

# Inhalt

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

<b>1 Einführung, UCTE, ENTSO-E .....</b>	<b>3</b>
1.1 Grundaufbau der elektrischen Energieversorgung .....	4
1.2 Organisation der Elektrizitätswirtschaft in einigen Ländern Europas (Rückblick) .....	5
1.3 Elektrizitätsproduktion und -austausch in Europa .....	7
1.3.1 UCPTE (1951–1999) .....	8
1.3.2 UCTE (ab 1999) .....	9
1.3.3 Energieproduktion und Energieaustausch .....	10
1.4 Verband europäischer Übertragungsnetzbetreiber ENTSO-E .....	11
<b>2 Elektrotechnische Grundlagen .....</b>	<b>17</b>
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
2.4.4 Raumzeiger versus symmetrische Komponenten .....	35

2.4.5 Raumzeiger und $\alpha\beta\theta$ -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 . . . . .	46
2.5.8 Technischer elektromagnetischer Kreis . . . . .	50
2.5.9 Elektromagnetische Kräfte . . . . .	52
Literatur . . . . .	54
<b>3 Grundlagen der Hochspannungstechnik . . . . .</b>	<b>55</b>
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 Isolermittel . . . . .	63
3.2.1 Durchschlag, Teildurchschlag . . . . .	63
3.2.2 Verhalten im homogenen Feld . . . . .	64
3.2.3 Verhalten im inhomogenen Feld . . . . .	64
3.3 Feldberechnung . . . . .	66
3.3.1 Grundlagen . . . . .	66
3.3.2 Verfahren mit Finiten Elementen . . . . .	68
3.3.3 Superpositionsverfahren . . . . .	71
3.3.4 Einfache Anordnungen mit 2 Elektroden . . . . .	74
3.3.5 Wirkung der Raumladung . . . . .	80
3.4 Ersatzschaltbild des Dielektrikums . . . . .	82
3.4.1 Elementares Modell . . . . .	82
3.4.2 Polarisationserscheinungen und exaktere Modelle . . . . .	84
3.5 Heterogene Isolierungen . . . . .	86
3.5.1 Querschichtung von Isolierstoffen . . . . .	86
3.5.2 Längs- und Schrägschichtung . . . . .	88
3.5.3 Zylinder- und Kugelschichtungen . . . . .	89
3.5.4 Poröse imprägnierte Stoffe . . . . .	89
3.6 Gasentladung und Gaszündung . . . . .	90
3.6.1 Verhalten der Gase bei kleinen Feldstärken (V/cm) . . . . .	91
3.6.2 Verhalten bei grossen elektrischen Feldstärken (kV/cm) . . . . .	92
3.6.3 Physikalische Erklärung der Stoßionisierungsfunktion . . . . .	94
3.6.4 Zündmechanismus . . . . .	95
3.6.5 Berechnung des Durchschlags im homogenen Feld . . . . .	98
3.6.6 Berechnung der Zündung im inhomogenen Feld . . . . .	101
3.6.7 Verhalten nach der Zündung . . . . .	106

3.7	Gasdurchschlag im stark inhomogenen Feld .....	107
3.7.1	Teilentladungen .....	107
3.7.2	Durchschlagmechanismus .....	108
3.7.3	Einfluss der Schlagweite auf die Durchschlagsspannung .....	112
3.7.4	Einfluss des Druckes .....	114
3.7.5	Einfluss der Entladezeit .....	115
3.8	Flüssige und feste Isolierstoffe .....	116
3.8.1	Flüssige Isolierstoffe .....	116
3.8.2	Feste Isolierstoffe .....	117
3.9	Überschlag und Gleitentladungen .....	122
	Literatur .....	126

