

Inhaltsverzeichnis

Teil I: Grundlagen

| | |
|---|----|
| 1. Einführung und Übersicht | 17 |
| 1.1. Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Leistungselektronik | 17 |
| 1.2. Prinzipieller Aufbau von Stromrichtern | 20 |
| 1.3. Leistungselektronik und Mikroelektronik | 24 |
| 2. Halbleiterventile | 28 |
| 2.1. Übersicht | 28 |
| 2.2. Physikalische Grundlagen und Aufbau von Dioden, Thyristoren und Triacs .. | 28 |
| 2.3. Elektrische Eigenschaften der Dioden, Thyristoren und Triacs | 35 |
| 2.3.1. Sperr- und Blockierzustand | 35 |
| 2.3.2. Durchlaßzustand (Kennlinien DK in den Bildern 2.2.3, 2.2.7 und 2.2.9) | 36 |
| 2.3.3. Zündung | 39 |
| 2.3.4. Schaltverhalten | 39 |
| 2.4. Schalttransistoren | 41 |
| 2.4.1. Bipolare Schalttransistoren | 41 |
| 2.4.1.1. Wirkungsweise | 41 |
| 2.4.1.2. Elektrische Eigenschaften | 42 |
| 2.4.2. Unipolare Schalt- oder Feldeffekttransistoren (MOSFETs) | 45 |
| 2.5. Thermische Eigenschaften der Halbleiterventile | 47 |
| 2.5.1. Temperaturen | 47 |
| 2.5.2. Stationäre Wärmewiderstände | 47 |
| 2.5.3. Nichtstationäre Wärmewiderstände | 49 |
| 2.6. Reihen- und Parallelschaltung | 51 |
| 2.7. Qualitätskontrolle und Zuverlässigkeit | 53 |
| 3. Schaltungen der Stromrichter | 54 |
| 3.1. Gleichrichter | 55 |
| 3.1.1. Einpulsleichrichter | 55 |
| 3.1.1.1. Widerstandslast | 55 |
| 3.1.1.2. Glättung mit einer Drossel | 58 |

| | |
|--|-----|
| 3.1.1.3. Glättung mit einem Kondensator | 59 |
| 3.1.1.4. Arbeit auf Gegenspannung | 59 |
| 3.1.1.5. Schaltung mit Freilaufzweig | 59 |
| 3.1.1.6. Spannungsverdoppler- und -vervielfacherschaltungen | 60 |
| 3.1.2. Zweipulsleichrichter | 61 |
| 3.1.2.1. Mittelpunkt- und Brückenschaltung | 61 |
| 3.1.2.2. Widerstandslast | 61 |
| 3.1.2.3. Belastung mit Widerstand, Glättung mit Drossel oder Kondensator | 63 |
| 3.1.2.4. Betrieb mit Freilaufzweig, halbgesteuerte Schaltung | 63 |
| 3.1.2.5. Verdopplerschaltung | 67 |
| 3.1.3. Dreipulsleichrichter | 67 |
| 3.1.4. Sechspulsleichrichter | 69 |
| 3.1.4.1. Brückenschaltung | 69 |
| 3.1.4.2. Saugdrosselschaltung | 72 |
| 3.1.5. Gleichrichter mit $p = 12, 24$ usw. | 73 |
| 3.1.6. Lückender Gleichstrom | 75 |
| 3.2. Stromrichtertransformator, Oberschwingungen, Steuerung | 76 |
| 3.2.1. Stromrichtertransformator | 76 |
| 3.2.1.1. Auslegung | 76 |
| 3.2.1.2. Streureaktanz des Transformators und Netzreaktanz | 76 |
| 3.2.2. Oberschwingungen der Gleichspannung und der Netzströme | 80 |
| 3.2.2.1. Oberschwingungen der Gleichspannung | 81 |
| 3.2.2.2. Oberschwingungen der Netzströme | 82 |
| 3.2.3. Steuerung der Gleichspannung | 84 |
| 3.2.3.1. Phasenanschnittsteuerung | 85 |
