

Einführung in die Theorie der Stromrichter

Von

A. Glaser und K. Müller-Lübeck

Erster Band
Elektrotechnische Grundlagen

Von

K. Müller-Lübeck

Mit Beiträgen von

W. Dällenbach, E. Gerecke, K. Kettner
und G. Reinhardt

Mit 313 Textabbildungen



Berlin

Verlag von Julius Springer

1935

ISBN-13: 978-3-642-47175-9

e-ISBN-13: 978-3-642-47492-7

DOI: 10.1007/978-3-642-47492-7

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1935 by Julius Springer in Berlin.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1935

Vorwort.

Dieses Buch soll ein einführendes Lehrbuch in das Gesamtgebiet der elektrischen Stromrichter sein. Der vorliegende, von mir verfaßte erste Band soll nach einer orientierenden Einleitung über den Zweck und die Anwendungsgebiete der Stromrichter sowie über die Ausführung der Entladungsgefäße die elektrotechnischen Grundlagen der Stromrichterschaltungen entwickeln, während ein zweiter, von Herrn Dr. A. Glaser verfaßter und später erscheinender Band eine eingehende Darstellung der physikalischen Grundlagen der Entladungsgefäße zur Aufgabe hat.

Den Plan zu diesem Buch faßte ich im Januar 1931, zu einer Zeit, in der die Entwicklung der gesteuerten Gleichrichter, Wechselrichter und Umrichter mit größter Lebhaftigkeit einsetzte, und ein allgemeines Bedürfnis nach einer einführenden und zugleich wegweisenden Darstellung des neuen Gebietes sich geltend machte. Die Stromrichter sind ja, das erkannte man damals allgemein, ein ganz großes Beispiel für die seit Jahren wachsende gegenseitige Durchdringung von moderner Physik und klassischer Elektrotechnik oder, wie wir sagen, ein Beispiel für die langsame Entstehung einer neuen, breiter gegründeten Elektrotechnik. Damals mit dem Entwurf eines geschlossenen Bildes der Stromrichter herauszutreten, wäre indessen bei dem noch bestehenden Widerstreit der Meinungen noch verfrüht gewesen. Es war deshalb gut, daß ich vier Jahre daran setzte, die noch ungeklärten Fragen der Gleichrichter und Wechselrichter zu studieren und die gewonnenen Ergebnisse zusammen mit den inzwischen in der Literatur erschienenen Untersuchungen anderer Autoren so weit ausreifen zu lassen, daß man es wagen konnte, an eine systematische und weitgehend anschauliche Darstellung des ganzen Stoffes heranzugehen.

Wenn ich diesem Ziel nahe gekommen bin, so verdanke ich dies nicht zuletzt der Möglichkeit eines ständigen Gedankenaustausches mit Herrn Dr. W. Dällenbach, der sich überdies der großen Mühe unterzogen hat, die ganze Korrektur mit zu lesen. Ferner lieferten Herr Dr. Dällenbach und Herr E. Gerecke wertvolle Beiträge zur Kenntnis der Spannungscharakteristik der gesteuerten Gleichrichter und Wechselrichter. Die Darstellung der Umrichter, ein Gebiet, auf dem ich selbst nicht tätig gewesen bin, wurde mir ermöglicht durch einen wertvollen,

bisher unveröffentlichten Beitrag von Herrn Dr. K. Kettner über die Systematik der Umrichterschaltungen und ferner durch einen ausgiebigen Gedankenaustausch mit Herrn Dr. G. Reinhardt, der mir außerdem noch einiges Versuchsmaterial zugänglich machte und mir bei der Korrektur behilflich war.

Wenn von einer elektrotechnischen Theorie der Stromrichter die Rede ist, so verstehen wir darunter weniger eine bloße mathematische Beschreibung der Strom- und Spannungsverläufe, als vielmehr eine Untersuchung der charakteristischen Zusammenhänge der Betriebseigenschaften mit den Elementen der Schaltungen. Sie soll zu einer vergleichenden Übersicht führen und es ermöglichen, die Elemente der Schaltungen für bestimmte gewünschte Betriebseigenschaften vorauszuberechnen; ferner soll sie es ermöglichen, experimentelle Untersuchungen zur Prüfung der Richtigkeit der vermuteten Zusammenhänge auf wenige prinzipielle Untersuchungen zu beschränken. Eine solche Theorie hat somit zwar von der Klärung der Strom- und Spannungsverläufe auszugehen, jedoch aus ihnen erst gewisse Betriebskenngrößen abzuleiten und alsdann diese in Abhängigkeit von der Belastung zu diskutieren.

