

Inhalt

Teil I Einführung, UCTE, ENTSO-E, elektrotechnische Grundlagen, Hochspannungstechnik

1	Einführung, UCTE, ENTSO-E	3
1.1	Grundaufbau der elektrischen Energieversorgung	4
1.2	Organisation der Elektrizitätswirtschaft in einigen Ländern Europas (Rückblick)	6
1.3	Elektrizitätsproduktion und -austausch in Europa	7
1.3.1	UCTE (1951–1999)	8
1.3.2	UCTE (ab 1999)	9
1.3.3	Energieproduktion und Energieaustausch	10
1.4	Verband europäischer Übertragungsnetzbetreiber ENTSO-E	10
2	Elektrotechnische Grundlagen	17
2.1	Drehstrom, Drehstromleistung	17
2.1.1	Wechselstrom versus Gleichstrom	17
2.1.2	Drehstrom	18
2.1.3	Drehstrom versus Einphasenwechselstrom	19
2.1.4	Scheinleistung, Wirkleistung, Blindleistung im Drehstromkreis	19
2.1.5	Momentane Phasenleistung	20
2.1.6	Momentane Drehstromleistung	22
2.2	Nenngrößen, p.u. Systeme	23
2.3	Symmetrische Dreiphasensysteme	26
2.3.1	Ersatzschaltbild	26
2.3.2	Zweitore	28
2.3.3	Berechnung von Spannungsabfall und Verlusten	29
2.4	Zeiger und Komponenten für Drehstrom	31
2.4.1	Zeiger im Einphasenkreis	31
2.4.2	Darstellung dynamischer Vorgänge	32
2.4.3	Raumzeigerdarstellung des Dreiphasensystems	33

XIII

2.4.4	Raumzeiger versus symmetrische Komponenten	35
2.4.5	Raumzeiger und $\alpha\beta 0$ -Komponenten	36
2.4.6	Parkzeiger und Parkkomponenten	37
2.5	Das elektromagnetische Feld	40
2.5.1	Feldgleichungen	40
2.5.2	Energie des Feldes	41
2.5.3	Feldpotentiale	43
2.5.4	Elektrisches Feld im Dielektrikum	43
2.5.5	Das Strömungsfeld	44
2.5.6	Magnetisches Feld	44
2.5.7	Magnetisches Feld von Leitern	45
2.5.8	Technischer elektromagnetischer Kreis	49
2.5.9	Elektromagnetische Kräfte	51
	Literatur	54
3	Grundlagen der Hochspannungstechnik	55
3.1	Hohe Spannungen in Energieversorgungsnetzen	55
3.1.1	Normspannungen, Prüf- und Bemessungsspannungen ...	56
3.1.2	Blitzentladungen	58
3.1.3	Innere Überspannungen	62
3.1.4	Gegenstand der Hochspannungstechnik	62
3.2	Elektrische Festigkeit der Isoliermittel	63
3.2.1	Durchschlag, Teildurchschlag	63
3.2.2	Verhalten im homogenen Feld	64
3.2.3	Verhalten im inhomogenen Feld	65
3.3	Feldberechnung	67
3.3.1	Grundlagen	67
3.3.2	Verfahren mit Finiten Elementen	69
3.3.3	Superpositionsverfahren	72
3.3.4	Einfache Anordnungen mit 2 Elektroden	74
3.3.5	Wirkung der Raumladung	81
3.4	Ersatzschaltbild des Dielektrikums	82
3.4.1	Elementares Modell	83
3.4.2	Polarisationserscheinungen und exaktere Modelle	84
3.5	Heterogene Isolierungen	87
3.5.1	Querschichtung von Isolierstoffen	87
3.5.2	Längs- und Schrägschichtung	89
3.5.3	Zylinder- und Kugelschichtungen	90
3.5.4	Poröse imprägnierte Stoffe	90
3.6	Gasentladung und Gaszündung	91
3.6.1	Verhalten der Gase bei kleinen Feldstärken (V/cm)	92
3.6.2	Verhalten bei grossen elektrischen Feldstärken (kV/cm) ..	93
3.6.3	Physikalische Erklärung der Stossionisierungsfunktion ..	95
3.6.4	Zündmechanismus	96
3.6.5	Berechnung des Durchschlags im homogenen Feld	99

