

# 风力发电机输出功率条件子集区间估计方法<sup>\*</sup>

沈方<sup>1</sup>, 杨博<sup>1</sup>, 韩震焘<sup>1</sup>, 金宇飞<sup>1</sup>, 王楚迪<sup>2</sup>, 马少华<sup>2</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司 经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110016;

2. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 根据风力发电机的风速和输出功率历史数据, 对风机输出功率均值与风速的关系进行最小二乘参数辨识, 以此为基础求出风机输出功率偏差与风速的关系。采用 Python 概率分析确定风机输出功率偏差各子集的概率分布类型, 估计其特征参数, 以求出其概率密度函数, 进而对风机输出功率偏差进行概率置信区间预测。基于风机输出功率均值与风速的关系和风机输出功率偏差子集的置信区间估计模型, 实现了根据风速预报值对风机输出功率的置信区间进行预测。用实际风机的历史纪录对所提方法进行了测试和验证。结果表明: 基于风速将风机输出功率偏差划分成多个子集, 可提高风机输出功率概率置信区间预测的精准度。

**关键词:** 风力发电机; 输出功率偏差; 风速; 置信; 区间估计; 条件子集

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)08-0104-06

## Conditional Subset Interval Estimation Method for Wind Turbine Output Power<sup>\*</sup>

SHEN Fang<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>, HAN Zhentao<sup>1</sup>, JIN Yufei<sup>1</sup>, WANG Chudi<sup>2</sup>, MA Shaohua<sup>2</sup>

(1. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Shenyang 110016, China;

2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** According to the wind speed and output power historical data of wind turbine, the relationship between the average output power of the wind turbine and the wind speed was subjected to least squares parameter identification, and the relationship between the output power deviation of the wind turbine and the wind speed was obtained based on the above research. The Python probabilistic analysis was used to determine the probability distribution types of each subset of the wind turbine output power deviation, and the characteristic parameters were estimated to obtain the probability density function, furthermore, the probability of confidence interval prediction was performed on the wind turbine output power deviation. Based on the relationship between the average output of the wind turbine and the wind speed and the confidence interval estimation model of the wind turbine output power deviation subset, the confidence interval of the wind turbine output power was predicted according to the wind speed forecast value. The method proposed was tested and verified with the historical record of the actual wind turbine, the confidence interval of the wind turbine output power was predicted according to the wind speed forecast value. The results showed that the wind turbine output power deviation was divided into multiple subsets based on the wind speed, which could improve the accuracy of the confidence interval prediction of the wind turbine output power.

**Key words:** wind turbine; output power deviation; windspeed; confidence; interval estimation; conditional subset

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家电网公司科技项目 (LNDL2018YF02)

作者简介: 沈方 (1963—), 男, 高级工程师, 研究方向为风功率预测、电力体制改革与电力系统规划。

杨博 (1988—), 男, 高级工程师, 研究方向为风功率预测、控制。

韩震焘 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网规划技术。

## 0 引言

随着风电并网规模的快速扩大,风电装机容量在电网中的占比不断提高。由于风力发电机的输出功率呈现较强的随机性和波动性,对含风电电网的安全稳定和经济运行构成了严重威胁。因此,风机输出功率预测已经成为可再生能源电网的热点研究问题之一<sup>[1-3]</sup>。

风机输出功率预测是根据风速及相关因素、风机输出功率的历史数据、当前状态定性或定量地推测其此后的演化过程。传统的风机输出功率预测方法一般给出的是点估计值,可反映风机的发电能力,但不能对其可能出现的范围进行较为精准地预测,难以满足含风电清洁能源电网的规划、运行和分析等需求。为此,基于概率方法的区间预测在近些年得到发展,并受到了越来越多的重视<sup>[4-7]</sup>。

概率预测方法可分为参数预测和非参数预测两大类<sup>[8-9]</sup>。参数预测是在假设预测目标服从某种概率分布的前提下,根据历史数据对预测目标进行检验和预测,其效果受限于所假设的分布类型是否与预测目标的分布形式相匹配;非参数预测方法无需考虑预测目标的概率分布类型,有效地避免了分布类型选择不当而带来的建模误差<sup>[10-11]</sup>。较为成熟的非参数预测方法包括分位点回归、核密度估计和自适应重采样等方法。分位点回归的预测结果与回归函数的选择有关;核密度估计方法需要大量的样本数据,且不易寻找到最佳的窗口宽度;自适应重采样的分布函数是通过多个经验分布函数加权得到的,预测效果受样本影响较大,泛化能力较差。为此,文献[12]提出基于 GA-VNN 模型的风力发电系统预测模型。文献[13]提出基于最小二乘法及因散模式分解的预测模型,两种预测方法都适用于风力发电系统的超短期预测。

