

H. Happoldt • D. Oeding

Elektrische Kraftwerke und Netze

Fünfte, völlig neubearbeitete Auflage

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1978

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines zur Elektrizitätsversorgung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Grundüberlegungen zur Energieerzeugung, -Übertragung und -Verteilung	4
2. Berechnungen im Drehstromnetz, mathematische Grundlagen	9
2.1 Überblick	9
2.2 Komplexe Größen	9
2.2.1 Die Transformation zeitlich sinusförmig verlaufender Größen in die komplexe Ebene	9
2.2.2 Die komplexe Leistung im Wechsel- und Drehstromnetz	12
2.3 Zählpeile und Zählpeilsysteme.	15
2.3.1 Definition.	15
2.3.2 Zählpeilfestlegungen bei Synchronmaschinen.	17
2.3.3 Zeigerdiagramme, Zählpeile und Leistungen.	18
2.4 Symmetrische Komponenten, Grundlagen.	21
2.4.1 Allgemeines.	21
2.4.2 Symmetrierung und Entsymmetrierung	21
2.4.3 Impedanzen im Mit-, Gegen- und Nullsystem.	24
2.4.4 Drehstromleistung und Komponentenleistungen.	28
3. Wärmekraftwerke	29
3.1 Allgemeines.	29
3.2 Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastanlagen. Einsatz und Prozeßführung	30
3.2.1 Grundlastanlagen.	30
3.2.2 Mittellastanlagen.	32
3.2.3 Spitzenlastanlagen.	34
3.3 Thermischer Dampfkraftwerksprozeß, Wirkungsgrad	35
3.4 Dampfkessel	46
3.5 Dampfturbine	50
3.6 Nukleare Dampferzeugung — Kernkraftwerke.	53
3.7 Allgemeine Anordnungen in thermischen Kraftwerken.	55
4. Wasserkraftwerke	58
4.1 Bedeutung.	58
4.2 Wasserkraftgeneratoren.	58
4.3 Wasserturbinen.	59
4.4 Laufwasser- und Speicherkraftwerke.	66

5. Drehstromgeneratoren	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
6. Generatorerregung und Regelung in Kraftwerken	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
7. Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken	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
8. Transformatoren	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

9. Freileitungen	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
10. Kabel	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
11. Leistungsschalter und Schaltanlagen	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 ₆ -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 ₆ -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

12. Das Drehstromübertragungs- und Verteilungsnetz	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
13. Rechnerische Behandlung des Drehstromnetzes	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
14. Lastfluß im Drehstromnetz	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
15. Kurzschlußströme und Kurzschlußbeanspruchungen in Drehstromnetzen	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^{\wedge}	416
15.4	Stoßkurzschlußstrom	422
15.4.1	Faktor K	422
15.4.2	Berechnungsgleichungen für Stoßkurzschlußströme I_k	427
15.5	Ausschaltwechselstrom und Dauerkurzschlußstrom	428
15.5.1	Faktoren n und l_{∞}	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
16.	Sternpunktbehandlung und Erdung in Hochspannungsnetzen	474
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 YyO-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

17. Überspannungen und Isolationskoordination	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
18. Stabilität der Drehstromübertragung	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
19. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	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
Anhang	627
Formelzeichen und Indizes	645
Literatur	649
Sachverzeichnis	669