfung der Drossel durchzuführen.

Obwohl die oben berücksichtigten Fehlerbedingungen normalerweise die ungünstigsten Bedingungen für den transienten Betrieb des Filters sind, müssen für komplexere Filterkonfigurationen andere realistische interne Fehlerbedingungen untersucht werden.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen solcher Fehler auf die Bemessung von Filterkomponenten und Überspannungsableitern ist es wichtig, das gebotene Schutzniveau des Sammelschienenüberspannungsableiters zu berücksichtigen und die Auslegung dieses Überspannungsableiters mit den Filter-Überspannungsableitern zu koordinieren, um eine optimale Gesamtauslegung zu erreichen.

5.2.4 Transformator - Einschaltströme

Die Einspeisung des Stromrichtertransformators oder benachbarter konventioneller Transformatoren kann zu beträchtlichen Einschaltströmen führen, die über längere Zeiträume aufrechterhalten werden können. Solche Einschaltströme können jedoch durch den Einsatz von Vorschaltwiderständen oder durch gesteuertes Schalten (en: point-on-wave), das den Remanenzfluss berücksichtigt, minimiert werden, so dass die unten beschriebenen Oberschwingungsprobleme vernachlässigt werden sollten. Da ungedämpfte Einschaltströme asymmetrisch sind und einen hohen Anteil an Oberschwingungen, insbesondere von Oberschwingungen niedriger Ordnung, aufweisen, können sie zu einem Oberschwingungsstromfluss in benachbarten Filtern führen. Bei Anwendungen, in denen Oberschwingungsfilter niedriger Ordnung installiert sind, müssen solche Auswirkungen untersucht werden. Obwohl in der normalen Praxis die Stromrichtertransformatoren vor der Filterumschaltung eingeschaltet werden, kann es bei der Fehlerbehebung, der Umschaltung von Transformatoren auf benachbarten Stromrichterpolen oder der Umschaltung benachbarter Netztransformatoren zu einer Einschaltung mit angeschlossenen Filtern kommen. Untersuchungen werden zeigen, dass Überspannungsschutzvorrichtungen in den Leistungsschaltern erforderlich sind, um wirtschaftliche Isolationsniveaus der Betriebsmittel zu definieren und/oder um das Auftreten von Kommutierungsfehlern zu verringern.

Untersuchungen, die sich mit Einschaltströmen von Transformatoren befassen, müssen den Transformator in einigen Details modellieren, einschließlich linearen und nichtlinearen, z. B. Sättigung, Induktivitäten. Die Verluste innerhalb des Transformators, die das Ausschwingen der Einschaltströme bestimmen, sollten ebenfalls modelliert werden.

5.3 Untersuchungen schneller Kurvenverläufen

5.3.1 Allgemeines

Wegen der großen Spannungs- und Stromänderungsgeschwindigkeiten, die bei diesen Untersuchungen auftreten, ist es wichtig, dass Streuinduktivitäten und -Kapazitäten innerhalb der Filterschaltungen und Betriebsmittel simuliert werden. Daher sollte bei der Simulation des Filters der Einbauort der Betriebsmittel, insbesondere von Überspannungsableitern, berücksichtigt werden.

5.3.2 Blitzeinschläge

Obwohl direkte Blitzeinschläge in die Filterbetriebsmittel unwahrscheinlich sind, insbesondere wenn ein Oberleitungserdungsschutz vorhanden ist, sollten die Auswirkungen von Einschlägen in das entfernte Wechselstromsystem, die auf die Filter übertragen werden, berücksichtigt werden. Die maximale Spannung an der Filterklemme wird durch den Haupt-Hochspannungsüberspannungsableiter begrenzt. Diese Überspannungen werden auf die Niederspannungskomponenten von zweifach abgestimmten Filtern übertragen und können sich erheblich auf deren Isolationswerte auswirken. Wo es angebracht ist, sollten angewandte Blitzeinschläge an verschiedenen Punkten innerhalb der Hochspannungsunterstation und in verschiedenen Entfernungen entlang der Wechselstromleitungen von der Station simuliert werden.

