

考虑相关性的沿海大规模风电场出力特性研究

卫鹏, 刘建坤, 周前

(国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:为了研究沿海地区密集型大规模风电场出力特性以及相互关联性,以江苏沿海大规模风电为例,基于EMS系统中的实测风电出力数据,对风电场之间的有功出力相关性、概率分布、月最大出力进行了分析,研究了风电场的有功出力波动情况,并探讨了风电有功出力对江苏电网综合负荷、调峰的影响。对于分布式新能源利用率的提高和调度运行的优化具有重要意义。

关键词:风电;出力特性;概率分布;相关性;波动;调峰

中图分类号:TM614

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)05-0006-05

随着我国风力发电快速发展,风电总装机容量日益增大。风电出力的随机性、间歇性、不可控等特性给电网运行带来较大的压力,电网运行时必需留有足够的备用电源和调峰容量^[1],以保证风电出力波动时系统的正常供电。在风电场建设较为集中的地区,由于地理位置接近,各风电场的来风情况相近,风电场之间有功出力曲线会有一些的相似性^[2],当风速变化剧烈时,各风电场有功出力波动的叠加将导致风电总出力的波动幅度剧增,从而会对电网的调度带来更大的压力^[3]。目前,国内外对风电的研究多集中于风电的并网方式和对电网的稳定影响等方面^[4],对风电场之间的出力相关性和波动性等方面的研究较少,分析风电集中地区风电场的有功出力特性,研究其对电网可能造成的影响并制定有效的应对措施变得愈发紧迫且重要^[5]。

江苏省风电场分布较为密集,其风电场有功出力具有典型性,文中以江苏沿海大规模风电场运行情况为范例,研究了风电集中地区的风电场有功出力特性,并对风电有功出力特性对电网的影响进行了分析。

1 风电场有功出力特性

1.1 风电场有功出力相关性

不同风电场出力相关性反映风电场之间发电出力变化趋势的一致性,是划分风区的重要依据之一^[6]。风电场相关性与风电场之间的地理距离有关,一般距离较近的风电场,其出力变化趋势较为一致,相关性则较强,反之则相关性较弱^[7]。

相关系数(γ)又称为皮氏积矩相关系数,是说明2个现象之间相关关系密切程度的统计分析指标^[8]。 γ 值的范围在-1和+1之间。 $\gamma > 0$ 为正相关, $\gamma < 0$ 为负相关, $\gamma = 0$ 为不相关, γ 的绝对值越大,相关程度越高。通常认为 γ 的绝对值大于0.75时,2个变量有很强的线性相关性。相关系数的计算公式为:

$$\gamma = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

其中: X, Y 为2个具有相关性风电场出力; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别代表这2个风电场出力的期望。文中对各风电场出力的相关系数进行了计算,具体结果如表1所示。表中第一行和第一列分别为不同风电场的简称。

由表1可看出,各风电场出力的相关系数大部分在0.75以上,表明各风电场出力具有较强的线性相关性。相关系数最大是LY风电和RD风电,2个风电场距离也在30~50 km内,可见风电场距离越近相关性系数越高。LY风电和RD风电2015年某一周出力曲线如图1所示。2个风电场出力变化形状具有较大相似性,最大和最小出力出现时间较接近,具有较大的同时率,因此彼此之间具有较强的相关性。相关性分析结果表明,未来相关区域内风电规模进一步增大后,风电出力特性将基本保持与现有风电出力特性的一致性和相似性。

1.2 风电出力的季节分布

风电发电量年内分布也有一定的规律性。2015年风电月发电量除以相应月最大发电量,得到年发电量分布曲线,如图2所示。一般5—9月为弱风期,其发电量仅为全年发电量的40%~50%;1—4月、10—12月为盛风期,其发电量为全年发电量的60%~80%。一年中,发电量最大的月份为11—12月,发电量最小的为7—9月。风电的这种分布是受自然地理条件所决定的。春季和夏季虽有台风活动,但沿海地区的平均风力为一年中最小的时期,也是一年中风能资源最贫乏的时期^[9]。秋季与冬季由于大风天气多,风力大,是一年中江苏沿海地区风能资源最丰富的季节。不同季节之间发电量差异较大^[10]。为了分析不同季节发电量分布的不均衡特性,采用季不平衡系数作为衡量月发电量分布情况的一个指标。季不平衡系数为月发电量平均值除以最大月发电量,用式(2)表示^[11]:

