

彩图版

Operation and Controlling for Distributed Resources
Connected to Power Grid

分布式电源并网 运行与控制

李瑞生 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



Operation and Controlling for Distributed Resources
Connected to Power Grid

分布式电源并网 运行与控制

李瑞生 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着分布式可再生能源的快速发展,如何提高分布式电源的渗透率,提高配电网对分布式电源的接纳能力是近年来研究的热点。作者根据近几年分布式电源并网技术研究工作及示范工程实践建设的体会,撰写了本书。

本书共6章,内容包括:概述、分布式电源并网电源变换、分布式电源并网关键技术、分布式电源并网保护控制技术、分布式电源运行控制及运维系统,以及分布式电源并网运行与工程应用。

本书理论与实践相结合,思路清晰、结构严谨、内容深入浅出、文字简练、应用性强。本书可供从事分布式电源并网装备制造、运行管理的管理人员和技术人员学习使用,也可供高等院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

分布式电源并网运行与控制/李瑞生著. —北京:中国电力出版社,2017.9
ISBN 978-7-5198-1034-4

I. ①分… II. ①李… III. ①电源—研究 IV. ①TM91

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第188716号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:崔素媛 (cuisuyuan@gmail.com)

责任校对:王小鹏

装帧设计:张俊霞 左 铭

责任印制:杨晓东

印 刷:北京九天众诚印刷有限公司

版 次:2017年9月第一版

印 次:2017年9月北京第一次印刷

开 本:710毫米×1000毫米 16开本

印 张:11.75

字 数:218千字

定 价:58.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



序

分布式电源接入配电网是智能配电网的重要特征和内容，也是清洁能源与传统电网结合的必然趋势。随着“互联网+智慧能源”的开展，用户侧区域能量互联网的建设已经兴起，在这样的背景下，利用光伏和风力发电、电动汽车以及储能等接入配电网，实现分布式发电的安全并网、即插即用和就地消纳，是构建清洁低碳、绿色可持续发展的能源转型供给的重要形式。

分布式电源并网系统是以光伏发电和风力发电为主的分布式发电、以储能技术为基础的平滑调节分布式发电和以电动汽车参与电网的局部能量平衡等主要部分构成，也包括微电网方式接入。针对分布式电源并网共性技术问题，包括：安全并网、信息互联、微电网离网能量平衡、无缝切换、提高接入渗透率和分布式电源运行维护等，本书作者将理论与实践相结合，把自己多年来研究的技术应用到实际工作中，积累了大量的工程应用经验和试验数据。

近几年关于分布式发电介绍和研究的文章及书籍很多，但本书没有从传统的角度和方法介绍各种分布式发电及技术，而是从分布式电源的概念及特点出发，针对配电网的运行实际和存在问题，在分布式电源并网要求、关键技术以及应用方式等方面做了深入浅出的阐述。尤其是作者介绍了自己主持或参与的相关科研项目和工程应用项目上取得的一些成果和经验，比如：提出并采用模块化三电平 DC/AC、DC/DC 电源转换技术，构成不同容量、不同应用场景的电源转换设备；创新性提出低频电源注入式主动孤岛检测技术、过电压功率自动控制技术（U/P）、过频率功率自动控制技术（f/P）、预同步并网技术、自趋优虚拟同步发电机技术、交直流混合微电网协调控制技术、无通信线互联微电网控制技术、主动配电网保护控制等技术和实现手段。书中通过仿真试验和应用案例验证，既说明了要解决的问题并给

出实验方法，又可以明确地指导具体工程实践。

该书是作者从事新能源并网技术研究的切身体会和经验心得，对从事新能源并网装备制造、电力企业配电网运行管理等行业的工程技术人员不失为一本很好的学习资料，也是可供高等学校相关专业师生阅读的一部参考书，特此推荐，期望分享。

