

	DIN IEC/TR 63262 (VDE 0553-262)	DIN
	Dies ist zugleich eine VDE-Leitlinie im Sinne von VDE 0022. Sie ist unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 29.200; 29.240.99 Betriebsverhalten des vereinheitlichten Leistungsflussreglers (UPFC) in elektrischen Energieversorgungssystemen (IEC TR 63262:2019) Performance of unified power flow controller (UPFC) in electric power systems (IEC TR 63262:2019) Caractéristiques de fonctionnement du régulateur unifié du flux de puissance dans les systèmes d'énergie électrique (IEC TR 63262:2019) Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer VDE-Leitlinie erstellt und ist die Übernahme eines Technischen Reports der IEC (IEC TR). Gesamtumfang 45 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE		

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieses Dokuments ist 2021-04-01.

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	6
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten	7
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise.....	9
Einleitung	10
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	11
3 Begriffe und Symbole	12
3.1 Begriffe	12
3.2 Symbole.....	13
4 Prinzipien und Konfigurationen	14
4.1 Grundprinzipien	14
4.2 UPFC Konfigurationen.....	15
4.2.1 Grundstruktur.....	15
4.2.2 UPFC Konfiguration bei einer einzelnen Übertragungsleitung	16
4.2.3 UPFC-Konfiguration bei Doppelübertragungsleitungen	16
4.2.4 UPFC-Konfiguration bei mehreren Übertragungsleitungen	18
5 Designregeln	18
5.1 Angebotsauswahl	18
5.2 Auswahl und Koordination der Parameter.....	19
6 Anforderungen an das Betriebsverhalten der wichtigsten Geräte	19
6.1 Allgemeines	19
6.2 Spannungszwischenkreisumrichter (VSCs)	19
6.2.1 Allgemeines	19
6.2.2 Dreipunktumrichter	19
6.2.3 Modulare Multilevelumrichter (MMCs).....	20
6.2.4 Anforderungen an das Betriebsverhalten der VSCs	20
6.3 Serientransformator.....	22
6.3.1 Allgemeines	22
6.3.2 Anschlussart der Wicklungen	22
6.3.3 Isolationspegel.....	23
6.3.4 Kurzschlussfähigkeit.....	23
6.3.5 Übererregungstoleranz.....	23
6.3.6 DC-Gleichstrombelastung	24
6.4 Paralleltransformator	24
6.4.1 Allgemeines	24

6.4.2	Wicklungsverbindung	24
6.4.3	Spannungsregelung unter Last.....	24
6.4.4	DC-Gleichstrombelastung	24
6.4.5	Oberschwingungen und Übererregungstoleranz	25
6.5	Schneller Überbrückungsschalter (FBS).....	25
7	Regelung und Schutz	26
7.1	Regelungssystem des UPFC	26
7.1.1	Grundlegende Anforderung	26
7.1.2	Konfigurationsanforderungen.....	26
7.1.3	Funktionen des Regelungssystems	26
7.2	Schutzsystem des UPFC	27
7.2.1	Grundlegende Anforderungen	27
7.2.2	Auslegungsanforderungen	27
7.2.3	Funktionen des Schutzsystems	28
7.3	Anforderungen an das UPFC-Überwachungssystem	29
7.4	Anforderungen an Kommunikationsschnittstellen.....	29
8	Isolationskoordination	30
8.1	Prinzipien der Isolationskoordination	30
8.1.1	Allgemeines.....	30
8.1.2	Isolationskoordinierungsverfahren	30
8.1.3	Entwurf des Schutzableiters	30
8.2	Spannungen und Überspannungen im Betrieb.....	31
8.2.1	Maximale Betriebsspannung.....	31
8.2.2	Quellen von Überspannungen	32
8.3	Bestimmung der erforderlichen Spannungsfestigkeiten (U_{rw})	32
9	Betriebsverhalten des Systems.....	33
9.1	Allgemeines.....	33
9.2	Stationäres Betriebsverhalten	33
9.2.1	Allgemeines.....	33
9.2.2	Stationäre Regelungsanforderung der Übertragungsleistung	34
9.2.3	Stationäre Regelungsanforderung der Blindleistungskompensation und Spannungsregelung	34
9.2.4	Anforderung an das Betriebsverhalten bezüglich Überlast.....	34
9.3	Dynamisches Betriebsverhalten.....	34
9.4	Betriebsverhalten beim Durchfahren von Fehlerzuständen.....	34
10	Prüfungen.....	35
10.1	Allgemeines.....	35
10.2	Werkprüfungen der Hauptkomponenten	35
10.2.1	Stromrichterventil	35