## Teil II Elemente des Drehstromnetzes und ihre Modellierung

4	Transformatoren .....	129
4.1	Bauarten .....	129
4.2	Schaltungsarten von Drehstromtransformatoren .....	131
4.3	Transformatormodelle .....	133
4.3.1	Transformatorphysik .....	133
4.3.2	Ersatzschaltbilder .....	134
4.4	Bestimmung der Transformatormodelle .....	137
4.4.1	Leerlaufversuch .....	138
4.4.2	Kurzschlussversuch .....	138
4.4.3	Kennwerte des Transformators .....	139
4.5	Stationäre Matrizen und Dynamikmodelle .....	141
4.5.1	Stationäre Matrizen .....	141
4.5.2	Dynamikmodelle .....	142
4.6	Betriebsverhalten .....	144
4.6.1	Einschaltverhalten .....	144
4.6.2	Spannungsabfall .....	146
4.6.3	Wirkungsgrad .....	148
4.6.4	Parallelbetrieb .....	150
4.7	Spartransformator .....	150
4.7.1	Prinzip .....	150
4.7.2	Ersatzschaltbild .....	152
4.8	Einstellbare Transformatoren .....	153
4.8.1	Umsteller .....	153
4.8.2	Regeltransformatoren .....	153
4.9	Transformatoren in der Energieversorgung .....	155
4.9.1	Kraftwerks- und Unterwerks (Netz)-Transformatoren .....	155
4.9.2	Netzkupplungstransformatoren .....	155
4.9.3	Verteilungstransformatoren .....	156
4.9.4	Spezialtransformatoren .....	156
	Literatur .....	161

<b>5 Elektrische Leitungen</b>	163
5.1 Leitungsarten und -aufbau	163
5.1.1 Freileitungen	164
5.1.2 Kabelleitungen	166
5.2 Leistungstheorie	169
5.2.1 Physikalische Grundlagen	169
5.2.2 Leitungsgleichungen	170
5.2.3 Interpretation der Lösung, Wanderwellen	173
5.3 Ersatzschaltbilder	176
5.3.1 Elektrisch lange Leitung	176
5.3.2 Elektrisch kurze Leitung	177
5.4 Bestimmung der Leitungsparameter	179
5.4.1 Widerstandsbelag	179
5.4.2 Induktivität von Mehrleitersystemen	180
5.4.3 Induktivitätsbelag der Drehstrom-Einfachfreileitung	184
5.4.4 Induktivitätsbelag der Drehstrom-Doppelfreileitung	184
5.4.5 Induktivitätsbelag der Drehstromkabelleitung	186
5.4.6 Kapazitäten von Mehrleitersystemen	186
5.4.7 Potentialkoeffizienten von Freileitungen	188
5.4.8 Kapazitätsbelag von Einfachfreileitungen	190
5.4.9 Kapazitätsbelag von Drehstrom-Doppelfreileitungen	192
5.4.10 Einfluss der Erdseile	193
5.4.11 Kapazitätsbelag von Kabelleitungen	194
5.4.12 Ableitungsbelag	194
5.4.13 Übertragungsmass und Wellenimpedanz	195
5.5 p.u. Zweitormatrizen	203
5.6 Dynamikmodelle	204
5.6.1 Momentanwertmodell mit konstanten Parametern	204
5.6.2 Übertragungsfunktion und Eigenfrequenzen der Leitung	208
5.6.3 Rationale Approximation der verzerrungsfreien Leitung	210
5.6.4 Dynamikmodelle der elektrisch kurzen Leitung	211
5.6.5 Zeigermodelle der verzerrungsfreien Leitung	212
Literatur	214
<b>6 Synchrongeneratoren</b>	217
6.1 Aufbau und Prinzip der SM	217
6.2 Leerlaufbetrieb	220
6.2.1 Erregerwicklung und magnetischer Kreis	220
6.2.2 Luftspaltfeld	221
6.2.3 Polfluss und magnetischer Hauptwiderstand	223
6.2.4 Induzierte Leerlaufspannung (Polradspannung)	223
6.2.5 Kennlinien und stationäres Leerlaufersatzschaltbild	224
6.2.6 Dynamik der Erregerwicklung	225

