

Elektrische Energieverteilung

Von Dipl.-Ing. René Flosdorff
Professor an der Fachhochschule Aachen

und Dr.-Ing. Günther Hilgarth
Professor an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

6., überarbeitete Auflage
Mit 274 Bildern, 47 Tafeln und 71 Beispielen



B.G. Teubner Stuttgart 1994

Inhalt

1 Elektrische Netze (Günther Hilgarth)

1.1 Betriebsgrößen und Begriffe	1
1.1.1 Stromarten und Frequenzen	1
1.1.2 Übertragungs- und Verteilungsspannungen	2
1.1.3 Netzstrukturen	3
1.2 Übertragungsmittel	4
1.2.1 Kabel	4
1.2.1.1 Kurzzeichen für Typenbezeichnung. 1.2.1.2 Metallmantelkabel. 1.2.1.3 Kunststoffkabel. 1.2.1.4 Ölkabel. 1.2.1.5 Gasdruckkabel. 1.2.1.6 Kabelerwärmung. 1.2.1.7 Hochleistungskabel	
1.2.2 Freileitung	20
1.2.2.1 Freileitungsmaste. 1.2.2.2 Mastgründungen. 1.2.2.3 Masterdung und Blitzschutzraum. 1.2.2.4 Seile. 1.2.2.5 Durchhang. 1.2.2.6 Anordnung der Leiter. 1.2.2.7 Isolatoren und Armaturen	
1.2.3 Ermittlung der Kenngrößen	31
1.2.3.1 Gleichstromwiderstand. 1.2.3.2 Induktivität bei Mehrleitersystemen. 1.2.3.3 Nullimpedanz einer Freileitung. 1.2.3.4 Kapazitäten einer Freileitung. 1.2.3.5 Blindwiderstände von Kabeln. 1.2.3.6 Normierte Widerstände	
1.2.4 Umrechnung von Widerständen auf andere Spannungen . .	47
1.2.5 Transformator	48
1.3 Bemessung elektrischer Leitungen und Netze	51
1.3.1 Richtlinien für die Bemessung	51
1.3.1.1 Leitungsnachbildung und Ersatzschaltung. 1.3.1.2 Spannungsdifferenz. 1.3.1.3 Erwärmung	
1.3.2 Nieder- und Mittelspannungsnetze	53
1.3.2.1 Einseitig gespeiste Leitung mit einer Abnahme. 1.3.2.2 Leitung mit verteilten Abnahmen. 1.3.2.3 Einseitig gespeiste, verzweigte Leitung. 1.3.2.4 Querschnittsabstufung. 1.3.2.5 Zweiseitig gespeiste Leitung. 1.3.2.6 Vermaschtes Netz	

1.3.3 Hochspannungs-Drehstromübertragung	74
1.3.3.1 Leitungsgleichungen. 1.3.3.2 Komplexes Spannungs- und Stromverhältnis. 1.3.3.3 Verlustlose Leitung. 1.3.3.4 Ver- lustarme Leitung. 1.3.3.5 Natürliche Leistung. 1.3.3.6 Lei- tungsdiagramm. 1.3.3.7 Komplexes Leistungsverhältnis. 1.3.3.8 Stabilität der Energieübertragung	
1.3.4 Hochspannungs-Gleichstromübertragung	91
1.3.5 Blindleistungskompensation	92

