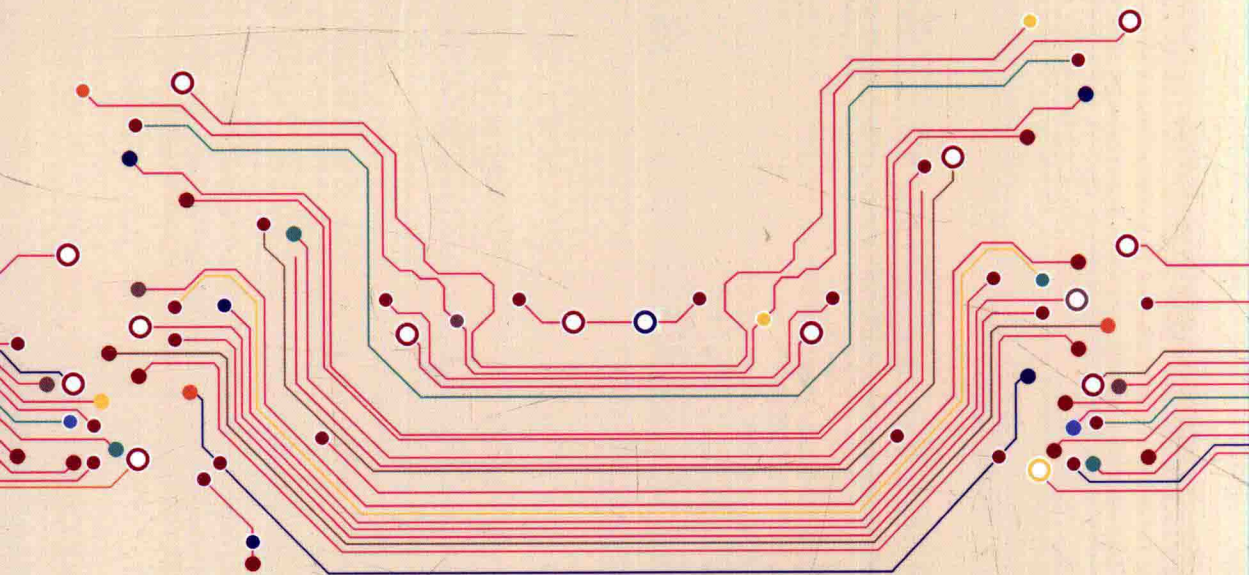




无线传感器网络 在可再生能源发电中的应用

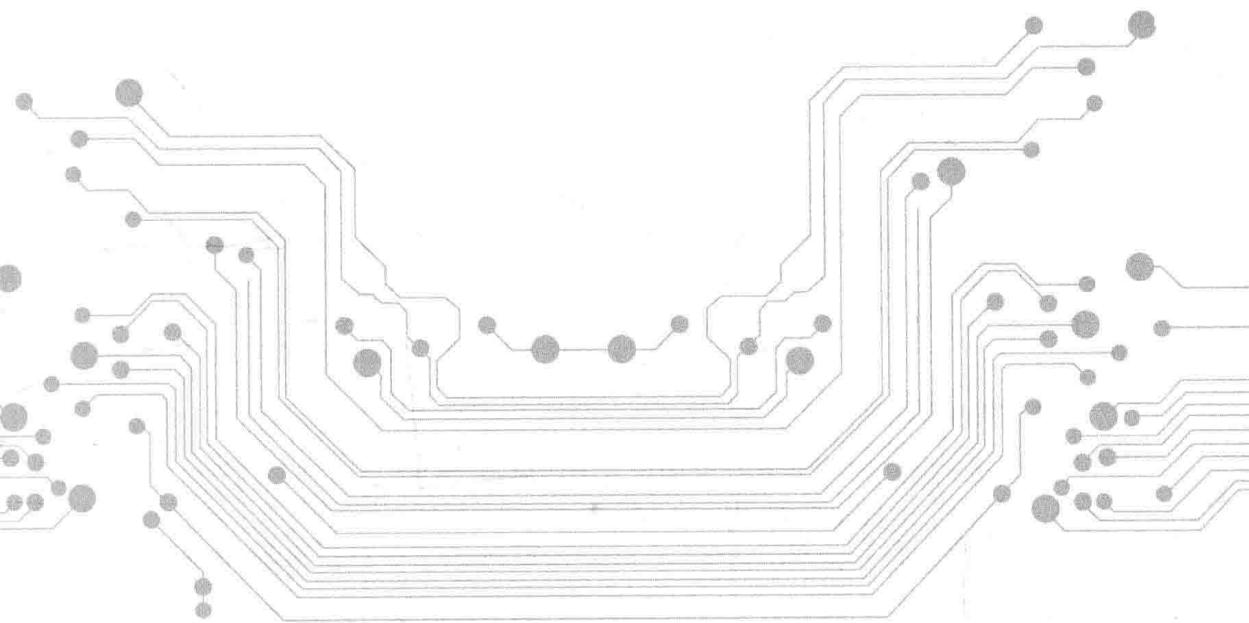
Wireless Sensor Network

In The Application Of The Renewable Energy Generation

傅质馨 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS



无线传感器网络 在可再生能源发电中的应用

Wireless Sensor Network

In The Application Of The Renewable Energy Generation

傅质馨 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书将海上风力发电、分布式光伏发电等目前可再生能源发电领域的研究热点问题与新兴的信息处理技术——无线传感器网络相结合,探讨无线传感器网络在可再生能源发电中应用的关键问题。其研究成果力求为海上风电场与分布式光伏发电系统的建设、运行和维护等提供理论依据与技术支持。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络在可再生能源发电中的应用/傅质
馨著. —南京: 河海大学出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-5630-3598-4

I. ①无… II. ①傅… III. ①无线电通信-传感器-
计算机网络-应用-再生能源-发电-研究 IV.

①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 137947 号

书 名/ 无线传感器网络在可再生能源发电中的应用

书 号/ ISBN 978-7-5630-3598-4

责任编辑/ 周 贤 周 勤

封面设计/ 谨容轩

出版发行/ 河海大学出版社

地 址/ 南京市西康路 1 号 (邮编: 210098)

网 址/ <http://www.hhup.com>

电 话/ (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)

经 销/ 江苏省新华发行集团有限公司