沈兵兵

河海大学

江苏省配用电与能效工程技术研究中心

2017年8月



前 言

作为广泛利用的可再生清洁能源的光伏发电、风力发电，其利用方式分为集中利用和分散利用。分布式光伏发电、分布式风力发电、储能装置和电动汽车的发展是新能源利用的发展趋势，它们都属于电源转换，应用场景都是需要接入配电网，但它们在时间及空间上存在差异，接入配电网也存在不同，把它们统一按照“随机性电源”考虑，从“即插即用”角度，探讨分布式电源的特点及即插即用的要求，实现即插即用需要的关键技术。

随着分布式电源并网的快速发展，需要在分布式电源并网技术、储能、微电网技术上开展技术研究，提升配电网对新能源消纳的能力。作者根据工作中的实践，撰写了本书。本书全面系统地介绍了分布式电源并网的基本概念、电力电子类型电源变换、分布式电源并网关键技术、分布式电源并网保护控制技术、分布式电源运行控制及工程应用。

本书共 6 章。第 1 章概述，主要介绍分布式电源的概念和特点、并网要求、并网关键技术和应用方式。

第 2 章分布式电源并网电源变换，主要介绍三电平 DC/AC 电源转换、三电平 DC/DC 电源转换、三电平双向 DC/AC 电源模块、三电平双向 DC/DC 电源模块和电力电子电源转换设备。

第 3 章分布式电源并网关键技术，主要介绍低频电源注入式主动孤岛检测技术、自动过电压/功率 (U/P) 控制技术、自动过频率/功率 (f/P) 控制技术、预同步并网控制技术、自趋优虚拟同步发电机技术、母线占优混合微电网协调控制技术和无通信线互联微电网控制技术。

第 4 章分布式电源并网保护控制技术，主要介绍架空线路主动配电网的纵联保

护和电缆线路主动配电网的差动保护。

第5章分布式电源运行控制及运维系统，主要介绍分布式电源运行控制系统、IEC61850在分布式电源中的应用和基于物联网的分布式电源运维方案。

第6章分布式电源并网运行与工程应用，主要介绍多能互补主动配电网示范工程、高密度分布式能源接入交直流混合微电网示范工程及北辰商务中心绿色办公示范工程。

分布式电源并网处于不断地研究及探索中，本书仅对所研究和实践结果进行阶段性总结。旨在为本领域的同行提供可借鉴的相关技术及经验，共同探索分布式电源并网中的问题。

本书由教授级高工李瑞生著，许继集团研发中心的马红伟、李献伟、郭宝甫、张海龙、谢卫华、翟登辉、徐军、田盈、毋炳鑫、王卫星、刘洋等在研究过程中共同探讨，这些研究成果是与他们在研究课题过程中共同取得的成果。河海大学的沈兵兵教授、华中科技大学的苗世洪教授在百忙之中审阅了本书稿并提出了宝贵的修改意见，在此一并对他们表示衷心的感谢！在本书撰写过程中参阅了大量的论著文献，在此对这些论著文献的作者表示衷心的感谢。

限于作者水平和撰写时间，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2017年8月

目 录

序

前言

第1章	概述	1
1.1	分布式电源的概念和特点	1
1.2	分布式电源并网要求	8
1.3	分布式电源并网关键技术	9
1.4	分布式电源应用方式	12
第2章	分布式电源并网电源变换	16
2.1	三电平 DC/AC 电源转换	16
2.2	三电平 DC/DC 电源转换	22
2.3	三电平双向 DC/AC 电源模块	28
2.4	三电平双向 DC/DC 电源模块	31
2.5	电力电子电源转换设备	34
第3章	分布式电源并网关键技术	42
3.1	低频电源注入式主动孤岛检测技术	42
3.2	自动过电压/功率 (U/P) 控制技术	53
3.3	自动过频率/功率 (f/P) 控制技术	60
3.4	预同步并网控制技术	61
3.5	自趋优虚拟同步发电机技术	67