| 3.2.3.2. Transformator mit Anzapfungen oder Stelltransformator | 87 |
| 3.3. Netzgelöschter Wechselrichter, Umkehrstromrichter | 88 |
| 3.3.1. Netzgelöschter Wechselrichter | 88 |
| 3.3.2. Umkehrstromrichter | 90 |
| 3.3.2.1. Wirkungsweise der Gegenparallelschaltung (kreisstromfreier Betrieb) | 91 |
| 3.3.2.2. Schaltungen | 92 |
| 3.3.2.3. Betrieb ohne und mit Kreisstrom | 93 |
| 3.4. Kurzschlußströme | 95 |
| 3.4.1. Grundlagen | 96 |
| 3.4.2. Berechnungsverfahren | 98 |
| 3.4.2.1. Übersicht | 98 |
| 3.4.2.2. Berechnungsgleichungen | 99 |
| 3.4.3. Berechnungsbeispiel | 100 |
| 3.5. Selbst- und lastgelöschte Wechselrichter, Umrichter | 103 |
| 3.5.1. Selbstgelöschte Wechselrichter | 103 |
| 3.5.1.1. Einführung | 103 |
| 3.5.1.2. Einphasige selbstgelöschte Spannungswechselrichter | 105 |
| 3.5.1.3. Wechselrichter mit Drehstromausgang | 108 |
| 3.5.1.4. Spannungsstellung | 111 |

| | |
|--|------------|
| 3.5.1.5. Stromwechselrichter | 112 |
| 3.5.1.6. Auslegung von Wechselrichtern | 113 |
| 3.5.2. Lastgelöschte Wechselrichter | 115 |
| 3.5.2.1. Wechselrichter mit parallelkompensierter Last | 115 |
| 3.5.2.2. Dimensionierungsbeispiel | 118 |
| 3.5.2.3. Schaltungsvarianten | 119 |
| 3.5.3. Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis | 121 |
| 3.5.4. Direkte Umrichter | 122 |
| 3.6. Wechsel- und Drehstromsteller | 125 |
| 3.6.1. Wirkungsweise | 126 |
| 3.6.1.1. Wechselstromsteller | 126 |
| 3.6.1.2. Vollgesteuerter Drehstromsteller | 128 |
| 3.6.1.3. Halbgesteuerter Drehstromsteller | 130 |
| 3.6.2. Kennlinien und Kenngrößen | 131 |
| 3.6.2.1. Wechselstromsteller | 131 |
| 3.6.2.2. Drehstromsteller | 133 |
| 3.6.3. Wechsel- und Drehstromsteller mit nachgeschaltetem Gleichrichter | 134 |
| 3.6.4. Schaltungswahl | 135 |
| 3.7. Gleichstromsteller | 136 |
| 3.7.1. Wirkungsweise der Grundsaltungen, Steuerungsverfahren | 136 |
| 3.7.2. Stellerschaltungen | 139 |
| 3.7.3. Betriebseigenschaften und -kenngrößen, Steuerkennlinie, Berechnungsbeispiel | 140 |
| 3.8. Ansteuergeräte | 142 |
| 3.8.1. Aufgaben | 142 |
| 3.8.2. Ansteuergeräte für die Zündwinkelsteuerung bei netzgelöschten Stromrichtern | 142 |
| 3.8.2.1. Ansteuergeräte für einphasige, zweipulsige Stromrichter | 142 |
| 3.8.2.2. Ansteuergeräte für die gebräuchlichen netzgelöschten Stromrichter | 145 |
| 3.8.2.3. Gebräuchliche Ausführungsformen der Funktionseinheiten | 148 |
| 3.8.3. Ansteuergeräte für selbst- und lastgelöschte Wechselrichter | 159 |
| 3.8.4. Ansteuergeräte für Gleichstromsteller | 161 |
| 3.8.5. Treiberschaltungen | 162 |
| 4. Grundsätzliches über Geräte und Anlagen der Leistungselektronik | 164 |
