

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	49
1.2.5	Transformator	50
1.3	Bemessung elektrischer Leitungen und Netze	52
1.3.1	Richtlinien für die Bemessung	52
1.3.1.1	Leitungsnachbildung und Ersatzschaltung	
1.3.1.2	Spannungsdifferenz	
1.3.1.3	Strombelastbarkeit	
1.3.2	Nieder- und Mittelspannungsnetze	55
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	
1.3.2.7	Komplexe Lastflußberechnung	

1.3.3	Hochspannungs-Drehstromübertragung	85
1.3.3.1	Leitungsgleichungen. 1.3.3.2 Komplexes Spannungs- und Stromverhältnis. 1.3.3.3 Verlustlose Leitung. 1.3.3.4 Verlustarme Leitung. 1.3.3.5 Natürliche Leistung. 1.3.3.6 Leitungsdiagramm. 1.3.3.7 Komplexes Leistungsverhältnis. 1.3.3.8 Stabilität der Energieübertragung	
1.3.4	Elektromagnetische Felder im Bereich elektrischer Anlagen	102
1.3.4.1	Magnetisches Feld. 1.3.4.2 Elektrisches Feld	
1.3.5	Hochspannungs-Gleichstromübertragung	108
1.3.6	Blindleistungskompensation	109

2 Kurzschluß und Erdschluß (René Flosdorff)

2.1	Dreisträngiger Kurzschluß	115
2.1.1	Verlauf des Kurzschlußstroms	115
2.1.1.1	Generatorferner Kurzschluß. 2.1.1.2 Generatornaher Kurzschluß. 2.1.1.3 Kurzschlußentfernung	
2.1.2	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom	120
2.1.3	Stoßkurzschlußstrom und Stoßfaktor	121
2.1.3.1	Stoßfaktor in Kurzschlußkreisen ohne Stromverzweigung. 2.1.3.2 Stoßfaktor in Kurzschlußkreisen mit Stromverzweigung	
2.1.4	Dauerkurzschlußstrom und Dauerfaktor	124
2.1.5	Ausschaltstrom und Abklingfaktor	125
2.1.6	Kurzschlußleistung und Ausschaltleistung	127
2.1.7	Widerstände in der Kurzschlußbahn	128
2.1.7.1	Dreiwirkungs-Transformator. 2.1.7.2 Kurzschlußstrombegrenzung. 2.1.7.3 Synchrongenerator. 2.1.7.4 Asynchronmotor. 2.1.7.5 Netzersatzimpedanz. 2.1.7.6 Kurzschlußberechnung mit Bezugsspannung 10 kV. 2.1.7.7 Kurzschlußberechnung in vermaschten Netzen	
2.2	Symmetrische Komponenten	144
2.2.1	Entstehung unsymmetrischer Dreiphasensysteme	144
2.2.1.1	Dreileiternetz. 2.2.1.2 Vierleiternetz	
2.2.2	Zerlegung unsymmetrischer Dreiphasen-Systeme in symmetrische Komponenten	146
2.2.2.1	Dreileiternetz. 2.2.2.2 Vierleiternetz	
2.2.3	Verknüpfung der symmetrischen Komponenten von Spannung und Strom	149
2.2.3.1	Mit-, Gegen- und Nullimpedanz. 2.2.3.2 Quellenspannung und Teilspannungen. 2.2.3.3 Leistungen	

2.3	Unsymmetrische Fehler	153
2.3.1	Zweisträngiger Kurzschluß	154
2.3.1.1	Mit Erdberührung. 2.3.1.2 Ohne Erdberührung	
2.3.2	Einsträngiger Kurzschluß	157
2.3.2.1	Ohne Übergangswiderstand. 2.3.2.2 Mit Übergangswiderstand	
2.3.3	Erdschluß im Netz mit isoliertem Sternpunkt	163
2.3.3.1	Ladeleistung. 2.3.3.2 Erdschlußkompensation	
2.3.4	Stromverteilung bei Transformatoren mit drehender Schaltgruppe	169
2.3.5	Sternpunktorschaltung in Drehstromnetzen	171
2.4	Wirkungen des Kurzschlußstroms	174
2.4.1	Mechanische Beanspruchung durch Stromkräfte	174
2.4.1.1	Mechanische Festigkeit von Stromschienen. 2.4.1.2 Mechanische Festigkeit von Stützern	
2.4.2	Thermische Beanspruchung durch Stromwärme	178

