

基于灰色理论的光伏发电系统 出力预测方法

侯伟¹ 肖健² 牛利勇³

(1. 北京市电力公司, 北京 100031; 2. 国网物资有限公司, 北京 100120;
3. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要 本文对电动汽车充电站光伏发电系统发电能力进行分析, 假定光伏发电并网逆变器可以保证光伏池板阵列始终工作在输出最大功率的工况下, 建立光伏发电系统模型, 利用灰色预测理论建立了光伏发电系统的发电量预测模型, 对光伏发电系统的未来发电量进行预测。

关键词: 光伏发电系统; 发电量; 分析; 预测

Analysis of Power Generation Capacity of Photovoltaic Power Generation System in Electric Vehicle Charging Station

Hou Wei¹ Xiao Jian² Niu Liyong³

(1. Beijing Electric Power Company, Beijing 100031; 2. State Grid Material Company, Beijing 100120;
3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract This paper analyzed power generation capacity of photovoltaic power generation system in electric vehicle charging station. It is assumed that the PV grid connected inverter can ensure that the PV cell array is always working in the output of the maximum power, and the PV system model is established. The power generation forecasting model is established by using the grey forecasting theory.

Keywords: photovoltaic power generation system; power generation capacity; analysis; forecasting

电动汽车是解决化石能源依赖、大气污染严重等问题的一个有效途径, 世界主要国家和大型汽车制造商都予以了重点关注。我国也在近几年连续出台激励政策, 使得电动汽车应用已经从公共交通领域进行了私人乘用领域。

充电站是保证电动汽车运行的重要基础设施。随着私人乘用电动汽车的推广, 充电设施将逐渐深入到配电网的末端, 从而对配电网的运行带来新的影响。同时, 光伏发电和储能等分布式发电技术的发展, 又使配电网的发展进入了新的阶段。因此, 建设结合了光伏发电、电池储能和充电设施的主动配电网, 将成为面向大规模电动乘用车应用的一个重要方向^[1]。

本文利用灰色预测理论建立了光伏发电系统的发电量预测模型, 为电动汽车充电站光伏发电系统实施提供了保障。

1 光伏发电系统的模型

太阳能光伏电池 (Photovoltaic, PV) 是利用半导体材料的光电效应将太阳能转化为电能的设备, 其发出的直流电通过逆变器转化成交流电输送至用电端或者电网中。

光伏电池的等效电路如图 1 所示, 其中电流源 I_{ph} 用于模拟太阳能光伏电池的“光生电流”, 二极管 D 用于模拟太阳能电池的半导体特性, 并联电阻 R_p 用于模拟内部漏电损耗, 串联电阻 R_s 用于模拟材

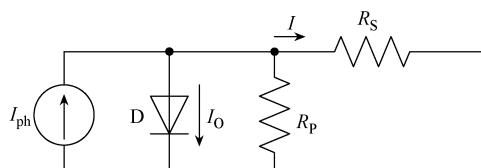


图 1 光伏电池等效电路

料电阻和接触电阻损耗。

该等效电路输出的伏安特性表达式为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_S}{R_p} \quad (1)$$

式中, I 为输出电流; U 为输出电压; I_0 为二极管反向饱和漏电流; q 为电子电荷 (1.6×10^{-19} C); A 为二极管理想因子; K 为玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K), T 为环境温度 ($T=t+273$ K)。

研究表明, 光伏电池输出电压相对太阳光的强弱变化比较小, 输出电流相对太阳光的强弱变化比较大, 但无论太阳光是强还是弱, 光伏电池的输出都有一个最大功率点^[2]。

光伏逆变器的一个重要功能即是通过恰当的控制方法, 使光伏电池在不同条件下, 都工作在最大功率线上。目前国内已经提出了多种最大功率点跟踪控制方法, 如电压跟踪法、扰动观察法、功率回授法和增量电导法等^[3]。在本文中, 假定光伏发电并网逆变器可以保证光伏池板阵列始终工作在输出最大功率的工况下。

