



国际电气工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

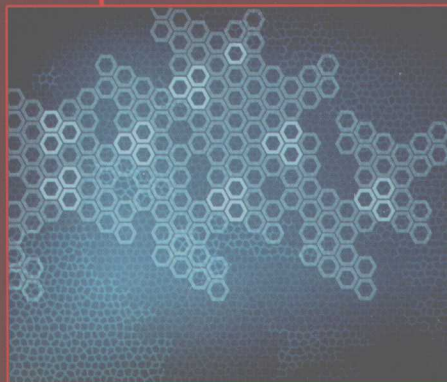
分布式发电—— 感应和永磁发电机

**Distributed Generation—
Induction and Permanent
Magnet Generators**

(英) Loi Lei Lai 著
(中) Tze Fun Chan 等译
孔祥新 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

分布式发电 ——感应和永磁发电机

(英) Loi Lei Lai 著

(中) Tze Fun Chan 等译

孔祥新 等译



机械工业出版社

分布式发电有助于促进能源的可持续发展、改善环境并提高绿色能源的竞争力。本书对应用于分布式发电的感应发电机和永磁发电机做了全面说明,从理论、实际设计以及运用三个方面,详细介绍了感应发电机和永磁发电机应用于分布式发电的最新技术。主要内容包括:分布式发电概述、感应发电机和永磁发电机的特点、单相发电系统中三相感应发电机的相平衡方案、基于 Steinmetz 联结的并网单相感应发电机的性能、自励式感应发电机的电路结构以及性能、自励式绕线转子感应发电机的电压和频率控制方法及性能、内置永磁转子的三相同步发电机的性能,以及分布式发电的未来发展趋势。

本书可以为工程师、技术顾问、调试人员以及参与能源的生产和输送的环境保护者提供极大的帮助,指导他们评估可再生能源的价值以及建立有效的输电系统。设计人员、操作人员和规划人员也将会从中收益。对本科生和研究生来说,这也是一本很好的参考书。

Copyright © 2007 John Wiley & Sons Ltd.

Au rights reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Ltd.

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons 公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字 01-2008-2204 号

图书在版编目 (CIP) 数据

分布式发电——感应和永磁发电机/ (英) 赖来利, 陈梓芬著; 孔祥新等译. —北京: 机械工业出版社, 2009. 9
(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Distributed Generation-Induction and Permanent Magnet Generators
ISBN 978-7-111-28287-7

I. 分… II. ①赖…②陈…③孔… III. ①感应电机②永磁式电机 IV. TM346 TM351

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 162753 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 付承桂 版式设计: 霍永明 责任校对: 姚培新
封面设计: 马精明 责任印制: 乔宇
北京京丰印刷厂印刷
2009 年 11 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm × 239mm · 13.25 印张 · 254 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-28287-7
定价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心: (010) 88361066
销售一部: (010) 68326294
销售二部: (010) 88379649
读者服务部: (010) 68993821

门户网: <http://www.cmpbook.com>
教材网: <http://www.cmpedu.com>
封面无防伪标均为盗版

译 者 序

随着全球变暖影响的加剧，人们开始重视并尽量减少陈旧的大型中央火力发电厂带来的污染。于是，分布式发电设备以及对联合输电系统的影响开始受到重视。本书将从各个方面对分布式发电系统的感应发电机和永磁发电机进行全面回顾，并对这些系统进行了详细的分析，从理论和实际应用方面对最新技术进行了介绍。

本书主要内容包括：分布式发电概述、感应发电机和永磁发电机的特点、单相发电系统中三相感应发电机的相平衡方案、基于 Steinmetz 联结的并网单相感应发电机的性能、自励式感应发电机的电路结构以及性能、自励式绕线转子感应发电机的电压和频率控制方法及性能、内置永磁转子的三相同步发电机的性能，以及分布式发电的未来发展趋势。

本书的特点是：层次分明、重点突出，概念阐述准确、清楚，公式推演全面、易于理解，便于自学，注重与工程实际结合，实用性强。

本书可以为工程师、技术顾问、调试人员以及参与能源的生产和输送的环境保护者提供极大的帮助，指导他们评估可再生能源的价值以及建立有效的输电系统。设计人员、操作人员和规划人员也将会从中收益。本书主要可作为普通高等学校电气工程自动化、电力系统及其自动化及相关专业的本科或研究生的教材，也可作为从事新能源开发、分布式发电和配电网自动化等相关工作的工程技术人员的参考书。