3.6	母线占优混合微电网协调控制技术	70
3.7	无通信线互联微电网控制技术	88
第4章	分布式电源并网保护控制技术	98
4.1	架空线路主动配电网的纵联保护	98
4.2	电缆线路主动配电网的差动保护	107
第5章	分布式电源运行控制及运维系统	116
5.1	分布式电源运行控制系统	116
5.2	IEC 61850 在分布式电源中的应用	125
5.3	基于物联网的分布式电源运维方案	129
第6章	分布式电源并网运行与工程应用	137
6.1	多能互补主动配电网示范工程	137
6.2	高密度分布式能源接入交直流混合微电网示范工程	151
6.3	北辰商务中心绿色办公示范项目	165
附录	名词术语中英文对照	172
参考文献	174

概 述

在清洁低碳、安全高效的新能源体系中，充分利用风能、太阳能等可再生能源，使配电网接纳更多的新能源，提高新能源接入的渗透率，需要解决新能源并网、储能控制、电动汽车接入、微电网控制等关键技术。根据利用方式，新能源接入分为集中利用和分散利用。集中利用是大型光伏电站和大型风电场作为单一大型电源直接接入大电网，本书不做论述。分散利用是光伏和风力发电分散接入配电网，结合储能技术、电动汽车接入，实现光伏和风力发电就地消纳、即插即用(Plug and Play, PNP)。本书主要讨论分散利用方式。

1.1 分布式电源的概念和特点

1.1.1 分布式电源的概念

新能源集中利用接入电压等级在 35kV 以上，容量一般在 10MW 以上，具有易于大电网接纳等优点；分散利用布置在用户附近，用户自发自用、多余电量上网，接入电压等级在 10kV 以下，容量一般在 6MW 以下，具有就地消纳、输配电损耗低、建设成本低等优点。光伏发电、风力发电接入配电网，采用分散利用方式，称为分布式发电 (Distributed Generation, DG)，IEEE 1547—2003《IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems》给出的定义：分布式发电是通过公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC) 连接到一个区域电力系统的发电设施，是分布式电源 (Distributed Resources, DR) 的子集。由于光伏发电出力多少随太阳日照变化而变化，风力发电出力多少随风速变化而变化，所以分布式发电体现的特征是随太阳昼夜变化及风速等气候变化而变化，即分布式发电具有随机性、间歇性和波动性等特点，这是与常规能源发电的最大不同。

随着储能技术的引入，分布式发电的随机性、间歇性和波动性得到了改善。储能能在配电网用电低谷时储存多余的电能，在配电网用电高峰时供给配电网，可有效改善分布式发电的间歇性。IEEE 1547—2003 给出分布式电源的定义是：分布式电



源不直接连接到大电网系统，分布式电源包括分布式发电和储能技术。在国家电网公司 2013 年 2 月向社会正式发布《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》中，明确指出分布式电源是指位于用户侧附近，所发电能就地利用，以 10kV 及以下电压等级接入配电网，且单个并网点总装机容量不超过 6MW 的发电项目。

配电网引入储能后，改善了分布式发电的随机性、间歇性和波动性，不仅可有效实现需求侧管理，消除昼夜间峰谷差，平滑负荷，还可有效地提高电力设备的利用率，降低供电成本；另外，还可促进可再生能源的应用，也可作为提高系统运行稳定性、补偿负荷波动的一种手段。

储能技术在电网系统主要采用抽水蓄能、化学电池、超级电容器、压缩空气、飞轮储能等，在分布式发电领域主要采用锂电池、铅酸电池和超级电容器储能技术。另外，随着电动汽车逐渐普及，电动汽车不仅作为交通工具，其 V2G (Vehicle-to-Grid, V2G) 技术也可将电动汽车的电能输送到电网，使电动汽车具备双向可控负荷 (Controllable Load, CL) 特征，作为配电网的有效可调节负荷使用。电动汽车是一种储能装置的特殊载体，充电站的充电设备，等同于储能变流器，可以实现电能在电动汽车和电网之间的能量互换。但电动汽车与人的出行时间相关，在时间和空间维度上均存在随机性。

