

# 基于场景划分方法的风光出力耦合特性机理

罗庆<sup>1,2</sup>, 晁勤<sup>1</sup>, 王一波<sup>3</sup>, 罗建春<sup>4</sup>, 刘改倩<sup>5</sup>

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830013; 3. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 4. 国网重庆武隆县供电有限责任公司, 重庆 408500; 5. 国电库尔勒发电公司, 新疆 库尔勒 836500)

**摘要:** 利用数据挖掘技术, 根据风光出力特性采用不同场景数据划分方法对风光资源丰富地区的实际风电、光电出力数据进行场景划分, 在划分的典型场景数据下对风光出力互补耦合特性进行分析, 研究合成出力跟踪系统负荷的机制特性及提高出力预测精度问题, 提出耦合度和跟踪负荷度计算方法。研究表明, 风光互合成出力耦合特性在一定程度上减小了出力的波动性, 合成出力对系统负荷跟踪度达到了 12.2%, 同时风光合成出力预测的耦合所得误差比单独的风、光电出力预测系统所得误差小。

**关键词:** 场景划分方法; 风电; 光伏; 合成出力; 耦合特性; 跟踪负荷度; 误差; 预测

**中图分类号:** TM 614; TM 615

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.008

## 0 引言

传统能源缺乏, 能源危机日益严重, 使得对洁净能源的研究处于热潮。风电的随机性和光电昼夜停特性, 使风光互补发电系统的发展受到国内外重视, 但对风光出力耦合特性机理对系统影响机制的研究较少, 如风光互补合成出力的耦合性对系统负荷的跟踪度问题, 及合成出力后出力预测误差问题等。

现有的文献中多研究单独的风、光电系统出力特性: 文献[1-2]分析大规模区域风电场出力特性对并网系统的影响, 如系统的稳定、调频等; 文献[3-4]分析光伏电站对并网系统的影响及太阳能出力对电网影响。风光系统的研究着重在建模、最大功率点跟踪(MPPT)及其在实际微电网中应用<sup>[56]</sup>, 而对风光互补系统出力耦合特性还没有定性分析, 且未对影响系统负荷的机制进行研究。文献[7]研究了不同场景下微电网内发电和负荷的不均衡情况以及切负荷策略, 计算了微电网的可靠性, 但没有根据风、光电出力特性对风电场出力进行场景划分方法研究。

综上所述, 现今风光互补系统的出力耦合特性对系统跟踪负荷及提高出力预测误差精度问题的研究较少。本文利用风光资源丰富地区的实际风电、光伏电站出力数据, 对数据进行挖掘, 分析风、光电出力特性, 研究划分方法对风、光电不同场景进行划分, 利用划分的典型场景数据, 对风光出力互补耦合特

性进行研究, 同时研究合成出力对系统负荷的跟踪度, 及合成出力减小出力预测误差的问题。

## 1 场景划分方法

场景是一种描述随机过程的方法<sup>[5-7]</sup>。场景数的目的是用最少的场景最大限度地拟合随机变量的特性, 以保证可靠性评估的整体效率。由于风、光电和负荷具有随机特性, 因此对风、光电及负荷采用场景划分方法, 可以最大限度地拟合相应变量的特性, 以此来可靠评估风光出力互补耦合特性、研究负荷的跟踪度和提高出力预测精度。本文挖掘实际风、光伏电站出力数据和系统负荷数据, 分析数据特性, 采用不同场景划分方法划分风、光电数据, 得到风光出力场景。

### 1.1 风电场景划分方法

现有研究对风电场景划分一直未有定论, 但均是基于实际出力数据进行划分, 典型场景的确定难度较大, 如文献[5]采用后向场景削减技术将风电出力数据进行场景划分。风电是基于风轮在流动的空气中, 获得阻碍流动空气流速的部分动能<sup>[8]</sup>, 由此可知风电长时间的出力特性由短时的风速特性决定。

在对历史数据进行挖掘、分析和研究中发现, 风电出力与风速分布特性相关<sup>[8]</sup>, 风电出力特性在时间尺度上一致, 对风电出力进行典型日出力数据划分, 得到风电场日出力呈不同风速分布, 按不同风速特性对风电出力进行场景的划分方法, 风电出力场景特性如图 1 所示, 图中出力为标么值, 采样间隔为 5 min。