	Seite
10.2.2 Fast bypass switch (FBS).....	36
10.2.3 Transformatoren	37
10.3 Inbetriebnahmeprüfungen vor Ort	38
10.3.1 Allgemeines	38
10.3.2 Einschalttest des Umrichters	39
10.3.3 Einschalttest des Serientransformators	39
10.3.4 Erste Betriebstests des UPFCs.....	39
10.3.5 Dauerbetriebsprüfung.....	39
10.3.6 Prüfung des dynamischen Betriebsverhaltens	39
10.3.7 Prüfung der Schutzabschaltung	39
10.3.8 Zusätzliche Prüfungen der Regelungsfunktion	39
10.3.9 Überlastprüfungen	39
10.3.10 Prüfung des Durchfahrens von Fehlerzuständen des AC-Systems.....	39
Anhang A (informativ) Beispiele für typische UPFC-Projekte	40
A.1 Struktur des Inez UPFC-Projekt in den U.S.A.....	40
A.2 Struktur des Kangjin UPFC-Projekts in Südkorea.....	40
A.3 Struktur des Marcy UPFC-Projekts in den U.S.A.....	41
A.4 Struktur des Nanjing UPFC-Projekts in China.....	41
A.5 Struktur des Shanghai UPFC-Projekts in China	41
A.6 Struktur des Suzhou UPFC-Projekts in China.....	42
A.7 Weitere Informationen über die typischen UPFC-Projekte	42
A.8 Technische und wirtschaftliche Bewertung der UPFC-Projekte.....	43
Anhang B (informativ) Der Unterschied zwischen UPFC und anderen FACTS	44
Literaturhinweise	45
Bilder	
Bild 1 – UPFC in einem Übertragungssystem mit zwei Anschlüssen	14
Bild 2 – UPFC-Leistungsflussdiagramm.....	15
Bild 3 – UPFC-Regelungsfunktionen	15
Bild 4 – UPFC-Strukturdiagramm	16
Bild 5 – VSC UPFC-Konfiguration bei einer einzelnen Übertragungsleitung	16
Bild 6 – UPFC-Konfiguration mit getrenntem DC-Bus.....	17
Bild 7 – UPFC-Konfiguration mit gemeinsamem DC-Bus	18
Bild 8 – Typische Dreipunktumrichter-Topologie	20
Bild 9 – Typische MMC-Topologie.....	21
Bild 10 – Einphasige Spannungskurvenform auf der AC-Seite.....	21
Bild 11 – Typische Struktur der Reihentransformatorwicklung.....	23
Bild 12 – Typische Wicklungsstruktur des Paralleltransformators.....	25
Bild 13 – Typische Struktur des TBS	26
Bild 14 – Funktionsbereiche des UPFC-Schutzes.....	29

Bild 15 – Beispiel für Ableiter zum Schutz von Bereichen eines MMC-UPFC	32
Bild A.1 – Elektrischer Hauptstromkreis des Inez UPFC-Projekts	40
Bild A.2 – Elektrischer Hauptstromkreis des Kangjin UPFC-Projekts [1]	40
Bild A.3 – Elektrischer Hauptstromkreis des Marcy UPFC-Projekts [1]	41
Bild A.4 – Elektrischer Hauptstromkreis des Nanjing UPFC-Projekts [1]	41
Bild A.5 – Elektrischer Hauptstromkreis des Shanghai UPFC-Projekts [1]	42
Bild A.6 – Elektrischer Hauptstromkreis des Suzhou UPFC-Projekts [1]	42