分布式光伏发电、分布式风力发电、储能和电动汽车的发展是新能源利用的发展趋势，它们还有一个共同特点：都属于电力电子类型电源，这是与常规电源的最大不同，它们的应用场景都是需要接入配电网，但它们在时间及空间上又存在差异。本书着重介绍电力电子类型分布式电源，对同步发电机、感应电机类的常规分布式电源不做介绍。本书从分布式电源并网友好利用出发，阐述实现分布式光伏发电、分布式风力发电、储能和电动汽车可控柔性接入技术，适应配电网主动管理技术和实现分布式电源的即插即用接入技术。

1.1.2 分布式电源的特点

1. 电力电子化

(1) 分布式光伏发电

目前，配电网是交流电网，将光伏发电系统接入交流配电网，则需要把直流电转换成交流电。如图 1-1 所示，通过光伏逆变器可以将光伏电池发出的直流电转换为交流电，从而接入交流电网。光伏逆变器是一种电力电子电源转换装置，它由逆变桥、LC 滤波等器件组成。逆变桥实现直流到交流转变，LC 实现滤波，电能流向是单向的。

未来配电网不仅有交流配电网，也会存在直流配电网，形成交直流混合配电

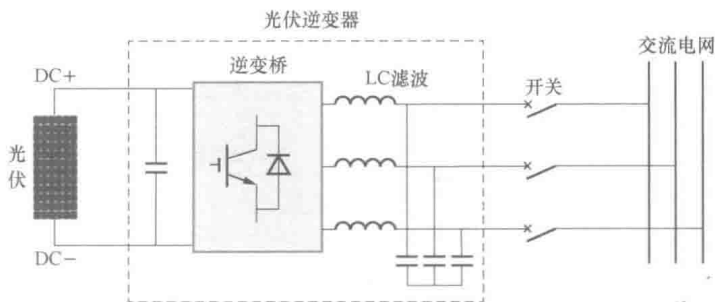


图 1-1 光伏发电通过光伏逆变器接入交流电网

网，既可以直接向交流负荷供电又可以直接向直流负荷供电。交直流混合配电网可以同时发挥直流配电网和交流配电网的优势，对于直流负荷可采用直流配电网供电，省去直流负荷所需的交流到直流的变换，减少一级转换损耗。如图 1-2 所示，光伏电池发出的直流电，通过光伏变流器（光伏接入交流电网需要直流到交流的逆变，所以接入交流电网通常叫逆变器，光伏接入直流电网需要直流到直流的变换，这种变换器称光伏变流器）接入直流配电网，光伏变流器是一种电力电子电源转换装置，是由半导体器件组成的单向 DC/DC，光伏变流器一般采用 boost 升压电路，完成直流电到直流电的转换，电流向是单向的光伏电池到直流电网。

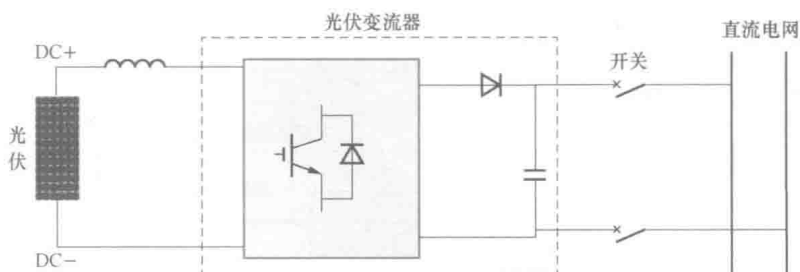


图 1-2 光伏发电通过光伏变流器接入直流电网

(2) 分布式风力发电

风力发电是将风能转化为电能的一种发电方式，风力发电机组通过特殊设计的叶片，充分吸收风中的能量，并将风能转化为机械能，带动发电机转动，最终实现将风的动能转化为电能。