5.3.3 Untersuchungen zu Sammelschienenüberschlägen

Ein Überschlag gegen Erde auf der Hochspannungssammelschiene des Filters führt zu einer schnellen Entladung der Filterkondensatorbatterie durch die Filterkomponenten. Ein solches Ereignis kann während einer hohen Systemspannung auftreten; die Kondensatorsicherungen sollten jedoch unter dieser Bedingung nicht auslösen, da sie darauf geprüft sind Kurzschlussströmen standzuhalten. Aufgrund der kurzen Dauer dieser Entladungen (einige Mikrosekunden) fallen sie in die gleiche Kategorie wie Blitzstoßspannungen.

5.4 Isolationskoordination

Aus den Ergebnissen der in 5.2 und 5.3 beschriebenen Untersuchungen lässt sich die Gesamtisolationskoordination des Filters ableiten. Der Bedarf an Überspannungsableitern, die in den Filtern verteilt sind, wird ermittelt. In den meisten Fällen wird die Wahl zwischen dem Schutzspannungsniveau und der Energieabsorptionsfähigkeit des Überspannungsableiters und der Spannungsfestigkeit der geschützten Betriebsmittel auf der Basis der relativen Kosten erfolgen. Niederspannungsüberspannungsableiter für Stationen sind zwar relativ preiswert, aber wenn eine hohe Energieabsorptionsfähigkeit erforderlich ist, werden parallele Gehäuse

benötigt, was zu hohen Kosten führen kann. In solchen Fällen kann eine Erhöhung des Isolationsniveaus der Betriebsmittel die optimale Lösung sein.

Bei der Modellierung von Überspannungsableitern ist es wichtig, die maximale Toleranz der Überspannungsableiterkennlinie bei der Bewertung der Schutzpegel und die minimale Toleranz bei der Bewertung der Energieaufnahmefähigkeit zu berücksichtigen.

Für Filter mit eingebetteten Überspannungsableitern gibt es eine Reihe von möglichen Schaltungsanordnungen. Typische Beispiele für zweifach abgestimmte Filter sind in Bild 5 dargestellt.

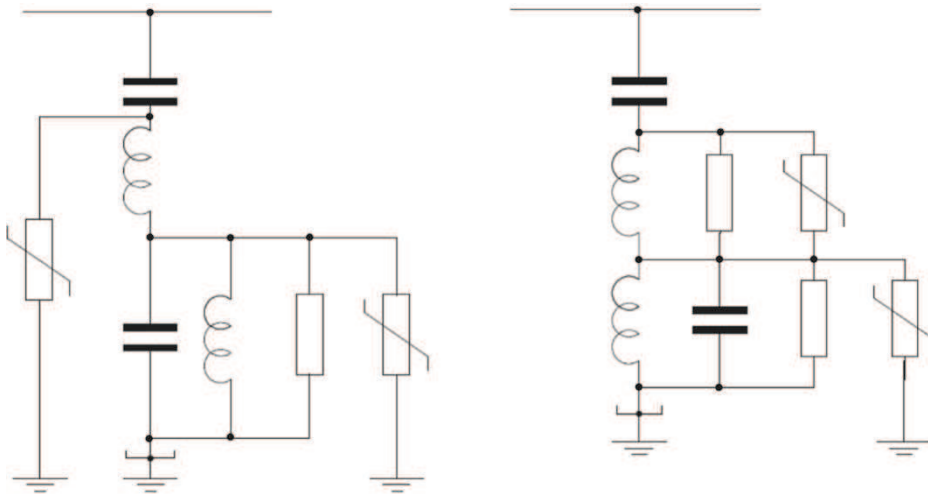


Bild 5 – Typische Anordnungen von Überspannungsableitern

Die Ergebnisse der Blitz- und Schaltstoßspannungsuntersuchungen bestätigen, dass die geforderten Spannen zwischen den Spannungsfestigkeitspegeln der Betriebsmittel und den entsprechenden Schutzpegeln des Überspannungsableiters nach IEC 60099-4 [7] oder der Spezifikation des Kunden erreicht werden. Es ist zu beachten, dass Spannen, die über die normalerweise in IEC 60099-4 [7] spezifizierten Werte hinausgehen, zu erhöhten Filterkosten führen. Die Energieaufnahme, die den Überspannungsableitern durch Blitzüberspannungen auferlegt wird, ist normalerweise geringer als die Energie, die durch die in 5.2 beschriebenen Fehlerbedingungen entsteht.