排 版/ 南京布克文化发展有限公司

印 刷/ 虎彩印艺股份有限公司

开 本/ 787 毫米×960 毫米 1/16

印 张/ 13.25

字 数/ 266 千字

版 次/ 2017 年 6 月第 1 版

印 次/ 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价/ 48.00 元

序 言

PREFACE

近年来,随着社会经济的迅猛发展以及对能源需求的日益增长,使得能源供应压力不断增大。同时,煤炭、石油等非清洁能源的大量使用所带来的环境污染问题也日益严重。为了保障能源的可持续利用、加强环境保护,加快开发利用风能、太阳能、地热能、海洋能、生物能等可再生能源的重要战略受到了世界各国的广泛关注。其中,风力发电技术和太阳能发电技术最为成熟,逐渐成为具有大规模开发和良好商业化发展前景的新能源发电技术。

然而,风电机组所处环境通常较为恶劣,可进入性差、维护困难,风电机组故障率较高,而海上风电机组的运行维护成本更是高达陆上风电机组的两倍以上。同时,光伏发电系统容易受到外界环境因素的影响,发电出力具有极大的波动性和随机性,其大量并网将对电网的接纳和控制能力,以及电网的运行调度能力提出更高的要求。因此,不管是针对风电机组还是分布式光伏发电系统都应该构建相应的状态监控系统,对其进行双向、动态的实时监控,以保证电网的安全可靠运行。

无线传感器网络涉及计算机、微电子、机械加工、控制工程等多门学科,最早来源于美国军事领域的研究,是由“侦测”功能发展起来的网络架构模式,与传统的无线网络技术之间存在较大区别。它的主要任务不仅仅是传统网络的传输数据,而是要达到某种监控目的,能够在一定时间内完成特定的监控任务。无线传感器网络与传统网络相比具有组网方式灵活、监控信息全面、智能化程度高的特点,是一种全新的信息采集和处理技术,大大地扩展了

人类获取信息的能力。基于无线传感器网络的诸多优点,它在工农业生产、国防军事、交通物流、医疗卫生、空间探索,以及楼宇管理、灾情预报等多个领域具有广阔的应用前景和巨大的应用价值。

本书作者长期从事无线传感器网络的理论和应用研究,在相关领域具有很深的学术造诣。本书是作者研究成果的集中展示,借助无线传感器网络在状态监控方面的应用优势,研究对风电机组及分布式光伏发电系统进行可靠监控的方法,具有良好的创新性和应用前景。研究成果可为构建稳定、可靠的分布式可再生能源发电系统监控网络提供良好的依据。

