

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XII
1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung	1
2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung	5
2.1 Fossil befeuerte Kraftwerke	5
2.1.1 Kondensationskraftwerke	5
2.1.1.1 Prinzipieller Ablauf der Energieumwandlung in Kondensationskraftwerken	6
2.1.1.2 Aufbau von Kondensationskraftwerken	8
2.1.1.3 Wärmeverbrauchskennlinie von Kondensationskraftwerken	14
2.1.2 Überblick über weitere Wärmekraftwerke	15
2.1.2.1 Gegendruckanlagen	15
2.1.2.2 Kraftwerke mit Gasturbinen	15
2.1.2.3 Kombinationskraftwerke	16
2.2 Wasserkraftwerke	17
2.2.1 Bauarten von Wasserturbinen	17
2.2.2 Bauarten von Wasserkraftwerken	18
2.3 Kernkraftwerke	19
2.4 Kraftwerkstechnische Regelung	22
2.4.1 Regelung von Wärmekraftwerken	22
2.4.1.1 Regelung eines Blockes im Inselbetrieb	22
2.4.1.2 Regelung im Insel- und Verbundnetz	27
2.4.2 Regelung von Wasser- und Kernkraftwerken	31
2.5 Kraftwerkseinsatz	31
2.5.1 Verlauf der Netzlösungen	31
2.5.2 Deckung der Netzlösungen	32
2.6 Aufgaben	33
3 Aufbau von Energieversorgungsnetzen	35
3.1 Übertragungssysteme	35
3.2 Wichtige Netzstrukturen	38
3.2.1 Niederspannungsnetze	39
3.2.2 Mittelspannungsnetze	41
3.2.3 Hoch- und Höchstspannungsnetze	43
3.3 Aufgaben	45
4 Aufbau und Ersatzschaltbilder wichtiger Netzelemente	47
4.1 Berechnung von Netzwerken mit induktiven Kopplungen	47
4.1.1 Analytische Beschreibung induktiver Kopplungen	47
4.1.2 Induktive Kopplungen in Netzen	51
4.1.3 Nichtlineare Induktivitäten	55

4.2	Transformatoren	56
4.2.1	Einphasige Zweiwicklungstransformatoren	57
4.2.1.1	Aufbau und Gültigkeitsbereich induktiver Modelle von einphasigen Zweiwicklungstransformatoren	57
4.2.1.2	Ersatzschaltbild eines einphasigen Zweiwicklungstransformators	61
4.2.1.3	Betriebsverhalten von Zweiwicklungstransformatoren im einphasigen Netzverband	66
4.2.2	Einphasige Dreiwirkungstransformatoren	68
4.2.3	Dreiphasige Transformatoren	72
4.2.3.1	Aufbau eines Drehstromtransformators mit zwei Wicklungen	72
4.2.3.2	Schaltungen	73
4.2.3.3	Übersetzung bei symmetrischem Betrieb	74
4.2.3.4	Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb	77
4.2.3.5	Betriebsverhalten von dreiphasigen Zweiwicklungstransformatoren im Netzverband	82
4.2.4	Spartransformatoren	84
4.2.4.1	Aufbau und Einsatz von Spartransformatoren	84
4.2.4.2	Ersatzschaltbild eines Spartransformators	86
4.2.5	Transformatoren mit einstellbarer Übersetzung	88
4.2.5.1	Erläuterung der direkten Spannungseinstellung	88
4.2.5.2	Erläuterung der indirekten Spannungseinstellung	90
4.2.5.3	Leistungsverhältnisse bei Umspannern mit einstellbaren Übersetzungen	92
4.3	Wandler	96
4.3.1	Spannungswandler	96
4.3.2	Stromwandler	98
4.4	Synchronmaschinen	100
4.4.1	Grundsätzlicher Aufbau von Synchronmaschinen	100
4.4.2	Erläuterungen zum Betriebsverhalten von Synchronmaschinen	101
4.4.2.1	Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb	101
4.4.2.2	Betriebseigenschaften von Synchronmaschinen in Energieversorgungsnetzen	106
4.4.2.3	Spannungsregelung von Synchronmaschinen	110
4.4.3	Erläuterungen zum Kurzschlußverhalten von Synchronmaschinen	112
4.4.3.1	Dreipoliger Klemmenkurzschluß bei einer verlustfreien, leerlaufenden Synchronmaschine mit Dauermagnetläufer .	112
4.4.3.2	Dreipoliger Klemmenkurzschluß bei einer verlustfreien, leerlaufenden Vollpolmaschine mit Gleichstromerregung .	114
4.4.3.3	Kurzschlußverhalten einer belasteten Vollpolmaschine .	117
4.5	Freileitungen	122
4.5.1	Aufbau von Freileitungen	122
4.5.2	Ersatzschaltbilder von Drehstromfreileitungen für den symmetrischen Betrieb	127
4.5.2.1	Induktivitätsbegriff bei Dreileiter-systemen	128
4.5.2.2	Kapazitätsbegriff bei Dreileiter-systemen	134

