

基于最大熵谱估计的风电功率周期特性研究

徐海翔^{1,2}, 崔正湃², 吴林林¹, 王若阳², 刘 辉¹

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054)

摘 要: 基于中国华北某省级电网千万 kW 级风电场群实测数据, 采用最大熵谱估计方法研究该地区风电功率周期分量的时空分布特性。分析结果表明, 随着风资源增强, 风电功率的周期分量呈集中趋势, 相应的周期值呈增大趋势; 随着风电装机容量的增加, 风电功率周期分量呈增大趋势。通过对风电功率间歇性——周期特性潜在规律挖掘, 以期对风电功率预测、优化调度等发挥指导作用。

关键词: 最大熵; 风电功率; 周期分量; 功率谱估计; 时空特性

中图分类号: TM614

文献标识码: A

0 引 言

截至 2017 年底, 全球风电累计装机容量达 546 GW, 年均增长率为 25 %。我国作为全球风电的主要增长点, 风电累计装机容量 164 GW, 占全国电力装机容量的比例超过 10%, 成为国内第三大电源。受自然界风资源不确定性影响, 风电功率呈明显的随机性、间歇性和波动性, 这也是风电接入对电力系统的最主要影响。随着风电装机规模的增大, 风电对电力系统的影响趋于严重化、复杂化和多样化, 包括对系统稳定性、频率调节、电压控制和电能质量等方面影响^[1-6]。为改善风电对电网的友好性, 实现对风电的“可预测、可控制和可调节”, 亟需从风电运行数据中挖掘潜在规律, 以最大化减小风电不确定性对电网带来的不利影响。

目前针对风电不确定性的研究主要集中在随机性和波动性两个方面。文献[7]基于甘肃省酒泉地区风电实际数据对风电功率的波动性和随机性等出力特性进行了初步分析。文献[8]从风功率波动幅度平均值、波动量标准差和波动差分量概率 3 个角度, 量化分析了风功率波动在时空分布的特性, 发现风功率波动性随规模的增大而呈平缓效应。文献[9]分别从平滑性和相关性两个方面研究了在不同时空尺度下风功率波动性的统计规律。文献[10]采用带位移因子和伸缩系数的 t 分

布分析风功率波动性的概率分布。此类文献主要通过概率统计的手段分析了风电功率的随机性和波动性, 然而却忽略了风电功率的时序特性。相对而言, 对风电功率间歇性的研究较少, 文献[11]通过自相关函数及周期图方法从风电功率时间序列中提取其间歇性特征——周期分量, 证实风电功率周期分量的存在性, 但缺乏对风电功率周期分量的整体阐述。此外, 自相关函数等经典功率谱估计方法具有一定的局限性, 存在分辨率低、频谱失真等问题, 只适用于周期性较为明显的风电功率时间序列的周期分量提取。

本文基于中国华北某省级电网千万 kW 级风电场群实测数据, 采用最大熵谱估计方法研究其风电功率周期分量的时空分布特性。该方法基于实际风电功率时间序列, 不作任何人为假定地外推其相关函数, 有效减小谱估计误差, 大大提高谱估计分辨率, 可适应于各类极端风电功率序列的周期特性挖掘。

1 风电功率趋势量处理

1.1 风电功率组成分析

受风能变化影响, 风电功率存在随机性、波动性和间歇性的自然特性, 这也是风电等间歇性能源相对于传统能源的最主要劣势, 在一定程度上制约了风电的发展。但与此同时, 风电功率在长时间尺

收稿日期: 2016-06-16

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900501)

