



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

电力系统频率 鲁棒控制 (原书第2版)

**Robust Power System Frequency Control
(Second Edition)**

[伊朗] 哈桑·贝朗尼 (Hassan Bevrani) 著

李勇 刘芳 曹一家 译

Power Electronics and Power Systems

Hassan Bevrani

**Robust Power
System
Frequency
Control**

Second Edition

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



 Springer

国际电气工程先进技术译丛

电力系统频率鲁棒控制

(原书第2版)

[伊朗] 哈桑·贝朗尼 (Hassan Bevrani) 著

李勇 刘芳 曹一家 译

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统频率鲁棒控制 / [伊朗] 哈桑·贝朗尼 (Hassan Bevrani) 著; 李勇, 刘芳, 曹一家译. —北京: 机械工业出版社, 2018.8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Robust Power System Frequency Control (Second Edition)

ISBN 978-7-111-54071-7

I. ①电… II. ①哈…②李…③刘…④曹… III. ①电力系统—自动控制—教材

IV. ①TM712.6

中国版本图书馆CIP数据核字 (2018) 第140228号

机械工业出版社 (北京) 出版发行 北京市西城区百万庄大街24号 邮政编码: 100037

责任编辑: 张倩倩 封面设计: 任燕
责任校对: 刘静 印刷: 北京印刷厂

北京印刷厂印刷

北京市丰台区右安门外大街50号 机械工业出版社

机械工业出版社

本书系统地讲解了电力系统负荷频率鲁棒控制方法,讨论了市场管制条件下的频率控制问题,介绍了风力发电等可再生能源发电系统参与电网频率调节的方法、微电网的频率控制方法以及虚拟同步发电机的频率控制方法。本书含有大量的频率控制器设计与实时仿真实例,内容翔实,覆盖面广。本书可作为从事电力系统工作的工程技术人员的参考书,也适合作为高等院校电力系统运行与控制、新能源发电技术及其他相关专业的教学辅导书或自学教材。

Translation from English language edition:

Robust Power System Frequency Control by Hassan Bevrani

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2014

Springer is part of Springer Science + business Media

All Rights Reserved

This title is published in China by China Machine Press with license from the Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-2051号

图书在版编目(CIP)数据

电力系统频率鲁棒控制:原书第2版/(伊朗)哈桑·贝朗尼(Hassan Bevrani)著;李勇,刘芳,曹一家译.—北京:机械工业出版社,2016.8
(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Robust Power System Frequency Control (Second Edition)

ISBN 978-7-111-54071-7

I. ①电… II. ①哈…②李…③刘…④曹… III. ①电力系统-自动频率控制-鲁棒控制 IV. ①TM761

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第140228号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:任鑫

责任校对:刘怡丹 封面设计:马精明

责任印制:常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2016年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·22印张·426千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54071-7

定价:99.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

频率是电力系统运行质量和安全状态的一个重要指标。电网频率监测与控制对于保障电力系统的安全、经济运行具有重要的现实意义。随着风电、光伏发电等新能源发电的分布式、规模化并网，以及电动汽车充电站/桩的广泛应用，电力系统的频率稳定问题在产生机理、作用机制、表征形式以及影响范围等方面出现了新的变化，这给传统意义上的频率稳定控制带来了新的挑战。

目前，专门研究新形势下电力系统频率稳定与控制的书籍甚少，本书是国际上不可多得的一本专门研究电力系统频率鲁棒控制的著作，阐述了一系列实用的、具有灵活调节性能的频率控制算法，并给出了翔实的控制系统设计与仿真实例。希望本书的翻译能对我国电力系统频率控制方面的研究有所帮助。

本书是根据原书第2版的内容翻译成稿的。全书共有12章，其中，李勇教授负责翻译了第1、2、3、11、12章，刘芳博士负责翻译了第4、5、6、9、10章，曹一家教授负责翻译了第7、8章。研究生贺悝、张文丹、万程、刘宏、李然然对本书译稿进行了大量的整理工作，在此一并表示感谢。另外，本书的翻译出版得到了国家自然科学基金（51520105011和61233008）、科技部国际合作项目（2015DFR70850）、湖南省科技重大专项（2015GK1002）、湖湘青年英才项目（2015RS4022）的支持，在此也一并表示感谢。

需要说明的是，原书中存在一些明显的笔误或印刷错误，本书对此都进行了改正。由于时间仓促，且限于译者水平，译文中难免存在翻译不准确或者不正确的地方，欢迎专家、读者给予批评指正。