表1 各风电场出力相关系数

	RD 风电	LY 风电	GH 风电	DF 风电	DY 风电	HQ 风电	XS 风电	DL 风电	GY 风电	DT 风电	LH 风电
RD 风电	1.00	0.92	0.84	0.80	0.76	0.71	0.54	0.76	0.49	0.82	0.80
LY 风电	0.92	1.00	0.86	0.83	0.87	0.82	0.55	0.89	0.50	0.83	0.91
GH 风电	0.84	0.86	1.00	0.86	0.70	0.67	0.57	0.76	0.52	0.85	0.79
DF 风电	0.80	0.83	0.86	1.00	0.70	0.66	0.64	0.74	0.57	0.77	0.77
DY 风电	0.76	0.87	0.70	0.70	1.00	0.92	0.46	0.79	0.41	0.66	0.79
HQ 风电	0.71	0.82	0.67	0.66	0.92	1.00	0.44	0.77	0.39	0.64	0.77
XS 风电	0.54	0.55	0.57	0.64	0.46	0.44	1.00	0.46	0.90	0.48	0.53
DL 风电	0.76	0.89	0.76	0.74	0.79	0.77	0.46	1.00	0.43	0.73	0.87
GY 风电	0.49	0.50	0.52	0.57	0.41	0.39	0.90	0.43	1.00	0.46	0.48
DT 风电	0.82	0.83	0.85	0.77	0.66	0.64	0.48	0.73	0.46	1.00	0.76
LH 风电	0.80	0.91	0.79	0.77	0.79	0.77	0.53	0.87	0.48	0.76	1.00

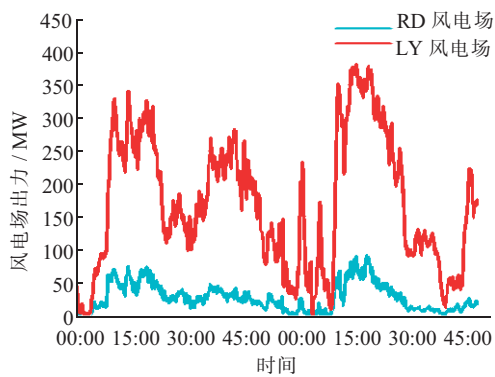


图1 RD和LY风电场周出力情况

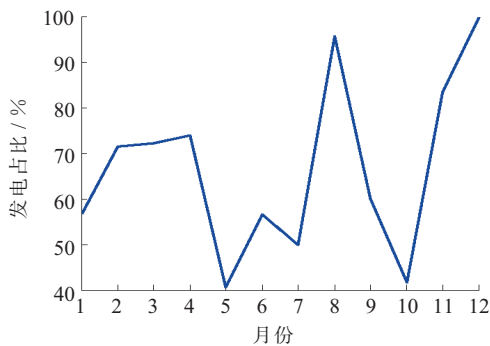


图2 风电出力逐月分布

$$\rho_w = \sum_{i=1}^{12} P_i / 12P_{\max} \quad (2)$$

其中: P_i 表示第*i*个月的发电量, $i=1,2,3,\dots,12$; P_{\max} 为一年中的最大月发电量。风力发电不同月份之间发电量差异较大,不均衡度较高,反映在季不均衡系数上数值较低,全省季不均衡系数平均在0.67左右^[12]。

1.3 风电月最大出力

风电月最大出力特性是相关输变电系统设计的重要依据。风电出力在短时间内(如1d内)有可能在0~100%之间变动^[13]。风电逐月最大出力不同,但年内呈现出规律性变化。

