

Inhalt

Vorwort	XIII
Einführung	1
1 Topologien von Niederspannungs-Gleichstromnetzen	5
1.1 Betriebsspannungen und Abnahmeleistungen	5
1.2 Hybride Gleich- und Wechselstromsysteme	6
1.2.1 Drehstromnetze mit Gleichstromkomponenten	7
1.2.2 Wechselstromnetze mit Gleichstromkomponenten	8
1.3 Parallele Gleich- und Wechselstromsysteme	8
1.3.1 Parallele Gleichstromsysteme für Gebäude	9
1.3.2 PoE-Systeme für Kommunikationsgeräte	10
1.3.3 KNX-Systeme für die Gebäudeautomatisierung	11
1.4 Reine Gleichstromsysteme	12
1.4.1 Gleichstromsysteme für kommerziell genutzte Gebäude	12
1.4.2 Gleichstromsysteme für Rechenzentren	13
1.4.3 Gleichstromsysteme für netzferne Gebiete	15
1.5 Bordnetze für Straßenkraftfahrzeuge	17
1.5.1 Bordnetze für Verbrennungsmotorantriebe	17
1.5.2 Bordnetze für Elektromotorantriebe	20
1.6 Systeme nach Art ihrer Erdverbindung	21
1.6.1 TN-Systeme	22
1.6.2 TT-Systeme	23
1.6.3 IT-Systeme	24
1.6.4 Erdungssysteme für Elektrofahrzeuge	25
1.7 Literatur	26

2	Spannungsquellen für Gleichstrom	29
2.1	Gleichgerichteter Drehstrom	29
2.1.1	Drehstromnetz mit Brückengleichrichter	29
2.1.2	Drehstrom-Synchrongenerator mit Brückengleichrichter	31
2.2	Photovoltaik-Anlagen	33
2.2.1	Elektrisches Verhalten	33
2.2.2	Netzunabhängiger Betrieb eines PV-Moduls mit einer Last	36
2.2.2.1	PV-Modul mit Lastwiderstand	36
2.2.2.2	PV-Modul mit Akkumulator	38
2.2.2.3	PV-Modul mit Gleichspannungswandler	40
2.2.3	Dimensionierungshinweise	41
2.3	Literatur	45
3	Akkumulatoren	47
3.1	Physikalische Grundlagen	47
3.2	Bleiakkumulatoren	50
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise	51
3.2.2	Nennkapazität	51
3.2.3	Leerlaufspannung	54
3.2.4	Innenwiderstand	55
3.3	Lithium-Ionen-Akkumulatoren	58
3.3.1	Aufbau und Funktionsweise	59
3.3.2	Technische Kennwerte	60
3.4	Laden und Entladen von Akkumulatoren	63
3.4.1	Ladeverfahren	63
3.4.2	Laden von Akkumulatoren in Reihe	66
3.4.2.1	Problematik beim Laden	66
3.4.2.2	Ladungsausgleich durch Entladen von Zellen	68
3.4.2.3	Ladungsausgleich durch Umladen von Zellen	70
3.4.2.4	Ladungsausgleich durch Nachladen von Zellen	73
3.4.3	Entladen von Akkumulatoren	75
3.4.3.1	Entladen eines einzelnen Akkumulators	75
3.4.3.2	Entladen von Akkumulatoren in Reihe	76
3.5	Batterie-Management-Systeme	77
3.6	Dimensionierungshinweise	78
3.7	Literatur	80

