

DIN IEC/TR 60919-3



ICS 29.240.30

**Betriebsverhalten netzgeführter Stromrichter in
Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Systemen –
Teil 3: Dynamische Bedingungen
(IEC TR 60919-3:2009 + A1:2016 + A2:2021)**

Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters –

Part 3: Dynamic conditions

(IEC TR 60919-3:2009 + A1:2016 + A2:2021)

Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) munis de convertisseurs commutés par le réseau –

Partie 3: Conditions dynamiques (

IEC TR 60919-3:2009 + A1:2016 + A2:2021)

Gesamtumfang 41 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Überblick über die Spezifikationen des dynamischen Verhaltens einer HGÜ	7
3.1 Spezifikation des dynamischen Verhaltens	7
3.2 Allgemeine Bemerkungen	8
4 Regelung von Leistungsfluss und Frequenz im Wechselstromnetz	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Regelung des Leistungsflusses.....	8
4.2.1 Anforderungen an die stationäre Leistungsregelung	8
4.2.2 Anforderung an sprungförmige Leistungsänderung	9
4.3 Frequenzregelung	11
5 Dynamische Wechselspannungsregelung und Wechselwirkung mit Blindleistungsquellen	12
5.1 Allgemeines	12
5.2 Verhalten von Spannung und Blindleistung einer HGÜ-Unterstation und anderer Blindleistungsquellen	13
5.2.1 Allgemeines	13
5.2.2 Umrichter als Wirk-/Blindleistungsquelle	13
5.2.3 Spannungseigenschaften von Wechselstromnetzen je nach Strombelastung an der Sammelschiene der HGÜ-Unterstation	15
5.2.4 Spannungseigenschaften von Wechselstromfiltern, Kondensatorbänken und Nebenschlussdrosseln zur Leistungskompensation in der HGÜ-Unterstation	17
5.2.5 Spannungscharakteristik des statischen Blindleistungskompensators (SVC, en: static var compensator).....	17
5.2.6 Spannungscharakteristik des synchronen Kompensators (SC, en: synchronous compensator)	18
5.2.7 Spannungscharakteristik des statischen synchronen Kompensators (STATCOM).....	18
5.3 Spannungsabweichungen an der Sammelschiene einer HGÜ-Unterstation	18
5.4 Wechselwirkung zwischen Spannung und Blindleistung der Unterstation und anderer Blindleistungsquellen	19
5.4.1 HGÜ-Umrichter, schaltbar Wechselstromfilter, Kondensatorbänke und Nebenschluss-Drosseln.....	19
5.4.2 HGÜ-Umrichter, schaltbare Blindleistungsquellen, SVC.....	20
5.4.3 HGÜ-Umrichter, schaltbare Blindleistungsquellen und Synchronkompensatoren	20
5.4.4 HGÜ-Umrichter, schaltbare Blindleistungsquellen, STATCOM	21
6 Transiente und stationäre Stabilität des Wechselstromnetzes	21
6.1 Allgemeines	21
6.2 Eigenschaften der Wirk- und Blindleistungsmodulation	22
6.2.1 Allgemeines	22
6.2.2 Großsignalmodulation	22
6.2.3 Kleinsignalmodulation.....	24
6.2.4 Blindleistungsmodulation.....	24
6.3 Klassifizierung von Netzsituationen.....	24

6.4	Wechselstromnetz parallel zur HGÜ-Verbindung	25
6.5	Verbesserung der Stabilität innerhalb eines der angeschlossenen Wechselstromnetze	29
6.6	Ermittlung der Regelcharakteristik der Dämpfung	29
6.7	Umsetzung des Dämpfungsreglers und Telekommunikationsanforderungen	30
7	Dynamik des HGÜ-Systems bei höheren Frequenzen	30
7.1	Allgemeines	30
7.2	Arten von Instabilität	31
7.2.1	Schleifeninstabilität (harmonische Instabilität)	31
7.2.2	Instabilität der Stromschleife	31
7.2.3	Instabilität durch Kernsättigung	31
7.2.4	Harmonische Wechselwirkungen	31
7.3	Erforderliche Informationen für Auslegungszwecke	32
7.4	Verfügbare Mittel zur Vermeidung von Instabilitäten	33
7.5	Dämpfung von Harmonischen niedriger Ordnung durch Regelungsaktionen	33
7.6	Demonstration eines zufriedenstellenden Verhaltens bei höheren Frequenzen	33
8	Subsynchrone Schwingungen	34
8.1	Allgemeines	34
8.2	Kriterien für die subsynchrone Torsionswechselwirkung mit einem HGÜ-System	35
8.3	Screening-Kriterien zur Identifizierung von Generatoreinheiten, die für Torsionswechselwirkungen anfällig sind	36
8.4	Verhaltensüberlegungen für die Verwendung von subsynchronen Dämpfungsreglern (SSDCs)	37
8.5	Prüfen des Verhaltens	37
8.6	Schutz des Turbinengenerators	37
9	Wechselwirkung mit Kraftwerken	38
9.1	Allgemeines	38
9.2	Spezielle Wechselwirkungen	38
9.2.1	Allgemeines	38
9.2.2	Effekte von Frequenzänderungen	38
9.2.3	Wechselwirkungen der Frequenzregelungen	39
9.2.4	Effekte durch Überspannung	39
9.2.5	Oberschwingungen	39
9.2.6	Subsynchrone Effekte und Wellenbeeinflussungseffekte	39
9.2.7	Resonanz	40
9.2.8	Überspannungen	40
9.2.9	Belastungen in Wechselstromschaltgeräten	40
9.2.10	Unterfrequenz	40
9.2.11	Startvorgang für einen HGÜ-Umrichter	40
9.3	Besonderheiten für ein Kernkraftwerk	40
	Literaturhinweise	41