通信作者: 徐海翔(1988—), 男, 硕士, 主要从事新能源并网分析与控制等方面的研究。xhx0617@foxmail.com

度上存在一定的规律性,如季节规律和昼夜规律。本文选取 2015 年华北某省级电网风电功率数据,如图 1 所示。

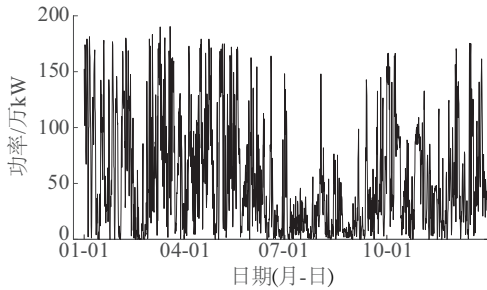


图1 华北某省级电网2015年风电功率

Fig. 1 Wind power of a provincial power grid in Northern China in 2015

对于风电功率时间序列 X_t ,一般可认为是由趋势分量 M_t 、周期分量 S_t 和随机分量 Y_t 叠加而成,如式(1)所示。其中,趋势分量属于时间序列中的确定性暂态成分,若风电功率中包含这种暂态成分时会破坏序列的平稳性^[12],则不满足最大熵谱估计对序列的平稳性要求。因此,对风电功率进行周期性分析之前需识别并排除序列中的趋势分量。

$$X_t = M_t + S_t + Y_t \quad (1)$$

1.2 趋势分量处理

针对风电功率的时间序列特性,本文采用最小二乘方法拟合风电功率序列的趋势分量,不但可消除因装机增长带来的线性偏移,而且可消除因多因素(如风资源变化)导致的高阶多项式趋势。

假设风电功率 $X_t(t=1,2,\dots,N)$ 是以 Δt 为采样间隔的时间序列,则可采用 K 阶多项式的估计值 N_t 来拟合风电功率 X_t 中的趋势分量。

$$N_t = \sum_{k=0}^K a_k (t \cdot \Delta t)^k \quad (2)$$

式中, a_k ——多项式系数。

根据最小二乘原理, a_k 的目标函数为实际值 X_t 与估计值 N_t 的误差 E 为极小值。

$$\min E = \min \sum_{k=0}^K \left[X_t - \sum_{k=0}^K a_k (t \cdot \Delta t)^k \right]^2 \quad (3)$$

从风电功率序列 X_t 中剔除趋势成分,再对序列进行中心化处理,即可获得风电功率的平稳时间序列 Y_t ,方可进一步进行最大熵谱估计。

2 风电功率最大熵谱估计

2.1 最大熵谱法

最大熵谱估计方法^[13-15]是现代功率谱估计方法之一,即在维持最大不确定性条件下,将有穷采样风电功率序列 $Y_t(lt < N)$ 的自相关函数 $R(t)$ 用迭代方法最佳地递推至 $lt \rightarrow \infty$,并进一步用得到的无穷自相关函数序列替代有穷序列去作功率谱估计,以提高功率谱估计的分辨率。

无穷自相关函数 $R(t)$ 的功率谱 $P(\omega)$ 为:

$$P(\omega) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} R(t) e^{-i\omega t \Delta t} \quad (4)$$

相应的熵 H 为:

$$H = - \int P(\omega) \ln P(\omega) d\omega \quad (5)$$

式中, ω ——角频率。

由于采用最大熵法外推自相关函数序列等价于自回归计算,因此在满足最大熵情况下(即 $dH=0$),采用拉格朗日乘子法可获得风电功率序列相应的最大熵功率谱 $P(f)$ 为:

$$P(f) = \frac{\sigma_m^2}{\left| 1 - \sum_{j=1}^m a_{j,m} e^{-ij\omega \Delta t} \right|^2} \quad (6)$$

式中, f ——频率; m ——自回归阶数; σ_m^2 ——预报误差方差估计; $a_{j,m}$ ——自回归系数。

2.2 伯格递推算法

最大熵谱估计法中最核心算法为伯格递推算法,采用递推方式从一阶模型开始逐步加阶递推,每次递推能保障自相关序列非负定的同时也能得到平稳的模型,由于方法采用正向预测误差和负向预测误差平方和最小,因此可提高数据的利用率,适用于短时间序列数据的建模和分析。