6.3	Stationärer Lastbetrieb .....	226
6.3.1	Statordrehfeld .....	226
6.3.2	Resultierendes Drehfeld .....	227
6.3.3	Hauptfluss der idealen Vollpolmaschine .....	228
6.3.4	Induzierte Hauptspannung der idealen Vollpolmaschine .....	229
6.3.5	Stationäres Zeigerdiagramm der idealen Vollpolmaschine .....	230
6.3.6	Zweiachsentheorie der realen SM .....	231
6.3.7	Zeigerdiagramm der realen SM .....	233
6.3.8	Drehmoment und Wirkleistung .....	235
6.3.9	Kennlinie bei Belastung, $\cos \varphi = 0$ .....	236
6.4	Dynamik der SM .....	237
6.4.1	Theoretische Maschine ohne Dämpferwirkungen .....	238
6.4.2	SM mit lamelliertem Rotor und Dämpferwicklung .....	245
6.4.3	SM mit massiven Polen .....	251
6.4.4	Kurzschlussverhalten .....	252
6.5	Inselbetrieb und Kraftwerksregelung .....	256
6.5.1	Inselbetrieb der SM .....	257
6.5.2	Parallelauf von Kraftwerken und Gruppen .....	266
6.6	Parallelauf mit dem Netz .....	269
6.6.1	Synchronisierung .....	269
6.6.2	Leistungsabgabe der idealen Vollpolmaschine .....	270
6.6.3	Leistungsdiagramm der idealen Vollpol-SM .....	275
6.6.4	Wirk- und Blindleistungsabgabe der realen SM .....	276
6.6.5	Leistungsdiagramm der realen SM .....	277
6.6.6	Einfluss der nichtstarren Spannung .....	279
6.6.7	Dynamik der SM am starren Netz .....	281
6.7	p.u. Modelle im Zustandsraum .....	287
6.7.1	Gleichungssysteme .....	287
6.7.2	Vollständiges lineares Zustandsraummodell .....	294
6.7.3	Bestimmung der Parameter .....	297
6.7.4	Lineare Zustandsraummodelle mit externen t. S .....	298
6.8	Kurzschlussverhalten mit t. S. ....	302
6.9	Modell der Netzkopplung der SM .....	306
	Literatur .....	308
7	<b>Verbraucher, Leistungselektronik .....</b>	309
7.1	Die Asynchronmaschine .....	309
7.1.1	Stationäres Verhalten .....	310
7.1.2	Kurzschluss- und Anlaufstrom .....	312
7.1.3	Dynamik der AM .....	314
7.1.4	Leistungen und Drehmoment .....	317
7.1.5	Vollständiges Modell der AM .....	319
7.1.6	Modelle ohne t.S. des Stators .....	322

7.2	Summarische Darstellung der Last . . . . .	325
7.3	Leistungselektronik . . . . .	328
7.3.1	Netzgeführte Dreiphasenbrücke . . . . .	329
7.3.2	Selbstgeführte Dreiphasenbrücke . . . . .	331
7.4	Netzqualität . . . . .	333
	Literatur . . . . .	337
<b>8</b>	<b>Schaltanlagen</b> . . . . .	<b>339</b>
8.1	Geräte . . . . .	339
8.1.1	Schaltgeräte . . . . .	339
8.1.2	Wandler . . . . .	342
8.1.3	Strombegrenzer . . . . .	344
8.1.4	Weitere Geräte und Anlagen . . . . .	347
8.2	Schaltungen und Bauformen . . . . .	347
8.2.1	Niederspannungsverteilanlagen . . . . .	347
8.2.2	Netzstationen . . . . .	347
8.2.3	Sammelschienschaltungen in MS- und HS-Anlagen . . . . .	348
8.2.4	Mittelspannungsschaltanlagen . . . . .	351
8.2.5	Hochspannungsschaltanlagen . . . . .	354
8.3	Leit- und Schutztechnik . . . . .	360
	Literatur . . . . .	362

### **Teil III Stationäres Verhalten symmetrischer Netze sowie von Netzen mit Unsymmetrien und deren Berechnung**

<b>9</b>	<b>Symmetrische Netze</b> . . . . .	<b>365</b>
9.1	Netzformen . . . . .	365
9.1.1	Radial- oder Strahlennetz . . . . .	366
9.1.2	Ringnetz, Strangnetz . . . . .	366
9.1.3	Maschennetz . . . . .	367
9.1.4	Kriterien für die Wahl der Netzform . . . . .	368
9.2	Dreipoliger Kurzschluss . . . . .	368
9.2.1	Effektivwert des Kurzschlussstromes . . . . .	369
9.2.2	Die Kurzschlussleistung . . . . .	371
9.2.3	Berechnung des subtransienten Anfangskurzschlussstromes . . . . .	373
9.2.4	Begrenzung der Kurzschlussleistung . . . . .	381
9.3	Allgemeines Netzberechnungsverfahren . . . . .	382
9.3.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	382
9.3.2	Anwendung auf das Kurzschlussproblem . . . . .	385
9.3.3	Reduktion der Knotenpunktadmittanzmatrix . . . . .	389
9.4	Berechnung nichtvermaschter Netze . . . . .	390
9.4.1	Einseitig gespeiste unverzweigte Leitung . . . . .	390
9.4.2	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen . . . . .	392
9.4.3	Zweiseitig gespeiste Leitung . . . . .	393