3 Schutzeinrichtungen (René Flosdorff)

3.1	Erder und Erdungsanlagen	183
3.1.1	Elektrisches Verhalten des Erders	183
3.1.2	Erderarten	185
3.1.3	Erdungsarten	188
3.2	Schutz des Menschen	190
3.2.1	Unfallstromkreis	191
3.2.2	Schutz bei indirektem Berühren im TN-System	193
3.2.3	Schutz bei indirektem Berühren im IT-System	195
3.2.4	Fehlerstrom-Schutzschaltung (FI-Schaltung)	195
3.3	Überspannungsschutz	196
3.3.1	Entstehung von Überspannungen	197
3.3.1.1	Spannungserhöhungen bei Betriebsfrequenz. 3.3.1.2 Gegenseitige Beeinflussung paralleler Leitungen. 3.3.1.3 Kippenschwingungen. 3.3.1.4 Schaltüberspannungen. 3.3.1.5 Atmosphärische Überspannungen	
3.3.2	Schutzeinrichtungen gegen Überspannungen	201
3.3.2.1	Funkenstrecke. 3.3.2.2 Überspannungsableiter. 3.3.2.3 Koordination der Isolation. 3.3.2.4 Einsatz von Überspannungsableitern	

X Inhalt

3.4 Schutz der Übertragungseinrichtungen	206
3.4.1 Fehlerarten, Auswirkungen, Meßkriterien	207
3.4.2 Grundlagen der Schutzgerätetechnik	208
3.4.2.1 Kenngrößen der Schutzgeräte. 3.4.2.2 Strom- und Spannungsrelais. 3.4.2.3 Zeitrelais. 3.4.2.4 Hilfs- und Melderelais	
3.4.3 Drehspulrelais mit Gleichrichterbrücken	210
3.4.3.1 Impedanzmessung. 3.4.3.2 Leistungsrichtungs-Messung.	
3.4.3.3 Differenzmessung	
3.4.4 Leitungs- und Netzschatz	215
3.4.4.1 Schutzanregungen. 3.4.4.2 Überstromschutz. 3.4.4.3 Distanzschutz. 3.4.4.4 Erdschlußschutz. 3.4.4.5 Kurzunterbrechung (KU)	
3.4.5 Generatorschutz	223
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 Entregungseinrichtungen	
3.4.6 Transformatorschutz	229
3.4.6.1 Gehäuseschlußschutz. 3.4.6.2 Buchholzschutz. 3.4.6.3 Differentialschutz	
3.4.7 Sammelschienenschutz	232
3.4.8 Gesamtstaffelplan	233
3.4.9 Elektronischer Schutz	234
3.4.9.1 Anregeschaltungen. 3.4.9.2 Elektronischer Erschlußschutz. 3.4.9.3 Elektronisch-digitale Schutzkonzepte.	
3.4.10 Prozessrechner und Schutzeinrichtung	239

4 Schaltanlagen (René Flosdorff)

4.1 Schaltgeräte für Niederspannung	240
4.1.1 Aufgabe der Schaltgeräte	240
4.1.2 Einteilung der Schaltgeräte	241
4.1.2.1 Schalter. 4.1.2.2 Niederspannungssicherungen. 4.1.2.3 Sicherungstrennschalter	
4.2 Schaltgeräte für Hochspannung	245
4.2.1 Einteilung der Schaltgeräte	245
4.2.2 Trennschalter	245
4.2.3 Lasttrennschalter	247

4.2.4	Leistungsschalter	248
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	257
4.2.5.1	Wirkungsweise. 4.2.5.2 Ausführungsarten	
4.2.6	Sicherungstrennschalter	259
4.2.7	Prüfung von Schaltgeräten	259
4.3	Planung, Aufbau und Betrieb von Schaltanlagen	261
4.3.1	Schaltplanteknik	261
4.3.2	Planungsgrundlagen	264
4.3.3	Schaltanlagen für Niederspannung	266
4.3.4	Ortsnetzstationen	267
4.3.5	Schaltanlagen für Hochspannung	270
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	277
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 und Leitsysteme	285
4.3.7.1	Schalttafel. 4.3.7.2 Zentralfeldsteuerung. 4.3.7.3 Mosaikschaltbild. 4.3.7.4 Leitsysteme mit Bildschirmüberwachung	
4.3.8	Betrieb von Schaltanlagen	290