本书是集体翻译而成，忠实于原著。孔祥新译第 1~4 章，张立华译第 5、6 章，王化建译第 7、8 章；李坤译其他部分。全书由蔡斌教授进行全面的校阅和修改。

我们在翻译过程中尽管精益求精，矢志译得准确、严谨、流畅，为国内同行呈现出一本精品译著，为便于阅读，还对个别段落在叙述上进行了适当调整，但在内容上并无任何变动。但毕竟因水平、能力有限，错误、欠妥之处在所难免，恳求读者批评指正。

最后要说明的一点是，原著中各种物理量基本上采用国际单位制，因此我们未作改动。

译 者

原 书 序

随着全球变暖影响的加剧，人们开始重视并尽量减少陈旧的大型中央火力发电厂带来的污染。于是，分布式发电设备以及对联合输电系统的影响开始受到重视。本书将从各个方面对分布式发电系统的感应发电机和永磁发电机进行全面回顾，并对这些系统进行了详细的分析，从理论和实际应用方面对最新技术进行了介绍。本书为读者在无管理的发电方案中理解和运用感应发电系统和永磁发电系统提供知识背景和指导。

本书可以为工程师、技术顾问、调试人员以及参与能源的生产和输送的环境保护者提供极大的帮助，指导他们评估可再生能源的价值以及建立有效的输电系统。设计人员、操作人员和规划人员也将会从中受益。能源策划人员以及电气工程专业的学生将会从本书中发现，建立在感应发电机或永磁发电机基础上的分布式发电是一项新的工业技术，也是一个值得深入研究的领域。本书有助于促进能源的可持续发展、改善环境并提高绿色能源的竞争力。

Robert Hawley

执行首长协调理事会理事

国防与航天中心成员

英国皇家工程学会会员

爱丁堡皇家学会会员

工程及科技学会香港分会会员

1996 ~ 1997 年的 IEE 主席

工程及技术理事会前任主席

粒子物理及天文研究委员会前任主席

世界核能大学副校长

原 书 前 言

能源节约、环境保护和可持续发展是当今世界面临的三大挑战。其中一个重要问题就是，如何在满足人们对能源需求的同时，又不过度消耗自然资源或对环境造成污染。对此，世界各国学者普遍认为，应当大力发展使用可再生能源发电技术。许多发展中国家拥有丰富的可再生能源，但是这些能源大多分布在边远地区，因此这些能源的开发和利用面临许多障碍。但是，如果这些地区已经使用三相输电，这个问题就很容易解决了。

不论是在发达国家还是在发展中国家，可以有效地应用可再生能源发电。本书对应用于分布式发电的感应发电机和永磁发电机做了全面的说明，从理论、实际设计以及运用三个方面，详细介绍了感应发电机和永磁发电机应用于分布式发电的最新技术。本书安排如下：首先对分布式发电做了全面的介绍，并列出了发展该项技术的原因及其潜在的经济效益。此外，本书还对可用的各种不同类型的发电机做了全面的评述。接下来的章节讨论了各种类型的感应发电机，并对将它们接入分布式发电系统后的建模、测试以及电压和频率的控制做了介绍。第7章分析了永磁同步发电机，并介绍了带内置转子的永磁同步发电机的结构。

第1章讨论了分布式发电（DG）。从DG的工作方式、相关性能以及向电网供电的发电厂来看，采用DG技术既可能增加成本，也可能减缓燃料消耗、含碳及其他污染物的排放以及噪声污染。综合考虑以上原因，应当鼓励利用DG方案中对公众有利的方面，而不应当只考虑价格因素。因此，采用DG时需要综合分析成本、对公众产生的效益及影响。虽然DG可能成为能源供应的主要方式，但它的最大价值在于应用范围广，而且可以和电网连接。

第2章对发电机的应用做了详细的讨论。永磁（PM）同步发电机适合于分布式发电系统中。PM材料技术的发展促使发电装置的效率和集成度进一步提高。异步（或感应）发电机还可以用来产生交变电流。感应发电机（IG）可靠度高，价格也将越来越便宜，这类发电机被广泛应用在风能转换系统和一些小型的水力发电厂。本章还介绍了IG在电网或独立发电系统中的应用。此外，还对双馈IG的相关问题做了简单的回顾，包括它的运行、控制、性能、对输电质量的影响以及在风力发电中的运用。

