



“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

主动配电网网络分析与 运行调控

Active Distribution Networks Analysis,
Operation and Control

吴文传 张伯明 巨云涛 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

主动配电网网络分析与运行调控

**Active Distribution Networks Analysis,
Operation and Control**

吴文传 张伯明 巨云涛 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统性地介绍主动配电网的多相建模、网络分析、运行优化与恢复控制决策和分布式自律控制的基本原理及实现方法。

本书共7章。第1~3章分别介绍分布式电源、配变电设备的三相稳态建模,适用于配电网的潮流计算方法以及不同量测冗余度条件下的状态估计。第4、5章介绍主动配电网的无功电压优化和网络重构技术,特别是在状态感知精度不足条件下的鲁棒控制决策问题。第6、7章介绍面向大规模分布式资源并网的主动配电网与微网分布式自律控制技术。

本书可作为电力系统及其自动化专业研究生教材,也可供电气工程专业科研人员、高等院校教师和高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

主动配电网网络分析与运行调控 = Active Distribution Networks Analysis, Operation and Control / 吴文传, 张伯明, 巨云涛著. —北京: 科学出版社, 2016. 8

(智能电网研究与应用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-049125-1

I. ①主… II. ①吴…②张…③巨… III. ①配电系统-电力网络分析
②配电系统-电力系统运行-调控 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143580 号

责任编辑: 耿建业 陈构洪 赵微微 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 426 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《智能电网研究与应用丛书》编委会

主编:周孝信

编委:(按姓氏汉语拼音排序)

白晓民(中国电力科学研究院)

蔡旭(上海交通大学)

曹一家(湖南大学)

陈希(中国电力科学研究院)

程浩忠(上海交通大学)

程时杰(华中科技大学)

丁立健(国家自然科学基金委员会)

董新洲(清华大学)

董旭柱(南方电网科学研究院有
限责任公司)

段献忠(华中科技大学)

郭剑波(中国电力科学研究院)

韩英铎(清华大学)

何湘宁(浙江大学)

胡学浩(中国电力科学研究院)

鞠平(河海大学)

李立涅(华南理工大学)

廖瑞金(重庆大学)

刘建明(国家电网公司)

卢强(清华大学)

梅生伟(清华大学)

穆钢(东北电力大学)

饶宏(南方电网科学研究院有限责
任公司)

荣命哲(西安交通大学)

宋永华(浙江大学)

孙元章(武汉大学)

王成山(天津大学)

王锡凡(西安交通大学)

王益民(国家电网公司)

肖立业(中国科学院电工研究所)

薛禹胜(国家电网公司)

杨奇逊(华北电力大学)

杨勇平(华北电力大学)

余贻鑫(天津大学)

张保会(西安交通大学)

张伯明(清华大学)

赵争鸣(清华大学)



《智能电网研究与应用丛书》序

迄今为止,世界电网经历了“三代”的演变。第一代电网是第二次世界大战前以小机组、低电压、孤立电网为特征的电网兴起阶段;第二代电网是第二次世界大战后以大机组、超高压、互联大电网为特征的电网规模化阶段;第三代电网是第一、二代电网在新能源革命下的传承和发展,支持大规模新能源电力,大幅度降低互联大电网的安全风险,并广泛融合信息通信技术,是未来可持续发展的能源体系的重要组成部分,是电网发展的可持续化、智能化阶段。

同时,在新能源革命的条件下,电网的重要性日益突出,电网将成为全社会重要的能源配备和输送网络。与传统电网相比,未来电网应具备如下四个明显特征:一是具有接纳大规模可再生能源电力的能力;二是实现电力需求侧响应、分布式电源、储能与电网的有机融合,大幅度提高终端能源利用的效率;三是具有极高的供电可靠性,基本排除大面积停电的风险,包括自然灾害的冲击;四是与通信信息系统广泛结合,实现覆盖城乡的能源、电力、信息综合服务体系。

发展智能电网是国家能源发展战略的重要组成部分。目前,国内已有不少科研单位和相关企业做了大量的研究工作,并且取得了非常显著的研究成果。在智能电网研究与应用的一些方面,我国已经走在了世界的前列。为促进智能电网研究和应用的健康持续发展,宣传智能电网领域的政策和规范,推广智能电网相关具体领域的优秀科研成果与技术,在科学出版社“中国科技文库”重大图书出版工程中隆重推出《智能电网研究与应用丛书》这一大型图书项目,本丛书同时入选“十二五”国家重点出版规划项目。