4.5.2.3	Ohmscher Widerstand bei Dreileitersystemen	140
4.5.2.4	Ableitungswiderstand bei Dreileitersystemen	141
4.5.3	Betriebsverhalten von symmetrisch aufgebauten Drehstromfreileitungen bei symmetrischem Betrieb	142
4.6	Kabel	146
4.6.1	Aufbau von Kabeln	147
4.6.2	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Drehstromkabeln	154
4.7	Lasten	156
4.8	Leistungskondensatoren	159
4.8.1	Aufbau von Leistungskondensatoren	159
4.8.2	Grundsätzliche Erläuterungen zur Blindleistungskompensation	160
4.8.3	Blindleistungskompensation bei Netzen mit parasitären Oberschwingungen	162
4.9	Drosselpulen	167
4.10	Schalter	169
4.10.1	Ersatzschaltbild und prinzipielle Eigenschaften von Schaltern	169
4.10.2	Beschreibung wichtiger Schaltertypen	170
4.11	Schaltanlagen	176
4.11.1	Schaltpläne von Schaltanlagen	176
4.11.2	Bauweise von Schaltanlagen	180
4.11.3	Berücksichtigung von Schaltanlagen in Ersatzschaltbildern	187
4.11.4	Leittechnik in Schaltanlagen	187
4.12	Überblick über wichtige Einrichtungen zum Schutz von Netzelementen	189
4.12.1	Einrichtungen zum Schutz vor Überspannungen	189
4.12.2	Einrichtungen zum Schutz vor Überströmen	193
4.12.2.1	Sicherungen und I_s -Begrenzer	194
4.12.2.2	Schutzsysteme	199
4.13	Aufgaben	204
5	Bemessung von Netzen im Normalbetrieb	211
5.1	Bemessungskriterien für den Normalbetrieb und Erläuterungen zu elektrisch kurzen Leitungen	211
5.2	Einseitig gespeiste Leitung ohne Verzweigungen	212
5.3	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen	217
5.4	Zweiseitig gespeiste Leitung	218
5.5	Vernaschtes Netz	221
5.6	Nachbildung von Teilnetzen	223
5.7	Lastflußrechnung	225
5.8	Aufgaben	230
6	Dreipoliger Kurzschluß	233
6.1	Generatorferner dreipoliger Kurzschluß	233
6.1.1	Berechnung des stationären Kurzschlußstromverlaufes in unverzweigten Netzen	234
6.1.2	Berechnung des transienten Kurzschlußstromverlaufes in unverzweigten Netzen	235

