

# Elektrische Energieversorgung 1

Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik

Bearbeitet von  
Valentin Crastan

4. Auflage 2015. Buch. XXXVI, 668 S. Gebunden

ISBN 978 3 662 45984 3

Format (B x L): 16,8 x 24,6 cm

Gewicht: 1338 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Energietechnik, Elektrotechnik > Elektrotechnik](#)

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# Inhalt

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

<b>1</b>	<b>Einführung, UCTE, ENTSO-E</b>	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	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	10
<b>2</b>	<b>Elektrotechnische Grundlagen</b>	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

2.4.4	Raumzeiger versus symmetrische Komponenten .....	35
2.4.5	Raumzeiger und $\alpha\beta0$ -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	<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 .....	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 Entladezzeit .....	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 Transformatormodelle .....	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

<b>5</b>	<b>Elektrische Leitungen</b>	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
<b>6</b>	<b>Synchrongeneratoren</b>	219
6.1	Aufbau und Prinzip der SM	219
6.2	Leerlaufbetrieb	222
6.2.1	Erregerwicklung und magnetischer Kreis	222
6.2.2	Luftspaltfeld	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	Statordrehfeld	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 nichtstarren 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	<b>Verbraucher, Leistungselektronik</b> . . . . .	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
<b>8</b>	<b>Schaltanlagen .....</b>	<b>343</b>
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	Sammelschienschaltungen 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**

<b>9</b>	<b>Symmetrische Netze .....</b>	<b>369</b>
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	Lastflussteuerung und -optimierung . . . . .	431
	Literatur . . . . .	433
<b>10</b>	<b>Netze mit Unsymmetrien . . . . .</b>	<b>435</b>
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 $L_{o0}$ . . . . .	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	Längunsymmetrie . . . . .	476
10.8	Symmetrische Komponenten und Oberwellen . . . . .	482
	Literatur . . . . .	483

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

<b>11 Bemessung von Netzelementen</b> . . . . .	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
<b>12 Kurzschlussbeanspruchungen</b> . . . . .	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
<b>13 Schalter und Schaltvorgänge</b> . . . . .	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
<b>14 Schutztechnik . . . . .</b>	<b>575</b>
14.1 Sternpunktbehandlung . . . . .	577
14.1.1 Netze mit isoliertem Sternpunkt . . . . .	578
14.1.2 Netze mit Erdschlusskompenstation . . . . .	580
14.1.3 Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung . . . . .	581
14.1.4 Netze mit strombegrenzender Sternpunktterdung . . . . .	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 Erdschlussenschutz . . . . .	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 Sammelschienenschutz . . . . .	596
14.6 Überspannungsschutz . . . . .	598
14.6.1 Überspannungen im Netz . . . . .	598
14.6.2 Isolationskoordination . . . . .	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

<b>Anhang A Technische Werte für Leitungsseile</b> .....	625
<b>Anhang B Lösungen der Aufgaben</b> .....	633
<b>Anhang C Elektrizitätsversorgung in der Schweiz</b> .....	657
<b>Sachverzeichnis</b> .....	661

Elektrische Energieversorgung 1  
Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten,  
Bemessung, Schalt- und Schutztechnik  
Crastan, V.  
2015, XXXVI, 668 S. 579 Abb., Hardcover  
ISBN: 978-3-662-45984-3