Burg 算法在 Levinson 递推算法基础上采用正向预测误差和负向预测误差平方和极小原则来确定自回归系数 $a_{j,m}$ 。因此,针对剔除趋势成分并中心化处理后的新序列 Y_t ,平均预测误差功率 E_m 定义为:

$$E_m = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{N-m} \sum_{t=m+1}^N \left(|e_m^f(t)|^2 + |e_m^b(t)|^2 \right) \right] \quad (7)$$

式中, $e_m^f(t)$ ——正向预测误差; $e_m^b(t)$ ——负向预测误差;上标 f、b——分别代表正向预测、反向预测。

为使 E_m 达到极小值, 对 E_m 求自回归系数 $a_{m,m}$ 的微分可得到:

$$a_{m,m} = \frac{2 \sum_{t=m+1}^N \left(y_t - \sum_{j=1}^{m-1} a_{j,m-1} y_{t-j} \right) \left(y_{t-m} - \sum_{j=1}^{m-1} a_{j,m-1} y_{t-m-j} \right)}{\sum_{t=m+1}^N \left[\left(y_t - \sum_{j=1}^{m-1} a_{j,m-1} y_{t-j} \right)^2 + \left(y_{t-m} - \sum_{j=1}^{m-1} a_{j,m-1} y_{t-m-j} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

利用 Levinson 递推算法, 计算自回归相应参数 $a_{j,m}$ 和预报误差方差估计 σ_m^2 分别为:

$$a_{j,m} = a_{j,m-1} - a_{m,m} a_{m-j,m-1} \quad (9)$$

$$\sigma_m^2 = (1 - a_{m,m}^2) \sigma_{m-1}^2 \quad (10)$$

通过以上伯格递推算可获得式(6)中风电功率的最大熵谱估计。

2.3 模型阶数选择

自回归阶数 m 选择是最大熵谱估计的关键步骤之一, 如果选取太小的阶数, 得到的熵谱会太平滑, 不能有效分辨时间序列周期分量; 如果选取太大的阶数, 则会影响最大熵谱估计值的稳定性。在实际应用基础上, 美国加利福尼亚大学, 劳伦斯伯克利国家实验室的 J. G. Beryman 提出模型自回归阶数 m 的经验公式为 $m = 2N/\ln(2N)$ 。

3 风电功率周期特性分析

为评估风电功率的周期特性, 本文选取 2015 年华北某省级电网 A 的实测风电功率数据进行分析, 包括全网 A (装机 9433 万 kW)、地区 B (装机 253 万 kW)、汇集站 C (装机 138 万 kW) 和风电场 D (装机 20 万 kW) 4 个层级的风电功率数据, 采样时间间隔均为 1 h。