| 4.1. Betriebsbedingungen, Betriebsarten, Betriebsverhalten, Netzzrückwirkungen | 164 |
| 4.1.1. Betriebsbedingungen und Betriebsarten | 164 |
| 4.1.1.1. Speisung des Leistungsteils aus einem Wechselstromnetz | 164 |
| 4.1.1.2. Speisung des Leistungsteils aus einem Gleichspannungsnetz | 166 |
| 4.1.1.3. Speisung der Informationselektronik | 167 |
| 4.1.1.4. Umgebungsbedingungen | 168 |
| 4.1.1.5. Betriebsarten und Belastungsklassen | 168 |
| 4.1.2. Belastungskennlinien | 168 |
| 4.1.2.1. Gleichrichter kleiner Leistung | 170 |
| 4.1.2.2. Gleichrichter mittlerer und großer Leistung | 171 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.1.3. | Welligkeit der Gleichspannung und des Gleichstroms | 173 |
| 4.1.4. | Wirkungsgrad | 174 |
| 4.1.5. | Blindleistung, Verschiebungsfaktor | 174 |
| 4.1.6. | Netzzrückwirkungen und ihre Verringerung | 176 |
| 4.1.6.1. | Kriterien für die Qualität der Netzspannung | 177 |
| 4.1.6.2. | Verzerrung der Netzspannung im Speisepunkt | 179 |
| 4.1.6.3. | Netzzrückwirkungen ohne Leistungskondensatoren | 180 |
| 4.1.6.4. | Kompensation mit einem Leistungskondensator | 183 |
| 4.1.6.5. | Kompensation mit Saugkreisen | 185 |
| 4.1.6.6. | Netzzrückwirkungen bei Niederspannungsnetzen zur Versorgung von Hausanschlüssen | 186 |
| 4.1.7. | Auslegung typischer Bauteile | 188 |
| 4.1.7.1. | Stromrichtertransformator | 188 |
| 4.1.7.2. | Ventile | 188 |
| 4.1.8. | Zuverlässigkeit und Störverhalten | 189 |
| 4.1.8.1. | Ausfallrate von Halbleiter-Leistungsbau-elementen | 189 |
| 4.1.8.2. | Zuverlässigkeit der Funktion des Leistungsteils | 190 |
| 4.1.8.3. | Kurzschlußstromtragfähigkeit | 191 |
| 4.1.8.4. | Ausblick | 191 |
| 4.2. | Schalt-, Schutz-, Zusatz- und Hilfseinrichtungen | 192 |
| 4.2.1. | Schutz gegen Überspannungen und Überstrom | 192 |
| 4.2.1.1. | Schutz gegen Überspannungen | 192 |
| 4.2.1.2. | Schutz gegen strommäßige Überlastungen | 195 |
| 4.2.2. | Kondensatorbatterien und Blindleistungsstromrichter zur Kompensation der Blindleistung | 200 |
| 4.2.3. | Funkentstörung | 205 |
| 4.2.4. | Kühlverfahren und -einrichtungen | 206 |
| 4.2.4.1. | Luftkühlung | 206 |
| 4.2.4.2. | Flüssigkeitskühlung | 208 |
| 4.2.4.3. | Verdampfungskühlung | 208 |
| 4.3. | Informationseinrichtungen | 209 |
| 4.3.1. | Grundsätzliche Betrachtungen | 209 |
| 4.3.1.1. | Baugruppensysteme | 209 |
| 4.3.1.2. | Elemente des Regelkreises | 211 |
| 4.3.1.3. | Grundsätzliche Forderungen an die Funktionseinheiten | 213 |
| 4.3.1.4. | Einsatzbedingungen | 213 |
| 4.3.1.5. | Störbeeinflussung | 215 |
| 4.3.1.6. | Prüfung und Service | 217 |
| 4.3.2. | Analoge und digitale Informationsverarbeitung | 217 |
