

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Allgemeines zur elektrischen Energieversorgung | 1 |
| 1.1 | Einführung, Primärenergie und elektrische Energie | 1 |
| 1.2 | Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie | 6 |
| 2 | Grundlagen zur Berechnung in Drehstromnetzen | 13 |
| 2.1 | Überblick | 13 |
| 2.2 | Komplexe Größen | 13 |
| 2.2.1 | Die Transformation zeitlich sinusförmig verlaufender Größen in die komplexe Ebene | 13 |
| 2.2.2 | Die komplexe Leistung im Wechsel- und Drehstromnetz | 15 |
| 2.3 | Zählpeile und Zählpeilsysteme | 18 |
| 2.4 | Symmetrische Komponenten | 26 |
| 2.4.1 | Allgemeines | 26 |
| 2.4.2 | Symmetrierung und Entsymmetrierung | 26 |
| 2.4.3 | Impedanzen im Mit-, Gegen- und Nullsystem | 31 |
| 2.4.4 | Drehstromleistung und Komponentenleistungen | 34 |
| 2.5 | Modale Komponenten | 35 |
| 2.5.1 | Allgemeiner Ansatz | 36 |
| 2.5.2 | Bestimmung der Transformationsmatrix | 38 |
| 2.5.3 | Transformation von Zeigergrößen | 39 |
| 2.5.4 | Leistung in modalen Komponenten | 40 |
| 2.5.5 | Gebräuchliche Komponentensysteme | 41 |
| 3 | Thermische Kraftwerke | 47 |
| 3.1 | Allgemeines | 47 |
| 3.2 | Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastanlagen | 51 |
| 3.3 | Thermische Prozesse, Wirkungsgrad | 55 |
| 3.4 | Kraft-Wärme-Kopplung | 74 |
| 3.5 | Dampfturbine | 78 |
| 3.6 | Allgemeine Anordnung in Dampfkraftwerken | 81 |
| 3.7 | Nukleare Dampferzeugung – Kernkraftwerke | 86 |
| 4 | Wasserkraftwerke und Windenergieanlagen | 93 |
| 4.1 | Bedeutung | 93 |
| 4.2 | Wasserkraftgeneratoren | 94 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3 | Wasserturbinen | 96 |
| 4.4 | Laufwasser- und Speicherkraftwerke | 102 |
| 4.5 | Windenergieanlagen | 111 |
| 5 | Drehstromgeneratoren | 119 |
| 5.1 | Allgemeines | 119 |
| 5.2 | Gleichungssystem der Synchronmaschine | 126 |
| 5.3 | Stationärer Betrieb | 130 |
| 5.4 | Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie | 140 |
| 5.5 | Nichtstationärer Betrieb | 142 |
| 5.5.1 | Operatorenleichungen | 143 |
| 5.5.2 | Zeitlicher Stromverlauf bei dreipoligem Klemmenkurzschluss | 147 |
| 5.5.3 | Kurzschlussdrehmomente und Fundamentbeanspruchung | 152 |
| 5.5.4 | Ersatzschaltungen für den subtransienten und den transienten Zustand | 161 |
| 6 | Generator- und Turbinenregelung | 167 |
| 6.1 | Erregungseinrichtungen | 167 |
| 6.2 | Spannungsregelung | 171 |
| 6.2.1 | Statik der Spannungsregelung | 171 |
| 6.2.2 | Spannungsregelung eines Turbogenerators | 171 |
| 6.3 | Turbinenregelung | 180 |
| 6.3.1 | Bilanzmodell des Netzes | 180 |
| 6.3.2 | Primärregelung | 183 |
| 6.3.3 | Sekundärregelung | 186 |
| 7 | Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken | 191 |
| 7.1 | Aufgabe des Eigenbedarfs | 191 |
| 7.2 | Aufbau von Eigenbedarfsnetzen, Prinzipschaltung | 192 |
| 7.2.1 | Auswahl der Eigenbedarfstransformatoren | 194 |
| 7.2.2 | Niederspannungsversorgung | 195 |
