

Ismail Kasikci

Planung von Elektroanlagen

Theorie, Vorschriften, Praxis

3. Auflage

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

Planung von Elektroanlagen

Ismail Kasikci

Planung von Elektroanlagen

Theorie, Vorschriften, Praxis

3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Ismail Kasikci
Energie-Ingenieurwesen
Biberach University of Applied Sciences
Biberach, Deutschland

ISBN 978-3-662-56426-4 ISBN 978-3-662-56427-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-56427-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001, 2015, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur dritten Auflage

Für die Berechnung, Bemessung und Bewertung einer elektrischen Anlage benötigt der Elektroplaner neben umfassendem Fachwissen ein Nachschlagewerk, mit dessen Hilfe er seine Arbeit einfacher gestalten kann. Die dritte Auflage des vorliegenden Buches soll diese Aufgabe erfüllen.

Die dritte Auflage wurde komplett überarbeitet, didaktisch verbessert, und neue Themen, wie beispielsweise die Spannungsfallberechnung in elektrischen Netzen aufgenommen.

Jedes Thema ist so geschrieben, dass der Leser seine Aufgaben mithilfe dieses Buches ohne große Mühe bewältigen kann. Viele Beispiele aus der Praxis, Tabellen, Diagramme sowie eine umfangreiche Literatursammlung machen das Kompendium zu einem vollständigen Werkzeug. Aus den zahlreichen Tabellen und Diagrammen können die für den Rechengang erforderlichen Planungswerte und Gleichungen entnommen werden.

Das Buch ist sowohl für die Lehre als auch für die Praxis gut geeignet. Ein besonderer Wert wurde auf die Vertiefung der Theorie, der Praxis und der Normen gelegt.

Die Firmen ABB, Dehn+Söhne und Siemens haben mich bereitwillig mit technischen Unterlagen und Bildmaterial unterstützt. Dank gebührt auch dem Springer Verlag und insbesondere Frau Kollmar-Thoni und Herrn Kottusch für die Unterstützung bei der Veröffentlichung des Buches. Weiterhin möchte ich Frau Strasser für das Korrekturlesen des finalen Textes herzlich danken.

Verlag und Autor bedanken sich im Voraus bei den Benutzern dieses Buches für konstruktive Verbesserungsvorschläge. Beim Verfassen der Kapitel ist es fast unmöglich, dass nicht an der einen oder anderen Stelle Schreibfehler entstehen.

Ich bitte Sie daher, vorkommende Fehler zu entschuldigen, und mir diese mitzuteilen, damit ich sie bei der nächsten Auflage verbessern kann.

Bei Fragen, Wünschen und Anregungen wenden Sie sich bitte an mich oder an den Verlag.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß und Erfolg bei Ihrer Arbeit und beim Lesen dieses Buches.

Weinheim, im August 2018

Ismail Kasikci

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Drehstromtechnik	5
2.1	Arten der Drehstromsysteme, Bezeichnungen	5
2.2	Schaltungen der Drehstromsysteme	6
2.3	Schaltungen des Generators	7
2.4	Schaltungen des Verbrauchers	9
2.5	Unsymmetrische Drehstromsysteme	11
2.6	Verkettungsfaktor	12
2.7	Zählpfeilsystem	13
	Literatur	14
	Weiterführende Literatur	14
3	Einführung in die komplexe Rechnung	17
3.1	Begriffe und Rechenregeln	17
3.2	Rechenregeln für komplexe Zahlen	18
3.3	Komplexe Größen der Wechselstromtechnik	19
	Literatur	20
	Weiterführende Literatur	20
4	Leistungen im Drehstromsystem	21
	Literatur	22
5	Beispiele zur Wechselstromtechnik	23
5.1	Sinusspannung	23
5.2	Sinusstrom	23
5.3	Komplexe Größe	24
5.4	Belastung der DS-Netze	24
5.5	Symmetrisches System	25
5.6	Komplexe Zahl in Polar- und Exponentialform	25
5.7	Komplexe Zahl in Polar- und Exponentialform	25
5.8	Stern-Dreieck-Schaltung	25

5.9	Stern-Stern-Schaltung	26
5.10	Verbraucher	27
	Weiterführende Literatur	28
6	Symmetrische Komponenten	29
6.1	Mit-, Gegen- und Nullsystem	31
6.2	Impedanzen der symmetrischen Komponenten	34
6.3	Beispiele zu symmetrischen Komponenten	36
6.3.1	Komponentenströme in einem Vierleiternetz	36
6.3.2	Einpoliger Kurzschlussstrom	36
6.3.3	Zweipoliger Kurzschlussstrom	37
6.3.4	Symmetrische Last	37
6.3.5	Unsymmetrische Fehler	38
6.3.6	Spannungen eines Generators	38
6.3.7	Zusammenfassung	38
	Literatur	39
	Weiterführende Literatur	39
7	Kurzschluss und Erdschluss im Drehstromnetz	41
7.1	Begriffe und Definitionen	41
7.2	Knotenpunktverfahren	44
7.3	Verfahren der Ersatzspannungsquelle	45
7.4	Kurzschlussimpedanzen der Betriebsmittel	48
7.4.1	Netzeinspeisung	48
7.4.2	Beispiel: Berechnung der Netzeinspeisung	49
7.4.3	Synchrongeneratoren	50
7.4.4	Dreipoliger Kurzschluss am Generator	52
7.4.5	Beispiel: Berechnung eines Generators	55
7.4.6	Beispiel: Berechnung eines anderen Generators	56
7.4.7	Transformatoren	56
7.4.8	Beispiel: Berechnung eines Transformators	58
7.4.9	Beispiel: Impedanz eines Transformators	59
7.4.10	Leitungen und Kabel	59
7.4.11	Beispiel: Berechnung eines Kabels	65
7.4.12	Asynchronmotoren	67
7.4.13	Beispiel: Kurzschlussimpedanz des Motors	68
7.4.14	Impedanzkorrekturen	69
7.5	Berechnung der Kurzschlussströme	72
7.5.1	Dreipoliger Kurzschluss	72
7.5.2	Beispiel für den dreipoligen Kurzschluss	73
7.5.3	Zweipoliger Kurzschluss	74
7.5.4	Beispiel für den zweipoligen Kurzschluss	75
7.5.5	Einpoliger Kurzschluss	76

