

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

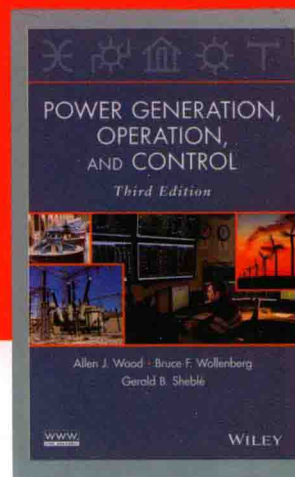
# Power Generation, Operation, and Control

Third Edition

## 电力系统发电、运行和控制 (第三版)

Allen J. Wood  
Bruce F. Wollenberg 著  
Gerald B. Sheblé

柏瑞 倪明 陈谦 丁涛 译



清华大学出版社

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

# Power Generation, Operation, and Control

Third Edition

## 电力系统发电、运行和控制 (第三版)

Allen J. Wood  
Bruce F. Wollenberg 著  
Gerald B. Sheblé

柏瑞 倪明 陈谦 丁涛 译

清华大学出版社  
北京

**Power Generation, Operation, and Control (Third Edition)**

Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Gerald B. Sheblé

ISBN: 9780471790556/0471790559

Copyright © 2014 by John Wiley & Sons Limited.

All rights reserved. This translation published under license.

Copyright © 2017 by John Wiley & Sons Limited and Tsinghua University Press. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Tsinghua University Press Limited and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予清华大学出版社。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2014-6033

本书封底贴有 John Wiley & Sons 防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

**图书在版编目(CIP)数据**

电力系统发电、运行和控制(第三版)/(美)艾伦·J.伍德(Allen J. Wood),(美)布鲁斯·F.活伦伯格(Bruce F. Wollenberg),(美)吉拉尔德·B.谢布尔(Gerald B. Sheblé)著;柏瑞,倪明,陈谦等译。—北京:清华大学出版社,2017

书名原文: Power Generation, Operation, and Control(Third Edition)

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

ISBN 978-7-302-46909-4

I. ①电… II. ①艾… ②布… ③吉… ④柏… ⑤倪… ⑥陈… III. ①电力系统运行 ②电力系统自动化—自动控制  
IV. ①TM732 ②TM763

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 070144 号

责任编辑: 王一玲 战晓雷

封面设计: 常雪影

责任校对: 李建庄

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

社 总 机: 010-62770175

投稿与读者服务: 010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈: 010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

邮 编: 100084

邮 购: 010-62786544

印 装 者: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 203mm×260mm

印 张: 26.75

字 数: 755 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1~1500

定 价: 128.00 元

产品编号: 057567-01

## 译者序

英文著作 *Power Generation, Operation and Control* 的第一版和第二版都深受全世界电力教育界和工业界人士的广泛好评。该书理论基础深厚又深入浅出,非常适合高年级本科生和研究生阅读。该书在美国甚至全世界都有很高的声望,是众多电力界权威推荐的教材,在美国高校广泛使用。第二版出版于 1996 年,清华大学出版社于 2003 年引入了第二版的影印版。作为电力行业的从业者,我们都从该书中受益良多,也深感本书对于电力系统专业本科生和研究生教育的巨大价值,可是由于缺少中文版,该书在国内大学的使用程度并不高。因此,我们非常希望将该书翻译成中文,以飨广大的电力系统专业师生和有关从业人员。

在第二版出版后时隔 17 年之久,该书的新版(第三版)终于在 2013 年 11 月面世。在第三版的筹备过程中,原作者之一 Wood 教授辞世,而 Sheblé 教授加入成为合著者。第三版英文版出版之后,我们就和本书的主要作者 Wollenberg 教授联系,商讨翻译并出版第三版中文版的事宜,得到 Wollenberg 教授、Wiley 出版社和 Wiley 中国以及清华大学出版社的支持。

本书是该著作第三版的中文翻译版。书中详尽地介绍了电力工业中发电、运行和控制各个环节的理论基础、技术方法和实践经验。内容涉及电力工业组织结构和管管理经济学、火电机组的经济调度、机组组合、输电系统、电力系统安全、状态估计、发电控制等。