3.6.6	Berechnung der Zündung im inhomogenen Feld	103
3.6.7	Verhalten nach der Zündung	107
3.7	Gasdurchschlag im stark inhomogenen Feld	109
3.7.1	Teilentladungen	109
3.7.2	Durchschlagmechanismus	110
3.7.3	Einfluss der Schlagweite auf die Durchschlagsspannung ..	114
3.7.4	Einfluss des Druckes	115
3.7.5	Einfluss der Entladezeit	117
3.8	Flüssige und feste Isolierstoffe	118
3.8.1	Flüssige Isolierstoffe	118
3.8.2	Feste Isolierstoffe	119
3.9	Überschlag und Gleitentladungen	124
	Literatur	128

Teil II Elemente des Drehstromnetzes und ihre Modellierung

4	Transformatoren	131
4.1	Bauarten	131
4.2	Schaltungsarten von Drehstromtransformatoren	133
4.3	Transformatormodelle	135
4.3.1	Transformatorphysik	135
4.3.2	Ersatzschaltbilder	136
4.4	Bestimmung der Transformatorparameter	139
4.4.1	Leerlaufversuch	140
4.4.2	Kurzschlussversuch	140
4.4.3	Kennwerte des Transformators	141
4.5	Stationäre Matrizen und Dynamikmodelle	143
4.5.1	Stationäre Matrizen	143
4.5.2	Dynamikmodelle	144
4.6	Betriebsverhalten	146
4.6.1	Einschaltverhalten	146
4.6.2	Spannungsabfall	148
4.6.3	Wirkungsgrad	150
4.6.4	Parallelbetrieb	152
4.7	Spartransformator	152
4.7.1	Prinzip	152
4.7.2	Ersatzschaltbild	154
4.8	Einstellbare Transformatoren	155
4.8.1	Umsteller	155
4.8.2	Regeltransformatoren	155
4.9	Transformatoren in der Energieversorgung	157
4.9.1	Kraftwerks- und Unterwerks (Netz)-Transformatoren ...	157
4.9.2	Netzkupplungstransformatoren	157
4.9.3	Verteilungstransformatoren	158
4.9.4	Spezialtransformatoren	158
	Literatur	163

5	Elektrische Leitungen	165
5.1	Leitungsarten und -aufbau	165
5.1.1	Freileitungen	166
5.1.2	Kabelleitungen	167
5.2	Leitungstheorie	171
5.2.1	Physikalische Grundlagen	171
5.2.2	Leitungsgleichungen	172
5.2.3	Interpretation der Lösung, Wanderwellen	175
5.3	Ersatzschaltbilder	178
5.3.1	Elektrisch lange Leitung	178
5.3.2	Elektrisch kurze Leitung	179
5.4	Bestimmung der Leitungsparameter	181
5.4.1	Widerstandsbelag	181
5.4.2	Induktivität von Mehrleitersystemen	182
5.4.3	Induktivitätsbelag der Drehstrom-Einfachfreileitung	186
5.4.4	Induktivitätsbelag der Drehstrom-Doppelfreileitung	186
5.4.5	Induktivitätsbelag der Drehstromkabelleitung	188
5.4.6	Kapazitäten von Mehrleitersystemen	188
5.4.7	Potentialkoeffizienten von Freileitungen	191
5.4.8	Kapazitätsbelag von Einfachfreileitungen	192
5.4.9	Kapazitätsbelag von Drehstrom-Doppelfreileitungen	194
5.4.10	Einfluss der Erdseile	196
5.4.11	Kapazitätsbelag von Kabelleitungen	197
5.4.12	Ableitungsbelag	197
5.4.13	Übertragungsmass und Wellenimpedanz	197
5.5	p.u. Zweitormatrizen	206
5.6	Dynamikmodelle	207
5.6.1	Momentanwertmodell mit konstanten Parametern	207
5.6.2	Übertragungsfunktion und Eigenfrequenzen der Leitung	211
5.6.3	Rationale Approximation der verzerrungsfreien Leitung	213
5.6.4	Dynamikmodelle der elektrisch kurzen Leitung	213
5.6.5	Zeigermodelle der verzerrungsfreien Leitung	215
	Literatur	217
6	Synchrongeneratoren	219
6.1	Aufbau und Prinzip der SM	219
6.2	Leerlaufbetrieb	222
6.2.1	Erregerwicklung und magnetischer Kreis	222
6.2.2	Luftpaltfeld	223
6.2.3	Polfluss und magnetischer Hauptwiderstand	225
6.2.4	Induzierte Leerlaufspannung (Polradspannung)	225
6.2.5	Kennlinien und stationäres Leerlaufersatzschaltbild	226
6.2.6	Dynamik der Erregerwicklung	227
6.3	Stationärer Lastbetrieb	228
6.3.1	Statorfeld	228