典型风电场RD和GY风电场以及全省月最大出力曲线如图3所示。月最大出力一般出现在1—4月或11—12月。就单个风电场而言,5—9月的月最大出

力一般为0.72~0.91 p.u.,1—4月的月最大出力为0.93~1.0 p.u.,10—12月的月最大出力为0.88~1.0 p.u.。从全省来看,风电出力率比单个风场低,5—9月的月最大出力一般为0.47~0.77 p.u.,1—4月的月最大出力为0.79~0.86 p.u.,10—12月的月最大出力为0.82~0.96 p.u.。

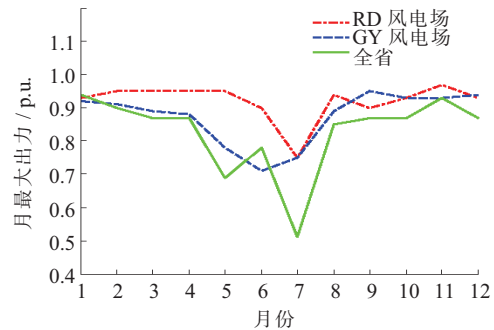


图3 风电月最大出力逐月分布

风电上述特性对相关配套输变电设备建设和改造的规划设计有影响。根据实际运行数据统计分析,在进行输变电设备建设、改造的规划设计中,当输变电设备长期最大允许电流起控制作用、确定夏季输变电设备最大运行电流时风电不应按照满发来考虑。由于风电最大出力往往发生在气温较低的冬春两季,夏季气温较高的日子里最大出力较低,从现有风电场来看,整个夏季高温期间风电出力不会超过装机容量的90%,超过80%持续时间也较短,如表2所示。

可见,风电出力一般随气温升高而明显降低,风电出力较大时气温一般是较低的。在设计相关输变电建设、改造工程时应该充分考虑这一特性,以节省输变电项目的建设、改造投资。

1.4 风电出力概率分布

根据风电全年8760h整点出力,分别按月将出力由大到小进行排序,得到全省大负荷和小负荷代表月的风电出力累积概率曲线如图4所示。

从图4中可看出,全年风电出力超过0.9 p.u.的概率很小。表3给出了风电出力与累积概率统计结果。

表2 逐月风电出力持续时间 h

月份	风电出力		
	≥90%	≥80%	≥50%
1	22	133	662
2	9	25	95
3	0	3	55
4	4	16	54
5	1	4	16
6	0	3	29
7	0	0	3
8	0	18	160
9	0	9	37
10	1	9	22
11	4	19	70
12	2	9	69

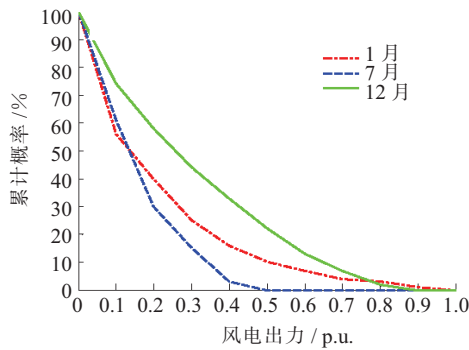


图4 风电出力累计概率曲线

表3 不同累计概率的风电出力

月份	风电出力 / p.u.			
	概率 5%	概率 10%	概率 90%	概率 95%
1	0.65	0.51	0.01	0
2	0.75	0.62	0	0
3	0.63	0.53	0.04	0.03
4	0.67	0.54	0.03	0.01
5	0.44	0.36	0.03	0.01
6	0.57	0.47	0.02	0
7	0.38	0.34	0.02	0
8	0.75	0.71	0.05	0.03
9	0.57	0.41	0.02	0
10	0.47	0.32	0.02	0
11	0.79	0.66	0.02	0
12	0.74	0.63	0.03	0.01

由表3可见,以1月份为例,风电出力超过0.51 p.u.的概率只有10%,超过0.65 p.u.的概率只有5%。如果累积概率(即保证率)要达到90%,则大部分月份的风电出力只有0~0.03 p.u.。因此,风电的“保证出力”很低,是极其不稳定的电源。