2 光伏发电系统发电量分析

利用一个 10kWp 光伏发电系统的实际运行数据来分析本地的光伏发电系统一般出力情况。该 10kWp 光伏发电系统的池板阵列安装于充电站的楼顶上, 紧邻本项目的安装地点, 因此对本项目中光伏发电系统的出力预测具有非常大的参考价值。

10kWp 光伏发电系统连续 5 年内的每日发电量情况示于图 2 中。对不同年度同一天的数据进行统计分析, 其均值、标准差和变异系数的情况示于图 3 中。其中, 均值、标准差和变异系数的定义如式(2)至式(4)所示。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

$$cv = s / \bar{x} \quad (4)$$

从统计分析结果可见, 光伏发电系统的每日发电量, 无论从纵向比较来看, 还是从横向比较来看, 其离散性都较大, 充分表明了光伏发电系统所具有的随机性高这一典型特性。因此, 在进行光伏发电系统出力预测时, 想要获得比较精确的日发电量预

测结果是非常困难的。

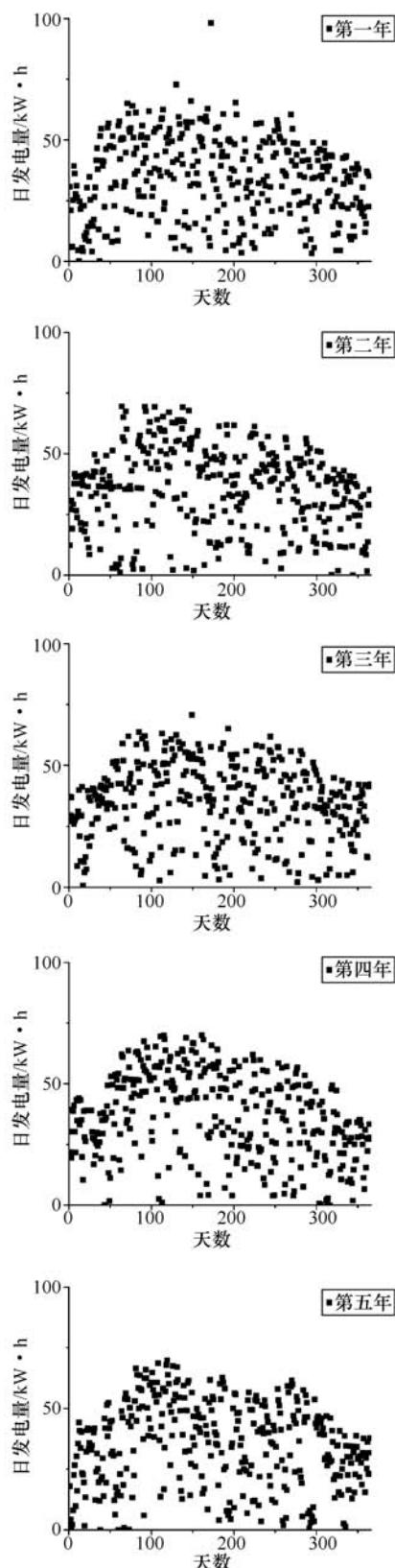


图 2 10kWp 光伏发电系统日发电量 (5 年)

