

Elektrische omzettingen

Elektrische omzettingen

M.J. Hoeijmakers

Technische Universiteit Delft
Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica
Electrical Power Processing

Tekeningen:
H. Paling

© VSSD

Eerste druk 1997

Tweede druk 1999

Derde druk 2003

Vierde druk 2007

Uitgegeven door de VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

URL met informatie over dit boek en de antwoorden op de opgaven:

<http://www.vssd.nl/hlf/e004.htm>

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photo-copying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Printed in The Netherlands

NUR 959

Trefw.: elektrische omzettingen

ISBN-10 90-6562-157-1

ISBN-13 978-90-6562-157-3

Voorwoord

Voorwoord bij de derde druk

Dit is de derde druk van het boek *Elektrische Omzettingen*. Bij de tweede druk is hoofdstuk 8 (de inductiemachine) toegevoegd en is in verband hiermee hoofdstuk 7 ingrijpend gewijzigd. Bij de derde druk is weer een aantal (kleine) verbeteringen aangebracht. Daarnaast is het aantal opgaven (met uitwerkingen) aanzienlijk vergroot en zijn zij opgenomen in een apart deel. In dit aparte deel staan bovendien de leerdoelen zoals die door mij bij de studierichting Elektrotechniek aan de Technische Universiteit Delft en aan de Universiteit Twente gebruikt worden.

In dit boek wordt een basisbehandeling gegeven van de omzetting van een vorm van elektrische energie in een andere vorm van elektrische energie en van de omzetting van mechanische energie in elektrische energie en omgekeerd. De behandeling van de omzeters vindt daarbij plaats vanuit het gezichtspunt van de elektrische energietechniek; de meeste omzeters zijn echter ook van belang voor de informatietechniek.

Het boek heeft enerzijds als doel om een overzicht te geven van de elektrische omzettingen voor degenen die zich niet verder in de elektrische energietechniek willen specialiseren en anderzijds als doel om een fundamentele basis te leggen voor degenen die zich wel verder in de elektrische energietechniek willen verdiepen.

Dit studieboek is ontstaan uit het dictaat behorende bij het vak *Elektrische Omzettingen* uit het basiscurriculum van de studierichting Elektrotechniek aan de Technische Universiteit Delft. Het dictaat/boek is in de loop van enkele jaren steeds aangepast, waarbij de inbreng van studenten een belangrijke rol heeft gespeeld. Ik wil deze studenten hierbij bedanken voor hun bijdrage.

Verder heeft bij het tot stand komen van het dictaat een groot aantal medewerkers van de Faculteit der Elektrotechniek een bijdrage geleverd, aan wie ik eveneens dank verschuldigd ben. Hierbij zou ik in het bijzonder H. Paling willen bedanken voor het tekenwerk en ir. E. van Dijk, dr.ir. H. Polinder, ir. M. Rondel, prof.ir. J.A. Schot en ir. M.P.N. van Wesenbeeck voor de discussies over de tekst en voor hun bijdragen aan de opgaven met uitwerkingen.

Voor dit boek zijn bestaande studieboeken gebruikt als inspiratiebron. Deze boeken zijn opgenomen in de literatuurlijst.

Dit boek bestaat uit een aantal onderdelen die niet bestudeerd behoeven te worden in de volgorde waarin ze hier staan. Elk van de hoofdstukken 1, 2, 3 en 6 kan bestudeerd worden zonder de kennis van een ander hoofdstuk. Voor hoofdstuk 4 is echter de kennis van hoofdstuk 3 nodig en hoofdstuk 5 heeft de paragrafen 3.1 tot en met 3.7 als voorkennis. Hoofdstuk 7 sluit aan op hoofdstuk 5 en hoofdstuk 8 op hoofdstuk 7.

Hoewel bij het schrijven van dit boek de nodige zorgvuldigheid betracht is, zal het zeker niet vrij

zijn van fouten. Ik zou graag attent gemaakt worden op deze fouten en sta open voor suggesties om het boek te verbeteren.