1.5 风电出力波动情况分析

根据上文分析,在风电场密集地区,风电场之间的有功出力具有较强的相关性。图5和图6是2015年某月LY风电和GY风电分别同RD风电之间的有功出力散点图,横坐标分别是LY风电和GY风电的有功出力,纵坐标是RD风电的有功出力。

力散点图,横坐标分别是LY风电和GY风电的有功出力,纵坐标是RD风电的有功出力。

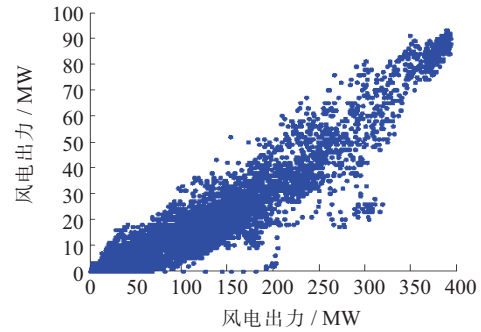


图5 LY风电和RD风电有功出力散点图

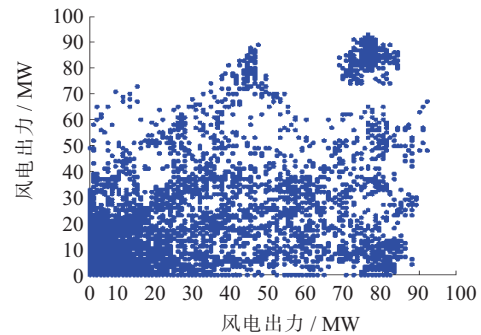


图6 GY风电和RD风电有功出力散点图

从图中可以看出,LY风电和RD风电之间的有功出力相关性较强,散点明显呈现出线性相关的关系,而GY风电和RD风电之间的有功出力相关性相对较差,散点分布较为散乱。

风电场的有功出力相关性总体较强,表4列出了一年內全省风电场总出力5 min波动幅值情况。5 min波动最大增加量为162.51 MW,最大下降量为193.59 MW,分别占了风电总装机容量的9%和11%。

表4 5 min内最大波动幅值

月份	最大上升波动 / MW	最大下降波动 / MW
1	72.359	81.134
2	110.392	120.158
3	162.51	117.000
4	120.167	182.536
5	82.991	193.588
6	73.019	83.392
7	115.598	97.000
8	90.593	116.895
9	121.679	83.234
10	94.860	100.468
11	101.856	119.047
12	162.000	161.000

2 风电有功出力特性对电网的影响

电网内大量风电机组接入后,由于风电有功出力的随机性和波动性,加大了电网对调度运行和调峰调频能力的要求。为满足风电全额消纳的需求,系统调度

运行和调峰能力必须适应并满足系统高峰负荷时段风电全部停发,低谷负荷时段风电全额满发的特殊但可能出现的运行方式。

2.1 风电对电网综合负荷的影响

全省负荷扣除风电出力后得到综合负荷(或称修正负荷曲线)曲线如图7所示。

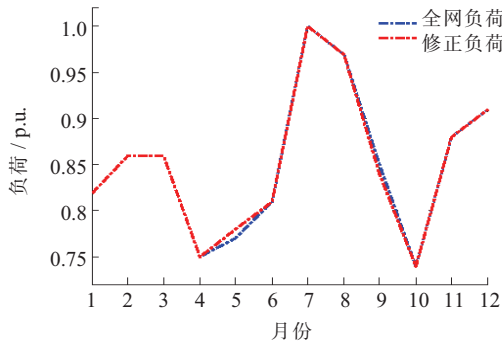


图7 综合负荷曲线

从图7中可以看出:(1)从持续负荷曲线来看,扣除风电出力以后,负荷有所下降。说明风电将导致大部分时间综合负荷减少,因此在同样装机的前提下系统可靠性将有所提高。换言之,有了风电后,在维持相同可靠性前提下,可减少系统装机,因此,从可靠性观点来看,风电也具有潜在的容量效益。(2)扣除风电出力后的综合负荷曲线的年最大负荷数值基本保持不变,并且仍发生在7月。各月考虑风电后的综合负荷比全网负荷低1%~4%。

