

光伏接入电网运行分析 与系统设计

赵洋 毛宏涛 李国冀 杨健 石磊磊 主编



燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS

光伏接入电网运行分析与 系统设计

赵洋 毛宏涛 李国冀 杨健 石磊磊 主编



燕山大学出版社

2018·秦皇岛

图书在版编目(CIP)数据

光伏接入电网运行分析与系统设计/赵洋等主编. —秦皇岛:燕山大学出版社, 2018. 10
ISBN 978-7-81142-367-9

I. ①光… II. ①赵… III. ①太阳能光伏发电—电力系统运行 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 234403 号

光伏接入电网运行分析与系统设计

赵 洋 毛宏涛 李国冀 杨 健 石磊磊 主编

出 版 人: 陈 玉

责任编辑: 孙志强

封面设计: 赵小雨

出版发行:  燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS

地 址: 河北省秦皇岛市河北大街西段 438 号

邮政编码: 066004

电 话: 0335-8387555

印 刷: 中国标准出版社秦皇岛印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 889 mm×1 194 mm 1/32 印 张: 5.625 字 数: 150 千字

版 次: 2018 年 10 月第 1 版 印 次: 2018 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81142-367-9

定 价: 35.00 元

版权所有 侵权必究

如发生印刷、装订质量问题,读者可与出版社联系调换
联系电话: 0335-8387718

前 言

太阳能是一种清洁可再生的新能源,利用太阳能发电技术可以有效地减轻环境污染以及缓解传统化石能源使用的压力,有利于全球社会的可持续发展。

光伏发电作为新能源发电技术之一,于 20 世纪 70 年代在我国起步。至 2015 年年底,我国光伏发电已超过德国,成为世界光伏装机第一大国。光伏发电产业发展迅猛,在电力系统中装机容量所占比例也越来越大,但随着分布式光伏发电的大量接入,给传统配电网带来一些问题。比如,光伏发电取决于太阳能,只能在白天发电,同时受到周边环境影响,对电网的稳定性提出了挑战。

本书结合理论与实际,从内容上来看,主要讨论了光伏发电接入电网产生影响的分析以及如何设计光伏电站接入系统。从结构上看,全书共有 7 章,第 1 章概述了光伏发电在国内外的发展趋势以及对电网产生的影响;第 2 章阐述了光伏阵列数学模型、最大功率追踪模型、并网逆变器及其控制器模型并进行了仿真分析;第 3 章分析了光伏系统接入配电网前后,对电压分布、网络损耗的影响;第 4 章分析了光伏系统接入对配电系统规划的影响,确定了光伏接纳原则,计算了光伏接纳能力,仿真分析了电网接纳光伏之后对电压偏差的影响,并给出了含光伏电站的地区电网调度流程;第 5 章对光伏发电接入系统进行评估,主要包括光伏电站接入配



电网后引起的谐波、电压波动与闪变、电压偏差以及无功补偿等问题,为光伏电站建设时完善和优化设计提供参考;第6、7章分别介绍了光伏电站以10kV、35kV电压等级接入电力系统的设计。本书可以为本科生、硕士研究生以及从事光伏电站的相关研究人员提供参考。

目 录

第 1 章 光伏发电概论	1
1.1 光伏发电的形势	1
1.2 国内外光伏发电发展动态	2
1.3 光伏发电接入对电网的影响	4
第 2 章 并网光伏系统模型及其控制系统仿真	6
2.1 光伏阵列仿真模型的研究	7
2.2 最大功率跟踪方法	11
2.3 最大功率跟踪实现	12
2.4 逆变系统及其控制系统研究	14
2.5 并网光伏系统仿真分析	16
2.5.1 光伏系统光照强度变化仿真分析	17
2.5.2 光伏系统并网无功功率、电压阶跃变化仿真分析	18
第 3 章 光伏系统接入对配电网稳态运行影响分析...	20
3.1 光伏接入对配电网电压分布的影响	21
3.1.1 配电网系统的电压计算	22
3.1.2 配电网系统的电压分布	23
3.2 光伏接入对配电网网络损耗的影响	26
3.2.1 配电网系统的网络损耗计算	27
3.2.2 配电网网络损耗分析	28