2 Kurzschluß und Erdschluß (René Flosdorff)

2.1 Dreisträngiger Kurzschluß	98
2.1.1 Verlauf des Kurzschlußstroms	98
2.1.1.1 Generatorferner Kurzschluß. 2.1.1.2 Generatornaher Kurzschluß. 2.1.1.3 Kurzschlußentfernung	
2.1.2 Anfangs-Kurzschlußwechselstrom	102
2.1.3 Stoßkurzschlußstrom und Stoßziffer	104
2.1.3.1 Stoßziffer in Kurzschlußkreisen ohne Stromverzwei- gung. 2.1.3.2 Stoßziffer in Kurzschlußkreisen mit Stromver- zweigung	
2.1.4 Dauerkurzschlußstrom und Dauerfaktor	107
2.1.5 Ausschaltstrom und Abklingfaktor	108
2.1.6 Kurzschlußleistung und Ausschaltleistung	109
2.1.7 Widerstände in der Kurzschlußbahn	110
2.1.7.1 Dreiwicklungs-Transformator. 2.1.7.2 Kurzschluß- strombegrenzung. 2.1.7.3 Synchrongenerator. 2.1.7.4 Asyn- chronmotor. 2.1.7.5 Netzersatzimpedanz. 2.1.7.6 Kurzschlußbe- rechnung mit Bezugsspannung 10 kV. 2.1.7.7 Kurzschlußbe- rechnung in vermaschten Netzen	
2.2 Symmetrische Komponenten	123
2.2.1 Entstehung unsymmetrischer Dreiphasensysteme	123
2.2.1.1 Dreileiternetz. 2.2.1.2 Vierleiternetz	
2.2.2 Zerlegung unsymmetrischer Dreiphasen-Systeme in symmetri- sche Komponenten	126
2.2.2.1 Dreileiternetz. 2.2.2.2 Vierleiternetz	
2.2.3 Verknüpfung der symmetrischen Komponenten von Span- nung und Strom	128
2.2.3.1 Mit-, Gegen- und Nullimpedanz. 2.2.3.2 Quellenspan- nung und Teilspannungen. 2.2.3.3 Leistungen	

2.3	Unsymmetrische Fehler	133
2.3.1	Zweisträngiger Kurzschluß	133
2.3.1.1	Mit Erdberührung. 2.3.1.2 Ohne Erdberührung	
2.3.2	Einsträngiger Kurzschluß	136
2.3.2.1	Ohne Übergangswiderstand. 2.3.2.2 Mit Übergangswiderstand	
2.3.3	Erdschluß im Netz mit isoliertem Sternpunkt	142
2.3.3.1	Ladeleistung. 2.3.3.2 Erdschlußkompensation	
2.3.4	Stromverteilung bei Transformatoren mit drehender Schaltgruppe	148
2.3.5	Sternpunktsschaltung in Drehstromnetzen	150
2.4	Wirkungen des Kurzschlußstroms	152
2.4.1	Mechanische Beanspruchung durch Stromkräfte	153
2.4.1.1	Mechanische Festigkeit von Stromschiene. 2.4.1.2 Mechanische Festigkeit von Stützern	
2.4.2	Thermische Beanspruchung durch Stromwärme	156
3	Schutzeinrichtungen (René Flosdorff)	
3.1	Erder und Erdungsanlagen	161
3.1.1	Elektrisches Verhalten des Erders	161
3.1.2	Erderarten	163
3.1.3	Erdungsarten	166
3.2	Schutz des Menschen	168
3.2.1	Unfallstromkreis	169
3.2.2	Schutz bei indirektem Berühren im TN-Netz	170
3.2.3	Schutz bei indirektem Berühren im IT-Netz	172
3.2.4	Fehlerstrom-Schutzschaltung (FI-Schaltung)	173
3.3	Überspannungsschutz	174
3.3.1	Entstehung von Überspannungen	175
3.3.1.1	Spannungserhöhungen bei Betriebsfrequenz. 3.3.1.2 Gegenseitige Beeinflussung paralleler Leitungen. 3.3.1.3 Kippschwingungen. 3.3.1.4 Schaltüberspannungen. 3.3.1.5 Atmosphärische Überspannungen	
3.3.2	Schutzeinrichtungen gegen Überspannungen	179
3.3.2.1	Funkenstrecke. 3.3.2.2 Überspannungsableiter. 3.3.2.3 Koordination der Isolation. 3.3.2.4 Einsatz von Überspannungsableitern	

