

# 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 $\alpha\beta 0$ -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	46
2.5.8	Technischer elektromagnetischer Kreis	50
2.5.9	Elektromagnetische Kräfte	52
	Literatur	54
3	<b>Grundlagen der Hochspannungstechnik</b>	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	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

<b>4</b>	<b>Transformatoren</b>	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 Transformatorparameter	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 Leitungstheorie	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	Parallellauf von Kraftwerken und Gruppen	266
6.6	Parallellauf 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 nichtstarken 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
<b>7</b>	<b>Verbraucher, Leistungselektronik</b>	<b>309</b>
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	Sammelschienenschaltungen in MS- und HS-Anlagen .....	348
8.2.4	Mittelspannungsschaltanlagen .....	351
8.2.5	Hochspannungsschaltanlagen .....	354
8.3	Leit- und Schutztechnik .....	360
	Literatur .....	362
 <b>Teil III Stationäres Verhalten symmetrischer Netze sowie von Netzen mit Unsymmetrien und deren Berechnung</b>		
<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 $L_{\sigma 0}$ .....	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	Längsunsymmetrie .....	469

10.8 Symmetrische Komponenten und Oberwellen .....	475
Literatur .....	477

## **Teil IV Bemessungsfragen Kurzschlussbeanspruchungen Schalt- und Schutzprobleme**

<b>11 Bemessung von Netzelementen .....</b>	<b>481</b>
11.1 Transformatoren und Drosselspulen .....	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 Lichtbogen Theorie .....	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 Vakuumschalter .....	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 Sternpunkterdung .....	573
14.1.4 Netze mit strombegrenzender Sternpunkterdung .....	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 Transformatorschutz .....	586
14.4.1 Klassische Schutzeinrichtungen .....	586
14.4.2 Differentialschutz .....	586
14.4.3 Folgen der Liberalisierung des Strommarktes .....	587
14.4.4 Umweltschutz .....	587
14.5 Sammelschienenschutz .....	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

**Anhang A** ..... 617

**Anhang B** ..... 623

**Anhang C** ..... 647

**Sachverzeichnis** ..... 651