Bilder

Bild 1 – Elemente zur Blindleistungskompensation an einer HGÜ-Unterstation	13
Bild 2 – P/Q -Diagramm eines Umrichters	14
Bild 3 – Blindleistungsbedarf eines schwachen Wechselstromnetzes abhängig von der Wirkleistungsbelastung für verschiedene Konstantspannungskennlinien an der Wechselstromsammelschiene einer HGÜ-Unterstation	16
Bild 4 – Darstellung des Wechselstromnetzes	16
Bild 5 – Beispiel einer Spannungs-Strom-Kennlinie, die den möglichen Strommodulationsbereich bei Abwesenheit von Telekommunikation zwischen Gleichrichter und Wechselrichter zeigt	23
Bild 6 – Blindleistungsmodulation in einer HGÜ-Übertragung bei Betrieb mit minimalem Löschwinkel $\gamma_{\min}$	26
Bild 7 – Blindleistungsmodulation in einer HGÜ-Übertragung bei Betrieb mit Löschwinkel $\gamma > \gamma_{\min}$	27
Bild 8 – Stabilitätsverbesserung einer Wechselstromleitung oder eines Wechselstromnetzwerks	28
Bild 9 – Prinzipielle Anordnungen eines Dämpfungsreglers	28

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) 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.

 Die Änderung A1 wurde eingearbeitet und mit den Änderungsmarken A1 am Textanfang und Textende gekennzeichnet. 

 Die Änderung A2 wurde eingearbeitet und mit den Änderungsmarken A2 am Textanfang und Textende gekennzeichnet. 

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.

Erfahrungen mit diesem Technischen Report sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter 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.

Betriebsverhalten netzgeführter Stromrichter in Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Systemen – Teil 3: Dynamische Bedingungen

1 Anwendungsbereich

Dieser Technische Report liefert allgemeine Leitlinien zum dynamischen Verhalten von Hochspannungs-Gleichstrom-(HGÜ)-Systemen. Das dynamische Verhalten, wie es in dieser Spezifikation verwendet wird, soll jene Ereignisse und Phänomene umfassen, deren charakteristische Frequenzen oder charakteristischer Zeitbereich den Bereich zwischen Übergangsbedingungen und stationärem Zustand abdecken. Es befasst sich mit dem dynamischen Verhalten aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Zweipunkt-HGÜ-Systemen und verbundenen Wechselstromnetzen oder deren Elemente wie Kraftwerke, Wechselspannungsleitungen und Sammelschienen, Blindleistungsquellen usw. unter stationären oder transienten Bedingungen. Es wird davon ausgegangen, dass die Zweipunkt-HGÜ-Systeme 12-Puls-Umrichtereinheiten verwenden, die aus dreiphasigen Brückenverbindungen (Zweiwege) bestehen. Es wird davon ausgegangen, dass die Umrichter Thyristorventile als Brückenarme, mit lückenlosen Metalloxid-Ableitern zur Isolationskoordination verwenden und Leistungsfluss in beide Richtungen ermöglichen. Diodenventile werden in dieser Spezifikation nicht berücksichtigt. Obwohl Mehrpunkt-HGÜ-Übertragungssysteme nicht ausdrücklich berücksichtigt werden, gelten viele der Informationen in dieser Spezifikation gleichermaßen für solche Systeme.

In diesem Report werden nur netzgeführte Stromrichter behandelt, was auch kondensatorgeführte Stromrichterschaltungskonfigurationen umfasst. Allgemeine Anforderungen an netzgeführte Halbleiterumrichter sind in IEC 60146-1-1, IEC 60146-1-2 und IEC 60146-1-3 enthalten. Spannungszwischenkreisumrichter werden nicht berücksichtigt.

Dieser Report (IEC 60919-3), der das dynamische Verhalten behandelt, wird von Veröffentlichungen für das stationäre (IEC 60919-1) und transiente (IEC 60919-2) Verhalten begleitet. Alle drei Aspekte sollten bei der Erstellung von Spezifikationen für Zweipunkt-HGÜ-Systeme berücksichtigt werden.

Es besteht ein Unterschied zwischen Spezifikationen des Systemverhaltens und Spezifikationen für die Auslegung einzelner Komponenten eines Systems. Obwohl Gerätespezifikationen und Prüfanforderungen hierin nicht definiert sind, wird auf diejenigen aufmerksam gemacht, die die Spezifikationen des Verhaltens für ein System beeinflussen würden. Es gibt viele Variationsmöglichkeiten zwischen verschiedenen HGÜ-Systemen, daher werden diese nicht im Detail betrachtet. Dieser Report sollte nicht direkt als Spezifikation für ein bestimmtes Projekt verwendet werden, sondern vielmehr als Grundlage für eine geeignete Spezifikation dienen, die auf die tatsächlichen Systemanforderungen für ein bestimmtes Stromübertragungsnetz zugeschnitten ist. Dieser Bericht beabsichtigt nicht, zwischen der Verantwortung von Benutzern und Herstellern für die angegebenen Arbeiten zu unterscheiden.