3.4	Schutz der Übertragungseinrichtungen	184
3.4.1	Fehlerarten, Auswirkungen, Meßkriterien	184
3.4.2	Grundlagen der Relais-technik	186
	3.4.2.1 Kenngrößen der Relais. 3.4.2.2 Strom- und Spannungs- relais. 3.4.2.3 Zeitrelais. 3.4.2.4 Hilfs- und Melderelais	
3.4.3	Drehspulrelais mit Gleichrichterbrücken	188
	3.4.3.1 Impedanzmessung. 3.4.3.2 Leistungsrichtungs-Mes- sung. 3.4.3.3 Differenzmessung	
3.4.4	Leitungs- und Netzschutz	193
	3.4.4.1 Relaisanregungen. 3.4.4.2 Überstromschutz. 3.4.4.3 Di- stanzschutz. 3.4.4.4 Erdschlußschutz. 3.4.4.5 Kurzunterbre- chung	
3.4.5	Generatorschutz	201
	3.4.5.1 Differentialschutz. 3.4.5.2 Überstromzeitschutz. 3.4.5.3 Ständererdschlußschutz. 3.4.5.4 Läufererdschlußschutz. 3.4.5.5 Schieflastschutz. 3.4.5.6 Windungsschlußschutz. 3.4.5.7 Entre- gungseinrichtungen	
3.4.6	Transformatorschutz	207
	3.4.6.1 Gehäuseschlußschutz. 3.4.6.2 Buchholzschutz. 3.4.6.3 Differentialschutz	
3.4.7	Sammelschienen-schutz	210
3.4.8	Gesamtstafelplan	211
3.4.9	Elektronischer Schutz	212
	3.4.9.1 Anregeschaltungen. 3.4.9.2 Phasenvergleichsverfahren. 3.4.9.3 Polygonkennlinie. 3.4.9.4 Elektronisches Erdschlußre- lais	
3.4.10	Prozeßrechner als Schutz-einrichtung	217

4 Schaltanlagen (René Flosdorff)

4.1	Schaltgeräte für Niederspannung	218
4.1.1	Aufgabe der Schaltgeräte	218
4.1.2	Einteilung der Schaltgeräte	219
	4.1.2.1 Schalter. 4.1.2.2 Niederspannungssicherungen. 4.1.2.3 Sicherungstrennschalter	
4.2	Schaltgeräte für Hochspannung	223
4.2.1	Einteilung der Schaltgeräte	223
4.2.2	Trennschalter	224
4.2.3	Lasttrennschalter	225

4.2.4	Leistungsschalter	226
4.2.4.1	Schaltaufgaben bei Wechselstrom.	
4.2.4.2	Schaltvorgang bei Wechsel- und Drehstrom.	
4.2.4.3	Wiederkehrende Spannung.	
4.2.4.4	Löschprinzipien.	
4.2.4.5	Ausführungsarten.	
4.2.4.6	Antriebsarten.	
4.2.4.7	Wichtige Kenngrößen	
4.2.5	Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen	236
4.2.5.1	Wirkungsweise.	
4.2.5.2	Ausführungsarten	
4.2.6	Sicherungstrennschalter	238
4.2.7	Prüfung von Schaltgeräten	238
4.3	Planung, Aufbau und Betrieb von Schaltanlagen	240
4.3.1	Schaltplantechnik	240
4.3.2	Planungsgrundlagen	243
4.3.3	Schaltanlagen für Niederspannung	245
4.3.4	Ortsnetzstationen	246
4.3.5	Schaltanlagen für Hochspannung	249
4.3.5.1	Schaltung des Einspeise- und Abgangsfeldes.	
4.3.5.2	Schaltung des Kuppelfeldes.	
4.3.5.3	Schaltung des Meßfeldes.	
4.3.5.4	Innenraumanlagen von 1 kV bis 30 kV/36 kV.	
4.3.5.5	Innenraumanlagen von 60 kV bis etwa 250 kV.	
4.3.5.6	Freiluft-Schaltanlagen	
4.3.6	Hilfsstromkreise in Schaltanlagen	257
4.3.6.1	Gleichstrom-Hilfskreis.	
4.3.6.2	Stromwandler für Schaltanlagen.	
4.3.6.3	Spannungswandler für Schaltanlagen.	
4.3.6.4	Verriegelungs-Schaltung	
4.3.7	Schaltwarten	264
4.3.7.1	Schalttafel.	
4.3.7.2	Zentralfeldsteuerung.	
4.3.7.3	Mosaikschaubild.	
4.3.7.4	Bildschirmüberwachung	
4.3.8	Betrieb von Schaltanlagen	268