李 勇 湖南大学
刘 芳 中南大学
曹一家 湖南大学

原 书 序

过去二十年间，电力行业宽松管制变革以及智能电网的出现使电网发生了巨大的变化，同时也给电力行业带来了许多挑战。一个重要的挑战便是在各种不同的运行条件下维持频率的稳定性。类似风能、太阳能等新能源的参与，以及微网和储能装置的并网给频率控制带来很大挑战。广域测量系统（WAMS）的使用为系统频率的监测和控制提供了新的可能性。

在电力系统频率控制领域，本书作为 Bevrani 教授 2009 年第 1 版著作的修订新版，在解决上述问题方面做了有益的补充。Bevrani 教授对电力系统频率控制问题的深刻见解使本书无论是对电力从业人员还是科研工作者都大有裨益。本书重点介绍了不同运行条件下电力系统频率控制的实时仿真、设计以及最优优化方法，分析了新能源的加入对电网运行阻尼的影响，并提出了新的解决方案。

Bevrani 教授愿与世界各地的研究人员积极互动交流，以期本书能受到广大读者的喜爱。

M. A. Pai

学大南暨 曹 幸

学大南中 袁 校

学大南暨 袁一曹

原书前言

频率控制是电力系统设计与运行中的一个重要的控制问题,并且随着电力系统规模的扩大、结构的改变、新型分布式可再生能源的浮现及其不确定性、环境的限制以及电力系统的复杂性,频率控制对现今的意义日益重大。

在过去的二十多年,很多的研究都集中在下垂控制和电压的稳定性等问题上,很少有对电力系统频率控制分析与综合的相关工作开展。在已经有一些单独的章节、很多的会议及专业论文对频率控制的某些方面进行了阐述的基础上,作者决定编写一部综合的、合理的、具有实践指导意义的电力系统频率鲁棒控制类书籍,并于2009年出版了《电力系统鲁棒频率控制》。时隔几年,在积累了大量的笔记以及来自世界各地的读者和出版商有价值的反馈的同时,思及近几年有关领域面临的挑战和取得的发展,作者决心对本书进行修订再版。

作为电力系统频率控制在工业领域参考的最新标准,本书为分布式发电和可再生能源在现代电网中逐步升高的地位带来的技术挑战提供了新的解决方案;解释了频率控制回路在现代电力系统中扮演的角色,包括一次回路、二次回路、三次回路和紧急控制回路。特别基于在含有少量或不含旋转惯量的分布式/可变化单元逐渐构成主要电网的环境下,考虑了低惯量和下垂特性对分布式和可再生能源逐渐渗透的系统频率的影响,指出了大部分基于同步发电机的传统频率控制是无效的,并提及在引人关注的微网领域中频率稳定和控制的课题。

电力系统频率鲁棒控制意味着该控制必须提供一个充分最小化的系统频率和连接线路的功率偏差,并使安全界限覆盖所有的运行状态和可能的系统配置。本书频率鲁棒控制的主要目标是:基于基础的频率调控内容,结合强大的鲁棒控制理论及工具,针对多区域电力系统提出一种新的频率控制综合理论。本书提及的各类控制技术涉及下述所有的说明或者是几种结合:

鲁棒性: 保证大范围运行情况下的鲁棒稳定性和鲁棒特性。为了达到该目的,将鲁棒控制技术应用到综合分析的过程中。

分散特性: 在新的电力系统环境中,对大规模多区域频率控制综合的数字化或实际地实施的集中化设计是比较困难的。由于分散频率控制的实用性优势,在现实世界电力系统的应用中重点强调了它的设计过程。

结构简单: 为了满足实用价值,提出大多数控制策略中的分散频率鲁棒控制设计问题被简化为低阶或比例积分控制问题的综合。这种简化思路被广泛应用在实际频率控制系统中。

不确定性及限制条件的简述:在电力系统模型及控制综合过程中,频率控制综合过程必须足够灵活以满足产生率限制、时延及不确定性等。所提出的方法提倡对系统进行物理的理解来完成频率鲁棒控制综合。

本书对电力系统各种运行状况下频率响应的基本规则进行了全面的阐述。它采用了简单的频率响应模型、控制结构和数学算法来适应现代鲁棒控制原理,结合频率控制问题和概念性说明。大多数成熟的控制策略是通过实时仿真进行验证的。计算机分析与设计的实用方法在这里得到了强调。