常用的风力发电系统有直驱风力发电机组和双馈风力发电机组；直驱风力发电机组通过全功率变流器并网，双馈风力发电机组通过双馈变流器实现并网。

图 1-3 所示为永磁同步直驱风力发电系统，该系统是利用风能推动风机旋转带动发电机，将机械能转换为电能。永磁同步发电机的定子输出为幅值和频率变化的

交流电，该交流电通过 AC/DC 整流后变成直流电，然后通过 DC/AC 逆变，接入交流配电网，电能流向是单向地从风机到交流电网。当接入直流配电网时，可以省去 DC/AC 逆变环节。

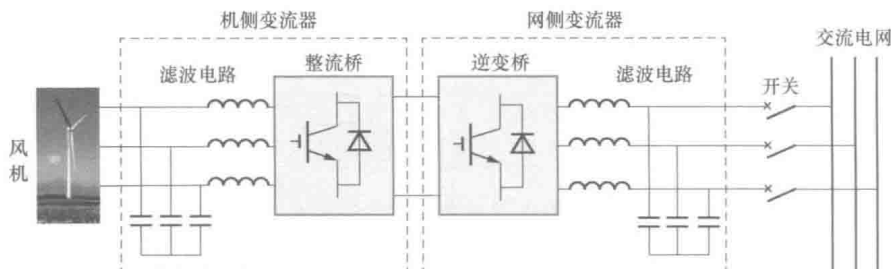


图 1-3 永磁同步直驱风力发电系统

图 1-4 所示为双馈风力发电系统，双馈发电机的定子和转子均可以向电网输送电能，双馈发电机的转子通过变流器与电网连接，定子直接与电网连接。当发电机转子转速发生变化的时候，变流器通过改变励磁电流频率的方式，保证定子旋转磁场的频率与电网频率相同，电能流向是单向地从风机到交流电网。

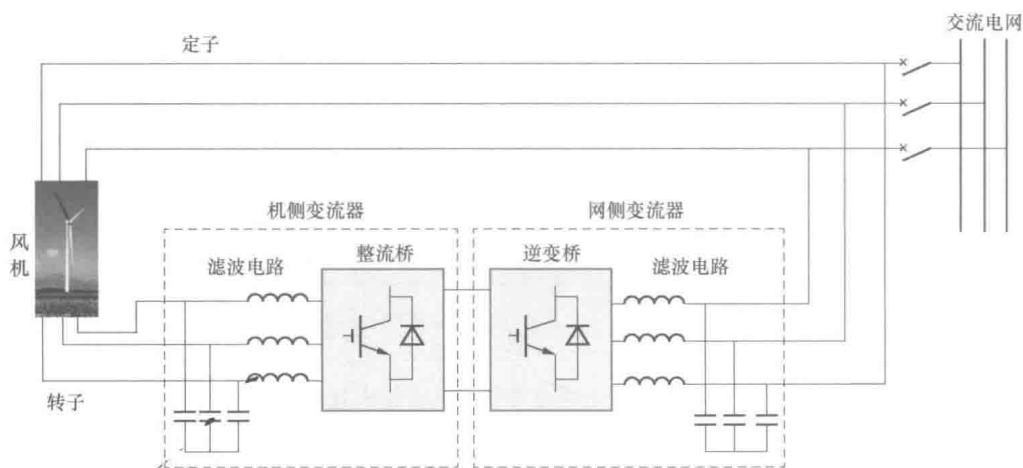


图 1-4 双馈风力发电系统

(3) 储能

储能系统既可以作为电源也可以作为负荷，具备电能存储、平滑分布式电源出力和削峰填谷的功能。如图 1-5 所示，储能电池通过储能变流器，接入交流电网。当接入直流配电网时，需利用 DC/DC 变流器进行电压幅值变换，实现电能可在储能系统与电网之间的双向流动。

