

H. Happoldt · D. Oeding

# Elektrische Kraftwerke und Netze

Fünfte, völlig neubearbeitete Auflage



Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1978



<b>5. Drehstromgeneratoren</b> . . . . .	76
5.1 Allgemeines, Aufbau und Kühlung der Generatoren . . . . .	76
5.2 Zeigerdiagramm und Leistungsdiagramm des Schenkelpol- und Turbogenerators . . . . .	82
5.3 Klemmenkurzschluß und unsymmetrische Belastung . . . . .	92
5.3.1 Klemmenkurzschluß . . . . .	92
5.3.2 Der Turbogenerator im asynchronen Betrieb . . . . .	100
5.3.3 Kurzschlußmomente und Fundamentbeanspruchung . . . . .	102
5.4 Das dynamische Leistungsdiagramm . . . . .	109
<b>6. Generatorerregung und Regelung in Kraftwerken</b> . . . . .	113
6.1 Erregungseinrichtungen . . . . .	113
6.1.1 Drehstromerregemaschine und Dioden . . . . .	114
6.1.2 Thyristor-Erregung . . . . .	115
6.1.3 Statik der Spannungsregelung . . . . .	115
6.2 Spannungsregelung . . . . .	118
6.2.1 Berechnung von Regelungsvorgängen . . . . .	118
6.2.2 Regelkreis und Spannungsregler . . . . .	124
6.2.3 Spannungsregelung eines Turbogenerators (Beispiel) . . . . .	131
6.3 Maschinenregelung in Kraftwerken . . . . .	138
6.3.1 Turbinenregelung, Primärregelung . . . . .	138
6.3.2 Übergabeleistungs-Frequenzregelung, Sekundärregelung . . . . .	139
<b>7. Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken</b> . . . . .	142
7.1 Aufgabe des Eigenbedarfs . . . . .	142
7.2 Aufbau von Eigenbedarfsnetzen, Prinzipschaltung . . . . .	143
7.2.1 Auswahl der Eigenbedarfstransformatoren . . . . .	144
7.2.2 Niederspannungsversorgung . . . . .	145
7.3 Sicherstellung des Eigenbedarfs in Wärmekraftwerken . . . . .	147
7.3.1 Grundüberlegungen . . . . .	147
7.3.2 Reserveversorgung des Eigenbedarfs . . . . .	147
7.3.3 Notstillsetzen des Blockes, Notstromversorgung . . . . .	149
7.4 Spannungshaltung und Schnellumschaltung . . . . .	152
7.4.1 Spannungseinbruch beim Einschalten von Motoren . . . . .	152
7.4.2 Umschaltung des Eigenbedarfs . . . . .	154
<b>8. Transformatoren</b> . . . . .	162
8.1 Einsatz der Transformatoren . . . . .	162
8.2 Schaltgruppen und Schaltungen . . . . .	164
8.3 Zwei- und Dreiwicklungs-Transformatoren . . . . .	167
8.3.1 Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm . . . . .	167
8.3.2 Leistungsaufnahme und Spannungsänderung bei Belastung . . . . .	171
8.3.3 Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	172
8.3.4 Reaktanzen des Nullsystems und Sternpunktbelastbarkeit . . . . .	175
8.3.5 Rushströme beim Einschalten leerlaufender Transformatoren . . . . .	178
8.4 Transformatorwicklungen und Stufenschalter . . . . .	182
8.5 Spartransformatoren . . . . .	185