Bei den zweifach und dreifach abgestimmten Filtern zeigen die Ergebnisse der Fehler- oder Schaltuntersuchungen in der Regel, dass die maximalen Transientenspannungen an den Niederspannungskondensatoren die Bemessungswerte im stationären Zustand weit übersteigen. Da die Kosten für solche Kondensatorbatterien in der Regel niedrig sind, kann eine Erhöhung der Bemessungsspannung, so dass die Überlastfähigkeit mit der vorhergesagten maximalen transienten Spannung übereinstimmt, zu einer akzeptablen Auslegung führen, ohne dass spezielle Ausführungen von Überspannungsableitern erforderlich werden.

Durch die Erstellung eines abgestimmten Planes zur Isolationskoordination im gesamten Filter ist es möglich, die folgenden Parameter für die Filterbetriebsmittel zu definieren:

- Stehblitzstoßspannungspegel LIWL (en: Lightning impulse withstand level);
- Stehschaltstoßspannungspegel SIWL (en: Switching impulse withstand level, falls erforderlich);
- Netzfrequenz-Spannung;
- Luftstrecke (Leitung - Leitung);
- Luftstrecke (Leitung - Erde);
- Kriechstrecke;
- Transienter Strom durch Überspannungsableiter und Filterkomponenten;
- Schutzpegel von Filter-Überspannungsableitern;
- Einbauorte und Anforderungen für Filterüberspannungsableiter.

Diese Parameter können an jeder Anschlußklemme des Betriebsmittels oder bei großen Hochspannungskondensatorbatterien an einer Reihe von Punkten festgelegt werden, an denen Stützisolatoren, Stromwandler oder Spannungswandler angeschlossen sein können. Die Neutralpunkte jeder Phase des in Sternschaltung angeschlossenen Filters werden normalerweise einzeln durch ein niedriges, aber einheitliches Isolationsniveau isoliert und dann zu einem einzigen Sternpunkt zusammengeführt, der dann mit der Erde verbunden wird.

Es ist wichtig, dass für den Neutralleiter des Filters ein Isolationsniveau festgelegt wird, um unerwünschte Erdschlüsse bei transienten Störungen zu vermeiden.

6 Verluste

6.1 Hintergrundinformationen

Die Kosten für die Verluste können ein wesentlicher Faktor für die Unterschiede zwischen den Entwürfen verschiedener Anbieter für ein HGÜ-System sein. Der Kunde muss sicherstellen, dass die Bewertung der Verluste nach klar definierten Verfahren und unter vergleichbaren Bedingungen für jeden angebotenen Entwurf vorgenommen wird.

Eine entsprechende Einführung in die Verluste von HGÜ-Stromrichterstationen ist in IEC 61803 [8] enthalten.

Oberschwingungsfilter auf der Wechselstromseite von LCC-HGÜ-Stromrichterstationen sind in der Regel für bis zu etwa 10 % der Gesamtverluste der Stromrichterstation verantwortlich. Im Gegensatz zu vielen anderen Anlagenteilen können die Verluste für Oberschwingungsfilter nur rechnerisch ermittelt werden, insbesondere die Verluste bei Oberschwingungsfrequenzen (wobei die Verlustwerte für die einzelnen Komponenten der Filter als Ergebnis von Werksprüfungen verfügbar sein können).

Das weitgehend akzeptierte Standardverfahren zur Berechnung der Verluste in HGÜ-Stationen ist in IEC 61803 [8] definiert, die eine Berechnung der Verluste unter im Wesentlichen nominalen Bedingungen vorschlägt, was für die meisten HGÜ-Anlagen eine angemessene Grundlage darstellt.

Dennoch können die berechneten Verluste bei Wechselstromfiltern in einem weiten Bereich variieren, abhängig von Faktoren wie der Verstimmung, der Resonanz des Wechselstromnetzes und der Höhe der Gegenkomponente in der Wechselstromversorgungsspannung. Folglich kann eine unter Nennbedingungen durchgeführte Berechnung die wahrscheinliche Höhe der Verluste unter realistischen Betriebsbedingungen stark unterschätzen.