7.5.6	Beispiel für den einpoligen Kurzschluss	77
7.5.7	Stoßkurzschlussstrom	79
7.5.8	Beispiel für den Stoßkurzschlussstrom	79
7.5.9	Beispiel: Berechnung aller Kurzschlussarten	80
7.5.10	Ausschaltwechselstrom	81
7.5.11	Dauerkurzschlussstrom	83
7.5.12	Mehrfach einseitig gespeiste Kurzschlüsse	84
7.5.13	Thermische und dynamische Kurzschlussfestigkeit	84
7.5.14	Berechnung der Mehrfachfehler	86
7.6	Beispiele zur Kurzschlussberechnung	87
7.6.1	Kurzschlussfestigkeit eines Kabels	87
7.6.2	Ermittlung der Kurzschlussströme bei einem 380-kV-Hochspannungsnetz	88
7.6.3	Berechnung der Kurzschlussarten	95
7.6.4	Generatornaher Kurzschluss	98
7.6.5	Anschluss eines Transformators über ein Fremdnetz	99
7.6.6	Parallelschaltung von Generatoren und Transformatoren	101
7.6.7	Beitrag eines Hochspannungsmotors zum Kurzschlussstrom	102
7.6.8	Berechnung eines Industrienetzes mit verschiedenen Netzennennspannungen	103
7.6.9	Kurzschlussstromfestigkeit eines Kabels	106
7.6.10	Berechnung eines Motoranschlusses	107
7.6.11	Berechnung der Daten von HS-Motoren	108
7.6.12	Berechnung eines Niederspannungsstrahlennetzes	110
7.6.13	Berechnung mit bezogenen Größen	120
7.7	Zusammenfassung	121
	Literatur	121
	Weiterführende Literatur	122
8	Lastflussrechnung	123
8.1	Begriffe	123
8.2	Einführung	124
8.3	Notation der mathematischen Größen	125
8.4	Newton-Raphson-Verfahren	126
8.4.1	Beispiel: Lastflussberechnung	128
8.4.2	Beispiel: Anwendung des Newton-Raphson-Verfahrens	128
8.5	Zusammenfassung	129
	Literatur	129
	Weiterführende Literatur	129
9	Spannungsfallberechnung	131
9.1	Grundlagen zur Spannungsfallberechnung	131
9.1.1	Fehler der ΔU -Näherungsgleichung	134

9.1.2	Cosinussatz: Satz des Pythagoras	136
9.1.3	Unsymmetrische Netze	137
9.1.4	Beispiel: Unsymmetrische Verbraucher	138
9.1.5	Beispiel: Spannungsfall auf einer 20-kV-Leitung	138
9.1.6	Beispiel: Leitungsparameter der 20-kV-Leitung	140
9.1.7	Beispiel: Spannungsfall auf einer 10-kV-Leitung	140
9.1.8	Beispiel: NS-Netz mit der Hauptzuleitung	141
9.1.9	Beispiel: Berechnung des Spannungsfalls mit Impedanzwinkel	142
9.1.10	Beispiel: NS-Verbraucher mit $\cos \varphi = 0,8$	142
9.1.11	Beispiel: NS-Verbraucher mit $\cos \varphi = 1$	143
9.1.12	Beispiel: Gegenüberstellung des Impedanzwinkels und des Leistungsfaktors	143
9.2	Spannungsfallberechnung in HS-Anlagen	144
9.3	Spannungsfallberechnung in NS-Anlagen	145
9.3.1	Berechnungsgleichungen	147
9.3.2	Gleichstrom	147
9.3.3	Einphasenwechselstrom	148
9.3.4	Drehstrom	149
9.3.5	Spannungsfall bei Ringleitung	150
9.3.6	Spannungsfall bei einem Strahlennetz	151
9.3.7	Beispiel: Spannungsfall eines Stranges	153
9.3.8	Beispiel: Spannungsfall eines Ringnetzes	153
9.3.9	Beispiel: Bestimmung der Übertragungslänge	154
9.3.10	Beispiel: Spannungsfall beim Wechselstrom	155
9.3.11	Beispiel: Spannungsfall bei Freileitung	155
9.3.12	Beispiel: Einspeisung zur Schule	155
9.3.13	Beispiel: Gebäude	155
9.3.14	Beispiel: Versorgung einer Hauptverteilung	156
9.3.15	Beispiel: Straßenbeleuchtung	156
9.3.16	Beispiel: Beliebige Last	157
9.3.17	Beispiel: Spannungsfall bei einem Ringnetz	157
9.3.18	Beispiel: Berechnung der Verluste	159
9.3.19	Beispiel: DS-Pumpenmotor	159
9.4	Zulässiger Spannungsfall nach TAB	160
9.5	Zulässiger Spannungsfall nach VDE	160
9.6	Zulässiger Spannungsfall nach NAV	160
9.7	Berechnung des zulässigen Spannungsfalls	161
9.8	Grenzlänge zur Einhaltung von Schutzmaßnahmen	162
9.9	Grenzlänge in Abhängigkeit von der Berührungsspannung	163
9.10	Berechnung der maximal zulässigen Leitungslängen	163
9.10.1	Beispiel: Ermittlung der zulässigen Kabellänge	163
9.10.2	Beispiel: Spannungsfallberechnung einer Motorzuleitung	164