| 7.3 | Sicherstellung des Eigenbedarfs in thermischen Kraftwerken | 197 |
| 7.3.1 | Grundüberlegungen | 197 |
| 7.3.2 | Reserveversorgung des Eigenbedarfs | 197 |
| 7.3.3 | Notstillsetzen des Blockes, Notstromversorgung | 201 |
| 7.4 | Spannungshaltung und Schnellumschaltung | 202 |
| 7.4.1 | Spannungseinbruch beim Einschalten von Motoren | 202 |
| 7.4.2 | Umschaltung des Eigenbedarfs | 205 |
| 7.5 | Schutz von Kraftwerksblöcken | 211 |
| 7.5.1 | Allgemeines | 212 |
| 7.5.2 | Schutzmaßnahmen für Kraftwerksblöcke | 213 |
| 8 | Transformatoren | 217 |
| 8.1 | Einsatz der Transformatoren | 217 |
| 8.2 | Schaltgruppen und Schaltungen | 219 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8.3 | Zwei- und Dreiwicklungstransformatoren | 223 |
| 8.3.1 | Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm | 223 |
| 8.3.2 | Leistungsaufnahme und Spannungsänderung bei Belastung | 227 |
| 8.3.3 | Dreiwicklungstransformatoren | 229 |
| 8.3.4 | Nullsystem und Sternpunktbelastbarkeit | 233 |
| 8.3.5 | Rushströme beim Einschalten | 236 |
| 8.4 | Wicklungen und Stufenschalter | 239 |
| 8.5 | Spartransformatoren | 243 |
| 8.6 | Ersatzschaltungen in symmetrischen Komponenten | 246 |
| 8.6.1 | Impedanzersatzschaltungen | 246 |
| 8.6.2 | Admittanzersatzschaltungen | 253 |
| 8.6.3 | Ersatzschaltungen ohne Übertrager | 255 |
| 9 | Freileitungen | 257 |
| 9.1 | Mastformen, Kosten | 257 |
| 9.2 | Aufbau der Freileitungen | 260 |
| 9.3 | Mittlere geometrische Abstände | 265 |
| 9.4 | Impedanzen | 270 |
| 9.4.1 | Allgemeines | 270 |
| 9.4.2 | Selbst- und Gegenimpedanzen von Leiterschleifen | 271 |
| 9.4.3 | Impedanzen in symmetrischen Komponenten | 280 |
| 9.4.4 | Induktive Beeinflussung | 291 |
| 9.5 | Kapazitäten | 292 |
| 9.5.1 | Allgemeines | 292 |
| 9.5.2 | Selbst- und Gegenpotenzialkoeffizienten von Leiterschleifen | 294 |
| 9.5.3 | Admittanzen in symmetrischen Komponenten | 298 |
| 9.5.4 | Oberflächenrandfeldstärke | 303 |
| 9.6 | Die Leitung im stationären Betrieb | 306 |
| 9.6.1 | Leitungsgleichungen | 306 |
| 9.6.2 | Ersatzschaltungen für die kurze Leistung | 307 |
| 9.6.3 | Wellenwiderstand und natürliche Leistung | 308 |
| 9.6.4 | Verluste, wirtschaftliche Stromdichte | 310 |
| 9.7 | Wirkung der Freileitungen auf den Menschen | 314 |
| 9.7.1 | Elektrische und magnetische Feldstärke am Erdboden | 314 |
| 9.7.2 | HF-Störfeldstärke und Geräuschpegel | 321 |
| 10 | Kabel | 323 |
| 10.1 | Allgemeines | 323 |
| 10.2 | Aufbau der Kabel | 323 |
| 10.3 | Kabelauslegung und Belastbarkeit | 329 |
| 10.3.1 | Allgemeine Überlegungen | 329 |
| 10.3.2 | Strombelastbarkeit | 330 |
| 10.3.3 | Verlustberechnung | 332 |
| 10.3.4 | Wärmewiderstände | 337 |
| 10.3.5 | Normalbedingungen für Kabelbelastung und Häufung | 339 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 10.3.6 | Kabelbelastung bei Bodenaustrocknung und wechselnder Last | 342 |
| 10.4 | Impedanzen und Kapazitäten | 346 |