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 60146-1-1, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specification of basic requirements*

IEC/TR 60146-1-2, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-2: Application guide*

IEC 60146-1-3, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-3: Transformers and reactors*

 IEC TR 60919-1:2020, *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 1: Steady-state conditions* 

IEC TR 60919-2:2008, *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 2: Faults and switching*
 IEC TR 60919-2:2008/AMD1:2015
 IEC TR 60919-2:2008AMD2:2020

3 Überblick über die Spezifikationen des dynamischen Verhaltens einer HGÜ

3.1 Spezifikation des dynamischen Verhaltens

Eine vollständige Spezifikation des dynamischen Verhaltens für ein HGÜ-System sollte die folgenden Abschnitte berücksichtigen:

- Regelung des Leistungsflusses und der Frequenz im Wechselstromnetz (siehe Abschnitt 4);
- Regelung der dynamischen Wechselspannung und Wechselwirkung mit Blindleistungsquellen (siehe Abschnitt 5);
- Transiente und stationäre Stabilität des Wechselstromnetzes (siehe Abschnitt 6);
- Dynamik des HGÜ-Systems bei höheren Frequenzen (siehe Abschnitt 7);
- subsynchrone Schwingungen (siehe Abschnitt 8);
- Wechselwirkung mit Kraftwerken (siehe Abschnitt 9).

Abschnitt 4 befasst sich mit der Nutzung der Wirkleistungsregelung des HGÜ-Systems, um den Leistungsfluss und/oder die Frequenz von zugehörigen Wechselstromnetzen zu beeinflussen, um die Leistungsfähigkeit solcher Wechselstromnetze zu verbessern. Die folgenden Aspekte sollten bei der Auslegung von HGÜ-Wirkleistungsregelungsmodi berücksichtigt werden:

- a) minimieren der Verluste im Wechselstromnetz im stationären Betrieb;
- b) verhindern von Überlastung von Wechselstromleitungen im stationären Betrieb und bei einer Störung;
- c) abstimmen mit der Regelung des Wechselstrom-Generatorreglers;
- d) unterdrücken von Frequenzabweichungen im Wechselstromnetz im stationären Betrieb und bei einer Störung.

In Abschnitt 5 werden die Spannungs- und Blindleistungseigenschaften der HGÜ-Unterstation und anderer Blindleistungsquellen (AC-Filter, Kondensatorbatterien, Shunt-Drosseln, SVC (statische Blindleistungskompensation, en: Static Var Compensator), Synchronkompensatoren) sowie die Wechselwirkung zwischen ihnen während der Regelung der Wechselspannung an der Sammelschiene berücksichtigt.

In Abschnitt 6 werden Verfahren zur Regelung der Wirk- und Blindleistung einer HGÜ-Verbindung erörtert, um die stationäre und/oder transiente Stabilität des verbundenen Wechselstromnetzes zu verbessern, indem es elektromechanischen Schwingungen entgegenwirkt.

Abschnitt 7 befasst sich mit dem dynamischen Verhalten eines HGÜ-Systems im Bereich der halben Grundfrequenz und darüber aufgrund sowohl charakteristischer als auch nichtcharakteristischer Oberschwingungen, die von Umrichtern erzeugt werden. Auch Wege zur Verhinderung von Instabilitäten werden diskutiert.

In Abschnitt 8 wird das Phänomen der Verstärkung von mechanischen Torsionsschwingungen in Generatorturbinen eines Wärmekraftwerks bei ihren Eigenfrequenzen aufgrund der Wechselwirkung mit einem HGÜ-Regelungssystem (Konstantleistungs- und Stromregelungsmodus) betrachtet. Vorgaben für die subsynchrone Dämpfungsregelung werden definiert.

Die Wechselwirkung zwischen einem Kraftwerk und einem elektrisch in seiner Nähe befindlichen HGÜ-System wird in Abschnitt 9 unter Berücksichtigung einiger Besonderheiten des Kernkraftwerks und Anforderungen an die Zuverlässigkeit des HGÜ-Systems betrachtet.

3.2 Allgemeine Bemerkungen

Alle Auslegungsanforderungen für zukünftige HGÜ-Systeme, die spezifiziert werden, sollten innerhalb der Auslegungsgrenzen liegen, die in Veröffentlichungen über das stationäre (IEC 60919-1) und transiente (IEC 60919-2) Verhalten behandelt werden. Es wird empfohlen, während der Erstellung der Spezifikation für das dynamische Systemverhalten der HGÜ die geeignete Regelungsstrategie für das HGÜ-System auf der Grundlage detaillierter Studien des Stromnetzes zu ermitteln. Die Prioritäten der Signaleingänge der Regelung und deren Verarbeitung sollten festgelegt werden.

4 Regelung von Leistungsfluss und Frequenz im Wechselstromnetz

4.1 Allgemeines

Die Wirkleistungsregelung eines HGÜ-Systems kann verwendet werden, um den Leistungsfluss und/oder die Frequenz in zugehörigen Wechselstromnetzen zu regeln, um das Verhalten von Wechselstromnetzen im stationären Betrieb und unter Störung zu verbessern.