本书用深入浅出的方式讲述电力系统运行控制中的技术难题和解决方法。书中不仅通过对背景知识的介绍来帮助读者理解有理论难度的技术方法,而且提供大量的精心设计的算例以及 MATLAB 程序来帮助读者加深理解。本书系统而详尽地介绍了电力系统中经济调度、机组组合、水火电协调、最优潮流、状态估计的数学理论、建模和求解方法。例如,经济调度方面,本书介绍了线性规划方法、Lambda 迭代方法、二分法、动态规划方法;机组组合方面,本书介绍了机组组合与经济调度的区别,旋转备用的建模,以及多种求解方法,包括优先列表法、拉格朗日松弛法、混合整数规划法等;最优潮流方面,本书介绍了基于直流潮流的最优潮流模型和基于交流潮流的最优潮流模型,以及包括线性规划、二次规划在内的求解方法。

本书也涵盖了电力行业在仿真计算、分析和市场结构方面近 20 年来的最新发展成果,如节点电价(LMP)、PJM 电力市场的竞价模型、使用同步相量测量单元(PMU)的状态估计等,因此也具有很强的现实意义和很高的实用价值。例如,电力市场方面,本书介绍了电价理论、节点电价的计算、合约类型以及电网输电能力的计算。

第三版中加入了大量涉及当前电力系统和电力市场最新理论、方法和技术的內容,增加了算例和 MATLAB 仿真程序,适合作为全国各研究型大学电气工程系的高年级本科和研究生教材,以及广大电

力科研工作人员的参考用书。

对于本书第三版中文版的顺利出版,我们要特别感谢清华大学出版社王一玲编辑和 Wiley 中国对促成此事所做的工作和努力。本书的完成也离不开译者家属的全力支持,在此也对她们一并表示感谢。

本书由柏瑞翻译序言及第 1~4 章,倪明翻译第 5~8 章,陈谦和丁涛翻译第 9~12 章,全书由柏瑞统稿。限于译者的水平,错译之处难免存在,欢迎广大读者不吝指教。

译 者

于 2017 年 10 月

## 第三版序言

自从本书第二版出版以来已经有 17 个年头了(如果从第一版算起,至今则已经有 28 年了)。这么多年来发生了太多的变化。在本书开头的献词中已经提到,Allen Wood 在第三版的筹备过程中已经过世,而一位新作者——Gerald Sheblé 加入进来,与 Bruce Wollenberg 一同撰写此书。Sheblé 博士带来了与 Wollenberg 博士既相似又不同的专业经验,从而扩展了本书的覆盖范围。

第二版于 1996 年出版,当时正值美国和全世界电力工业在“解除管制”或者更确切地说是“重新管制”。现在,像电力现货市场、美国的独立系统运行员(ISOs),独立的发电、输电和配电公司等等新概念都已经很普遍了。随着电力市场的扩展,电力系统控制中心得以增大,覆盖着大得多的区域。由于电力公司对电力系统可靠性和安全性的影响,自从“9·11”事件以后,美国政府已经和北美电力可靠性公司(也就是曾经的北美电力可靠性委员会)展开合作,对电力公司的运行实践开始了更加严格的管理。

与本书第二版相比,第三版加入了几个新的章节。一方面是由于那些话题逐渐变得越来越重要,另一方面是为了提高本书在教育 and 工程方面的价值。Sheblé 和 Wollenberg 作为著名大学的教授,也是电力行业的顾问专家,为本教材编制了新算例、习题和软件,希望对广大读者有所帮助。

在今天,学生和工程师们都可以通过互联网接触到大量的信息。如果他们是 IEEE 会员,甚至可以从自己的家里或者办公室的计算机来获取 IEEE Xplore 数据图书馆的大量收藏。基于这个原因,本书采用与之前版本不同的做法,就是不再增补更多的参考文献了。

此外,还要感谢我们的学生,他们一边在我们的指导下从事科研工作,一边用优秀的编程和开发技巧来解决困难的问题。他们之中,有明尼苏达大学的 Mohammad Alsaffar 和 Anthony Giacconi; 奥本大学的 George Fahd, Dan Richards, Thomas Smed 和 David Walters; 爱荷华州立大学的 Darwin Anwar, Somgiat Dekrajangpetch, Kah-Hoe Ng, Jayant Kumar, James Nicolaisen, Chuck Richter, Douglas Welch, Hao Wu 和 Weiguo Yang; 波特兰州立大学的 Chin-Chuen Teoh, Mei P. Cheong 和 Gregory Bingham; 南威尔士大学的 Zhenyu Wan。

