



Doctoral Thesis

Strom-Spannungstheorie eines gesteuerten m-Phasen-Stromrichters bei Belastung auf konstante Gegenspannung und mit endlicher Glättungsrosselspule

Author(s):

Eggenberger, Hans-Peter

Publication Date:

1957

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000089249> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Prom. Nr. 2405

**Strom-Spannungstheorie
eines gesteuerten m-Phasen-Stromrichters
bei Belastung auf konstante Gegenspannung
und mit endlicher Glättungsdrosselspule**

Von der
Eidgenössischen Technischen
Hochschule in Zürich

zur Erlangung
der Würde eines Doktors der Technischen Wissenschaften
genehmigte

PROMOTIONSARBEIT

vorgelegt von

HANS-PETER EGGENBERGER

dipl. El.-Ing. E. T. H.

von Buchs (St. Gallen)

Referent: Herr Prof. Ed. Gerecke

Korreferent: Herr Prof. E. Dünner

Juris-Verlag Zürich

1957

Vorwort und Inhaltsangabe

Die "klassische" Gleichrichtertheorie wurde von W. Dällenbach und Ed. Gerecke (Lit. 1) im Jahre 1924 erstmals für den ungesteuerten Gleichrichter veröffentlicht. Sie beruht auf den beiden wesentlichen vereinfachenden Annahmen, dass die Glättungsdrosselspule sehr gross sei und dass die ohmschen Widerstände, also die Verluste, auf der Wechselstromseite vernachlässigbar seien. Da beim Stromrichter die Anodenkreise durch die Ventile periodisch ein- und ausgeschaltet werden, setzen sich die Anodenströme allgemein aus Sinusgliedern und Exponentialgliedern mit endlichen Zeitkonstanten zusammen. Für die Bestimmung der Zünd- und Löschwinkel erhält man transzendente Gleichungen, sodass es unmöglich ist, diese Winkel in geschlossener Form anzugeben. In der "klassischen" Theorie sind alle Zeitkonstanten unendlich gross, die Exponentialglieder gehen in Konstante über und die Zünd- und Löschwinkel lassen sich durch trigonometrische Funktionen explizite darstellen. Dadurch ist es möglich, die den Ingenieur interessierenden Mittelwerte, Effektivwerte, Grund- und Oberwellen der auftretenden Ströme und Spannungen in geschlossener Form anzugeben. Diese "klassische" Theorie hat sich bei vielen praktischen Anwendungen, insbesondere beim Mehrphasenstromrichter, sehr gut bewährt.

Es gibt aber Fälle, wo sie erweitert werden muss. Das betrifft einerseits das Gebiet des gelückten Stromes, wie er beim Einphasenstromrichter sowie bei sehr kleinen Strömen beim Mehrphasenstromrichter vorkommt. Andererseits interessiert beim lückenlosen Betrieb in gewissen Fällen die Welligkeit des Gleichstromes, die bei fehlender oder endlich grosser Glättungsdrosselspule auftritt. Diese ist neuerdings von besonderer Wichtigkeit für die Gleichrichterlokomotiven, die bei Leistungen von mehreren tausend Kilowatt in Zweiphasenschaltung arbeiten. In diesem Fall kann aber der Löschwinkel nicht mehr in expliziter Form durch den Zündwinkel ausgedrückt werden. Für einzelne numerische Werte lässt er sich mit Hilfe von Annäherungsmethoden bestimmen. Wollte man jedoch das ganze Kennlinienfeld und die Zeigerortskurven der Grund- und Oberharmonischen auf diese Weise berechnen, so würde die Rechenarbeit ins Uferlose steigen. In seiner Vorlesung über Stromrichter hat Herr Prof. Gerecke darauf hingewiesen, dass diese Schwierigkeit in wichtigen Fällen dadurch umgangen werden kann, dass die Zünd- und Löschwinkel als gegeben aufgefasst, und die interessierenden Grössen, wie die Gleichspannung, der Gleichstrom, die Zeiger der Grund- und Oberwellen, in Parameterform als implizite Funktionen des Zünd- und Löschwinkels ausgedrückt werden.

Die vorliegende Arbeit wendet nun diese Methode auf den Fall des ungesteuerten und des gesteuerten Stromrichters an, der auf eine konstante Gegenspannung (insbesondere auf einen Motor) arbeitet, eine endliche Glättungsdrosselspule und ferner

Streuungen in den Transformatorphasen aufweist. Die ohmschen Widerstände werden sowohl auf der Wechselstromseite wie auf der Gleichstromseite vernachlässigt. Mathematisch gesehen treten dann Sinusfunktionen und linear mit der Zeit ansteigende Funktionen auf, letztere als degenerierte Exponentialfunktionen. Der verlustarme Fall interessiert besonders die Starkstromtechnik, wo die Verluste ja möglichst klein gehalten werden. Sie können dann, wie in der "klassischen" Theorie, nachträglich als Korrekturen berücksichtigt werden.