《智能电网研究与应用丛书》将围绕智能电网的相关科学问题与关键技术,以国家重大科研成就为基础,以奋斗在科研一线的专家、学者为依托,以科学出版社“三高三严”的优质出版为媒介,全面、深入地反映我国智能电网领域最新的研究和应用成果,突出国内科研的自主创新性,扩大我国电力科学的国内外影响力,并为智能电网的相关学科发展和人才培养提供必要的资源支撑。

我们相信,有广大智能电网领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编



委的共同努力,本丛书将为发展智能电网、推广相关技术、增强我国科研创新能力做出应有的贡献。

最后,我们衷心地感谢所有关心丛书并为丛书出版尽力的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和赞助,感谢广大读者对丛书的厚爱;希望通过大家的共同努力,早日建成我国第三代电网,尽早让我国的电网更清洁、更高效、更安全、更智能!

周孝信



序

主动配电网是消纳分布式可再生能源发电的主要载体,也是智能电网的核心组成部分,其主要特征表现为两个方面:①通过灵活可变的网络拓扑管理配电网的潮流;②通过对分布式发电、储能和可控负荷等分布式资源自动调控,以保证配电网整体的安全高效运行。相对应,主动配电网调控的核心需求也有两个方面:①配电网需要提供高效、可靠的公共服务;②分布式资源要主动参与电网运行,为电网提供必要的友好支持,而不是被动地接入。

该书的内容组织围绕上述核心需求展开,包括了主动配电网网络分析、安全评估与运行优化和分布式资源自律控制三个方面。其中第一部分叙述了主动配电网的多相建模、不同量测冗余度下的状态估计技术,以及总结分析了适用于不同场景的潮流计算方法。内容丰富而不失简洁,蕴含了不少作者的理论和实践成果,利于读者深入掌握主动配电网分析方法。第二部分内容介绍了作者创立的基于回路分析的安全评估、运行优化和恢复决策的系列高效算法,具有很强的工程应用价值;同时阐述并发展了主动配电网优化模型的凸松弛技术,并对其应用进行了较全面分析。特别是,作者首次引入了鲁棒优化模型用于解决配电网状态感知精度不高和运行不确定性大导致的决策结果不可行问题。第三部分介绍了作者在分布式自律调控方面的最新研究成果,包括主动配电网的全分布式无功电压控制和经济调度以及微电网的分布式自律调控和潮流控制技术,该类方法可以克服集中式调控技术存在单点失效、模型维护困难、控制延时过长以及多利益主体间的信息隐私等问题,是实现分布式资源“即插即用”的有效技术途径。

该著作凝聚了吴文传教授团队历时十余年的研究成果,内容涵盖了主动配电网的建模、安全评估、优化运行、恢复控制和分布式资源自律控制等方面。该书主题突出、系统性好,前沿理论和实际工程问题紧密结合,其中大部分技术已在工程现场得到应用,是一本理论性和实用性并重的优秀学术专著。主动配电网已成为国内外学术界的研究热点,也是电力工程业界非常关注的领域,而主动



配电网的运行调控是其核心,但目前尚缺乏系统性的专著,本书的出版在很大程度上弥补了这一不足。相信这本著作的出版将为相关同行和科技工作者提供很好的参考。

中国电力科学研究院

周孝信

2016年8月2日



前 言

主动配电网的主要特征包括两个层面,首先是接入大量分布式电源以及可调控的柔性负荷的新型配电网;其次是能够实现远程和自动调控分布式资源以及网络拓扑结构从而达到高效、可靠的运行。为了实现主动配电网的有效调控,一方面需要对配电系统实现基于多相模型的网络分析,对多电压等级配网进行精细化状态估计与模拟分析,提高对配电网的状态感知水平。另一方面,需要通过使用适用于大规模配电网的无功电压优化和网络重构决策模型及其高效算法,提高系统的高效运行;特别是需要能适应状态估计精度不高以及分布式电源波动快的调度决策方法。最后,面对大规模的分布式电源和可控负荷,集中式调控架构存在通信负担重、控制延时过长以及多利益主体的信息隐私等问题,需要采用分布式自律调控技术应对这些挑战。本书针对如上命题,讨论了其中的共性问题和基础技术。

第1章介绍主动配电网主要设备类型的三相稳态模型,重点分析了四类常见分布式电源的三相模型及其在潮流计算中的可解性。

第2章介绍主要的主动配电网潮流计算方法,包括前推回推潮流法的更严格形式——基于回路分析的潮流以及基于回路分析的连续潮流计算方法,适用于多相建模的隐式 ZBus 潮流法、交直流配电网的扩展节点潮流法以及形式简单的辐射状态配网支路潮流法。