5 Kraftwerke (Günther Hilgarth)

5.1	Dampfkraftwerke	270
5.1.1	Innerer Aufbau	270
5.1.1.1	Dampf-Wasser-Kreislauf.	
5.1.1.2	Kühlwasser-Kreislauf.	
5.1.1.3	Feuerung	
5.1.2	Konventionelle Dampfkraftwerke	273
5.1.2.1	Dampferzeuger.	
5.1.2.2	Äußerer Aufbau	
5.1.3	Kernenergie-Kraftwerke	274
5.1.4	Dampfturbinen	275

XII Inhalt

5.2 Gasturbinen-Kraftwerke 276
 5.2.1 Bauarten 276
 5.2.2 Anwendungsbereiche 276
5.3 Dieselmotorkraftwerke 278
5.4 Wasserkraftwerke 279
 5.4.1 Arten der Wasserkraftwerke 279
 5.4.1.1 Laufwasser-Kraftwerke. 5.4.1.2 Speicher-Kraftwerke.
 5.4.1.3 Gezeiten-Kraftwerke
 5.4.2 Wasserturbinen 281
5.5 Generatoren 282
 5.5.1 Bauarten 282
 5.5.1.1 Aufbau. 5.5.1.2 Generatorspannung. 5.5.1.3 Erregung
 5.5.2 Betriebsverhalten 284
 5.5.2.1 Widerstände. 5.5.2.2 Zeigerdiagramm und Ersatzschaltung
5.6 Kraftwerkseigenbedarf 286
 5.6.1 Betriebsanforderung 287
 5.6.2 Versorgung des Eigenbedarfs 287
 5.6.3 Anfahren des Kraftwerks 288
 5.6.4 Spannungen 289

6 Elektrizitätswirtschaft (Günther Hilgarth)

6.1 Grundbegriffe 290
 6.1.1 Belastungskurven 290
 6.1.2 Verlustarbeit 293
 6.1.3 Gleichzeitigkeitsgrad 295
6.2 Kostenstruktur 295
 6.2.1 Verlustkosten 296
 6.2.2 Annuitätsmethode 297
 6.2.3 Barwertmethode 298
 6.2.3.1 Barwert von Kapitalbeträgen. 6.2.3.2 Barwert jährlich
 gleicher Verlustkosten. 6.2.3.3 Barwert jährlich steigender Ver-
 lustkosten
6.3 Wirtschaftlichkeit elektrischer Anlagen 300
 6.3.1 Kraftwerk 300

6.3.2 Freileitung	302
6.3.2.1 Anlagekosten. 6.3.3.2 Wirtschaftliche Stromdichte.	
6.3.2.3 Wirtschaftliche Übertragungsleistung	
6.3.3 Kabel	304
6.3.4 Transformatoren	304
6.3.5 Wirtschaftlicher Netzbetrieb	306
6.3.6 Verbundwirtschaft	308
6.4 Strompreisregelung	308
6.4.1 Leistungspreis-Tarif	309
6.4.2 Arbeitspreis-Tarif	309
6.4.3 Blindstromklausel	310

Anhang

1. Umrechnung von Einheiten	311
2. Weiterführende Bücher	311
3. Normblätter (Auswahl)	313
4. VDE-Bestimmungen (Auswahl)	314
5. Schaltzeichen (Auswahl aus DIN 40 710 bis 40 717)	315
6. Kennwerte von Leitungen und Leitern (Auswahl)	320
7. Kennbuchstaben in Schaltplänen	333
8. Schutzmaßnahmen nach DIN VDE 0100 (Auswahl)	336
9. Formelzeichen	337
Sachverzeichnis	343

Hinweise auf DIN-Normen in diesem Werk entsprechen dem Stand der Normung bei Abschluß des Manuskriptes. Maßgebend sind die jeweils neuesten Ausgaben der Normblätter des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. im Format A 4, die durch die Beuth-Verlag GmbH, Berlin und Köln zu beziehen sind. – Sinngemäß gilt das gleiche für alle in diesem Buche angezogenen amtlichen Richtlinien, Bestimmungen, Verordnungen usw.