

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen

XII

| | |
|---|-----------|
| 1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung | 1 |
| 2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung | 5 |
| 2.1 Fossil befeuerte Kraftwerke | 5 |
| 2.1.1 Kondensationskraftwerke | 5 |
| 2.1.1.1 Prinzipieller Ablauf der Energieumwandlung in Kondensationskraftwerken | 6 |
| 2.1.1.2 Aufbau von Kondensationskraftwerken | 8 |
| 2.1.1.3 Wärmeverbrauchskenlinie von Kondensationskraftwerken | 14 |
| 2.1.2 Überblick über weitere Wärmekraftwerke | 15 |
| 2.1.2.1 Gegendruckanlagen | 15 |
| 2.1.2.2 Kraftwerke mit Gasturbinen | 15 |
| 2.1.2.3 Kombinationskraftwerke | 16 |
| 2.2 Wasserkraftwerke | 17 |
| 2.2.1 Bauarten von Wasserturbinen | 17 |
| 2.2.2 Bauarten von Wasserkraftwerken | 18 |
| 2.3 Kernkraftwerke | 19 |
| 2.4 Kraftwerksregelung | 22 |
| 2.4.1 Regelung von Wärmekraftwerken | 22 |
| 2.4.1.1 Regelung eines Blockes im Inselbetrieb | 22 |
| 2.4.1.2 Regelung im Insel- und Verbundnetz | 27 |
| 2.4.2 Regelung von Wasser- und Kernkraftwerken | 31 |
| 2.5 Kraftwerkseinsatz | 31 |
| 2.5.1 Verlauf der Netzlast | 31 |
| 2.5.2 Deckung der Netzlast | 32 |
| 2.6 Aufgaben | 33 |
| 3 Aufbau von Energieversorgungsnetzen | 35 |
| 3.1 Übertragungssysteme | 35 |
| 3.2 Wichtige Netzstrukturen | 38 |
| 3.2.1 Niederspannungsnetze | 39 |
| 3.2.2 Mittelspannungsnetze | 41 |
| 3.2.3 Hoch- und Höchstspannungsnetze | 43 |
| 3.3 Aufgaben | 45 |
| 4 Aufbau und Ersatzschaltbilder wichtiger Netzelemente | 47 |
| 4.1 Berechnung von Netzwerken mit induktiven Kopplungen | 47 |
| 4.1.1 Analytische Beschreibung induktiver Kopplungen | 47 |
| 4.1.2 Induktive Kopplungen in Netzen | 51 |
| 4.1.3 Nichtlineare Induktivitäten | 55 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.2 | Transformatoren | 56 |
| 4.2.1 | Einphasige Zwe Wicklungstransformatoren | 57 |
| 4.2.1.1 | Aufbau und Gültigkeitsbereich induktiver Modelle von einphasigen Zwe Wicklungstransformatoren | 57 |
| 4.2.1.2 | Ersatzschaltbild eines einphasigen Zwe Wicklungstransformators | 61 |
| 4.2.1.3 | Betriebsverhalten von Zwe Wicklungstransformatoren im einphasigen Netzverband | 66 |
| 4.2.2 | Einphasige Dre Wicklungstransformatoren | 68 |
| 4.2.3 | Dreiphasige Transformatoren | 72 |
| 4.2.3.1 | Aufbau eines Drehstromtransformators mit zwei Wicklungen | 72 |
| 4.2.3.2 | Schaltungen | 73 |
| 4.2.3.3 | Übersetzung bei symmetrischem Betrieb | 74 |
| 4.2.3.4 | Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb | 77 |
| 4.2.3.5 | Betriebsverhalten von dreiphasigen Zwe Wicklungstransformatoren im Netzverband | 82 |
| 4.2.4 | Spartransformatoren | 84 |
| 4.2.4.1 | Aufbau und Einsatz von Spartransformatoren | 84 |
| 4.2.4.2 | Ersatzschaltbild eines Spartransformators | 86 |
| 4.2.5 | Transformatoren mit einstellbarer Übersetzung | 88 |
| 4.2.5.1 | Erläuterung der direkten Spannungseinstellung | 88 |
| 4.2.5.2 | Erläuterung der indirekten Spannungseinstellung | 90 |
| 4.2.5.3 | Leistungsverhältnisse bei Umspannern mit einstellbaren Übersetzungen | 92 |
| 4.3 | Wandler | 96 |
| 4.3.1 | Spannungswandler | 96 |
| 4.3.2 | Stromwandler | 98 |
| 4.4 | Synchronmaschinen | 100 |
| 4.4.1 | Grundsätzlicher Aufbau von Synchronmaschinen | 100 |
| 4.4.2 | Erläuterungen zum Betriebsverhalten von Synchronmaschinen | 101 |
| 4.4.2.1 | Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb | 101 |
| 4.4.2.2 | Betriebseigenschaften von Synchronmaschinen in Energieversorgungsnetzen | 106 |
| 4.4.2.3 | Spannungsregelung von Synchronmaschinen | 110 |