Dieses Vorhaben ist zum ersten Male in der berühmten Gleichrichterarbeit von Dällenbach und Gerecke im Jahre 1924 und in dem wertvollen Gleichrichterbuch von Prince und Vogdes aus dem Jahre 1927 durchgeführt worden, jedoch in beiden Fällen unter einer Reihe einschränkender Voraussetzungen, die die Beantwortung einer großen Zahl der in der heutigen Praxis gestellten Fragen noch ausschließen. Es war deshalb notwendig, die methodische Basis wesentlich zu verbreitern. Den Schlüssel dazu liefert allein das eingehende Studium der ungesteuerten Einphasen- und Zweiphasengleichrichter. Sie bilden daher auch den Untergrund für die Entwicklung des ganzen methodischen Rüstzeuges, weshalb es unumgänglich war, ihnen einen verhältnismäßig großen Raum in diesem Buch zu widmen. Von dieser Basis aus ist es nicht mehr schwer, die ungesteuerten Mehrphasengleichrichter und alsdann die gesteuerten Gleichrichter und Wechselrichter in Angriff zu nehmen. Bei den Umrichtern freilich mußte ich mich noch darauf beschränken, nur ihre grundsätzliche Wirkungsweise zu schildern, da für eine Untersuchung ihrer Betriebseigenschaften die Zeit noch nicht reif und außerdem der Umfang des Buches zu sehr begrenzt war.

Es wäre mir wohl unmöglich gewesen, eine Theorie zu entwerfen, die, wie ich hoffe, der Praxis auf den Leib gemessen ist, wenn ich nicht durch meine frühere Tätigkeit in der Glas- und Eisengleichrichterfabrik der AEG in ständiger Fühlung mit der Praxis gestanden hätte und wenn der Leiter des Forschungsinstitutes der AEG, Herr Professor Ramsauer, und mein unmittelbarer Vorgesetzter, Herr Dr. Glaser,

es mir nicht ermöglicht hätten, die gewonnenen praktischen Erfahrungen theoretisch zu verarbeiten. Ferner stellte sich Herr Dr. H. Scherp zur Beratung in einigen Transformatorfragen zur Verfügung, während mir Herr Dipl.-Ing. F. Barz in Fragen der Gittersteuerungsmethoden und der Umrichterschaltungen zur Seite stand. Herrn Dr. F. Hauffe und Herrn Dr. H. U. Neidhardt verdanke ich Anregungen auf dem Gebiet der Kondensatorwechselrichter und die Überlassung von demnächst erscheinenden Arbeiten darüber; auch Herr Dr. W. Schilling stellte mir zwei demnächst erscheinende Beiträge darüber zur Verfügung. Einen ausführlichen Nachweis für die unveröffentlichten Arbeiten findet man in dem Namenverzeichnis am Ende des Buches. Schließlich gilt mein Dank dem Verleger, der mich hinsichtlich des Umfanges des Buches zwar sehr im Zaume halten mußte, aber die Fertigstellung des Werkes mit erstaunlicher Geduld abwartete.

Berlin-Reinickendorf, im März 1935
AEG-Forschungsinstitut.

Kurt Müller-Lübeck.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
Einteilung und Anwendungsgebiete der Stromrichter	1
Ausbildung und Arbeitsweise der Entladungsgefäße der Stromrichter	7
Über die Messung des Lichtbogenabfalles	20
I. Der ungesteuerte Gleichrichter.	
1. Der Einphasengleichrichter mit Widerstandsbelastung	23
Mittelwerte von Gleichspannung und Gleichstrom	23
Sperrspannung und Scheitelstrom	24
Oberwellen und Welligkeit des Gleichstromes	24
Störspannung	26
Arbeitsweise des Transformators, Wechselstrombedingung, Leistungsverhältnisse	28
Oberwellen und Verzerrung des Wechselstromes	38
Definition von Wirkleistung, Blindleistung, Verzerrungsleistung und Scheinleistung	39
Definition des Leistungsfaktors	41
Berücksichtigung des Lichtbogenabfalles	44
Berücksichtigung von induktivem Gleichspannungsabfall, Gleichspannungscharakteristik, das Reduktionsproblem	47
Berücksichtigung der Zündspannung	55
Verbesserung der Kurvenform der Gleichspannung mittels Kondensator, Analogiesätze	56
2. Der Einphasengleichrichter mit Batteriebelastung	62
Strombegrenzung durch Ohmschen Widerstand	62
Strombegrenzung durch eine Induktivität	63
3. Der Zweiphasengleichrichter mit Widerstandsbelastung	64
Schaltung ohne und mit Nullpunktbildung	64
Oberwellen und Welligkeit des Gleichstromes	68
Störspannung	69
Strom- und Leistungsdaten eines Transformators in Sparschaltung	69
Leistungsfaktor	71
Berücksichtigung des Lichtbogenabfalles	71
Berücksichtigung von induktivem Gleichspannungsabfall, der Kommutierungsvorgang, Gleichspannungscharakteristik und Welligkeitscharakteristik	72
Berücksichtigung verteilter Reaktanzen, allgemeines Reduktionsproblem, das Theorienschema	83
Grenzfall eines Gleichrichters nur mit Primärdrossel	89
Grenzfall eines Gleichrichters nur mit Kathodendrossel, Oberwellengesetz	91
Zwischenfall eines Gleichrichters mit natürlichen Transformatorreaktanzen	97