In diesem Abschnitt werden die HGÜ-Wirkleistungsbetriebsarten abgedeckt, die verwendet werden, um das Verhalten des Wechselstromnetzes für die folgenden Zwecke zu verbessern:

- HGÜ-Leistungsregelung zur Minimierung der Gesamtverluste des Stromnetzes im stationären Betrieb;
- HGÜ-Leistungsregelung zur Vermeidung von Überlastung von Wechselstromleitungen bei einer Störung sowie im stationären Zustand;
- koordinierte HGÜ-Leistungsregelung mit der Steuerung einer Generatorregelung im Wechselstromnetz;
- HGÜ-Leistungsregelung zur Unterdrückung einer Frequenzabweichung im Wechselstromnetz unter einer Störung sowie im stationären Zustand.

HGÜ-Wirk- und/oder Blindleistungsmodi zur Verbesserung der dynamischen und transienten Stabilität des Wechselstromnetzes oder zur Verbesserung der Wechselspannungsregelung wird in den Abschnitten 5 und 6 besprochen.

4.2 Regelung des Leistungsflusses

4.2.1 Anforderungen an die stationäre Leistungsregelung

Die Leistung eines HGÜ-Systems wird manchmal geregelt, um die Gesamtverluste des Netzes zu minimieren, um Überlastung von Wechselstromleitungen zu vermeiden und zur Abstimmung mit den Generatorreglern von Wechselstrom-Systemgeneratoren. Solche Leistungsregelungsanforderungen unterscheiden sich von Zeit zu Zeit entsprechend der Rolle von HGÜ-Systemen im Gesamtstromsystem.

Wenn ein HGÜ-System zur Übertragung von Leistung von entfernten Kraftwerken verwendet wird, wird die HGÜ-Übertragungsleistungsregelung mit dem Generatorregler der Kraftwerksgeneratoren koordiniert. In diesem Fall können Generatorspannung, Frequenz oder Rotordrehzahl als Referenz für das HGÜ-Leistungsregelungssystem verwendet werden.

Wenn zwei Wechselstromnetze durch eine HGÜ-Verbindung verbunden werden, wird die HGÜ-Leistung unter normalen Umständen nach einem vorbestimmten Muster geregelt, aber eine zusätzliche Funktion kann in diese HGÜ-Leistungsregelung integriert werden, so dass die Frequenz von einem oder beiden Wechselstromnetzen geregelt wird. Wenn eines der Wechselstromnetze ein isoliertes System ist, z. B. eines, das eine separate Insel versorgt, kann die Frequenzregelung dieses isolierten Wechselstromnetzes durch das HGÜ-System realisiert werden müssen.

Die Regelung der Frequenz des Wechselstromnetzes durch ein HGÜ-System wird in 4.3 behandelt.

Wenn zwei Wechselstromnetze durch mehr als eine Gleichstromverbindung oder Gleichstrom- und Wechselstromverbindungen miteinander verbunden sind, oder wenn ein Gleichstromsystem innerhalb eines Wechselstromnetzes existiert, kann die HGÜ-Leistung geregelt werden, um die Gesamtübertragungsverluste der verbundenen Systeme zu minimieren.

In einigen Fällen von oben beschriebenen Wechselstrom/Gleichstrom-Systemkonfigurationen kann die HGÜ-Leistungsänderungsregelung verwendet werden, um eine Überlastung einer oder mehrerer Übertragungsleitungen im Energiesystem zu verhindern.

Bei bestimmten speziellen HGÜ-Regelungsverfahren, wie dem zur Verbesserung des Wechselstrom-Systemverhaltens durch Erhöhen der Gleichspannungsleistung während und nach einer Störung, kann die stationäre Gleichstromleistung möglicherweise auf einen begrenzten Wert eingestellt werden müssen, damit die Gleichstromleistung nicht die bemessene Gleichstromleistung überschreitet, einschließlich Überlastfähigkeit, wenn die Regelung eingeleitet wird. Es ist wichtig, auch die zusätzliche Blindleistungsversorgung zu berücksichtigen, die sowohl von den HGÜ-Umrichtern als auch von dem Wechselstromnetz in einer solchen Situation benötigt wird.

Die folgenden Punkte a) bis g) müssen bei der Spezifikation der Anforderungen an die stationäre Regelung berücksichtigt werden. Es ist zu beachten, dass zum Zeitpunkt der Erstellung der Spezifikation die vollständigen Anforderungen an die stationäre Regelung möglicherweise noch nicht festgelegt oder ausgelegt worden sind, jedoch mögliche zukünftige Eingaben berücksichtigt werden müssen.