9.11	Beispiele zur Spannungsfallberechnung	165
9.11.1	Beispiel: Energieübertragung	165
9.11.2	Beispiel: Modellberechnungen	166
9.11.3	Beispiel: Ersatzschaltbild von Freileitungen	169
9.11.4	Beispiel: Ersatzschaltbild	171
9.11.5	Beispiel: Verbraucherdaten, Strom und Spannung	172
9.11.6	Beispiel: Verbraucherdaten, Spannung, Strom, Leistung und Leistungsfaktor	174
9.11.7	Beispiel: Leiterquerschnitt	176
9.11.8	Beispiel: Leistungen an den Knotenpunkten	177
9.11.9	Beispiel: Spannung an den Kondensatoren	178
9.11.10	Beispiel: Spannung an den Motorklemmen	179
9.11.11	Beispiel: Verbraucherspannung	181
9.11.12	Beispiel: Verbraucherspannung und Wirkungsgrad der Leitung	182
9.11.13	Beispiel: Speisespannung	184
9.11.14	Beispiel: Wellenwiderstand, Strom und Leistung	184
9.11.15	Beispiel: Spannung am Ende der Leitung	185
9.11.16	Beispiel: Stromverteilung	187
9.11.17	Beispiel: Spannung am Anfang der Leitung	188
9.11.18	Beispiel: Wellenwiderstand und natürliche Leistung	188
9.11.19	Beispiel: Spannung am Ende des Kabels	189
9.11.20	Beispiel: Strom am Anfang und Ende des Kabels	190
9.11.21	Beispiel: Spannung und Strom am Anfang des Kabels	191
9.11.22	Beispiel: Strom und Spannung am Anfang des Kabels	192
9.11.23	Beispiel: Ausbreitungsgeschwindigkeit	194
9.11.24	Beispiel: Ladestromkompensationsdrossel	194
9.11.25	Beispiel: Wirk- und Blindleistung am Anfang der Leitung	196
9.11.26	Beispiel: Kondensatorleistung	197
9.11.27	Beispiel: Leitungsparameter der Leitung	198
9.11.28	Beispiel: Leitungsparameter der Leitung	199
9.11.29	Beispiel: Vier Fälle des Leistungsfaktors	201
9.12	Zusammenfassung	201
	Literatur	204
10	Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen	205
10.1	Schutz bei Überlast	205
10.2	Beispiel: Schutz bei Überlast	207
10.3	Schutz bei Kurzschluss	207
10.4	Beispiel: Schutz bei Kurzschluss	208
10.5	Strombelastbarkeit	209
10.5.1	Belastbarkeit im ungestörten Betrieb	209
10.5.2	Beispiel: Zuleitung einer Verteilung	209

10.5.3	Beispiel: Kabelbemessung eines Motors	211
10.5.4	Beispiel: Überprüfung der Stromwärmewerte	212
10.6	Thermische Kurzschlussfestigkeit	212
10.7	Querschnittsdimensionierung	217
10.8	Bemessung von Überstromschutzeinrichtungen	219
10.8.1	Beispiel: Kabeldimensionierung eines Motors	219
10.8.2	Beispiel: Leitungsberechnung	220
10.9	Bemessung einer Sicherung	221
10.10	Zusammenfassung	222
	Literatur	223
11	Bemessung des Schutzleiters	225
11.1	Bemessung des Hauptschutzleiters	225
11.2	Bemessung des Schutzleiters	227
11.3	Bemessung des Schutzpotentialausgleichsleiters	227
11.4	Zusätzlicher Schutzpotentialausgleichsleiter	227
11.5	Zusammenfassung	228
	Literatur	228
12	Spannungsänderung und Blindleistung	229
12.1	Blindstromkompensation	230
12.2	Praktische Beispiele	232
12.3	Berechnung der Blindleistung	232
12.4	Vorgehen bei der Planung	235
12.5	Beispiel: Kompensation einer Anlage	235
12.6	Beispiel: Einzelkompensation von Transformatoren	236
12.7	Beispiel: Resonanzerscheinungen von Transformatoren	236
12.8	Beispiel: Kompensation einer Anlage	237
12.9	Zusammenfassung	237
	Literatur	238
	Weiterführende Literatur	238
13	Erdungen in Schaltanlagen	239
13.1	Begriffe	239
13.1.1	Erdung eines Umspannwerkes	241
13.1.2	Berechnung der zulässigen Berührungsspannung	243
13.1.3	Auslegungsverfahren der Erdungsanlage	246
13.2	Art der Sternpunktterdung	247
13.2.1	Isolierte Sternpunktterdung	249
13.2.2	Kompensierte Sternpunktterdung	250
13.2.3	Niederohmige Sternpunktterdung	251
13.3	Erderarten	252
13.4	Bemessung von Erdungsanlagen	256

13.5	Berechnung der Erdungswiderstände	257
13.5.1	TN-System auf der NS-Seite	257
13.5.2	TT-System auf der NS-Seite	258
13.6	Berechnung des Gesamterdungswiderstandes in NS-Netzen	258
13.7	Berechnung des Erdungswiderstandes von Erdschlusslöschspulen	259
13.8	Zusammenschluss oder Trennung von Erdungsanlagen	259
13.9	Hochspannungsschutzerder	259
13.9.1	Holzmasten mit Schalter	259
13.9.2	Masten mit Schalter	260
13.9.3	Schalt- und Umspannpunkte	260
13.10	Niederspannungsbetriebserder	260
13.11	Ausführung von Erdungsanlagen	261
13.12	Ersatzmaßnahmen	261
13.13	Elimination von Messfehlern	261
13.14	Messung von Erdungsanlagen	262
13.15	Erdungswiderstände in anderen Ländern	262
13.16	Erdungsberechnung nach IEEE Std 80	263
13.16.1	Tolerierbarer Körperstrom	263
13.16.2	Zulässige Berührungsspannungen	265
13.16.3	Berechnung des Leiterquerschnitts	266
13.16.4	Berechnung des maximalen Maschenfehlerstromes	266
13.17	Beispiel: Berechnung einer Erdungsanlage	268
13.18	Beispiel: Berechnung einer TR-Station	269
13.19	Beispiel: Erdungswiderstand nach IEEE Std 80	270
13.20	Beispiel: Querschnittsermittlung	273
13.21	Beispiel: Querschnittsermittlung der Sternpunktleitung	275
13.22	Zusammenfassung	275
	Literatur	275
14	Blitzschutzanlagen	277
14.1	Begriffe	277
14.2	Äußerer Blitzschutz	278
14.2.1	Fangeinrichtung	279
14.2.2	Ermittlung der Blitzschutzklasse	279
14.2.3	Ableitung	281
14.2.4	Erdungsanlage	282
14.2.5	Trennungsabstand	286
14.3	Innerer Blitzschutz	288
14.3.1	EMV-Blitzschutzkonzept	288
14.3.2	Überspannungsschutz	289
14.4	Zusammenfassung	291
	Literatur	291