本文采用参数预测方法对风机输出功率进行概率区间预测,根据风力发电机的风速及输出功率历史数据,确定风机输出功率均值与风速的关系,求出风机输出功率偏差与风速的关系特性;按风力等级,将风机输出功率偏差划分成若干个子集;采用 Python 概率分析确定风机输出功率偏差各子集的概率分布类型,并估计其特征参数,求出

风机输出功率偏差各子集的概率密度函数,进而对风机输出功率偏差进行置信区间估计;基于风机输出功率均值和风机输出功率偏差各子集置信区间估计模型,实现对风机输出功率的置信区间预测。以实际运行风力发电机的风速和输出功率历史数据作为训练和测试样本,对本文提出的算法进行了验证。

## 1 风机输出功率与风速的关系

风力发电机的输出功率  $P(v)$  与风速  $v$  有关,可表示为

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_c \\ f(v) & v_c < v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_0 \\ 0 & v > v_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v_c$ ——切入风速;

$f(v)$ ——表征实际风速介于  $v_c$  和  $v_N$  之间,风机输出功率与风速之间关系的非线性函数;

$v_N$ ——额定风速;

$P_N$ ——风机额定输出功率;

$v_0$ ——切出风速。

式(1)可以反映风机输出功率与风速的关系,但无法表征风机输出功率的随机性和波动性。

## 2 风机输出功率均值及偏差的预测

### 2.1 风机输出功率的均值

对风速和风电功率历史数据进行清洗,构建历史风速向量  $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_m]^T$  和历史风机输出功率向量  $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m]^T$ 。其中,  $P_i$  与  $v_i$  相对应,  $v_1 \leq v_2 \leq \dots \leq v_i \leq \dots \leq v_m$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ 。

根据  $\mathbf{P}$  和  $d\mathbf{P}/d\mathbf{v}$ , 求  $v_c, v_N, v_0, P_N$  的估计值。式(1)中的  $f(v)$  为非线性函数,采用多项式函数对其进行逼近。令  $f(v) = a_0 + a_1v + a_2v^2 + a_3v^3$ , 基于最小二乘均方差求参数向量  $\mathbf{a} = [a_0, a_1, a_2, a_3]^T$  的估计值,建立风机输出功率均值预测模型。

### 2.2 风机输出功率偏差

不同风速条件下,风机输出功率偏差的概率分布有所不同。为此,本文按照风力等级将样本

划分成若干个子集。假设风机输出功率偏差各子集均服从典型概率分布,采用 Python 概率分析确定其概率分布类型,并估计特征参数,进而得到风机输出功率偏差各子集的概率密度函数。具体方法如下:

(1) 根据风速和风机输出功率历史数据,以及第 2.1 节所建立的风机输出功率均值模型,构建历史风机输出功率偏差向量  $\Delta P = P - P(v) = [P_1 - P(v_1), P_2 - P(v_2), \dots, P_m - P(v_m)]^T$ 。

(2) 按风力等级将风机输出功率偏差划分成  $n$  个子集。

(3) 对第  $i$  个风机输出功率偏差子集进行假设检验,确定其与哪种典型概率分布类型最为接近,同时采用极大似然法估计出特征参数,得到概率密度分布函数  $f_i(\Delta P)$ 。其中,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

### 2.3 风机输出功率的置信区间

根据风机输出功率偏差第  $i$  个子集的概率密度函数,求出置信度为  $1-\alpha$  下,风机输出功率偏差置信区间的估计值  $[\Delta P_{iL}^\alpha, \Delta P_{iH}^\alpha]$ ,满足:

$$\begin{aligned} \int_0^{\Delta P_{iL}^\alpha} f_i(\Delta P) d\Delta P &= \frac{\alpha}{2} \\ \int_0^{\Delta P_{iH}^\alpha} f_i(\Delta P) d\Delta P &= 1 - \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ ——显著性水平。

根据第  $i$  个子集风机输出功率偏差置信区间  $[\Delta P_{iL}^\alpha, \Delta P_{iH}^\alpha]$  的估计值,求出风速位于第  $i$  个子集的风速区间时,风机输出功率置信区间的估计值  $[P_L^\alpha, P_H^\alpha]$  为

$$\begin{cases} P_L^\alpha = P(v) - \Delta P_{iL}^\alpha \\ P_H^\alpha = P(v) + \Delta P_{iH}^\alpha \end{cases} \quad v \in [v_{imin}, v_{imax}] \quad (3)$$

