



电力系统 自动电压控制

Automatic Voltage Control for Power Systems

孙宏斌 郭庆来 张伯明 著



 科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

电力系统自动电压控制

Automatic Voltage Control for Power Systems

孙宏斌 郭庆来 张伯明 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述了现代大规模电力系统自动电压控制的基础理论、关键技术和工程应用。全书分为四篇共 13 章。第一篇基础知识；第二篇基础技术，包括控制模式、在线自适应分区、三级电压控制、二级电压控制、静态电压稳定预警等；第三篇介绍自动电压控制中的高级协调问题，包括多级控制中心协调、安全与经济协调、支撑大规模风电汇集接入的自律协同电压控制；第四篇工程实践，包括与 EMS 的集成、标准化技术、大规模电力系统的应用实例等。

本书理论紧密联系实践，既涵盖了电压控制的基础知识，也介绍了相关领域的最新研究成果，同时结合大量实际应用案例介绍了工程实施经验。本书面向研究人员和电力工程师，也可作为高校高年级本科生和研究生学习的教材和参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动电压控制 = Automatic Voltage Control for Power Systems/ 孙宏斌, 郭庆来, 张伯明著. —北京: 科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-055836-7

I. ①电… II. ①孙… ②郭… ③张… III. ①电力系统自动化-电压控制 IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第300417号

责任编辑: 范运年 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

艺堂印刷(天津)有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 25

字数: 500 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

电压是电力系统运行的核心指标,近 20 年来国内外历次大停电事故几乎都与电压安全的破坏直接相关。近年来,我国已建成含特高压的交直流混联复杂电力系统,同时接入了大规模间歇式可再生能源,电力系统的规模与复杂性在世界上均首屈一指,无功支撑和电压安全已经成为这一复杂电力系统运行的核心挑战,单单依靠人工经验已无法驾驭,迫切需要实施自动电压控制来保障电力系统的安全经济运行。自动电压控制已成为当前电力系统学科的热点技术领域之一。

该书是作者及其课题组师生二十余年科学研究和工程实践的结晶,它系统阐述了现代电力系统自动电压控制的理论、关键技术和工程应用。1995 年我曾参加了该书作者承担的“八五”国家科技攻关计划“电力系统全局准稳态无功优化闭环控制研究及示范工程”立项评审会,也参加了作者承担的江苏、华北等多个 AVC 应用项目的验收会。2016 年我参加了作者完成的“复杂电网自律-协同无功电压自动控制系统关键技术及应用”科技成果鉴定会,该成果成功入选了 2016 年度中国高等学校十大科技进展。二十余年来,作者团队在自动电压控制技术领域,做出了举世瞩目的科技成就,其中包括:2003 年在我国江苏电网研制了世界上第一个基于软分区的自动电压控制系统,使得自动电压控制系统能够自适应于电网的发展变化;2007 年在华北电网研制了我国第一个大区电网自动电压控制系统,首次实现了网省地三级协调控制;2009 年在美国最大的互联电网——PJM^①完成了北美洲首个自动电压控制系统,用于控制含美国首都和东部 13 个州电网的无功电压;2012 年在国网冀北电力有限公司研制了首个支撑大规模风电接入的自动电压控制系统,用于抑制大规模风电接入弱网时的大范围电压波动,显著降低了风电机组连锁脱网的风险。

复杂电力系统的自动电压控制一直是世界性难题。美国最大区域电网——PJM 曾经与美国一流大学合作,但由于提出的模型过于复杂而无法在线应用,研究搁浅。PJM 转而寻求与作者团队合作,作者团队在突破了重重技术挑战之后,又经受了美国联邦能源监管委员会提出的三轮严苛的信息安全检查,历时 40 个月解答了 3000 余个信息安全问题,最终实现了美国首例 AVC,成为我国先进电网控制系统出口美国的首例,也是我国智能电网技术引领世界的一个有力例证,具

^① PJM 互联电力公司是北美洲最大的区域独立调度机构,负责协调美国东部电网运行,包括:特拉华、伊利诺伊、印第安纳等十三个州和首都华盛顿哥伦比亚特区。

有里程碑意义。我深深地被作者团队所表现出的不畏艰难、坚忍不拔的意志品质所感动。

迄今为止,该系统已经在我国绝大部分电网和大型可再生能源基地推广应用,控制了全国 56%的常规水/火发电机组与 37%的风/光机组,承担了已投运的全部 8 条交直流特高压线路近区电网电压控制,在我国电网的安全运行、节能减排和大规模可再生能源接纳等方面已经取得巨大的社会和经济效益。