15 Niederspannungsanlagen	293
15.1 Vorschriften und Normen	297
15.2 Bestandteile des VDE-Vorschriftenwerks	301
15.3 Rechtliche Bedeutung des VDE-Werks	301
15.4 Gesetzliche Regelungen, HOAI und VOB	303
15.5 Richtlinien für die Projektierung elektrischer Anlagen	305
15.6 Zusammenfassung	307
15.7 Darstellung der Schaltungsunterlagen	307
15.8 Inhalt der Elektroinstallation	307
15.9 Bestimmung der Anschlussleistung	308
15.10 Elektrische Leistung	308
15.11 Anschlusswerte von Elektrogeräten	309
15.12 Richtwerte für die Anlagenberechnung	309
15.13 Berechnung der Hauptversorgungsleitung	312
15.14 Elektrische Anlagen	313
15.15 Beispiel: Projektierung eines Hochhauses	316
15.16 Beispiel: Installation einer Küche	325
15.17 Beispiel: Industrieanlage	326
15.18 Beispiel: Energieversorgung einer Fabrik	329
15.19 Technische Anschlussbedingungen	331
Literatur	332
16 Schutz gegen elektrischen Schlag	333
16.1 Schutz durch Abschaltung oder Meldung	333
16.2 TN-System	335
16.3 TT-System	339
16.4 IT-System	342
Literatur	345
17 Zentraler Erdungspunkt	347
17.1 Arbeiten an elektrischen Anlagen	347
17.2 Zusammenfassung	349
Literatur	349
18 Mittelspannungsanlagen	351
18.1 Betriebsverfügbarkeit	352
18.1.1 Arten von Schottungen	353
18.1.2 Störlichtbogenqualifikation	354
18.2 Projektierung	355
18.3 Mittelspannungsschaltgeräte	359
18.4 Aufstellung von Schaltanlagen	361
18.5 Auswahlgrößen	362
18.6 Isolierung	362
18.7 Raumplanung	362

18.8	Transformatoren	363
18.9	Erdung	363
18.10	Innenraumschaltfelder	364
18.11	Grundlagen der Netzplanung	364
18.12	Kriterien für die Anlagenauslegung	365
18.13	Bauformen von Schaltanlagen	366
18.14	Lasttrennschalteranlagen	366
18.15	Leistungsschalteranlagen	367
18.16	Leistungsschalter-Festeinbauanlagen	367
18.17	Schaltanlagenkonstruktionen	368
18.18	Isolationskoordination	368
18.19	Schaltüberspannungen	369
18.20	Begrenzung von Überspannungen	370
18.21	Erdfehlerfaktor	370
18.22	Ableiterauswahl	371
18.23	Dimensionierung von MS-Anlagen	373
18.23.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	373
18.23.2	Bemessung des Einspeisekabels	375
18.23.3	Wirtschaftlicher Kabelquerschnitt	376
18.23.4	Beispiel: Barwertmethode	378
18.24	Zusammenfassung	381
	Literatur	381
19	Hochspannungsanlagen	383
19.1	Luftisolierte Schaltanlagen	383
19.2	Gasisolierte Schaltanlagen	386
19.3	Zusammenfassung	387
	Literatur	387
20	Sammelschienensysteme	389
20.1	Einfachsammelschiene	389
20.2	Doppelsammelschiene	389
20.3	Hochstromschaltanlagen	391
20.4	Zusammenfassung	392
	Literatur	392
	Weiterführende Literatur	392
21	Schalt- und Schutzgeräte	393
21.1	Hochspannungsschutzgeräte	393
21.1.1	Unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ)	393
21.1.2	UMZ mit Richtungskriterium	394
21.1.3	Abhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ)	394
21.1.4	Distanzschutz	395
21.1.5	Differentialschutz	395

21.1.6	Leistungsschalter	395
21.1.7	Strom- und Spannungswandler	395
21.1.8	Lastschalter	396
21.1.9	HH-Sicherungen	396
21.1.10	Trennschalter, Erdungsschalter und Überspannungsschutzgeräte	397
21.2	Niederspannungsschutzgeräte	398
21.2.1	Leitungsschutzschalter (MCB)	398
21.2.2	Belastbarkeit von Leitungsschutzschaltern	401
21.2.3	Nebeneinander montierte LS-Schalter	402
21.2.4	Schmelzsicherungen	403
21.2.5	RCD (Fehlerstromschutzschalter)	404
21.2.6	Auswahl und Errichtung von RCDs	405
21.2.7	RCD in Wohngebäuden nach DIN 18015-1	405
21.2.8	Hauptleitungsschutzschalter	406
21.2.9	Motorstarter	407
21.2.10	Leistungsschalter (MCCB)	407
21.2.11	Auslöser/Schutzfunktion	410
21.3	Zusammenfassung	412
	Literatur	412
22	Selektivität und Back-up-Schutz	413
22.1	Selektivität zwischen zwei Leistungsschaltern	413
22.2	Der Leistungsschalter ist der Sicherung vorgeschaltet	415
22.3	Die Sicherung ist dem Leistungsschalter vorgeschaltet	416
22.4	Selektivität zwischen zwei Sicherungen	416
22.5	Die Sicherung ist dem Leitungsschutzschalter vorgeschaltet	417
22.6	Selektivität zwischen den Leitungsschutzschaltern	418
22.7	Back-up-Schutz	419
	Literatur	420
23	Sicherungslose Schaltanlagen	421
23.1	Auswahl der Sicherungen	422
23.2	Auswahl der Leistungsschalter	423
23.3	Kennlinienvergleich mit Sicherungen und Leistungsschalter	423
23.4	Vergleich der Bauweise mit und ohne Sicherung	425
23.4.1	Projektionierung	426
23.4.2	Schutzfunktion	426
23.4.3	Bedienung und Wartung	426
23.4.4	Kostenvergleich	426
23.5	Beispiel: Einstellung der Kennlinien	428
	Literatur	428
	Weiterführende Literatur	428