| 4.4.3 | Erläuterungen zum Kurzschlußverhalten von Synchronmaschinen | 112 |
| 4.4.3.1 | Dreipoliger Klemmenkurzschluß bei einer verlustfreien, leerlaufenden Synchronmaschine mit Dauermagnetläufer | 112 |
| 4.4.3.2 | Dreipoliger Klemmenkurzschluß bei einer verlustfreien, leerlaufenden Vollpolmaschine mit Gleichstromerregung | 114 |
| 4.4.3.3 | Kurzschlußverhalten einer belasteten Vollpolmaschine | 117 |
| 4.5 | Freileitungen | 122 |
| 4.5.1 | Aufbau von Freileitungen | 122 |
| 4.5.2 | Ersatzschaltbilder von Drehstromfreileitungen für den symmetrischen Betrieb | 127 |
| 4.5.2.1 | Induktivitätsbegriff bei Dreileitersystemen | 128 |
| 4.5.2.2 | Kapazitätsbegriff bei Dreileitersystemen | 134 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.5.2.3 | Ohmscher Widerstand bei Dreileitersystemen | 140 |
| 4.5.2.4 | Ableitungswiderstand bei Dreileitersystemen | 141 |
| 4.5.3 | Betriebsverhalten von symmetrisch aufgebauten Drehstromfreileitungen bei symmetrischem Betrieb | 142 |
| 4.6 | Kabel | 146 |
| 4.6.1 | Aufbau von Kabeln | 147 |
| 4.6.2 | Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Drehstromkabeln | 154 |
| 4.7 | Lasten | 156 |
| 4.8 | Leistungskondensatoren | 159 |
| 4.8.1 | Aufbau von Leistungskondensatoren | 159 |
| 4.8.2 | Grundsätzliche Erläuterungen zur Blindleistungskompensation | 160 |
| 4.8.3 | Blindleistungskompensation bei Netzen mit parasitären Oberschwingungen | 162 |
| 4.9 | Drosselspulen | 167 |
| 4.10 | Schalter | 169 |
| 4.10.1 | Ersatzschaltbild und prinzipielle Eigenschaften von Schaltern | 169 |
| 4.10.2 | Beschreibung wichtiger Schaltertypen | 170 |
| 4.11 | Schaltanlagen | 176 |
| 4.11.1 | Schaltpläne von Schaltanlagen | 176 |
| 4.11.2 | Bauweise von Schaltanlagen | 180 |
| 4.11.3 | Berücksichtigung von Schaltanlagen in Ersatzschaltbildern | 187 |
| 4.11.4 | Leittechnik in Schaltanlagen | 187 |
| 4.12 | Überblick über wichtige Einrichtungen zum Schutz von Netzelementen | 189 |
| 4.12.1 | Einrichtungen zum Schutz vor Überspannungen | 189 |
| 4.12.2 | Einrichtungen zum Schutz vor Überströmen | 193 |
| 4.12.2.1 | Sicherungen und I_s -Begrenzer | 194 |
| 4.12.2.2 | Schutzsysteme | 199 |
| 4.13 | Aufgaben | 204 |
| 5 | Bemessung von Netzen im Normalbetrieb | 211 |
| 5.1 | Bemessungskriterien für den Normalbetrieb und Erläuterungen zu elektrisch kurzen Leitungen | 211 |
| 5.2 | Einseitig gespeiste Leitung ohne Verzweigungen | 212 |
| 5.3 | Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen | 217 |
| 5.4 | Zweiseitig gespeiste Leitung | 218 |
| 5.5 | Vermaschtes Netz | 221 |
| 5.6 | Nachbildung von Teilnetzen | 223 |
| 5.7 | Lastflußrechnung | 225 |
| 5.8 | Aufgaben | 230 |
| 6 | Dreipoliger Kurzschluß | 233 |
| 6.1 | Generatorferner dreipoliger Kurzschluß | 233 |
| 6.1.1 | Berechnung des stationären Kurzschlußstromverlaufes in unverzweigten Netzen | 234 |
| 6.1.2 | Berechnung des transienten Kurzschlußstromverlaufes in unverzweigten Netzen | 235 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2 | Generatornaher dreipoliger Kurzschluß | 238 |
| 6.2.1 | Verzweigte Netze mit einer Generatoreinspeisung | 238 |
| 6.2.2 | Berücksichtigung von Verbrauchern und Querkapazitäten | 244 |
| 6.2.3 | Verzweigte Netze mit mehreren Generatoreinspeisungen | 246 |
| 6.3 | Aufgaben | 250 |
| 7 | Kurzschlußfestigkeit von Anlagen | 254 |
| 7.1 | Lichtbogenkurzschlüsse in Anlagen | 254 |
| 7.2 | Mechanische Kurzschlußfestigkeit | 256 |
| 7.2.1 | Auslegung von linienförmigen, biegesteifen Leitern | 256 |