正是该团队二十余年的不懈努力,使得自动电压控制与自动发电控制一样,成为电力系统调控中心必备的两大基础性自动控制系统之一,为电力系统电压控制从“人工”走向“自动”做出了开拓性贡献,为电力系统学科的发展做出了重要贡献。

该书基于作者多年的科学研究和工程实践,理论紧密联系实际,有翔实的实际大电网的现场测试和对比数据,还有华北电网、南方电网、PJM 等实际大电网 AVC 工程项目的介绍。因此,该书不但面向研究人员、高校高年级本科生和研究生,而且面向电力工程师,具有十分广泛的阅研和应用价值。

周孝信

2017 年 11 月 10 日

前 言

自动电压控制与自动发电控制一起，共同构成了现代电力系统两大基础自动控制系统。

电压是电力系统运行的核心指标之一，自动电压控制系统承担了保障电网电压安全、提高电压质量、降低网损和减轻调度值班人员劳动强度的功能。近年来，我国陆续建成含特高压多电压等级的交直流混联复杂电网，无功支撑与电压安全问题成为保证这一特大电网安全性的核心挑战之一。与此同时，随着可再生能源的快速发展，电压安全问题也成为实现大规模可再生能源“并得上”和“送得出”的关键问题之一。此外，合理的电压分布还可显著降低网损，提高电网运行经济水平。单纯依靠人工经验已无法驾驭现代复杂电力系统，迫切需要实施自动电压控制来保证电力系统的安全、优质、经济与环保运行水平。在我国，国家电网公司将自动电压控制作为智能电网调度技术支持系统的必备功能，南方电网公司实施了网省地三级协调电压控制，而美国 PJM 电网公司实施了北美洲首个自动电压控制系统。

本书是作者及其课题组师生二十余年理论研究和工程实践成果的系统总结。20 世纪 90 年代，针对国外硬分区技术无法适用于电网发展变化这一瓶颈问题，课题组在“八五”国家科技攻关计划和国家自然科学基金等项目的资助下，提出了基于“软分区”的自动电压控制技术，2003 年在我国江苏省电网研制出世界上第一个基于软分区的自动电压控制系统，并投入实际运行。21 世纪初，在 863 计划专题课题和国家自然科学基金资助下，针对分层分区调度机制下带来的多控制中心分布式协调控制问题，2007 年在华北电网研制出我国第一个大区电网自动电压控制系统，首次实现了网省地三级协调的电压控制。2009 年针对北美洲电力市场对 N-1 安全的高要求，美国最大的互联电网——PJM 电网，实现了复杂预想故障条件下安全与经济协同的 AVC，用于控制美国首都华盛顿哥伦比亚特区在内的东部 13 个州的电网电压，这是北美洲第一套自动电压控制系统，也是我国先进电网控制系统对美国的首例输出，系统还推广到加拿大 BC Hydro 和马来西亚国家电网。近年来，在 973 计划和国家自然科学基金的资助下，针对大规模可再生能源接入引发的电压波动及其诱导的风机连锁脱网问题，研制支撑大规模可再生能源接入的自动电压控制系统。

截至 2015 年年底，成果已经在我国 6 个大区电网(占全国 6/7)、22 个省级电网(占全国 2/3)和 6 个千万千瓦级风/光基地应用，接入全国常规水/火电装机 7.55

亿千瓦(占全国 56%)与风/光装机 0.49 亿千瓦(占全国 37%), 并应用于已投运的全部特高压交/直流线路的近区电网。通过课题组 20 余年持续不懈的努力, 实现了自动电压控制在国内外电力系统的大范围应用, 使得电网电压控制从传统的“人工调压模式”发展为“自动控制模式”, 也使得自动电压控制与自动发电控制一样, 成为电网调控中心必备的两大基础自动控制系统之一, 使得电力系统调度员从繁重的人工调压工作中解放出来, 创造了重大的社会和经济效益, 引领了国内外电网自动电压控制技术的发展。本书作者作为主要执笔人, 起草了国家电网公司企业标准《电网自动电压控制技术规范》。科研成果入选 2016 年度中国高等学校十大科技进展。

