

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Darstellung der Betriebsmittel	5
2.1	Freileitung	5
2.1.1	Leitungsgleichungen	5
2.1.2	Berechnung der Resistanz	12
2.1.3	Berechnung der Induktivität	13
2.1.4	Mitimpedanz	17
2.1.5	Induktivitäten von Bündelleitern	21
2.1.6	Nullimpedanz	22
2.1.7	Berechnung der Kapazitäten	26
2.1.8	Mitkapazität	28
2.1.9	Kapazitäten von Bündelleitern	30
2.1.10	Nullkapazität	30
2.1.11	Ladeleistung (kapazitive Blindleistung)	31
2.1.12	Stromverdrängung	32
2.1.13	Randfeldstärke	33
2.1.14	Verdrillung	34
2.1.15	Natürliche Leistung	35
2.1.16	Spannungsprofil	35
2.1.17	Kompensation	38
2.1.18	Kennwerte von Freileitungen	41
2.2	Kabel	41
2.2.1	Aufbau, Typen	42
2.2.2	Elektrische Schirmung	42
2.2.3	Leiterisolation	43
2.2.4	Metallmantel	44
2.2.5	Bewehrung	44
2.2.6	Elektrische Kenndaten	45
2.3	Gas-Isolierte Schaltanlagen (GIS) bzw. Leitungen (GIL)	59

VII

2.4	Transformator	64
2.4.1	Aufbau, Bauarten	64
2.4.2	Schaltgruppen, Schaltungen	65
2.4.3	Induktives Ersatzschaltbild eines Drehstromtransformators (Zweiwicklungstransformator)	66
2.4.4	Ersatzschaltbild eines Dreiwicklungstransformators	75
2.4.5	Spartransformatoren	78
2.4.6	Kapazitives Ersatzschaltbild	84
2.4.7	Resonanzanregung	86
2.4.8	Oberschwingungsberechnungen	91
2.4.9	Transiente Berechnungen	92
2.4.10	Kennwerte von Transformatoren	94
2.5	Generatoren	96
2.5.1	Reaktanzen und Zeitkonstanten (betriebsfrequent)	96
2.5.2	Netzkurzschluss eines Generators	101
2.5.3	Ersatzschaltbilder	102
2.5.4	Kennwerte von Generatoren	102
2.6	Spulen	103
2.7	Kondensatoren	106
2.8	Netz	107
2.9	Asynchronmotoren	109
2.10	Schaltgeräte	111
2.10.1	Einteilung der Schaltgeräte	112
2.10.2	Schaltlichtbogen	112
2.10.3	Bauformen von Schaltgeräten	113
2.11	Zusammenfassung	115
	Literatur	116
3	Drehstromsystem und Komponenten	119
3.1	Drehstromsystem (Dreiphasensystem)	119
3.1.1	Strom- und Spannungsbeziehungen	120
3.1.2	Impedanzen des Drehstromsystems	123
3.2	Komponentensysteme	125
3.2.1	Symmetrische Komponenten	126
3.2.2	0, α , β -Komponenten	149
3.2.3	0, d, q-Komponenten	154
3.3	Berechnung von transienten Vorgängen	155
3.3.1	Ausschaltung eines einpoligen Kurzschlussstroms	155
3.3.2	Ausschaltvorgang: zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung – zweipoliger Kurzschluss – Leerlauf	158
3.4	Zusammenfassung	166
	Literatur	167

4	Transiente Vorgänge/Wanderwellenverfahren	169
4.1	Frequenzbereiche der transienten Vorgänge	169
4.2	Anzahl π -Glieder und Schrittweite	170
4.3	Wellengleichungen (allgemein)	171
4.4	Ableitung der Kettenmatrix	173
4.5	Wellenimpedanz	175
4.6	Wellenimpedanz im Mit- und Nullsystem	177
4.6.1	Wellenwiderstand einer Freileitung für hohe Frequenzen	177
4.6.2	Einphasiger Blitzeinschlag	179
4.6.3	Zweiphasiger Blitzeinschlag	180
4.6.4	Dreiphasiger Blitzeinschlag	181
4.7	Reflexions- und Brechungsfaktoren	181
4.8	Einkopplung auf parallele Leitungen	183
4.9	Beispiele von Reflexionen und Brechungen	185
4.9.1	Beispiel 1	185
4.9.2	Beispiel 2	188
4.9.3	Beispiel 3	193
4.9.4	Beispiel 4	195
4.9.5	Beispiel 5	197
4.9.6	Beispiel 6	201
4.9.7	Beispiel 7	202
4.9.8	Beispiel 8	204
4.10	Verhalten von Überspannungsableitern	210
4.11	Berechnung mit Hilfe des Wellengitters (Lattice Diagram)	212
4.12	Zusammenfassung	215
	Literatur	215
5	Kurzschluss/Erdschluss	217
5.1	Stationäre Ströme und Spannungen	218
5.1.1	Berechnung der Kurzschlussströme	218
5.1.2	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf den einpoligen Kurzschlussstrom	220
5.1.3	Erdkurzschluss mit Spartransformatoren	234
5.2	Transiente Ströme und Spannungen (generatorfern)	243
5.2.1	Dreipoliger Kurzschluss	243
5.2.2	Zweipoliger Kurzschluss	251
5.2.3	Einpoliger Kurzschluss/Erdschluss	255
5.3	Generatornahe Kurzschlüsse	266
5.4	Fehlsynchronisation	273
5.5	Kurzschlussstrombeitrag von Kompensationsanlagen	275
5.5.1	Beitrag einer Kompensation im Höchstspannungsnetz	275
5.5.2	Allgemeine Auslegung	283