6.3.2	Resultierendes Drehfeld	229
6.3.3	Hauptfluss der idealen Vollpolmaschine	230
6.3.4	Induzierte Hauptspannung der idealen Vollpolmaschine ..	231
6.3.5	Stationäres Zeigerdiagramm der idealen Vollpolmaschine	232
6.3.6	Zweiachsentheorie der realen SM	233
6.3.7	Zeigerdiagramm der realen SM	235
6.3.8	Drehmoment und Wirkleistung	237
6.3.9	Kennlinie bei Belastung, $\cos \varphi = 0$	238
6.4	Dynamik der SM	239
6.4.1	Theoretische Maschine ohne Dämpferwirkungen	240
6.4.2	SM mit lamelliertem Rotor und Dämpferwicklung	247
6.4.3	SM mit massiven Polen	253
6.4.4	Kurzschlussverhalten	254
6.5	Inselbetrieb und Kraftwerksregelung	258
6.5.1	Inselbetrieb der SM	259
6.5.2	Parallellauf von Kraftwerken und Gruppen	268
6.6	Parallellauf mit dem Netz	271
6.6.1	Synchronisierung	271
6.6.2	Leistungsabgabe der idealen Vollpolmaschine	272
6.6.3	Leistungsdiagramm der idealen Vollpol-SM	277
6.6.4	Wirk- und Blindleistungsabgabe der realen SM	278
6.6.5	Leistungsdiagramm der realen SM	279
6.6.6	Einfluss der nichtstarrten Spannung	281
6.6.7	Dynamik der SM am starren Netz	283
6.7	p.u. Modelle im Zustandsraum	289
6.7.1	Gleichungssysteme	290
6.7.2	Vollständiges lineares Zustandsraummodell	296
6.7.3	Bestimmung der Parameter	299
6.7.4	Lineare Zustandsraummodelle mit externen t. S	301
6.8	Kurzschlussverhalten mit t. S.	305
6.9	Modell der Netzkopplung der SM	309
	Literatur	311
7	Verbraucher, Leistungselektronik	313
7.1	Die Asynchronmaschine	313
7.1.1	Stationäres Verhalten	314
7.1.2	Kurzschluss- und Anlaufstrom	316
7.1.3	Dynamik der AM	318
7.1.4	Leistungen und Drehmoment	321
7.1.5	Vollständiges Modell der AM	323
7.1.6	Modelle ohne t.S. des Stators	326
7.2	Summarische Darstellung der Last	329
7.3	Leistungselektronik	332
7.3.1	Netzgeführte Dreiphasenbrücke	333
7.3.2	Selbstgeführte Dreiphasenbrücke	335