5 Kraftwerke (Günther Hilgarth)

5.1	Dampfkraftwerke	293
5.1.1	Innerer Aufbau	293
5.1.1.1	Dampf-Wasser-Kreislauf. 5.1.1.2 Kühlwasser-Kreislauf.	
5.1.1.3	Feuerung	
5.1.2	Konventionelle Dampfkraftwerke	295
5.1.2.1	Dampferzeuger. 5.1.2.2 Äußerer Aufbau	
5.1.3	Kernenergie-Kraftwerke	296
5.1.4	Dampfturbinen	297

XII Inhalt

5.2 Gasturbinen-Kraftwerke	298
5.2.1 Bauarten	298
5.2.2 Anwendungsbereiche	298
5.3 Dieselkraftwerke	300
5.4 Wasser-, Wind- und Solarkraftwerke	300
5.4.1 Wasserkraftwerke	301
5.4.1.1 Laufwasser-Kraftwerke. 5.4.1.2 Speicher-Kraftwerke.	
5.4.1.3 Gezeiten-Kraftwerke. 5.4.1.4 Wasserturbinen	
5.4.2 Windkraftwerke	304
5.4.2.1 Leistung der Windturbine. 5.4.2.2 Elektrische Systeme	
5.4.3 Solarkraftwerke	308
5.5 Generatoren	309
5.5.1 Bauarten	309
5.5.1.1 Aufbau. 5.5.1.2 Generatorspannung. 5.5.1.3 Erregung	
5.5.2 Betriebsverhalten	311
5.5.2.1 Widerstände. 5.5.2.2 Zeigerdiagramm und Ersatzschaltung	
5.6 Kraftwerkseigenbedarf	313
5.6.1 Betriebsanforderung	314
5.6.2 Versorgung des Eigenbedarfs	314
5.6.3 Anfahren des Kraftwerks	315
5.6.4 Spannungen	316
5.7 Kraftwerksregelung	316
5.7.1 Inselbetrieb	317
5.7.2 Verbundbetrieb	319

6 Elektrizitätswirtschaft (Günther Hilgarth)

6.1 Grundbegriffe	320
6.1.1 Belastungskurven	320
6.1.2 Verlustarbeit	323
6.1.3 Gleichzeitigkeitsgrad	325
6.2 Kostenstruktur	325
6.2.1 Verlustkosten	326
6.2.2 Annuitätsmethode	327

6.2.3 Barwertmethode	328
6.2.3.1 Barwert von Kapitalbeträgen. 6.2.3.2 Barwert jährlich gleicher Verlustkosten. 6.2.3.3 Barwert jährlich steigender Verlustkosten	
6.3 Wirtschaftlichkeit elektrischer Anlagen	331
6.3.1 Kraftwerk	331
6.3.2 Freileitung	333
6.3.2.1 Anlagekosten. 6.3.3.2 Wirtschaftliche Stromdichte.	
6.3.2.3 Wirtschaftliche Übertragungsleistung	
6.3.3 Kabel	335
6.3.4 Transformatoren	335
6.3.5 Wirtschaftlicher Netzbetrieb	337
6.3.6 Verbundwirtschaft	339
6.4 Strompreisregelung	339
6.4.1 Leistungpreis-Tarif	340
6.4.2 Arbeitspreis-Tarif	340
6.4.3 Blindstromklausel	341

Anhang

1. Umrechnung von Einheiten	342
2. Weiterführende Bücher	342
3. Normblätter (Auswahl)	344
4. VDE-Bestimmungen (Auswahl)	345
5. Grafische Symbole für die Elektrotechnik (Auswahl aus DIN 40900)	346
6. Kennwerte von Leitungen und Leitern (Auswahl)	351
7. Kennbuchstaben in Schaltplänen	364
8. Schutzmaßnahmen nach DIN VDE 0100 (Auswahl)	367
9. Richtwerte, Sicherheitswerte, Vorsorgewerte von niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern für ausgewählte Einrichtungen und Geräte	368
10. Formelzeichen	369
Sachverzeichnis	375