2.2 风电对调峰的影响

图8是江苏电网某典型日的电网日用电负荷曲线和风电场日出力变化曲线。

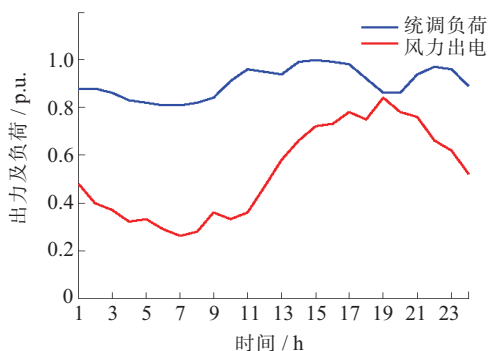


图8 日负荷曲线

由图中可看出,在负荷高峰时,风电场很难提供足够的出力,而在低谷负荷阶段,风电场却出现出力高峰,由此可见,江苏境内风电场的反调峰特性明显。随着风电装机容量的增大,这种出力特性势必要求调度部门对风电出力情况做出较精确的预测,对现有的开机方式做出调整。

3 结束语

在风电集中地区,风电场之间的有功出力具有较

强的相关性。根据对2015年江苏投运的12座风电场的分析结果,各个风电场有功出力曲线相似,有功出力相关系数大部分在0.75以上,且风电场之间距离越近,相关性越强。根据2015年全年统计结果,江苏风电场总有功出力5 min变化幅值最高可达193.59 MW,占总装机容量的11%。

根据以上结论,建议如下:(1)在风电集中地区,各风电场应加强有功出力调控,确保有功出力最大变化率满足国家标准要求;(2)风电集中地区的风电总出力波动幅度大,电网运行中需采取相应针对性措施,安排必要的旋转备用容量;(3)针对风电场有功出力特性,电网应加强风功率预测,提高预测的准确性,尤其是电网高峰和低谷负荷时段风功率预测的准确性。

参考文献:

- [1] 肖创英,汪宁渤,陈晶,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.
- [2] 蔺红,孙立成,常喜强.新疆风电出力波动特性的概率建模[J].电网技术,2014,38(6):1616-1620.
- [3] 徐乾耀,康重庆,张宁,等.海上风电出力特性及其消纳问题探讨[J].电力系统自动化,2011,35(22):54-59.
- [4] 刘春燕,晁勤,魏丽丽.不同时间尺度风储耦合特性研究[J].水力发电,2014,40(7):86-89,99.
- [5] 王锡凡,王碧阳,王秀丽,等.面向低碳的海上风电系统优化规划研究[J].电力系统自动化,2014,38(17):4-13,19.
- [6] 颜拥,文福拴,杨首晖.考虑风电出力波动性的发电调度[J].电力系统自动化,2010,34(6):79-88.
- [7] 王锡凡,卫晓辉,宁联辉,等.海上风电并网与输送方案比较[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5459-5466.
- [8] 黄雅莉,贺志峰.国外风电消纳的主要经验及借鉴[J].陕西电力,2013,41(10):19-24.
- [9] 王小海,齐军,侯佑华,等.内蒙古电网大规模风电并网运行分析和思路[J].电力系统自动化,2011,35(22):90-96,146.
- [10] 薛明军,陈福锋,姚亮,等.一种超高压输电线路恢复电压的精确计算方法[J].江苏电机工程,2014,33(5):59-61,65.
- [11] 鲁俊荣,宋念达,宋丹,等.特高压淮南—上海输变电工程新施工技术的应用[J].江苏电机工程,2014,33(1):60-62,64.
- [12] 顾威,徐梅梅,邵梦桥,等.大规模风电场次同步振荡分析[J].电力建设,2015,36(4):95-103.
- [13] 袁兆祥,仇卫东,齐立忠,等.大型海上风电场并网接入方案研究[J].电力建设,2015,36(4):123-128.