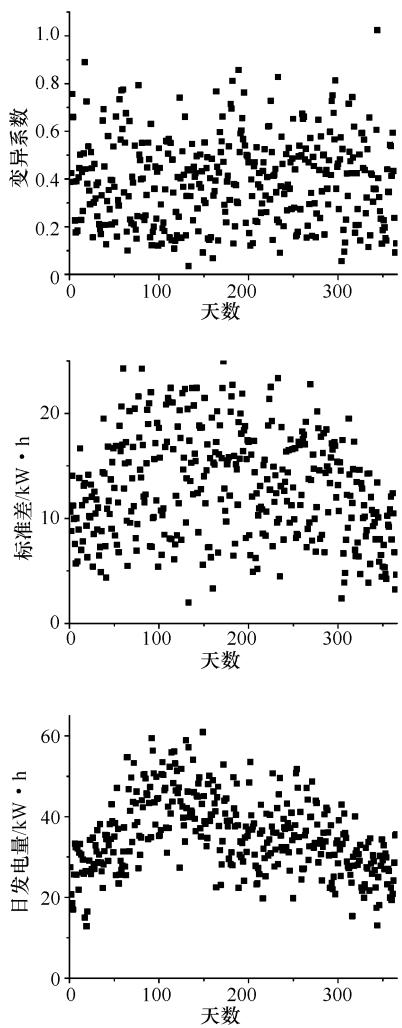


图 3 10kWp 光伏发电系统日发电量均值、标准差和变异系数(5 年)

将 10kWp 光伏发电系统发电量的统计时间跨度扩大到“月”时，连续 5 年内的每月发电量情况示于图 4 中。对不同年度同一月的数据进行统计分析，其均值、标准差和变异系数的情况示于图 5 中。通过统计分析结果可知，在“月”的统计尺度上，光伏发电系统的发电量表现出了一定的规律性，即在 1、2、11、12 四个月份的发电量普遍较低，7—10 四个月份的发电量次之，而发电量最高的为 3—6 四个月份。

将 10kWp 光伏发电系统发电量的统计时间跨度扩大到“年”时，连续 5 年的每年发电量情况示于表 1 中。由统计结果可见，光伏发电系统的年度发电总量虽然有波动，但其差别已经较小，非常接近于一个固定的均值。

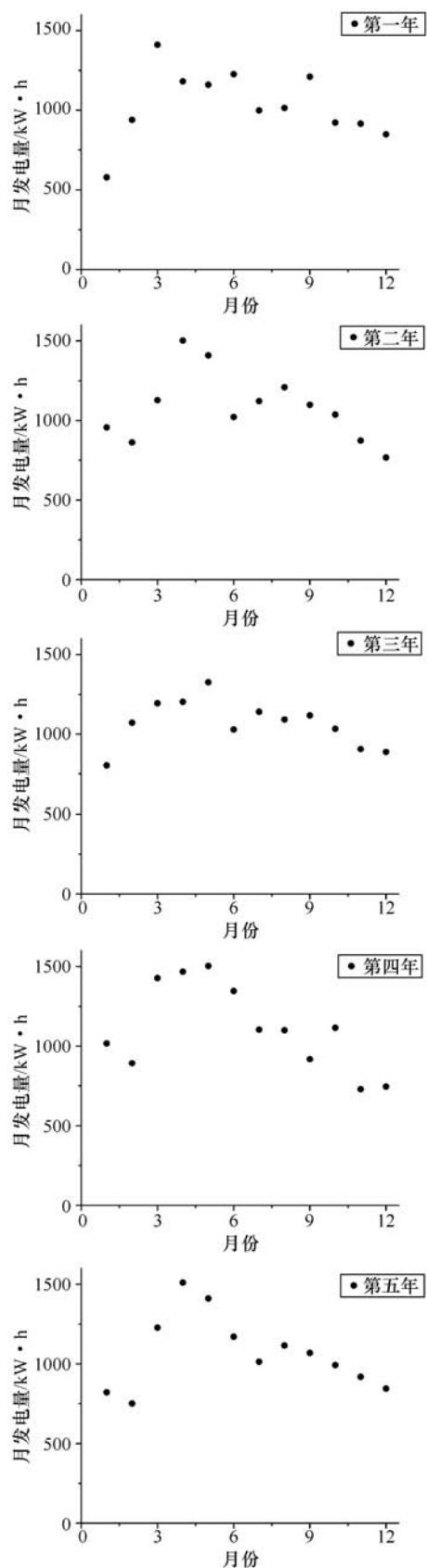


图 4 10kWp 光伏发电系统月发电量(5 年)