第3章探讨了单相电力系统中三相IG的一般相平衡原理，并提出了几种实用的相平衡方案，包括有关耗能元件和电流注入式变压器的相关问题。本章对IG相变换器做了总体分析，阐明了单相电力系统中三相IG实现相平衡的可能

性,并说明了如何确定相变换器元件;讨论了相平衡对输出功率、系统功率因数和效率的影响;论证了在转子速度变化受涡轮控制的条件下,利用固定相变换器就可以获得较为满意的发电机性能。对小型感应发电机的实验,证明了理论分析的正确性,同时分析了基于 Smith 联结的单相并网 IG 的可行性。利用对称分量法,系统分析了不同转子转速时发电机的性能。此外,探讨了电容对发电机性能的影响。在输出功率变化范围较大的情况下,考虑到电压的不平衡因素,利用简单的双模控制策略提高了发电机的性能。通过小型感应发电机的实验,验证了理论分析的正确性。本章还阐述基于微控制器的、多模的、Smith 联结的单相 IG 并网后的工作情况,分析了基于 Smith 联结的 C 模式电路的原理、性能以及三相 IG 在单相电网中的运行。相平衡方案简化了电路、降低了成本,并提高了电网的效率以及系统功率因数。

第 4 章提出了一种分析基于 Steinmetz 联结的并网单相 IG 性能的新方法。采用基于二维有限元法的电路和磁场的耦合方法,分析了非对称定子绕组的联结方式、发电机内部的复杂磁场以及转子绕组中的电流分布。由于该方法是建立在电机精确模型基础上,并且是普遍适用的,所以它也适用于其他非对称 IG 结构。

第 5 章讨论了自主(或称为独立、孤立)发电系统中的自励式感应发电机(SEIG)的不同电路结构;分析了基于 Steinmetz 联结的三相 SEIG,研究了负载电抗、转子转速及功率因数对电容要求的影响。通过小型感应发电机实验证实了理论分析的正确性。分析了三相发电机的单相自调节 SEIG(SRSEIG)的稳态性能。单相 SRSEIG 具有绕组利用合理、输出功率大、发电效率高以及电压调节小等优点。利用对称元件和相量图分析法推导了带单相负载的三相发电机实现相完全平衡的条件。由于单相 SRSEIG 电路结构非常简单,并且只需要静态电容,因此可以方便地应用到低成本的单相自主发电系统中。介绍了一种带单相负载的三相 IG 的新型励磁方案(SMSEIG),通过调整 Smith 联结中的励磁电容值,可以实现三相发电机的相平衡。通过实验可以证明该新型励磁方案的可行性。由于 SMSEIG 具有低成本、高效率和输出功率大的优点,因此,在边远地区发展自主单相发电系统是比较经济的选择。

第 6 章提出通过改变外部转子电阻控制自励式绕线转子 IG(SESRIg)的电压和频率,利用等效电路分析方法可以获得 SESRIg 的稳态性能和控制特性。当 SESRIg 的负载阻抗和励磁电容为定值时,在定子电流的所允许范围内,通过改变转子的电阻,就可以维持 SESRIg 的频率和输出电压在速度变化较大的范围内为恒定值。通过调节 PI 控制器参数就能保证发电系统具有较好的稳态性能和良好的动态响应。上述方案使得利用低成本的变速风力发电系统在边远地区实现高质量供电成为可能。

第 7 章分析了带内置永磁转子的三相同步发电机的性能。由于内置永磁转子

结构的逆凸特性显著地改进了三相同步发电机的电压调整性能, 样机实验验证了理论分析的准确性。在双轴模型的基础上, 推导了具有滞后功率因数负载的相关方程, 分析了达到负载特性极值点后, 实现电压调整为零和最大输出功率的条件; 介绍了 PMSG (永磁同步发电机) d 轴和 q 轴同步电抗的计算方法, 并分析了包括转子磁极作用效果磁场饱和。通过电路和磁场的耦合方法, 分析了带内置转子三相 PMSG 的性能, 并利用二维有限元法解决了三相 PMSG 的磁场问题。在求解过程中考虑了饱和对气隙磁通密度以及负载特性的影响, 电压和电流的实验波形与二维有限元法的计算结果相似。