### 1.2 光电场景划分方法

研究光电出力数据发现, 季节的更替和天气变化, 对光伏电站周边的环境温度和日照强度造成影响, 由此光电出力有一定的规律性。本文对光电数据按季节和特殊日照强度进行场景划分, 如图 2 所示, 图中出力为标么值, 采样间隔为 10 min。

收稿日期: 2013-08-07; 修回日期: 2014-06-04

基金项目: 国家国际科技合作专项资助项目(2013DFG61520); 国家自然科学基金资助项目(51267020); 教育部 2012 年高等学校博士学科点专项科研基金博导类联合资助课题(2012-6501110003)

Project supported by International Science & Technology Cooperation Program of China(2013DFG61520), the National Natural Science Foundation of China(51267020) and Ministry of Education 2012 Higher Education Research Fund for the Doctoral Program Jointly Funded Doctoral Class Topics(2012-6501110003)

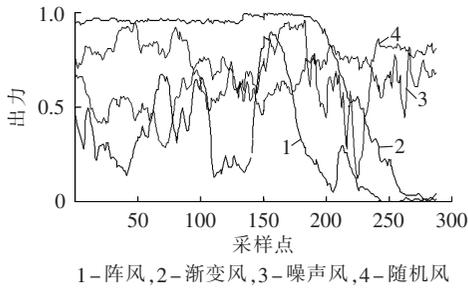


图 1 不同场景下典型风电出力特性

Fig.1 Typical characteristics of wind power output for different scenarios

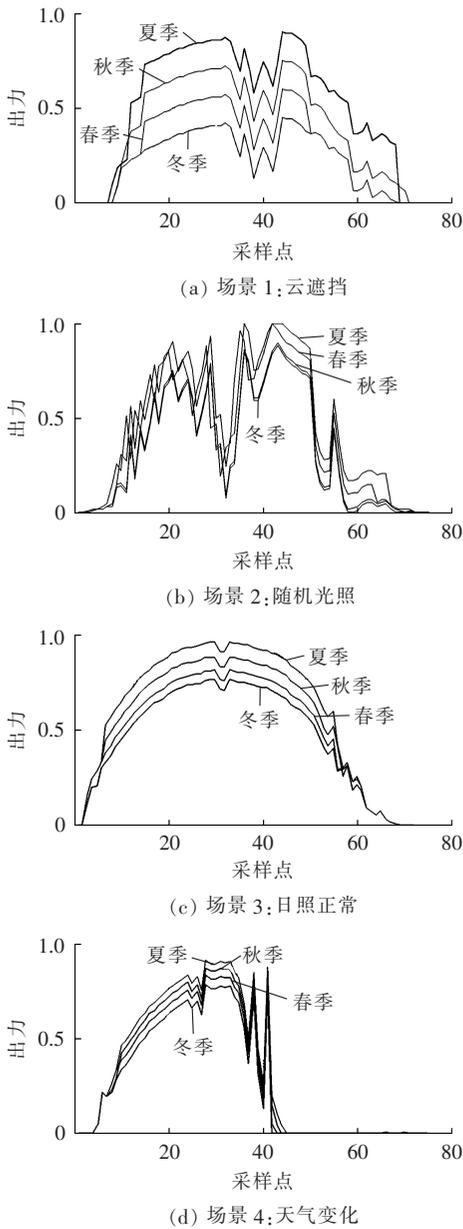


图 2 光电出力场景

Fig.2 Scenarios of photovoltaic power output

## 2 风光出力耦合度计算

风光电出力的耦合能在一定程度上减小合成出力的波动和保证出力的连续性,从而减小对系统的

冲击影响。

对风光资源丰富地区的相应出力数据进行挖掘分析,研究在时域共性上的风光电出力耦合度。

光电的昼发夜停现象,使得光电在时域上有局限性。基于光电昼发夜停时域制约,抽取风电对应时域实际出力数据,分析光电、风电实际出力的标么值,比较风大光小、风小光大等相关性的耦合特性,统计风光出力的标么值在 30% 范围内的耦合度。

## 3 跟踪负荷及风光出力预测误差

将系统负荷进行场景划分,再用风光合成出力场景进行跟踪负荷研究,得到风光合成出力对负荷的跟踪度。同时,对比单独风、光电预测出力,研究风光合成预测出力,减小出力预测误差问题。

### 3.1 跟踪负荷

对系统负荷采用季节性场景划分方法,利用跟踪负荷度计算方法,分析计算风光合成出力对负荷的跟踪相关度。

#### 3.1.1 负荷划分

对系统负荷进行数据统计和标么转化,按季节性场景划分方法,将负荷划分为春、夏、秋、冬 4 个场景<sup>[9]</sup>,如图 3 所示,图中负荷为标么值,后同。