Tabellen

Tabelle 1 – Ableiterschuttschema für einen MMC-UPFC	31
Tabelle 2 – Richtwerte für die Verhältnisse von erforderlicher Stehstoßspannung zum Schutzpegel	33
Tabelle 3 – Hauptsächliche Prüfgegenstände des Umrichterventils	36
Tabelle 4 – Hauptsächliche Prüfgegenstände des FBS	37
Tabelle 5 – Hauptsächliche Prüfgegenstände der Transformatoren	37
Tabelle A.1 – Wesentliche Parameter der typischen UPFC-Projekte [1]	42
Tabelle A.2 – Wesentliche Parameter der Transformatoren im Kangjin UPFC-Projekt	43
Tabelle A.3 – Wesentliche Parameter der Transformatoren im Nanjing UPFC-Projekt	43
Tabelle B.1 – Vergleich der Regelungsparameter und Anwendung der einzelnen FACTS	44

Nationales Vorwort

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium 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.

Die VDE-Leitlinien enthalten sicherheitstechnische Festlegungen mit einem im Vergleich zu den VDE-Bestimmungen wesentlich erweiterten Ermessensraum für eigenverantwortliches sicherheitstechnisches Handeln.

VDE-Leitlinien sind angebracht, wenn die Vielfalt der zu betrachtenden Sachlagen oder Gestaltungsmöglichkeiten nach vorherrschender Meinung durch unmittelbar anwendbare Anweisungen nicht erfasst werden kann. Sie dienen dem Anwender als Beispielsammlung oder Grundlage für eigene sicherheitstechnische Entscheidungen. Für sich allein sind sie nicht als ausreichende Entscheidungsgrundlage für die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden oder die Anwender geeignet.

VDE-Leitlinien sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom 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 dieser Publikation bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

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

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

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

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten

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.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1 (1 von 2)

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60071-1	IEC 60071-1	DIN EN 60071-1 (VDE 0111-1)	VDE 0111-1
EN 60071-5:2015	IEC 60071-5:2014	DIN EN 60071-5 (VDE 0111-5):2015-05	VDE 0111-5
EN 60076-2	IEC 60076-2	DIN EN 60076-2 (VDE 0532-76-2)	VDE 0532-76-2
EN 60076-3	IEC 60076-3	DIN EN 60076-3 (VDE 0532-76-3)	VDE 0532-76-3
EN 60076-4	IEC 60076-4	DIN EN 60076-4 (VDE 0532-76-4)	VDE 0532-76-4
EN 60700-1	IEC 60700-1	DIN EN 60700-1 (VDE 0553-1)	VDE 0553-1
EN 61954	IEC 61954	DIN EN 61954 (VDE 0553-100)	VDE 0553-100
EN 62501	IEC 62501	DIN EN 62501 (VDE 0553-501)	VDE 0553-501
–	IEC TR 62543	DIN IEC/TR 62543 (VDE 0553-543)	VDE 0553-543
EN 62751-2	IEC 62751-2	DIN EN 62751-2 (VDE 0553-751-2)	VDE 0553-751-2
EN 62823	IEC 62823	DIN EN 62823	–
–	IEC TR 60146-1-2 :2011	DIN IEC/TR 60146-1-2 (DIN SPEC 48146-1-2):2012-03	DIN SPEC 48146-1-2
EN 60255-1:2010	IEC 60255-1:2009	DIN EN 60255-1 (VDE 0435-300):2010-09	VDE 0435-300
EN 62751-1	IEC 62751-1	DIN EN 62751-1 (VDE 0553-751-1)	VDE 0553-751-1
–	IEC 60633:2019	–	–

Tabelle NA.1 (2 von 2)