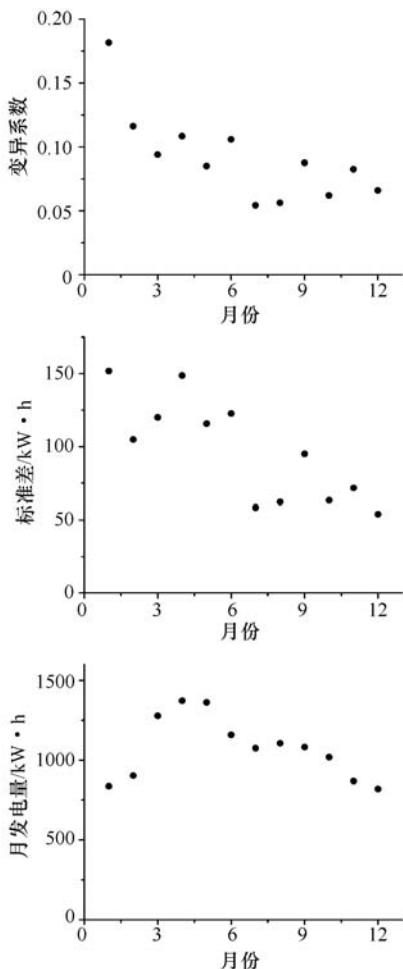


图 5 10kWp 光伏发电系统月发电量均值、标准差和变异系数(5年)

3 光伏发电系统发电量预测

通过统计分析可知,要进行准确的光伏发电系统每日发电量预测是非常困难的,但可以在月度的尺度上进行发电量的大致预测,并且在年度的尺度上进行比较精确的预测。本节利用灰色预测理论建立了光伏发电系统的发电量预测模型,用以依据历史数据对光伏发电系统的未来发电量进行预测。

3.1 灰色系统理论

邓聚龙教授于1982年3月在《SYSTEMS AND CONTROL LETTER》(《系统与控制通讯》)杂志上发表了题为“Control Problems of Grey Systems”(“灰色系统的控制问题”)的论文,在国际上首创提出了灰色系统理论。灰色系统理论诞生后,立即受到国内外学术界和广大实际工作者的积极关注,经多个领域的使用,证实了灰色预测模型的预测精度^[4]。

灰色系统是指信息不完全的系统,包括系统因素不完全明确、因素关系不完全清楚、系统结构不完全知道、系统的作用原理不完全明了等情况。灰色系统理论研究的就是这类贫信息系统的建模方法,从而提供了一种贫信息情况下解决系统问题的新途径。

灰色系统理论把一切随机过程看做是在一定范围内变化的、与时间有关的灰色过程,对灰色量不是从寻找统计规律的角度,通过大样本进行研究,而是用数据生成的方法,将杂乱无章的原始数据整理成规律性较强的生成数列后再作研究。灰色理论

表 1 10kWp 光伏发电系统年发电量(5年)

第1年	第2年	第3年	第4年	第5年	年发电量/kW·h	年发电量均值/kW·h	标准差/kW·h	变异系数
12402.5590	12985.2910	12807.0140	13367.7946	12846.6760	12881.8669	310.9340	0.0241	

认为系统的现象尽管是朦胧的,数据是杂乱无章的,但它毕竟是有序的,有整体功能的,在杂乱无章的数据后面,必然潜藏着某种规律,灰数的生成是从杂乱无章的原始数据中去开拓、发现、寻找这种内在规律。

对于本文研究的光伏发电系统而言,比较符合灰色系统的定义,即影响发电量的随机因素多样化,影响机理复杂多样,发电量与影响因素之间没有确定的函数关系,而历史数据又难以满足进行大样本统计分析的要求,所以灰色系统理论正好适用于对光伏发电系统进行发电量预测。