<b>9. Freileitungen</b> . . . . .	188
9.1 Mastformen, Kosten . . . . .	188
9.2 Mechanischer Aufbau der Freileitungen . . . . .	190
9.3 Berechnung der Leitungsinduktivitäten . . . . .	197
9.3.1 Selbst- und Koppelinduktivität . . . . .	197
9.3.2 Mitimpedanz der Drehstromfreileitung . . . . .	199
9.3.3 Nullimpedanz der Drehstromfreileitung . . . . .	202
9.4 Berechnung der Leitungskapazitäten . . . . .	211
9.4.1 Allgemeines zur Berechnung der Leitungskapazitäten . . . . .	211
9.4.2 Teilkapazitäten und Potentialkoeffizienten bei Freileitungen . . . . .	213
9.4.3 Kapazitäten im Mit- und Nullsystem . . . . .	215
9.4.4 Oberflächenrandfeldstärke . . . . .	219
9.5 Die Leitung im stationären Betrieb . . . . .	222
9.5.1 Leitungsgleichungen . . . . .	222
9.5.2 Wellenwiderstand und natürliche Leistung . . . . .	224
9.5.3 Verluste, wirtschaftliche Stromdichte . . . . .	226
<b>10. Kabel</b> . . . . .	228
10.1 Allgemeines . . . . .	228
10.2 Starkstromkabel . . . . .	228
10.3 Kabelauslegung und Belastbarkeit . . . . .	234
10.3.1 Allgemeine Überlegungen . . . . .	234
10.3.2 Strombelastbarkeit . . . . .	235
10.3.3 Verlustberechnung . . . . .	238
10.3.4 Wärmewiderstände . . . . .	243
10.3.5 Normalbedingungen für Kabelbelastung und Häufung . . . . .	245
10.3.6 Kabelbelastung bei Bodenaustrocknung und wechselnder Last . . . . .	248
10.4 Impedanzen und Kapazitäten von Kabeln . . . . .	251
10.4.1 Kabelimpedanzen im Mit- und Nullsystem . . . . .	251
10.4.2 Kabelkapazitäten, Ladeleistung und kapazitiver Erdschlußstrom . . . . .	256
10.5 Hochspannungs- und Hochleistungskabel . . . . .	259
<b>11. Leistungsschalter und Schaltanlagen</b> . . . . .	265
11.1 Leistungsschalter . . . . .	265
11.1.1 Anforderungen an Leistungsschalter . . . . .	265
11.1.2 Ölschalter, ölarme Schalter . . . . .	267
11.1.3 Druckluft-(Druckgas-) Schalter . . . . .	270
11.1.4 Hochstromschalter, Generatorschalter . . . . .	273
11.1.5 SF <sub>6</sub> -Schalter . . . . .	274
11.2 Schaltanlagen . . . . .	276
11.2.1 Schaltungen in Schaltanlagen . . . . .	276
11.2.2 Innenraum- und Freiluftschaltanlagen . . . . .	278
11.2.3 Vollgekapselte, SF <sub>6</sub> -isolierte Schaltanlagen . . . . .	282
11.3 Geräte in Schaltanlagen . . . . .	284
11.3.1 Trennschalter, Lasttrennschalter . . . . .	284
11.3.2 Stromwandler . . . . .	286
11.3.3 Spannungswandler . . . . .	291

<b>12. Das Drehstromübertragungs- und Verteilungsnetz</b> . . . . .	295
12.1 Spannungsebenen, Teilnetze, Netzkupplung . . . . .	295
12.2 Drehstromhöchstspannungsübertragung . . . . .	295
12.3 Verbundnetze . . . . .	303
12.4 Netze der öffentlichen und industriellen Stromversorgung . . . . .	307
12.4.1 Aufbau und Auslegung der Verteilungsnetze . . . . .	307
12.4.2 Netze für die Versorgung von großen Städten oder Ballungsräumen . . . . .	313
12.4.3 Industrienetze . . . . .	316
12.5 Blindleistungsbedarf und Kompensation . . . . .	320
12.5.1 Blindleistungsbedarf der Verbraucher und des Netzes . . . . .	320
12.5.2 Blindleistungskompensation im Drehstromnetz . . . . .	327
12.5.3 Parallelresonanz und Absaugung von Stromüberschwingungen . . . . .	333
<b>13. Rechnerische Behandlung des Drehstromnetzes</b> . . . . .	338
13.1 Stern-Vieleckumwandlung . . . . .	338
13.2 Querunsymmetrie im Drehstromnetz . . . . .	340
13.3 Einfachfehler und Doppelfehler im Drehstromnetz . . . . .	344
13.3.1 Fehlerbeschreibung . . . . .	344
13.3.2 Dreipoliger Kurzschluß . . . . .	344
13.3.3 Zweipoliger Kurzschluß mit Erdberührung . . . . .	346
13.3.4 Zweipoliger Kurzschluß ohne Erdberührung . . . . .	348
13.3.5 Einpoliger Erdkurzschluß . . . . .	350
13.3.6 Leitungsunterbrechungen . . . . .	356
13.3.7 Doppelerdschluß und andere Doppelfehler . . . . .	359
13.4 Übertragung symmetrischer Komponenten über Transformatoren . . . . .	362
13.5 Admittanz-, Impedanz- und Hybridmatrix . . . . .	369
13.5.1 Netznachbildung . . . . .	369
13.5.2 Hybridmatrix des Netzes . . . . .	377
13.5.3 Direkter Aufbau der Hybridmatrix . . . . .	379
<b>14. Lastfluß im Drehstromnetz</b> . . . . .	385
14.1 Aufgabe . . . . .	385
14.2 Lastfluß auf Leitungen . . . . .	385
14.2.1 Vorgabe der Belastung als Impedanz . . . . .	385
14.2.2 Belastungsnachbildung durch konstanten Strom . . . . .	388
14.2.3 Vorgabe konstanter Abnahmeleistungen . . . . .	389
14.2.4 Vorgabe der Abnahmeleistungen in Funktion der Spannung . . . . .	391
14.3 Lastfluß in vermaschten Netzen . . . . .	393
14.3.1 Vermaschungsgrad . . . . .	393
14.3.2 Methoden der Lastflußberechnung – Einführung . . . . .	394
14.3.3 Iterative Lösung der Knotenpunktadmittanzgleichungen . . . . .	396
<b>15. Kurzschlußströme und Kurzschlußbeanspruchungen in Drehstromnetzen</b> . . . . .	401
15.1 Einführung, Fehlerarten . . . . .	401
15.2 Zeitlicher Verlauf des Kurzschlußstromes . . . . .	403
15.2.1 Verlauf des Kurzschlußstromes beim Netzkurzschluß . . . . .	403
15.2.2 Gleichstromglied beim Netzkurzschluß . . . . .	406