9.5	Betriebsverhalten der elektrischen Leitung . . . . .	394
9.5.1	Spannungsverhalten . . . . .	394
9.5.2	Leistungsverhalten . . . . .	402
9.5.3	Kompensation . . . . .	404
9.5.4	Übertragungsfähigkeit von Leitungen . . . . .	411
9.6	Der Lastfluss vermaschter Netze . . . . .	417
9.6.1	Die Netzgleichungen . . . . .	417
9.6.2	Lösung des Lastflussproblems . . . . .	419
9.6.3	Begrenzungen der Lastflussvariablen . . . . .	423
9.6.4	Entkoppelte Lastflussberechnung . . . . .	424
9.6.5	Lastflusssteuerung und -optimierung . . . . .	425
Literatur . . . . .		427
<b>10</b>	<b>Netze mit Unsymmetrien . . . . .</b>	<b>429</b>
10.1	Methode der symmetrischen Komponenten . . . . .	429
10.1.1	Symmetrie . . . . .	429
10.1.2	Bisymmetrie . . . . .	430
10.1.3	Nullspannung und Nullstrom . . . . .	430
10.1.4	Symmetrische Komponenten . . . . .	432
10.2	Ersatzschaltbild eines symmetrischen Netzelements . . . . .	436
10.2.1	Längsimpedanz . . . . .	436
10.2.2	Queradmittanz . . . . .	439
10.2.3	Resultierendes Komponenten-Ersatzschema . . . . .	440
10.3	Messung der Längs- und Querimpedanzen . . . . .	441
10.4	Leitungsmodelle . . . . .	443
10.4.1	Symmetrische Leitung . . . . .	443
10.4.2	Neutralleiterwiderstand, Erdungswiderstand . . . . .	444
10.4.3	Unsymmetrische Leitung . . . . .	446
10.4.4	Nullinduktivität . . . . .	448
10.4.5	Ersatzschaltbild im Originalbereich . . . . .	448
10.4.6	Einfluss der Erdseile . . . . .	449
10.4.7	Modelle mit frequenzabhängigen Parametern . . . . .	451
10.5	Transformatormodelle . . . . .	452
10.5.1	Hauptinduktivität $L_{h0}$ . . . . .	453
10.5.2	Streuinduktivität $L_{\phi 0}$ . . . . .	453
10.5.3	Nullersatzschaltbilder der wichtigsten ` Schaltgruppen . . . . .	454
10.5.4	Phasenverschiebung im Gegen- und Nullsystem . . . . .	455
10.6	Modell der Synchronmaschine . . . . .	455
10.7	Berechnung von Netzen mit Unsymmetrien . . . . .	457
10.7.1	Unsymmetrische Belastung . . . . .	457
10.7.2	Unsymmetrische Kurzschlüsse . . . . .	464
10.7.3	Allgemeine Querunsymmetrie . . . . .	466
10.7.4	Mehrfachunsymmetrien . . . . .	467
10.7.5	Längunsymmetrie . . . . .	469