最后,我们还想宣布写下一个版本的计划。在下一个版本中,除了对主要章节进行扩充,比如扩展的拍卖机理、可靠性等,我们还将涉及电力工业商业运作的诸多方面。

Bruce F. Wollenberg

Gerald B. Sheblé

## 原作者对中文版的祝愿

原作者在给译者柏瑞博士的电子邮件中,给予中文版良好的祝愿如下:

我们欢迎本书中文版的出版,也希望此书对中国的工程师能有所裨益。

——Bruce F. Wollenberg, Gerald B. Sheblé

## 第二版序言

自从本书第一版问世以来已经有 11 个年头了, 书中所涉及的领域都出现了很多新进展, 传统的老问题已经可以用新技术来解决。计算能力得到迅猛提高, 使得曾经被认为计算量太大的问题也得以解决。其中, 最重要的进展也许是电力工业中新出现的非电力公司一类的参与者在运行决策中开始扮演更重要的角色。

本书作者的目的是仍然是以本书给大四学生或者工程专业一年级研究生提供本领域的介绍。虽然本书作为一学期(或者两个四分之一学期)的教材已经有很多年了, 但仍然存在着同样的困难和折中考虑。工程专业的学生很熟悉计算机, 但是通常并不理解人和经济因素如何互动来制定各种“最优”计划。1995 年, 大多数学生同时学习高等微积分和求解潮流方程的课程。这就需要适当的协调。此外, 我们也发现非常少的学生接触过运筹学的技术和概念, 因此, 让他们不断地熟悉优化方法的应用就显得非常有必要。本书所涉及的内容就是将优化理论应用于重要工业系统的一个极好例子。

第二版中涉及的议题以及深度和第一版基本相同, 只有一个重大变化。网损公式占了更少的篇幅, 相应得到补充的是, 在新增加的一章中更完整地介绍基于潮流技术的最优潮流(OPF)。这是本书的最后一章。对有些教师而言, 提前介绍这一章的内容也许更合适。这可以根据个人喜好以及与其他课程的协调来定(如果学生还没有接触过求解潮流方程的常用方法, 那么对 OPF 的讨论就会比较困难)。

机组组合加入了拉格朗日松弛技术。发电成本这一章改变了侧重点, 并且介绍了新方法。批量电力交易的市场结构在全世界都发生了重要的变化, 而互联系统交易这一章就是一个“进度报告”, 意在让学生了解和竞争性发电市场相关的复杂性。安全分析一节也得到了更新, 介绍了对定界技术和其他预想事故选择方法的使用。第 13 章中简要介绍了带安全约束的 OPF 以及在安全控制中的应用。

本书作者感谢使用过第一版并提出宝贵建议和帮助的教授, 以及我们的学生(许多建议已经被吸纳入书中, 还有一些没有, 主要是由于时间、篇幅或者知识水平的原因为)。伦斯勒理工学院(RPI)和明尼苏达大学的许多学生都对本书第一版的修正做出了贡献, 并且花了大量时间来计算出作业的答案, 核对旧的算例, 以及为第二版的新算例准备数据。RPI 1994 级的学生特别值得一提: 他们承担了校对第 8 章草稿的烦冗工作, 并且完成得非常出色, 发现了 10~15 年来一直存在的错误(借此提醒任何一个打算写书的教授, 写书需要比你想象中要多得多的工作量, 此外, 还取决于你是否喜欢 20 个挑剔的编辑来审查你最新的著作)。

感谢 Power Technologies 公司的 Kuo Chang, 他做了第 10 章中的节点边际转运成本算例的计算, 同样感谢 Power Computer Applications 公司的 Brian Stott, 他做了第 13 章中的 OPF 算例。

Allen J. Wood

Bruce F. Wollenberg



# 第一版序言

本书的根本目标是介绍和探讨电力公司在发电和输电系统的规划、运行和控制方面的工程和经济问题。本书可供电力工程专业一年级的研究生使用。我们相信,本书也非常适合自学,适合任何接受过电力工程大学教育以及有稳态电力分析基础的人士。