## 3 算例测试

### 3.1 预测模型

以某实际风力发电机的风速和输出功率历史数据作为测试和验证样本,对本文提出的算法进行测试。选取 2017 年 1 月和 7 月的 31 日作为预测日,对其输出功率进行置信区间预测。根据被预测日前 30 天的风速和风机输出功率历史数据,按第 2.1 节给出的方法求出风机输出功率均值和风机输出功率偏差与风速的变化特性。图 1 所示分别为根据 2017 年 1 月 1~30 日和 7 月 1~30 日历史数据得到的风机输出功率均值和输出功率偏

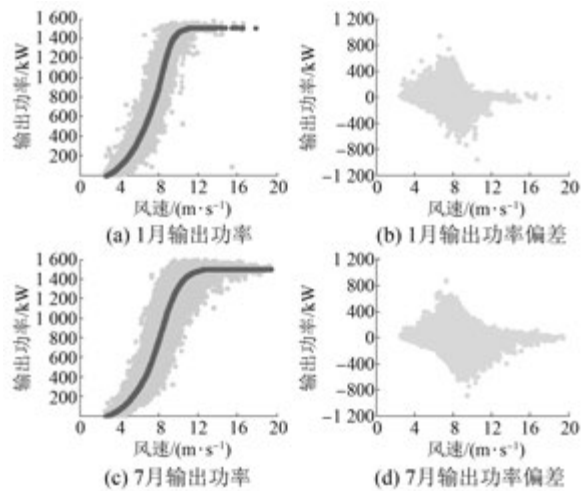


图1 风机输出功率及输出功率偏差与风速的关系

差与速度的关系特性。

从图 1(a)和图 1(c)可以看出,风机输出功率与风速的关系满足式(1),但具有较强的随机性和波动性。从图 1(b)和图 1(d)可以看出,风机输出功率偏差与风速有关,风速较小或较大时,输出功率偏差较小;中等风速下,输出功率偏差较大。

参照国家气象局规定的风力等级,将风机输出功率偏差划分成 5 个子集;采用 Python 概率分析确定风机输出功率偏差各子集的概率分布,估计特征参数,求出置信区间的估计值。图 2 所示为 2017 年 1 月 1~30 日和 7 月 1~30 日连续 30 天风机输出功率偏差子集和全集的概率密度直方图和概率密度函数。2017 年 1 月和 7 月风机输出功率偏差各子集和全集的风速范围和概率分布类型如表 1 所示。

从概率分析结果可以看出:

(1) 该风机 2017 年 1 月和 7 月输出功率偏差的概率分布有些相似,但有一定区别。

(2) 风速较小(0~3 级)和较高( $\geq 6$  级)时,输出功率偏差较小;中等风力(4~5 级)时,输出功率偏差较大。可见,风机发电波动范围与风力等级相关。

(3) 风机输出功率偏差子集主要服从 genlogistic 分布、recipinvgauss 分布、f 分布、t 分布或 norm 分布(后 2 种分布类型在 1 月和 7 月未出现,但在其他时间段内偶有出现)。