3.1 自相关函数法与最大熵谱法对比

本文分别采用自相关函数法与最大熵谱法对 2015 年 1 月份地区 B 风电功率周期性进行评估, 对比分析 2 种方法的有效性。

3.1.1 趋势量处理

选取 $K=8$ 阶多项式拟合风电功率的趋势分量, 从风电功率序列中剔除趋势分量并进行中心化处理, 以此获得平稳风电功率序列, 如图 2 所示。

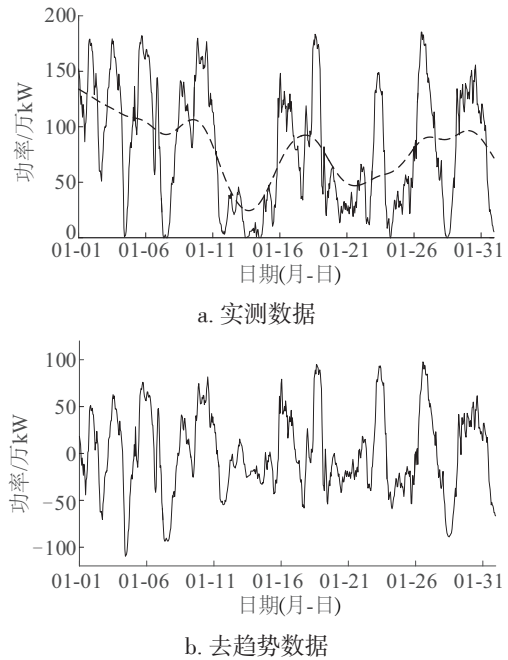


图2 风电功率原始序列和处理后序列

Fig. 2 Measured date and reintegration of wind power

3.1.2 自相关函数法

该地区 2015 年 1 月风电功率的自相关函数如图 3 所示, 可以看见其自相关函数呈一定周期性变化, 周期约为 3 d。为进一步准确分析风电功率周

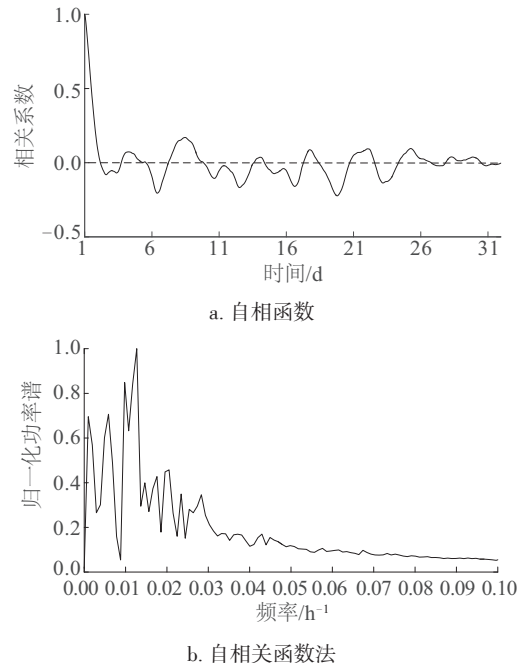


图3 风电功率自相关函数及功率谱图

Fig. 3 Power spectrum diagram by autocorrelation function method

期性,采用傅里叶变换对自相关函数进行功率谱估计,功率谱图中存在较多波峰,其中主周期峰对应的频率为 0.0127 h^{-1} (周期为 78.7 h), 3 个次周期峰对应的频率为 0.0098 、 0.0059 、 0.0010 h^{-1} , 其相应周期分别为 102.0 、 169.5 、 1000.0 h 。

3.1.3 最大熵谱法

由式(6)~式(10)对该地区 2015 年 1 月风电功率进行最大熵谱法估计,其功率谱图如图 4 所示,与图 3 不同的是只有 2 个明显的波峰,且与图 3 对应波峰的位置完全一致,即其相应周期为 78.7 、 102.0 h 。

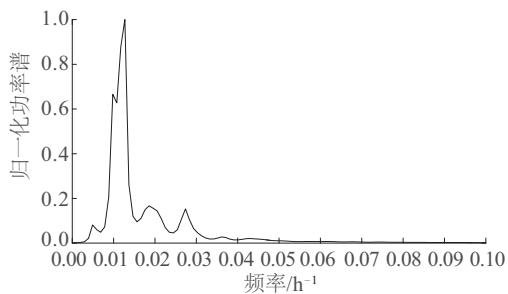


图 4 风电功率最大熵谱法功率谱图

Fig. 4 Power spectrum diagram by maximum entropy estimation method

数据结果证实,风电功率确实存在一定周期性,如在 2015 年 1 月,地区 B 风电功率存在周期为 78.7 h 的周期分量。但对比图 3 和图 4 发现,图 3 存在许多波峰,这些峰是有限自相关函数序列进行功率谱估计时产生的伪峰,有的峰幅值还较大,严重干扰了周期峰的判断。尽管图 4 也存在这些峰,但幅值较小、数量不多。此外,图 4 的周期峰比图 3 更为尖锐,提取的周期分量更符合实际。

