

# 光伏出力特性指标体系和分类典型曲线研究

王建学<sup>1</sup>,张耀<sup>1</sup>,万筱钟<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电气工程学院,西安 710049;2. 国家电网公司西北分部,西安 710048)

Research of index system and typical curves on photovoltaic power output characteristics

WANG Jian-xue<sup>1</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>, WAN Xiao-zhong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Branch of State Grid Company of China, Xi'an 710048, China)

**摘要:**光伏发电近几年得到快速发展,其出力特性的分析研究逐步深入,但还没有形成成熟的光伏出力评价指标体系。针对这个问题,提出了面向电网运行的光伏出力特性指标体系。通过理论研究和数据测算,发现光伏出力的波动性较风电明显要小、规律性较强,完全可以采用简单、精练的指标体系来表述。提出采用指标“季节属性”来表征光伏发电在不同季节的可出力时段,指标“平均出力”来表征光伏全天出力整体水平,指标“全日最大出力”来表征光伏出力对系统调节能力的影响。以某实际光伏电站出力为例,分析了所提评价指标体系的具体指标和分类结果。计算结果说明了通过核心指标体系,可以直观描述光伏出力特性,并有助于形成典型出力曲线,具有很好的应用前景。

**关键词:**光伏发电;指标体系;电网运行;典型曲线

**Abstract:** There has been a rapid development of photovoltaic (PV) power in recent years. Further analysis about the feature of PV power output was also a research focus. However, we have not got the mature PV power evaluation index system. After the data calculation, we found that the randomness of PV power output was less than that of wind power output. Therefore, we could choose alternatively some simple and refined index system to character PV power output. In this paper, we proposed an evaluation index system for PV power output. The index 'PV power output season' is used to describe the period of PV power output during different season. The index 'averaged PV power output' is used to describe the level of PV power output. The index 'maximum PV power output per day' is applied to quantitatively analyze the impact of PV power output on peaking service. The paper takes the output of an actual photovoltaic power station as an example, explains the indexes in detail and the application in curve classification. The results show that the proposed index system can directly describe PV power characteristics and form the typical curves, which has good application prospect.

**Key words:** photovoltaic (PV) power; index system; power system operation; typical curve

中图分类号:TM714 文献标志码:B

近年来以风电、光伏为代表的新能源受到高度重视,装机容量迅速增加。目前光伏发电有2条发展道路。国外发达国家侧重集中发展屋顶并网光伏工程,属于分布式发电范畴,光电功率主要就地消纳,少量送入电网,从而减小了对电力系统的冲击<sup>[1-3]</sup>。而我国在稳步推进分布式光伏发电的同时,当前发展现状是在日照充足的西部地区建设一批大规模光伏并网发电基地。不管是分布式发电还是集中并网,都需要刻画和应对光伏发电的间歇性和随机性<sup>[4-7]</sup>。

在日常电网运行中,运行人员已经对光伏出力

曲线形状形成了一定的直观认识,比如单峰曲线、总体呈现“半包络”形状<sup>[8]</sup>。这可以借鉴较成熟的日负荷曲线评价指标体系和典型负荷曲线来开展研究<sup>[9]</sup>。然而与负荷曲线不一样,光伏出力曲线的形状并不固定,容易受到云层等因素的影响。目前,仅有不多的研究讨论光伏发电的评价指标。

文献[10]定义了光伏电站的六状态可靠性模型,并且建立了相应的可靠性指标评价体系;文献[11]构建了一套光伏并网发电规划方案的综合评价指标体系,为规划光伏电源位置及装机容量提供了参考依据;文献[12]通过选取指标,应用熵权法和模糊综合评价模型得出了光伏发电系统的综合评分结果;文献[13]提出了储能单元充放电优化模型,给出了衡量风光储能联合发电系统有功功率波动的评价指标。

从实际应用角度出发,指标最好能够具有类似负荷曲线指标的直观性特征,才能方便地将这些指标直接用于指导光伏并网后电网运行和规划。故本文在分析光伏出力特征的基础上,提出一套光伏出力特性评价指标体系。本文与课题组风电指标体系

收稿日期:2017-06-19

基金项目:2017年陕西省重点研发计划重点产业创新链项目(含高比例可再生能源的电力系统优化运行与控制保护关键技术研究2017ZDCXL-GY-02-03);国家电网公司西北分部科技项目(52993216000H)