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 62747:2014 ersetzt durch	IEC 62747:2014 ersetzt durch	DIN EN 62747:2015-03 ersetzt durch	—
EN 62747:2014 + AC:2015 + A1:2019	IEC 62747:2014 + COR1:2015 + A1:2019	DIN EN 62747:2020-04	—
EN 60071-2	IEC 60071-2	DIN EN 60071-2 (VDE 0111-2)	VDE 0111-2
EN 62927	IEC 62927	DIN EN 62927 (VDE 0553-927)	VDE 0553-927
—	IEC TR 61000-2-14 :2006	—	—

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60071-1 (VDE 0111-1), Isolationskoordination – Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen

DIN EN 60071-2 (VDE 0111-2), Isolationskoordination – Teil 2: Anwendungsrichtlinie

DIN EN 60071-5 (VDE 0111-5):2015-05, Isolationskoordination – Teil 5: Verfahren für Hochspannungs-Gleichstrom-Stromrichterstationen (HGÜ-Stromrichterstationen) (IEC 60071-5:2014); Deutsche Fassung EN 60071-5:2015

DIN EN 60076-2 (VDE 0532-76-2), Leistungstransformatoren – Teil 2: Übertemperaturen für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren

DIN EN 60076-3 (VDE 0532-76-3), Leistungstransformatoren – Teil 3: Isolationspegel, Spannungsprüfungen und äußere Abstände in Luft

DIN EN 60076-4 (VDE 0532-76-4), Leistungstransformatoren – Teil 4: Leitfaden zur Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung von Leistungstransformatoren und Drosselpulen

DIN EN 60255-1 (VDE 0435-300):2010-09, Messrelais und Schutzeinrichtungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 60255-1:2009); Deutsche Fassung EN 60255-1:2010

DIN EN 60700-1 (VDE 0553-1), Thyristorventile für Hochspannungsgleichstrom-Energieübertragung (HGÜ) – Teil 1: Elektrische Prüfung

DIN EN 61954 (VDE 0553-100), Statische Blindleistungskompensatoren (SVC) – Prüfung von Thyristorventilen

DIN EN 62501 (VDE 0553-501), Ventile von Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) – Elektrische Prüfung

DIN EN 62747:2020-04, Terminologie für Spannungszwischenkreis-Stromrichter (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme (IEC 62747:2014 + COR1:2015 + A1:2019); Deutsche Fassung EN 62747:2014 + AC:2015 + A1:2019

DIN EN 62751-1 (VDE 0553-751-1), Bestimmung der Leistungsverluste in Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme – Teil 1: Allgemeine Anforderungen

DIN EN 62751-2 (VDE 0553-751-2), Bestimmung der Leistungsverluste in Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme – Teil 2: Modulare Mehrpunkt-Stromrichter

DIN EN 62823, Thyristorventile für thyristorgesteuerte Reihenkontensatoren (TCSC) – Elektrische Prüfung

DIN EN 62927 (VDE 0553-927), Ventile von Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) für STATCOM – Elektrische Prüfungen

DIN IEC/TR 60146-1-2 (DIN SPEC 48146-1-2):2012-03, Halbleiter-Stromrichter – Allgemeine Anforderungen und netzgeführte Stromrichter – Teil 1-2: Anwendungsleitfaden (IEC/TR 60146-1-2:2011)

DIN IEC/TR 62543 (VDE 0553-543), Hochspannungsgleichstrom (HGÜ-)Energieübertragung mit selbstgeführten Stromrichtern (VSC)

Einleitung

Ein Vereinheitlichter Leistungsflussregler (en: Unified Power Flow Controller, UPFC) regelt sowohl die Wirk- als auch die Blindleistung einer Übertragungsleitung durch Regeln und Steuern der Leitungsimpedanz, der Zwischenkreisspannung und der Phasenwinkeldifferenz. Wenn ein Mangel an Leistungsregelungsverfahren und die unzureichende Unterstützung der dynamischen Bedingungen betrachtet wird, liefert UPFC eine effektive Lösung. Vor 2005 gab es drei UPFC-Projekte rund um die Welt: Das Inez UPFC-Projekt, das im Jahr 1998 in den USA installiert wurde, das Kangjin UPFC-Projekt, das im Jahr 2003 in Südkorea installiert wurde, und das Marcy UPFC Projekt, das im Jahr 2004 in den USA installiert wurde (siehe [Anhang A](#)).