| 4.3.2.1. | Einsatzgebiete | 217 |
| 4.3.2.2. | Signale | 219 |
| 4.3.3. | Häufig verwendete Funktionseinheiten | 219 |
| 4.3.3.1. | Analoge Sollwertvorgabe | 219 |
| 4.3.3.2. | Istwertgeber für den Strom | 221 |
| 4.3.3.3. | Istwertgeber für die Drehzahl | 221 |
| 4.3.3.4. | Sollwert-Istwert-Vergleich | 222 |

| | |
|---|------------|
| 4.3.3.5. Regelverstärker | 223 |
| 4.3.3.6. Rechenfunktionseinheiten | 224 |
| 4.3.3.7. Potentialtrenner | 225 |
| 4.3.3.8. Stromversorgung | 226 |
| 4.4. Baureihen von Geräten und Anlagen | 227 |
| 4.4.1. Baugruppenbildung | 227 |
| 4.4.2. Spezielle Anforderungen | 229 |
| 4.4.3. Ausführung von Stromrichtergeräten und Anlagen | 235 |
| Teil II: Anwendungen | |
| 5. Geräte und Anlagen zur Stromversorgung | 253 |
| 5.1. Speisung von Gleichstromnetzen | 253 |
| 5.1.1. Industrienetze | 253 |
| 5.1.2. Bahnstromversorgung | 256 |
| 5.1.2.1. Gestaltung von Unterwerken | 256 |
| 5.1.2.2. Bahnstromrichter | 258 |
| 5.2. Ladegeräte und Geräte zur Speisung von Fernmeldeanlagen | 269 |
| 5.2.1. Ladegeräte | 269 |
| 5.2.1.1. Ladegeräte mit W-Kennlinie | 269 |
| 5.2.1.2. Ladegeräte mit Wa- und IU-Kennlinie | 271 |
| 5.2.1.3. Pufferladegeräte | 273 |
| 5.2.2. Geräte zur Speisung von Fernmeldeanlagen | 273 |
| 5.2.2.1. Stromversorgungsgerät für mittlere Nebenstellenanlagen und kleine Wahlvermittlungsstellen | 274 |
| 5.2.2.2. Stromversorgungsgerät für größere Wahlvermittlungsstellen | 277 |
| 5.2.2.3. Netzgeräte | 280 |
| 5.3. Notstromversorgung, Stromversorgung für Schienenfahrzeuge und Hoch- spannungsanlagen | 285 |
| 5.3.1. Notstromversorgung für Wechselstromverbraucher | 285 |
| 5.3.2. Elektroenergieversorgung für Schienenfahrzeuge | 288 |
| 5.3.2.1. Energieverbraucher in Reisezugwagen | 288 |
| 5.3.2.2. Autonome Energieversorgung (AEV) von Reisezugwagen | 289 |
| 5.3.2.3. Zentrale Energieversorgung (ZEV) von Reisezugwagen | 291 |
| 5.3.2.4. Einrichtungen auf Triebfahrzeugen zur Energieversorgung aus der Zugsammelschiene | 296 |
| 5.3.2.5. Elektrische Triebwagenzüge | 296 |
| 5.3.3. Stromversorgung für Hochspannungsanlagen | 298 |
| 5.3.3.1. Elektrofilter | 298 |
| 5.3.3.2. Gleichspannungsprüfanlagen | 301 |
| 5.4. Elektronische Erregung von Synchronmaschinen | 303 |
| 5.4.1. Allgemeine Gesichtspunkte | 303 |
| 5.4.2. Ruhende Gleichrichter | 303 |

| | |
|--|------------|
| 5.4.2.1. Ruhende, ungesteuerte Gleichrichter | 303 |
| 5.4.2.2. Ruhende, gesteuerte Gleichrichter | 304 |
| 5.4.3. Bürstenlose Erregung | 308 |
| 5.5. Thyristorschalter | 311 |
| 5.5.1. Aufgaben und Entwicklungstendenzen für Schalter | 311 |
| 5.5.2. Wechselstromschalter | 313 |