作者简介:王建学(1976),男,重庆人,教授,博士生导师,研究方向为新能源电力系统、微电网规划和运行、电力市场;张耀(1988),男,江苏扬州人,博士,研究方向为新能源概率预测和电力系统随机优化理论;万筱钟(1974),男,四川叙永人,硕士,研究方向为新能源电力系统运行分析和管理。

的论文<sup>[14]</sup>,共同构成了新能源出力特性指标体系。

## 1 光伏出力特性分析

光伏发电出力水平与地面接收太阳辐射的变化密切相关<sup>[15-16]</sup>。光伏发电系统出力水平随着太阳辐射的变化呈现先增后减的特点,中午时分达到出力峰值,总体呈现“半包络”形状。半包络线的宽度与日照时间有关,半包络线的高度与季节、气象条件有关。为此可以从以下2个方面来讨论光伏发电出力特性。

### (1) 季节属性的影响

光伏可出力时段受到日出时刻和日落时刻的限制,因此受季节特性的影响较大,图1给出某光伏电站1月1日和7月1日的日出力曲线。从下图可以看出在不同的季节,光伏出力曲线形状相差较大,夏冬2季的光伏电站起始发电时刻相差达到2小时,全天出力持续时间相差接近4h。

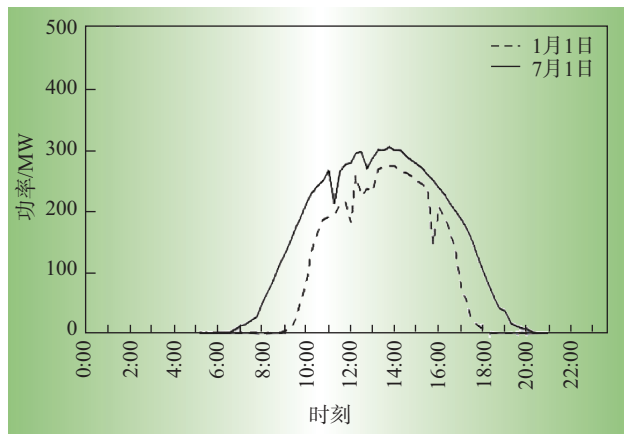


图1 夏季和冬季的光伏电站每日出力曲线

一般来说,可以使用“日出时刻加上0.5h”表征当天光伏发电的起始时刻、使用“日落时刻减去0.5h”表征发电终止时刻。通常可以认为在某一个季节里,某地的日出时刻、日落时刻基本不变,因此对于光伏出力曲线,所对应的季节属性就非常重要。如果已知季节属性,就可以根据日出时刻和日落时刻,大致确定出光伏发电的起始时刻和终止时刻,进一步计算得到光伏出力的持续时间长度。

### (2) 气象条件的影响

由于光伏发电直接受到太阳辐射的影响,因此不同的天气情况也会对光伏发电系统的出力水平造成影响,例如在阴雨或者多云等天气条件下,光伏发电系统的出力可能会急剧下降。这给光伏发电系统出力带来了较大不确定性。图2中给出了晴朗、多云、阴雨这3种天气情况下的光伏发电系统日出力曲线。从图2中可以看出,天气状况对光伏系统出力的影响非常大,是光伏出力的重要约束条件。

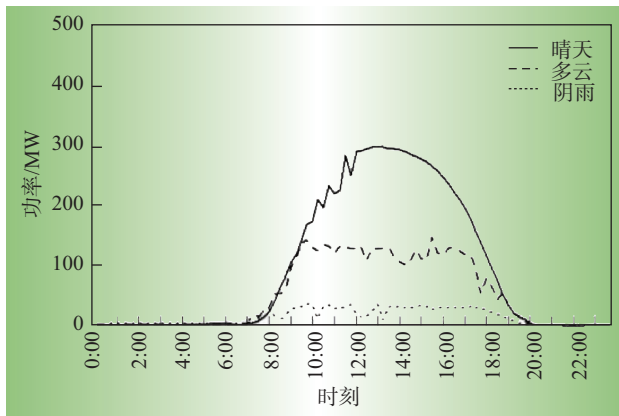


图2 不同气象条件下的光伏电站每日出力曲线

## 2 光伏出力特性评估指标体系

作为对比,风电出力的随机性和间歇性较强,有时需要使用比较复杂的数理统计指标。而光伏出力的波动性要明显小于风电出力,其规律性更强,主要表现在以下几个方面:第一、气象因素,影响光伏发电的云层活动比影响风电的大气对流要更加稳定;第二、时段因素,光伏电站只在白天发电,其随机性对电网的影响有限,特别对后半夜电网调峰没有影响;第三、地理因素,荒漠地区的日照小时达到3000h以上,全年几乎不下雨,基本上都是“晴天”和“多云”,能够保证光伏电站出力的稳定性。因此对于并网运行的光伏电站来说,可以认为光伏出力随机性高于负荷随机性,但是远低于风电随机性。参照负荷曲线的相关指标体系,完全可以采用更加简单、更加精炼的指标体系来表述光伏出力的主要特征。