袁 越

2017年5月于南京

前 言

FOREWORD

在能源危机与气候变化等诸多因素的推动下,风力发电和光伏发电技术得到了迅猛发展。然而,风力发电与光伏发电受环境因素的影响,其出力具有显著的随机性和波动性,这给电网的稳定运行提出了挑战。因此,为风电机组和光伏发电系统构建相应的状态监测系统成为了目前的研究热点之一。

笔者近年来基于无线传感器网络对风电机组和光伏发电系统的状态监测问题进行了研究,承担了国家自然科学基金、江苏省自然科学基金等一系列相关的科研项目。通过本书的撰写将近年来的研究工作进行了梳理和总结,力图为相关行业的发展提供有益的参考。

本书分别对风电机组和光伏发电系统的状态监测系统进行了介绍,主要内容包括:状态监测系统的总体构建方案、状态监测系统的节点部署方式、状态监测系统的可靠性评估方法、状态监测系统的自愈策略等。

本书分为4篇,共14章,由河海大学傅质馨撰写、统稿。感谢南京理工大学的吴晓蓓教授与河海大学的袁越教授在本书的撰写和出版过程中给予的宝贵意见与建议。同时,向为本书付出劳动的赵敏、刘振、李乔木、张弛、冯辉、丁国荣、王勇、罗宇超、骆阳、徐善荣等表示感谢。

本书是在科研项目成果的基础上撰写的,依托的项目主要有:国家自然科学基金资助项目(51307044)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2012409)、江苏省“六大人才高峰”资助项目(2014-XNY-008)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016B08514)。笔者对上述项目的支持表示感谢。

本书的撰写参考了大量的文献,在此一并致谢。

限于作者的理论水平和实践经验,本书难免存在不妥与错误之处,恳请读者给予批评指正,不胜感激。作者的联系方式为 E-mail:zhixinfu@hhu.edu.cn。

作 者

2017 年 5 月

前言.....	1
---------	---

第一篇 无线传感器网络在可再生能源发电中的应用优势

1.1 可再生能源发电中存在的问题	3
1.1.1 海上风力发电中存在的问题.....	3
1.1.2 分布式光伏发电中存在的问题.....	4
1.2 国内外相关技术综述	5
1.2.1 海上风电机组状态监测的相关技术综述.....	5
1.2.2 分布式光伏发电系统状态监测的相关技术综述	10
1.3 无线传感器网络及其在可再生能源发电中的应用优势.....	14
1.3.1 无线传感器网络的基本概念	14
1.3.2 无线传感器网络的体系结构	15
1.3.3 无线传感器网络的拓扑结构	16
1.3.4 无线传感器网络的可靠性	17
1.3.5 无线传感器网络特点及在可再生能源发电中的应用优势.....	18
1.3.6 无线传感器网络在可再生能源发电应用中的关键技术	19
1.4 本书的内容安排.....	20

第二篇 无线传感器网络在海上风力发电系统状态监测中的应用

第一章 海上风力发电系统监测网络总体构建技术研究	27
1.1 引言.....	27
1.2 风电机组状态监测系统的性能要求.....	27

1.3	风电机组状态监测系统的构成	28
1.3.1	就地监测中心	28
1.3.2	中央监测与远程监测中心	30
1.4	风电机组状态监测系统的通信方案	31
1.4.1	常用的无线通信方式	31
1.4.2	风电机组状态监测系统通信方案的选择	33
1.4.3	基于 ZigBee 的长距离无线通信的可行性分析	33
1.5	本章小结	35
第二章	海上风力发电系统监测网络构建方法	36
2.1	引言	36
2.2	监测系统拓扑结构分析	36
2.2.1	风电机组的构成及常见故障	36
2.2.2	监测系统的拓扑结构分析	38
2.2.3	监测系统模型及节点能量模型	40
2.3	监测系统的节点部署策略	42
2.3.1	均匀部署策略	43
2.3.2	能量均衡部署策略	43
2.3.3	基于连通性的能量均衡部署策略	45
2.4	算例分析	46
2.5	本章小结	51
第三章	海上风力发电系统监测网络可靠性分析方法	52
3.1	引言	52
3.2	监测系统可靠性建模	52
3.2.1	备用节点部署策略	52
3.2.2	基于马尔可夫链的监测系统状态转移过程	53
3.2.3	监测系统可靠性函数	56
3.3	基于粒子群算法的备用节点优化求解	57
3.3.1	粒子群算法简介	58
3.3.2	基于系统可靠性备用节点数目优化	59
3.4	算例分析	60
3.5	本章小结	63
第四章	海上风力发电系统监测网络感知性能自愈方法	65
4.1	引言	65
4.2	自愈临界点预测	65
4.2.1	监测系统的覆盖度模型	65
4.2.2	监测系统的生存模型	67

