

基于实测数据的风电场风速-功率模型的研究

王 钤¹, 潘险险², 陈 迎³, 杨汾艳¹, 林 俐²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;
3. 安徽省电力公司检修公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 建立准确的风电场模型是风电接入系统相关研究的基础。首先通过对某双馈风电机组的标准功率特性曲线和实测风速-功率散点图进行对比, 针对它们之间的差异问题, 建立基于实测运行数据的风电机组风速-功率模型。其次, 针对地形复杂、机组排列不规则的大型风电场风速差异性, 利用 K-means 聚类算法对风电场内所有风电机组按实测风速数据进行聚类划分, 建立了整个风电场的等效风速模型, 进而给出了基于实测运行数据的风电场风速-功率模型。然后, 以某实际风电场为例, 对该风电场内的风电机组按风速进行 K-means 聚类划分, 结果显示该划分结果与简单按地理位置的机群划分结果有明显差异。最后, 对传统的风速-功率模型和所提出的风速-功率模型输出结果进行比较, 结果证明所提出的模型相对于传统模型而言, 准确性有了较大的提高。

关键词: 风速-功率模型; 实测数据; K-means 聚类算法; 聚类划分; 风电场建模

Study of wind speed-active power model for wind farm based on measured data

WANG Qian¹, PAN Xian-xian², CHEN Ying³, YANG Fen-yan¹, LIN Li²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China;
3. Maintenance Company of Anhui Electric Power Corporation, Hefei 230000, China)

Abstract: Accurate model of the wind farm is the basis for the analysis of wind power integrating grid. Firstly, the comparison is made between the standard power characteristic curve and the measured scatter plot of wind speed-active power for DFIG. The wind speed-active power model is proposed based on the measured data. For the wind speed differences of wind turbines in large wind farm caused by complex terrain and the crew irregular arrangement, K-means clustering algorithm is used for the equivalent wind speed model of the whole wind farm. Then the wind speed-active power model of wind farm based on measured data is proposed. Taking an actual wind farm as example, K-means clustering algorithm is used to the clusters division. Result shows that the division by wind speed is different from that by location of wind turbine units. Finally, to verify the effectiveness of the new wind speed-active power model, the error comparative analysis is made between the new model and the traditional model. Result shows that the accuracy of the model is greatly improved with the proposed method.

Key words: wind speed-active power model; measured data; K-means clustering algorithm; clusters division; wind farm modeling

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0023-05

0 引言

随着能源和环境问题的日益严重, 风力发电越来越受到人们的重视^[1-2]。风力发电是目前世界上可再生新能源开发技术中, 最成熟、最具大规模开发和商业化前景的能源利用方式^[3]。随着风电机组单机容量和风电场规模的不断扩大, 风电功率波动对电

网的影响愈加显著^[4-5], 在风电并网仿真分析中, 若对每台风电机组进行详细建模将极大增加仿真的复杂度^[6], 因此风电场建模方法的研究已成为一项重要研究课题^[7-9]。风电场稳态建模的一个关键问题是构建反映风电场风速与输出功率之间关系的数学模型^[10], 即风电场的风速-功率模型。传统的风电场风速-功率模型假设所有风电机组输入风速相等或相差不大, 用单台风电机组的输出功率乘以场内机组的台数, 得到整个风电场的输出功率^[11]。然而由于

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAA02B00)

风电场内的风速分布、地形地貌、机组排列方式等诸多因素的影响,场内各机组之间的风况及其输出功率都可能存在较大差别,该方法不适用于大型风电场风速-功率建模。目前,许多学者提出基于风电场外特性建模方法^[12],主要有两种思路:第一种是通过单台风电机组风速-功率特性曲线,采用各种不同的方法得到等效的风电场风速-功率模型^[13-14]。第二种思路是直接将整个风电场作为研究对象,对风电场长期实际运行数据进行统计分析,据此构建风电场等效风速-功率模型^[10]。

本文首先通过对某双馈风电机组的标准功率特性曲线和实测风速-功率散点图进行对比,针对它们之间的差异问题,建立基于实测运行数据的风电机组风速-功率模型。然后,针对地形复杂、机组排列不规则的大型风电场风速差异性,利用K-means聚类算法对风电场内所有风电机组按实测风速数据进行聚类划分,建立整个风电场的等效风速模型,进而给出基于实测运行数据的风电场等效风速-功率模型。最后,以某实际风电场为例,并与传统的风速-功率模型输出结果进行比较,验证本文提出模型的有效性。

1 基于实测数据的风电机组风速-功率模型

传统的计算风电场输出功率的方法依赖于厂家提供的风电机组标准功率特性曲线。图1为空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 时,GE1.5 s-1500 kW双馈感应式风电机组的标准功率特性曲线。