根据已有研究,新能源特性指标体系通常可以包括3个部分:全日整体指标、单点评价指标和时段属性指标。具体到光伏出力指标体系,根据上述光伏出力特征分析,指标的设计需要能够反映光伏发电受气象条件和受季节性的影响。对于光伏出力特性评价指标体系来说,全日整体指标可采用光伏电站的日平均出力;单点评价指标可采用光伏电站的日最大出力;在时段属性指标中直接指定光伏出力所属季节,该信息通常属于已知信息。下面对3个评价指标进行具体说明。

### (1) 时段属性代表性指标:光伏出力季节属性

光伏发电的可出力时段受到季节的影响较大,在计算评估指标时应当考虑季节因素。在本文所提指标体系中,采用光伏出力季节属性,来表征光伏可出力时段受时间季节的影响。

如果已有了光伏出力历史数据或者已经明确了要计算的日期,在分析时可以直接给定季节属性指标,按照“春秋两季”、“夏季”和“冬季”3种类别分别考虑。应注意各地区应根据当地情况做调整,比如即使是同一季节,上海和新疆的光伏可发电时段也应该不同。比较典型的可发电时段值,大致在春

秋2季为8:00~19:00、在夏季为7:00~20:00、在冬季为9:00~18:00。

(2) 单点评价代表性指标:光伏全日最大出力

光伏全日最大出力,是指在光伏可发电时段内的光伏出力最大值,可以用公式表示为

$$P_{\max} = \max_{t \in T_0} P_t \quad (1)$$

式中:  $T_0$  为光伏电站的可发电时段。指标“光伏全日最大出力”反映了光伏电站的极限出力情况。

(3) 全日整体代表性指标:光伏平均出力

指标“光伏平均出力”属于平均值范畴。实际光伏出力统计数据表明,光伏出力主要服从对称型分布,此时使用平均值更加简便,并且有利于电网运行人员理解所提指标的具体含义,因此本文选择指标“光伏平均出力”。

光伏平均出力,是指在光伏可发电时段内的光伏出力平均值,可以用公式表示为

$$\bar{P} = \frac{1}{N_{T_0}} \sum_{t \in T_0} P_t \quad (2)$$

式中:  $T_0$  为光伏电站的可发电时段;  $N_{T_0}$  为可发电时段的总长度。光伏平均出力直接反映了当天的气象状况,其大小可以直接对应为晴天、阴雨等气象状况。若光伏平均出力较大,则表明天气晴朗、太阳辐照强度较高,光伏电站能够为电网提供了更加充裕的电源支撑。若光伏平均出力较小,则表明气象状况较差、太阳辐照强度较低,电网需要安排更多的常规机组以替代光伏电站出力。

这3个指标采用了最重要、最直接的物理量,从而构成了光伏出力特性的基础评估指标体系。为了更准确地反映光伏出力的波动特性,还可以采用更多指标作为补充,例如“光伏全日中位数出力”等。另外如果能够计算出外大气层的每天太阳辐射强度曲线,然后将其转换为光伏电站的理想出力曲线,最后将“全天光伏实际出力的总电量”除以“全天光伏理想出力的总电量”,就可以计算得到光伏发电指标“填充因子”等。

### 3 基于评估指标体系的光伏出力曲线分类及典型曲线

(1) 分类指标的选取

在电力系统运行和规划中,往往需要基于典型的光伏出力曲线来开展。本文所提的评估指标可以作为一种分类标准,来提取典型曲线。

本文研究侧重于大规模光伏电站,所以指标体系选取需要针对这类电站的特点。由于大规模光伏电站主要集中在荒漠戈壁等地区,而这些地区太阳辐射条件好、气象条件稳定,因此大规模集中式的并网光伏电站出力波动性相对较小,大多数日子都能够观察到较为完整的半包络线型光伏出力曲线。在这种情况下,光伏出力曲线存在较为固定的