- a) Wenn ein Leistungsflussregelungssystem so ausgelegt ist, dass es mehr als eine Funktion hat, einschließlich der Frequenzregelung des Wechselstromnetzes, sollte das HGÜ-Regelsystem so ausgelegt sein, dass zwischen den einzelnen Regelfunktionen Prioritäten gesetzt werden.
- b) Unter stationären Bedingungen wird der Regelung zur Verhinderung der Überlastung von Wechselstromleitungen in der Regel eine höhere Priorität gegenüber anderen Leistungsflussregelungen eingeräumt. Die Regelung zur Minimierung von Netzverlusten wird implementiert, indem entweder die Gleichstromleistung auf ein Muster eingestellt wird, das durch die Stromsystemdaten vorherbestimmt wurde, oder als Reaktion auf eine Online-Berechnung, die im zentralen Lastverteilungsbüro durchgeführt wird. Normalerweise ist seine Regelanwort relativ langsam und beträgt selbst im letzteren Fall mehrere Sekunden oder mehrere Minuten.
- c) In isolierten Systemen oder Systemen mit relativ großer Gleichstromeinspeisung wird die Frequenz oft durch die HGÜ-Leistung aufrechterhalten. In einem solchen Fall könnte die HGÜ-Frequenzregelung Vorrang vor der Minimierung von Systemverlusten haben, kann jedoch durch einen Überlastschutz eingeschränkt sein.
- d) Die mit den Leistungsänderungen einhergehende Änderung des Blindleistungsbedarfs kann zu einem häufigen Schalten von Blindleistungsanlagen führen. In einem solchen Fall ist es notwendig, bestimmte Wechselspannungsregelungsmaßnahmen wie Blindleistungsregelung durch Umrichtereinheiten herauszufinden oder Grenzen für die Höhe der HGÜ-Leistungsänderung zu setzen.
- e) Die Notwendigkeit spezieller Leistungsanforderungs-Einstellsignale, die für das Leistungssystem einzigartig sind, sollte identifiziert, untersucht und festgelegt werden. Die Signale dürfen keinen Gleichstrom oder Gleichstromleistung verursachen, oder Wechselspannungsabweichungen über die Geräte- und Systembemessungswerte hinaus. Die Priorität von zwei oder mehr Eingangssignalen mit gleichzeitigem Bedarf an Gleichstromleistung sollte aufgebaut und koordiniert werden.
- f) Bipolare Gleichstromverbindungen erfordern normalerweise, dass Gleichstromleistung und Strom effektiv zwischen den Polen aufgeteilt werden. Für den Verlust eines Pols könnte eine Überlaststrategie für den verbleibenden Pol entwickelt werden, um die Unterbrechung von Systemleistungsfluss, Spannung und Frequenz im Wechselstromnetz zu minimieren.
- g) Eine Unterbrechung der Telekommunikationsverbindung zwischen dem sendenden und empfangenden System der Gleichstromverbindung sollte keine Störung des Wechselstromversorgungssystems verursachen. Eine Mindestspezifikationsanforderung besteht darin, dass die Leistungsübertragung auf dem gleichen Leistungspegel gehalten wird, der vor dem Telekommunikationsausfall bestand. Werden während eines vorübergehenden Ausfalls der Telekommunikationsverbindung zusätzliche Funktionen wie z. B. Frequenzregelung benötigt, sollten diese festgelegt werden.

4.2.2 Anforderung an sprunghafte Leistungsänderung

Unter bestimmten Bedingungen des Stromnetzes kann es erforderlich sein, die HGÜ-Leistung sprunghaft zu ändern, um das Verhalten der Wechselstromnetze während und nach Netzstörungen zu verbessern. Unter bestimmten Umständen kann der Stufenwechsel eine Umkehr der Gleichstromleistung im beinhalten.

Eine stufenweise Änderung von Gleichstromleistung wird durch Ändern des Sollwerts der Gleichstromleistungsanforderung oder durch Ändern des Leistungsbereichs als Reaktion auf ein Eingangssignal realisiert. Die Änderungsrate der Leistung und die Begrenzung der Größe der Gleichstromleistungsänderung, die durch den Sprung angefordert wird, sollte innerhalb festgelegter Grenzen nach den Anforderungen des Wechselstromnetzes einstellbar sein. Beispielsweise können für verschiedene Ereignisse unterschiedliche Rampenraten erforderlich sein. Besondere Überlegungen können erforderlich sein, wenn die Stufenänderung eine Leistungsumkehr beinhalten würde.

Netzstörungen, die bei der Festlegung von sprungförmigen Gleichstromleistungsänderungen zu berücksichtigen sind, können umfassen: Wechselstromleitungsauslösung, Verlust einer großen Stromversorgungsquelle oder großer Abfall in der Gleichstrom-Netzfrequenz und plötzlicher Anstieg oder Abfall der Netzlast mit der entsprechenden großen Frequenzabweichung.

In einigen der oben genannten Fälle von Netzstörungen werden die Wechselstromnetze auch von der Wechselstrom-Frequenzregelung unterstützt, die das Gleichstromsystem bereitstellt.

Beim Festlegen und Entwerfen von HGÜ-Regelungsfunktionen sollten die Auswirkungen der Funktionen der sprungförmigen Leistungsänderungen für verschiedene Netzbedingungen im Detail untersucht werden. Es ist am besten, Grenzwerte und Bereiche für Leistungsänderungen und Rampenraten anstatt spezifischer Einstellungen anzugeben. Einstellungsanpassungen können vorgenommen werden, wenn das Gleichstromsystem in Betrieb ist.

Die Signale zum Auslösen von sprungförmigen HGÜ-Leistungsänderungen umfassen Überlastrelaisignale oder Auslösesignale bestimmter Übertragungsleitungen, die an die HGÜ-Unterstation übertragen werden, oder die Netzfrequenz, die an der HGÜ-Unterstation oder an einem Punkt im Wechselstromnetz erfasst wird.

Die in einem Telekommunikationssystem, das diese Initiierungssignale sendet, auftretende Zeitverzögerung kann das Verhalten des Wechselstrom- oder Gleichstromnetzes beeinflussen. Daher kann in einigen Fällen ein Hochgeschwindigkeits-Telekommunikationssystem erforderlich sein. Wenn die Übertragungsverzögerungszeit groß ist, sollte dieser Effekt berücksichtigt werden.