本书重点强调了电力系统频率控制设计在实际应用和工程应用中的问题,提供了对频率调控和鲁棒控制技术应用的概念性理解,主要目标是形成一种恰当的关于现实世界电力系统负荷频率鲁棒调控问题的直觉,而不仅仅是对复杂的数学分析方法的描述。

本书可供电力系统规划和操作的工程师和操作员,以及学术研究人员参考使用;也可以作为电气工程方向的本科生、研究生在电力系统动态特性、电力系统分析和电力系统稳定性及其控制等专业课程的补充教材。

本书提出的技术及算法构成了电力系统频率鲁棒调控的系统、快捷、灵活的设计方法论。成熟的控制策略是在面对众所周知的严格条件下能够平衡功率鲁棒/最优化控制理论与实用电力系统频率控制综合。

本修订版本包含12章和4个附录。

第1章对电力系统控制的各个方面进行介绍,强调了稳定性和现有控制方法的基本概念和定义,描述了各类电力系统控制的时间尺度和特性,解释了频率稳定和控制在重要性。

第2章介绍了实际功率和频率控制,包括其涉及的定义和基本概念。首先,全面介绍了包括一次回路、二次回路、三次回路的频率控制和紧急控制设计;然后分别对一次回路和二次回路进行了详细介绍,对二次控制(又称负荷频率控制)的控制机理在单一控制区域进行了第一次描述,并将其应用扩展到多区域频率控制系统中;最后,简要回顾了其他频率控制文献的研究成果。

第3章介绍了含有一次和二次回路的电力系统的频率控制特性和动态特性。首先,全面介绍了一次、二次、三次和紧急控制的频率响应模型;然后介绍了它们的动态和静态特性,重点强调了一些物理限制对电力系统频率控制特性的影响,如产生率、死区、时延以及不确定性等。

第4章提出一种分散式控制方法,采用成熟的迭代线性矩阵不等式(ILMI)算法设计基于比例积分(PI)的负荷频率鲁棒控制方法,应用了 H_{∞} 的静态输出反馈控制。本章集中讨论了多区域电力系统中带有通信时延的基于PI的负荷频率鲁棒控制问题。在含有不同负荷频率控制设计的多区域电力系统中应用了所提出的方法,并测试了闭环控制系统。

第5章将基于比例积分的带有通信时延的频率控制转化为静态输出反馈鲁棒控制的最优化问题。采用 H_2/H_∞ 控制理论, 通过 ILMI 算法得到了假设设计目标的次最优解; 通过实验室仿真, 将提出的方法应用到电力系统的一个控制区域; 最后, 成功地应用遗传优化算法 (GA) 跟踪混合 H_2/H_∞ 控制器获得的鲁棒性能指标, 调节了鲁棒 PI 控制环。

第6章介绍了结构奇异值理论 (μ) 在分散式负荷频率鲁棒控制设计中的应用。在控制综合过程中恰当地考虑了系统的不确定性和实际应用条件的限制, 依据结构奇异值对系统的鲁棒性能进行表述以对其控制性能进行系统地估量; 介绍了一个基于模型预测控制的分散式频率鲁棒控制器的设计, 其中的模型预测控制器中采用了前馈控制策略以抑制负荷变化带来的影响; 该控制器被应用到三控制区域电力系统中, 并将应用效果与 ILMI-PI 鲁棒控制器进行对比。

第7章介绍了重组电力系统中频率控制问题的处理。首先, 简单介绍了频率调控市场; 然后, 仿真电力系统重构对频率调控带来的影响, 引入一个动态模型使得传统频率响应模型能够适应电力系统变化的运行环境; 提出一个适应于宽松的电力环境的基于主体的负荷频率控制器, 并已完成相应的实验室实时测试; 之后进一步提出了采用实用价值导向的学习分类系统和二分搜索法的两种频率控制综合法; 最后, 对经济频率控制的设计框架进行了说明。

第8章介绍了一个广义频率响应模型, 适合有重大干扰和紧急状况的电力系统的分析。首先, 恰当地考虑了紧急控制/保护的作用, 回顾了低频减载的策略, 强调了分散区域减载设计; 其次, 在三控制区域电力系统环境下仿真比较有针对性的减载与更为传统的共同分担减载; 最后, 强调了利用系统的电压和频率数据 [尤其在电力系统中有大量可再生能源 (RES) 接入的情况下] 生成有效的减载机制的必要性。