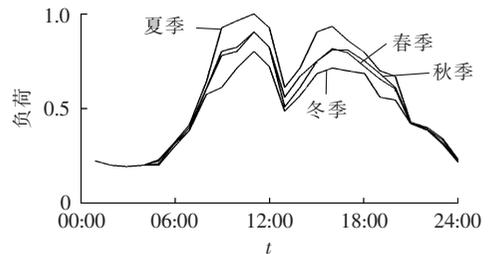


图 3 系统负荷场景

Fig.3 Scenarios of system load

由于风、光电的随机性,对风、光电出力进行标么化,能更好地突出风光电的出力趋势,同时对负荷的标么化能较好地反映出风光电合成出力对跟踪负荷度的影响。

#### 3.1.2 跟踪负荷度

在相应的场景下,分析系统负荷数据和风光出力数据,研究风光合成出力对负荷的影响。

将负荷和风光合成出力数据进行标么值转化,研究标么值转化后的两者趋势,计算风光合成出力与跟踪负荷相差 10% 范围内的时间占全天时间的比值作为负荷跟踪度。

负荷曲线如图 3 所示,取相应风光电的场景数进行分析。单独的风、光电出力场景中,光电一般呈正调峰,对系统负荷有益,风电出力有一定的随机性,对负荷系统影响有不定性。基于历史数据统计研究,可以发现风电有一定的反调峰性。

基于以上不同场景数的研究,分析风光合成出力对负荷系统的影响。光电的昼发夜停性,使得风光合成出力在白天对系统负荷影响较明显,晚上光电停发,风电影响负荷系统。

图 4 为典型某天风电场景 3 和 4 个光电场景出力合成与负荷曲线标幺值化后负荷跟踪情况,图中①、②、③、④分别为光电场景 1、2、3、4 与风电场景 3 合成出力。由于光电不能持续发电的时域制约,研究风电某一场景与光电所有场景的出力共性,更有利于研究风光合成出力跟踪负荷度情况。负荷上升段时,两者在 10% 波动范围内即为正调峰,反之为反调峰。对比分析得到风光合成出力在 08:00—14:00 对系统负荷起着正调峰作用,由于光电的时域特性制约,风光合成出力在 20:00—24:00 时段反调峰。

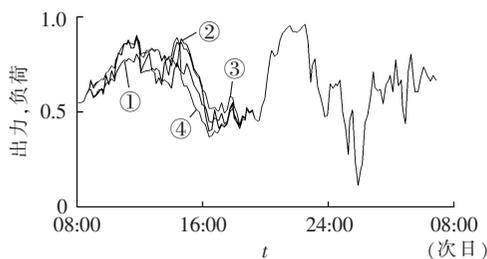


图 4 光电与风电场景 3 合成出力

Fig.4 Coupled photovoltaic and wind power output of scenario 3

从以上数据可知,负荷跟踪度可以达到 10.2%,风光合成出力系统相对单独的风、光电出力系统有一定优越性,风光合成出力对负荷有一定的正调峰作用。

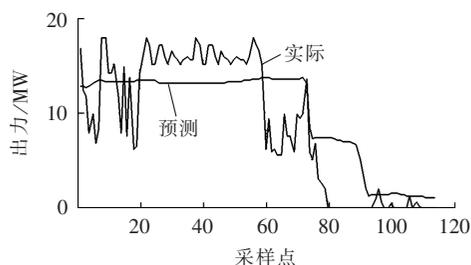
### 3.2 风光合成出力预测误差

现有的风、光电都有相应的出力预测系统,单独的风、光出力的预测误差较大。将风、光预测出力合成后,将对出力进行耦合,由于风、光出力预测系统均有系统误差,若只是对合成出力进行预测将减小 2 个系统预测误差,同时预测误差有正有负,使合成预测出力误差相应减小,见图 5,采样间隔为 10 min。