| 10.4.1 | Impedanzen im Mit- und Nullsystem | 346 |
| 10.4.2 | Kapazitäten, Ladeleistungen und kapazitiver Erdschlussstrom | 354 |
| 10.5 | Hochspannungs- und Hochleistungskabel | 358 |
| 11 | Schalter und Schaltanlagen | 365 |
| 11.1 | Leistungsschalter | 365 |
| 11.1.1 | Anforderungen an Leistungsschalter | 365 |
| 11.1.2 | Ölschalter, ölarme Schalter | 368 |
| 11.1.3 | Vakuumschalter | 368 |
| 11.1.4 | Druckluftschalter | 370 |
| 11.1.5 | Generatorschalter | 373 |
| 11.1.6 | SF ₆ -Schalter | 373 |
| 11.2 | Schaltanlagen | 375 |
| 11.2.1 | Allgemeines | 375 |
| 11.2.2 | Schaltungen in Schaltanlagen | 376 |
| 11.2.3 | Innenraum- und Freiluftschaltanlagen | 379 |
| 11.2.4 | Vollgekapselte, SF ₆ -isolierte Schaltanlagen | 382 |
| 12 | Drehstromnetze | 387 |
| 12.1 | Netzaufbau, Verbundnetz | 387 |
| 12.2 | Höchstspannungsübertragung | 390 |
| 12.3 | Versorgung großer Städte oder Ballungsräume | 397 |
| 12.4 | Verteilungsnetze | 403 |
| 12.5 | Industrielle Stromversorgung | 410 |
| 12.6 | Blindleistungsbedarf und Kompensation | 412 |
| 12.6.1 | Blindleistungsbedarf der Verbraucher | 412 |
| 12.6.2 | Blindleistungsbedarf des Netzes | 417 |
| 12.6.3 | Blindleistungskompensation | 419 |
| 12.6.4 | Parallelresonanz und Absaugung von Stromüberschwingungen | 425 |
| 12.7 | Netzschutz | 431 |
| 12.7.1 | Überblick | 431 |
| 12.7.2 | Leitungsschutz | 433 |
| 12.7.3 | Transformatorschutz | 435 |
| 13 | Mathematische Beschreibung des Drehstromnetzes | 439 |
| 13.1 | Netzumformungen | 439 |
| 13.2 | Gleichungssysteme mit Admittanz-, Impedanz- und Hybridmatrix | 439 |
| 13.2.1 | Knotenpunktverfahren, Admittanzmatrix | 441 |
| 13.2.2 | Impedanzmatrix | 445 |
| 13.2.3 | Hybridmatrix | 449 |
| 13.3 | Quer- und Längsunsymmetrien | 455 |
| 13.4 | Einfachquerfehler | 461 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 13.4.1 | Strom-Spannungsbeziehungen an der Fehlerstelle | 462 |
| 13.4.2 | Einpoliger Erdkurzschluss | 466 |
| 13.5 | Einfachlängsfehler | 468 |
| 13.5.1 | Strom-Spannungsbeziehungen an der Fehlerstelle | 468 |
| 13.5.2 | Einpoliger Längsfehler | 469 |
| 13.5.3 | Zweipoliger Längsfehler | 471 |
| 13.6 | Doppelerdkurzschluss und andere Doppelfehler | 472 |
| 13.7 | Fehlermatrizenverfahren | 478 |
| 13.7.1 | Fehlerbedingungen | 480 |
| 13.7.2 | Nachbildung von Kurzschlüssen an der Admittanzmatrix | 481 |
| 13.7.3 | Nachbildung von Unterbrechungen an der Admittanzmatrix | 483 |
| 13.7.4 | Nachbildung von Kurzschlüssen an der Impedanzmatrix | 486 |
| 13.7.5 | Nachbildung von Kurzschlüssen und Unterbrechungen in modalen Komponenten | 486 |
| 14 | Leistungsfluss im Drehstromnetz | 487 |
| 14.1 | Aufgabe | 487 |
| 14.2 | Leistungsfluss auf Leitungen | 487 |
| 14.2.1 | Vorgabe der Belastung als konstante Impedanz | 489 |
| 14.2.2 | Vorgabe der Belastung durch konstanten Strom | 490 |
| 14.2.3 | Vorgabe der Belastung durch konstante Leistung | 493 |