(4) 风机输出功率偏差不同子集虽可能服从同一类型的概率分布,但特征参数不同。

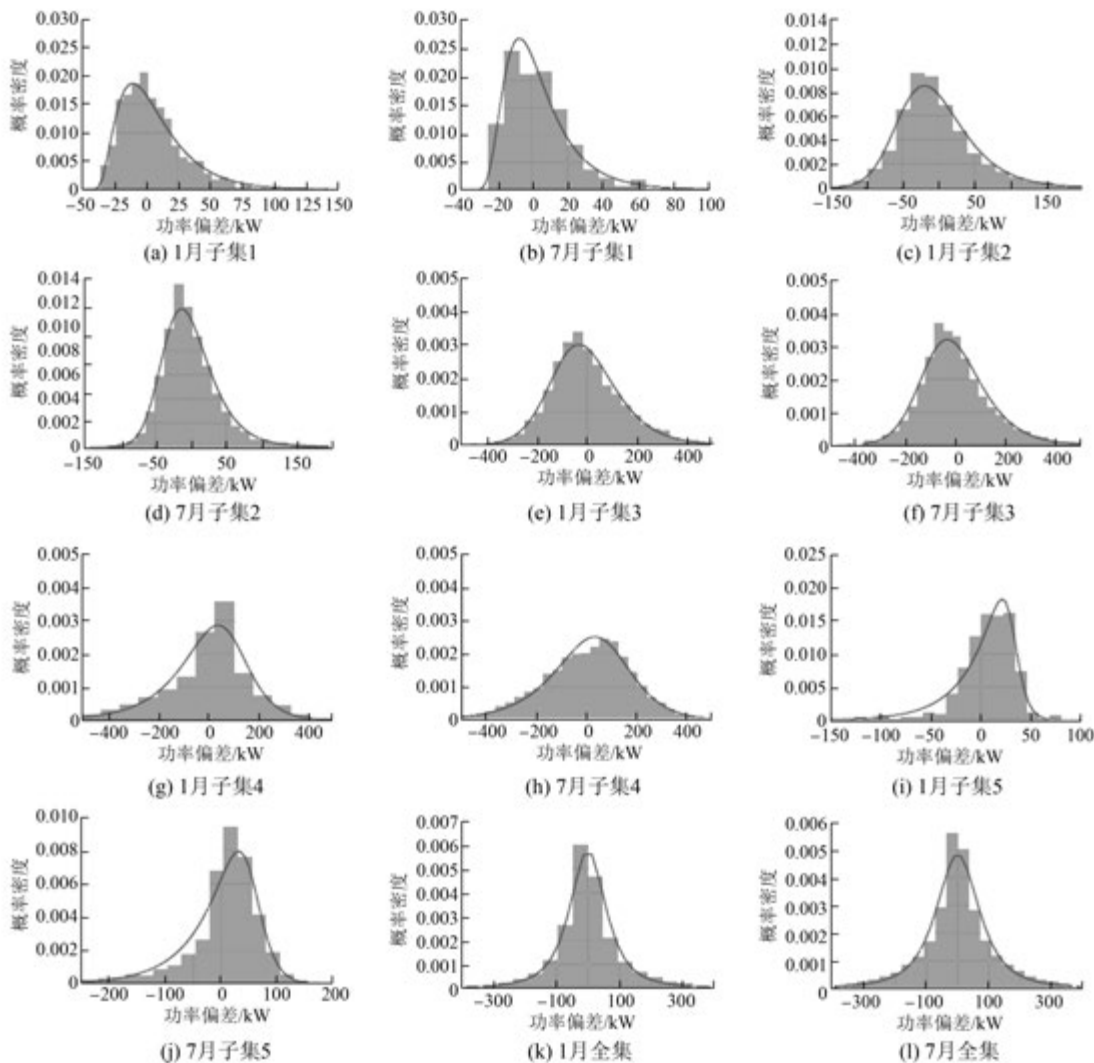


图2 风机输出功率偏差子集和全集的概率分布

表1 风机输出功率偏差子集

| 集 | 风力/级 | 风速/<br>(m·s <sup>-1</sup> ) | 1月       |            | 7月       |            |
|---|------|-----------------------------|----------|------------|----------|------------|
|   |      |                             | 分布<br>类型 | 标准差/<br>kW | 分布<br>类型 | 标准差/<br>kW |
| 1 | 0~2  | [0,3.4)                     | A        | 27.52      | B        | 21.10      |
| 2 | 3    | [3.4,5.5)                   | C        | 53.43      | C        | 39.46      |
| 3 | 4    | [5.5,8.0)                   | C        | 148.69     | C        | 141.01     |
| 4 | 5    | [8.0,10.8)                  | C        | 172.06     | C        | 188.02     |
| 5 | ≥6   | [10.8,24.5)                 | C        | 33.01      | C        | 69.48      |
| 全 | 1~10 | [0,24.5)                    | D        | 381.34     | D        | 226.94     |

注:A 为 recipinvgauss 分布;B 为 f 分布;C 为 genlogistic 分布;D 为 t 分布。

(5) 全风速范围内,风机输出功率偏差服从 t

分布,位于零附近的样本占比较高,余者虽占比不高,但分散性较大。

可见,如果不按照风力等级划分风机输出功率偏差子集,而是在全风速范围内对风机输出功率偏差进行概率置信区间预测,难以恰当地反映风机输出功率偏差的波动范围与风速有关;此外,风速受天气和季节影响较大,风速的概率分布与季节天气有关。若中等风速的样本占比较少,则风机输出功率偏差的概率密度函数主要分布在零附近,其余的样本会分散在远离零的较宽范围内。这样,当风速较小或较高时,预测结果较为可信,但区间范围较宽,精度不理想;中等风速时,区间估计的精度较好,但预测结果的可信度难以保证。因此,有必要按风速将样本划分成若干个子集,考