3.2 GM (1,1) 预测模型

在灰色系统理论中应用最广泛的灰色动态预测模型称为 GM (1,1) 模型,该模型由一个单变量的一阶微分方程构成,主要用于复杂系统某一主导因素特征值的拟合和预测,以揭示主导因素变化规律和未来发展变化态势。

GM (1,1) 模型通过叠加数据形成指数分布的数列,综合反映了复杂现象总体数量上的变动状态,也可以据此分析现象总体变动中受各因素变动的影响程度,从而利用连续的指数数列对复杂现象总体长时间发展变化趋势进行分析。

GM (1,1) 模型的基本建模思路如下：

假设原始数列记为 $x^{(0)}$ ：

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (5)$$

将原始数列做一次累加生成数列 $x^{(1)}$ ：

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (6)$$

其中， $x^{(1)}$ 与 $x^{(0)}$ 之间满足如下关系

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (7)$$

此时，数列 $x^{(1)}$ 具有指类型增长规律，而一阶微分方程的解恰好是指数增长形式的解，因此可以认为 $x^{(1)}$ 数列满足下述一阶微分方程模型：

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + \hat{a}x^{(1)}(t) = \hat{u} \quad (8)$$

则其解的基本形式为

$$x^{(1)}(t) = Ce^{-\hat{a}t} + \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \quad (9)$$

利用最小二乘法求解上述微分方程中的参数 \hat{a} 和 \hat{u} ，可得

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{u} \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_n \quad (10)$$

其中：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

将求得的 \hat{a} 和 \hat{u} 代入式 (13) 的解中，并利用 $x^{(1)}(t)|_{t=0} = x^{(1)}(1)$ 的初值，可求得

$$x^{(1)}(t) = \left[x^{(1)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}t} + \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \quad (12)$$

令 $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$ ，将式 (3) — 式 (11) 写成离散形式，可得

$$x^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}k} + \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

最后做累减还原得到原始数列 $x^{(0)}$ 的灰色预测模型为

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k+1) &= x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) \\ &= (1 - e^{-\hat{a}}) \left[x^{(0)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}k} \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (14)$$

3.3 光伏发电系统发电量预测

本文根据上述的 GM (1,1) 预测模型建模方法在 Matlab 中编制了预测程序，利用 10kWp 光伏发电系统连续 5 年内的月发电量历史数据，对第六年的月发电量进行了预测。预测结果与实际运行数据示于表 2 及图 6 中。为了评估预测的精度，利用下式计算预测结果的预测误差，结果也示于表 2 中。

$$e = \frac{| \text{实际值} - \text{预测值} |}{\text{实际值}} \times 100\% \quad (15)$$

表 2 光伏发电系统月发电量

月份	10kWp 光伏发电系统			50kWp 光伏发电系统
	实际值 /kW · h	预测值 /kW · h	预测误差 /%	预测值 /kW · h
1	684.9820	835.6450	22.00	4178.2248
2	663.8870	742.3449	11.82	3711.7243
3	1542.7141	1434.7843	7.00	7173.9213
4	1454.7150	1531.3236	5.27	7656.6179
5	1563.4280	1478.2544	5.45	7391.2721
6	1320.2181	1427.4628	8.12	7137.3141
7	1166.0400	977.0163	16.21	4885.0815
8	1121.1831	1034.9693	7.69	5174.8467
9	1134.2701	951.6218	16.10	4758.1089
10	948.1690	1026.4479	8.26	5132.2397
11	783.4120	842.8695	7.59	4214.3476
12	730.0920	843.7521	15.57	4218.7604
合计	13113.1103	13126.4918	0.10	65632.4591

根据预测结果可知，GM (1,1) 模型可以较好地预测光伏发电系统的月发电量，最大预测误差为 22.00%，最小预测误差为 5.27%。而当对 12 个月的发电量进行累加得到全年的发电量时，预测值已经非常接近实际值，仅有 0.10% 的预测误差。