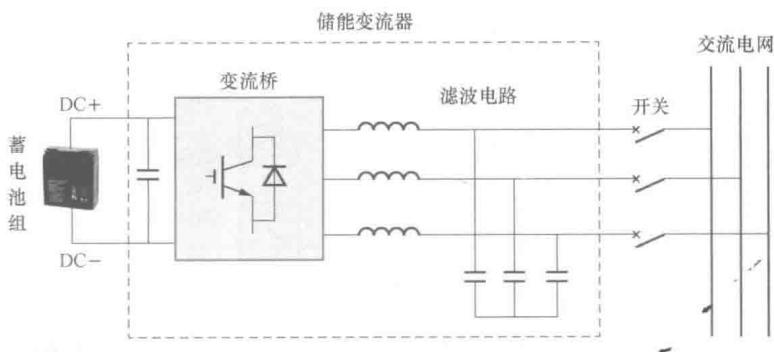


图 1-5 储能通过变流器接入交流电网

(4) 电动汽车

未来,电动汽车可作为一种随机负荷存在,也可以充当一种分布式储能,参与电网的局部能量平衡,实现与电网的双向互动,为大规模分布式电源的并网消纳提供支持。图 1-6 所示为电动汽车通过变流器接入交流电网,电流动向是电池与电网之间的双向流动。

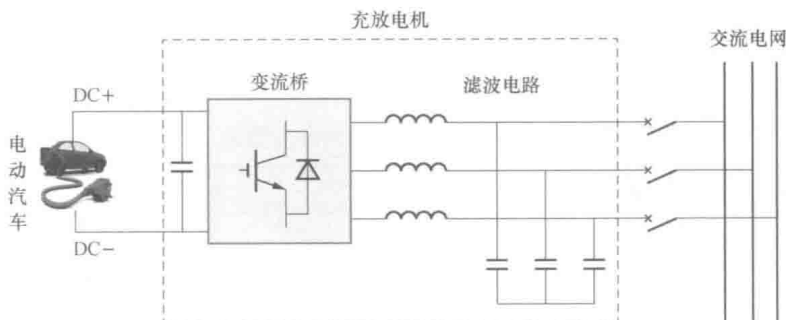


图 1-6 电动汽车 (V2G) 接入电网

光伏发电、风力发电、储能装置、电动汽车充放电都是通过电力电子类型的变流器并网。逆变器、变流器、充电机均能够实现电源转换,它们是根据应用场景的不同,实现不同的电源转换需求;但都是采用 DC/DC 及 DC/AC 构成所需要的电源转换设备,如图 1-7 所示。

2. 改变接入点电压

分布式电源接入配电网后,传统配电网的潮流分布会发生改变,同时会改变接入点的稳态电压。接入点电压的变化大小与分布式电源接入点位置以及容量大小有关。由于注入有功功率会引起节点电压升高,相关标准规定了电压异常响应分布式电源脱网时间,见表 1-1。从表 1-1 可以看出,分布式电源接入配电网对电压异常

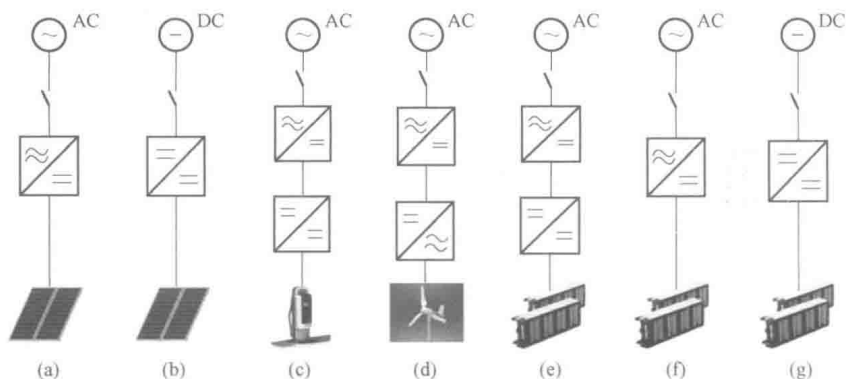


图 1-7 不同类型的电力电子电源

- (a) 光伏逆变 (DC/AC); (b) 光伏变流 (DC/DC); (c) 充电机 (DC/DC+DC/AC);
 (d) 风机变流 (AC/DC+DC/AC); (e) 储能变流 (DC/DC+DC/AC);
 (f) 储能变流 (DC/AC); (g) 储能变流 (DC/DC)