本书系统阐述了现代电力系统自动电压控制的理论、关键技术和工程应用, 其特色是理论紧密联系工程实践。全书共四篇: 第一篇基础知识; 第二篇基础技术, 包括控制模式、在线自适应分区、三级电压控制、二级电压控制、静态电压稳定预警和预防控制; 第三篇高级协调问题, 包括多级控制中心的协调、安全与经济的协调、支撑大规模风电接入的自律协同电压控制等问题; 第四篇工程实践, 包括与 EMS 的集成、标准化和大规模电力系统的应用实例等, 在应用实例中, 详细介绍了在华北电网、南方电网、美国 PJM 等工程实施中的实际问题和实施情况。本书面向研究人员和电力工程师, 也可作为高校高年级本科生和研究生学习的教材和参考资料。

孙宏斌编写第三篇和第四篇, 并负责全书统稿; 郭庆来编写第二篇, 并负责书稿修改工作; 张伯明编写第一篇, 并负责全书审定。衷心感谢周孝信院士在百忙之中对本书进行细心审阅, 提出了很多宝贵意见和建议, 并亲自为本书作序。

衷心感谢美国国家工程院院士 Bose 教授、IEEE PES 主席 Rahman 教授等海外知名专家学者为本书作出评论。

衷心感谢相年德教授, 是相年德和张伯明两位教授带领着我和课题组团队进入电力系统自动电压控制领域。我还清晰地记得, 1995 年, 由两位先生负责的“八五”国家科技攻关计划“电力系统全局准稳态无功优化闭环控制研究及示范工程”立项评审会在清华大学召开的情景。当时我是两位先生的在读博士研究生, 该项目也是我博士论文的主攻方向。在那次评审会上, 两位先生安排我演示了基于 RISC 工作站的开放分布式能量管理系统。该项目最终顺利获得了“八五”国家科技攻关计划的资助, 那次立项评审会也成为本项研究的标志性开端, 迄今已二十二年。令我更欣喜与骄傲的是, 在这二十多年的时光里, 自己在电压控制方向也培养了多位优秀的研究生, 他们薪火相传, 为本领域的理论发展和技术进步做出了自己的贡献, 这其中就包括本书的合作者郭庆来博士, 我也见证了他从一名青涩的本科生长为优秀青年学者的全过程。

感谢吴文传教授、王彬博士、汤磊博士、张明晔博士和多位研究生等课题组

团队成员陆续二十余年来的辛勤和汗水。还要感谢二十余年来，在项目现场实施过程中，曾经帮助过我们的各级电网公司领导和工程师的大力支持，担心挂一漏万，在此就不一一列举了，你们的帮助将永远铭记在课题组团队成员的心中。

感谢“八五”国家科技攻关计划(85-720-10-38)、国家杰出青年科学基金(51025725)、国家自然科学基金优秀青年科学基金(51522702)、国家自然科学基金项目(59677008、50807025、51277105)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51321005、51621065)、863 计划(2006AA05Z217)、973 计划(2013CB228200)的资助。

孙宏斌

2017 年 10 月 31 日

目 录

序 前言

第一篇 基础知识

第 1 章 绪论	3
1.1 自动电压控制的发展背景	3
1.2 AVC 的发展历史	4
1.2.1 基于 OPF 的两层控制模式	4
1.2.2 基于分区的三层控制模式	5
1.2.3 三层电压控制模式的发展	6
1.2.4 发展历史小结	10
1.3 AVC 的主要挑战	11
第 2 章 基础知识	14
2.1 基本概念	14
2.1.1 电压偏移	14
2.1.2 无功功率	15
2.2 电压水平与无功平衡	20
2.2.1 电压水平	20
2.2.2 无功平衡	23
2.3 无功电源	23
2.3.1 同步发电机	24
2.3.2 同步调相机及同步电动机	24
2.3.3 静电电容器	25
2.3.4 静止无功补偿器	26
2.3.5 高压输电线的充电功率	27
2.4 电压控制措施	27
2.4.1 调节发电机励磁	28
2.4.2 改变变压器变比	29
2.4.3 利用并联无功补偿控制电压	30
2.4.4 利用串联无功补偿控制电压	30
2.5 潮流方程与灵敏度分析	32