6.2	Generatornaher dreipoliger Kurzschluß	238
6.2.1	Verzweigte Netze mit einer Generatoreinspeisung	238
6.2.2	Berücksichtigung von Verbrauchern und Querkapazitäten	244
6.2.3	Verzweigte Netze mit mehreren Generatoreinspeisungen	246
6.3	Aufgaben	250
7	Kurzschlußfestigkeit von Anlagen	254
7.1	Lichtbogenkurzschlüsse in Anlagen	254
7.2	Mechanische Kurzschlußfestigkeit	256
7.2.1	Auslegung von linienförmigen, biegesteifen Leitern	256
7.2.2	Auslegung von Leiterschienen mit großen Querschnittsabmessungen	260
7.2.3	Auslegung von Stützern	262
7.2.4	Auslegung von Leiterseilen und Kabeln	263
7.3	Thermische Kurzschlußfestigkeit	263
7.4	Maßnahmen zur Beeinflussung der Kurzschlußleistung	268
7.5	Auswirkungen von Kurzschläßen auf das transiente Generatordrehzahlverhalten	271
7.5.1	Wichtige Netzparameter zur Gewährleistung der transientes Stabilität	271
7.5.2	Drehzahlverhalten der Generatoren in einem kurzschlußbehafteten Netz mit mehrfacher Generatoreinspeisung	277
7.6	Aufgaben	279
8	Grundzüge der Betriebsführung und Planung von Netzen	281
8.1	Betriebsführung von Netzen	281
8.2	Wichtige Gesichtspunkte zur Planung von Netzen	283
8.3	Aufgaben	288
9	Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau	290
9.1	Methode der symmetrischen Komponenten	290
9.2	Anwendung der symmetrischen Komponenten auf unsymmetrisch betriebene Drehstromnetze	292
9.3	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Mit- und Gegensystem der symmetrischen Komponenten	297
9.4	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Nullsystem der symmetrischen Komponenten	300
9.4.1	Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil	301
9.4.1.1	Ohmscher Widerstand einer nullspannungsgespeisten Freileitung	301
9.4.1.2	Induktivität einer nullspannungsgespeisten Freileitung . .	303
9.4.1.3	Kapazitäten einer nullspannungsgespeisten Freileitung . .	305
9.4.2	Nullimpedanz einer Freileitung mit Erdseil	305
9.4.3	Nullimpedanz einer Doppelleitung	307
9.4.4	Nullimpedanz von Kabeln	308

9.4.5 Nullimpedanz von Transformatoren	310
9.4.5.1 Dreischinkeltransformatoren	310
9.4.5.2 Fünfschenkeltransformatoren	315
9.4.6 Nullimpedanz von Synchronmaschinen	316
9.5 Veranschaulichung des Berechnungsverfahrens an einem Beispiel	316
9.6 Aufgaben	321
10 Berechnung von symmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit punktuellen Asymmetrien im Aufbau	322
10.1 Beschreibung häufiger Asymmetrien	322
10.2 Erläuterung des Berechnungsverfahrens	323
10.3 Anwendung des Berechnungsverfahrens auf verschiedene Fehlerarten	328
10.3.1 Erdschluß mit Übergangswiderstand	328
10.3.2 Zweipoliger Kurzschluß mit Erdberührung	329
10.3.3 Leiterunterbrechung	333
10.3.4 Mehrfachfehler	335
10.4 Berechnung von transienten Netzvorgängen	338
10.5 Aufgaben	343
11 Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen	346
11.1 Netze mit isolierten Sternpunkten	346
11.2 Netze mit Erdschlußkompensation	349
11.3 Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung	355
11.4 Aufgaben	359
12 Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren	362
12.1 Direkter und indirekter Berührungsschutz in Netzen mit Nennspannungen über 1 kV	362
12.2 Berührungsspannungen bei Erdern	365
12.3 Berechnung von Erdungsspannungen bei unsymmetrischen Fehlern	368
12.4 Wichtige Auslegungskriterien für Erdungsanlagen	372
12.5 Indirekter Berührungsschutz in Niederspannungsnetzen	374
12.6 Aufgaben	377
Lösungen	379
Anhang	418
Quellenverzeichnis	422
Literaturverzeichnis	423
Sachwortverzeichnis	429