Die Kunden sollten sich daher darüber im Klaren sein, dass sie, wenn sie sich an die Leitlinien von IEC 61803 [8] halten, möglicherweise keine realistische Schätzung der wahrscheinlichen Wechselstromfilterverluste erhalten. Da die Verluste bei verschiedenen Wechselstromfilterausführungen erheblich variieren, können sie auch keinen fairen Vergleich der von verschiedenen Anbietern angebotenen Ausführungen anstellen.

Die Informationen in Abschnitt 6 bieten dem Kunden daher eine Anleitung, wie er gegebenenfalls alternative Bedingungen für die Berechnung der Wechselstromfilterverluste festlegen kann. Es wird vorgeschlagen, die Filterverluste sowohl unter den Nennbedingungen nach IEC 61803 [8] als auch unter den in 6.4 beschriebenen alternativen Bedingungen zu berechnen, um alle vom Kunden benötigten Informationen bereitzustellen.

6.2 Verluste der Wechselstromfilterkomponenten

6.2.1 Allgemeines

Die Wechselstromfilter bestehen aus kapazitiven, induktiven und oft auch ohmschen Elementen, die alle zu den Gesamtverlusten der Stromrichterstation beitragen. Als Teil des Filterentwurfsprozesses wird die Kalkulation der Verluste bei der Auswahl der Anzahl und des Typs der erforderlichen Filter berücksichtigt. IEC TR 62001-1:2021 [1], 7.4, hebt die verschiedenen Vor- und Nachteile von abgestimmten Filtern hervor, die typischerweise geringe Verluste erzeugen, gegenüber Dämpfungsfilter, die im Allgemeinen höhere Verluste in M_{var} (var : " Voltampere Reaktiv ") erzeugen.

Eine weitere Betrachtung über die Gesamtkosten der Filterkomponenten unter Berücksichtigung ihrer Verluste findet sich in [9].

6.2.2 Filter-/Parallelkondensatorverluste

Bei großen Hochspannungskondensatorbatterien mit Bemessungen von vielen Mvars wird der Verlustwinkel wichtig; je kleiner der Verlustwinkel, desto geringer sind die Verluste für die Kondensatorbank.

Tabelle 1 zeigt die Unterteilung der Verluste in eine typische Vollfilmkondensatoreinheit.

Tabelle 1 – Typische Verluste in einer Vollfilmkondensatoreinheit

Verlustquelle	Verlust W/kvar	
	Intern abgesicherte Einheit	Extern abgesicherte Einheit
Dielektrikum	0,05	0,05
Entladewiderstände	0,05	0,05
Sonstiges (Sicherungen und Anschlüsse)	0,05	0,01
GESAMT	0,15	0,11

Die Verluste in Tabelle 1 sind typische Werte; garantierte Werte liegen in der Größenordnung von 20 % höher. Schmelzsicherungslose Kondensatoren haben ähnliche dielektrische, Entladewiderstands- und Anschlussverluste wie die oben genannten. Bei extern abgesicherten Einheiten kommen die durch die externe Sicherung verursachten Verluste zu den angegebenen Werten hinzu. Mit der Verbesserung bei der Auswahl und dem Aufbau des Dielektrikums ist es bemerkenswert, dass die Verluste im Entladewiderstand der Kondensatoreinheit jetzt tendenziell überwiegen. Die Anforderungen und der Betrieb für solche Widerstände liegen nicht in der direkten Kontrolle des Kondensatorherstellers, sondern werden von den Anforderungen an die Entladezeit diktiert, die durch internationale Normen oder die eigenen Anforderungen des Kunden vorgegeben sind. Wird eine erhöhte Entladungsanforderung spezifiziert, so sind die in Tabelle 1 aufgeführten Verluste höher.

Die oben genannten Verluste beziehen sich auf neue Kondensatoreinheiten. Die dielektrischen Verluste nehmen mit der Zeit ab und erreichen bei Kondensatoreinheiten mit Vollfilm nach einigen hundert Betriebsstunden ihren Mindestwert. Die Verringerung ist jedoch minimal, und da der dielektrische Verlust nicht mehr der Hauptverursacher der Verluste ist, wirkt sich die Verringerung nur minimal auf die Gesamtverluste des Filters aus. Die von den Kondensatorherstellern durchgeführten Tests bestätigen auch, dass die Verluste bei den Oberschwingungen niedriger Ordnung (in W/kVAr) mit den oben genannten Werten bei der Grundfrequenz vergleichbar sind.