本书汇集了自从1966年以来在伦斯勒理工学院(RPI)电力工程系教授研究生课程所逐渐发展出的材料。书中的议题有效地向研究生介绍了如何将高等数学和运筹学方法应用于实际电力工程问题。有些内容涵盖了当今正在发电和输电系统使用的方法。当然,毋庸讳言,选题在总体上反映了作者的喜好。

对于一个学期的课程而言,几乎不可能涉及该领域的所有问题和“当前实践”。因此,我们只能介绍那些问题的类型,阐述理论和实践的计算方法,并且引导学生往正确的方向去寻找更多的信息以及培养需要的高级技能。

因为需要对高级微积分方法(比如拉格朗日乘子)和基本的大学控制理论有所了解,书中的内容常常被用于一年级研究生课程第二学期的教学。由于求解实际问题的需要,本书对优化方法也做了介绍,并且在不用寻求大量的数学证明的情况下使用。本教材用于工程课程,因此,数学严谨性虽然重要,但更多的是应用数学或者理论数学课程的范畴。除了第12章,本书的章节都是自我完备的,这是因为各种有关的应用数学技术都在需要用到的章节中给予了介绍。第12章是状态估计,可能需要超出本书所提供的有关统计和概率方法的知识。

前7章的安排采用了很自然的顺序,而其后的每一章都进一步介绍了发电计划问题和新求解技术。

第8章讨论用在发电系统规划中的方法,并且介绍燃料消耗和发电成本计算的概率技术。第8章是独立的一章,可以在完成前7章之后的任何时候学习。

第9章介绍了发电控制,并且讨论了当代美国电力公司和联营体的实践。我们试图在这一章中描绘出一个整体架构,来说明电力控制系统的不同部分是如何在一起协同工作的。

第10章讨论了互联电力公司之间协调经济运行时可能出现的电力公司之间的能量和容量交换以及经济计划问题。

第11章和第12章是一个整体。第11章涉及电力系统安全,构建了用于控制和增强大规模电力系统安全性的分析框架。任何系统,包括电力系统,都有失效的可能。电力系统安全实践的目的在于试图将电力系统控制和运行在防御状态,从而将这些不可避免的失效所带来的影响最小化。

第12章介绍了在电力系统中使用的状态估计。由于诸如权重函数的定量测量在形成过程中自然出现,因此我们选择了最大似然估计方法。

每一章都带有一套习题和带有注释的参考文献列表以供进一步阅读。许多(甚至大部分)习题都需要计算机来求解。在RPI,我们给学生提供了一些基本程序(比如潮流程序和火电机组调度程序)。如今的工程专业学生已经得到了充分的训练,可以有效地使用计算机。大规模电力系统的实际问题往往

会引发 Bellman 博士所提出的维数灾难,因此计算机是解决实际规模问题的必要元素。

本书作者向 K. A. Clements, H. H. Happ, H. M. Merrill, C. K. Pang, M. A. Sager 和 J. C. Westcott 致谢,他们分别审阅了本书草稿的一部分,并提出了宝贵建议。此外, Clements 博士将本书的早期版本用于伍斯特理工学院(Worcester Polytechnic Institute)的研究生课程,以及用于在马萨诸塞州的波士顿给电力工程师讲授的一门课程。

本书中的许多材料都来源于我们过去和现在的同事所完成的工作,包括 Power Technologies 公司、通用电气公司和 Leeds and Northrup 公司。许多 IEEE 文献是本书的主要参考资料,并且在适当的时候被引用。不过,难免会有重要的但是被遗漏的参考文献和资料。对于读者喜爱的但是没有被引用的文献,敬请读者谅解。感兴趣的读者可以很容易根据参考文献追溯到原始的资料。

我们感谢 Liane Brown 和 Bonnalyne MacLean 非常出色的打字工作。

谨以本书献给我们所有的老师,包括教授和助理,特别献给 E. T. B. Gross 博士。

Allen J. Wood

Bruce F. Wollenberg

# 致 谢

我非常感激这些鼓励我引导我的导师：Homer Brown、Gerry Heydt、Pete Sauer、Ahmed El-Abiad, K Neal Stanton、Robin Podmore、Ralph Masiello、Anjan Bose、Jerry Russel、Leo Grigsby、Arun Phadke、Saifur Rahman、Aziz Fouad、Vijay Vittal 和 Mani Venkata, 他们总是在恰当的时机, 从非常好的角度, 给我的发展提供了建议。我的合著者 Bruce 在过去的几十年中一直给我指导并保持友谊。我非常幸运地有机会与许多合作者一起工作, 并学习和体验到不同的观点。我要特别感谢 Arnaud Renaud, Mark O'Malley, Walter Hobbs, João Abel Peças Lopes, Manuel Matos, Vladimiro Miranda, João Tomé Saraiva, Vassilios G. Agelidis。