第9章就集成 RES 的电力系统中的关键问题进行了全面概述, 这在今天具有重要的意义。首先, 对本书提及的近几年研究成果中的一些最重要的问题进行简要回顾; 其次, 描述了 RES 对频率控制问题的意义, 引入一个新的频率响应模型; 然后, 分析了 RES 影响下电力系统的频率响应及相关问题, 强调了频率特性标准修订的需要; 最后, 对 RES 对频率控制的贡献建立一个总体框架。

第10章介绍了基于风能和频率调控的一些重大问题。首先, 回顾了相关领域的最新研究成果; 其次, 强调了由于大规模风电接入导致电力系统功率波动对频率响应带来的影响, 并引入先进控制综合方法论以解决该问题; 随后介绍了一些频率响应模型以讨论风机对电力系统频率控制的作用; 最后, 突出强调了 H_∞ 控制和模型预测控制等鲁棒控制技术通过惯性环节、一次回路和二次回路实现风机对频率调控的潜力。

第11章回顾了微网主要的控制概念, 作为未来智能电网的重要元素, 它们

在提高电网有效性、稳定性以及改善一些环境问题方面扮演着重要的角色。首先,将微网的控制环节分为局部环节、二次环节、整体环节和中心/紧急控制环节;其次,采用根轨迹法分析了微网的频率响应模型,讨论了各分布式发电机对频率调控的影响;最后,介绍了微网中对频率(电压)的广义下垂控制和几种智能/鲁棒控制方法论。

第12章利用近几年研究成果对虚拟同步发电机(VSG)概念上的一些重大问题进行了完善。首先,介绍了VSG最为关键的设计框架及拓扑;其次,对集成VSG的微网或电网的一些关键问题进行综述,它们的应用领域在今天有很大的利益;本章集中介绍了VSG在电网频率控制中的潜在价值;最后,强调了对更加灵活有效的VSG及其他相关领域进行进一步的研究必要性。

本书共分12章,第1章介绍电力系统频率控制的重要性,并指出频率控制是电力系统安全稳定运行的基础。第2章介绍电力系统频率响应的物理过程,并给出频率响应的数学模型。第3章介绍电力系统频率控制的基本原理,并给出频率控制的基本策略。第4章介绍电力系统频率控制的经典控制方法,并给出频率控制的经典控制器的设计方法。第5章介绍电力系统频率控制的现代控制方法,并给出频率控制的现代控制器的设计方法。第6章介绍电力系统频率控制的鲁棒控制方法,并给出频率控制的鲁棒控制器的设计方法。第7章介绍电力系统频率控制的智能控制方法,并给出频率控制的智能控制器的设计方法。第8章介绍电力系统频率控制的分布式控制方法,并给出频率控制的分布式控制器的设计方法。第9章介绍电力系统频率控制的自适应控制方法,并给出频率控制的自适应控制器的设计方法。第10章介绍电力系统频率控制的模糊控制方法,并给出频率控制的模糊控制器的设计方法。第11章介绍电力系统频率控制的神经网络控制方法,并给出频率控制的神经网络控制器的设计方法。第12章介绍电力系统频率控制的遗传算法控制方法,并给出频率控制的遗传算法控制器的设计方法。

本书可作为电力系统及其自动化专业及相关专业的教材,也可供从事电力系统及其自动化工作的工程技术人员参考。

本书由清华大学出版社出版,责任编辑为李霞,封面设计为李霞,印刷为李霞,装订为李霞,发行所地址为北京清华大学出版社,电话为010-62770175,网址为http://www.tup.tsinghua.edu.cn/。

本书在编写过程中参考了国内外许多文献,在此表示衷心的感谢。同时,感谢清华大学出版社编辑部的辛勤工作和大力支持,使本书得以顺利出版。最后,感谢家人的理解和支持,使本书得以顺利完成。