4.3	监测系统自愈策略研究	67
4.3.1	相关假设及定义	67
4.3.2	基于节点感知距离调整的自愈策略算法	68
4.4	算例分析	70
4.4.1	监测系统的调整效果	70
4.4.2	监测系统的覆盖度	72
4.5	本章小结	73
第五章	海上风力发电系统监测网络传输性能自愈方法	74
5.1	引言	74
5.2	基于 WSN 的风电机组状态监测系统	75
5.3	RRA-FB 算法	76
5.3.1	节点路由链路的建立	76
5.3.2	RRA-FB 算法流程的设计	78
5.4	仿真分析	79
5.4.1	β 值的选取	80
5.4.2	节点路由链路的建立过程	81
5.4.3	数据传输成功率的比较	82
5.5	本章小结	84
第六章	海上风力发电系统监测网络人机交互平台设计	85
6.1	引言	85
6.2	.Net Framework 4.5	85
6.3	软件设计概要	86
6.3.1	设计需求	86
6.3.2	软件体系结构	86
6.4	软件各功能模块说明	87
6.4.1	用户信息管理模块	87
6.4.2	监测模块	88
6.4.3	数据分析模块	91
6.4.4	资料查询阅读模块	94
6.5	本章小结	96

第三篇 无线传感器网络在分布式光伏发电系统中的应用

第一章	分布式光伏发电系统监测网络总体构建技术	101
1.1	引言	101
1.2	分布式光伏发电系统监测网络拓扑结构	101
1.2.1	WSN 的拓扑结构	102

1.2.2	分布式光伏发电系统监测网络拓扑结构的选择	103
1.3	分布式光伏并网发电系统监测网络总体结构	105
1.3.1	监测网络总体结构的设计	105
1.3.2	光伏发电系统中的节点供电方案	105
1.3.3	无线通信技术的选择	106
1.4	本章小结	108
第二章	分布式光伏发电系统监测网络节点部署方法	109
2.1	引言	109
2.2	监测网络基础模型	110
2.2.1	兴趣点模型	110
2.2.2	传感器节点信号模型	110
2.3	监测网络传感器节点部署方法	111
2.3.1	基于网格理论的节点部署法	111
2.3.2	基于兴趣点感知的传感器节点部署法	115
2.4	仿真分析	117
2.4.1	三角形网格部署法	117
2.4.2	兴趣点感知部署法	118
2.5	本章小结	120
第三章	分布式光伏发电监测网络可靠性分析方法	121
3.1	引言	121
3.2	基于 WSN 技术的监测网络可靠性建模	121
3.2.1	监测网络传感器节点的可靠性模型	122
3.2.2	监测网络信息传输链路的可靠性建模	123
3.2.3	不同拓扑结构下监测网络的可靠性模型	123
3.3	不同拓扑结构下监测网络可靠性仿真分析	126
3.3.1	基于网状拓扑结构的光伏发电系统监测网络	127
3.3.2	基于树状拓扑结构的光伏发电系统监测网络	128
3.4	监测网络可靠性评价指标	130
3.4.1	光伏面板节点部署方式及通信链路模型	130
3.4.2	监测网络可靠性评价指标	130
3.5	故障树分析法	131
3.5.1	故障树模型的建立	132
3.5.2	故障树模型的定性和定量分析	132
3.5.3	故障树分析法在光伏发电监测系统可靠性分析中的应用优势	133
3.6	基于故障树分析法的监测网络可靠性分析	135