由于新建的校园充电站中的 50kWp 光伏发电系统尚未形成可用的运行数据，因此本文基于对

10kWp 光伏发电系统的研究，采用等比例扩大($K=5$)的方式来预测50kWp光伏发电系统的月发电量和年发电量，所得数据也列于表2中。

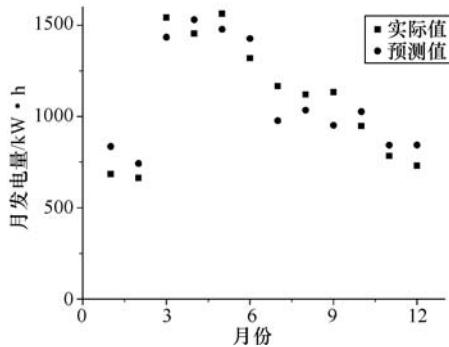


图6 10kWp光伏发电系统月发电量(第6年)

4 结论

本文根据光伏电池典型P-U曲线簇，利用一个10kWp光伏发电系统的实际运行数据分析了本地的光伏发电系统一般出力情况。结合灰色预测理论建立了光伏发电系统的发电量预测模型，用以依据历史数据对光伏发电系统的未来发电量进行预测。

电量预测综合反映了复杂现象总体数量上的变动状态，可以据此分析总体变动中受各因素变动的影响程度，从而利用连续的指数数列对复杂现象总体长时间发展变化趋势进行分析。该结果能够满足研究人员基于光伏发电系统开展研究工作，并将研究成果进行二次开发并集成入电动汽车充电站监控

(上接第52页)

4) 水平排列和正三角型排列时线路下方无线电干扰分布在中相导线左右分别出现峰值；垂直排列时峰值发生在线路中心正下方且无线电干扰水平相较于其他排列方式低一些，倒三角型排列时无线电干扰的唯一峰值也在线路正下方，在线路下方左右20m内，倒三角排列时无线电干扰水平介于正三角排列和垂直排列之间。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交流输电工程电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 王国辉. 超高压输电线路工频电场及无线电干扰对环境的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [3] 王晓燕. 特高压交流输电线路电磁环境研究[D]. 济

系统的需求，以便于研究人员提出基于模型的二次开发支持方案，并对二次开发的流程和支持模块进行下一阶段设计^[5]。

参考文献

- [1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [2] Lamb H C, Stefanakos E K, Smith T, Krakow B, et al. Efficient photovoltaic charging of electric vehicles[C]//Southcon/94 Conference Record, 1994, 47-52.
- [3] Ingersoll J G, Perkins C A. The 2.1kW photovoltaic electric vehicle charging station in the city of Santa Monica, California[C]//Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1996, 1509-1512.
- [4] Abella M A, Chenlo F. Photovoltaic charging station for electrical vehicles[C]//Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003: 2280-2283.
- [5] 康微微, 鞠振河. 新能源光伏汽车充电站的现状分析与研究[J]. 太阳能, 2014(10): 12-15, 40.

作者简介

侯伟(1983-)，女，山东省寿光市人，硕士，工程师，主要从事电网运行检修以及物资管理工作。

南：山东大学，2011。

- [4] 周益峰. 特高压交流输电线路的无线电干扰研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [5] 朱景林. 国网典型设计 220kV 输变电工程的工频电场和无线电干扰分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [6] 侯锐. 基于激发函数法的有限长交流线路无线电干扰计算[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [7] 李彦瑞. 1000kV 特高压输电线路电磁环境仿真分析[D]. 成都: 西华大学, 2010.
- [8] 庄池杰, 曾嵘, 龚有军, 等. 交流输电线路的无线电干扰计算方法[J]. 电网技术, 2008(2): 56-60.

作者简介

肖阶平(1991-)，男，吉林省延边州人，硕士研究生，主要从事高电压与绝缘技术。