第4章 光伏接入对配电网规划影响及消纳能力 计算	31
4.1 光伏系统对配电网规划的影响分析	31
4.1.1 光伏系统接入对配电网负荷预测的影响	31
4.1.2 光伏系统接入对配电网电源规划的影响	33
4.1.3 光伏系统接入对配电网网架规划的影响	34
4.2 分区域电力消纳原则	36
4.3 光伏系统消纳能力分析	37
4.4 邢台光伏接入对系统电压偏差和网损的影响仿真 ...	42
4.5 接入光伏电网调度分析	44
第5章 20 MWp 光伏发电项目接入电网电能质量 分析	45
5.1 项目概述	45
5.2 项目基础数据	45
5.2.1 20 MW 光伏工程接入电网方案	45
5.2.2 工程建设情况及内部接线方式	47
5.2.3 升压站变压器参数	47
5.2.4 光伏逆变器型号及电能质量参数	48
5.2.5 接入点短路容量及供电容量情况	56
5.3 数据分析计算	56
5.3.1 谐波计算	57
5.3.2 电压波动评估	70
5.3.3 电压闪变评估	73
5.3.4 电压偏差/无功补偿	78



第 6 章 某厂区 3 180 kW_p 分布式光伏发电项目接入系统设计	80
6.1 光伏电站地点选择与分析	81
6.1.1 光伏电站所在地实测太阳能资源情况	81
6.1.2 基本气象资料及分析	84
6.1.3 光伏电站所在区域电网情况分析	87
6.2 光伏电站接入系统方案	89
6.2.1 光伏电站站内设计	89
6.2.2 接入系统方案选择	104
6.3 继电保护及自动化配置方案	112
6.3.1 系统对分布式光伏电站继电保护的要求	112
6.3.2 系统继电保护配置现状	113
6.3.3 系统继电保护配置方案	113
6.3.4 系统继电保护设备清单	116
6.3.5 调度端主站概况	116
6.3.6 光伏电站调度自动化配置方案	117
6.3.7 自动化设备清单	119
6.4 通信配置方案	119
6.4.1 系统通信现状	119
6.4.2 各专业通道要求	120
6.4.3 通信方案	121
6.4.4 通道组织	122
6.4.5 通信设备清单	122
第 7 章 20 MW_p 光伏电站接入系统设计	124
7.1 光伏电站地点选择与分析	125
7.1.1 光伏电站所在地实测太阳能资源情况	125
7.1.2 基本气象资料及分析	129



7.1.3 光伏电站所在区域电网情况分析	131
7.2 光伏电站接入系统方案	134
7.2.1 光伏电站站内设计	134
7.2.2 接入系统方案选择	138
7.3 继电保护及自动化配置方案	148
7.3.1 系统对光伏电站继电保护的要求	148
7.3.2 系统继电保护配置现状	148
7.3.3 系统继电保护配置方案	149
7.3.4 系统继电保护设备和设备投资估算	150
7.3.5 调度端主站概况	151
7.3.6 调度关系	152
7.3.7 光伏电站调度自动化配置方案	152
7.3.8 110 kV 变电站配套自动化配置方案	155
7.3.9 调度端配套方案	156
7.3.10 设备清单及投资估算	156
7.4 系统通信	158
7.4.1 系统通信现状	158
7.4.2 各专业通道要求	159
7.4.3 通信方案	159
7.4.4 主要设备清单及投资估算	162
参考文献	165

第 1 章 光伏发电概论

1.1 光伏发电的形势

据某能源机构预测,全球一年能量消耗到 2020 年将达到 190 多亿吨标准煤^[1],如果不采取措施任其发展下去,石油、天然气等能源将在数十年之后消耗殆尽,即使是储量最多的煤炭也只能开采 160 多年^[2]。而伴随大规模能源消耗而来的是近年来温室气体的浓度已达到了前所未有的程度,已开始导致全球平均气温升高,高山冰川与雪线后退,南北极冰盖开始消融,灾害性气象频发,对人类及其他生物的生存造成严重的威胁。能源枯竭、环境污染已成为当今全球不得不重视的问题。