Die Leistungsverluste jeder einzelnen Kondensatorbatterie lassen sich unter der Annahme, dass der Verlustwinkel bei den Oberschwingungsfrequenzen derselbe ist wie bei der Grundfrequenz, wie folgt bestimmen:

$$P_c = \tan(\delta) \cdot \sum_{n=1}^{n=N} I_{cn}^2 \cdot X_{cn} \quad (17)$$

Dabei ist

P_c die Verlustleistung des Filterkondensators;

n die Ordnungszahl der Oberschwingung;

N die maximale Oberschwingungsordnung (typischerweise 49 für LCC, kann bei VSC höher sein);

I_{cn} der berechnete Strom im Kondensator bei der Oberschwingungsordnung n ;

X_{cn} der Blindwiderstand des Kondensators bei der Oberschwingungsordnung n ;

$\tan(\delta)$ der Tangens des Verlustwinkels des Kondensators.

Parallelkondensatorbatterien werden häufig zusätzlich zu Oberschwingungsfiltern eingesetzt, um einen Teil des gesamten Blindleistungsbedarfs der Stromrichterstation zu decken. Ihre Verluste, sowohl bei der Grund- als auch bei der Oberschwingungsfrequenz, können in ähnlicher Weise wie die der Filterkondensatoren (siehe oben) bewertet werden. Da die Verluste der Kondensatoreinheiten selbst jedoch gering sind, sollten die Auswirkungen von Verlusten in anderen Komponenten, die dann erheblich werden können, nicht übersehen werden. Die Verluste durch die folgenden Anlagenteile können in der Regel die Verluste durch die Kondensatoreinheiten allein um etwa 50 % erhöhen:

- die Verbindungsleitungen und Sammelschienen;
- das Schaltgerät für die Kondensatorbatterie;
- der Potentialtransformator (PT) (Entladung) der Kondensatorbatterie;
- die Einschalt-drossel (falls vorhanden);
- die Kondensatorsicherungen;
- die internen Anschlüsse der Kondensatorbatterie.

6.3 Drossel- und Widerstandsverluste

6.3.1 Allgemeines

Filterdrosseln (und, wo vorhanden, Widerstände) sind eine Hauptquelle für die Gesamtverluste des Filters. Dies gilt insbesondere für eine Filterbank, die Oberschwingungen niedriger Ordnung dämpft, entweder in Form von auf eine Frequenz abgestimmten Filtern oder Dämpfungsfiltren.

Bei abgestimmten Einzelfrequenzfiltern muss der Filterentwickler häufig einen Kompromiss zwischen dem Q -Faktor (Gütefaktor) für die Drossel bei der Grundfrequenz und bei der abgestimmten Oberschwingungsfrequenz eingehen. Bei der Grundfrequenz muss zur Minimierung der Verluste ein möglichst hoher Q -Faktor angegeben werden, während bei den Oberschwingungsfrequenzen, insbesondere bei der abgestimmten Frequenz, ein Q -Faktor gewünscht wird, der mit den Anforderungen an das Filterbetriebsverhalten vereinbar ist. Der erforderliche Q -Faktor bei der Oberschwingungsfrequenz kann niedrig sein, wenn das Filter aufgrund großer Frequenzschwankungen des Systems und/oder des Umgebungstemperaturbereichs wahrscheinlich großen Verstimmungseffekten ausgesetzt ist. Das endgültige Gleichgewicht kann oft ein Kompromiss zwischen diesen widersprüchlichen Anforderungen sein, vor allem, wenn der Entwurf eines Filterdrosselherstellers mit den niedrigsten Anfangskosten in Bezug auf die Verluste nicht optimal ist.