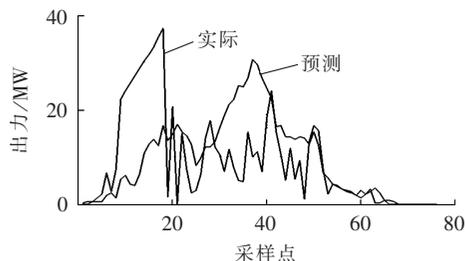
图 5(a)、(b)为风、光电某天的实际出力和预测出力数据曲线,将图 5(a)、(b)中的风、光电数据进行合成得到图 5(c)。从图中可见,风光合成出力的预测和实际值的误差范围较单独的风、光的误差减小;由相应预测出力和实际出力数据可得,单个风、光电误差和比合成风光电的误差高出 11.5%,即风光合成预测出力比单独风、光预测出力精度提高了 11.5%。

## 4 具体历史数据验证

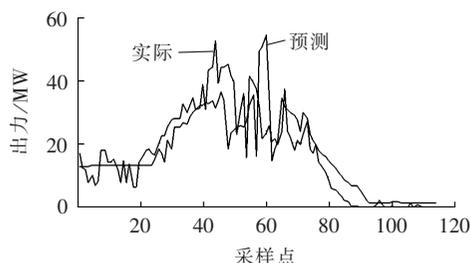
在风光电时域和地域的局限下调研了某地区 99 MW 的风电场与相邻的 20 MW 的光伏电站的 2 a 历史数据,光电采样间隔为 10 min,风电采样间隔为 5 min,随后将风电数据进行插值拟合成 10 min 采



(a) 风电实际出力与预测出力对比



(b) 光电实际出力与预测出力对比



(c) 风光合成实际出力与预测出力对比

图 5 风电、光电出力及合成出力预测耦合

Fig.5 Comparison between actual and predicted values for wind and photovoltaic and coupled power outputs

集一个点,研究挖掘分析风光电的相应数据<sup>[10-17]</sup>。

### 4.1 场景划分方法验证

将出力按天进行标幺值转化,与相应划分场景进行对比,允许 10% 的误差,进行场景统计。统计得到风电场景和光电场景概率分布情况如表 1 所示。

从表 1 中可以算出,划分的场景能拟合出风光电实际出力数据的 82.1%,所以上述场景划分方法具有一定的研究理论性。

### 4.2 风光出力耦合度计算

由以上划分的风光电出力场景数据,对数据进行耦合度计算,得到表 2 的风光电合成出力耦合度值。

在表 2 中可以发现风电场景 1 与光电出力耦合性较强,耦合度最高达到 61.33%。

### 4.3 跟踪负荷度计算

对实际出力数据标幺化后,分析负荷曲线,场景出力下的跟踪负荷度如表 3 所示。

风光合成出力能够对负荷进行跟踪,最高跟踪度能够达到 12.2%,合计时间为 2.92 h。达到光电出力时间的 36.5%,能较好地跟踪负荷出力曲线<sup>[18]</sup>。

### 4.4 风光合成出力预测误差验证

在单独风、光电系统历史数据中,风电的预测误

表 1 风电场景和光电场景概率分布

Tab.1 Probability distribution of wind and photovoltaic power scenarios

光电场景	风电场景				
	1	2	3	4	
1	春	2.33%	1.10%	1.67%	1.800%
	夏	1.30%	0.95%	1.80%	0.924%
	秋	1.50%	0.75%	1.73%	0.840%
	冬	0.93%	1.73%	1.67%	0.960%
2	春	0.80%	1.84%	0.73%	1.520%
	夏	0.91%	0.73%	1.84%	0.960%
	秋	0.70%	0.96%	1.04%	0.970%
	冬	0.93%	1.71%	0.96%	1.850%
3	春	1.03%	0.96%	1.67%	1.780%
	夏	0.83%	1.85%	1.01%	2.240%
	秋	0.95%	0.86%	2.13%	0.940%
	冬	0.63%	0.93%	1.87%	0.560%
4	春	1.80%	0.94%	1.23%	0.520%
	夏	1.91%	0.93%	2.14%	1.060%
	秋	1.17%	1.24%	0.98%	1.120%
	冬	1.33%	1.75%	2.36%	0.950%

表 2 风光出力耦合度

Tab.2 Coupling degree of wind and photovoltaic power outputs

光电场景	风电场景			
	1	2	3	4
1	49.33%	17.33%	16.00%	13.33%
2	61.33%	30.67%	37.30%	29.33%
3	38.67%	48.00%	41.30%	46.67%
4	48.00%	24.00%	24.00%	34.67%

表 3 跟踪负荷度

Tab.3 Load-following degree

光电场景	风电场景			
	1	2	3	4
1	10.33%	9.23%	10.2%	8.43%
2	6.53%	9.67%	7.30%	9.73%
3	13.00%	8.00%	6.30%	6.67%
4	8.00%	4.80%	6.70%	4.67%