| 5.5.3. Drehstromschalter | 314 |
| 5.5.4. Stufenschalter mit Thyristor-Lastumschalter | 316 |
| 5.5.5. Gleichstromschalter | 317 |
| 5.5.6. Ansteuern von Thyristoren in Schaltern | 319 |
| 5.5.7. Einsatz in Automatisierungsanlagen | 321 |
| 6. Stromrichter für Antriebsregelungen | 324 |
| 6.1. Übersicht | 324 |
| 6.2. Einrichtungsantriebe mit Gleichstrommotoren | 328 |
| 6.2.1. Stellglieder mit Netzlöschung | 329 |
| 6.2.1.1. Stellglieder kleiner Leistung bis etwa 30 kW | 329 |
| 6.2.1.2. Stellglieder mittlerer Leistung bis etwa 250 kW | 333 |
| 6.2.1.3. Stellglieder großer Leistung von 250 kW bis zu einigen Megawatt ... | 334 |
| 6.2.1.4. Übertragungsverhalten | 338 |
| 6.2.1.5. Zuverlässigkeit | 343 |
| 6.2.1.6. Anpassungsprobleme Stellglied – Gleichstrommaschine | 344 |
| 6.2.2. Gleichstromsteller als Stellglieder | 345 |
| 6.2.3. Mikrorechnereinsatz | 349 |
| 6.2.4. Netzurückwirkungen netzgelöschter Stromrichter | 350 |
| 6.2.5. Stromrichterauswahl mit Berechnungsbeispielen | 352 |
| 6.3. Umkehr des Drehmoments | 353 |
| 6.3.1. Schaltungen ohne und mit Kreisstrom | 354 |
| 6.3.1.1. Übersicht | 354 |
| 6.3.1.2. Umschaltungen im Ankerkreis | 356 |
| 6.3.1.3. Umschaltung im Feldkreis | 360 |
| 6.3.1.4. Umkehrschaltungen mit Selbstlöschungen | 361 |
| 6.3.2. Betriebsverhalten | 361 |
| 6.4. Stromrichter zur Speisung von Drehfeldmotoren | 362 |
| 6.4.1. Übersicht | 362 |
| 6.4.2. Untersynchrone Stromrichtererkaskade | 363 |
| 6.4.3. Spannungssteuerung von Asynchronmotoren | 366 |
| 6.4.3.1. Wirkungsweise | 366 |
| 6.4.3.2. Der Drehstromsteller | 367 |
| 6.4.4. Frequenzstellung von Asynchronmotoren | 369 |
| 6.4.4.1. Stationäres und dynamisches Verhalten | 369 |
| 6.4.4.2. Regelkreisstrukturen | 371 |
| 6.4.4.3. Anwendung von Antrieben mit frequenzgestellten Asynchronmotoren | 373 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 6.4.5. | Frequenzstellung von Synchronmotoren..... | 375 |
| 6.4.5.1. | Fremdgetakteter Synchronmotor | 375 |
| 6.4.5.2. | Eigengetakteter Synchronmotor (Stromrichter motor) | 377 |
| 6.4.5.3. | Anwendung von Antrieben mit frequenzgestellten Synchronmotoren | 380 |
| 6.4.6. | Frequenzstellung von Linearmotoren..... | 384 |
| 6.4.7. | Entwicklungs- und Anwendungsperspektiven von Antrieben mit frequenzgestellten Drehstrommotoren | 384 |
| 6.5. | Antriebe für Traktionszwecke | 385 |
| 6.5.1. | Allgemeine Darlegungen | 385 |
| 6.5.2. | Wechselstromtriebfahrzeuge mit Kommutatorfahrmotoren | 385 |
| 6.5.2.1. | Wechselstromsteller | 385 |
| 6.5.2.2. | Steuerebare Gleichrichter | 388 |
| 6.5.3. | Triebfahrzeuge mit Gleichstromstellern | 391 |
| 6.5.4. | Triebfahrzeuge mit kommutatorlosen Fahrmotoren | 394 |