在当前环境下我国再也不能无限制地排放污染,只有充分利用清洁、可再生能源才能有效地促进我国社会和经济的可持续发展。由于地球表面所接受的太阳能约为 1.074×10^{14} GWh/年,是全球能量需求的 35 000 倍,太阳能资源可以说是取之不尽、用之不竭,由于我国处于有利的地理位置,具有非常丰富的太阳能资源,开发利用太阳能资源,特别是利用太阳能发电是获取清洁能源、改善生态环境的有效方法,大力发展太阳能光伏发电越来越受到我国的重视。

随着对新能源的发展越来越重视,我国不断促进可再生能源、节能减排等技术的创新应用,尤其是针对太阳能利用技术的推广应用,再加之近年来国家推出的一系列优惠政策,太阳能技术得到了前所未有的快速发展。我国还对可再生能源的发展做

出了长期规划,力争未来 15 年内在所有能源中可再生能源要占到 16%左右。光伏电站在燃料零消耗、温室气体零排放的情况下获得大量的能源,符合我国的《可再生能源发展“十一五”规划》和电力结构调整的方向,其必要性是明确而充分的。

近些年来,世界上越来越多的国家注重太阳能光伏发电的发展,尤其是在一些发达国家,比如美国、德国、日本等,光伏发电技术已经比较成熟,产业结构相对完善,在光伏发电领域处于领先地位。在我国,光伏发电技术也得到了相关研究单位的认可,认为“一些大型和远离负荷中心的电厂将越来越多地被靠近负荷中心的小型和清洁的发电方式所代替,这些负荷中心将减小对昂贵的远距离输电线路的需求”,并且这种方式已经开始实施并逐渐进行推广,当前我国已下发相关正式的文件鼓励有条件的企事业单位建设相关的工程,其建设规模在逐年扩大。总之,在各国的高度关注与政策扶持下,太阳能光伏发电产业势必会得到空前的迅猛发展,进而随着光伏发电技术的不断成熟,并网发电项目势必也会越来越多,将在光伏发电中占据主要地位,成为今后光伏发电发展的必然趋势。

1.2 国内外光伏发电发展动态

美国、德国、日本等国早在 20 世纪就开始了太阳能光伏发电技术应用的研究,并且制订出了许多详细有效的发展推广计划,这些国家在太阳能光伏发电应用领域里一直处于领先地位。例如德国最早推动的“1 000 太阳能屋顶计划”、美国制订的“百万太阳能屋顶计划”、日本提出的“新阳光计划”等,通过各国政府推出的各种优惠政策的有利引导,光伏发电产业得到了快速的发展。近几十年来,越来越多的国家意识到了光伏发电具有许多优点,



存在着巨大的发展前景,并开始注重本国光伏发电产业的发展。据相关数据显示,全球光伏电站装机容量在2006—2014年间得到了快速增长。全球光伏电站年新增装机容量在2006—2007年间只有2.8 GW,而到2014年,就已经达到了47 GW,累计装机容量到2014年年底更是达到了188.8 GW。2006—2014年全球光伏电站累计装机容量如图1-1所示。

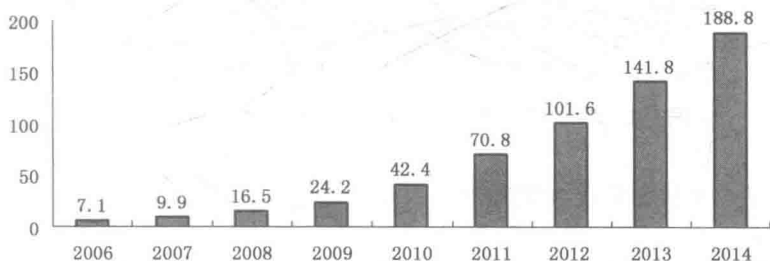


图 1-1 2006—2014 年全球光伏电站累计装机容量(GW)

据有关报告统计,到2014年年底,欧洲和亚洲为全球光伏电站建设累计装机容量最主要的分布区域。光伏电站累计装机容量在欧洲约为80 GW,占全球累计装机容量的59%,位于全球第一;亚洲和太平洋地区约为40 GW左右,占全球的29%,居于第二;而美洲装机容量仅占全球的10%;其他地区则更少,只占全球的2%。2014年全球光伏电站累计装机容量区域分布格局如图1-2所示。

