

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung</b>	<b>5</b>
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	9
2.1.1.2.1 Kesselanlage	9
2.1.1.2.2 Dampfturbine	12
2.1.1.2.3 Kondensator	14
2.1.1.2.4 Kesselspeisepumpen	15
2.1.1.2.5 Luftvorwärmer	15
2.1.1.2.6 Speisewasservorwärmer	16
2.1.1.3 Wärmeverbrauchskenlinie von Kondensationskraftwerken	16
2.1.2 Überblick über weitere Wärmekraftwerke	17
2.1.2.1 Gegendruckanlagen	17
2.1.2.2 Kraftwerke mit Gasturbinen	18
2.1.2.3 Kombinationskraftwerke	19
2.2 Wasserkraftwerke	19
2.2.1 Bauarten von Wasserturbinen	20
2.2.2 Bauarten von Wasserkraftwerken	21
2.3 Kernkraftwerke	22
2.4 Kraftwerksregelung	25
2.4.1 Regelung von Wärmekraftwerken	25
2.4.1.1 Regelung eines Blockes im Inselbetrieb	25
2.4.1.2 Regelung im Insel- und Verbundnetz	31
2.4.2 Regelung von Wasser- und Kernkraftwerken	35
2.5 Kraftwerkseinsatz	35
2.5.1 Verlauf der Netzlast	35
2.5.2 Deckung der Netzlast	36

<b>3</b>	<b>Aufbau von Energieversorgungsnetzen</b>	<b>37</b>
3.1	Übertragungssysteme	37
3.2	Wichtige Netzstrukturen	40
3.2.1	Niederspannungsnetze	40
3.2.2	Mittelspannungsnetze	43
3.2.3	Hoch- und Höchstspannungsnetze	45
<b>4</b>	<b>Aufbau und Ersatzschaltbilder wichtiger Netzelemente</b>	<b>49</b>
4.1	Berechnung von Netzwerken mit induktiven Kopplungen	49
4.1.1	Analytische Beschreibung der induktiven Kopplung bei dünnen Leiterschleifen	49
4.1.2	Berechnung von Netzwerken mit induktiv gekoppelten Leiterschleifen	54
4.1.3	Induktive Kopplung bei Spulen	56
4.1.4	Zwei- und Vierpolersatzschaltungen für Netzteile	59
4.1.4.1	Ersatzschaltung für Zweipole	59
4.1.4.2	Ersatzschaltung für Vierpole	60
4.2	Transformatoren	63
4.2.1	Volltransformatoren	63
4.2.1.1	Einphasige Zweiwicklungstransformatoren	64
4.2.1.1.1	Aufbau eines einphasigen Zweiwicklungstransformators	64
4.2.1.1.2	Ersatzschaltbild eines einphasigen Zweiwicklungstransformators	66
4.2.1.1.3	Betriebsverhalten von Zweiwicklungstransformatoren im einphasigen Netzverband	71
4.2.1.2	Einphasige Dreiwicklungstransformatoren	73
4.2.1.3	Dreiphasige Transformatoren	77
4.2.1.3.1	Aufbau eines dreiphasigen Zweiwicklungstransformators	77
4.2.1.3.2	Schaltungsvarianten	78
4.2.1.3.3	Übersetzung bei symmetrischem Betrieb	80
4.2.1.3.4	Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb	83
4.2.1.3.5	Betriebsverhalten von dreiphasigen Zweiwicklungstransformatoren im Netzverband	86
4.2.2	Spartransformatoren	88
4.2.2.1	Aufbau und Einsatz von Spartransformatoren	88
4.2.2.2	Ersatzschaltbild eines Spartransformators	90
4.2.3	Transformatoren mit einstellbarer Übersetzung	92
4.2.3.1	Erläuterung der direkten Spannungseinstellung	93
4.2.3.2	Erläuterung der indirekten Spannungseinstellung	95
4.2.3.3	Leistungsverhältnisse beim Umspannen mit einstellbaren Übersetzungen	99