Zehn Jahre später, mit den relevanten Technologie-Upgrades und dem steigenden Bedarf an elektrischer Energie, wurden drei weitere UPFC-Projekte gebaut und in Betrieb genommen, alle in China. Sie sind das im Jahr 2015 in Nanjing installierte 220 kV UPFC-Projekt, das im Jahr 2017 installierte Shanghai 220 kV UPFC-Projekt, und das Suzhou 500 kV UPFC-Projekt, das ebenfalls in 2017 installiert wurde. All diese Projekte basieren auf der modularen Multi-Level-Wandler-(MMC)-Technologie, die erfolgreich das Problem der ungleichmäßigen Lastflussverteilung entschärft und die Kapazität und die Zuverlässigkeit der Stromnetze in den betroffenen Gebieten verbessert hat. Es wird angenommen, dass mit dem weiteren Wachstum der Nachfrage an elektrischer Leistung die UPFC-Technologie noch intensiver auf dem Markt der Energieversorgung eingesetzt wird.

Dieses Dokument basiert auf den praktischen Erfahrungen von UPFC-Projekten mit dem modularen Multi-levelumrichter (MMC), der die beste Art eines Spannungszwischenkreisumrichters (VSC) darstellt und der technische Referenzen für UPFC-Auslegung, Herstellung, Test, Inbetriebnahme, Betrieb und Wartung liefern kann.

Betriebsverhalten des vereinheitlichten Leistungsflussreglers (UPFC) in elektrischen Energieversorgungssystemen

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument liefert Richtlinien für die Anwendung von Vereinheitlichten Leistungsflussreglern (UPFC) in Energieversorgungssystemen. Es enthält Formelzeichen, Begriffe und Definitionen, Prinzipien und Konfigurationen, Designregeln, Anforderungen an das Betriebsverhalten für die wichtigsten Geräte, Regelung und Schutz, Isolationskoordination, Systemverhalten und Tests. Dieser Technischer Report ist sowohl für die UPFC, die auf der MMC-Technologie (en: Modular Multi-Level Converter) basieren, als auch für die UPFC, die auf der Technik von Dreipunktumrichtern basieren, anwendbar.

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 60071-1, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60071-5:2014, *Insulation co-ordination – Part 5: Procedures for high-voltage direct current (HVDC) converter stations*

IEC 60076-2, *Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers*

IEC 60076-3, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*

IEC 60076-4, *Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors*

IEC 60700-1, *Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission – Part 1: Electrical testing*

IEC 61954, *Static var compensators (SVC) – Testing of thyristor valves*

IEC 62501, *Voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission – Electrical testing*

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

IEC 62751-2, *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems – Part 2: Modular multilevel converters*

IEC 62823, *Thyristor valves for thyristor controlled series capacitors (TCSC) – Electrical testing*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

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

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

3.1.1

Vereinheitlichter Leistungsflussregler UPFC

Geräte mit zwei (oder mehr) Spannungszwischenkreisumrichtern (VSCs), die sich einen gemeinsamen DC-Bus teilen und parallel und in Reihe mit dem Übertragungssystem verbunden sind und gleichzeitig die Leitungsimpedanz, die Spannungsamplitude und den Phasenwinkel regeln können

3.1.2

Vereinheitlichter Leistungsflussregler unter Verwendung des modularen Multilevel-Umrichters MMC-UPFC

UPFC unter Verwendung eines Multilevelumrichters, bei dem jedes Ventil des Spannungszwischenkreisumrichters (VSC) aus einer Reihe von in sich abgeschlossenen, in Reihe geschalteten Einphasen-Spannungszwischenkreisumrichtern besteht

3.1.3

Paralleltransformator

Transformator, der parallel zum Wechselstromnetz zwischen Umrichter und Wechselstromnetz geschaltet wird

3.1.4

Reihentransformator

Transformator, der eine Wicklung in Reihe mit der Leitung hat, um die Netzspannung und/oder -phase zu ändern

Anmerkung 1 zum Begriff: Andere Wicklungen wie die Erregerwicklung und die Ausgleichswicklung können vom Kunden gewählt werden.