第3章介绍主动配电网状态估计技术,包括基于凸优化模型的拓扑辨识法、量测无冗余条件下的潮流匹配状态估计以及量测有冗余条件下的抗差状态估计技术。

第4章介绍主动配电网的无功电压控制技术。首先,介绍基于回路分析法的无功优化算法,包括静态优化和动态优化,这是一种实用化的高效算法;然后,介绍基于扩展二阶锥松弛的无功电压优化算法,这是一类基于严格数学优化技术的算法;最后,介绍快慢控制设备协调和考虑运行不确定的鲁棒无功电压控制方法。

第5章介绍主动配电网网络重构与恢复控制决策技术。首先,介绍基于回路分析的网络重构算法,这是一种类启发式算法,计算效率很高;然后,介绍基于混合整数二阶锥优化的网络重构模型;最后,分析两类适用于恢复控制分布式电源和负荷波动性及不确定性的鲁棒恢复控制方法。



第6章介绍主动配电网分布式自律控制技术。首先,介绍一种优秀的分布式优化方法——ADMM;然后,讨论分布式无功电压控制的模型和算法;最后,分析分布式经济调度模型和算法。

第7章介绍微网频率与潮流分布式自律控制技术。首先,介绍微电网调频技术体系;然后,讨论分布式控制的算法基础;其次,介绍孤网运行的微电网分布式调频技术;最后,介绍并网运行的微电网联络潮流的分布式控制技术。

本书是作者及其课题组在该领域十多年的科研成果总结,专注于配电网分析与运行的基础性和共性问题。除了署名作者之外,参与相关研究的还有研究生陈珂宁、刘一兵、郑伟业、王中冠、田庄、王永杰和陈欣等。

本书的出版要特别感谢课题组的孙宏斌教授。与孙宏斌教授的合作始于我的大学本科时期,在我的学术成长之路上始终得到了他兄长般的关心和支持。我还要感谢清华大学电机系给我提供了良好的研究和教学环境,使得我能够完成本书相关的课题研究和出版工作。

本书研究工作得到了国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB228203、2013CB228205)和国家自然科学基金资助项目(51477083)的资助。

吴文传

2016年3月于清华园



目 录

《智能电网研究与应用丛书》序

序

前言

第1章 主动配电网的三相建模	1
1.1 分布式电源模型	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 并网型同步发电机	2
1.1.3 并网型异步发电机	4
1.1.4 换流器并网型分布式电源	6
1.1.5 双馈感应发电机	10
1.2 线路三相模型	16
1.2.1 线路铭牌参数	16
1.2.2 线路参数的计算方法	16
1.3 变压器三相模型	22
1.3.1 变压器参数	22
1.3.2 变压器三相导纳矩阵	24
1.3.3 中性点不接地问题的通用处理方法	30
1.4 电容器模型	31
1.4.1 Y0 接法	32
1.4.2 Y 接法	32
1.4.3 Δ 接法	32
1.5 负荷模型	33
1.5.1 Y0 接法	33
1.5.2 Y 接法	34
1.5.3 Δ 接法	35
1.6 本章小结	36
参考文献	36



第2章 主动配电网潮流分析	39
2.1 概述	39
2.2 配电网潮流回路法	39
2.2.1 回路分析法基础	39
2.2.2 经典前推、回代潮流法	43
2.2.3 前推、回推潮流法的回路分析法解释	44
2.2.4 基于回路分析的潮流法	46
2.2.5 回路分析的连续潮流算法	60
2.3 基于隐式 ZBus 的多相潮流法	69
2.3.1 隐式 ZBus 潮流算法	69
2.3.2 系统导纳阵建立方法	69
2.3.3 算例分析	76
2.4 交直流混联配电网的扩展节点潮流法	77
2.4.1 扩展节点法	77
2.4.2 交直流混联配电网建模	78
2.4.3 交直流混联配电网潮流计算	80
2.4.4 算例分析	83
2.5 配电网支路潮流法	84
2.6 本章小结	85
参考文献	86
第3章 主动配电网状态估计	87
3.1 概述	87
3.2 拓扑辨识方法	88
3.2.1 拓扑辨识模型	88
3.2.2 约束凸化修正	89
3.2.3 修正后的凸优化模型	90
3.2.4 算例分析	91
3.3 量测无冗余条件下的匹配潮流法	92
3.3.1 配电网典型量测配置与分区	92
3.3.2 最优估计意义下的配电匹配电流	94
3.3.3 匹配电流的计算方法	95
3.3.4 算例分析	96
3.4 量测有冗余条件下的抗差状态估计方法	98
3.4.1 量测方程	98
3.4.2 可观测性分析	101