响应要求非常苛刻, 当电压超过 $1.1U_n$ 时, 要求分布式电源在规定的时间内脱网; 其中表 1-1 中标准 [1]、[2] 最严格, 当 $1.1U_n < U < 1.2U_n$ 时, 脱网时间为 60(100) 电网周期; 当 $U \geq 1.2U_n$ 时, 脱网时间为 10 个电网周期。这样可以避免分布式电源接入对配电网造成不利的影

表 1-1 相关标准的过电压异常响应要求

过电压范围 ($\%U_n$)	最大分闸周期数 $N^{\text{①}}$	相关标准
$110 < U < 120$	$60^{[1]}, 100^{[2]}, \geq 500^{[8]}$	[1] IEEE 1547—200 《IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems》 [2] Q/GDW 564—2010 《储能系统接入配电网技术规定》 [3] Q/GDW 480—2010 《分布式电源接入电网技术规定》 [4] NB/T 32004—2013 《光伏发电并网逆变器技术规范》 [5] GB/T 20046—2006 《光伏 (PV) 系统电网接口特性》 [6] GB/T 19939—2005 《光伏系统并网技术要求》 [7] Q/GDW 617—2011 《光伏电站接入电网技术规定》 [8] GB/Z 19964—2005 《光伏发电站接入电力系统技术规定》
$U \geq 120$	$10^{[1]}, 10^{[2]}, 6^{[13]}$	[9] GB/T 29319—2012 《光伏发电系统接入配电网技术规定》 [10] CGC/GF001: 2009 《400V 以下低压并网光伏发电专用逆变器技术要求和试验方法》 [11] IEC 61727—2004 《Photovoltaic (PV) systems-characteristics of the utility interface》
$110 < U < 135$	$100^{[3][4][5][6][7][9][10]}, 120^{[11]}$	
$U \geq 135$	$10^{[3][9]}, 2.5^{[4][5][6][7][10]}, 3^{[11]}$	

过电压范围 ($\%U_n$)	最大分闸周期数 $N^{\text{①}}$	相关标准
$120 \leq U \leq 130$	$\geq 2.5^{[8]}$	[12] VDE-AR-N4105; 2011—08《Power generation systems connected to the low-voltage distribution network》 [13] BDEW《Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network》
$110 < U < 115$	$6^{[12]}$	
$U > 115$	$6^{[12]}$	

① N 代表电网周期 T 的个数, 其值由国际标准的 60Hz、国内标准的 50Hz 分别计算得到。

同电压异常响应一样, 从接入配电网安全考虑, 尤其是防止孤岛现象的出现, 国内外相关标准均对分布式电源接入后的频率异常响应提出了专门要求。如: 频率上限超过 0.5Hz 或下限超过 0.7Hz, 在规定的时间内要求分布式电源脱网, 脱网时间 6 个电网周期, 表 1-2 所示为分布式电源正常运行时要求的电网电压及频率。