Dem Drosselentwickler stehen jedoch (zumindest bei Drosseln offener Bauart für natürliche Luftkühlung) Mittel zur Verfügung, um dieses Gleichgewicht zwischen den Anforderungen an den Q -Faktor bei den verschiedenen Frequenzen durch zusätzliche, im Drosselkörper installierte Dämpfungsspulen (en: de- Q -ing-coils) oder sogar durch den Einsatz von selbstabstimmenden Filtern zu steuern oder zu optimieren.

Bei Dämpfungsfiltren ist die Wahl des Q -Faktors der Drossel bei Oberschwingungsfrequenzen im Allgemeinen unwichtig, wenn es darum geht, das geforderte Betriebsverhalten und die optimale Bemessung zu erreichen, so dass der Filterentwickler bei der Festlegung des Q -Faktors bei der Grundfrequenz relativ freie Hand hat, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Drosselkosten und Verlusten zu erreichen. Bei zweifach abgestimmten Dämpfungsfiltren erfordert die Wahl des Q -Faktors der Drossel bei Oberschwingungsfrequenzen jedoch eine sorgfältige Optimierung, um die Auswirkungen der sich im Filter selbst ausbreitenden Oberschwingungsströme zu minimieren. Eine Erhöhung des Q -Faktors kann unter bestimmten Umständen die Oberschwingungsverluste in den Drosseln erhöhen.

Der Q -Faktor der Drossel bei Oberschwingungsfrequenzen wird im Allgemeinen mit einem bestimmten Toleranzbereich um einen Nennwert herum definiert. Für die Berechnung der Verluste sollte nicht der Nennwert, sondern der minimale Q -Wert (d. h. der höchste Widerstand) verwendet werden.

Die Leistungsverluste in der Drossel können wie folgt bestimmt werden:

$$P_l = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{I_{ln}^2 \cdot X_{ln}}{Q_n} \quad (18)$$

Dabei ist

P_l die Verlustleistung der Filterdrossel;

n die Ordnungszahl der Oberschwingung;

N die maximale Oberschwingungsordnung (typischerweise 49 für LCC, kann bei VSC höher sein);

I_{ln} der berechnete Strom in der Drossel bei der Oberschwingungsordnung n ;

X_{ln} die Reaktanz der Drossel bei der Oberschwingungsordnung n ;

Q_n der Q -Faktor der Drossel bei der Oberschwingungsordnung n .

6.3.2 Verluste des Filterwiderstands

Bei der Festlegung der Gesamtkonfiguration des Filters hat der Entwickler die Wahl zwischen abgestimmten Filtern und Dämpfungsfiltern sowie zwischen den verschiedenen Typen von Dämpfungsfiltern im Hinblick auf die Minimierung der Widerstandsverluste des Filters zu treffen. In diesem Zusammenhang sollte die Verringerung der Widerstandsverluste berücksichtigt werden, die durch die Verwendung von Filtern dritter Ordnung und C-Filtern anstelle von Filtern zweiter Ordnung erzielt werden kann, und zwar gegen ein allgemein schlechteres Betriebsverhalten. Es sollte auch geprüft werden, ob es notwendig ist, dass abgestimmte Einzelfrequenzfilter mit einem externen Widerstand versehen werden, um den erforderlichen Q -Faktor des Filters bei der abgestimmten Oberschwingungsfrequenz zu erreichen.

Bei der Wahl zwischen den verschiedenen Arten von Dämpfungsfiltern sollte bedacht werden, dass insbesondere bei Wechselstromfiltern, die an eine hohe Netzspannung angeschlossen sind, die Kosten für die Widerstandsbank selbst nicht direkt proportional zur erforderlichen Verlustleistung sind, da die Kosten für die erforderliche Isolation einen erheblichen Teil der Gesamtkosten ausmachen können.

Die Leistungsverluste im Widerstand können wie folgt bestimmt werden:

$$P_r = \sum_{n=1}^{n=N} I_{rn}^2 \cdot R_n \quad (19)$$

Dabei ist

P_r die Verlustleistung des Filterwiderstandes;

n die Ordnungszahl der Oberschwingung;

N die maximale Oberschwingungsordnung (typischerweise 49 für LCC, kann bei VSC höher sein);

R_n der Widerstand in Ohm bei der Oberschwingungsordnung n ;

I_{rn} der berechnete Strom im Widerstand bei der Oberschwingungsordnung n .