4	Spannungswandler für Gleichstrom	83
4.1	Tiefsetzsteller	83
4.1.1	Prinzip des Tiefsetzstellers	84
4.1.2	Periodisches Aus- und Einschalten des Schalters	86
4.1.3	Zeitverlauf und Mittelwert von Ausgangsstrom und -spannung	87
4.1.4	Tiefsetzsteller mit Glättungskondensator	91
4.1.4.1	Wirkungsweise des Glättungskondensators	92
4.1.4.2	Abschätzung der Glättungskapazität	94
4.1.5	Ausgangsstrom und -spannung mit realen Bauelementen	98
4.1.5.1	Wirkungsweise einer realen Diode	98
4.1.5.2	Abschätzung der Lückgrenze	101
4.2	Hochsetzsteller	103
4.2.1	Prinzip des Hochsetzstellers	104
4.2.2	Zeitverlauf und Mittelwert von Spulen- und Ausgangsstrom	107
4.2.3	Hochsetzsteller mit Glättungskondensator	109
4.2.3.1	Wirkungsweise des Glättungskondensators	109
4.2.3.2	Abschätzung der Kapazität	113
4.3	Eintaktwandler	114
4.3.1	Prinzip des Eintaktwandlers	115
4.3.2	Eintaktwandler mit Übersetzung	118
4.3.3	Eintaktwandler mit Glättungskondensator	119
4.4	Gegentaktwandler	123
4.4.1	Prinzip des Gegentaktwandlers	124
4.4.2	Kaskadierung des Gegentaktwandlers	126
4.5	Dimensionierungshinweise	127
4.6	Literatur	132
5	Unterbrechung von Niederspannungs-Gleichströmen	133
5.1	Theorie des Gleichstrom-Lichtbogens	133
5.1.1	Entstehung eines Lichtbogens	133
5.1.2	Spannung-Strom-Kennlinie	135
5.1.3	Stabilität des Lichtbogens	137
5.2	Theorie der Gleichstromunterbrechung	139
5.2.1	Löschung eines Lichtbogens durch Verlängerung	139
5.2.2	Gleichstromunterbrechung einer ohmschen Last	142
5.2.3	Lichtbogenleistung und -energie	145
5.2.3.1	Maximale Lichtbogenleistung	145
5.2.3.2	Minimale Lichtbogen-Zündleistung	146
5.2.3.3	Lichtbogenenergie	148

5.2.4	Gleichstromunterbrechung einer ohmsch-induktiven Last	149
5.2.5	Gleichstromunterbrechung einer motorischen Last	153
5.3	Forcierung der Gleichstromunterbrechung	156
5.3.1	Mehrpole Unterbrechung	156
5.3.2	Lichtbogenlösbleche	158
5.3.3	Kühlung des Lichtbogens	160
5.4	Zusammenfassung	161
5.5	Literatur	163
6	Schalter und Steckverbindungen	165
6.1	Stromunterbrechung bei Schaltern	165
6.1.1	Mechanische Schalter	165
6.1.2	Halbleiterschalter	167
6.1.3	Hybridschalter	168
6.2	Stromunterbrechung bei zweipoligen 230-V-Steckverbindungen	168
6.2.1	Lichtbogenentwicklung bei ohmscher Last	169
6.2.2	Verlauf der Lichtbogenkennwerte mit dem Steckerweg	171
6.2.3	Parameter der Lichtbogengleichung	178
6.2.4	Abhängigkeit der Lichtbogenkennwerte von der Betriebsspannung	181
6.2.5	Öffnen einer Steckverbindung bei induktiven oder motorischen Lasten	186
6.2.6	Vergleich der Stromunterbrechung mit Wechselstrom	188
6.3	Stromunterbrechung bei 48-V-Bordnetzsteckverbindungen	192
6.3.1	Lichtbogenentwicklung bei ohmscher Last	192
6.3.2	Verlauf der Lichtbogenkennwerte mit dem Steckerweg	194
6.3.3	Parameter der Lichtbogengleichung	198
6.3.4	Grenzen der Lichtbogenentstehung	199
6.4	Literatur	201
7	Dimensionierung des Leitungsnetzes	203
7.1	Leiterquerschnitt und Belastungsstrom	203
7.1.1	Belastungsstrom der Leitungen	204
7.1.2	Erforderlicher Leitungsquerschnitt	205
7.2	Leitungslänge und Spannungsfall	207
7.2.1	Spannungsfall längs einer Leitung	207
7.2.2	Maximale Leitungslänge	208
7.2.3	Maximaler Spannungsfall und minimale Betriebsspannung	209
7.3	Leistungsverluste und übertragbare Leistung	212
7.3.1	Leistungsverluste	212
7.3.2	Übertragbare Leistung	213