Der extreme Fall eines Gleichrichters mit unendlich großer Kathodendrossel, Zusammensetzung von induktivem und Ohmschem Gleichspannungsabfall, die universellen Überlappungsfunktionen $\psi(u)$ und $\chi(u)$, der Leistungsfaktor	104
Der extreme Fall des gleichstromseitig kurzgeschlossenen Gleichrichters	113
4. Der Zweiphasengleichrichter mit Batteriebelastung	114
Strombegrenzung durch Ohmschen Widerstand	114
Strombegrenzung durch Reaktanzen	115
5. Einige allgemeine Sätze über Mehrphasengleichrichter	121
Mittlere Gleichspannung des p -phasigen Gleichrichters ohne wechselstromseitige Reaktanzen	121
Oberwellen der ideellen Gleichspannung	124
Allgemeines Oberwellengesetz der Gleichspannung und des primären Wechselstromes, Welligkeit und Verzerrung	125
Störspannung	129
Berücksichtigung von wechselstromseitigen Reaktanzen, Anfangsverlauf der Gleichspannungscharakteristik bei fehlender und bei unendlich großer Kathodendrossel	129
Anfangsverlauf der Gleichspannungscharakteristik bei endlicher Kathodendrossel	134
Geltungsbereich der einfachen Kommutierung	135
Induktiver Gleichspannungsabfall und Kurzschlußspannung.	136
Die Kommutierungsblindleistung	137
Allgemeine Definition der maßgebenden Blindleistung und des maßgebenden Leistungsfaktors $\cos \tilde{\alpha}$	138
Die Eigenleistungsfaktoren $\cos \alpha_0$ und $\cos \alpha_1$	141
Oberwellen der Gleichspannung und der primären Wechselströme	148
Oberwellen des Gleichstromes, Oberwellenverminderung durch Glättungseinrichtungen	151
Kompensation der Blindleistung	156
Berücksichtigung von Ohmschem Gleichspannungsabfall	157
Verlängerung der Anodenbrenndauer, treppenförmig aufsteigende, konstante und treppenförmig auf- und absteigende Anodenströme und ihre Kommutierung, allgemeiner Ansatz für den induktiven Gleichspannungsabfall	158
6. Eigenschaften einiger wichtiger Schaltungen von Mehrphasengleichrichtern	167
Allgemeine Gesichtspunkte für die Wahl der Schaltungen, Zweispannungs-gleichrichter	167
Einige Dreiphasenschaltungen	169
Sechspannige Grundschaltungen: Die Dreieck-Sechspannstern-, die Stern-Doppelzickzack- und die Dreiphasen-Graetzschaltung	174
Sechspannige Halbierungs- und Drittelungsschaltungen: Die Stern- 2×3 -phasen-Schaltung mit zweiphasigem Saugtransformator und die Dreieck- 3×2 -phasen-Schaltung mit dreiphasigem Saugtransformator	178
Sechspannige Halbierungsschaltungen mit Stromteilern oder mit Steuertransformator	183
Sechspannige Halbierungsschaltungen mit drei Einzeltransformatoren, Manteltransformator oder mit Fünfschenkeltransformator	184
Sechspannige Halbierungsschaltung mit primärer Zickzack- und sekundärer Sternschaltung	188