Gerald B. Sheblé

### 关于本书配套的网站

明尼苏达大学提供了一套电力系统及有关领域的网上课程,其中一个课程是以本书为基础的。要获取更多的信息,请访问 <http://www.cusp.umn.edu> 并点击课程的链接。

本书提供针对学生的额外教学资源以及针对教师的解题答案,请访问 <http://www.wiley.com/go/powergenoperation>。

# 目录

<b>第1章 引言</b> .....	1
1.1 课程目的 .....	1
1.2 课程范围 .....	1
1.3 经济的重要性 .....	2
1.4 解除管制：从垂直到水平 .....	2
1.5 新的问题和旧的问题 .....	2
1.6 蒸汽机组的特性 .....	4
1.6.1 蒸汽机组特性的变化形式 .....	6
1.6.2 联合循环机组 .....	7
1.6.3 热电联产电厂 .....	8
1.6.4 轻水慢化核反应堆机组 .....	9
1.6.5 水电机组 .....	10
1.6.6 储能 .....	11
1.7 可再生能源 .....	12
1.7.1 风力 .....	13
1.7.2 切入风速 .....	13
1.7.3 额定输出功率和额定输出风速 .....	13
1.7.4 切出风速 .....	13
1.7.5 风机效率或者功率系数 .....	13
1.7.6 太阳能 .....	14
附录 1A 典型发电机数据 .....	15
附录 1B 化石燃料的价格 .....	16
附录 1C 机组统计数据 .....	17
参考文献 .....	18
进一步阅读 .....	18
<b>第2章 电力工业组织结构、管理 经济学和金融学</b> .....	22
2.1 引言 .....	22
2.2 商业环境 .....	22
2.2.1 管制环境 .....	23
2.2.2 竞争性市场环境 .....	23
2.3 企业理论 .....	25
2.4 竞争市场方案 .....	26

2.5 供应商方案 .....	28
2.5.1 供应商成本 .....	29
2.5.2 单个供应商曲线 .....	29
2.5.3 竞争环境 .....	29
2.5.4 不完全竞争 .....	32
2.5.5 其他因素 .....	33
2.6 电能生产的成本 .....	34
2.7 市场演变 .....	35
2.8 多公司环境 .....	37
2.8.1 Leontief 模型：输入-输出经济学 .....	37
2.8.2 稀缺燃料资源 .....	37
2.9 不确定性和可靠性 .....	39
习题 .....	39
参考文献 .....	39
<b>第3章 火电机组的经济调度及 求解方法</b> .....	40
3.1 经济调度问题 .....	40
3.2 带分段线性成本函数的经济调度问题 .....	43
3.3 线性规划方法 .....	44
3.3.1 分段线性成本函数 .....	44
3.3.2 用线性规划求解经济调度问题 .....	44
3.4 Lambda 迭代法 .....	46
3.5 用二分法求解经济调度问题 .....	48
3.6 用动态规划求解经济调度问题 .....	49
3.7 复合发电机生产成本函数 .....	52
3.8 基准点和参与因子 .....	54
3.9 考虑网损的火电系统调度 .....	56
3.10 节点电价的概念 .....	58
3.11 拍卖机制 .....	61
3.11.1 PJM 增量价格拍卖的图解 .....	61
3.11.2 拍卖理论导论 .....	63
3.11.3 拍卖机制简介 .....	64
3.11.4 英式拍卖(第一价格公开 叫价=上升式) .....	65