7.4	Spannungsfall und Verluste typischer Leitungsanordnungen	215
7.4.1	Einfach gespeiste Leitung mit mehrfacher Belastung	216
7.4.2	Einfach gespeiste Leitung mit teils gleichmäßiger Belastung	218
7.4.3	Einfach gespeiste Leitung mit gleichmäßiger Belastung	220
7.4.4	Ringleitung mit einfacher oder mehrfacher Belastung	223
7.4.5	Ringleitung mit gleichmäßiger Belastung	226
7.5	Reduzierung von Spannungsfall und Verluste durch Ringleitungen.....	229
7.5.1	Ringleitungen mit gleichmäßiger Strombelastung	229
7.5.2	Ringleitungen mit ungleichmäßiger Strombelastung.....	232
7.6	Literatur	233
8	Umstellung von Wechsel- auf Gleichstrom	235
8.1	Betrieb von Wechselstromgeräten mit Gleichstrom	235
8.2	Auswahl der Betriebsspannung	236
8.3	Berechnungsgleichungen	237
8.3.1	Verwendung von Wechselstromleitungen	237
8.3.2	Verwendung von Drehstromleitungen	238
8.4	Dimensionierung einer Umstellung auf Gleichstrom	240
8.4.1	Beschreibung der Niederspannungsinstallation	240
8.4.2	Berechnung der Stromkreise für Gleichstrom	242
8.4.3	Vergleich mit Wechselstrom bei 230 V	250
8.4.4	Minimierung der Betriebsspannung	251
8.5	Umstellung von Einfachleitungen auf Ringleitungen	253
8.6	Literatur	257
9	Berechnung von Kurzschlussströmen	259
9.1	Entstehung eines Kurzschlusses	259
9.2	Kurzschlussstromquellen und Kurzschlussstromzeitverläufe.....	260
9.3	Netzeinspeisung mit Drehstrombrücke	263
9.3.1	Berechnungsverfahren der DIN EN 61660-1	263
9.3.2	Vereinfachtes Berechnungsverfahren	265
9.3.2.1	Dauerkurzschlussstrom	265
9.3.2.2	Stoßkurzschlussstrom	268
9.3.3	Dimensionierungshinweise.....	269
9.3.3.1	Kurzschlussströme für ein 200-V-Netz	269
9.3.3.2	Kurzschlussströme in Abhängigkeit von der Betriebsspannung	271
9.4	Einspeisung ortsfester Bleiakumulatoren	273
9.4.1	Berechnungsverfahren der DIN EN 61660-1	273