15.3	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom . . . . .	409
15.3.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	409
15.3.2	Ersatzspannungsquelle . . . . .	410
15.3.3	Ersatzschaltung im Mit-, Gegen- und Nullsystem . . . . .	413
15.3.4	Berechnungsgleichungen für Anfangs-Kurzschlußwechselströme $I_k''$ . . . . .	416
15.4	Stoßkurzschlußstrom . . . . .	422
15.4.1	Faktor $\kappa$ . . . . .	422
15.4.2	Berechnungsgleichungen für Stoßkurzschlußströme $I_s$ . . . . .	427
15.5	Ausschaltwechselstrom und Dauerkurzschlußstrom . . . . .	428
15.5.1	Faktoren $\mu$ und $\lambda$ . . . . .	428
15.5.2	Berechnungsgleichungen für $I_a$ und $I_k$ . . . . .	432
15.6	Kurzschlußströme von Motoren . . . . .	433
15.6.1	Berücksichtigung von Asynchronmotoren bei Kurzschluß im Hochspannungsnetz . . . . .	434
15.6.2	Berücksichtigung von Asynchronmotoren bei Kurzschluß im Niederspannungsnetz . . . . .	437
15.7	Kurzschlußstromberechnung in Niederspannungsnetzen . . . . .	438
15.7.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	438
15.7.2	Einfach gespeister generatorferner Kurzschluß und von mehreren Seiten einfach gespeister Kurzschluß . . . . .	439
15.7.3	Kurzschluß im vermaschten Netz . . . . .	441
15.7.4	Kurzschlußstrom bei Generatoren im Niederspannungsnetz . . . . .	442
15.8	Berechnung der Kurzschlußströme mit Impedanzen des %/MVA-Systems . . . . .	445
15.8.1	Physikalische, relative und semi-relative Größen . . . . .	445
15.8.2	Impedanzen und Kurzschlußströme im %/MVA-System . . . . .	446
15.9	Begrenzung der Kurzschlußströme . . . . .	450
15.10	Mechanische und thermische Kurzschlußfestigkeit . . . . .	454
15.10.1	Grundüberlegungen zur mechanischen Festigkeit . . . . .	454
15.10.2	Beanspruchung bei biegesteifen Leitern . . . . .	455
15.10.3	Thermische Kurzschlußfestigkeit . . . . .	464
15.11	Beispiele zur Kurzschlußstromberechnung . . . . .	468
<b>16.</b>	<b>Sternpunktbehandlung und Erdung in Hochspannungsnetzen . . . . .</b>	<b>474</b>
16.1	Überblick . . . . .	474
16.2	Sternpunktbehandlung . . . . .	475
16.2.1	Einführung . . . . .	475
16.2.2	Netze mit isoliertem (freiem) Sternpunkt . . . . .	477
16.2.3	Netze mit Erdschlußkompensation (Erdschlußlöschung) . . . . .	479
16.2.4	Netze mit direkt oder über strombegrenzende Impedanzen geerdeten Sternpunkten (niederohmige Sternpunkterdung) . . . . .	482
16.3	Sternpunktbehandlung auf der OS- und US-Seite eines Yy0-Transformators mit Dreieckausgleichswicklung . . . . .	484
16.4	Erdung in Hochspannungsnetzen . . . . .	487
16.4.1	Über Erde fließende Teilkurzschlußströme . . . . .	487
16.4.2	Schleifenimpedanzen, Erdseilreduktionsfaktoren und Kettenleiterimpedanzen . . . . .	491
16.4.3	Ausbreitungswiderstände von Erdern . . . . .	495
16.4.4	Ausführung von Erdungsanlagen und Erdungsmessungen . . . . .	499
16.5	Beeinflussung . . . . .	505
16.5.1	Überblick über Beeinflussungsarten . . . . .	505
16.5.2	Berechnung induktiver Beeinflussung . . . . .	506