3.11.5 荷兰式拍卖(下降式) .....	66	5.9.2 梯级水力发电(水力的耦合) .....	143
3.11.6 第一价格暗标拍卖 .....	67	5.9.3 抽水蓄能水电站 .....	145
3.11.7 Vickrey(第二价格暗标拍卖) .....	67	5.10 使用线性规划的水电调度 .....	147
3.11.8 全体支付拍卖(例如劝说活动) .....	68	附录 5A 水火电系统调度的动态规划法 .....	149
附录 3A 带约束的优化 .....	68	习题 .....	155
附录 3B 线性规划 .....	76	<b>第 6 章 输电系统的影响</b> .....	162
附录 3C 非线性规划 .....	83	6.1 引言 .....	162
附录 3D 动态规划 .....	83	6.2 将设备参数转化为母线和支路的参数 .....	164
附录 3E 凸规划 .....	89	6.3 变电站母线的处理 .....	164
习题 .....	91	6.4 设备模型 .....	166
参考文献 .....	97	6.5 用于运行规划的调度员潮流 .....	167
<b>第 4 章 机组组合</b> .....	98	6.6 能量守恒定律(特勒根定理) .....	168
4.1 引言 .....	98	6.7 常用的潮流技术 .....	168
4.1.1 经济调度和机组组合 .....	98	6.8 用增广雅可比矩阵的牛顿-拉夫逊法 .....	169
4.1.2 机组组合中的约束 .....	101	6.9 理论推导 .....	171
4.1.3 旋转备用 .....	101	6.10 交流系统控制建模 .....	172
4.1.4 火电机组约束 .....	102	6.11 本地电压控制 .....	172
4.1.5 其他约束 .....	103	6.12 输电线路与变压器的建模 .....	172
4.2 机组组合求解方法 .....	103	6.12.1 输电线路潮流方程 .....	172
4.2.1 优先顺序法 .....	104	6.12.2 变压器潮流方程 .....	173
4.2.2 拉格朗日松弛法 .....	105	6.13 高压直流输电线路 .....	173
4.2.3 混合整数线性规划 .....	111	6.13.1 高压直流换流器和柔性交流 输电设备的建模 .....	174
4.3 安全约束机组组合 .....	112	6.13.2 高压直流换流器中角度关系的 定义 .....	174
4.4 使用机组组合做每日拍卖 .....	112	6.13.3 六极高压直流换流器的功率方程 .....	175
附录 4A 非凸问题的对偶优化 .....	112	6.14 雅可比矩阵处理方法简介 .....	176
附录 4B 机组组合的动态规划解 .....	115	6.15 交流潮流计算实例 .....	177
4B.1 引言 .....	115	6.16 解耦潮流算法 .....	180
4B.2 前向动态规划法 .....	115	6.17 高斯-赛德尔法 .....	182
习题 .....	122	6.18 “直流”潮流或线性潮流 .....	183
<b>第 5 章 有限能源供应条件下的发电</b> .....	125	6.18.1 直流潮流计算 .....	184
5.1 引言 .....	125	6.18.2 六节电系统直流潮流计算实例 .....	184
5.2 燃料调度 .....	125	6.19 用于高压直流输电的统一变量消去法 .....	185
5.3 “照付不议”燃料供应合同 .....	126	6.19.1 对简化雅可比矩阵的修改 .....	185
5.4 复杂“照付不议”燃料供应模型 .....	129	6.19.2 控制模式 .....	186
5.5 线性规划求解燃料调度 .....	130	6.19.3 解析消去 .....	186
5.6 水火电协调问题 .....	135	6.19.4 控制模式切换 .....	188
5.6.1 长期水电调度 .....	136	6.19.5 双极和 12 脉波换流器 .....	188
5.6.2 短期水电调度 .....	136	6.20 输电线路损耗 .....	188
5.7 水力发电厂模型 .....	136	6.20.1 双机系统范例 .....	188
5.8 规划问题 .....	138	6.20.2 协调方程、增量损耗和惩罚因子 .....	190
5.8.1 规划问题的类型 .....	138	6.21 参考节点惩罚因子的讨论 .....	191
5.8.2 能量规划 .....	138	6.22 用交流潮流算法直接求解节点 惩罚因子 .....	192
5.9 水火电系统调度问题 .....	141	习题 .....	193
5.9.1 带有储量限制的水力调度 .....	141		

