

Inhaltsverzeichnis

Teil I Wissensbriefing

1	Ausrichtung, Randbedingungen und Begriffe	3
1.1	Inhaltliche Ausrichtung	3
1.2	Aufgaben von Stromrichtern	4
1.3	Kategorisierung von Stromrichtern	5
1.4	Netzbetrieb	5
1.5	Netzschutz	6

Teil II Wissensvernetzung

2	Stromrichter in Einphasensystemen	9
2.1	Einphasige Stromrichter am Gleichspannungszwischenkreis	9
2.1.1	Schaltzellen als Grundbausteine selbstgeführter Stromrichter	9
2.1.2	Halbbrückentopologie	14
2.1.3	Vollbrückentopologie	21
2.2	Filter als Verbindungselement zwischen Stromrichter und Netz	25
2.2.1	Auswirkungen harmonischer Frequenzkomponenten und Gegenmaßnahmen	25
2.2.2	Filtertopologien und Modellierung	30
2.2.3	Auslegung und Wirkungsweise eines LCL-Filters	40
2.3	Einstellung von Strom und Spannung	47
2.3.1	Wirkungsweise eines Stromrichters mit LCL-Filter	47
2.3.2	Mathematische Modellierung	52
2.3.3	Regelungskonzept	62
2.4	Leistungsübertragung und Charakteristik eines Stromrichters mit LCL-Filter	70
2.4.1	Einstellung der Wirk- und Verschiebungsblindleistung	72
2.4.2	Einstellung der Strom-/Spannungscharakteristik	83
2.4.3	Verallgemeinerung der Stromrichtercharakteristik	87
	Literatur	91

3	Stromrichter in Dreiphasensystemen	93
3.1	Modellierung eines dreiphasigen Stromrichters am elektrischen Netz .	94
3.2	Übersicht und Klassifizierung dreiphasiger Stromrichterregelungen . .	102
3.2.1	Generelle Regelkreisstruktur	103
3.2.2	Klassifizierungsschema für Stromrichterregelungen	106
3.3	Analyse und Entwurf verschiedener Stromrichterregelungen in DSRF-Koordinaten	109
3.3.1	Stromregelung und PQ -Modus	110
3.3.2	Netzfolgende Statikregelung $P(f)Q(U)$ und Synchronmaschinennachbildung $P(\hat{f})Q(U)$	122
3.3.3	Spannungsregelung uf	125
3.3.4	Netzbildende Statikregelung $f(P)U(Q)$	131
3.3.5	Virtuelle Trägheit $\hat{f}(P)U(Q)$	140
3.4	Vergleich von Stromrichter und Synchrongenerator	144
3.4.1	Frequenzregelung und Momentanreserve	144
3.4.2	Stabilitätsverhalten	151
3.4.3	Betriebsverhalten und Ersatzschaltbilder in Symmetrischen Komponenten	159
	Literatur	161
4	Stromrichter in Dreiphasen-Vierleitersystemen	165
4.1	Erhöhung der Stromrichterspannungen durch Addition einer dritten Harmonischen	165
4.2	Systemmodellierung und Regelung von Nullsystemgrößen	169
4.3	Symmetrierung der Zwischenkreisspannung	172
	Literatur	173
5	Netzschutz unter Einfluss von Stromrichtern	175
5.1	Grundannahmen zum Netzverhalten	176
5.1.1	Strom- und Spannungsverläufe im Kurzschlussfall	176
5.1.2	Verhalten im fehlerfreien Netzbetrieb	178
5.1.3	Topologie und Leitungsbeschaffenheit	179
5.1.4	Elektromechanische Ausgleichsvorgänge	180
5.2	Messvorschriften des Distanzschutzes	181
5.2.1	Komplexwertige Messvorschrift	182
5.2.2	Reellwertige Messvorschrift	183
5.2.3	Messvorschrift der Reaktanzmethode	184
5.3	Analytische Untersuchungen	190
5.3.1	Methodik	191
5.3.2	Konfiguration Ia: einseitige Einspeisung durch eine Drehfeldmaschine	194