3.2 风电功率周期时间特性分析

随机性的风能导致风电功率周期性的不稳定性,不同时段的风电功率的周期分量不尽相同。某些时段风电功率周期分量较为集中,则周期性明显;某些时段风电功率周期分量较为分散,则周期性不明显,而对于期分量较分散序列,自相关函数法则难以区分相应的周期分量。为研究风电功率周期性在时间分布上的特性,本文对地区 B 各时段风电功率进行最大熵谱估计(每次选取 10 d 的功率数据序列),并以此构建风电功率谱三维图,如图 5 所示。

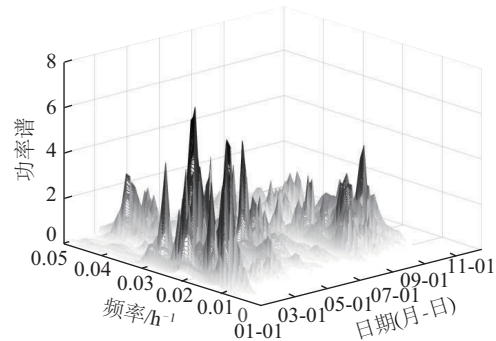


图 5 2015 年地区 B 风电功率谱三维图

Fig. 5 The three-dimensional graph of wind power spectrum

由于夏季风资源不足,相应功率谱幅值较小,不利于分析,因此对各时段(地区 B 风电,每个时段为 10 d 的功率数据序列)功率序列的功率谱按最大值进行归一化处理,如图 6 所示。

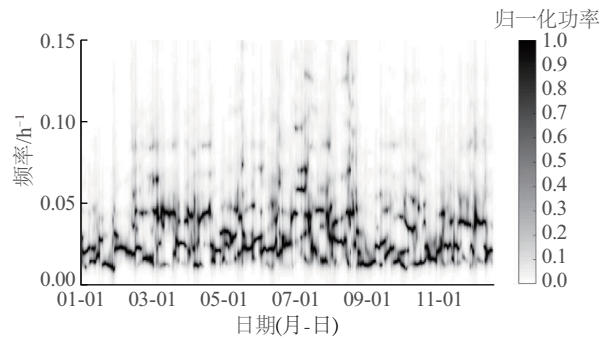


图 6 2015 年地区 B 风电功率谱二维图(归一化)

Fig. 6 The two-dimensional graph of wind power spectrum

图 5 和图 6 分析结果表明,2015 年地区 B 风电功率周期分量的频率主要分布在 $0.01 \sim 0.05 \text{ h}^{-1}$ (周期为 $20 \sim 100 \text{ h}$)。随着风资源的增强,风电功率的周期分量呈集中趋势,相应的周期值呈变大趋势,如风资源较弱的 6~8 月份,风电功率的周期分量较为分散,而风资源较强 1、2 月份和 9~12 月份,风电功率的周期分量较为集中。

为进一步精确量化风电功率主周期分量的分布情况,提取各时段的主周期分量,并对相应周期值建立概率分布函数,如图 7 所示。数据结果表明,2015 年地区 B 风电功率周期分量的周期主要分布在 $14 \sim 64 \text{ h}$,占比为 81.3% 。其中,概率分布函数在 24 和 48 h 附近存在明显的波峰,表示地区 B 风电功率中存在一定的日周期分量。