形状,因此指标“光伏全日最大出力”和“光伏平均出力”存在较强的相关性。为了使得分类指标体系更加精简,这2个指标可以任选其一(后面的算例计算结果也验证了这个结论)。本文采用了对电网运行更有指导意义的指标“光伏全日最大出力”,并以光伏电站装机容量为基准值,将该指标转换为标么值形式  $C_1^*$ 。

与风电可出力时段分布到全天24h不同,光伏可出力时段受到日出时刻和日落时刻的限制,故受季节的影响较大。因此在选择分类指标时,需要考虑光伏出力曲线的时间季节因素,即引入分类指标“光伏出力曲线的季节  $C_2$ ”。

基于以上分析,本文选取的光伏出力曲线分类指标为:①光伏全日最大出力的标么值  $C_1^*$ ;②光伏出力曲线的季节属性  $C_2$ 。在选定分类指标后,就可以设定各指标的分类阈值,并对光伏曲线进行分类。

(2) 分类方法和分类结果

本文所提出的分类方法如下:根据光伏全日最大出力指标  $C_1^*$  分为3类,即“低出力”(0-1/3)、“中出力”(1/3-2/3)、“高出力”(2/3-1),分别代表3种气象状态,即阴雨、多云和晴朗,用于反映半包络线的最大值;根据光伏出力的季节  $C_2$  分为3类,即“春季+秋季”、“夏季”和“冬季”,用于反映半包络线的持续时间。根据上述分类方法,理论上可以得到9类光伏出力曲线。经过测算,在实际应用中上述9个分类均存在,因此针对本指标体系的光伏出力曲线分类情况如表1所示。

表1 基于光伏出力特性评价指标的光伏曲线分类

分类编号	光伏最大出力 $C_1^*$	光伏出力季节 $C_2$
G1	低水平	春秋季
G2	中水平	春秋季
G3	高水平	春秋季
G4	低水平	夏季
G5	中水平	夏季
G6	高水平	夏季
G7	低水平	冬季
G8	中水平	冬季
G9	高水平	冬季

参照表1光伏分类标准,就可以把大量历史光伏曲线归入对应的类,然后取该类光伏曲线的平均值作为该类的典型光伏出力曲线。

需要指出的是,对于分布式光伏发电系统或者微电网来说,受到建筑阴影和微观气象等影响,全天光伏面板接受到的太阳辐射波动性较强,光伏系统的全日最大出力和平均出力不存在较强的相关性。因此针对分布式光伏出力特性,需要在分类依据上添加一个指标,即光伏平均出力的标么值

$C_3^*$ 。其分类思想和典型曲线确定方法与前面类似,可以参照处理,这里就不再赘述。

## 4 算例分析

### 4.1 光伏出力特性指标体系的计算结果

选取某 500 MW 的大型光伏电站 (photovoltaic farm, PF) 为研究对象,数据时间范围为一年,数据采样周期为 15 min。由于电站数据中存在遗漏情况以及异常偏差情况,实际可供分类分析的光伏日出力曲线总数为 313 天。图 3 给出了冬季典型日(1月 15 日)、春季典型日(4月 15 日)、夏季典型日(7月 15 日)的光伏电站实际出力曲线。

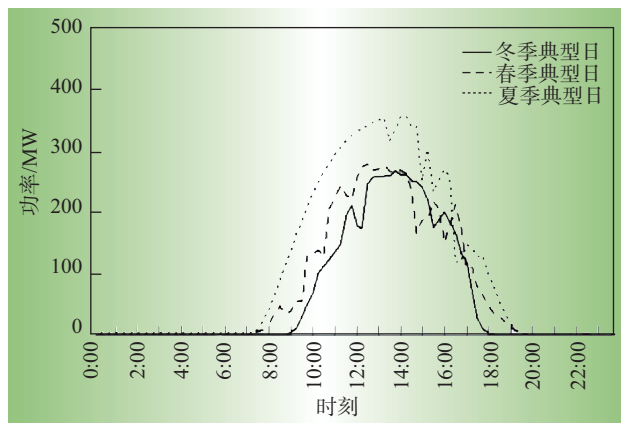


图3 不同季节的光伏电站典型日出力曲线

根据本文所提方法,表 2 给出了光伏电站在上述各季典型日的光伏出力特性评价指标。其中,冬季典型日和春季典型日的光伏最大出力属于中等水平(分别与表 1 中的分类 G8 和 G2 相对应),夏季典型日的光伏最大出力属于高水平(与表 1 中的分类 G6 相对应)。