7.4	Netzqualität	337
	Literatur	341
8	Schaltanlagen	343
8.1	Geräte	343
8.1.1	Schaltgeräte	343
8.1.2	Wandler	346
8.1.3	Strombegrenzer	348
8.1.4	Weitere Geräte und Anlagen	351
8.2	Schaltungen und Bauformen	351
8.2.1	Niederspannungsverteilanlagen	351
8.2.2	Netzstationen	351
8.2.3	Sammelschienenschaltungen in MS- und HS-Anlagen ...	352
8.2.4	Mittelspannungsschaltanlagen	355
8.2.5	Hochspannungsschaltanlagen	358
8.3	Leit- und Schutztechnik	364
	Literatur	366
 Teil III Stationäres Verhalten symmetrischer Netze sowie von Netzen mit Unsymmetrien und deren Berechnung		
9	Symmetrische Netze	369
9.1	Netzformen	369
9.1.1	Radial- oder Strahlennetz	370
9.1.2	Ringnetz, Strangnetz	370
9.1.3	Maschennetz	371
9.1.4	Kriterien für die Wahl der Netzform	372
9.2	Dreipoliger Kurzschluss	372
9.2.1	Effektivwert des Kurzschlussstromes	373
9.2.2	Die Kurzschlussleistung	375
9.2.3	Berechnung des subtransienten Anfangskurzschlussstromes	377
9.2.4	Begrenzung der Kurzschlussleistung	385
9.3	Allgemeines Netzberechnungsverfahren	386
9.3.1	Theoretische Grundlagen	386
9.3.2	Anwendung auf das Kurzschlussproblem	389
9.3.3	Reduktion der Knotenpunktadmittanzmatrix	394
9.4	Berechnung nichtvermaschter Netze	395
9.4.1	Einseitig gespeiste unverzweigte Leitung	395
9.4.2	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen	397
9.4.3	Zweiseitig gespeiste Leitung	398
9.5	Betriebsverhalten der elektrischen Leitung	399
9.5.1	Spannungsverhalten	399
9.5.2	Leistungsverhalten	406
9.5.3	Kompensation	409

9.5.4	Übertragungsfähigkeit von Leitungen	416
9.6	Der Lastfluss vermaschter Netze	422
9.6.1	Die Netzgleichungen	422
9.6.2	Lösung des Lastflussproblems	425
9.6.3	Begrenzungen der Lastflussvariablen	429
9.6.4	Entkoppelte Lastflussberechnung	430
9.6.5	Lastflusssteuerung und -optimierung	431
Literatur	433
10	Netze mit Unsymmetrien	435
10.1	Methode der symmetrischen Komponenten	435
10.1.1	Symmetrie	435
10.1.2	Bisymmetrie	436
10.1.3	Nullspannung und Nullstrom	436
10.1.4	Symmetrische Komponenten	438
10.2	Ersatzschaltbild eines symmetrischen Netzelements	442
10.2.1	Längsimpedanz	442
10.2.2	Queradmittanz	445
10.2.3	Resultierendes Komponenten-Ersatzschema	446
10.3	Messung der Längs- und Querimpedanzen	447
10.4	Leitungsmodelle	448
10.4.1	Symmetrische Leitung	448
10.4.2	Neutralleiterwiderstand, Erdungswiderstand	449
10.4.3	Unsymmetrische Leitung	452
10.4.4	Nullinduktivität	454
10.4.5	Ersatzschaltbild im Originalbereich	454
10.4.6	Einfluss der Erdseile	455
10.4.7	Modelle mit frequenzabhängigen Parametern	457
10.5	Transformatormodelle	459
10.5.1	Hauptinduktivität L_{h0}	459
10.5.2	Streuinduktivität $L_{\sigma 0}$	460
10.5.3	Nullersatzschaltbilder der wichtigsten Schaltgruppen ...	460
10.5.4	Phasenverschiebung im Gegen- und Nullsystem	461
10.6	Modell der Synchronmaschine	462
10.7	Berechnung von Netzen mit Unsymmetrien	464
10.7.1	Unsymmetrische Belastung	464
10.7.2	Unsymmetrische Kurzschlüsse	470
10.7.3	Allgemeine Querunsymmetrie	473
10.7.4	Mehrfachunsymmetrien	474
10.7.5	Längsunsymmetrie	476
10.8	Symmetrische Komponenten und Oberwellen	482
Literatur	483