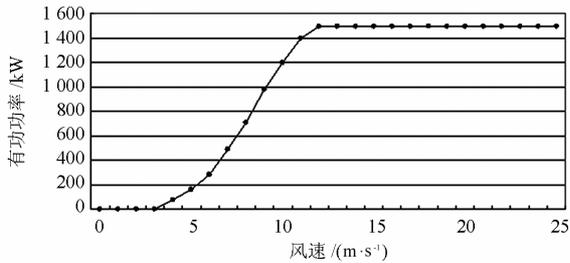


图1 GE1.5 s-1500 kW 双馈感应式风电机组标准功率特性曲线

Fig. 1 Standard power characteristic curve of GE1.5s-1500 kW DFIG

本文统计了2010年6月1日至2010年6月30日某实际风电场33台GE1.5 s~1500 kW双馈感应式风电机组的风速、有功功率运行数据,绘制成散点图,如图2所示。由该图可以看出,该风电场的风电机组并不是完全按照厂家提供的风速-功率特性曲线运行,事实上其风速-功率点分布在一个较宽的范围。

风电机组的输出功率主要取决于其所受的风速^[15],这里将风电机组看成一个输入量为风速、输

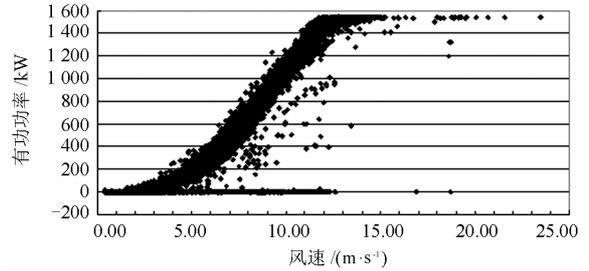


图2 GE1.5 s-1500 kW 双馈感应式风电机组实测风速-功率散点图

Fig. 2 The measured scatter plot of wind speed-active power for GE1.5s-1500 kW DFIG

出量为有功功率的二端口元件,忽略其内部特性,风电机组的风速-功率特性可以表示为

$$P = f(v) \quad (1)$$

式中: P 为风电机组输出的有功功率, kW; v 为风速, m/s。

将散点图中的风速从切入风速到切出风速划分为 s 个等宽度的区段,则每个风速区段的宽度为

$$\Delta v = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{s} \quad (2)$$

式中, v_{\min} 、 v_{\max} 分别表示切入风速和切出风速。设 $[v_{\min}, v_{\max})$ 区间段内的端点及等分点的横坐标分别为

$$v_1 = v_{\min}, v_2, v_3, \dots, v_{(i)}, \dots, v_{(s)}, v_{\max}$$

则第 i 个区间段为 $[v_{(i)}, v_{(i)} + \Delta v)$,该区间段内所有实测有功数据的平均值 $P_{i,\text{mean}}$ 和风速数据的平均值 $v_{i,\text{mean}}$ 计算为

$$P_{i,\text{mean}} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{i,j} \quad (3)$$

$$v_{i,\text{mean}} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} v_{i,j} \quad (4)$$

式中, N_i 为第 i 个区间段内实测数据的个数,其中第 j 个实测数据对应的横坐标(风速)为 $v_{i,j}$,纵坐标(有功功率)为 $P_{i,j}$,则第 i 区间段内的风速-有功均值点为 $(v_{i,\text{mean}}, P_{i,\text{mean}})$ 。

遍历所有区间,可以得到 s 个风速-有功均值点 $(v_{1,\text{mean}}, P_{1,\text{mean}}), (v_{2,\text{mean}}, P_{2,\text{mean}}), \dots, (v_{s,\text{mean}},$

$P_{s,\text{mean}}$)。将 s 个风速-有功均值点用最小二乘法进行拟合, 可以得到风电机组基于实测数据的风速-功率特性曲线。

2 基于 K-means 聚类算法的风电场等效风速-功率模型

这里采用 K-means 聚类算法对风电场内所有风电机组进行机群划分。假设风电场中风电机组共有 $n+m$ 台, 若某个时间段内有 n 台风电机组并网运行, m 台风电机组由于某些原因而与电网脱离, 则将 m 台离网的风电机组剔除, 选取风电场在该时间段内并网运行的风电机组的实测风速数据作为样本, 风速在该时段内的采样点数为 k 个。将 n 台风电机组的风速数据建立实测风速样本矩阵为

$$\mathbf{V} = (\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_n)^T = (V_{i,j})_{n \times k} = \begin{bmatrix} V_{1,1} & V_{1,2} & \dots & V_{1,k} \\ V_{2,1} & V_{2,2} & \dots & V_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{n,1} & V_{n,2} & \dots & V_{n,k} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $V_{i,j}$ 表示第 i 台风电机组在第 j 个时刻测得的风速, 把向量 \mathbf{V}_i 看作空间 \mathbf{V} 的一个样本组, 则 \mathbf{V} 中样本组数量为 n , 维数为 k 。