根据光伏电站规模的大小及建设特点划分,光伏电站主要分为两类:一是分布式光伏,它主要是指容量为1~100 kW左右的,常建在住宅、办公楼、农牧场等场所的光伏发电形式,在美国、德国、日本等国家常被应用,在这些国家分布式光伏占据主要地位,比例甚至超过90%;二是装机容量较大,建设较为集中的并网光伏发电,在意大利、中国等国家以建设此类型光伏电站为主。在

意大利,大型光伏发电在全国市场份额中占据 63%,而在中国,大型光伏发电在全国市场份额中占据 64%。

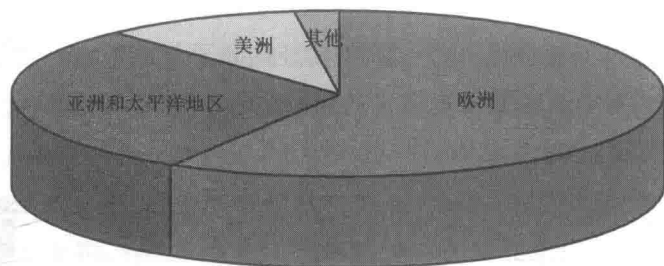


图 1-2 2014 年全球光伏电站累计装机容量区域分布格局

1.3 光伏发电接入对电网的影响

接入系统的光伏发电也称为并网光伏发电,是指光伏电站接入公用供电网,与公用供电网一起为社会生产生活提供电力保证。并网光伏发电可以直接将电能输入公用供电网,公用供电网完全取代了独立光伏发电系统中的蓄电池的配置,没有了蓄电池能量储存以及释放的环节,减少了其中的能量消耗,同时由于减少了蓄电池的建设,大大降低了投资成本,节约了占地空间。光伏发电接入拓宽了太阳能的应用范畴以及增加了太阳能发电的灵活性,并网光伏发电已是电力工业结构中不可或缺的一部分。

虽然并网光伏发电具有诸多优点,但由于光伏发电完全取决于太阳能资源,而太阳能主要是受到昼夜交替、季节变换等时间周期,天气阴晴、云量等气象条件,光伏电站的地理位置等因素的影响,使得光伏发电极其不稳定,目前光伏发电量变化幅度、频率较大,还不能被准确预测,不能对用电负荷持续、可靠、安全地供电,会对电网潮流、电压、电能质量、电网现有的继电保护、调度自动化等方面产生较大的冲击。同时由于大中型并网光伏电站大



多建在较为偏远的荒漠地带,光伏电站接入系统后会存在大功率、高电压、远距离的电能传输问题,因此确定合理的站址位置、光伏电站接入后怎样得到有效的调控等方面的问题都有待解决,必须确保光伏电站接入后在电能质量、继电保护、调度自动化、通信系统等方面使电网和光伏电站都要得到合理的优化配置,优化电网结构,保证电网能安全、稳定运行。

第2章 并网光伏系统模型及其控制系统仿真

光伏发电系统是通过太阳能电池的光伏效应,将太阳光辐射能量直接转换为电能的一种新型发电系统。光伏系统的运行方式主要可分为独立运行和并网运行两大类。

当今世界光伏发电的发展趋势是并网光伏发电,并网光伏系统可分为住宅用并网光伏系统和集中式并网光伏系统两大类。前者特点是光伏系统发的电能直接分配给用户负载,多余或不足的电力通过连接的电网来调节;后者特点是光伏系统发的电能被直接输送到电网上,由电网把电力统一分配给各用户。两者在系统结构上差别不大。

并网光伏系统通常由光伏阵列、逆变器、交流电路和控制电路四部分组成,如图 2-1 所示。并网逆变器将光伏阵列所产生的直流电转换成交流电进而并入电网;控制电路部分实现光伏阵列最大功率点跟踪、控制逆变器并网的输送功率和并网电流的波形,进而使光伏阵列模块所发的最大功率与向电网输送的功率平衡。

本章首先阐明并网光伏系统中光伏阵列、最大功率追踪元件和逆变器及其控制电路的数学模型;然后在此基础上选用 DIgSILENT 软件作为仿真工具,在 DIgSILENT/PowerFactory 环境下搭建了并网光伏系统模型;最后对并网光伏系统进行仿真分析加以验证。