3.6.1	监测网络故障树模型的定性分析	135
3.6.2	监测网络故障树模型的建立	136
3.7	下行法求解监测网络故障树最小割集	140
3.8	基于蒙特卡洛模拟法的监测网络可靠性计算	141
3.8.1	蒙特卡洛模拟法	141
3.8.2	蒙特卡洛模拟法评估监测网络可靠性的基本原理	142
3.8.3	对传感器节点失效的蒙特卡洛模拟	142
3.8.4	对通信链路失效的蒙特卡洛模拟	143
3.9	仿真分析	144
3.10	本章小结	146
第四章	分布式光伏发电系统监测网络感知性能自愈方法	147
4.1	引言	147
4.2	相关研究分析	148
4.3	光伏发电系统监测网络失效情况分析	148
4.3.1	监测网络的覆盖率模型	148
4.3.2	监测网络中的冗余节点	149
4.4	光伏发电系统监测网络覆盖率自愈算法	150
4.4.1	标准粒子群算法	151
4.4.2	非定值权重的混合粒子群算法	151
4.4.3	监测网络自愈算法流程	152
4.5	仿真分析	153
4.5.1	光伏发电系统监测网络失效情况	153
4.5.2	监测网络覆盖率的自愈	154
4.5.3	监测网络覆盖率自愈的耗时	155
4.6	本章小结	156
第五章	分布式光伏发电系统监测网络信号重构方法	157
5.1	引言	157
5.2	分布式光伏发电系统信号的压缩感知	158
5.2.1	压缩感知模型	158
5.2.2	含约束的二次规划问题	159
5.3	分布式光伏发电系统信号的重构方法	160
5.3.1	迭代收缩阈值重构算法	160
5.3.2	基本梯度投影稀疏重构算法	162
5.3.3	Barzilai-Borwein 梯度投影稀疏重构算法	162
5.3.4	基于连续正则因子的重构算法	163
5.4	仿真分析	164

5.4.1	稀疏信号重构算法的比较分析	164
5.4.2	电压稀疏信号的重构波形	166
5.5	本章小结	166
第六章	分布式光伏发电系统监测网络休眠调度机制	167
6.1	引言	167
6.2	传感器节点休眠调度机制	167
6.2.1	节点休眠调度机制研究现状	167
6.2.2	节点休眠调度在工业应用中的研究现状	168
6.3	分布式光伏发电系统的数学模型及出力特性	168
6.4	基于 WSN 技术的分布式光伏发电系统监测网络能耗分析	170
6.4.1	监测网络传感器节点能耗分析	170
6.4.2	监测网络传感器节点行为	170
6.5	基于动态采样周期的节点休眠调度机制	171
6.5.1	基于光照强度变化规律的节点动态采样周期	171
6.5.2	基于环境温度变化规律的节点动态采样周期	172
6.5.3	节点动态采样周期的确定	174
6.6	基于最小深度的节点休眠调度机制	174
6.6.1	传感器节点最小深度的确定	174
6.6.2	传感器节点的休眠策略	175
6.7	基于 WSN 技术的分布式光伏发电系统监测网络	176
6.7.1	监测网络模型	176
6.7.2	监测网络寿命模型	177
6.8	仿真分析	177
6.9	本章小结	180

第四篇 总结与展望

1.1	研究结论	183
1.1.1	海上风力发电状态监测的研究结论	183
1.1.2	分布式光伏发电系统状态监测的研究结论	184
2.2	展望	185
2.2.1	海上风力发电状态监测需要进一步研究的问题	185
2.2.2	分布式光伏发电系统状态监测需要进一步研究的问题	186