差达到 46.3%, 光电的出力预测误差达到 49.1%。将风、光电预报出力进行耦合得到风光电合成出力, 再与实际出力进行对比, 得到合成出力预测误差达到了 33.3%, 比单独风电预测误差低 13%, 比单独光电预测误差低 15.8%。

风光合成预测出力的耦合能有效地减小预测误差值, 将使系统对风光电的调度和优化系统的能源结构起到重要作用<sup>[19]</sup>。

## 5 结论

算例采用某地区实际现场数据, 在气候相似地区较有普遍性, 同时研究不同地区数据发现具有一定的类比性, 其中采用的方法和结论均能较好地应用到分析风光电的耦合度、负荷跟踪度等相关特性。

挖掘和分析风光电历史数据, 将其出力按各自特性的方法进行典型场景划分, 对系统负荷也进行场

景划分, 再将风、光电的场景出力进行合成, 分析其间的耦合特性对系统负荷的跟踪度和出力预测误差。综上研究可得结论如下:

a. 风光合成出力有一定的耦合特性, 出力波动范围有一定的耦合度, 最高耦合度能够达到 61.33%, 风光出力耦合度高, 有利于减小出力的波动和使出力连续性增强, 减小对系统的冲击影响;

b. 风光合成出力对系统负荷跟踪度较高, 最高能够达到 12.2%, 占光电出力时间的 36.5%, 从而使系统更好地接纳风光电等洁净能源, 减小系统的热备用容量, 使系统运行更经济、洁净;

c. 风光合成出力预测的耦合, 较单独风、光出力预测系统提高了精度, 这将有利于系统调度风光洁净能源, 优化系统能源结构。

通过分析数据的耦合机理和耦合特性, 将风光电出力和系统负荷划分典型场景, 再将相应的场景数进行分析整理, 进而得到了风光合成出力的耦合特性和对负荷的影响机制, 为风光互补系统的研究提供了一定的理论依据和参考。

## 参考文献:

- [1] 肖创英, 汪宇渤, 陟晶, 等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 64-67.  
XIAO Chuangying, WANG Ningbo, ZHI Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 64-67.
- [2] 韩小琪, 宋璇坤, 李冰寒, 等. 风电出力变化对系统调频的影响[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 26-29.  
HAN Xiaoqi, SONG Xuankun, LI Chill, et al. Study of impact of wind power variable output on frequency regulation[J]. Electric Power, 2010, 43(6): 26-29.
- [3] 张轶, 鲁国超, 张焰, 等. 光伏电站并网对电网可靠性的影响[J]. 华东电力, 2010, 38(5): 700-706.  
ZHANG Yi, LU Guoqi, ZHANG Yan, et al. Influence of grid connection of photovoltaic power station on power grid reliability [J]. East China Electric Power, 2010, 38(5): 700-706.
- [4] 孙川永, 彭友兵, 高媛媛, 等. 数值模式在太阳能出力分析中的应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(8): 73-76.  
SUN Chuanyong, PENG Youbing, GAO Yuanyuan, et al. Application of numerical model in solar energy[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(8): 73-76.
- [5] RAZALI N M M, HASHIM A H. Backward reduction application for minimizing wind power scenarios in stochastic programming [C]//Power Engineering and Optimization Conference. Shal Alam, Malaysia: PEOCO, 2010: 430-434.
- [6] GROWE-KUSKA N, HEITSCH H, ROMISCH W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems [C]//Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 7-13.
- [7] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 67-73.  
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multi-