第 8 章描述分布式发电的未来发展趋势以及实验电机的技术数据。

本书为电力工程师及教学者、系统操作员、管理者、方案设计者及研究员提供了宝贵的信息。

Loi Lei Lai 和 Tze Fun Chan

2007 年 5 月

原书致谢

感谢 Wiley 对本项目的支持。

感谢北京清华大学电机工程与应用电子技术系的退休教授严烈通先生，参与编写了第4章和第7章关于有限元分析的内容。

第二作者感谢中国香港理工大学电气工程系为本研究提供了设备和支持。

感谢伦敦城市大学能源系统组的研究员 Harald Braun 博士提供的图表，以及 Qi Ling Lai 和 Chun Sing Lai 对索引进行的安排。

作者们还要感谢 IEEE（美国电气与电子工程师学会）允许本书使用以下内容：

图 2-1 ~ 图 2-3 摘自 T. F. Chan 和 L. L. Lai 的《Permanent-magnet machines for distributed power generation: a review》，论文编号 07GM0593，IEEE 2007 General Meeting, Tampa, FL, USA, 24-28 June 2007。

图 3-12、图 3-13、图 3-15 ~ 图 3-27 以及表 3-4 和表 3-5 摘自 T. F. Chan 和 L. L. Lai 的《Single-phase operation of a three-phase induction generator with the Smith connection》，IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, March 2002, 47-54。

图 4-1 ~ 图 4-14 以及表 4-1 和表 4-2 摘自 T. F. Chan、L. L. Lai 和 L. -T. Yan 的《Finite element analysis of a single-phase grid-connected induction generator with the Steinmetz connection》，IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 2, June 2003, 321-329。

图 5-4 ~ 图 5-11 摘自 T. F. Chan 和 L. L. Lai 的《Capacitance requirements of a three-phase induction generator self-excited with a single capacitance and supplying a single-phase load》，IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, March 2002, 90-94。

图 6-9 ~ 图 6-13 以及表 6-1 摘自 T. F. Chan、K. A. Nigim 和 L. L. Lai 的《Voltage and frequency control of Self-excited slip-ring induction generators》，IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, March 2004, 81-87.。

图 7-1 ~ 图 7-9 和图 7-22、图 7-23 摘自 T. F. Chan、L. L. Lai 和 L. -T. Yan 的《Performance of a three-phase A. C. generator with inset NdFeB permanent-magnet rotor》，IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, March 2004, 88-94。

经 IET (工程技术研究所) 允许重新出版了以下内容:

图 7-10 ~ 图 7-17、图 7-19 ~ 图 7-21 和图 7-24 摘自 T. F. Chan 和 L. L. Lai 的《Permanent-magnet synchronous generator with inset rotor for autonomous power system applications》, IEEE Proceedings—Generation, Transmission&Distribution, Vol. 151, No. 5, September 2004, 597-603.

图 7-25 ~ 图 7-33 和图 7-35、图 7-36 摘自 T. F. Chan、L. L. Lai 和 L.-T. Yan 的《Analysis of a stand-alone permanent-magnet synchronous generator using a time-stepping coupled field-circuit method》, IEE Proceedings—Electric Power Applications, Vol. 152, No. 6, November 2005, 1459-1467.

最后, 还要衷心感谢 John Wiley & Sons 公司对本书的支持和配合。

作者

作者简介

Loi Lei Lai 毕业于伯明翰的阿斯顿大学，获得理学学位和博士学位，被授予伦敦城市大学理学博士学位和名誉毕业生。1984 年，被任命为斯塔福德郡理工大学高级讲师。1986 年至 1987 年，是通用电气公司 Alstom 涡轮发电机有限公司和工程研究中心的皇家学者。长期从事技术顾问工作，例如：1994 年参与了海峡隧道电力系统的研究工作，并对该系统的保护提出了建议。目前，担任能源系统组的组长，也是伦敦城市大学电气工程系的主任。过去的 10 年中，编辑（或是参与编辑）了 200 本技术刊物。2001 年，出版了两本专著：《Intelligent System Applications in Power Engineering—Evolutionary Programming and Neural Networks》和《Power System Restructuring and Deregulation—Trading, Performance and Information Technology》，这两本书都由 John Wiley & Sons 有限公司出版。被 IEEE 授予第三届千年奖章，并获得 2003 年 IEEE 电力工程协会英国及爱尔兰共和国（UKRI）分会的杰出工程师称号。1995 年获得美国国际海水淡化协会的精品论文奖，2006 年获得 IEEE 电力工程学会能源发展和电力发电委员会论文奖，是 IEEE 和 IET（工程技术研究所）学会的特别会员。