4.3	Wandler	103
4.3.1	Spannungswandler	104
4.3.2	Stromwandler	105
4.4	Synchrongeneratoren	107
4.4.1	Grundsätzlicher Aufbau von Synchronmaschinen	108
4.4.2	Erläuterungen zum Betriebsverhalten von Synchronmaschinen	109
4.4.2.1	Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb	109
4.4.2.2	Betriebseigenschaften von Synchronmaschinen in Energieversorgungsnetzen	116
4.4.3	Erläuterungen zum Kurzschlußverhalten von Synchronmaschinen	121
4.4.3.1	Dreipoliger Klemmenkurzschluß bei einer verlustfreien, leerlaufenden Synchronmaschine mit Magnetläufer	121
4.4.3.2	Dreipoliger Klemmenkurzschluß bei einer verlustfreien, leerlaufenden Vollpolmaschine	124
4.4.3.3	Kurzschlußverhalten einer belasteten Vollpolmaschine	127
4.5	Freileitungen	132
4.5.1	Aufbau von Freileitungen	132
4.5.2	Ersatzschaltbilder von Drehstromfreileitungen für den symmetrischen Betrieb	140
4.5.2.1	Induktivitätsbegriff bei Dreileitersystemen	141
4.5.2.2	Kapazitätsbegriff bei Dreileitersystemen	147
4.5.2.2.1	Berechnung der Teilkapazitäten	147
4.5.2.2.2	Festlegung einer Betriebskapazität	153
4.5.2.3	Ohmscher Widerstand bei Dreileitersystemen	154
4.5.2.4	Ableitungswiderstand bei Dreileitersystemen	155
4.5.3	Betriebsverhalten von symmetrisch aufgebauten Drehstromfreileitungen bei symmetrischem Betrieb	156
4.6	Kabel	160
4.6.1	Aufbau von Kabeln	161
4.6.2	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Drehstromkabeln	170
4.7	Lasten	173
4.8	Leistungskondensatoren	176
4.8.1	Aufbau von Leistungskondensatoren	176
4.8.2	Grundsätzliche Erläuterungen zur Blindleistungskompensation	177
4.8.3	Blindleistungskompensation bei Netzen mit parasitären Oberschwingungen	180
4.9	Drosselpulen	185
4.10	Schalter	188
4.10.1	Ersatzschaltbild und prinzipielle Eigenschaften von Schaltern	188
4.10.2	Beschreibung wichtiger Schaltertypen	189
4.11	Schaltanlagen	193
4.11.1	Aufbau von Schaltanlagen	193
4.11.1.1	Freiluftschaltanlagen	193
4.11.1.2	Innenraumschaltanlagen	196
4.11.2	Berücksichtigung von Schaltanlagen in Ersatzschaltbildern	200

4.12	Überblick über wichtige Einrichtungen zum Schutz von Netzelementen . . .	201
4.12.1	Einrichtungen zum Schutz vor Überspannungen . . . . .	201
4.12.2	Einrichtungen zum Schutz von Überströmen . . . . .	204
4.12.2.1	Sicherungen, Leitungsschutzschalter, $I_s$ -Begrenzer . . . .	204
4.12.2.2	Schutzsysteme . . . . .	208
5	<b>Bemessung von Netzen mit elektrisch kurzen Leitungen im Normalbetrieb . . .</b>	<b>212</b>
5.1	Bemessungskriterien für den Normalbetrieb und Erläuterungen zu elektrisch kurzen Leitungen . . . . .	212
5.2	Einseitig gespeiste Leitung ohne Verzweigung . . . . .	214
5.3	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen . . . . .	219
5.4	Zweiseitig gespeiste Leitung . . . . .	220
5.5	Vermaschtes Netz . . . . .	224
5.6	Nachbildung von Teilnetzen . . . . .	229
5.7	Lastflußrechnung . . . . .	232
6	<b>Dreipoliger Kurzschluß . . . . .</b>	<b>234</b>
6.1	Generatorferner dreipoliger Kurzschluß . . . . .	234
6.1.1	Berechnung des stationären Kurzschlußstromverlaufes in unverzweigten Netzen . . . . .	235
6.1.2	Berechnung des transienten Kurzschlußstromverlaufes in unverzweigten Netzen . . . . .	237
6.2	Generatornaher dreipoliger Kurzschluß . . . . .	240
6.2.1	Berechnung des Anfangskurzschlußwechselstromes in unverzweigten Netzen . . . . .	240
6.2.2	Berechnung des Stoßkurzschluß-, Ausschaltwechsel- und Dauerkurzschlußstromes in unverzweigten Netzen . . . . .	242
6.3	Ersatzschaltbilder von Verbrauchern beim dreipoligen Kurzschluß . . . .	244
6.4	Dreipoliger Kurzschluß in verzweigten Netzen . . . . .	246
6.4.1	Ermittlung des Anfangskurzschlußwechselstromes in verzweigten Netzen . . . . .	246
6.4.2	Berechnung des Stoßkurzschluß-, Ausschaltwechsel- und Dauerkurzschlußstromes in verzweigten Netzen . . . . .	250
6.5	Veranschaulichung der Kurzschlußstromberechnung an einem Beispiel . . . . .	251
7	<b>Kurzschlußfestigkeit von Anlagen . . . . .</b>	<b>256</b>
7.1	Lichtbogenkurzschlüsse in Anlagen . . . . .	256
7.2	Mechanische Kurzschlußfestigkeit . . . . .	258
7.2.1	Auslegung von dünnen Leiterschienen . . . . .	258
7.2.2	Auslegung von Leiterschienen mit großen Querschnittsabmessungen . . . . .	263
7.2.3	Auslegung von Stützern . . . . .	266
7.2.4	Auslegung von Leiterseilen und Kabeln . . . . .	266
7.3	Thermische Kurzschlußfestigkeit . . . . .	267
7.4	Maßnahmen zur Beeinflussung der Kurzschlußleistung . . . . .	270