作者简介:

- 卫鹏(1988),男,陕西宝鸡人,工程师,从事电力系统运行仿真及规划研究工作;
- 刘建坤(1980),男,山东潍坊人,高级工程师,从事电力系统分析及规划研究工作;
- 周前(1978),男,江苏无锡人,高级工程师,从事电力系统仿真及规划研究工作。

- Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 134-143.
- [13] ZHAO Z, LEE W C, SJIN Y, et al. An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System [J]. Etri Journal, 2013, 4(3): 1391-1400.
- [14] PIPATTANASOMPOM M, KUZLU M, RAHMAN S. An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2166-2173.
- [15] MOHSENIAN-RAD A H, LEON-GARCIA A. Optimal Residential Load Control with Price Prediction in Real-time Electricity Pricing Environments [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 120-133.
- [16] KIM T T, POOR H V. Scheduling Power Consumption with Price Uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 519-527.
- [17] CHANG T H, ALIZADEH M, SCAGLIONE A. Real-time Power Balancing via Decentralized Coordinated Home Energy Scheduling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1490-1504.
- [18] VIVEKANANTHAN C, MISHRA Y, LI F. Real-time Price Based Home Energy Management Scheduler [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2149-215
- [19] 阮冰洁, 杨 强, 颜文俊. 计及实时电价的柔性负荷系统需求侧响应机制研究 [J]. 机电工程, 2015, 32(6): 857-862.
- [20] 唐二雷. 基于智能用电系统的家庭用电策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [21] SAHA A, KUALU M, PIPATTANASOMPOM M. Demonstration of a Home Energy Management System with Smart Thermostat control [C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference. IEEE, 2013: 1-8.
- [22] BOZCHALUI M C, HASHMI S A, HASSEN H, et al. Optimal Operation of Residential Energy Hubs in Smart Grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1755-1766.
- [23] RASTEGAR M, FOTUHI-FIRUZABAD M, ZAREIPOUR H, et al. A Probabilistic Energy Management Scheme for Renewable-Based Residential Energy Hubs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, pp(99): 1-11.

作者简介:

吴 桥(1967),男,江苏武进人,高级工程师,从事电力计量试验研究工作;

卢树峰(1972),男,山东高唐人,研究员级高级工程师,从事计量管理工作;

杨世海(1976),男,安徽淮北人,高级工程师,从事计量管理工作;

陈 坚(1992),男,浙江温州人,硕士研究生,研究方向为智能用电;

李志新(1986),男,辽宁朝阳人,博士,工程师,从事配电系统与计量方向研究工作。

Research on Home Energy Management Under the Condition of Demand-side Response

WU Qiao¹, LU Shufeng¹, YANG Shihai¹, CHEN Jian², LI Zhixin¹

(1.State Grid Key Laboratory of Electric Energy Metering, State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 210019, China; 2.China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Demand-side response is beneficial to both the electricity grid companies and power consumers. This paper introduces the concept of demand-side response, and studies the system structure and electricity strategy of home energy management under the condition of demand-side response. And then, the existing electricity strategies are classified according to RTP, TOU, temperature control consideration and integrated energy, and the shortcomings and advantages of these strategies are summarized. Finally, some advices are given for the future development direction of the home energy management.

Key words: demand-side response; home energy management; system structure; electricity strategy

(上接第9页)

Research on Power Output Characteristics of Coastal Large-scale Wind Farms Considering Their Correlation

WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to study power output characteristics and interrelatedness of intensive large-scale wind farms located around coastal areas, the large-scale wind farms sit at coastal areas of Jiangsu were taken as an example and some work was done. Based on the field measurement data of output wind power from the EMS system, active power correlation, probability distributions and the monthly maximum output power among wind farms were analyzed. The fluctuation of wind farms output active power was studied and the impact of output active wind power on the composite load of Jiangsu as well as on peak-load regulation was discussed. This work is important for the utilization rate improvement and dispatching optimization of distributed new energy.

Key words: wind power; power output characteristics; probability distribution; correlation; fluctuation; peak-load regulation