虑风机输出功率偏差的波动范围与风速相关,还可消除风速不均衡造成样本代表性偏颇的问题。

根据式(2)求出的风机输出功率偏差置信区间估计结果如表 2 所示。

表 2 风机输出功率偏差的概率置信区间

| 集 | 1 月             |               | 7 月             |               |
|---|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
|   | $\alpha=0.1$    | $\alpha=0.4$  | $\alpha=0.1$    | $\alpha=0.4$  |
| 1 | (-21.0, 40.2)   | (-3.4, 7.0)   | (-15.8, 27.8)   | (-0.8, 5.7)   |
| 2 | (-62.0, 65.1)   | (-21.6, -0.1) | (-43.8, 49.1)   | (-13.4, 2.7)  |
| 3 | (-172.3, 199.5) | (-49.1, 15.4) | (-155.2, 184.3) | (-45.4, 15.0) |
| 4 | (-252.3, 191.1) | (2.9, 48.9)   | (-248.1, 211.3) | (-38.4, 56.5) |
| 5 | (-25.2, 34.8)   | (3.9, 16.4)   | (-92.6, 68.7)   | (6.8, 27.3)   |
| 全 | (-118.3, 130.2) | (-20.2, 10.5) | (-138.7, 156.1) | (-16.2, 16.4) |

3. 2 预测效果分析

根据第 3.1 节所建立的预测模型,代入预测日的历史风速,得到风机输出功率的点估计和置信区间估计,2017 年 1 月 31 日和 7 月 31 日风机输出功率实测值和预测值如图 3 所示。

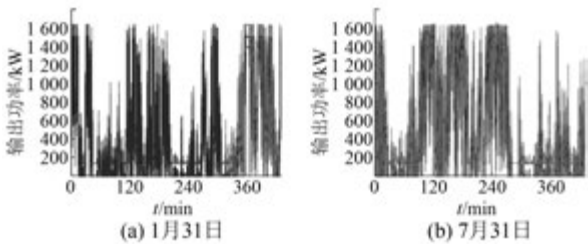


图 3 风机输出功率实测值与预测值

为了评价单个点的置信区间估计是否准确,定义:

$$\xi_i^\alpha = \begin{cases} 0 & P_i \notin [P_L^\alpha, P_H^\alpha] \\ 1 & P_i \in [P_L^\alpha, P_H^\alpha] \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\xi_i^\alpha$  表征实际输出功率是否位于概率置信区间预测范围之内,若其为 1,则表明预测结果准确,反之亦然。

采用预测区间的覆盖概率  $R_{cover}^\alpha$  评价全体的区间预测是否准确:

$$R_{cover}^\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i^\alpha \quad (5)$$

为评价单个点的置信区间估计是否有指导意义,定义:

$$\delta_i^\alpha = P_{iH}^\alpha - P_{iL}^\alpha \quad (6)$$

式中:  $\delta_i^\alpha$ ——第  $i$  个点区间预测的相对宽度。

全体置信区间预测的指导意义用区间平均宽度  $\delta_{mean}^\alpha$  表示,即

$$\delta_{mean}^\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i^\alpha \quad (7)$$

计算结果表明,未按风速划分风机输出功率偏差子集时,2107 年 1 月 31 日和 7 月 31 日区间估计的预测区间覆盖概率  $R_{cover}^{0.1}$  分别为 74.90% 和 67.45%,区间平均宽度  $\delta_{mean}^{0.1}$  分别为 247 kW 和 293 kW;按风速划分风机输出功率偏差子集后,预测区间覆盖率分别提高到 85.55% 和 74.65%,区间平均宽度分别为 283.6 kW 和 262 kW。从计算结果可以看出,基于风力条件子集的风机输出功率预测算法可以在保持区间预测精度基本不变的情况,有效地提高区间预测的可靠性。

4 结 语

(1) 风机输出功率偏差的波动范围与风速相关,较小风速和较高风速下,风机输出功率偏差波动较窄;中等风速下,风机输出功率偏差波动较宽。因此,可按风力等级将风机输出功率偏差划分成若干子集,对各子集进行概率统计分析。

(2) 实际风机历史数据的概率分析结果表明,各子集的概率分布类型主要服从 genlogistic 分布、t 分布、recipinvgauss 分布、f 分布或 norm 分布;不同子集的分布类型可能相同,也可能不同,但即使分布类型相同,特征参数也有较大差别。

(3) 与未按风速等级划分风机输出功率偏差子集相比,按风力等级划分风机输出功率偏差子集对区间预测的精度影响不大,但可有效地提高风机输出功率区间预测的可靠性。

【参 考 文 献】

[ 1 ] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等.大规模风电接入电网的相关问题及措施[ J ].中国电机工程学报,2010,30(25): 1-9.