Es gibt einige Fälle, in denen Signale an beide HGÜ-Unterstationen gesendet werden oder mehr als ein Signal von einer HGÜ-Unterstation empfangen wird. In diesen Fällen ist es notwendig, Prioritäten der Regelungsfunktionen zu setzen.

Die Größe der stufenförmigen Änderung der Gleichstromleistung kann durch Wechselstrom- und Gleichstromsystembedingungen begrenzt werden, und es kann unter bestimmten Umständen erforderlich sein, die Änderungen der Systembedingungen zu erkennen, um die Werte solcher Grenzwerte zu aktualisieren.

Insbesondere wenn es eine große stufenförmige Änderung in der Gleichstromleistung gibt, kann sich die Wechselspannung erheblich ändern. Aus diesem Grund kann es erforderlich sein, den zulässigen Bereich der Wechselspannungsschwankung zu untersuchen, um die Grenzen der stufenförmigen Leistungsänderungen zu bestimmen oder um spezielle Maßnahmen zur Wechselspannungsregelung einzuführen.

Die zulässigen Grenzwerte für eine Wechselspannungsabweichung können für stationären Betrieb und transiente Bedingungen unterschiedlich sein und sollten festgelegt werden.

Wenn ein HGÜ-System an einen Wechselstromnetz mit hoher Impedanz und/oder geringer Trägheit angeschlossen ist, kann die stufenförmige Änderung in der Gleichstromleistung nachteilige Auswirkungen auf die Spannungsstabilität, die transiente Stabilität und die Frequenz des Wechselstromnetzes haben. In solchen Fällen müssen möglicherweise die Größe und die Geschwindigkeit der Leistungsänderung begrenzt oder andere besondere Maßnahmen ergriffen werden, um eine Verschlechterung des dynamischen Verhaltens des Wechselstromnetzes zu verhindern. Wenn ein HGÜ-System zwei Wechselstromnetze miteinander verbindet, muss die Auswirkung der stufenförmigen Gleichstromleistungsänderung im Detail nicht nur für das Wechselstromnetz bewertet werden, in dem eine Störung auftritt, sondern auch für das andere Wechselstromnetz, in dem kein Fehler auftritt.

Wenn die stufenförmige Änderung der Gleichstromleistung bewirkt, dass der Gleichstrom den minimal zulässigen Betriebsstrom des HGÜ-Systems unterschreitet, der in der Regel 5 % bis 10 % des Bemessungsstroms beträgt, sollte der Umrichterbetrieb auf den positiven Mindeststrom eingestellt werden. Andernfalls sollte

der Umrichter nach der zulässigen Dauer des Niedrigstrombetriebs gesperrt oder für den Betrieb bis auf Nullstrom festgelegt werden. Eine mögliche Maßnahme zur Überwindung des minimal zulässigen Betriebsstroms besteht darin, die Leistungsflüsse von zwei Polen in entgegengesetzte Richtungen zu setzen und die Leistungsflüsse von zwei Polen sich gegenseitig aufheben zu lassen, wenn die HGÜ-Systemkonfiguration bipolar ist. Die Differenz der Leistungsflüsse jedes Pols ist der tatsächliche Betriebsleistungsfluss des gesamten HGÜ-Systems.

Aufgrund von Beschränkungen der Wechselrichterregelung und möglichen Risiken für den Betrieb des Wechselstromnetzes ist es nicht ratsam, eine stufenförmige Änderung der Stromanforderung zu verlangen, die größer als die Strommarge ist, es sei denn, es werden besondere Kontrollmaßnahmen bei einem Ausfall der Telekommunikation ergriffen.

Bestimmte Überlegungen können erforderlich sein, wenn ein HGÜ-System aus einem Leerlauf-Standby-Zustand als Reaktion auf eine stufenförmige Änderung der Leistungsanforderung gestartet werden soll (siehe IEC 60919-1, Abschnitt 7).

4.3 Frequenzregelung

Die Netzfrequenzregelung durch das HGÜ-System kann für folgende Zwecke eingesetzt werden:

- a) Frequenzregelung des empfangs- und/oder sendeseitigen Wechselstromnetzes für eine Gleichstromübertragung von entfernten Energiequellen;
- b) Frequenzregelung eines Wechselstromnetzes auf einer isolierten Insel oder einem kleinen Wechselstromnetz, wenn es an ein großes Wechselstromnetz über ein Gleichstromnetz angeschlossen ist;
- c) Frequenzregelung von einem der Wechselstromnetze, die durch ein HGÜ-System verbunden sind, auch unter Berücksichtigung der Frequenz des anderen Systems.

Die Wechselstrom-Netzfrequenzregelung wird entweder als kontinuierliche Funktion der Frequenz unter stationären Bedingungen ausgeführt, oder wenn die Frequenzabweichung des Wechselstromnetzes bestimmte Grenzen überschreitet. Sie kann nur unter bestimmten Umständen aktiviert werden, z. B. wenn das lokale Wechselstromnetz, das an die HGÜ-Unterstation angeschlossen ist, vom Haupt-Wechselstromnetz getrennt wird (Inselbetrieb). Dementsprechend sollte die Spezifikation die Aufgaben und Anforderungen an das Verhalten der Frequenzregelfunktion angeben.