作者: 李霞

目 录

译者序	1
原书序	1
原书前言	1
第1章 电力系统控制综述	1
1.1 发展概述	1
1.2 不稳定性问题	2
1.3 控制系统	4
1.3.1 概述	4
1.3.2 控制运行状态	6
1.4 SCADA 系统	6
1.5 功角与电压控制	8
1.6 频率控制	9
1.6.1 频率控制的必要性	11
1.7 动态特性与时间常数	12
1.8 小结	13
参考文献	13
第2章 频率控制与有功补偿	16
2.1 频率控制回路	16
2.2 一次与二次调节回路	18
2.3 频率响应建模	19
2.4 互联电力系统频率控制	22
2.5 LFC 参与系数	27
2.6 频率运行标准	28
2.7 有功备用及其控制性能标准	30
2.7.1 有功备用/调节备用	30
2.7.2 性能控制标准	31
2.8 频率控制综合与分析综述	33
2.9 小结	34
参考文献	34
第3章 频率响应特征与动态特性	42
3.1 频率响应分析	42
3.2 状态空间动态模型	45

3.3 物理限制	49
3.3.1 发电机组出力速率与死区	49
3.3.2 延时	50
3.3.3 不确定性	51
3.4 综合频率响应模型	53
3.5 下垂特性	56
3.6 小结	57
参考文献	58
第4章 基于PI的频率鲁棒控制	60
4.1 H_{∞} -SOF 控制器设计	61
4.1.1 静止输出反馈控制	61
4.1.2 H_{∞} -SOF	61
4.2 问题描述和控制框架	63
4.2.1 从PI到SOF控制的变换	63
4.2.2 控制框架	63
4.3 ILMI 算法	66
4.3.1 算法改进	66
4.3.2 权系数选择	69
4.4 应用实例	69
4.4.1 算例研究	69
4.4.2 仿真结果	71
4.5 一种改进型可控输出向量	74
4.6 含时滞的频率调节	77
4.7 控制策略	79
4.7.1 时滞系统的 H_{∞} 控制	79
4.7.2 问题描述	80
4.7.3 基于 H_{∞} -SOF 的 LFC 设计	81
4.7.4 在三区域系统中的应用	82
4.8 实时仿真实验	83
4.8.1 电力系统仿真器	83
4.8.2 研究系统的配置	84
4.8.3 基于 H_{∞} -SOF 的 PI 控制器	86
4.9 实验结果	86
4.10 小结	88
参考文献	89
第5章 基于多目标控制的频率鲁棒调节	92
5.1 混合 H_2/H_{∞} 的技术背景	93

5.2	控制策略	94
5.2.1	基于多目标 PI 的 LFC 设计	94
5.2.2	不确定性建模	97
5.2.3	改进的 ILMI	97
5.2.4	权向量的选取 (μ_i, W_i)	100
5.2.5	三控制区域系统中的应用	100
5.3	讨论	100
5.4	实时仿真实验	102
5.4.1	研究系统的配置	102
5.4.2	PI 控制器	103
5.5	仿真结果	105
5.6	采用优化算法的跟踪鲁棒性能	109
5.6.1	多目标 GA	109
5.6.2	鲁棒性能跟踪	110
5.7	小结	112
	参考文献	112
第 6 章 μ 理论和 MPC 在频率综合控制中的应用		114
6.1	基于 μ 理论的序贯频率控制设计	114
6.1.1	模型描述	115
6.1.2	综合流程	116
6.1.3	综合步骤	119
6.1.4	应用例子	120
6.1.5	仿真结果	124
6.2	基于 μ 理论的离散频率综合控制	125
6.2.1	综合方法论	125
6.2.2	应用实例	127
6.2.3	仿真结果	130
6.3	基于 MPC 的频率控制设计	132
6.3.1	模型预测控制	133
6.3.2	基于分散 MPC 的 LFC	136
6.4	小结	139
	参考文献	139
第 7 章 电力市场环境下的频率控制		141
7.1	电力市场环境下的频率调节	141
7.1.1	频率调节的参与者	142
7.1.2	调节框架	144

XII 电力系统频率鲁棒控制 (原书第2版)