第二篇 基础技术

第3章 自动电压控制模式	37
3.1 引言	37
3.2 分级递阶电压控制模式	37
3.3 基于软分区的三层电压控制模式	40
3.4 电压控制模式的演化关系	42
3.4.1 理想化最优控制模式	43
3.4.2 目标解耦性分析	45
3.4.3 时间解耦性分析	47
3.4.4 空间解耦性分析	50
3.4.5 对比总结	55
第4章 在线自适应分区方法	59
4.1 引言	59
4.2 无功源控制空间	61
4.2.1 基本思想	61
4.2.2 控制灵敏度求解	61
4.2.3 无功源空间构造过程	64
4.2.4 简单示例	65
4.3 基于无功源空间的分区方法	67
4.3.1 聚类分析	67
4.3.2 算例研究	68
4.4 中枢母线选择方法	73
4.4.1 原理与算法框架	74
4.4.2 中枢母线的选择过程	75
4.4.3 算例分析	81
第5章 三级电压控制	87
5.1 引言	87
5.2 OPF 无功优化模型	87
5.3 软件体系	88
5.4 功能	89
5.5 现场应用案例	90
5.5.1 联络线控制效果	90
5.5.2 网损控制效果	92
第6章 二级电压控制	95
6.1 引言	95

6.2	不同控制方式下的协调	95
6.3	CSVC 的基本思想	98
6.4	CSVC 的数学模型	99
6.4.1	变量说明	99
6.4.2	目标函数	100
6.4.3	约束条件	102
6.4.4	紧急控制模式	103
6.5	仿真算例	104
6.5.1	IEEE39 节点系统	104
6.5.2	江苏实际电网	106
6.6	功能体系	110
6.6.1	控制策略计算	110
6.6.2	控制策略执行	110
6.6.3	闭锁设置	111
第 7 章	静态电压稳定预警和预防控制	112
7.1	概述	112
7.2	奇异值分解法	113
7.3	标准连续型潮流计算方法	115
7.3.1	原理简介	115
7.3.2	算法细节	116
7.4	连续潮流计算方法的改进	117
7.4.1	潮流计算中的 PV-PQ 节点类型转换逻辑	117
7.4.2	基于动态潮流方程的连续潮流方法	119
7.5	故障型连续潮流	123
7.5.1	问题的列式	124
7.5.2	虚拟的静态稳定临界点	126
7.6	电压稳定控制的模型和方法	127
7.6.1	控制灵敏度的计算方法	127
7.6.2	基于连续线性规划的控制模型	128

第三篇 高级协调问题

第 8 章	多级控制中心的协调控制	133
8.1	概述	133
8.2	基本概念	134
8.2.1	协调关口	134
8.2.2	协调变量	136

8.2.3	协调约束	136
8.2.4	关口无功电压耦合度关系	139
8.2.5	协调关口组	142
8.3	多级控制中心协调优化控制模式	145
8.4	强耦合的多级控制中心协调优化控制	147
8.4.1	特点分析	147
8.4.2	协调约束的生成	148
8.4.3	协调策略的产生	153
8.4.4	控制策略的执行	155
8.4.5	仿真控制效果	159
8.5	弱耦合的多级控制中心协调优化控制研究	163
8.5.1	弱耦合特点说明	163
8.5.2	省地协调电压控制弱耦合特性分析	163
8.5.3	省地协调中协调约束的生成	165
8.5.4	省地协调中协调策略的产生	170
8.5.5	省地协调中协调策略的执行	174
8.5.6	仿真算例 1	176
8.5.7	仿真算例 2	179
第 9 章	安全与经济的协调	182
9.1	概述	182
9.2	多目标优化和博弈论	183
9.2.1	多目标优化相关概念	183
9.2.2	博弈论相关概念	184
9.2.3	基于博弈理论求解多目标优化	186
9.3	多目标无功电压优化模型	188
9.3.1	经济安全指标	188
9.3.2	考虑安全和经济的多目标无功电压优化模型	190
9.3.3	多目标无功电压优化模型的 Pareto 最优前沿	191
9.4	多目标无功电压优化模型求解	195
9.4.1	基于合作博弈理论求解多目标无功电压优化模型	195
9.4.2	传统模型和新模型最优解关系	202
9.4.3	算例分析	204
9.5	安全方博弈决策的在线方法	212
9.5.1	状态变化转移因子特性	212
9.5.2	实用化的安全方决策方法	224
9.5.3	基于中枢节点的决策方法	226