| 7.2.2 | Auslegung von Leiterschienen mit großen Querschnittsabmessungen | 260 |
| 7.2.3 | Auslegung von Stützen | 262 |
| 7.2.4 | Auslegung von Leiterseilen und Kabeln | 263 |
| 7.3 | Thermische Kurzschlußfestigkeit | 263 |
| 7.4 | Maßnahmen zur Beeinflussung der Kurzschlußleistung | 268 |
| 7.5 | Auswirkungen von Kurzschlüssen auf das transiente Generatordrehzahlverhalten | 271 |
| 7.5.1 | Wichtige Netzparameter zur Gewährleistung der transienten Stabilität | 271 |
| 7.5.2 | Drehzahlverhalten der Generatoren in einem kurzschlußbehafteten Netz mit mehrfacher Generatoreinspeisung | 277 |
| 7.6 | Aufgaben | 279 |
| 8 | Grundzüge der Betriebsführung und Planung von Netzen | 281 |
| 8.1 | Betriebsführung von Netzen | 281 |
| 8.2 | Wichtige Gesichtspunkte zur Planung von Netzen | 283 |
| 8.3 | Aufgaben | 288 |
| 9 | Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau | 290 |
| 9.1 | Methode der symmetrischen Komponenten | 290 |
| 9.2 | Anwendung der symmetrischen Komponenten auf unsymmetrisch betriebene Drehstromnetze | 292 |
| 9.3 | Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Mit- und Gegensystem der symmetrischen Komponenten | 297 |
| 9.4 | Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Nullsystem der symmetrischen Komponenten | 300 |
| 9.4.1 | Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil | 301 |
| 9.4.1.1 | Ohmscher Widerstand einer nullspannungsgespeisten Freileitung | 301 |
| 9.4.1.2 | Induktivität einer nullspannungsgespeisten Freileitung | 303 |
| 9.4.1.3 | Kapazitäten einer nullspannungsgespeisten Freileitung | 305 |
| 9.4.2 | Nullimpedanz einer Freileitung mit Erdseil | 305 |
| 9.4.3 | Nullimpedanz einer Doppelleitung | 307 |
| 9.4.4 | Nullimpedanz von Kabeln | 308 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.4.5 | Nullimpedanz von Transformatoren | 310 |
| 9.4.5.1 | Dreischenkeltransformatoren | 310 |
| 9.4.5.2 | Fünfschenkeltransformatoren | 315 |
| 9.4.6 | Nullimpedanz von Synchronmaschinen | 316 |
| 9.5 | Veranschaulichung des Berechnungsverfahrens an einem Beispiel | 316 |
| 9.6 | Aufgaben | 321 |
| 10 | Berechnung von symmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit punktuellen Asymmetrien im Aufbau | 322 |
| 10.1 | Beschreibung häufiger Asymmetrien | 322 |
| 10.2 | Erläuterung des Berechnungsverfahrens | 323 |
| 10.3 | Anwendung des Berechnungsverfahrens auf verschiedene Fehlerarten | 328 |
| 10.3.1 | Erdschluß mit Übergangswiderstand | 328 |
| 10.3.2 | Zweipoliger Kurzschluß mit Erdberührung | 329 |
| 10.3.3 | Leiterunterbrechung | 333 |
| 10.3.4 | Mehrfachfehler | 335 |
| 10.4 | Berechnung von transienten Netzvorgängen | 338 |
| 10.5 | Aufgaben | 343 |
| 11 | Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen | 346 |
| 11.1 | Netze mit isolierten Sternpunkten | 346 |
| 11.2 | Netze mit Erdschlußkompensation | 349 |
| 11.3 | Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung | 355 |
| 11.4 | Aufgaben | 359 |
| 12 | Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren | 362 |
| 12.1 | Direkter und indirekter Berührungsschutz in Netzen mit Nennspannungen über 1 kV | 362 |
| 12.2 | Berührungsspannungen bei Erdern | 365 |
| 12.3 | Berechnung von Erdungsspannungen bei unsymmetrischen Fehlern | 368 |
| 12.4 | Wichtige Auslegungskriterien für Erdungsanlagen | 372 |
| 12.5 | Indirekter Berührungsschutz in Niederspannungsnetzen | 374 |
| 12.6 | Aufgaben | 377 |
| | Lösungen | 379 |
| | Anhang | 418 |
| | Quellenverzeichnis | 422 |
| | Literaturverzeichnis | 423 |
| | Sachwortverzeichnis | 429 |