24	Schutztechnik in elektrischen Anlagen	429
24.1	Umfang der Selektivität	430
24.2	Auslegung des Netzschutzes	430
24.3	Leitungsschutz	432
24.3.1	UMZ-Schutz	432
24.3.2	Beispiele zu UMZ	434
24.3.3	AMZ-Schutz	434
24.3.4	Beispiele zu AMZ	436
24.4	Thermischer Überlastschutz	441
24.5	Differentialschutz	442
24.6	Beispiel zum Differentialschutz	443
24.7	Distanzschutz	443
24.8	Messverfahren der Impedanzen	446
24.9	Beispiele zum Distanzschutz	447
24.10	Erdschlussschutz	450
24.11	Transformatorschutz	452
24.12	Sammelschienenenschutz	455
24.13	Hochspannungsmotorschutz	456
24.14	Generatorschutz	457
24.15	Strom- und Spannungswandler	458
24.16	Beispiel: Auslegung eines Stromwandlers	462
24.17	Beispiel: Wandlerauslegung für Differentialschutz	463
24.18	Beispiel: Projektierung eines Mittelspannungsnetzes	465
24.19	Erstellung eines Staffelpans	469
24.20	Gesamtbeispiel mit HS- und NS-Netzen	472
24.21	Zusammenfassung	472
	Literatur	472
	Weiterführende Literatur	473
25	Grundlagen elektrischer Maschinen	475
25.1	Einführung	475
25.2	Physikalische Gesetze	475
25.3	Transformator	478
25.3.1	Grundgleichungen von Transformatoren	480
25.3.2	Verluste im Transformator	482
25.3.3	Belastung von Transformatoren	485
25.3.4	Schaltgruppen von Transformatoren	487
25.3.5	Parallelschaltung von Transformatoren	487
25.3.6	Wirkungsgrad von Transformatoren	489
25.3.7	Wirtschaftlichkeit von Transformatoren	490
25.3.8	Schutz von Transformatoren	492
25.3.9	Auswahl von Transformatoren	492

25.4	Beispiele zu Transformatoren	492
25.4.1	Beispiel: Übertragung elektrischer Energie	492
25.4.2	Beispiel: Spannungsänderung von Transformatoren	494
25.4.3	Beispiel: Lastverteilung bei Transformatoren	495
25.4.4	Beispiel: Berechnung von Verlustleistungen	496
25.4.5	Beispiel: Wirtschaftlichkeit von Transformatoren	496
25.4.6	Beispiel: Berechnung des Jahreswirkungsgrades	498
25.4.7	Beispiel: Berechnung des Wirkungsgrades	498
25.4.8	Beispiel: Schaltgruppen	498
25.4.9	Beispiel: Berechnung der Transformatorgrößen	499
25.4.10	Beispiel: Berechnung des vollständigen Ersatzschaltbildes eines Transformators	500
25.4.11	Beispiel: Berechnung eines Einphasentransformators	501
25.4.12	Beispiel: Berechnung eines Einphasentransformators	504
25.4.13	Beispiel: Berechnung eines Drehstromtransformators	506
25.5	Asynchronmaschinen	511
25.5.1	Vorteile des Asynchronmotors	512
25.5.2	Entstehung des Drehfeldes	514
25.5.3	Typischer Drehmomentverlauf	514
25.5.4	Schlupf	514
25.5.5	Anlaufverfahren von ASM	515
25.5.6	Steuerung von Asynchronmaschinen	516
25.5.7	Wahl des Motors	517
25.5.8	Frequenzumrichter	517
25.6	Wechselstrommotoren	519
25.6.1	Beispiel: Leistungsabgabe eines Asynchronmotors	520
25.6.2	Beispiel: Leistungsaufnahme eines Asynchronmotors	520
25.6.3	Beispiel: Leistungsschild eines Asynchronmotors	520
25.6.4	Beispiel: Stern-Dreieck-Anlauf	521
25.6.5	Beispiel: Einspeisung mit drei Motoren	522
25.7	Synchrongenerator	523
25.7.1	Vollpol- und Schenkelpollläufer	524
25.7.2	Leistungsdiagramm des Turbogenerators	527
25.7.3	Betriebsarten des Synchrongenerators	527
25.7.4	Beispiel: Berechnung des Polradwinkels	529
25.7.5	Beispiel: Berechnung des Leistungsdiagramms	529
25.7.6	Beispiel: Vollpolsynchrongenerator	529
25.7.7	Beispiel: Vollpolsynchronmotor	531
25.7.8	Beispiel: Berechnung des Momentes	532
25.7.9	Beispiel: Polradspannung	533
25.7.10	Beispiele zu Fragen und Antworten	534
25.7.11	Beispiel: Zuschalten der Maschine	535

25.8	Gleichstrommaschinen	536
25.8.1	Wicklungsarten	538
25.8.2	Nebenschlussmotor	539
25.8.3	Beispiel: Berechnung eines GS-Nebenschlussmotors	540
25.8.4	Reihenschlussmotor	540
25.8.5	Beispiel: Berechnung der Daten eines Reihenschlussmotors	541
25.8.6	Doppelschlussmotor	542
25.8.7	Beispiel: Berechnung eines Doppelschlussmotors	543
25.8.8	Fremderregter Motor	544
25.8.9	Beispiel: Berechnung einer Arbeitsmaschine	544
25.9	EC-Motoren	545
25.10	Elektrische Antriebe	546
25.10.1	Last- und Motorkennlinien	547
25.10.2	Drehmomentkennlinie von Arbeitsmaschinen	548
25.11	Zusammenfassung	548
	Literatur	548
26	Regenerative Energiesysteme	549
26.1	Wasserkraftwerke	553
26.1.1	Berechnung der Leistung	554
26.1.2	Pumpspeicherkraftwerke	556
26.1.3	Beispiel: Pumpspeicherkraftwerk	556
26.2	Windkraft	558
26.2.1	Grundlagen zur Windenergienutzung	558
26.2.2	Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen	559
26.2.3	Anlagenbeispiele	562
26.2.4	Generatorsysteme	563
26.2.5	Beispiel: Auswahl von Windkraftanlagen	564
26.2.6	Beispiel: Parkverkabelung	566
26.2.7	Rotoren	567
26.2.8	Generatoren	568
26.2.9	Netzanbindung	568
26.2.10	Schaltpläne von WKA	568
26.2.11	Beispiel: Berechnung der Windleistung	570
26.2.12	Beispiel: Generator-Transformator-Berechnung	571
26.2.13	Beispiel: Berechnung der Kurzschlussleistung	572
26.2.14	Beispiel: Anschlussgesuch einer Windkraftanlage	573
26.3	Photovoltaik	574
26.3.1	pn-Übergang	577
26.3.2	Füllfaktor	580
26.3.3	Wirkungsgrad	581
26.3.4	Erzeugte Energie einer Dachfläche	581
26.3.5	Reihenschaltung	581