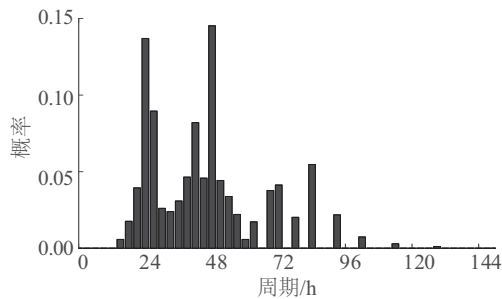


图7 风电功率主周期分量概率分布

Fig. 7 Probability distribution of main periodic components

2015 年地区 B 各月周期分量统计如表 1 所示。

表1 2015年地区B各月周期分量

Table 1 Periodic component of area B in 2015

月份	主周期分量/h	次周期分量/h
1	78.7	102.0
2	51.2	44.5
3	73.1	23.8、170.6
4	85.3	39.4
5	33.0	53.9、41.0
6	37.9	51.2、146.2、78.7
7	24.4	42.7、53.9、21.8
8	146.2	73.1、56.9、35.3
9	56.9	78.7、102.0、42.7
10	73.1	56.9、204.8
11	44.5	78.7、60.2
12	146.2	64.0、26.3

3.3 风电功率周期时间特性分析

随着装机规模的增大,风电功率呈平滑效应。因此本文分析了不同装机规模地区(如全网 A、地区 B、汇集站 C 和风电场 D)的周期特性,以研究风电功率周期特性随风电分布地域和装机规模的增加而表现的空间分布特征。在此基础上,分别构建各地区风电功率的功率谱概率分布曲线,如图 8 所示。随着风电装机容量的增加,风电功率周期特性的分布特征基本相同,各概率分布曲线均存在 3 个峰值,相应的频率分别为 0.012 、 0.021 、 0.042 h^{-1} 。而有所区别的是,随着风电装机容量的增加,频率 0.012 h^{-1} 对应的功率谱概率呈增加趋势,这表明随装机规模的增加,风电功率周期分量变化不是很明

显,但其中的大周期分量比例随之增多。

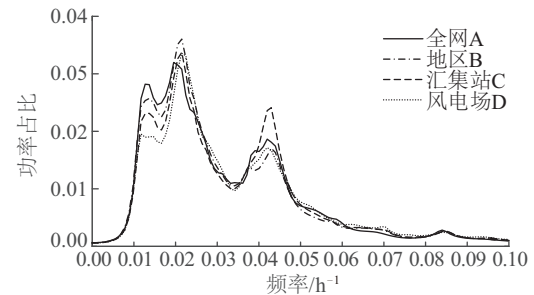


图8 2015年风电功率功率谱概率分布曲线

Fig. 8 Probability distribution of wind power spectrum

由以上分析结果表明,各地区风电功率周期分量均存在 3 个主周期分量,相应频率约为 0.012 、 0.021 、 0.042 h^{-1} (周期为 83、48、24 h),从侧面反映了风电功率中存在日周期分量的广泛性。此外,受不同地区风电功率互补效应的影响,风电功率的周期分量随风电装机容量的增加而呈变大趋势,在更广域地区的表现形式更明显。

4 结 论

本文基于中国华北某省级电网千万 kW 级风电场群实测数据,采用最大熵谱估计的方法研究其风电功率周期分量的时空分布特性。结论如下:

- 1) 在分析风电周期特性方面,最大熵谱估计法较自相关函数法更有效;
- 2) 风电功率存在周期范围为 20~100 h 的周期分量;
- 3) 风电功率存在一定的日周期分量;
- 4) 随着风资源的增强,风电功率的周期分量呈集中趋势,相应的周期值呈增大趋势;
- 5) 随着风电装机容量的增加,风电功率的周期分量呈增大趋势。

通过挖掘风电功率的周期规律,可进一步提高风电功率预测精度、优化新能源调度运行方式等。

[参考文献]

- [1] 薛禹胜,雷 兴,薛 峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J].中国电机工程学报,2014,34(29): 29—40.
- [1] Xue Yusheng, Lei Xing, Xue Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 29—40.