	Seite
Zwölfphasenschaltungen mit dreifacher und vierfacher Anodenbrenndauer mit Saugtransformatoren	188
Zwölfphasenschaltungen mit dreifacher und fünffacher Anodenbrenndauer mit primärseitiger Kaskadenschaltung	192
Zwölfphasenschaltungen mit fünffacher Anodenbrenndauer mit Steuertransformator	202
Abschließende Kritik der Zwölfphasenschaltungen, Anodenbrenndauer und wiederkehrende Sperrspannung, das Sprungspannungsgesetz . .	203
7. Weiterer Verlauf der Gleichspannungscharakteristik der Mehrphasengleichrichter bis zum Kurzschlußpunkt	208
Allgemeine Untersuchung der Gleichspannungscharakteristik bei beliebig verteilten Reaktanzen	208
Verlauf der Gleichspannungscharakteristik und der Anodenströme bei ungekoppelten Anodendrosseln	219
8. Die Stromverhältnisse bei einer Rückzündung	227
Verlauf der Anodenströme bei einer einanodigen Rückzündung	227
II. Der gesteuerte Gleichrichter und Wechselrichter.	
9. Das Problem der Spannungsregelung von Gleichrichtern	229
Die Regelung der Gleichspannung bei ungesteuerten Gleichrichtern . .	229
Das Prinzip der Gittersteuerung von Gleichrichtern	231
10. Methoden der Gittersteuerung	235
Die möglichen Arten der Gittersteuerung zur Spannungsregelung . . .	235
Methoden der Phasendrehung von Wechselspannungen	238
11. Der gesteuerte Mehrphasengleichrichter ohne wechselstromseitige Reaktanzen	240
Oberwellen und Welligkeit der Gleichspannung bei lückenlosem Gleichstrom	240
Störspannung	240
Verlauf, Oberwellen und Welligkeit des lückenlosen Gleichstromes . .	241
Verlauf und Brenndauer des lückenhaften Gleichstromes	243
Die Gleichspannungscharakteristik bei Belastung durch Gegenspannung allein	246
Anodendrosseln an Stelle der Kathodendrossel, Verlauf der ganzen Gleichspannungscharakteristik bis zum Kurzschlußpunkt, Übergang zum Wechselrichterbetrieb	248
Gleichrichter-Kurzschlußstrom und Wechselrichter-Trittgrenze als Funktion der Zündverzögerung	250
12. Der gesteuerte Mehrphasengleichrichter mit wechselstromseitigen Reaktanzen	251
Induktiver Gleichspannungsabfall und Kommutierung bei fehlender Kathodendrossel	251
Induktiver Gleichspannungsabfall und Kommutierung bei unendlich großer Kathodendrossel	256
Berücksichtigung von Ohmschem Gleichspannungsabfall	258
Die Steuerblindleistung, Kommutierungsblindleistung und die Scheinleistung mit Berücksichtigung des Leerlaufstromes des Transformators	259
13. Die Eigenleistungsfaktoren des gesteuerten Mehrphasengleichrichters	262
Die Leistungsfaktoren des Gleichrichters ohne Anodendrosseln	262

	Seite
Die Leistungsfaktoren des Gleichrichters mit Anodendrosseln	264
Verbesserung des Leistungsfaktors durch Zusatzanoden	265
14. Weiterer Verlauf der Gleichspannungscharakteristik des gesteuerten Mehrphasengleichrichters, Übergang auf Wechselrichterbetrieb . . .	267
Verlauf der Charakteristik des Gleichrichters mit unendlich großer Kathodendrossel	267
Der Gleich-Wechselrichter-Symmetriesatz	272
15. Der selbstgeführte Wechselrichter	274
Der Einphasen-Wechselrichter als einfachstes Wechselrichterbeispiel . .	274
Einführung eines Kondensators, der Wechselrichter mit Serienkondensator und Kommutierungsrossel	276
Der Zweiphasen-Wechselrichter mit Parallelkondensator	279
Übertragung von Blindleistung durch einen Zweiphasen-Wechselrichter .	281
16. Der netzgeführte Wechselrichter	282
Der Mehrphasen-Wechselrichter bei unendlich großer Gleichstromdrossel, Zündvoreilung und Trittgrenze	282
Ergänzende Bemerkungen über die höheren Arbeitszustände	285
III. Der Umrichter.	
17. Mittelbare Umrichter als Kombination von Gleichrichter und Wechselrichter	286
Umrichter als Gleichrichter mit Wechselrichterbelastung zur Frequenz- und Phasenumwandlung von Wechselströmen	286
Umrichter als Wechselrichter mit Gleichrichterbelastung zur Transformierung von Gleichspannungen	292
18. Unmittelbare Umrichter mit unverbesselter Spannungskurvenform .	292
Umrichter als Gleichrichter mit periodisch geänderter Steuerung . . .	292
Umrichter als Kombination zweier entgegenwirkender Gleichrichter mit periodisch unterbrochenen Gleichströmen; die Grundsaltungen . . .	293
19. Unmittelbare Umrichter mit verbesserter Spannungskurvenform . .	299
Die direkte Beeinflussung der Kurvenform der Einphasenspannung . . .	299
Der Umrichter mit abgestufter Steuerung	300
Der Umrichter mit abgestufter Spannung	301
Der Trapezkurvenumrichter	302
Der Zweispannungsumrichter	305
Der Steuerplan	311
Namenverzeichnis	314
Sachverzeichnis	315

Druckfehlerberichtigung.

S. 162, Zeile 15 von oben:

Anstatt „im Falle a)“ muß es heißen „außer $m = 3$ im Falle a)“.

S. 168, letzte Zeile und 169, erste Zeile:

Anstatt „nicht mehr lohnend ist.“ muß es heißen „nicht mehr lohnend ist; wir gelangen so zu Gleichrichtern, in denen, wie wir wissen, stets zwei Spannungen wirksam sind, und die man daher als Zweispannungsgerichte bezeichnen könnte.“