7.1.3	调节市场	146
7.2	LFC 动态和双边合同	148
7.2.1	建模	149
7.2.2	仿真实例	152
7.3	考虑双边合同的基于鲁棒 PI 的频率控制	156
7.3.1	基于 H_{∞} -PI 的二次频率控制设计	156
7.3.2	基于 H_2/H_{∞} -PI 的二次频率控制设计	157
7.4	基于主体频率鲁棒控制	163
7.4.1	频率响应分析	163
7.4.2	控制策略	165
7.4.3	PI 控制器的整定	169
7.4.4	实时仿真	170
7.4.5	实验结果	173
7.4.6	备注	174
7.5	基于智能/搜索方法的二次频率控制	176
7.5.1	基于 XCSR 的二次频率控制	177
7.5.2	基于搜索法的二次频率控制	180
7.5.3	基于 GA 的经济型二次调频	183
7.6	小结	190
	参考文献	191
第 8 章	紧急状态下的频率控制	195
8.1	频率响应模型	195
8.1.1	建模	195
8.1.2	紧急控制/保护动态分析	197
8.1.3	仿真实例	199
8.2	低频负荷减载 (UFLS)	203
8.2.1	为什么减载	203
8.2.2	低频减载的文献简述	204
8.3	UFLS 在多区域电力系统中的应用	205
8.3.1	定向负荷减载	205
8.3.2	一种集中式 UFLS 方案	207
8.3.3	基于频率变化率的定向减载方案	208
8.3.4	仿真实例	211
8.4	取代 UFLS 或 UVLS 的 UVLS	214
8.5	备注	218
8.6	小结	219
	参考文献	219

第 9 章 可再生能源和频率调节	222
9.1 概述和现存的挑战	222
9.1.1 现状与展望	223
9.1.2 新的技术挑战	223
9.2 最新发展	224
9.2.1 影响分析和一次调频	224
9.2.2 二次调频和所需的储备	225
9.2.3 紧急频率控制	227
9.2.4 基于电力电子器件的 RES 系统	228
9.2.5 惯性响应	228
9.3 计及 RES 影响的广义频率响应模型	229
9.3.1 广义频率响应模型	229
9.3.2 频率响应分析	230
9.4 性能标准修订的必要性	232
9.5 仿真研究	233
9.5.1 孤立的小型电力系统	233
9.5.2 用 $\Delta f/\Delta t$ 替换 df/dt	238
9.5.3 24 节点测试系统	238
9.6 可再生能源对频率调节的意义	241
9.7 小结	242
参考文献	242
第 10 章 风电与频率控制	247
10.1 风能对频率特性的影响	247
10.2 风能渗透下的频率控制	250
10.2.1 新英格兰测试系统	255
10.2.2 实时仿真分析	257
10.3 风能对频率调控的意义	259
10.3.1 以往的工作和成就	259
10.3.2 风机频率响应	261
10.4 控制系统设计以提高风频率响应	266
10.4.1 P、PD 和 PI 控制器设计	266
10.4.2 H_{∞} 控制	273
10.4.3 模型预测控制	276
10.5 小结	277
参考文献	277
第 11 章 微网频率控制	281
11.1 微网结构和控制的背景	281
11.1.1 微网结构	281
11.1.2 微网控制	282

11.2 频率响应特性	285
11.2.1 频率响应模型	285
11.2.2 频率响应分析	288
11.3 基于广义下垂的控制综合	293
11.3.1 传统下垂控制	293
11.3.2 广义下垂控制 (GDC)	294
11.3.3 基于广义下垂控制的控制设计	295
11.4 基于智能广义积分下垂的控制综合	297
11.4.1 基于粒子群算法的广义下垂控制设计	297
11.4.2 基于自适应模糊推理系统 (ANFIS) 的广义下垂控制 (GDC) 设计	302
11.5 小结	305
参考文献	305
第12章 基于虚拟惯量的频率控制	307
12.1 基本原理和概念	308
12.2 微网中的 VSG	309
12.2.1 含 VSG 的微网结构	310
12.2.2 VSG 在微网控制中的作用	312
12.3 现有 VSG 拓扑结构和应用	313
12.3.1 拓扑1	314
12.3.2 拓扑2	315
12.3.3 拓扑3	316
12.3.4 拓扑4	317
12.3.5 VSG 应用	318
12.4 基于虚拟惯量的频率控制	319
12.4.1 惯性和有功补偿	319
12.4.2 频率控制结构	320
12.4.3 实验结果	322
12.5 频率控制环节和时间尺度	324
12.6 技术挑战和未来探索需求	326
12.7 小结	328
参考文献	328
附录	331
附录 A	331
附录 B	333
附录 C	335
附录 D	337

第 1 章 电力系统控制综述

关键词：电力系统；频率稳定；电压稳定；功角稳定；动态时间尺度；SCADA；PS；AVR；电力系统稳定性；运行状态；EMS；紧急控制；励磁系统；AGC；一次控制；二次控制；三次控制；鲁棒频率控制

本章对电力系统控制进行了概述，重点介绍了电力系统稳定性以及已有控制方法的基本概念和定义。电力系统控制（无论是采用自动装置或手动操作）的目标是在系统发生故障时保持系统的完整性并恢复正常运行^[1]。换言之，在系统发生短路或者切机、甩负荷等故障时，电力系统控制仍能保证系统的稳定性以及运行性能。