| 14.2.4 | Vorgabe der Abnahmeleistungen als Funktion der Spannung | 494 |
| 14.2.5 | Leistungsfluss auf Leitungen bei mehreren Abnahmen | 495 |
| 14.2.6 | Leistungsfluss in Ringnetzen | 498 |
| 14.3 | Leistungsfluss in vermaschten Netzen | 499 |
| 14.3.1 | Methoden der Leistungsflussberechnung – Einführung | 499 |
| 14.3.2 | Knotenpunktverfahren | 503 |
| 14.3.3 | Newton-Verfahren | 510 |
| 14.3.4 | Entkoppelte Leistungsflussberechnung | 512 |
| 14.3.5 | Gleichstromleistungsflussberechnung | 514 |
| 15 | Kurzschlussströme und Kurzschlussbeanspruchungen | 517 |
| 15.1 | Einführung | 517 |
| 15.2 | Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstromes | 521 |
| 15.3 | Methoden zur Berechnung der Kurzschlussströme | 527 |
| 15.3.1 | Allgemeines | 527 |
| 15.3.2 | Überlagerungsverfahren | 527 |
| 15.3.3 | Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle | 534 |
| 15.4 | Nachbildung der Betriebsmittel beim Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle | 539 |
| 15.4.1 | Allgemeines | 539 |
| 15.4.2 | Netzeinspeisungen | 540 |
| 15.4.3 | Leitungen (Freileitungen und Kabel) | 542 |
| 15.4.4 | Transformatoren | 543 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 15.4.5 | Generatoren | 549 |
| 15.4.6 | Kraftwerksblöcke mit Stufenschalter | 553 |
| 15.4.7 | Kraftwerksblöcke ohne Stufenschalter | 560 |
| 15.4.8 | Korrekturfaktoren bei Kurzschluss zwischen Generator und Blocktransformator | 563 |
| 15.4.9 | Motoren | 570 |
| 15.5 | Kurzschlussströme und ihre Berechnung | 573 |
| 15.5.1 | Allgemeines | 573 |
| 15.5.2 | Anfangs-Kurzschlusswechselstrom | 580 |
| 15.5.3 | Stosskurzschlussstrom | 597 |
| 15.5.4 | Ausschaltstrom | 605 |
| 15.5.5 | Dauerkurzschlussstrom | 612 |
| 15.5.6 | Beitrag von Asynchronmotoren zum Kurzschlussstrom | 616 |
| 15.5.7 | Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom und Joule-Integral | 628 |
| 15.6 | Berechnung der Kurzschlussströme im per-unit- oder im %/MVA-System | 640 |
| 15.6.1 | Physikalische, relative und semirelative Größen | 640 |
| 15.6.2 | Definition der Größen des p. u.-Systems und des %/MVA-Systems | 642 |
| 15.6.3 | Kurzschlussstromberechnung im %/MVA-System | 643 |
| 15.7 | Mechanische und thermische Kurzschlussfestigkeit | 649 |
| 15.7.1 | Grundüberlegungen zu Kurzschlusskräften | 649 |
| 15.7.2 | Beanspruchung biegesteifer Leiter und Stützpunkt- beanspruchung | 656 |
| 15.7.3 | Beanspruchung in Hochspannungsanlagen mit Seilen | 671 |
| 15.7.4 | Thermische Kurzschlussfestigkeit | 677 |
| 15.8 | Begrenzung der Kurzschlussströme | 682 |
| 16 | Sternpunktbehandlung und Erdung in Hochspannungsnetzen | 687 |
| 16.1 | Überblick | 687 |
| 16.2 | Sternpunktbehandlung | 690 |
| 16.2.1 | Einführung | 690 |
| 16.2.2 | Netze mit isoliertem Sternpunkt | 690 |
| 16.2.3 | Netze mit Erdschlusskompensation | 692 |
| 16.2.4 | Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung | 696 |