5.3.3	Konfiguration Ib: einseitige Einspeisung durch einen Stromrichter	203
5.3.4	Konfiguration IIa: beidseitige Einspeisung durch zwei Drehfeldmaschinen	211
5.3.5	Konfiguration IIb: beidseitige Einspeisung durch eine Drehfeldmaschine und einen Stromrichter	224
5.3.6	Konfiguration IIc: beidseitige Einspeisung durch zwei Stromrichter	238
5.3.7	Konfiguration IIIa: beidseitige Einspeisung durch zwei Drehfeldmaschinen mit Zwischeneinspeisung durch eine Drehfeldmaschine	248
5.3.8	Konfiguration IIIb: beidseitige Einspeisung durch zwei Drehfeldmaschinen mit Zwischeneinspeisung durch einen Stromrichter	269
5.3.9	Konfiguration IIIc: beidseitige Einspeisung durch zwei Stromrichter mit Zwischeneinspeisung durch einen Stromrichter	284
5.4	Zusammenfassende Bewertung des Einflusses von Stromrichtern auf den Netzschutz	296
5.4.1	Grundlegende Unterschiede zwischen Drehfeldmaschinen- und Stromrichtereinspeisung	296
5.4.2	Auswirkungen von Zwischeneinspeisung und Stromrichter auf das Schutzsystem	297
	Literatur	301

Teil III Wissenscontainer

6	Modal- und Koordinatentransformationen	305
6.1	Raumzeiger und Nullgröße	305
6.2	Raumzeiger und Symmetrische Komponenten	312
6.3	DSRF-Komponenten	317
	Literatur	321
7	Elektrische Leistungsbegriffe	323
7.1	Energiestrom, Energiestromdichtevektor und Leistung	323
7.1.1	Ladungsmodell	324
7.1.2	Feldenergiemodell für widerstands- und querschnittslose Leiter	325
7.1.3	Feldenergiemodell für reale Leiter	326
7.2	Spannungs- und Stromsignale	329

7.3	Herleitung der Wirkleistung aus der Momentanleistung für Wechsel- und Gleichgrößen	330
7.4	Beurteilung der Wirkleistungsbereitstellung	333
7.5	Einführung der Scheinleistung	334
7.6	Beziehung von Wirk- und Scheinleistung und der Leistungsfaktor	335
7.7	Einführung der Blindleistung, Verschiebungs- und Verzerrungsblindleistung	338
7.8	Leistungen mit komplexwertigen Zeigern, komplexe Scheinleistung, komplexe Wechselleistung	342
7.9	Leistungen im Mehrleitersystem	347
7.10	Komplexwertige Leistungen im Drehstromsystem	351
7.11	Leistungen im Mehrleitersystem mit Symmetrischen Komponenten	352
7.12	Leistungsfaktor und Blindleistung für den verzerrten und unsymmetrischen Betrieb	355
7.13	Komplexe momentane Drehstromleistungen mit Raumzeiger, $\alpha\beta$ -, dq- und DSRF-Komponenten	360
	Literatur	367
8	Stromrichtertopologien	369
8.1	Grundlagen	369
8.1.1	Zweistufiger Elementarstromrichter	370
8.1.2	Aspekte mehrstufiger Topologien	372
8.2	Schalterbasierte Multilevel-Topologien	373
8.2.1	Diode-clamped Stromrichter	373
8.2.2	Flying-capacitor Stromrichter	374
8.3	Modulare Multilevel-Topologien	376
8.3.1	Stromrichterzellen und Stromrichterzweige	376
8.3.2	Dreieckschaltung	380
8.3.3	Doppelsternschaltung	382
	Literatur	387
9	Regelungstechnik	389
9.1	Struktur und Wirkungsweise einer Regelung	389
9.2	Digitale Reglerimplementierung	392
9.3	Modellierung der Regelstrecke	395
9.4	Analyse des Regelkreises	397
9.5	Reglersynthese	404
9.6	Zusätzliche Komponenten der Regeleinrichtung	413
9.7	Kaskadierte Regelkreise	418
9.8	Ausblick: Zustandsregler	420
	Literatur	421