3.1.5

Schneller Überbrückungsschalter FBS

Gerät, das über die Anschlüsse der zu schützenden Einrichtung während des Abschaltverfahrens der Brücke(n) gelegt wird und um Strom von der geschützten Einrichtung während des Einschaltverfahrens der Brücke(n) mit schneller Leitfähigkeit während eines Leitungsfehlers zu übernehmen

3.1.6

Thyristorüberbrückungsschalter TBS

Leistungselektronischer Schalter mit antiparallel geschalteten Thyristoren zwischen dem Wandler und der ventileitigen Wicklung des Serientransformators

3.1.7

Ventildrossel

Drossel (falls vorhanden), die in Reihe zu dem VSC-Ventil geschaltet ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Einem VSC-Ventil kann eine oder können mehrere Ventildrossel(n) zugeordnet sein, und diese kann bzw. können an unterschiedlichen Stellen im Ventil angeschlossen sein.

[QUELLE: IEC 62747:2014, 7.22, geändert – Die Wörter „vom Typ der steuerbaren Spannungsquelle“ sowie die beiden letzten Sätze der Anmerkung zum Begriff wurden aus der Definition gestrichen.]

3.1.8

Überbrückungsbetriebszeit

Zeit vom Auftreten des Fehlers bis zum vollständigen Schließen des Überbrückungsschalters

3.1.9

Mehrfachventil(-Einheit)

MVU

Einzelne Aufbau, der aus mehr als einem Ventil besteht

[QUELLE: IEC 60633:2019, 6.3.2, modifiziert – Die Anmerkungen zum Begriff wurden gelöscht.]

3.1.10

Paralleleinrichtung

Einrichtung, die hauptsächlich aus einem Paralleltransformator und ein Parallelumrichter besteht, welche die Funktion einer statischen synchronen Kompensationseinheit (STATCOM) erreicht

3.1.11

Reiheneinrichtung

Einrichtung, die hauptsächlich aus einem Reihentransformator und einem Reihenumrichter besteht, welche die Funktion einer statischen synchronen Serienkompensationseinheit (SSSC) erreicht

3.2 Symbole

C	Kapazität eines Submoduls
C_{VSC}	Zwischenkreiskapazität des VSC
T_p	Paralleltransformator
T_s	Reihentransformator
$U_{a/b/c}$	Leiter-Leiter Wechselspannung des Umrichters
$U_{r \text{ line-to-line}}$	Wechselspannung des verbrauchenden Wechselspannungssystems, Effektivwert
$U_{S \text{ line-to-line}}$	Wechselspannung des einspeisenden Wechselspannungssystems, Effektivwert
U_0	UPFC Spannung vor der Kompensation
ΔU_0	Kompensationsspannung durch Spannungsregelung
U_c	Kompensationsspannung durch Impedanzregelung
U_α	Kompensationsspannung durch Phasenwinkelregelung
U_d	Leiter-Leiter Gleichspannung des Gleichspannungszwischenkreises
U_{VN}	Leiter-Erde Spannung auf der Wechselspannungsseite des VSCs, Effektivwert
V_u	Spannung des oberen Zweigs
V_d	Spannung des unteren Zweigs
X	Induktivität der Übertragungsleitung
Z	Impedanz der Übertragungsleitung
δ_s	Spannungswinkel an der Einspeiseseite
δ_r	Spannungswinkel an der Verbrauchsseite

4 Prinzipien und Konfigurationen

4.1 Grundprinzipien

Der UPFC kann äquivalent einer Spannungsquelle betrachtet werden, die Amplitude und Phasenwinkel von 0° bis 360° einstellen kann. Der Strom der Übertragungsleitung fließt durch diese Spannungsquelle, was zu dem Austausch von Wirk- und Blindleistung zwischen der Spannungsquelle und der Wechselstromleitung führt. Die Struktur eines UPFC in einem Übertragungssystem mit zwei Anschlüssen ist in Bild 1 dargestellt.