在职业生涯中，与 IEE（现今的 IET）一起组建了国际电网重构重组及发电技术会议（DRPT），并在 2000 年担任该会议主席。他定期参与评定澳大利亚研究理事会和香港研究大会的 EPSRC 重大提议。2001 年，受香港工程师研究所邀请成为鉴定团主席，参与电气工程工学硕士学位的评审。自 2005 年起，Lai 教授一直受邀为 IET 工程创新奖的评委，也是 IEEE UKRI 部执行委员会的委员。此外，Lai 教授还是电力系统分析计算及经济委员会智能系统分会和 IEEE 电力工程学会的会员，也是电力交换和控制技术执行委员会以及 IET 专业网络的成员。同时，他还担任许多杂志期刊的编辑，包括：《IEE Proceedings—Generation, Distribution and Generation》（现今的《IET Generation, Distribution and Generation》）、由 Elsevier 科学有限公司出版的《International Journal of Electrical Power & Energy Systems》、《Hong Kong Institution of Engineers (HK IE) Transactions》及由 John Wiley & Sons 有限公司出版的《European Transactions on Electrical Power》。Lai 教授曾是东京首都大学的科研教授，也受邀成为南京东南大学和上海复旦大学的客座教授，曾在 IET 和 IEEE 主办的几个重要国际会议上对关键技术发表演讲。

Tze Fun Chan 1974 年和 1980 年分别获得了香港大学电气工程系的理学学士

学位和哲学硕士学位。2005 年获得了伦敦城市大学电气工程系的博士学位。从 1978 年至今，Chan 博士一直是香港理工大学电气工程系的副教授。主要研究方向：自励式 AC 发电机、无电刷的 AC 发电机和永磁发电机。2006 年 6 月，获得 IEEE 电力工程学会能源发展和发电委员会颁发的论文奖。

刘善敏
周洪烈
吉荫祥
李益祥
余志丹

李益祥 章工第

吉荫祥

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

李益祥

余志丹

目 录

译者序

原书序

原书前言

原书致谢

作者简介

第 1 章 分布式发电	1
1.1 引言	1
1.2 发展 DG 的原因	1
1.3 DG 技术的影响	3
1.3.1 DG 技术	3
1.3.2 热量问题	5
1.3.3 电压分布问题	5
1.3.4 故障水平	6
1.3.5 谐波及其与负载的相互作用	6
1.3.6 发电设备间的相互作用	6
1.3.7 系统保护问题	6
1.4 DG 的经济效应	7
1.5 DG 的发展障碍	8
1.6 可再生能源	9
1.7 可再生能源的经济效益	11
1.8 电网的互连	13
1.8.1 电网互连的标准	13
1.8.2 收费设计	13
1.9 DG 设计的建议和指导	14
1.10 小结	16
参考文献	17
第 2 章 发电机	19
2.1 引言	19
2.2 同步发电机	19

2.2.1	永磁材料	19
2.2.2	永磁发电机	20
2.3	感应发电机	24
2.3.1	三相感应发电机和自励式感应发电机	24
2.3.2	单相感应发电机和自励式感应发电机	25
2.4	双馈感应发电机	26
2.4.1	运行	26
2.4.2	近期研究工作	27
2.5	总结	28
	参考文献	29
第3章	三相感应发电机在单相电力系统中的应用	36
3.1	引言	36
3.2	无源电路元件的相平衡	36
3.2.1	感应发电机的相变换器分析	36
3.2.2	相平衡方案	37
3.2.3	实例分析	39
3.2.4	系统功率因数	41
3.2.5	功率和效率	42
3.2.6	恒定相变换器工作原理	43
3.2.7	小结	44
3.3	采用 Smith 联结的相平衡	45
3.3.1	基于 Smith 联结的三相感应发电机	45
3.3.2	性能分析	46
3.3.3	平衡工作原理	47
3.3.4	实例分析	49
3.3.5	相平衡电容的影响	52
3.3.6	双模工作方式	55
3.3.7	小结	57
3.4	基于微控制器的 SMIG 多模控制	57
3.4.1	相电压分析	57
3.4.2	控制系统	57
3.4.3	实际应用	60
3.4.4	实验结果	61
3.4.5	小结	65
3.5	采用线电流注入方法的相平衡	65
3.5.1	电路连接和工作原理	65