| 16.3 | Sternpunktbehandlung auf der OS- und US-Seite eines Yy0 d5-Transformators | 698 |
| 16.4 | Erdung in Hochspannungsnetzen | 702 |
| 16.4.1 | Über Erde fließende Teilkurzschlussströme | 702 |
| 16.4.2 | Schleifenimpedanzen, Erdseilreduktionsfaktoren und Kettenleiterimpedanzen | 706 |
| 16.4.3 | Erdkurzschluss in der Nähe einer Anlage | 712 |
| 16.4.4 | Ausbreitungswiderstände von Erdern und Erdungsanlagen | 718 |
| 16.4.5 | Bau von Erdungsanlagen und Erdungsmessungen | 722 |
| 16.5 | Beeinflussung | 728 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 17 | Überspannungen und Isolationskoordination | 735 |
| 17.1 | Übersicht | 735 |
| 17.2 | Spannungserhöhungen | 736 |
| 17.2.1 | Zeitweilige Spannungserhöhung bei Erdschluss | 736 |
| 17.2.2 | Zeitweilige Spannungserhöhung bei Lastabwurf, Ferranti-Effekt | 736 |
| 17.2.3 | Spannungserhöhung durch kapazitive Unsymmetrie | 742 |
| 17.2.4 | Resonanzüberspannungen | 743 |
| 17.3 | Innere Überspannungen | 744 |
| 17.3.1 | Transiente Erdschlussüberspannungen | 744 |
| 17.3.2 | Überspannungen beim Schalten kleiner induktiver Ströme | 747 |
| 17.3.3 | Überspannungen beim Schalten von Kondensatoren und Leitungen | 754 |
| 17.3.4 | Überspannungen beim Ausschalten von Kurzschlussströmen | 759 |
| 17.4 | Äußere Überspannungen | 767 |
| 17.4.1 | Überblick | 767 |
| 17.4.2 | Atmosphärische Entladung und Blitzeinschlag | 768 |
| 17.4.3 | Wanderwellen auf Leitungen | 770 |
| 17.5 | Isolationsminderung | 779 |
| 17.6 | Isolationskoordination | 784 |
| 17.7 | Auswahl und Einsatz von Überspannungsableitern | 788 |
| 17.7.1 | Funkenstreckenableiter | 788 |
| 17.7.2 | Metalloxidableiter | 791 |
| 17.7.3 | Ableiterabsatz | 792 |
| 18 | Stabilität der Drehstromübertragung | 801 |
| 18.1 | Einführung, Begriff der Stabilität, Modellbildung | 801 |
| 18.2 | Statische Stabilität | 806 |
| 18.2.1 | Statische Stabilität ohne Regelung | 806 |
| 18.2.2 | Statische Stabilität mit Regelung | 810 |
| 18.2.3 | Selbsterregung | 814 |
| 18.3 | Transiente Stabilität | 817 |
| 18.3.1 | Einflussgrößen und Untersuchungsmethode | 817 |
| 18.3.2 | Transiente Stabilität abhängig von Kurzschlussart, -dauer und Netzaufbau | 821 |
| 18.3.3 | Stabilitätsverlust und Resynchronisierung | 826 |
| 18.3.4 | Einfluss von Generatorauslegung und Erregersystem auf die transiente Stabilität | 831 |
| 19 | Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung | 835 |
| 19.1 | Wirkungsweise | 835 |
| 19.2 | Technische Besonderheiten der HGÜ gegenüber der DHÜ | 837 |
| 19.3 | Entwicklung der HGÜ | 837 |
| 19.4 | Betriebsmittel der HGÜ | 841 |
| 19.4.1 | Gesamtanordnung | 841 |
| 19.4.2 | HGÜ-Stationen | 845 |

| | | |
|---------------------------------------|------------------------------|------------|
| 19.4.3 | HGÜ-Freileitungen und -Kabel | 847 |
| 19.5 | Kostenvergleich HGÜ mit DHÜ | 850 |
| Anhang | | 853 |
| Formelzeichen und Nebenzeichen | | 919 |
| Literatur | | 925 |
| Sachverzeichnis | | 963 |