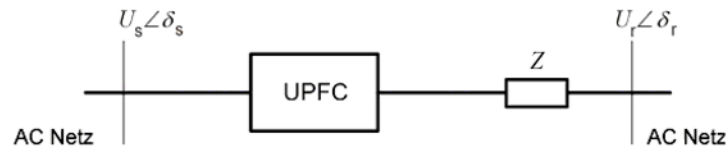


Bild 1 – UPFC in einem Übertragungssystem mit zwei Anschlüssen

Die Wirk- und Blindleistung der Übertragungsleitungen sind wie folgt:

$$P = \frac{U_s U_r}{X} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_s}{X} (U_s - U_r \cos(\delta_r - \delta_s)) \quad (2)$$

Der UPFC regelt den Leistungsfluss der Leitung durch Veränderung von U_s , U_r , δ_s , δ_r und X . Ein Schaltbild des UPFC-Leistungsflusses ist in Bild 2 dargestellt. Wirkleistung wird von dem UPFC-Parallelumrichter VSC1 über den Paralleltransformator Tp von dem Verbindungspunkt aufgenommen oder abgegeben, über die Gleichstromseite des UPFC und den Reihenumrichter VSC2 übertragen und letztlich an die Übertragungsleitungen über den Serientransformator Ts geliefert. Der UPFC stellt einen Wirkleistungsübertragungskanal für die Leitung bereit, wodurch die gesamte Wirkleistungsübertragungskapazität erhöht oder verringert werden kann. Für Blindleistung erfolgt ein Leistungsaustausch auf Tp und Ts durch VSC1 und VSC2. Zwischen VSC1 und VSC2T gibt es keinen Blindleistungsaustausch [1]¹.

Daher ist der UPFC in der Lage, den Energiefluss zu regeln, und dabei nicht nur die Blindleistung, sondern auch die Wirkleistung zu ändern.

Die verschiedenen Regelungsfunktionen des UPFC werden in kurz in Bild 3 dargestellt. Die Spannungsregelungsfunktion des UPFC ist in Bild 3 a) dargestellt, wobei die Reihenkompensationsspannung ΔU_0 des UPFC die gleiche oder entgegengesetzte Phasenlage wie U_0 hat und nur die Amplitude der Spannung regelt, anstatt die Phase der Spannung zu ändern. Dank der flexiblen Regelung der Serienausgangsspannungen kann der UPFC problemlos eine Spannungsregelung erreichen. Die Serienkompensation in UPFCs entspricht der allgemeinen Serienkompensation. Wie in Bild 3 b) gezeigt, hat der Serienteil keinen Wirkleistungsaustausch mit Übertragungsleitungen, daher sollte die Offset-Spannung U_c senkrecht zum Leitungsstrom I sein. Bild 3 c) zeigt ein Zeigerdiagramm der Phasenwinkelkompensation, die den Phasenwinkel der Spannung ändert, aber nicht ihre Amplitude. Die UPFC-Kompensationsspannung wird durch den in Bild 3 c) gezeigten Lichtbogen angezeigt. Ein UPFC entspricht daher einem Phasenschieber. Bild 3 d) zeigt ein Zeigerdiagramm der umfassenden Funktionalität des UPFC, der drei frühere Funktionen integriert, welche die Amplitude und Phase der Spannung entsprechend des Systembetriebs ändern [2] [3].

¹ Nummern in eckigen Klammern beziehen sich auf das Literaturverzeichnis.