Wenn die Frequenz am Empfangsende durch Variieren oder Modulieren der von der Gleichstromverbindung übertragenen Leistung geregelt wird, muss eine Koordination der Frequenzregelung der Gleichstromversorgung mit jeder Generatorregelung verbundener Wechselstromgeneratoren erfolgen. Es kann möglich sein, die vorübergehende Frequenzabweichungsfähigkeit eines asynchronen Systems am sendenden Ende zur Unterstützung des empfangenden Endes zu verwenden, vorausgesetzt, dass die Erzeugungsanlagen entsprechend ausgelegt sind.

Wenn eine HGÜ-Unterstation elektrisch weit vom Zentrum des Wechselstromnetzes entfernt ist, ändert sich der Phasenwinkel der Wechselspannung an der HGÜ-Unterstation bei Leistungsänderungen erheblich. Unter solchen Umständen kann die Ansprechgeschwindigkeit des Frequenzsignals verringert werden. Um diese geringere Ansprechgeschwindigkeit zu vermeiden, kann das Frequenzsignal in der Mitte des Wechselstromnetzes erfasst und an die HGÜ-Unterstation übertragen werden.

Bei der Frequenzregelung kann es erforderlich sein, Grenzen der Leistungsänderung und eine Rate der Leistungsänderung vorzusehen, die die Netzspannungsschwankung innerhalb eines zulässigen Bereichs hält oder spezielle Maßnahmen zur Spannungsregelung wie Blindleistungsregelung durch Umrichter oder SVC zu nutzen. Die zulässigen Grenzen der Spannungsschwankung während der stationären Frequenzregelung sollten festgelegt werden.

Wenn ein Gleichstrombeitrag zur Frequenzregelung des Wechselstromnetzes implementiert ist, ist es möglich, dass die Generatorfrequenzregelung beeinträchtigt wird, wenn die Regelungen nicht richtig koordiniert sind. Wenn zwei verschiedene Stromversorgungssysteme miteinander verbunden werden, kann es erforderlich sein, ein geeignetes Totband bereitzustellen oder eine geeignete Verstärkung in der Frequenzregelung durch das HGÜ-System auszuwählen, so dass nur große oder schnelle Frequenzschwankungen durch die Gleichstromleistungsregelung kompensiert werden, und kleine oder langsame Frequenzschwankungen von den Kraftwerken der einzelnen Wechselstromnetze geregelt werden.

Die Frequenzregelung zur Korrektur schwerer Störungen, wie sie beispielsweise durch das Abschalten großer Erzeugungseinheiten verursacht werden, kann effektiver realisiert werden, wenn das Auslösesignal der Generatoreinheit an die HGÜ-Unterstation übertragen wird, um die Regelung einzuleiten.

Schnelle und große Änderungen der Gleichstromleistung zur Frequenzregelung können zu Überspannungen oder Spannungseinbrüchen im Wechselstromnetz führen. Eine solche Situation kann durch Begrenzung der Leistungsänderungsrate oder durch schnelle Blindleistungskompensation entschärft werden. Die zulässige Überspannung oder der Spannungseinbruch und die zulässige Dauer sollten festgelegt werden.

Eine mögliche Maßnahme für einen kontinuierlichen und reibungslosen Betrieb der Frequenzregelung besteht darin, die Leistungsflüsse zweier Pole gegenläufig zu setzen und sich die Leistungsflüsse zweier Pole bei einer bipolaren HGÜ-Systemkonfiguration aufheben zu lassen. Dieser spezielle Betriebsmodus wird als „Frequenzregelung mit Nullleistungseinstellung“ bezeichnet. Es ist jedoch zu beachten, dass beim Überschreiten der Grenze des Mindeststroms zusätzliche Systemverluste und damit einhergehende Polaritätsumkehrungen auftreten.

Es ist manchmal schwierig, optimale Parameter der Frequenzregelung einzustellen, da sich die Konfiguration des Stromnetzes häufig aufgrund von Ausfällen von Übertragungsleitungen und/oder Unterstationen zu Wartungszwecken ändert. Dies könnte durch die Verwendung einer Frequenzregelung mit multiplen Variablen berücksichtigt werden.

Wenn die Regelung der Gleichstromleistung zum Zwecke der Frequenzregelung durchgeführt wird, ist es normalerweise erforderlich, Hochgeschwindigkeits-Telekommunikationskanäle wie Mikrowellenkanäle oder Glasfaserkanäle zwischen zwei HGÜ-Unterstationen bereitzustellen. Bei einem Ausfall der Telekommunikation zwischen den beiden Unterstationen ist die Frequenzregelung in der Regel auf das Netz beschränkt, das mit der stromregelnden Unterstation verbunden ist.

Befindet sich der Frequenzerfassungspunkt weit vom Steuerterminal der HGÜ-Unterstation entfernt oder soll die Frequenzregelung durch spezielle Signale von dem Wechselstromnetz eingeleitet werden, sind Telekommunikationskanäle erforderlich.

In jedem Fall sollte die Auswirkung der Telekommunikations-Zeitverzögerung berücksichtigt werden.

Eine Erläuterung der Telekommunikationskanäle ist in IEC 60919-1, Abschnitt 13 zu finden.