5.6	Spannungsübertritt zwischen Drehstromsystemen	285
5.6.1	Berechnung der stationären Spannungsverteilung	285
5.6.2	Spannungsbeanspruchung der 110-kV-Überspannungsableiter ...	292
5.6.3	Digitale Simulation	294
5.7	Zusammenfassung	302
	Literatur	302
6	Einschaltvorgänge	305
6.1	Grundlagen	305
6.2	Ohmscher Kreis	307
6.3	Induktiver Kreis	308
6.3.1	Gleichstrom	308
6.3.2	Wechselstrom	310
6.4	Kapazitiver Kreis	314
6.4.1	Gleichstrom	314
6.4.2	Wechselstrom	316
6.4.3	Zusammenfassung	318
6.5	LC-Schwingkreise	319
6.5.1	Gleichstrom	319
6.5.2	Wechselstrom	322
6.5.3	Synchronisiertes Schalten bzw. Einschaltwiderstände	333
6.6	Einschalten von Leitungen	336
6.6.1	Nachbildung mit konzentrierten Elementen	336
6.6.2	Nachbildung mit Wellenwiderstand und Wanderwellenlaufzeit ...	349
6.6.3	Kapazitive Einkopplung bei einer unsymmetrischen Zuschaltung	359
6.7	Überspannungen in MS-Kabelnetzen von Offshore-Windparkanlagen bei Einschaltungen und einpoligen Fehlern mit Erdberührung	363
6.7.1	Anlagenkonfiguration	363
6.7.2	Betriebsmitteldaten	364
6.7.3	Berechnung von transienten Vorgängen	367
6.7.4	Ergebnisse und Bewertung	368
6.8	Einschaltvorgänge von Kompensationsanlagen	373
6.9	Einschaltvorgänge von Transformatoren	375
6.9.1	Berechnung des Einschaltstroms (Inrush)	376
6.9.2	Berechnung der übertragenen Spannungen	382
6.9.3	Resonanzanregung	386
6.9.4	Unsymmetrische Zuschaltung	394
6.10	Zusammenfassung	400
	Literatur	401

7	Ausschaltvorgänge	403
7.1	Ohmscher Kreis	404
7.2	Induktiver Kreis	405
7.2.1	Ausschaltung ohne Wiedertzündungen	405
7.2.2	Ausschaltung mit Wiedertzündungen	411
7.2.3	Synchronisiertes Schalten	414
7.2.4	Virtueller Stromabriss	415
7.3	Kapazitiver Kreis	417
7.4	Ausschalten einer Leitung	428
7.5	Klemmenkurzschluss	433
7.5.1	Klemmenkurzschluss (Wechselstrom)	433
7.5.2	Klemmenkurzschluss (Drehstrom)	444
7.6	Ausschaltung von Kurzschlussströmen bei parallelen Transformatoren	469
7.7	Abstandskurzschluss	471
7.8	Ausschalten von Transformatoren	476
7.9	Ausschalten bei Phasenopposition	478
7.10	Zusammenfassung	482
	Literatur	482
8	Schaltverhalten von Leistungsschaltern	485
8.1	Lichtbogenlöschung in SF ₆	485
8.2	Grundsätzlicher Aufbau von SF ₆ -Hochspannungsleistungsschaltern	487
8.3	Schaltverhalten von SF ₆ -Hochspannungsleistungsschaltern	491
8.3.1	Schalten von Kurzschlussströmen	491
8.3.2	Schalten von kapazitiven Strömen	504
8.3.3	Schalten von kleinen induktiven Strömen	507
8.4	Verhalten von Vakuum-Mittelspannungsleistungsschaltern	510
8.4.1	Lichtbogenlöschung in Vakuum und grundsätzlicher Aufbau von Vakuumschaltern	510
8.4.2	Schalten von Kurzschlussströmen	514
8.4.3	Stromabriss und multiple Wiedertzündungen	516
8.5	Zusammenfassung	518
	Literatur	519
9	Schalten von Trenn- und Erdungsschaltern	521
9.1	Grundlagen	521
9.2	Schalten von (kleinen) kapazitiven Strömen mit Trennschaltern	523
9.2.1	Grundsätzliche Darstellung der Ausgleichsvorgänge	523
9.2.2	Hochfrequente Ausgleichsvorgänge beim Schalten von SF ₆ -isolierten metallgekapselten Trennschaltern	526
9.2.3	Hochfrequente Ausgleichsvorgänge beim Schalten von Freiluft-Trennschaltern	529
9.2.4	Mittel- und niederfrequente Ausgleichsvorgänge	530