26.3.6	Parallelschaltung	582
26.3.7	Kenndaten von Photovoltaikanlagen	583
26.3.8	Wechselrichter	586
26.3.9	Komponenten einer Photovoltaikanlage	589
26.3.10	Beispiel: Planung eines Einfamilienhauses	589
26.3.11	Beispiel: Dimensionierung eines Wechselrichters	592
26.3.12	Beispiel: Dimensionierung eines Wechselrichters	596
26.3.13	Planung von Photovoltaikanlagen	597
26.3.14	Prüfungen von Photovoltaikanlagen	597
26.3.15	Anschlussbeurteilung von Photovoltaikanlagen	598
26.3.16	Brennstoffzellen	601
26.3.17	Biogas und Biomasse	601
26.3.18	Beispiel: Biomasse eines Haushaltes	602
26.4	Energiespeicherung	602
26.4.1	Druckluftspeicher	602
26.4.2	Lithium-Ionen-Batterien	602
26.4.3	Blei-Säure-Batterien	603
26.4.4	Superkondensatoren	603
26.5	Smart Grid	603
26.6	Zusammenfassung	604
	Literatur	604
	Weiterführende Literatur	605
27	Netzanschlussregeln	607
27.1	Allgemeines zum Netzanschluss	607
27.2	Netzebene 7 (Niederspannungsnetz-400 V)	608
27.3	Netzebene 6 (Umspannung von 10/30 kV auf 400 V)	609
27.4	Netzebene 5 (Mittelspannungsnetz, 10 bis 30 kV)	610
27.5	Kriterien für den Anschluss in einer höheren Netzebene	610
	Literatur	612
28	Projektierung einer Industrieanlage	613
28.1	Beschreibung der Anlage	613
28.2	Anzuwendende Vorschriften	616
28.3	Verbrauchertabelle	616
28.4	Berechnungen	620
28.5	Berechnung der Innenraumbeleuchtung	625
28.5.1	Berechnung der Blitzschutzanlage	626
28.5.2	Berechnung der Kompensationsanlage	626
28.5.3	Planung der Transformatorstation	628
28.5.4	Planung der Notstromanlage	630
	Stichwortverzeichnis	645

Formelzeichen

a	Raumlänge
A	Querschnitt, Fläche der umschlossenen Fläche eines Ringerders
b_a	Barwertfaktor der Anlage
b_k	Barwertfaktor jährlich steigender Verluste
b_0	Barwertfaktor jährlich gleicher Verluste
B	Flussdichte
b	Raumbreite
c	Spannungsfaktor, kleinste Stufenleistung
C_{str}	Strangkapazität
C_e	Umgebungskoeffizient
C_E	Erdkapazität
C	Kondensatorleistung
C_0	Nullkapazität
d	Durchmesser des Erdungsseils oder halbe Breite eines Erdungsbands
D	Näherungsabstand, Decrementfaktor, Durchmesser des Ringerders
e	Höhe der Bewertungsebene über dem Boden
E	Beleuchtungsstärke, Quellenspannung
E_m	mittlere Beleuchtungsstärke
E_n	Bemessungsbeleuchtungsstärke
f	Frequenz
f_b	Faktor der Betriebsbedingungen
f_a	Ansprechsicherheitsfaktor
f_1	Ständerfrequenz
f_2	Läuferfrequenz
F	Stromkraft zwischen den Leitern
f_n	Netzfrequenz
g	Gleichzeitigkeitsfaktor
g_S	Gleichzeitigkeitsfaktor für Warmwasserspeicher
g_D	Gleichzeitigkeitsfaktor für Durchflusswassererwärmer

g_F	Gleichzeitigkeitsfaktor für Speichergeräte mit Fussbodenheizung
g_Z	Gleichzeitigkeitsfaktor für Zentralspeicher
h	Lichtpunkthöhe, Höhenunterschied, Abstand zwischen den Leuchten
H	Raumhöhe
I	Strom, Lichtstärke
I_1	Stromstärke der Eingangswicklung
I_2	Stromstärke der Ausgangsspannung, großer Prüfstrom
I_0	Leerlaufstrom, Nullstrom
I''_k	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
I_a	Abschaltstrom der Überstromschutzeinrichtung
I_A	Anlaufstrom, Ankerstrom
I_d	Ableitstrom
I_E	Erregerstrom
$I_{\Delta n}$	Bemessungsdifferenzstrom des RCD (FI)
I_F	Fehlerstrom (kleinster Kurzschlussstrom)
I_{an}/I_{rM}	Verhältnis des Anzugsstroms zum Bemessungsstrom des Motors
I_{an}	Anzugsstrom des Motors
I_{rM}	Bemessungsstrom des Motors, magnetischer Einstellstrom
I_e	Einstellstrom
l	Länge
i_p	Stoßkurzschlussstrom
I''_{k1}	einpoliger Kurzschlussstrom
I''_{k2}	zweipoliger Kurzschlussstrom
I''_{k3}	dreipoliger Kurzschlussstrom
I''_{k2E}	zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung
I''_{kEE}	Doppelerdkurzschlussstrom
I_k	Dauerkurzschlussstrom
I_{th}	thermischer Kurzschlussstrom
I_B	Betriebsstrom, Blindstrom
I_b	Blindstrom
I_n	Bemessungsstrom der Schutzeinrichtung, Nennstrom
I_z	zulässige Strombelastbarkeit des Kabels oder der Leitung
I_r	Bemessungsstrom
I_w	Wirkstrom
I_L	Laststrom
$I_{a,max}$	maximaler Ausschaltwechselstrom
I_{cn}	Bemessungskurzschlussausschaltstrom bzw.
I_{sc}	short circuit current
i_{pmax}	maximaler Stoßkurzschlussstrom
I_{en}	Bemessungskurzschlusseinschaltstrom
I_{ma}	making current