<b>17. Überspannungen und Isolationskoordination</b> . . . . .	511
17.1 Aufgabe der Isolation . . . . .	511
17.2 Isolationsminderung durch Verschmutzung . . . . .	512
17.3 Innere Überspannungen . . . . .	516
17.3.1 Überblick . . . . .	516
17.3.2 Transiente Erdschlußüberspannungen . . . . .	517
17.3.3 Aus- und Einschaltüberspannungen bei kleinen induktiven Strömen und Transformatoren . . . . .	521
17.3.4 Aus- und Einschaltüberspannungen von Kondensatoren und Leitungen . . . . .	528
17.3.5 Einschwingspannung nach Kurzschlußausschaltung . . . . .	539
17.4 Äußere (atmosphärische) Überspannungen . . . . .	549
17.4.1 Überblick . . . . .	549
17.4.2 Atmosphärische Entladung und Blitzeinschlag . . . . .	551
17.4.3 Wanderwellen auf Leitungen, Reflexion und Brechung . . . . .	552
17.5 Isolationskoordination . . . . .	562
17.5.1 Aufgabe der Isolationskoordination . . . . .	562
17.5.2 Isolationspegel . . . . .	566
17.5.3 Auswahl und Einsatz von Ventilableitern . . . . .	567
<b>18. Stabilität der Drehstromübertragung</b> . . . . .	576
18.1 Einführung, Begriff der Stabilität . . . . .	576
18.2 Statische Stabilität . . . . .	577
18.2.1 Statische Stabilität ohne Regelung . . . . .	577
18.2.2 Stabilität bei kapazitiver Belastung . . . . .	581
18.2.3 Statische Stabilität der Synchronmaschine mit Regelung . . . . .	582
18.3 Dynamische Stabilität . . . . .	587
18.3.1 Einflußgrößen und Untersuchungsmethode . . . . .	587
18.3.2 Dynamische Stabilität abhängig von der Fehlerart, der Fehlerdauer und dem Netzaufbau . . . . .	590
18.3.3 Stabilitätsverlust, Resynchronisierung und Grobsynchronisierung . . . . .	596
18.3.4 Einfluß der Generatorauslegung und des Erregersystems auf die dynamische Stabilität und die Ausregelung von Spannungsänderungen . . . . .	602
<b>19. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung</b> . . . . .	607
19.1 Wirkungsweise . . . . .	607
19.2 Technische Besonderheiten der HGÜ gegenüber der DHÜ . . . . .	609
19.3 Entwicklung der HGÜ . . . . .	610
19.4 Bauteile von HGÜ-Übertragungen . . . . .	612
19.4.1 Vorhandene Übertragungen . . . . .	612
19.4.2 HGÜ-Stationen . . . . .	617
19.4.3 HGÜ-Freileitungen . . . . .	621
19.4.4 HGÜ-Kabel . . . . .	623
19.5 Kostenvergleich HGÜ mit DHÜ . . . . .	624
19.6 Anwendungsmöglichkeiten und Weiterentwicklung der HGÜ . . . . .	626
<b>Anhang</b> . . . . .	627
<b>Formelzeichen und Indizes</b> . . . . .	645
<b>Literatur</b> . . . . .	649
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	669