3.4.3 指数型抗差估计模型	102
3.4.4 求解算法	103
3.4.5 算例分析	103
3.5 本章小结	108
参考文献	108
第4章 主动配电网无功电压优化	110
4.1 概述	110
4.2 基于回路分析的无功电压优化	110
4.2.1 静态无功优化	111
4.2.2 动态无功优化	120
4.2.3 多目标无功电压优化	132
4.3 基于二阶锥松弛的无功电压优化	147
4.3.1 基于二阶锥规划松弛的静态无功电压优化	148
4.3.2 考虑变压器调压作用的无功电压优化	157
4.3.3 基于二阶锥规划松弛的有功无功协调的动态无功电压优化	160
4.3.4 鲁棒无功电压优化控制	169
4.4 本章小结	179
参考文献	179
第5章 主动配电网网络重构与恢复控制	181
5.1 概述	181
5.2 基于回路法的网络重构	181
5.2.1 最优匹配回路流	182
5.2.2 网络重构算法	188
5.3 配电网网络重构与恢复控制的凸优化模型	192
5.3.1 网络重构的混合整数二阶锥规划模型	192
5.3.2 恢复控制的混合整数线性规划模型	197
5.4 基于 IGDT 的鲁棒恢复控制	200
5.4.1 主动配电网中的不确定性因素	200
5.4.2 IGDT 优化的基本原理	201
5.4.3 基于 IGDT 的鲁棒恢复控制模型	202
5.4.4 算例测试与分析	205
5.5 保守性可调节的鲁棒恢复控制	209
5.5.1 鲁棒优化基本原理	210
5.5.2 保守性可调的鲁棒恢复控制优化模型	211
5.5.3 两阶段鲁棒模型的求解	213



5.5.4 算例测试与分析	218
5.6 配电网综合优化	221
5.6.1 综合优化的原始模型	222
5.6.2 综合优化的 MISOCP 模型	224
5.6.3 提高计算效率的策略	226
5.6.4 算例分析	228
5.7 本章小结	234
参考文献	234
第 6 章 主动配电网分布式自律调控	236
6.1 概述	236
6.2 分布式自律控制理论基础	236
6.2.1 交替方向乘子法简介	237
6.2.2 全分布式交替方向乘子法	238
6.3 配电网无功电压分布式自律控制	242
6.3.1 非凸的主动配电网优化问题	243
6.3.2 二阶锥松弛	247
6.3.3 全分布式 D-SOCP 求解算法	248
6.3.4 全分布式罚因子调制	252
6.3.5 算例分析	253
6.4 配电网分布式经济调度	259
6.4.1 集中式 ED	260
6.4.2 全分布式 ED 算法	262
6.4.3 算例分析	265
6.5 本章小结	269
参考文献	269
第 7 章 微网调频自律控制	272
7.1 微网的调频技术概述	273
7.1.1 微网频率分层控制体系	275
7.1.2 微网频率集中式控制与分布式控制	283
7.2 微网的自律控制的理论基础	286
7.2.1 一致性算法	286
7.2.2 次梯度算法	289
7.3 孤立微网的频率自律控制	291
7.3.1 等微增率准则	291
7.3.2 孤立微网频率自律控制模型	294



7.3.3 频率自律控制模型分布式求解算法	300
7.3.4 频率自律控制算例分析	302
7.4 并网微网的潮流自律控制	305
7.4.1 并网微网潮流自律控制模型与分布式求解方法	306
7.4.2 潮流自律控制算例分析	307
7.5 本章小结	312
参考文献	312
附录 A 双馈发电机模型	314
附录 B IEEE 123 节点系统	315
附录 C IEEE 69 节点系统	316
附录 D 配电网三馈线和 69 节点系统算例数据	325
D.1 三馈线系统	325
D.2 69 节点配电系统	326
附录 E IEEE 33 节点系统三相参数	330
附录 F IEEE 123 节点系统三相参数	332



第 1 章 主动配电网的三相建模

随着分布式电源(distributed energy resource, DER)和电动汽车的广泛接入,未来配电网将呈现交直流混合的多电源形态。只有基于精细准确的主动配电网模型,才能准确计算出电网的运行状态,得到准确的仿真计算结果。同时,由于配电系统固有的三相不平衡性,传统输电网采用的单相模型已经不再适用于配电系统中,所以建立详细的主动配电网多相模型,对于三相不平衡的潮流计算和网络分析是非常必要的。本章介绍最常见的四类分布式电源模型、线路模型、变压器模型、电容器模型和负荷模型。