$I_{th,max}$	maximaler thermisch wirksamer Kurzschlussstrom
$I_{th,zul}$	zulässige thermische Kurzschlussbelastbarkeit
I_{Δ}	Strom bei Dreiecksschaltung
I_Y	Strom bei Sternschaltung
i_{DC}	abklingende Gleichstromkomponente
k_a	Strompreis, Arbeitskosten
k_l	Leitungsverlustkosten
K_a	Anlagekosten
K_K	Barwert der Kurzschlussverluste
K_k	Kurzschlussverlustkosten
k	Arbeitverlustkosten
K	Jahreskosten der Kabelverbindung
K_d	Kapitaldienst, feste Kosten
K_v	Verlustkosten
k_u	Klirrfaktor der Spannung
l_p	Pendellänge bzw. Abhängung
l_h	Länge des Horizontalerders
l_v	Länge des Vertikalerders
l_1	Mindestlänge eines Erders
m	abklingendes Gleichstromglied, Wärmewirkung des Gleichstromglieds bei Drehstrom und Einphasenwechselstrom
M	Drehmoment, Materialkonstante
M_M	Motormoment
$M_{M\Delta}$	Motormoment bei direktem Einschalten
M_{MY}	Motormoment bei Stern-Dreieck-Anlauf
M_L	Lastmoment (Gegenmoment)
M_{L0}	Lastanzugsmoment
M_N	Bemessungsdrehmoment
M_A	Anzugsmoment
M_S	Sattelmoment
M_K	Kippmoment
$M_{L(M)}$	Moment der Last, bezogen auf die Motorwelle
n	Drehzahl, berechnete Leuchtenanzahl, Wärmewirkung des Wechselstromgliedes bei dreipoligem Kurzschluss, Anzahl der parallel zu schaltenden Transformatoren, abklingendes Wechselstromglied, Anzahl der Ableitungen, Anzahl der Wohnungen
N_c	zulässige Anzahl der kritischen Blitzeinschläge
N_d	Einschlaghäufigkeit in die bauliche Anlage
N_g	Blitzdichte
N_1	Windungszahl der Eingangswicklung
N_2	Windungszahl der Ausgangsspannung

n_1	synchrone Drehzahl
n_2	Läuferdrehzahl
n_S	Schlupfdrehzahl
n_M	Motordrehzahl
n_L	Lastdrehzahl
N	Windungszahl
p	Polpaarzahl
P_{auf}	aufgenommene Leistung
P_{inst}	installierte Leistung
P_n	Bemessungsleistung
P_G	Gesamtanschlussleistung
P_v	Transformatorverlustleistung
P	Wirkleistung
P_H	installierte Gesamtleistung für die Heizung und Wassererwärmung
P_{DE}	Aufnahmeleistung aller Durchflusserwärmer
P_L	Lampenleistung
P_k	Kurzschlussverluste
P_{max}	maximaler Leistungsbedarf
P_d	Durchgangsleistung
ΔP	Leistungsverluste
P_0	Leerlaufverluste
P_{v_r}	Verlustleistung
P_{Fe}	Eisenverluste
P_{Cu}	Kupferverluste
P_{rM}	Bemessungsleistung des Motors
P_{zu}	zugeführte Leistung
P_{auf}	aufgenommene Leistung
Q	Blindleistung
r	Reduktionsfaktor
R_A	Summe der Widerstände des Erders und des Schutzleiters, Ankerwiderstand
R_B	Betriebswiderstand
R'_L	bezogener Wirkwiderstand eines Leiters
R_E	Erdungswiderstand
R_l	Leiterwiderstand
R	ohmscher Widerstand, Wirkwiderstand
R_Q, X_Q	ohmscher, induktiver Widerstand des vorgelagerten Netzes
R_T, X_T	ohmscher, induktiver Widerstand des Transformators
R_L, X_L	ohmscher, induktiver Widerstand des Leitungsnetzes
R_{0T}, X_{0T}	ohmscher, induktiver Nullwiderstand des Transformators
R_{0L}, X_{0L}	ohmscher, induktiver Nullwiderstand des Leitungsnetzes
R_G	Resistanz des Generators

S	Scheinleistung, Leiterquerschnitt
S'_k	Kurzschlussleistung
S_{rT}	Bemessungsleistung des einzelnen Transformators
$\sum P_r$	Summe der Bemessungswirkleistungen
$\sum S_r$	Summe der Bemessungsscheinleistungen
S_{rA}	Bemessungsscheinleistung einer Anlage
S_k	Gerätehöchstleistung einer Anlage
S'_{kQ}	Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung
S_0	Transformatorleerlaufscheinleistung
s	Schlupf, Sicherheitsabstand
t_f	Fehlerzeit
t	Zeit
t_{ab}	Abschaltzeit der ÜSE
t_{zu}	zulässige Ausschaltzeit
t_a	Abschaltzeit
T_B	Einschaltdauer im Jahr
T_a	Anfangstemperatur
T_e	Endtemperatur
T_B	Einschaltdauer
T	Tilgungssatz, Temperatur
T_R	Erhöhung des Tilgungssatzes durch Kosten
ε	Lastangriffsfaktor
T_v	Verluststundenzahl
Δu	prozentualer Spannungsfall
ΔP	Leistungsverlust
ΔU	Spannungsfall
t_{ag}	Gesamtausschaltzeit
$t_{ag,zul}$	zulässige Gesamtausschaltzeit
U_b	Betriebsspannung
U_1	Eingangsspannung
U_2	Ausgangsspannung
U_E	Erdungsspannung
U_0	Leiter-Erde-Spannung
U_T	Berührungsspannung
u_{kr}	Kurzschlussspannung
U_m	höchste Spannung für Betriebsmittel
U_p	Polradspannung
U_s	Schrittspannung
\ddot{u}_r	Bemessungswert der Transformatorübersetzung mit Stufenschalter auf Hauptanzapfung
U_{nQ}	Bemessungsspannung des Netzes am Anschlusspunkt Q
U	Bemessungswechselspannung zwischen