Martin Hoeijmakers
Delft, oktober 2003

Voorwoord bij de vierde druk

Bij de vierde druk is in hoofdstuk 2 een paragraaf over wisselstroomtheorie (paragraaf 2.5) toegevoegd en is hoofdstuk 8 (de inductiemachine) ingrijpend gewijzigd. Verder is weer een aantal (kleine) verbeteringen aangebracht.

De oefenopgaven staan niet meer in een apart deel: zij zijn opgenomen in het boek aan het einde van het hoofdstuk. De uitwerkingen van de opgaven staan op de internetsite:
<http://www.vssd.nl/hlf/e004.htm>.

Martin Hoeijmakers
Delft, augustus 2007

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Elektrische energie-overdracht	7
2.1	Inleiding	7
2.2	Enkele elektrische grootheden	8
2.3	Gelijkstroomoverdracht	10
2.4	Wisselstroomgrootheden	13
2.5	Wisselstroomtheorie	15
2.6	Wisselstroomoverdracht	24
2.7	Driefasige systemen	27
2.8	Het elektriciteitsvoorzieningssysteem	30
2.9	Vraagstukken	34
3	Magnetische circuits	39
3.1	Inleiding	39
3.2	De wetten van Maxwell	40
3.3	Een eenvoudig magnetisch circuit	42
3.4	De netwerkbeschrijving van magnetische circuits	43
3.5	Niet-lineaire magnetische circuits	48
3.6	De opgewekte spanning	49
3.7	De magnetische veldenergie	52
3.8	De hystereselus	54
3.9	Wervelstroomverliezen	57
3.10	Vraagstukken	60
4	De transformator	67
4.1	Inleiding	67
4.2	De verliesvrije, spreidingsloze transformator	68
4.3	De spreidingsfluxen	72
4.4	Vervangingsschema's	74
4.5	Het magnetische circuit	80
4.6	De belaste transformator	84
4.7	De beproeving van de transformator	85
4.8	De spaartransformator	88
4.9	Driefasentransformatoren	88
4.9.1	De uitvoering	88
4.9.2	Transformatorschakelingen	91

4.9.3	Hogere harmonischen	92
4.10	Vraagstukken	93
5	Inleiding elektromechanica	99
5.1	Inleiding	99
5.2	Elektromechanische interactie	101
5.3	"Fysisch" begrip van de krachtopwekking	103
5.4	Het mechanische systeem	104
5.5	Magnetische circuits met een beweegbaar deel	108
5.6	Berekening van de kracht uit de vermogensbalans	109
5.7	Koppelberekening bij een elektromechanische omzetter met twee elektrische poorten	113
5.8	Vraagstukken	118
6	Vermogenselektronica	125
6.1	Inleiding	125
6.2	De gelijkrichter met één diode	127
6.3	Gelijkrichters met twee of vier dioden	134
6.4	De thyristorgelijkrichter	143
6.5	De chopper	149
6.6	Invertoren	155
6.7	Vraagstukken	160
7	De synchrone machine	171
7.1	Inleiding	171
7.2	Een eenvoudige generator	173
7.3	De eenfasige synchrone generator	179
7.4	Het koppel bij een eenfasige synchrone generator	189
7.5	De driefasige synchrone machine	190
7.6	De synchrone machine in het elektriciteitsnet	197
7.7	Uitvoeringsvormen	200
7.8	Vraagstukken	202
8	De inductiemachine	215
8.1	Inleiding	215
8.2	Het basisprincipe van de inductiemachine	216
8.3	De rotorstromen en het luchtspleetveld	222
8.4	Het model	225
8.5	Vervangingschema's	231
8.6	Voeding uit spanningsbron bij verwaarlozing statorweerstand	233
8.6.1	Het fasordiagram en het cirkeldiagram	234
8.6.2	De koppelhoeksnelheidskarakteristiek	238
8.7	De inductiemachine bij variabele voedingsfrequentie	240
8.8	Vraagstukken	240

Bijlagen

A	Fourierreeksen	243
----------	-----------------------	------------

Literatuur	247
Symbolen	249
Index	253