1.1 分布式电源模型

1.1.1 引言

分布式电源一般指接入中压、低压配电网的电源,发电功率在几千瓦到 50 兆瓦。接入配电网的分布式电源种类很多,包括光伏发电、风力发电、微型燃气轮机、燃料电池、储能设备等电源。分布式电源接入电网的运行方式主要分为两类:一类是以微电网的形式孤网运行;另一种是与主网并网运行。这两种方式下,系统的运行特性差异显著。孤网运行时,微电网的频率和电压由分布式电源的有功功率-频率和无功功率-电压下垂控制特性决定^[1]。而并网运行时,配电网的频率和电压由配电网以及上级电网决定,分布式电源是可控的功率注入源。

由于三相不平衡负荷的存在,配电网通常运行在三相不平衡状态。接入配电网的分布式电源多运行在三相不平衡状态。如果配电网接入非常少量的分布式电源,分布式电源采用正序模型与采用三相模型对整个主动配电网稳态分析影响不大。但当分布式电源较大规模接入配电网时,分布式电源模型误差累加会严重影响主动配电网的分析。当分布式电源接入三相不平衡较严重的网络时,采用三相不平衡模型与正序模型的计算结果差别很大。所以需要建立分布式电源的三相模型。另外,分布式电源的三相稳态分析结果,也可用于主动配电网的动态仿真的初始化。

按照并网特性,分布式电源并网形式分为四种,即同步发电机并网、异步发电机并网、电力电子接口并网、双馈电机并网。热电联产机组、小型水电等多采用同步发电机并网;部分风力发电机组(以下简称风机)和部分微型燃气轮机等采用异



步发电机并网;燃料电池、光伏发电、储能装置及大多数微型燃气轮机和永磁直驱型风机等采用电力电子接口方式并网;双馈风机采用电力电子接口和异步发电机组组合方式并网。

对称分量法是三相不平衡系统建模的一个重要方法。并网分布式电源常采用序分量分解控制方法,对正序和负序分量分别进行有效控制,所以分布式电源采用序分量方法建模具有天然优势^[2]。本节详细分析现有分布式电源的控制策略,建立不同控制方式下分布式电源的三相稳态模型,同时结合具体的控制方式,对四种常见的分布式电源接口模型进行分析,并与已有的模型进行对比。这四类分布式电源主要包括同步发电机、异步发电机、电力电子接口并网型电源和双馈发电机。本节建立的三相模型也可扩展应用于采用电力电子接口并网的柔性输配电设备。

1.1.2 并网型同步发电机

分布式热电联产机组、小型水电机组等经常采用同步发电机并网。同步发电机通过在转子侧励磁绕组中通入直流励磁电流,建立转子主磁场,转子主磁场以同步速旋转时,在定子建立同步的定子主磁场,转子与定子之间通过电磁转矩传递电磁功率。三相平衡时同步发电机的稳态模型可参考大学教材《电机学》^[3]。本节主要关注三相不平衡时同步发电机的模型。

同步发电机三相平衡模型的研究比较成熟,三相不平衡时,根据叠加原理,对三相瞬时电压,通过正向 dq 变换可得到正序的稳态复数相量,通过反向的 dq 变换,得到负序的稳态复数相量。Tamura 等^[4]研究了详细的同步发电机三相不平衡的模型,并给出同步发电机负序阻抗的计算方法,用于三相不平衡动态仿真初始化。Chen 等^[5]建立了三相总加有功功率为恒定量的同步发电机模型,同时认为发电机内电势为恒定量,而 Kamh 等^[6]建立了正序有功功率为恒定量的同步发电机模型,实现正序、负序和零序解耦计算,但目前同步发电机多采用三相总加功率为恒定量的控制方式^[7,8]。

1. 约束方程

采用对称分量法,可建立如图 1-1 所示的同步发电机三序模型。

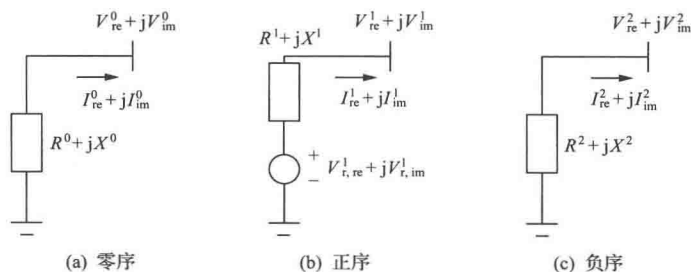


图 1-1 同步发电机序分量模型