表 1-2 分布式电源正常运行时要求的电网电压及频率

电压范围 ($\%U_n$)	频率	相关标准
$85 < U < 110$	f_{nom}	[1] IEEE 1547. 2003《IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources》 [2] NBT 32004—2013《光伏发电并网逆变器技术规范》 [3] GB-T 20046—2006《光伏 (PV) 系统电网接口特性》 [4] GB-T 10030—2005《光伏系统并网技术要求》 [5] GB-Z 19964—2005《光伏发电站接入电力系统技术规定》 [6] GB/T 29319—2012《光伏发电系统接入配电网技术规定》 [7] IEC 61727—2004《Photovoltaic (PV) systems characteristics of the utility interface》
U_{nom}	$f_{\text{nom}} - 0.7\text{Hz} < f$ $f < f_{\text{nom}} + 0.5\text{Hz}$	[8] VDC-AR-N 4105; 2011-08《Power generation systems connected to the low-voltage distribution network》 [9] 德国中压入网标准 BDEW《Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network》

注 U_{nom} —电网电压幅值的标准值; f_{nom} —电网频率的标准值。

3. 随机性

分布式电源接入配电网的并网要求是一致的, 但不同类型的电源之间有不同的差异, 这些差异主要体现在时间、空间、能量流动等方面。在时间方面: 光伏发电出力随昼夜日出变化, 风力发电出力随气候风速变化, 储能出力随削峰填谷曲线变化, 电动汽车随人的用车出行行为变化; 在空间方面: 光伏发电、风力发电、储能位置固定不变, 电动汽车随车辆移动位置变化; 在能量流动方面: 光伏发电、风力发电均是向电网输送电能, 能量是单向流动, 储能及电动汽车则既可以向电网输送电能, 也可以从电网吸收电能, 能量是双向流动。

4. 配电网消纳困难

分布式电源接入配电网的电气特性是一致的，但它们接入配电网的需求则是不同的。分布式光伏发电、风力发电是尽可能多发电，渗透率（Capacity Penetration, CP）越高越好，但分布式电源无约束大规模接入以及负荷的多变性可能会引起较大的电压偏差和波动，甚至出现电压越限现象，影响配电网安全。这造成了高渗透率与配电网安全之间的矛盾。分布式电源尽量多发电，提高发电渗透率，渗透率过高又可能导致逆变器（变流器）因过电压而退出，分布式电源频繁投入/退出，又降低了分布式电源的发电量。储能单元能有效改善分布式发电的间歇性，但电动汽车由于空间差异，无约束的充放电以及负荷的多变性同样会引起电压偏差和波动，影响配电网的安全。

1.2 分布式电源并网要求

1.2.1 安全并网

分布式电源接入配电网后，都需要考虑并网的安全性，最重要的是要考虑配电网由于故障或自然因素等原因中断供电时，分布式电源向负荷供电所形成的孤岛现象。分布式电源的安全并网，保证维修人员的人身安全是第一位的。目前的孤岛检测方法有两种，一种是设置在逆变器内部，分为被动检测法和主动检测法。被动检测法通过电压、频率、相位、谐波等是否出现异常来判断是否形成孤岛，但被动检测法存在检测盲区问题；主动检测法通过在输出电流的幅值、频率、初始相位注入扰动来判断是否形成孤岛，经常采用的有功率扰动法、频率扰动法、相位偏移法等。当存在多台逆变器并联运行时，主动检测法会因扰动不同步而造成检测不准确。另一种是设置在逆变器外部，通过通信手段检测断路器状态实现孤岛检测或通过设置专门的反孤岛装置。主要原理为通过操纵开关及扰动负载，进而改变功率平衡来实现孤岛检测。该方法缺点为依赖通信检测断路器状态且较为复杂，要求配网自动化水平高，采用专门的反孤岛装置需要手动投入。因此需要一种不依赖逆变器与通信系统、不需要人工投入的主动式反孤岛方法以实现分布式电源的安全并网。

1.2.2 信息互联

分布式电源接入配电网需要相应的互联设备。目前，互联设备信息众多，规约类型多样，需要信息互联互通，实现信息互联与即插即用。为适应分布式电源各种运行和控制模式的需求，IEC 61850-90-7《分布式能源系统》应用 IEC61850 建模，支持分布式能源紧急控制、电压无功控制、频率控制、电压管理等各类业务，