<b>第 7 章 电力系统的安全性</b> .....	197	8.12.1 使用 DC 潮流和二次规划的安全 约束 OPF .....	260
7.1 引言 .....	197	8.12.2 DC 潮流 .....	260
7.2 影响电力系统安全性的因素 .....	200	8.12.3 线路潮流限制 .....	261
7.3 预想事故分析: 系统问题检测 .....	200	8.12.4 预想故障潮流限制 .....	261
7.3.1 发电机停运 .....	200	附录 8A 内点法 .....	265
7.3.2 输电线停运 .....	201	附录 8B 12 节点系统的数据 .....	267
7.4 安全分析概述 .....	204	附录 8C 线路潮流灵敏度因子 .....	268
7.4.1 功率传输分布因子 .....	204	附录 8D AC 潮流的线性灵敏度分析 .....	270
7.4.2 线路开断分布因子 .....	205	习题 .....	271
7.5 使用潮流关口监测电力传输 .....	210	<b>第 9 章 电力系统状态估计</b> .....	274
7.6 电压崩溃 .....	211	9.1 引言 .....	274
7.6.1 交流潮流算法 .....	212	9.2 对状态估计的初步认识 .....	274
7.6.2 事故筛选 .....	213	9.3 最大似然加权最小二乘估计 .....	276
7.6.3 同心松弛 .....	216	9.3.1 原理简介 .....	276
7.6.4 边界 .....	217	9.3.2 最大似然估计法的概念 .....	277
7.6.5 自适应定位 .....	217	9.3.3 矩阵形式的推导 .....	280
附录 7A 交流潮流案例 .....	218	9.3.4 加权最小二乘法的算例 .....	282
附录 7B 系统的灵敏度因子计算 .....	226	9.4 交流网络的状态估计 .....	284
7B.1 PTDF 因子计算 .....	226	9.4.1 方法推导 .....	284
7B.2 计算 LODF 因子 .....	228	9.4.2 典型算例分析 .....	287
7B.3 PTDF 因子的补偿法 .....	230	9.5 基于正交分解的状态估计 .....	290
习题 .....	231	9.6 针对状态估计的深入讨论 .....	294
参考文献 .....	236	9.6.1 状态估计中的误差来源 .....	294
<b>第 8 章 最优潮流</b> .....	237	9.6.2 不良测量数据的检测和鉴别 .....	295
8.1 引言 .....	237	9.6.3 无量测量时的状态估计 .....	301
8.2 经济调度方程 .....	237	9.6.4 可观测性与伪测量数据 .....	302
8.3 结合经济调度和潮流计算的最优潮流 .....	238	9.7 相量测量单元 .....	305
8.4 使用 DC 潮流的最优潮流 .....	240	9.8 状态估计的工程应用 .....	307
8.5 直流潮流 OPF 的解法实例 .....	240	9.9 基于状态估计的数据校验 .....	309
8.6 考虑输电线路限制的 DCOPF 实例 .....	244	9.10 电力系统调控中心概述 .....	309
8.7 DCOPF 的通用解法 .....	246	附录 9A 最小二乘方法的详细推导 .....	310
8.8 在线性规划中增加线路潮流约束 .....	247	9A.1 超定情况 .....	310
8.9 ACOPF 的解法 .....	249	9A.2 完全确定情况 .....	313
8.10 求解 ACOPF 的算法 .....	249	9A.3 欠定情况 .....	313
8.10.1 网络方程的对比 .....	249	习题 .....	314
8.10.2 算法 .....	250	<b>第 10 章 发电控制</b> .....	317
8.10.3 迭代 LP .....	250	10.1 引言 .....	317
8.11 LMP、增量网损和线路潮流约束之间的 关系 .....	255	10.2 发电机模型 .....	318
8.11.1 没有线路在极限值处运行时的 节点边际价格 .....	255	10.3 负荷模型 .....	320
8.11.2 有一条线路在极限值运行时的 节点边际价格 .....	256	10.4 原动机模型 .....	321
8.12 安全约束的 OPF .....	258	10.5 调速器模型 .....	321
		10.6 联络线模型 .....	324
		10.7 发电控制 .....	327