	Außenleitern, Ladespannung
U_n	Nennspannung des Netzes
U_{rG}	Bemessungsspannung des Generators
U_{rM}	Bemessungsspannung des Motors
\ddot{u}	Übersetzung
v	Planungsfaktor
z	Zahl der Leiter, Zinssatz
Z	Impedanz
Z_1	eingangsseitiger Scheinwiderstand, Mitimpedanz
Z_2	ausgangsseitiger Scheinwiderstand, Gegenimpedanz
Z_0	Nullimpedanz
Z_E	Erdungsimpedanz
Z_Q	Impedanz des vorgelagerten Netzes
Z_{PE}	Impedanz des Schutzleiters
Z_T	Impedanz des Transformators
Z_v	Vorimpedanz
Z'	bezogene Impedanz
Z_F	Fehlerimpedanz
Z_k	Körperimpedanz
Z_{st}	Standortimpedanz
Z_S	Impedanz der Fehlerschleife
Z_{TUS}	Impedanz des Transformators (US)
Z_{TOS}	Impedanz des Transformators (OS)
Z_{KW}	korrigierte Impedanz des Kraftwerkblocks, bezogen auf die OS-Seite
Z_G	Impedanz des Generators
Z_M	Kurzschlussimpedanz eines Motors
Z_{GK}	korrigierte Impedanz des Generators
X	Reaktanz
X''_d	subtransiente Reaktanz
X'_L	bezogener Blindwiderstand eines Leiters
X_L	induktiver Widerstand
X_0	Nullreaktanz
X_1	Mitreaktanz
X_2	Gegenreaktanz
η_b	Beleuchtungswirkungsgrad
Φ	Lampenlichtstrom
η_i	Wirkungsgrad
α	Temperaturkoeffizient
ϑ	Polradwinkel
ρ_m	Dichte des Leitungsmaterials
θ	Leitertemperatur

φ_{rG}	Phasenwinkel zwischen $U_{rG}/\sqrt{3}$ und I_{rG}
$\cos\varphi$	Wirkfaktor, Leistungsfaktor
$\sin\varphi$	Blindfaktor
η_B	Beleuchtungswirkungsgrad gemäß Datenblatt
η_R	Raumwirkungsgrad
η_{LB}	Betriebswirkungsgrad einer Leuchte
η_B	Beleuchtungswirkungsgrad
κ	Leitwert
$\Delta\vartheta$	Temperaturerhöhung
$\Delta\phi$	Flussänderung
Δt	Zeitänderung
δ	Erdfehlerfaktor
ν	Anzahl der Harmonischen
ρ_E	spezifischer Erdwiderstand
τ	Teuerungsrate
μ	Verlustfaktor
$\tan \delta$	dielektrischer Verlustfaktor

Abkürzungen

A	Ankerwicklung, Aluminiumleiter
ASM	Asynchronmotor
B	Wendepolwicklung
C	Kompensationswicklung
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CW	wellenförmiger konzentrischer Leiter
D	Reihenschlusswicklung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
E	Nebenschlusswicklung
ED	Einschaltdauer
ESD	Electro-Static-Discharge (statische Aufladung)
EPR	Isolierung aus Ethylen-Propylen-Kautschuk
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
F	fremderregte Wicklung
FE	Fundamenterder
G	Generator, Gummiisolierung als Leiter
g	Erdschlussschutz
HS	Hochspannung
HV	Hauptverteilung oder High Voltage (HV)
HEK	Haupterdungsklemme
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
LV	Low Voltage
L_+	positiver Leiter
L_-	negativer Leiter
L_1, L_2, L_3	Außenleiter
MS	Mittelspannung
M	Motor, Schaltgeräte

N	Neutralleiter
NB	Netzbetreiber
NS	Niederspannung
NSHV	Niederspannungshauptverteilung
OS	Oberspannung oder Oberschwingungen
PVC	Isolierung aus Polyvinylchlorid
PS	Potentialsteuerung
PE	Schutzleiter
RCD	Residual Current Protective Device (FI)
R	Halbleiter
SE	Steuererder (Ringerder)
T	Transformator
TAB	Technische Anschlussbedingungen
TR	Transformator
UVV	Unfallverhütungsvorschriften
ÜSE	Überstromschutzeinrichtung
VPE	Isolierung aus vernetztem Polyethylen
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
WE	Wohneinheiten
Y	PVC-Isolierung

Indizes

<i>ac</i>	Wechselstrom
<i>dc</i>	Gleichstrom
<i>ASM</i>	Asynchronmotor
<i>e</i>	Elektron
<i>E</i>	Erde
<i>f</i>	fiktiv
<i>n</i>	Nennwert
<i>r</i>	Bemessungswert
<i>G</i>	Generator, Wirkleitwert
<i>HV</i>	Hochspannung (High Voltage)
<i>LV</i>	Niederspannung (Low Voltage)
<i>L</i>	Freileitung, Kabel
<i>K</i>	Kabel, Kurzschluss
<i>L1, L2, L3</i>	Leiter des Drehstromnetzes
<i>N</i>	Neutralleiter
<i>M</i>	Motor
<i>MV</i>	Mittelspannung (Medium Voltage)
<i>N</i>	Nennwert, Neutralpunkt des Drehstromnetzes
<i>Q</i>	Anschlusspunkt eines Netzes
<i>p</i>	Proton
<i>r</i>	Rotor-
<i>Q</i>	Anschlusspunkt der Netzeinspeisung
<i>str</i>	Strang
<i>s</i>	Ständer-
<i>T</i>	Transformator
—	Gleichstrom
~	Wechselstrom
Δ	Dreieckschaltung
<i>Y</i>	Sternpunkt, Sternschaltung

Formelzeichen in der Elektrotechnik (IEC 60027)

I	elektrischer Strom
I_E	Erdfehlerstrom
I_k	Dauerkurzschlussstrom
I_c	kapazitiver Strom
I''_k	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
I_{LR}	Anzugsstrom
i_p	Stoßkurzschlussstrom
I_r	Bemessungsstrom
I_{th}	thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom
P	Wirkleistung
I_{rM}	Bemessungsstrom eines Motors
Q	Blindleistung
S	Scheinleistung
S''_k	Kurzschlussleistung
U	Spannung
U_m	höchste Spannung für Betriebsmittel
U_s	Schrittspannung
q	Querschnitt, Ausweichformelzeichen S oder A
c	Spannungsfaktor
u_{kr}	bezogene Kurzschlussspannung eines Transformators
u_{Rr}	Wirkkomponente der bezogenen Kurzschlussspannung eines Transformators
u_x	Blindkomponente der bezogenen Kurzschlussspannung eines Transformators