10.8 Symmetrische Komponenten und Oberwellen .....	475
Literatur .....	477
<b>Teil IV Bemessungsfragen Kurzschlussbeanspruchungen Schalt- und Schutzprobleme</b>	
<b>11 Bemessung von Netzelementen .....</b>	<b>481</b>
11.1 Transformatoren und Drosselpulen .....	481
11.2 Synchronmaschinen .....	485
11.3 Leitungen .....	487
11.3.1 Das wirtschaftliche Optimum .....	488
11.3.2 Erwärmung .....	492
11.3.3 Mechanische Bemessung von Freileitungen .....	499
11.4 Kondensatoren .....	503
11.4.1 Dimensionierungsgrundlagen .....	503
11.4.2 Kennwerte und Aufbau .....	504
11.4.3 Anwendungen .....	505
Literatur .....	506
<b>12 Kurzschlussbeanspruchungen .....</b>	<b>507</b>
12.1 Kenngrößen des momentanen Kurzschlussstromes .....	507
12.1.1 Momentaner Kurzschlussstromverlauf .....	507
12.1.2 Berechnung des Stosskurzschlussstromes .....	510
12.1.3 Berechnung des Ausschaltwechselstromes .....	512
12.1.4 Berechnung des thermisch wirksamen Kurzzeitstromes .....	513
12.2 Thermische Kurzschlussfestigkeit .....	517
12.3 Mechanische Kurzschlussfestigkeit .....	520
12.3.1 Berechnung elektromagnetischer Kräfte .....	520
12.3.2 Kurzschlusskräfte .....	526
12.3.3 Mechanische Überprüfung .....	529
Literatur .....	532
<b>13 Schalter und Schaltvorgänge .....</b>	<b>533</b>
13.1 Lichtbogentheorie .....	533
13.1.1 Lichtbogenentstehung .....	533
13.1.2 Eigenschaften des Lichtbogens .....	534
13.1.3 Stationäre Lichtbogenkennlinie .....	536
13.1.4 Dynamik des Lichtbogens .....	537
13.2 Ausschalten von Gleichstrom .....	540
13.3 Ausschalten von Wechselstrom .....	543
13.3.1 Dynamische Lichtbogenkennlinie .....	543
13.3.2 Löschvorgang und Löschbedingungen .....	546
13.4 Schaltgeräte .....	548
13.4.1 Gasströmungsschalter .....	550
13.4.2 Vakuumsschalter .....	551

13.5 Schaltüberspannungen .....	556
13.5.1 Wiederkehrende Spannung im Einphasenkreis .....	556
13.5.2 Wiederkehrende Spannung im Drehstromkreis .....	556
13.5.3 Abstandskurzschluss .....	559
13.5.4 Einschalten kapazitiver Ströme .....	560
13.5.5 Ausschalten kleiner Blindströme .....	562
Literatur .....	565
<b>14 Schutztechnik .....</b>	<b>567</b>
14.1 Sternpunktbehandlung .....	569
14.1.1 Netze mit isoliertem Sternpunkt .....	570
14.1.2 Netze mit Erdschlusskompensation .....	571
14.1.3 Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung .....	573
14.1.4 Netze mit strombegrenzender Sternpunktterdung .....	573
14.1.5 Erdfehlerfaktor .....	574
14.2 Leitungsschutz .....	575
14.2.1 Sicherungen .....	575
14.2.2 Schutzschalter .....	577
14.2.3 Zeitstaffelschutz .....	578
14.2.4 Vergleichsschutz .....	581
14.2.5 Kurzunterbrechung .....	582
14.3 Generatorschutz .....	583
14.3.1 Stator- und Blockschutz .....	583
14.3.2 Rotorschutz Erdschlussschutz .....	584
14.3.3 Weitere Schutzeinrichtungen .....	585
14.4 Transformatorsschutz .....	586
14.4.1 Klassische Schutzeinrichtungen .....	586
14.4.2不同步保护 .....	586
14.4.3 Folgen der Liberalisierung des Strommarktes .....	587
14.4.4 Umweltschutz .....	587
14.5 Sammelschienschutz .....	588
14.6 Überspannungsschutz .....	589
14.6.1 Überspannungen im Netz .....	590
14.6.2 Isolationskoordination .....	592
14.6.3 Überspannungsableiter .....	593
14.6.4 Schutzbereich .....	597
14.6.5 Fern- und Naheinschläge .....	599
14.7 Schutzmassnahmen für Lebewesen (Rudolf Haldi) .....	601
14.7.1 Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen .....	601
14.7.2 Wirkungen des elektrischen Stromes auf Nutztiere .....	604
14.7.3 Die Normen .....	604
14.7.4 Schutzmassnahmen .....	605
Literatur .....	615

<b>Anhang A</b> .....	617
<b>Anhang B</b> .....	623
<b>Anhang C</b> .....	647
<b>Sachverzeichnis</b> .....	651