表 2 不同季节的光伏出力特性指标

季节	平均出力/MW	全日最大出力/MW	相关系数
冬季	132.70	267.24	0.925 2
春季	159.57	277.45	0.878 8
夏季	226.42	355.95	0.909 3

表 2 还给出了在不同季节下,指标“光伏平均出力”与“光伏全日最大出力”之间的相关系数,可以看出二者相关系数均在 0.85 以上,表明 2 种指标具有较强的相关性。针对大型光伏电站,为了使得分类指标体系更加精简,从这 2 种指标中仅采用一种指标来指导分类是可行的。

### 4.2 光伏出力的分类典型曲线

在计算得到全部光伏日出力曲线(共计 313 条)的 2 个指标后,按照表 1 中列出的分类标准,对所有光伏日出力曲线进行分类,分类结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,本文提出的用于描述光伏出力特征的 9 个分类,包含了现实中光伏出力可能出现的所有形状。对于所研究的光伏电站来说,G2

表 3 历史光伏出力曲线的分类结果

分类编号	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
曲线数量/条	10	87	65	20	47	3	4	54	23
比例/%	3.0	28	21	6.4	15	1.0	1.3	17	7.3

类、G3 类、G5 类和 G8 类出现几率最大,表明在全年时间范围内光伏电站总体出力水平中等偏高。

对于上述分类结果,可以取相近时段内该类光伏出力曲线的平均值作为该类的典型光伏出力曲线。需要说明的是,根据实际需要,典型出力曲线也可以采用该分类中极端出力曲线等方法。针对光伏电站 PF,图 4、图 5 和图 6 分别给出了春秋 G1—G3 分类、夏季 G4—G6 分类和冬季 G7—G9 分类的典型光伏出力曲线。

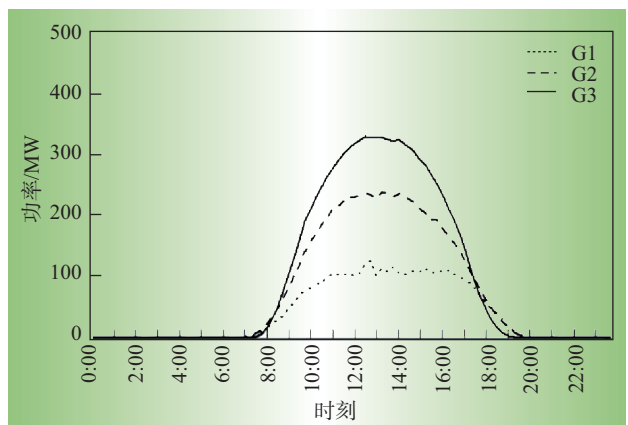


图4 春秋分类 G1—G3 对应的典型光伏出力曲线

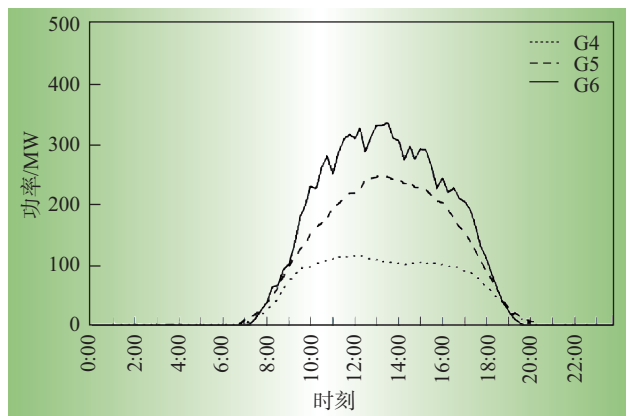


图5 夏季分类 G4—G6 对应的典型光伏出力曲线

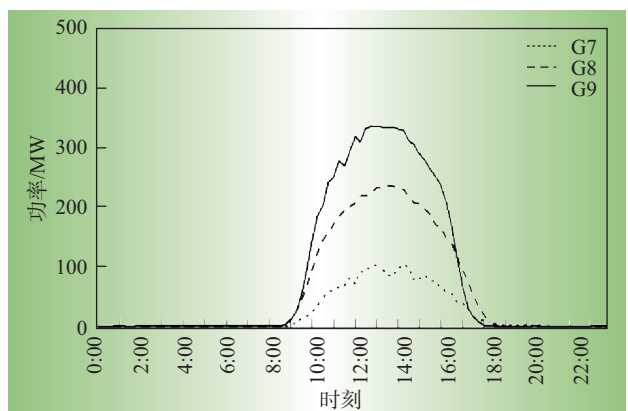


图6 冬季分类 G7—G9 对应的典型光伏出力曲线

为了验证典型曲线的合理性,本文采用“均方根误差(root-mean-square error, RMSE)”评估了典型光伏出力曲线和实际光伏出力曲线的偏差。表4给出光伏电站各分类编号对应的RMSE各项统计指标。