Die Arbeit umfasst vier Teile. Zuerst wird der gesteuerte, verlustlose Stromrichter mit konstanter Gegenspannung und endlicher Drosselspule im Gebiet des gelückten Stromes behandelt. Das Oszillogramm dieses Stromes wird analytisch und graphisch eingehend diskutiert. Dann werden die äusseren Kennlinien (Gegenspannung in Funktion des Gleichstrommittelwertes) für konstanten Zündwinkel und konstanten Löschwinkel berechnet und das zugehörige Kennlinienfeld in relativen Grössen aufgezichnet. Die Ortskurven für konstante Brenndauer erweisen sich als Ellipsen. Auf Grund des Symmetriesatzes für Gleich- und Wechselrichterbetrieb kann die Rückarbeit vom Gleichstromgenerator auf das Netz leicht überblickt werden. Die Grund- und Oberwellen der Gleichspannung und des Gleichstromes werden hierauf in komplexer Form nach Fourier berechnet und deren Zeiger als Ortskurven mit dem Zünd- und dem Löschwinkel als Parameter dargestellt.

Erreicht die Brenndauer den m -ten Teil einer Periode, also z. B. 180° beim Zweiphasen-Gleichrichter oder 120° beim Dreiphasen-Gleichrichter, so befindet man sich an der Grenze des lückenlosen Stromes, wo sich nun völlig andere Zustände einstellen. Die äusseren Kennlinien sind horizontale Gerade. Die Grenzkurve zwischen den beiden Gebieten ist eine der Ellipsen konstanter Brenndauer. Die Ortskurven für die Zeiger der Oberwellen der Gleichspannung und des Gleichstromes sind Epizykloiden, wie diese für die "klassische" Theorie erstmals von Ed. Gerecke (Lit. 3) abgeleitet wurden. Für die Stromwendung der Gleichstrommotoren ist die erste Oberwelle des Stromes von besonderer Wichtigkeit. Daher wird ihr Verhältnis zum Gleichstrommittelwert (als Ersatz für die gesamte quadratische Welligkeit) berechnet.

Relativ viel Zeit wurde auf das Studium des Vorläuferstromes verwendet, auf welchen W. Dällenbach und Ed. Gerecke (Lit. 1, Seite 227) bereits hingewiesen haben. Dieser Vorläufer ist praktisch nur von geringer Bedeutung, muss jedoch theoretisch untersucht werden, da sonst der Uebergang vom gelückten zum lückenlosen Betrieb nicht restlos verstanden werden kann. Auch der entsprechende Fall bei Wechselrichterbetrieb wird eingehend behandelt.

Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Strom-Spannungstheorie bei Anwesenheit von Streuungen auf der Wechselstromseite. Die Ueberlappung der Anodenströme führt zu einem induktiven Gleichspannungsabfall, dessen Wert genau angegeben werden kann. Bei relativ kleiner Streuung lässt er sich durch den Momentanwert des Gleich-

stromes im Zünd- und im Löschmoment ausdrücken, in Erweiterung der "klassischen" Formel. Beim ungesteuerten Gleichrichter wird die zeitliche Verschiebung des Zündwinkels noch besonders untersucht. Das äussere Kennlinienfeld, sowie die Grund- und Oberwellen des Gleichstromes und des Anodenstromes sind ebenfalls berechnet.

Im dritten Teil wird die Wirkung kleiner Widerstände durch Annäherung erfasst.

Im vierten Teil wird nun das Zusammenspiel des Stromrichters mit dem Motor untersucht. Aus dem äusseren Kennlinienfeld erkennt man beispielsweise sofort, dass die Kombination des ungesteuerten Stromrichters, des stufenweise regulierbaren Haupttransformators und des Seriomotors so getroffen werden kann, dass immer nur im lückenlosen Gebiet gearbeitet wird. Zudem ist auf den unteren Spannungsstufen, also beim Anfahren, die Welligkeit des Gleichstromes praktisch null. Der Motor verhält sich dort so, wie wenn er an eine zeitlich konstante Gleichspannung angeschlossen wäre, was für seine Stromwendung von grösster Wichtigkeit ist.

Den Abschluss der Arbeit bildet die Durchrechnung eines Zahlenbeispiels.

Da die Gleichrichterlokomotive insbesondere in Frankreich eingehend praktisch erprobt wurde, war vorauszusehen, dass während der Durchführung der vorliegenden Arbeit die theoretische Behandlung auch von anderer Seite in Angriff genommen werde. Die verschiedenen inzwischen erschienenen Veröffentlichungen und die vorliegende überdecken sich aber nur teilweise, da sich die Autoren verschiedene Probleme gestellt haben. R. Jötten und L. Lebrecht (Lit. 5) befassen sich mit den Rückwirkungen auf das Speisennetz, insbesondere den Möglichkeiten von Resonanzerscheinungen. Die interessante Arbeit von M. Demontvignier (Lit. 6) beschäftigt sich mit den Stromoszillogrammen des Zweiphasenstromrichters mit Gegenspannung und endlicher Glättungsdrösselspule, sowie insbesondere auch mit dem Problem der Oberwellen im Einphasennetz. Die Ortskurven der Zeiger der Oberharmonischen in der vorliegenden Arbeit ermöglichen ebenfalls eine Uebersicht über diese Frage. M. Blondet (Lit. 7) behandelt das Oszillogramm des Gleichstromes einer Lokomotive mit ungesteuerten Gleichrichtern und berechnet dessen Welligkeit in Abhängigkeit vom Ueberlappungswinkel. J. Lecorguillier (Lit. 8) endlich, untersucht verschiedene Belastungsfälle des Einphasen-Gleichrichters, arbeitet also nur im gelückten Gebiet.