[ 2 ] 霍现旭,李国栋,朱晓辉,等.永磁同步风电系统闭环弱磁控制研究[ J ].电机与控制应用,2016,43(1): 54-59.

[ 3 ] ABDULLAH M A, MUTTAQI K M, AGALGAONKAR A P. Sustainable energy system design with distributed renewable resources considering economic, environmental and uncertainty

- aspects[J]. Renewable Energy, 2015(78): 165-172.
- [4] 涂娟, 汤宁平. 一种新型直驱式风力发电系统控制策略[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(7): 52-56.
- [5] 刘波, 潘巧波. 大型直驱风电机组快速响应控制策略[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(11): 62-66.
- [6] GOLESTAN S, MONFARED M, FREIJEDO F D. Design-oriented study of advanced synchronous reference frame phase-locked loops [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(2): 765-778.
- [7] 王丽婕, 冬雷, 廖晓钟, 等. 基于小波分析的风电场短期发电功率预测[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 30-33.
- [8] 茆美琴, 周松林, 苏建徽. 基于脊波神经网络的短期风电功率预测[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 70-74.
- [9] 周松林, 茆美琴, 苏建徽. 风电功率短期预测及非参数区间估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 10-16.
- [10] 贾文昭, 康重庆, 李丹, 等. 基于日前风功率预测的风电消纳能力评估方法[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 69-75.
- [11] 江岳春, 张丙江, 邢方方, 等. 基于混沌时间序列 GA-VNN 模型的超短期风功率多步预测[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2160-2166.
- [12] ABBAS K, SAEID N, DOUG C. Prediction intervals for short-term wind farm power generation forecasts [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 602-610.
- [13] 杨德友, 蔡国伟. 基于因散经验模式分解与最小二乘支持向量机的风电场短期风速预测[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(3): 44-49.

收稿日期: 2018-07-11

(上接第 97 页)

- [11] 张琪, 黄苏融, 丁烜明, 等. 独立磁路混合励磁电机的多领域仿真分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 8-15.
- [12] JANG J H, CHIU H C, YAN W M, et al. Numerical study on electromagnetics and thermal cooling of a switched reluctance motor[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2015(6): 16-27.
- [13] LI W, CAO J, HUO F, et al. Numerical analysis of stator-rotor coupled transient thermal field in induction motors with blocked rotor [C] // World Automation Congress, Hawaii, IEEE, 2008: 1-6.
- [14] 杜国华, 房建成, 刘西全, 等. 高速永磁无刷直流电机的热分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(8): 1101-1105.
- [15] 陈彦锡. 45 kW 汽车用水冷电机流体场计算与冷却系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [17] 熊莉芳, 林源, 李世武.  $k-\varepsilon$  湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 工业加热(热能工程), 2007, 36(4): 13-15.

收稿日期: 2018-03-26

(上接第 103 页)

- [5] 魏岚婕. 风电并网逆变器控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(12): 100-102.
- [6] 郑怡. 基于 PR 控制的风电机组整流侧并网系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2016, 5: 1-2.
- [7] 李立成, 叶林. 变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 26-31.
- [8] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 83-89.
- [9] 叶瑞丽, 刘瑞叶, 刘建楠, 等. 直驱风电机组风电场接入后的电力系统暂态稳定计算[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 211-218.
- [10] 杨钊. 永磁直趋风力发电机组的建模及控制技术的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [11] 周飞航, 刘军. 基于状态反馈的直驱风电系统模糊控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2758-2763.
- [12] 刘忠义, 刘崇茹, 李庚银. 机械轴系模型对直驱永磁同步风力发电机暂态分析的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 145-152.
- [13] OMID A, AMIRNASER Y. A strategy for real power control in direct-drive PMSG-based wind energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1297-1305.
- [14] 黄守道, 高剑, 罗德荣. 直驱永磁风力发电机设计及并网控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.

收稿日期: 2017-12-04