表4 典型出力曲线与实际出力曲线的RMSE结果 %

分类编号	平均值	最小值	最大值	RMSE ≤15%频率	RMSE ≤10%频率
G1	4.74	2.77	6.87	100	100
G2	8.44	3.88	19.48	96.55	77.01
G3	6.49	3.09	20.46	93.85	87.69
G4	5.47	2.66	13.10	100	95
G5	10.29	5.24	20.23	85.11	63.83
G6	5.35	3.92	7.74	100	100
G7	5.60	4.15	7.99	100	100
G8	8.22	3.70	18.87	96.30	77.78
G9	8.36	1.91	19.45	95.65	69.57
均值	6.97	3.48	14.91	96.38	85.65

从表4可以看到,绝大多数分类对应的RMSE平均值都小于10%,所有分类的RMSE平均值为6.97%。这说明本文所提指标体系是合理的,能够反映不同的光伏出力特性。据此形成的典型出力曲线误差较小,能够为电力系统运行和规划提供有益的基础性信息。

## 5 结束语

本文基于光伏出力特性的分析,提出了光伏出力特性基础指标体系,包括“光伏出力季节属性”、“平均出力”和“全日最大出力”。所提的指标体系物理意义直观明确,计算简单,可以方便指导形成各类典型光伏出力曲线。

该指标体系既能适用于大规模光伏电站,又能适用于分布式光伏发电系统和微网系统。该光伏指标体系可拓展性好,与前期所提的风电指标体系共同构成了新能源出力特性指标体系,可以用于新能源电力系统的预测、规划、运行和交易,具有较高的实用价值。D

## 参考文献:

[1] Bialasiewicz J. Renewable energy systems with photovoltaic power generators: operation and modeling [J]. IEEE

Transactions on industrial electronics, 2008, 55 (7) : 2 752-2 758.

- [2] Khadem S, Basu M, Conlon M. Power quality in grid connected renewable energy systems: role of custom power devices[C]//International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2010:1-6.
- [3] Alajmi B, Glasgow U, Ahmed K, et al. A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2013, 60(4), 1 596-1 606.
- [4] 吴理博,赵争鸣,刘建政,等. 单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(6):73-77.
- [5] 董密,罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(20):97-102.
- [6] 汪海璞,白晓民,马纲. 并网光伏电站的发电可靠性评估[J]. 电网技术,2012,36(10):1-5.
- [7] 周磊,袁晓玲,徐杰彦. 基于需求侧管理的分布式光伏发电余电上网调控研究[J]. 电力需求侧管理,2015,17(2):13-16.
- [8] 郭宇杰,袁晓玲,李昌明,等. 利用最佳相似日的光伏电站短期出力预测[J]. 电力需求侧管理,2015,17(6):5-8.
- [9] 赵希正. 中国电力负荷特性分析与预测[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [10] 王震,鲁宗相,段晓波,等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系[J]. 电力系统自动化,2011,35(15):18-24.
- [11] 王琬,曾博,刘宗歧,等. 光伏发电并网规划综合评价模型及其应用[J]. 现代电力,2011,28(6):82-86.
- [12] 宋玉萍,孟忠. 太阳能光伏电站项目的评价方法及实证研究[J]. 华北电力技术,2011,40(1):30-34.
- [13] 李碧辉,申洪,汤涌. 风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J]. 电网技术,2011,35(4):123-128.
- [14] 王建学,张耀,万筱钟,等. 面向电网运行的新能源出力特性指标体系研究—风电出力特性指标体系[J]. 电网与清洁能源, 2016,32(2):42-51.
- [15] Stefan Krauter. 太阳能发电-光伏能源系统[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [16] Beltran H, Jaume I, Castello de la Plana. Evaluation of Storage Energy Requirements for Constant Production in PV Power Plants [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2013, 60(3), 1 225-1 234.