10	Aufbau und Betrieb elektrischer Netze	423
10.1	Struktur und Aufbau elektrischer Netze	423
10.2	Physikalische Grundlagen für den Betrieb von Wechselstromnetzen	425
10.2.1	(Polrad-) Winkel- und Frequenzstabilität	426
10.2.2	Zusammenhang zwischen Spannung, Frequenz, Wirk- und Blindleistung	428
10.3	Eigenschaften und Regelung von Synchrongeneratoren	430
10.3.1	Übersicht	431
10.3.2	Elektromagnetische Vorgänge im Fehlerfall und Ersatzschaltbilder	432
10.3.3	Elektromechanisches Verhalten und Polradwinkelstabilität	435
10.3.4	Drehzahl-, Spannungs- und Statikregelung	443
10.4	Bilanzmodell und Frequenzverhalten des elektrischen Netzes	448
	Literatur	453
11	Schutztechnik	455
11.1	Generatorverhalten im Kurzschluss	455
11.2	Gleichanteil des Kurzschlussstroms in ohmsch-induktiven Netzen	458
11.3	Source Impedance Ratio (SIR)	460
11.4	Darstellung von Netzfehlern	461
11.4.1	Querfehler	462
11.4.2	Längsfehler	463
11.5	Sättigung	465
11.6	Netzpendelungen	467
11.7	Anregung im Distanzschutz	468
11.7.1	Überstromanregung	468
11.7.2	U/I -Anregung	469
11.7.3	$U/I\varphi$ -Anregung	470
11.7.4	Impedanzanregung	471
11.7.5	Allgemeines	471
11.8	Distanzschutzstaffelung	472
11.8.1	Einseitig gespeister Leitungszug	472
11.8.2	Beidseitig gespeister Leitungszug	473
11.8.3	Verzweigte Leitungen	474
11.9	Zwischeneinspeiseeffekt im Distanzschutz	475
11.10	Richtungsbestimmung	477
11.11	Maßnahmen zur Frequenzhaltung	479
11.12	Modellierung von Stromrichtern in Symmetrischen Komponenten	480
11.13	Anforderungen an dezentrale Energieumwandlungsanlagen bei Netzfehlern	481
	Literatur	484

12	Distanzschutzalgorithmen	487
12.1	Funktionsprinzip	487
12.2	Leitungsmodell in der Distanzschutztechnik	489
12.3	Erdimpedananzpassungsfaktoren	493
12.4	Fehlerschleifen	494
12.5	Messvorschrift in der Distanzschutztechnik	497
12.6	Impedanzmessmethode: Leitungsdifferentialgleichung	501
12.7	Impedanzmessmethode: Grundschrwingungszeiger	501
12.8	Messvorschrift für Leiter-Leiter-Schleifen	504
12.8.1	Komplexwertige Messvorschrift	505
12.8.2	Reellwertige Messvorschrift	505
12.8.3	Messfehler der Messvorschrift für Leiter-Leiter-Schleifen	506
12.9	Messvorschrift für Leiter-Erde-Schleifen	509
12.9.1	Komplexwertige Messvorschrift	510
12.9.2	Reellwertige Messvorschrift	511
12.9.3	Messfehler der Messvorschrift für Leiter-Erde-Schleifen	513
12.10	Algorithmus zur Lastflusskompensation	519
12.11	Reaktanzmethode	522
12.11.1	Problemstellung	522
12.11.2	Zielstellung	524
12.11.3	Lösungsidee	524
12.11.4	Varianten der Reaktanzmethode	524
12.11.5	Messvorschriften auf Basis der Reaktanzmethode	537
	Literatur	551