- ple scenarios technique[J]. Proceeding of the CSEE,2012,32(34):67-73.
- [8] 叶杭治. 风力发电系统的设计、运行与维护[M]. 北京: 电子工业出版社,2010;90-94,183-187.
- [9] 鞠平,陈谦,熊传平,等. 基于日负荷曲线的负荷分类和综合建模[J]. 电力系统自动化,2006,30(16):6-9.  
JU Ping, CHEN Qian, XIONG Chuanping, et al. Load clustering and synthetic modeling based on daily load curves[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(16):6-9.
- [10] 卢继平,白树华. 风光氢联合式独立发电系统的建模及仿真[J]. 电网技术,2007,31(22):75-79.  
LU Jiping, BAI Shuhua. Modeling and simulation of conjoint independent power generation system consisting of power generation by wind energy, solar energy and hydrogen energy[J]. Power System Technology,2007,31(22):75-79.
- [11] 黄宇洪,方宾义,孙锦枫. 飞轮储能系统应用于微网的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(9):83-87.  
HUANG Yuqi, FANG Binyi, SUN Jinfeng. Simulation research on the microgrid with flywheel energy storage system[J]. Power System Protection and Control,2011,39(9):83-87.
- [12] LEE D J, WANG Li. Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations[J]. IEEE Journals & Magazines,2008,23(1):311-320.
- [13] 蔡国伟,孔令国,杨德友,等. 大规模风光互补发电系统建模与运行特性研究[J]. 电网技术,2012,36(1):65-71.  
CAI Guowei, KONG Lingguo, YANG Deyou, et al. Research on modelling and operation characteristics analysis of large-scale wind & light complementary electricity-generating system[J]. Power System Technology,2012,36(1):65-71.
- [14] 梁亮,李建林,惠东. 光伏-储能联合发电系统运行机理及控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):20-23.  
LIANG Liang, LI Jianlin, HUI Dong. Operating modes of photovoltaic/energy-storage hybrid system and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):20-23.
- [15] ZHENG Kuan, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia. Distribution network reliability considering complementary distribution generation with wind and photovoltaic powers[C]//2010 5th International Conference on Critical Infrastructure, CRIS. Beijing, China: [s.n.],2010;1-5.
- [16] 刘立群,王志新,顾临峰. 基于改进模糊法的分布式风光互补发电系统 MPPT 控制[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(15):70-75.  
LIU Liqun, WANG Zhixin, GU Linfeng. MPPT control based on improved fuzzy method for distributed hybrid wind-solar power generating systems[J]. Power System Protection and Control,2011,39(15):70-75.
- [17] 郭天勇,赵庚申,赵耀,等. 基于风光互补的微网系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):104-108.  
GUO Tianyong, ZHAO Gengshen, ZHAO Yao, et al. Modeling and simulation of microgrid system based on wind-solar hybrid[J]. Power System Protection and Control,2010,38(21):104-108.
- [18] 龙虹毓,徐瑞林,何国军,等. 基于热风电协调调度的系统日调峰能力分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):30-34.  
LONG Hongyu, XU Ruilin, HE Guojun, et al. Analysis of peak-load regulation capability based on combined dispatch of wind power and thermal power[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):30-34.
- [19] 凌武能,杭乃善,李如琦. 基于云支持向量机模型的短期风电功率预测[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):34-38.  
LING Wuneng, HANG Naishan, LI Ruqi. Short-term wind power forecasting based on cloud SVM model[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):34-38.

#### 作者简介:



罗庆(1987-),男,湖北咸宁人,硕士,从事电网工作(E-mail:goodgob@qq.com);

晁勤(1959-),女,新疆乌鲁木齐人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究和教学工作(E-mail:cqtdx@163.com);

罗庆 王一波(1977-),男,新疆哈密人,副研究员,博士,从事光伏发电技术、光伏系统与电网关系研究;

罗建春(1987-),男,四川广安人,硕士,从事电网工作;

刘改倩(1989-),女,河南新乡人,讲师,从事电网分析教学工作。

## Characteristics of wind-photovoltaic power output coupling based on scenario classification

LUO Qing<sup>1,2</sup>, CHAO Qin<sup>1</sup>, WANG Yibo<sup>3</sup>, LUO Jianchun<sup>4</sup>, LIU Gaiqian<sup>5</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute of Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830013, China; 3. The Institute of Electrical Engineering of CAS, Beijing 100190, China; 4. State Grid Wulong Power Supply Company, Chongqing 408500, China;

5. Korla State Power Generation Company, Korla 836500, China)

**Abstract:** Based on the data mining technology, the actual wind and photovoltaic power outputs of rich-resource regions are classified by different scenario data classification methods according to their characteristics. Based on the typical scenario data classified, the coupling characteristics of the complementary wind and photovoltaic power outputs are analyzed. The mechanism of the coupled power output following the system load and the improvement of power output prediction precision are researched, and a method is proposed to calculate the coupling degree and load-following degree. Research shows that, the complementary coupling of wind and photovoltaic power outputs reduces the fluctuation of total power output in a certain degree, its load-following degree reaches 12.2%, and its prediction error is less than that of either wind or photovoltaic power output prediction.

**Key words:** scenario classification method; wind power; photovoltaic power; synthetic power; coupling characteristics; load-following degree; errors; forecasting