| 6.5.5. | Vergleiche zwischen verschiedenen Stromrichter-Traktionsantrieben | 397 |
| 7. | Stromversorgung für technologische Prozesse | 399 |
| 7.1. | Gleichrichteranlagen für Elektrolysen | 399 |
| 7.1.1. | Allgemeines | 399 |
| 7.1.2. | Forderungen an die Gleichrichteranlage | 400 |
| 7.1.3. | Anlagengestaltung | 400 |
| 7.1.3.1. | Gleichrichtergruppen | 400 |
| 7.1.3.2. | Wahl der Schaltung der Gleichrichtergruppen | 402 |
| 7.1.3.3. | Anzahl der Gleichrichtergruppen | 402 |
| 7.1.3.4. | Konstanthaltung des Stroms | 402 |
| 7.1.4. | Gleichrichter..... | 403 |
| 7.1.4.1. | Transformatorteil | 403 |
| 7.1.4.2. | Gleichrichtereinheit | 405 |
| 7.1.5. | Aufstellung | 406 |
| 7.2. | Gleichrichter zur Speisung von Geräten zur Lichtbogenschweißung und von Lichtbogenöfen (Vakuum-Lichtbogenöfen und Plasmaschmelzöfen)..... | 407 |
| 7.2.1. | Anwendungsgebiet und Forderungen an die Stromversorgungseinrichtung | 407 |
| 7.2.1.1. | Anwendungsgebiet..... | 407 |
| 7.2.1.2. | Forderungen an die Stromversorgungseinrichtung und Besonderheiten der Lichtbogenspeisung | 407 |
| 7.2.2. | Grundschaltungen der Stromversorgungseinrichtung | 410 |
| 7.2.2.1. | Lichtbogen- und Plasmaschweißgeräte..... | 410 |
| 7.2.2.2. | Vakuum-Lichtbogen- und Plasmaschmelzöfen | 412 |
| 7.2.3. | Gleichstromspeisung für einen Plasmaschmelzofen großer Leistung .. | 413 |
| 7.3. | Wechselstromsteller für Beleuchtungsanlagen, Widerstandsöfen und Schweißgeräte | 418 |
| 7.3.1. | Beleuchtungsanlagen | 418 |
| 7.3.2. | Steller für Widerstandsöfen | 422 |
| 7.3.3. | Steller für Widerstandsschweißgeräte | 423 |

| | |
|---|------------|
| 7.4. Umrichter für Elektrowärmanlagen | 424 |
| 7.4.1. Umrichter mit sehr niedrigen Frequenzen | 424 |
| 7.4.1.1. Umrichter für die elektromagnetische Durchmischung | 424 |
| 7.4.1.2. Umrichter für das Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren | 426 |
| 7.4.2. Umrichter mit Mittelfrequenz für die Induktionserwärmung | 428 |
| 8. Konsumgüter | 435 |
| 8.1. Schaltungen des Leistungs- und Steuerkreises | 437 |
| 8.1.1. Leistungskreis | 437 |
| 8.1.2. Steuerkreis | 442 |
| 8.1.2.1. Phasenanschnittsteuerung | 442 |
| 8.1.2.2. Schwingungspaketsteuerung | 445 |
| 8.1.2.3. Spezielle Bauelemente (Triggerelemente) | 446 |
| 8.1.2.4. Integrierte Schaltkreise (IC) | 447 |
| 8.2. Anwendungen | 452 |
| 8.2.1. Drehzahlsteuerung und -regelung | 452 |
| 8.2.2. Begrenzung der Anschlußleistung thermischer Geräte | 458 |
| 8.2.3. Kraftfahrzeugtechnik | 460 |
| 9. Formelzeichen und Schaltzeichen | 464 |
| 10. Literaturverzeichnis | 468 |
| 11. Sachwörterverzeichnis | 482 |