9.4.2	Einflussgrößen	275
9.4.3	Dimensionierungshinweise.....	277
9.4.3.1	Kurzschlussströme für ein 200-V-Netz	277
9.4.3.2	Kurzschlussströme in Abhängigkeit von der Betriebsspannung	278
9.5	Literatur	280
10	Leitungs-, Geräte- und Personenschutz	281
10.1	Leitungs- und Geräteschutz (Schutz gegen Überstrom)	282
10.1.1	Geräteschutz	284
10.1.2	Leitungsschutz.....	284
10.1.3	Photovoltaik-Schutz	286
10.2	Personenschutz (Schutz gegen elektrischen Schlag)	288
10.2.1	Gefährdung von Personen bei Durchströmung mit Gleichstrom	288
10.2.2	Körperstrom und Berührspannung im Fehlerfall	289
10.2.2.1	TN-System	289
10.2.2.2	TT-System	295
10.2.2.3	IT-System	298
10.2.2.4	Bipolare Systeme	299
10.2.3	Zulässige Durchströmungsdauer und erforderliche Abschaltzeit	300
10.2.3.1	Zulässige Durchströmungsdauer im Vergleich zu Wechselstrom	300
10.2.3.2	Abhängigkeit des Körperstroms von der Berührspannung	302
10.2.3.3	Abhängigkeit der erforderlichen Abschaltzeit von der Berührspannung	303
10.2.4	Einhaltung der erforderlichen Abschaltzeit	305
10.2.4.1	Überstrom-Schutzeinrichtung.....	305
10.2.4.2	Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD)	307
10.3	Personenschutz bei TN- und TT-Systemen	307
10.3.1	Erforderliche Abschaltzeit in Abhängigkeit von der Betriebsspannung	307
10.3.2	Mindest-Kurzschlussströme zur Einhaltung der Abschaltzeit	309
10.4	Betriebsspannungsgrenzen für Überstrom-Schutzeinrichtungen als Personenschutz	312
10.4.1	Netzgespeiste TN-Systeme	312
10.4.1.1	Berechnung des minimalen Dauerkurzschlussstroms	312
10.4.1.2	Ermittlung der Betriebsspannungsgrenzen.....	316
10.4.2	Bleiakkumulatorgespeiste TN-Systeme	317
10.4.2.1	Berechnung des minimalen Dauerkurzschlussstroms	317
10.4.2.2	Ermittlung der Betriebsspannungsgrenzen.....	319
10.4.3	Zusammenfassung	321
10.5	Literatur	321

11	Brandschutz bei Längsfehlern	323
11.1	Lichtbögen und Brandauslösung	323
11.1.1	Arten von Fehlerlichtbögen	323
11.1.2	Brandentstehung bei Längsfehlern	324
11.2	Gefährdungsbeurteilung von Fehlern mit Lichtbögen	326
11.2.1	Fehlerlichtbogenprüfungen	326
11.2.1.1	Kabelprobe und Prüfanordnung	326
11.2.1.2	Prüfparameter	328
11.2.1.3	Auswertegrößen	328
11.2.2	Lichtbogen- und Flammenentwicklung bei Gleichstrom	329
11.2.3	Lichtbogenspannung und Lichtbogenleistung beim Flammenauftritt ..	332
11.2.4	Gefährdungspotenzial für die Entzündung einer Kabelisolierung.....	334
11.2.4.1	Abhängigkeit von der Spannung	334
11.2.4.2	Abhängigkeit vom Strom	335
11.2.4.3	Abhängigkeit von der Leistung.....	337
11.2.5	Gefährdungspotenzial im Vergleich mit Wechselstrom	338
11.2.5.1	Lichtbogenspannung und Lichtbogenleistung bei Flammenauftritt	338
11.2.5.2	Gefährdungspotenzial für die Entzündung einer Kabelisolierung	339
11.2.5.3	Zusammenfassung	341
11.3	Detektion von Gleichstrom-Fehlerlichtbögen	342
11.3.1	Lichtbogenrauschen bei Kupferleitern	342
11.3.1.1	Lichtbogenzündung und Lichtbogenlöschung	342
11.3.1.2	Elektrisches Rauschen des Lichtbogenplasmas	345
11.3.1.3	Rauschleistung des Lichtbogens	346
11.3.2	Messtechnische Erfassung des Lichtbogenrauschens	349
11.4	Abschaltung eines seriellen Fehlerlichtbogens	352
11.4.1	Lichtbogenkennwerte bei einem simulierten Leiterbruch	352
11.4.2	Detektion des Lichtbogens anhand des Stromrückgangs	353
11.4.3	Abschaltung des Lichtbogens mittels der Empfangssignallautstärke	354
11.5	Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung für Gleichstrom	356
11.6	Literatur	357
	Symbole und Abkürzungen	359
	Index	361