主要参考文献	187
--------	-----

第一篇

无线传感器网络在可再生能源 发电中的应用优势

1.1 可再生能源发电中存在的问题

1.1.1 海上风力发电中存在的问题

由于海上风资源丰富,具有发电量大、发电时间长、无噪声限制、不占用土地、可大规模开发等多方面优势,同时海上风电一般靠近传统电力负荷中心,便于就地消纳,免去了长距离输电的问题,因此随着风电技术的不断进步,大力开发海上风电成为风力行业发展的新趋势。然而,虽然海上风资源与陆上相比更具开发潜力,但是环境状况十分恶劣,海上风电机组运行风险远远大于陆上机组,故障率高;同时,海上风电场可进入性差,风电机组的维护需要动用快艇、吊装船,甚至是直升飞机,维护工作往往还会因恶劣天气而难以及时开展,这些都大大增加了维护费用。长期以来,海上风电机组的运行维护主要采用传统的定期维修(计划维修)和故障维修(事后维修)的方式。其中,定期维修即运行 2 500 h 和 5 000 h 后的例行维护,这种停机状态下的维修方式很难全面了解设备运行状况并及时发现故障隐患。而故障维修是在故障发生之后才进行,即矫正性维护,由于缺乏对故障原因的了解和事先的准备,维修工作往往不能有针对性地及时开展,导致损失进一步增加。目前,单台海上风电机组的维护成本一般至少为陆上机组的 2 倍,整个海上风电场的维护成本高达其经济收入的 20%~25%,严重影响了风电场的生产效益。例如,2004 年,世界首座大型海上风电场——丹麦 Horns Rev 的 80 台风电机组中有多台发生故障,故障率竟高达 70%,故障部件只得运回陆上修理,风机制造商 Vestas 为此承担了高额的维修费用,直接导致该公司当年近 4 000 万欧元的亏损;台湾电力公司规划从 2003 年至 2010 年共投资 190 亿建立 186 台海上风电机组,但是到 2009 年,所安装的 82 台机组中就有 51 台无法运转,故障率高达 62%,投资近百亿,而发电收入仅仅 11 亿。因此,为了降低经济损失与维护成本,必须对海上风电机组运行状态进行可靠监控,将大量矫正性维护转变为预防性维护,减少严重故障的发生。

针对风电机组状态监测的相关技术国内外学者已经开展了大量的研究工作,一些风电制造商也相继开发了风电场状态监测系统来实现对风电场内所有风电机组状态的集群监测与控制,例如,美国 GE 公司的 Bently Nevada 系统,德国 SKF 公司的 SKF Wind Con 系统等。风电机组状态监测的相关技术主要包括风电机组

状态信息监测、故障分析与诊断、状态调节与控制三个方面,其目的是通过实时监测风电机组的状态来采集并传输有效数据,利用故障诊断技术及时发现故障隐患并控制风电机组的运行状态。风电机组状态监测需要在机组关键部位部署多个传感器,并保证传感器能够实时采集状态数据并传递给机组主控计算机进行分析与处理。然而,现有风电机组的状态监测大多基于有线通信方式,由于海上环境恶劣以及海上风电场容量的不断增加,这种监控方式存在明显缺陷:

(1) 海上风电场尤其是深海风电场远离陆地,可进入性差,有线通信设施布设难度大、成本高,不利于监控系统初始构建也不便于日后风电场扩容时监控系统的快速重组;

(2) 海上风电机组状态监测信息量大、通信压力大,传统有线通信的集中式数据处理方式难以满足应用要求;

(3) 海上自然环境多变,气候恶劣,容易导致有线设施的物理损坏,且不便及时查找修复,监控系统本身的可靠性无法保证。

基于以上分析,本书中结合国内外海上风电发展现状,重点围绕上述几方面基本要求构建适用于海上风电机组的状态监测系统,提高状态信息采集与传输的可靠性,可以更好地实时掌握海上风电机组的运行状况,这对于海上风电行业的健康持续发展具有十分重要的意义。研究成果将力求为海上风电场的建设、运行和维护等提供理论依据与技术支持。

1.1.2 分布式光伏发电中存在的问题

我国的太阳能资源分布较广且较为均匀,其优势得天独厚,具有十分广阔的应用前景。目前,光伏发电已成为太阳能发电的主流趋势,其应用市场得到了加速增长,据统计,2013 年全世界实现了新增光伏装机容量 39.5 GW,相比于 2012 年增加了 23.4%,增速提高了接近 18 个百分点。受政策变化的影响,全球光伏的市场中心很快向东方国家转移,我国已经成为光伏市场发展的领军国家。2014 年,我国全年光伏发电累积并网装机容量为 28.05 GW,同比增长 60%,其中,分布式光伏发电 4.67 GW。分布式光伏并网发电具有即发即用、减少线路成本、适用性强等优点,近几年来得到了快速发展。到 2013 年底,全国总计并网运行的光伏发电装机容量为 19.42 GW,其中,分布式光伏装机容量为 3.1 GW。2013 年全年,新增的光伏发电系统装机容量为 12.92 GW,其中,分布式光伏新增的装机容量为 0.8 GW。但是,分布式光伏并网运行会给电网带来一些安全性方面的问题,为推动和支持分布式光伏发展,国家电网积极地出台了一系列政策。

分布式光伏发电系统通常并入配电网,随着并网容量的不断增加,对配电系统的运行特性产生的影响正愈加明显。对电网来说,分布式光伏发电系统可以看作是一种分散的电源,这些电源通过中低压配电网接入,那么,原来可视为放射状无