从控制工程的角度来看，电力系统是一个高度非线性、大规模多输入输出（MIMO）的动态系统，它含有大量的控制变量、保护装置以及控制回路等，具有不同的动态响应特性。电力系统控制在本书的定义为：在电力系统正常或非正常运行状态下，采用一系列控制理论和技术、优化算法、专家智能系统等来提升系统的运行性能。电力系统控制能使系统在安全状态运行，且保护整个系统免受故障的影响。

1.1 发展概述

从 20 世纪 20 年代起，电力系统稳定性及控制开始被视为一个重要的问题^[3,4]。迄今已有大量的专家学者将研究兴趣和努力集中于功角暂态和稳态的稳定性问题，并提出了许多有效的建模仿真方法以及一系列控制与保护策略。本章参考文献 [5, 6] 给出了一个关于电力系统控制方面已有成果的概述。

在 20 世纪 70、80 年代一些大型电力系统故障发生后，频率稳定性问题、相应的控制策略以及长期动态仿真算法引起了人们的重视^[7-10]。IEEE 工作组制定了一系列有效的指导规则以解决发电厂在发生严重频率扰动时的响应问题^[11]。

从 20 世纪 90 年代起，发电机励磁系统辅助控制、静态无功补偿器（SVC）以及高压直流输电（HVDC）变流器逐渐被用于解决电力系统频率振荡问题的场景中^[5]。基于电力电子元件的针对系统阻尼振荡的柔性交流输电（FACTS）控制器近年来引起研究者广泛的兴趣^[12]。20 世纪 90 年代世界范围内发生了几

次电力系统崩溃的事故后,对电压稳定性的研究获得了更多的关注,并发展形成了一系列有效的分析工具和理论方法。

从20世纪80年代起,研究人员提出了许多针对电力系统阻尼振荡及电压调节的综合控制方法^[16-19]。近年来随着同步相量测量装置(PMU)、通信技术以及数字信号处理技术的发展,广域电力系统稳定性控制已成为研究的热点^[20-22]。提升不同控制系统间的数据交换和协调能力^[22,23],并以此作为广域控制解决方案已成为一个重要的控制策略。

近年来可再生能源发电(RES)以及分布式发电(DG)技术取得长足发展。可再生能源、分布式电源以及微网电源的大量并网带来许多技术问题,如针对传统电力系统的控制方是否能适应新环境下的系统运行要求。近来,可再生能源与分布式发电以及它们对电力系统动态性能和稳定性的影响,如何控制这些新增电源等问题已成为了研究热点^[21-29]。

在现代电力系统中,发电、输电、配电协调运作是建立在鲁棒/最优化控制方法、含基础通信设施与信息技术的(IT)智能控制单元以及监测控制和数据采集(SCADA)中心基础之上的。新环境下的电力系统控制有如下一些重要问题有待解决:故障防御机制^[21],考虑不确定性的动态仿真模型^[22,30],评估体系/预测方法,同步设备的最优分配与控制问题^[31],可视化系统扰动评估方法,分布式电源^[32]以及保证电力系统稳定性的鲁棒控制策略。

升级传统针对集中高压发/输电系统的经典控制方法,以使其能够用于含有大量中、低压微网系统的新型高度离散化电网,这也是另一个亟待解决的问题^[22,34]。

1.2 不稳定性问题

关于电力系统稳定性的最新定义是^[35]:“在给定的初始条件下,电力系统在遭到物理扰动后,其大部分物理量仍能维持在设定范围内,系统整体完好且重新恢复稳定运行状态。”

电力行业已发展超过了一个世纪,不同的稳定性问题在不同时期都曾出现且被重点关注。同样地,依赖控制理论的发展,电力系统控制技术与计算工具以及不同的控制方法都取得了长足的发展。

电力系统控制可采用不同的形式,而且深受不稳定性问题的影响。不稳定性问题的定义以及分类在本章参考文献[35]中有详细阐述。如图1.1所示,导致电力系统不稳定的几种情况分别是:功角不稳定、电压不稳定、频率不稳定等。功角不稳定指的是电力系统遭受扰动后无法保持发电设备相位同步的情况。在暂态功角不稳定的情况中,电力系统遭受严重的扰动,某些发电机组无法将电