10.7.1 补偿控制	327	12.3 负荷模型	380
10.7.2 联络线控制	327	12.4 电价预测	381
10.7.3 出力分配	329	12.5 预测误差	381
10.7.4 自动发电控制	331	12.6 系统识别	382
10.7.5 AGC 的功能简介	333	12.7 计量经济模型	382
10.7.6 NERC 发电控制标准	333	12.7.1 线性环境模型	382
习题	334	12.7.2 天气敏感性模型	384
参考文献	336	12.8 时间序列模型	385
<b>第 11 章 交换、联营、经纪和拍卖</b>	<b>337</b>	12.8.1 考虑季节性成分的时间序列模型	385
11.1 引言	337	12.8.2 自回归模型	387
11.2 交换合约	338	12.8.3 滑动平均模型	388
11.2.1 能量合约	338	12.8.4 自回归滑动平均线法	388
11.2.2 动态能量合约	340	12.8.5 自回归积分滑动平均模型(ARIMA)	389
11.2.3 紧急合约	340	12.8.6 其他相关模型	390
11.2.4 基于市场合约	341	12.9 时间序列模型的建模	390
11.2.5 输电线使用合约	341	12.9.1 基础负荷模型	390
11.2.6 可靠性合约	345	12.9.2 长期趋势模型	391
11.3 电力公司之间的能量交换	346	12.9.3 线性回归方法	391
11.4 电力公司间经济能量交换评估	348	12.9.4 季节性模型	392
11.5 考虑机组组合的区域间功率交换的 评估	349	12.9.5 平稳性	392
11.6 多个电力企业间互联交易——过网	349	12.9.6 WLS 估计	393
11.7 电力联营	351	12.9.7 阶数和方差的估计	394
11.8 能量经纪人系统	353	12.9.8 尤尔-沃克方程	395
11.9 输电能力的一般问题	355	12.9.9 德宾-莱文森算法	396
11.10 可用传输容量和潮流关口	357	12.9.10 MA 和 ARMA 过程中的新息估计	399
11.10.1 定义	357	12.9.11 ARIMA 的全过程	400
11.10.2 评估过程	359	12.10 人工神经网络	402
11.10.3 ATC 计算方法	360	12.10.1 人工神经网络概述	403
11.11 安全约束机组组合	366	12.10.2 人工神经元	403
11.11.1 负荷与发电的现货市场拍卖	367	12.10.3 神经网络的应用	403
11.11.2 两个方程的特性	368	12.10.4 霍普菲尔德神经网络	404
11.11.3 拉格朗日乘子的意义	368	12.10.5 前馈网络	404
11.11.4 日前市场调度	369	12.10.6 反向传播算法	406
11.12 使用网络线性规划的竞价模拟	369	12.10.7 内点线性规划算法	408
11.13 密封投标的分散拍卖	369	12.11 模型整合	408
习题	373	12.12 负荷预测	409
<b>第 12 章 短期负荷预测</b>	<b>377</b>	12.12.1 每小时的系统负荷预测	409
12.1 引言	377	12.12.2 单步的前向预测	409
12.2 分析方法概述	379	12.12.3 每小时的节点负荷预测	410
		12.13 总结	410
		习题	410
		参考文献	412



# 第 1 章 引 言

## 1.1 课程目的

作为一门研究生一年级覆盖一学期的发电、运行和控制课程,其教学目标包括:

- 使电力工程专业的学生熟悉电力发电系统及其经济运行和控制。
- 让学生了解火力和水力发电系统的“终端”(terminal)特性。
- 介绍数学优化方法,并且应用到实际运行问题中。
- 介绍用于解决涉及经济分析和网络分析等复杂问题的方法,并且通过较为简单的示例来说明这些方法。
- 介绍在发电系统的现代控制系统中用到的方法。
- 介绍“最新议题”,即正在进行着重要的、革命性变化的电力系统运行领域。这包括用新的方法来解决旧的问题,以及那些由于在系统发展模式、管制结构和经济学方面的变化所产生的新问题。

## 1.2 课程范围

本课程涉及的议题包括:

- 发电特性。
- 作为商业的电力工业。
- 经济调度以及常规经济调度问题。
- 火电机组经济调度和求解方法。
- 带约束的优化。
- 优化方法,包括线性规划、动态规划、非线性优化、整数规划,内点法优化。
- 输电系统的影响。
  - 潮流方程和解。
  - 输电网损。
  - 对发电计划的影响。
- 机组组合问题和求解方法。
  - 动态规划。
  - 拉格朗日松弛法。
  - 整数规划。
- 包括化石燃料电厂和水电厂在内的有限能量供给系统的发电计划,将能源通过诸如管道、铁路网络、河流/水库系统来传输的网络系统,以及电力系统安全技术。
- 最优潮流技术。
- 电力系统状态估计。