Teil IV Bemessungsfragen Kurzschlussbeanspruchungen Schalt- und Schutzprobleme

11 Bemessung von Netzelementen	487
11.1 Transformatoren und Drosselpulen	487
11.2 Synchronmaschinen	491
11.3 Leitungen	493
11.3.1 Das wirtschaftliche Optimum	494
11.3.2 Erwärmung	498
11.3.3 Mechanische Bemessung von Freileitungen	505
11.4 Kondensatoren	509
11.4.1 Dimensionierungsgrundlagen	509
11.4.2 Kennwerte und Aufbau	511
11.4.3 Anwendungen	512
Literatur	512
12 Kurzschlussbeanspruchungen	515
12.1 Kenngrößen des momentanen Kurzschlussstromes	515
12.1.1 Momentaner Kurzschlussstromverlauf	515
12.1.2 Berechnung des Stosskurzschlussstromes	518
12.1.3 Berechnung des Ausschaltwechselstromes	520
12.1.4 Berechnung des thermisch wirksamen Kurzzeitstromes	521
12.2 Thermische Kurzschlussfestigkeit	525
12.3 Mechanische Kurzschlussfestigkeit	528
12.3.1 Berechnung elektromagnetischer Kräfte	528
12.3.2 Kurzschlusskräfte	534
12.3.3 Mechanische Überprüfung	537
Literatur	540
13 Schalter und Schaltvorgänge	541
13.1 Lichtbogentheorie	541
13.1.1 Lichtbogenentstehung	541
13.1.2 Eigenschaften des Lichtbogens	542
13.1.3 Stationäre Lichtbogenkennlinie	544
13.1.4 Dynamik des Lichtbogens	545
13.2 Ausschalten von Gleichstrom	548
13.3 Ausschalten von Wechselstrom	551
13.3.1 Dynamische Lichtbogenkennlinie	551
13.3.2 Löschvorgang und Löschbedingungen	554
13.4 Schaltgeräte	556
13.4.1 Gasströmungsschalter	558
13.4.2 Vakuumschalter	559
13.5 Schaltüberspannungen	564
13.5.1 Wiederkehrende Spannung im Einphasenkreis	564
13.5.2 Wiederkehrende Spannung im Drehstromkreis	564

13.5.3	Abstandskurzschluss	567
13.5.4	Einschalten kapazitiver Ströme	568
13.5.5	Ausschalten kleiner Blindströme	570
Literatur		573
14	Schutztechnik	575
14.1	Sternpunktbehandlung	577
14.1.1	Netze mit isoliertem Sternpunkt	578
14.1.2	Netze mit Erdschlusskompensation	580
14.1.3	Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung	581
14.1.4	Netze mit strombegrenzender Sternpunkterdung	582
14.1.5	Erdfehlerfaktor	582
14.2	Leitungsschutz	583
14.2.1	Sicherungen	584
14.2.2	Schutzschalter	586
14.2.3	Zeitstaffelschutz	586
14.2.4	Vergleichsschutz	589
14.2.5	Kurzunterbrechung	590
14.3	Generatorschutz	591
14.3.1	Stator- und Blockschutz	591
14.3.2	Rotorschutz Erdschlussschutz	593
14.3.3	Weitere Schutzeinrichtungen	593
14.4	Transformatorschutz	594
14.4.1	Klassische Schutzeinrichtungen	594
14.4.2	Differentialschutz	595
14.4.3	Folgen der Liberalisierung des Strommarktes	595
14.4.4	Umweltschutz	596
14.5	Sammelschienenenschutz	596
14.6	Überspannungsschutz	598
14.6.1	Überspannungen im Netz	598
14.6.2	Isulationskoordination	600
14.6.3	Überspannungsableiter	601
14.6.4	Schutzbereich	606
14.6.5	Fern- und Naheinschläge	607
14.7	Schutzmassnahmen für Lebewesen (Rudolf Haldi)	609
14.7.1	Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen	609
14.7.2	Wirkungen des elektrischen Stromes auf Nutztiere	612
14.7.3	Die Normen	613
14.7.4	Schutzmassnahmen	614
Literatur		623

Anhang A Technische Werte für Leitungsseile 625

Anhang B Lösungen der Aufgaben 633

Anhang C Elektrizitätsversorgung in der Schweiz 657

Sachverzeichnis 661