3.5.2	性能分析	66
3.5.3	平衡工作原理	67
3.5.4	实例分析	69
3.5.5	小结	77
	参考文献	78
第4章 基于 Steinmetz 联结的并网感应发电机的有限元分析		79
4.1	引言	79
4.2	Steinmetz 联结和对称分量法分析	80
4.3	电机模型	80
4.4	有限元分析	81
4.4.1	基础场方程	81
4.4.2	定子电路方程	81
4.4.3	定子反电动势	82
4.4.4	转子电路模型	83
4.4.5	对所采用方法的评论	85
4.5	计算方面	85
4.6	实例分析	86
4.7	小结	90
	参考文献	90
第5章 自主电力系统中的自动式感应发电机		92
5.1	引言	92
5.2	基于 Steinmetz 联结的三相 SEIG	92
5.2.1	电路联结和分析	92
5.2.2	求解方法	94
5.2.3	电容要求	94
5.2.4	计算和实验结果	96
5.2.5	负载电容的要求	99
5.2.6	小结	101
5.3	带非对称阻抗和励磁电容的 SEIG	101
5.3.1	电路模型	102
5.3.2	性能分析	102
5.3.3	计算和实验结果	103
5.3.4	改进的 Steinmetz 联结	104
5.3.5	简化的 Steinmetz 联结	110
5.3.6	小结	112

5.4	为单相负载供电的自调节 SEIG	112
5.4.1	电路联结和分析	112
5.4.2	串联补偿电容的作用	113
5.4.3	实验结果和讨论	118
5.4.4	负载功率因数的影响	121
5.4.5	小结	123
5.5	基于 Smith 联结的 SEIG	124
5.5.1	电路联结和操作原理	124
5.5.2	性能分析	124
5.5.3	平衡工作的条件	125
5.5.4	结果和讨论	126
5.5.5	小结	131
	参考文献	132
第 6 章	自励式绕线转子感应发电机的电压和频率控制	133
6.1	引言	133
6.2	SESRIG 的特性分析	133
6.3	频率和电压控制	136
6.4	定子负载可变时的控制	138
6.5	工程实现	139
6.5.1	转子外部电阻的斩波控制	139
6.5.2	闭环控制	140
6.5.3	PI 控制器的参数整定	140
6.5.4	动态响应	141
6.6	小结	143
	参考文献	143
第 7 章	独立发电系统中的永磁同步发电机	145
7.1	引言	145
7.2	带内置转子的 PMSG 的原理及结构	145
7.3	单位功率因数负载的分析	146
7.3.1	基于双轴模型的分析	146
7.3.2	设计时应考虑的因素	149
7.3.3	计算结果	150
7.3.4	实验结果	151
7.3.5	小结	152
7.4	综合分析	152

7.4.1	基本方程和分析	152
7.4.2	电压调整系数为零的条件	155
7.4.3	负载特性中的极值点	157
7.4.4	功率-负载角的关系	157
7.4.5	饱和双轴模型	158
7.4.6	小结	159
7.5	同步电抗的计算	159
7.5.1	基于 FEM 的分析	159
7.5.2	X_d 与 X_q 的计算	161
7.5.3	计算结果	161
7.5.4	小结	165
7.6	时步 2-DFEM 分析	165
7.6.1	发电机模型和假设	165
7.6.2	电路和磁场的耦合分析	166
7.6.3	磁化饱和因素	167
7.6.4	计算结果	169
7.6.5	实验验证	173
7.6.6	小结	175
	参考文献	175
第 8 章 结论		176
8.1	本书贡献	176
8.2	今后工作 (展望)	177
	参考文献	178
附录		179
附录 A 感应发电机和自励式感应发电机的分析		179
A.1	感应发电机的对称分量方程	179
A.2	感应发电机的正序和负序电路	179
A.3	两相变换器感应发电机的 V_p 和 V_n	181
A.4	相角关系的推导	182
A.5	Steinmetz 联结的自励式感应发电机的输入阻抗	183
	参考文献	184
附录 B Hooke-Jeeves 方法 (模式搜索法)		185
	参考文献	185
附录 C 关于有限元法的注释		186
C.1	能量函数及其离散化	186