9.3	Schalten von Kommutierungsströmen beim Sammelschienenwechsel ...	532
9.3.1	Darstellung der grundsätzlichen Kommutierungsvorgänge	533
9.3.2	Stationäre Kommutierungsbeanspruchungen	534
9.3.3	Transiente Kommutierungsbeanspruchungen	538
9.4	Schalten von Leitungserdungsschaltern bei Beeinflussung durch in Betrieb befindliche Stromkreise	540
9.4.1	Grundsätzliches zum Schalten von Leitungserdungsschaltern in Mehrfachstromkreisen	540
9.4.2	Stationäre Beanspruchungen	541
9.4.3	Transiente Einschwingbedingungen	545
9.4.4	Einflussgrößen für Beanspruchung von Leitungserdungsschalter	546
9.5	Einschalten von Erdungsschaltern auf Kurzschluss	548
9.6	Zusammenfassung	549
	Literatur	549
10	Schaltverhalten von Trenn-und Erdungsschaltern	551
10.1	Schalten von (kleinen) kapazitiven Strömen mit Trennschaltern	551
10.1.1	Typische hochfrequente Ausgleichsvorgänge beim Schalten von SF ₆ -Trennschaltern in realen Schaltanlagenanordnungen ...	552
10.1.2	Typische hochfrequente Ausgleichsvorgänge beim Schalten von Freilufttrennschaltern	559
10.1.3	Lichtbogenlösch- und Wiedertzündvorgänge beim Schalten von SF ₆ -Trennschaltern auf Grund der mittel- und niederfrequenten Ausgleichsvorgänge	561
10.1.4	Lösch- und Wiedertzündverhalten von Freiluft-Trennschaltern ...	564
10.1.5	Folgerungen für das Schaltverhalten und die grundsätzliche Auslegung der Schaltanlage	568
10.2	Schalten von Kommutierungsströmen beim Sammelschienenwechsel ...	570
10.2.1	Verhalten von Freilufttrennschaltern	570
10.2.2	Verhalten von SF ₆ -isolierten, metallgekapselten Trennschaltern ...	572
10.2.3	Folgerungen für das Schaltverhalten und die Auslegung von Sammelschientrennschaltern	575
10.3	Schalten von eingekoppelten Strömen mit Leitungserdungsschaltern ...	575
10.3.1	Freiluft-Leitungserdungsschalter	575
10.3.2	SF ₆ -isolierte, metallgekapselte Leitungserdungsschalter	580
10.3.3	Folgerungen für das Schaltverhalten und die Auslegung von Leitungserdungsschaltern	583
10.4	Zusammenfassung	585
	Literatur	586

11 Sonstige transiente Vorgänge	587
11.1 Ferroresonanzen/Kippschwingungen	587
11.1.1 Grundlagen	587
11.1.2 Möglichkeiten von Ferroresonanzen	599
11.2 Subsynchroner Resonanzen (SSR)	607
11.2.1 Entstehen von subsynchronen Resonanzen	607
11.2.2 Induktionseffekt	611
11.2.3 Wechselwirkung zwischen den elektrischen und mechanischen Systemen (Torsional Interaction)	612
11.2.4 Vergleich Reihen- und Querkompensation	612
11.3 Zusammenfassung	616
Literatur	617
12 Anhang	619
12.1 Umwandlung von Vierpolen	619
12.1.1 π -Ersatzschaltung	619
12.1.2 T-Ersatzschaltung	622
12.2 Umwandlung einer Kettenmatrix in eine Impedanz-, Admittanzmatrix	623
12.3 Laplace-Transformationen	624
12.4 Trigonometrische Funktionen	627
12.5 Spannungsoperatoren	628
12.6 Stern-Dreieck Umwandlungen	628
12.7 Fourier-Reihen	629
Sachverzeichnis	631