- [2] Gomez-quiles C, Gil H A. Price and resource-related uncertainty in the estimation of the revenue of a wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2074—2083.
- [3] Makarov Y, Eeingov P, Ma J, et al. Incorporating uncertainty of wind power generation forecast into power system operation, dispatch and unit commitment procedures[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 433—442.
- [4] Holttinen H, Meibom P, Ortho A, et al. Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration[J]. Wind Energy, 2011, 14(2): 179—192.
- [5] 何世恩, 姚 旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21—27.
- [5] He Shien, Yao Xu, Xu Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 21—27.
- [6] 陈 宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32—36.
- [6] Chen Ning, He Weiguo, Qian Minhui, et al. Design and application of reactive power control system for wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 32—36.
- [7] 肖创英, 汪宁渤, 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.
- [7] 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.
- [8] 崔 杨, 穆 钢, 刘 玉, 等. 风电功率波动的时空分布特性[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 110—114.
- [8] Cui Yang, Mu Gang, Liu Yu, et al. Spatiotemporal distribution characteristic of wind power fluctuation[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 110—114.
- [9] 李剑楠, 乔 颖, 鲁宗相, 等. 大规模风电多尺度出力波动性的统计建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 7—13.
- [9] Li Jiannan, Qiao Ying, Lu Zongxiang, et al. Research on statistical modeling of large-scale wind farms output fluctuations in different special and temporal scales[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 7—13.
- [10] 林卫星, 文劲宇, 艾小猛, 等. 风电功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 38—46.
- [10] Lin Weixing, Wen Jinyu, Ai Xiaomeng, et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 38—46.
- [11] 杨 茂, 王 东, 严干贵, 等. 风电功率波动特性中的周期性研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(11): 20—26.
- [11] Yang Mao, Wang Dong, Yan Gangui, et al. Study on periodicity for wind power fluctuations characteristics[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(11): 20—26.
- [12] 王爱莲, 史晓燕. 统计学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2010.
- [12] Wang Ailian, Shi Xiaoyan. Statistics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2010.
- [13] 张文泉, 李彦斌. 最大熵谱估计及应用研究[J]. 现代电力, 2001, 18(1): 41—46.
- [13] Zhang Wenquan, Li Yanbin. Maximum entropy spectrum estimation and its applications[J]. Modern Electric Power, 2001, 18(1): 41—46.
- [14] 赵丽娜, 宋松柏, 谢萍萍. 陕北年径流序列的谱分析研究[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(6): 16—25.
- [14] Zhao Lina, Song Songbai, Xie Pingping. Spectral analysis of annual runoff series in Shanbei area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(6): 16—25.
- [15] 唐 洁. 功率谱分析方法在周期分析中的应用[J]. 陕西理工学院学报: 自然科学版, 2013, 29(5): 26—31.
- [15] Tang Jie. Periodicity analysis based on power spectrum estimation[J]. Journal of Shaanxi University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 29(5): 26—31.
- [16] Berryman J G. Choice of operator length for maximum entropy spectral analysis[J]. Geophysics, 1978, 43(43): 1384—1391.

STUDY ON PERIODICITY OF WIND POWER BASED ON MAXIMUM ENTROPY SPECTRUM ESTIMATION

Xu Haixiang^{1,2}, Cui Zhengpai², Wu Linlin¹, Wang Ruoyang², Liu Hui¹

(1. *State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Beijing 100045, China;*

2. *State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China*)

Abstract: Because the wind power has the natural characteristic of intermittent, fluctuation and randomness, large scale wind power will make negative influence on the safe and stable operation of power grid. So, based on the wind power measured data of a province in North China which possesses gigawatt level capacity of wind farms group, this article uses the maximum entropy spectrum estimation method to study the time and space distribution characteristics of wind power periodicity. Analysis results show that wind power periodic component will get concentrated with the improvement of wind resources, and wind power period will be larger with the augment of wind power capacity. By mining the potential rule of intermittent wind power, this article in order to play a guiding role on power prediction, optimal scheduling, etc.

Keywords: maximum entropy; wind power; extracting periodic component; power spectral estimation; spatiotemporal distribution