9.6 考虑静态电压稳定性的模型与求解方法	229
9.6.1 考虑静态电压稳定性的 SCOPF 模型	229
9.6.2 考虑静态电压稳定性的 M-ROPF 模型	230
9.6.3 基于合作博弈理论的模型求解	235
9.6.4 算例分析	241
第 10 章 支撑大规模风电汇集接入的自律协同电压控制	245
10.1 概述	245
10.1.1 背景与技术挑战	245
10.1.2 自律协同控制架构	247
10.2 风电场 AVC 子站侧自律控制	249
10.2.1 概述	249
10.2.2 目标函数	251
10.2.3 预测模型	252
10.2.4 风电场 AVC 子站功能	254
10.2.5 风电场 AVC 子站接口	255
10.3 系统级协同控制	257
10.3.1 概述	257
10.3.2 敏捷二级电压控制	258
10.3.3 基于 SCOPF 的预防控制	261
10.4 现场应用案例	262
10.4.1 MPC 控制效果	262
10.4.2 系统控制效果	268

第四篇 工程实践

第 11 章 与 EMS 的集成	273
11.1 概述	273
11.2 外挂式集成	274
11.2.1 基本流程	274
11.2.2 IEC61970 CIM 模型简介	276
11.2.3 CIM 模型的自动导出与解析	280
11.3 内嵌式集成	281
11.3.1 系统框架与数据交互	283
11.3.2 详细设计分析	285
第 12 章 AVC 相关标准化研究	298
12.1 概述	298
12.2 扩展原则	299

12.3	对现有 AVC 系统的分析	300
12.4	层次结构描述	301
12.5	与现有 CIM 结合	302
12.6	多控制中心之间的标准化信息交互	305
12.6.1	交互信息分析	305
12.6.2	信息模型定义	306
12.6.3	信息交互流程	310
第 13 章	大规模电力系统的应用实例	313
13.1	华北电网 AVC	313
13.1.1	整体架构	314
13.1.2	主要功能	315
13.1.3	应用情况	317
13.2	南方电网网省地一体化协调电压控制系统	319
13.2.1	系统结构	321
13.2.2	南网 AVC 功能	322
13.2.3	网省地数据交互流程	327
13.2.4	应用情况	328
13.2.5	小结	330
13.3	安全与经济协调的 AVC 系统在 PJM 电网的应用	330
13.3.1	PJM 电网介绍及其电压控制现状	330
13.3.2	AVC 系统设计	332
13.3.3	控制效果评估	337
附 录		
附录 A	IEEE39 节点系统数据	347
A.1	系统单线图	347
A.2	运行约束	347
A.2.1	正常运行状态的运行约束	347
A.2.2	预想故障设置及故障后约束	348
A.3	基态潮流	349
附录 B	电厂侧电压控制	351
B.1	概述	351
B.2	主站与电厂子站的协调策略	351
B.3	接口设计	353
B.3.1	子站与主站接口方式	353

B.3.2 子站上位机与下位机接口方式	353
B.3.3 子站实时数据采集方式	353
B.3.4 子站与 DCS 接口方式	354
B.4 功能体系	354
B.4.1 主要功能	354
B.4.2 安全约束条件	355
B.5 主站与子站通信方案	356
附录 C 变电站协调优化控制	358
C.1 概述	358
C.2 考虑变电站控制资源的协调全局优化	358
C.3 变电站直控模式	359
C.4 控制策略	360
C.4.1 控制目标	360
C.4.2 控制逻辑	361
C.5 功能设计	363
C.5.1 变电站控制建模	363
C.5.2 变电站闭环控制	364
附录 D 海外专家书评	368
D.1 美国能源部高级顾问、国家工程院院士 Anjan Bose 教授	368
D.2 美国国家工程院院士 Joe H. Chow 教授	370
D.3 美国国家工程院院士 Yilu Liu 教授	371
D.4 美国国家工程院院士 Jay Giri 博士	372
D.5 美国国家工程院院士、IEEE 智能电网汇刊创刊主编 Mohammad Shahidehpour 教授	373
D.6 IEEE 电力与能源协会主席 Saifur Rahman 教授	374
D.7 IEEE 电力与能源协会前任主席 Miroslav Begovic 教授	375
D.8 IEEE 电力系统汇刊主编 Nikos Hatziargyriou 教授	376
D.9 IEEE 可持续能源汇刊主编 Bikash Pal 教授	377
D.10 IEEE 智能电网汇刊主编 Jianhui Wang 博士	378
参考文献	379

第一篇 基础知识