<b>8</b>	<b>Anwendung der Lastfluß- und Kurzschlußstromberechnungen bei Betrieb und Planung von Netzen</b>	<b>276</b>
<b>9</b>	<b>Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau</b>	<b>283</b>
9.1	Methode der symmetrischen Komponenten	283
9.2	Anwendung der symmetrischen Komponenten auf unsymmetrisch betriebene Drehstromnetze	286
9.3	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Mit- und Gegensystem der symmetrischen Komponenten	291
9.4	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Nullsystem der symmetrischen Komponenten	293
9.4.1	Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil	294
9.4.1.1	Ohmscher Widerstand einer nullspannungsgespeisten Freileitung	295
9.4.1.2	Induktivität einer nullspannungsgespeisten Freileitung	298
9.4.1.3	Kapazitäten einer nullspannungsgespeisten Freileitung	300
9.4.2	Nullimpedanz einer Freileitung mit Erdseil	300
9.4.3	Nullimpedanz einer Doppelleitung	303
9.4.4	Nullimpedanz von Kabeln	304
9.4.5	Nullimpedanz von Transformatoren	306
9.4.5.1	Dreischenkeltransformatoren	306
9.4.5.2	Fünfschenkeltransformatoren	311
9.4.6	Nullimpedanz von Synchronmaschinen	312
9.5	Veranschaulichung des Berechnungsverfahrens an einem Beispiel	312
<b>10</b>	<b>Berechnung von symmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit punktuellen Asymmetrien im Aufbau</b>	<b>318</b>
10.1	Beschreibung häufiger Asymmetrien	318
10.2	Erläuterung des Berechnungsverfahrens	320
10.3	Anwendung des Berechnungsverfahrens auf verschiedene Fehlerarten	325
10.3.1	Erdschluß mit Übergangswiderstand	325
10.3.2	Zweipoliger Kurzschluß mit Erdberührung	326
10.3.3	Leiterunterbrechung	331
10.3.4	Mehrfachfehler	334
10.4	Vereinfachte Bestimmung des Stoßkurzschluß-, Ausschaltwechsel- und Dauerkurzschlußstroms für einige wichtige Asymmetrien	336
<b>11</b>	<b>Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen</b>	<b>338</b>
11.1	Netze mit isolierten Sternpunkten	338
11.2	Netze mit Erdschlußkompensation	342
11.3	Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung	348

---

<b>12 Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen in Netzen mit Nennspannungen über 1 kV</b>	<b>353</b>
12.1 Direkter und indirekter Berührungsschutz	353
12.2 Berührungsspannungen bei Erdern	355
12.3 Berechnung von Erdungsspannungen bei unsymmetrischen Fehlern	359
12.4 Wichtige Auslegungskriterien für Erdungsanlagen	263
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>369</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>371</b>