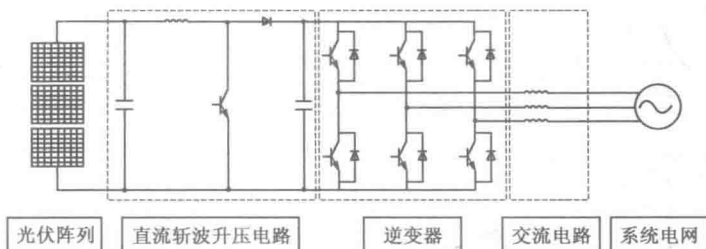


图 2-1 并网光伏系统结构图

2.1 光伏阵列仿真模型的研究

光电转换的最小单元是单体光伏电池,一般不能达到工程电源使用要求。光伏电池组件是将单体光伏电池进行串并联并封装后形成的。光伏电池组件的伏安特性随电池表面温度 T 和光照强度 S 变化而变化,即 $I_{pv} = f(V_{pv}, S, T)$,其中 I_{pv} 是光伏电池输出直流电流, V_{pv} 是光伏电池输出直流电压。光伏电池组件标准测试条件(STC)下测出的参数短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、最大功率电流 I_m 、最大功率电压 V_m 和最大功率 P_m 值通常由生产厂家提供,如何在工程精度允许情况下利用这些工厂测试参数反应组件及由相应组件构成的光伏阵列在不同温度、不同日射强度下的伏安特性特性,显得格外重要。

根据基础电子学理论,光伏电池的等效电路如图 2-2 所示。

规定图中所示的光伏电池电压 V_{pv} 和电流 I_{pv} 的方向是正方向,则光伏电池的伏安特性方程如式(2-1)所示:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q}{AKT}(V_{pv} + R_s I_{pv})} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (2-1)$$

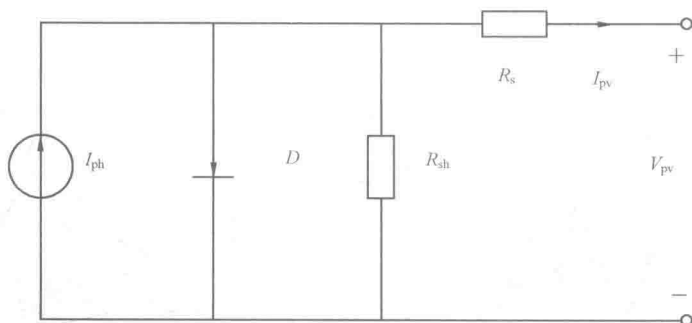


图 2-2 光伏电池的等效电路图

式中, I_{ph} 是光生电流; I_s 是二极管反向饱和电流; q 是电子电荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$); A 是二极管因子; K 是玻耳兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T 是绝对温度; R_s 是串联电阻; R_{sh} 是并联电阻。

工程用模型是在保证精确性的同时强调实用性。工程用光伏电池模型通常要求在满足一定的精度下仅利用供应商提供的几个重要技术参数如 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 和 P_m 就能反映阵列的特性, 并能便于工程计算分析, 对方程式(2-1)进行条件允许的两点近似, 即:

(1) 将 $(V_{pv} + R_s I_{pv})/R_{sh}$ 项忽略, 这是由于在通常情况下该项远小于光生电流;

(2) 假设 $I_{ph} = I_{sc}$, 这是由于在通常情况下 R_s 远小于二极管正向导通电阻, 并定义: 第一, 光伏电池开路状态时, $I_{pv} = 0$, $V_{pv} = V_{oc}$; 第二, 最大功率点处, $I_{pv} = I_m$, $V_{pv} = V_m$ 。通过以上两个条件建立太阳能电池的工程用数学模型, 光伏电池伏安特性方程可简化为:

$$I_{pv} = I_{sc} - I_{sc} C_1 \{ \exp[V_{pv}/(C_2 V_{ov})] - 1 \} \quad (2-2)$$

在最大功率点时, 有 $I_{pv} = I_m$, $V_{pv} = V_m$, 可得:

$$I_m = I_{sc} - I_{sc} C_1 \{ \exp[V_m/(C_2 V_{ov})] - 1 \} \quad (2-3)$$