5 Dynamische Wechselspannungsregelung und Wechselwirkung mit Blindleistungsquellen

5.1 Allgemeines

Änderungen des Blindleistungsflusses durch Laständerungen, Schalthandlungen oder Fehler führen zu Spannungsschwankungen im Wechselstromnetz. Bei hochohmigem Wechselstromnetzen, d. h. in Systemen mit geringer Kurzschlussleistung ist mit größeren Spannungsschwankungen zu rechnen und der Bedarf an Spannungsregelung ist ausgeprägter.

Plötzliche Spannungsänderungen im Netz sollten begrenzt werden, z. B. auf weniger als 3 % bei häufigem Auftreten und auf weniger als 10 % bei seltenem Auftreten. Angemessene Werte sollten festgelegt werden.

Hohe kurzzeitige Überspannungen außerhalb des normalen Betriebsbereichs durch große Lastwechsel und Lastabwurf in Netzen mit geringer Kurzschlussleistung können die Anlagenausrüstung gefährden. Hohe kurzzeitige Überspannungen können durch das Abschalten von Blindleistungsquellen begrenzt werden. Der zulässige Grenzwert und die Dauer für vorübergehende Überspannungen sollten festgelegt werden.

5.2 Verhalten von Spannung und Blindleistung einer HGÜ-Unterstation und anderer Blindleistungsquellen

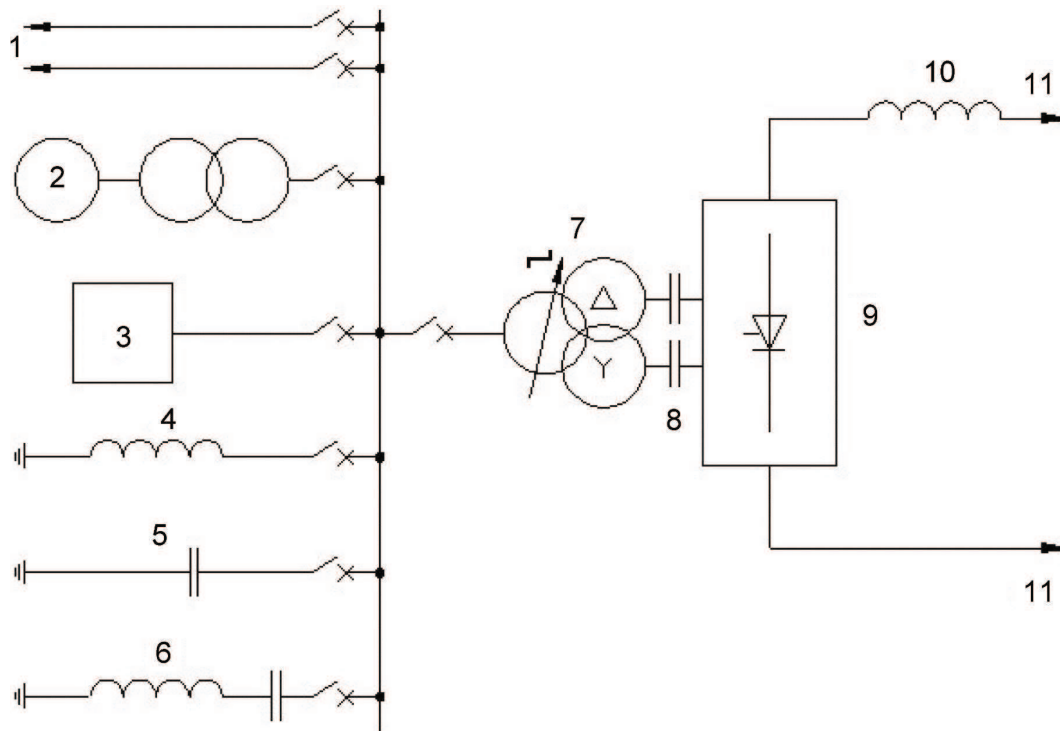
5.2.1 Allgemeines

Dynamische Blindleistungs- und Spannungsregelung an der AC-Sammelschiene einer HGÜ-Unterstation kann mit unterschiedlichen Geräten realisiert werden. Bild 1 zeigt schematisch eine HGÜ-Unterstation mit Elementen zur Blindleistungskompensation. Welches der abgebildeten Elemente verwendet wird, hängt von den Eigenschaften des Wechselstromnetzes und den Anforderungen an die Daten der jeweiligen HGÜ-Unterstation ab sowie von der wirtschaftlichen Bewertung der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten.

5.2.2 Umrichter als Wirk-/Blindleistungsquelle

Die Wirk-/Blindleistung eines HGÜ-Umrichters hängt von folgenden Faktoren ab:

- Kommutierungsimpedanz (ggf. einschließlich Kommutierungskapazität);
- Kommutierungsspannung;
- Verzögerungswinkel α am Gleichrichter oder Löschwinkel γ am Wechselrichter;
- Gleichstrom.



Legende

- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1 Wechselstromnetz | 7 Umrichtertransformator |
| 2 synchrone Kompensator | 8 Kommutierungskondensatoren |
| 3 Blindleistungskompensator | 9 Umrichter |
| 4 Wechselstromdrossel | 10 Gleichstromdrossel |
| 5 Kondensator | 11 Gleichstromanschluss |
| 6 Wechselstromfilter | |

Bild 1 – Elemente zur Blindleistungskompensation an einer HGÜ-Unterstation