假设将样本组划分为 c 个类, 即 c 个机群。设聚类划分次数为 t ($t \geq 1, t \in N$), 初始时令 $t=1$, 从所有样本组中任意选择 c ($1 \leq c \leq n$) 个样本组作为 c 个类 G_p ($p=1, 2, \dots, c$) 的初始聚类中心, 即

$$\mathbf{m}_p^{(1)} = (m_{p,1}^{(1)}, m_{p,2}^{(1)}, \dots, m_{p,k}^{(1)}) = (V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,k}) \quad (p=1, 2, \dots, c) \quad (6)$$

则任意一个样本组 \mathbf{V}_i 到 c 个聚类中心的欧氏距离为

$$d(\mathbf{V}_i, \mathbf{m}_p^{(1)}) = \sqrt{\sum_{j=1}^k (V_{i,j} - m_{p,j}^{(1)})^2} \quad (p=1, 2, \dots, c) \quad (7)$$

对于任意一个样本组 \mathbf{V}_i , 总是 \exists 一个 $\mathbf{m}_p^{(1)}$ ($p=1, 2, \dots, c$) 使 $d(\mathbf{V}_i, \mathbf{m}_p^{(1)})$ 达到最小, 则将 \mathbf{V}_i 划分到类 G_p 中。

遍历完所有的样本组, 完成第 1 次聚类划分。定义聚类的平方误差总和 (此时 $t=1$) 为

$$E^{(1)} = \sum_{p=1}^c \sum_{V_i \in G_p} |V_i - \mathbf{m}_p^{(1)}|^2 \quad (8)$$

作为评估类内相似性的指标。

此时, 第 p 个机群 G_p 所含的机组数目为

$$l_p^{(1)} \quad (p=1, 2, \dots, c), \text{ 计算新的聚类中心}$$

$$\mathbf{m}_p^{(2)} = \left(\frac{1}{l_p^{(1)}} \sum_{V_i \in G_p} V_{i,1}, \frac{1}{l_p^{(1)}} \sum_{V_i \in G_p} V_{i,2}, \dots, \frac{1}{l_p^{(1)}} \sum_{V_i \in G_p} V_{i,k} \right) \quad (9)$$

$$(p=1, 2, \dots, c)$$

按上述方法进行第 2 次聚类划分。重复上述过程, 当第 t 次聚类划分时, 如果满足

$$E^{(t-1)} - E^{(t)} < \varepsilon \quad (t \geq 2, \varepsilon \text{ 为某一给定的很小正值}) \quad (10)$$

则完成聚类划分, 否则继续上述过程。设 $t=t_z$ 时完成聚类划分, 即在第 t_z 次将 n 台风电机组分别划分

进了对应的机群 G_p ($p=1, 2, \dots, c$) 中, 此时第 p 个机群 G_p 所含的机组数目为 $l_p^{(t_z)}$ ($p=1, 2, \dots, c$)。

对于第 p 个机群, 总 $\exists V_i \in G_p$ 使 $d(V_i, \mathbf{m}_p^{(t_z)})$ 达到最小, 则选取第 i 台风电机组作为第 p 个机群的典型代表机组。依次选出 c 台风电机组作为 c 个机群的典型代表机组, 将这 c 台风电机组的风速称为典型风速, 编号为 $v_{G_1}, v_{G_2}, \dots, v_{G_c}$ 。

那么可以建立风电场等效风速 v_{eq} 模型为

$$v_{eq} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^c v_{G_p} l_p^{t_z} = \sum_{p=1}^c k_p v_{G_p} \quad (11)$$

其中 $k_p = \frac{l_p^{t_z}}{n}$ ($p=1, 2, \dots, c$) 分别为各典型风速在风电场等效风速中的权重值。

以公式 (11) 计算风电场的等效风速 v_{eq} 作为风电机组的输入风速, 代入公式 (1) 即可得到整个风电场的输出功率 P_{sum} 为

$$P_{\text{sum}} = n \times P = n \times f(v_{eq}) \quad (12)$$

3 仿真实验

以某风电场二期风力发电机组的实测风速为例进行分析, 场内共有 33 台风电机组, 装机容量为 49.5 MW, 发电机轮毂高度为 70 m。该风电场场址中心经纬度为东经 114°05'49" 至 114°13'23", 北纬 41°14'59" 至 41°20'7", 该地区为东亚大陆性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。由于该风电场位于坝上丘陵地区, 所处位置有连绵不断的低矮山丘, 为了适合地势变化, 风电机组的地理平面布置

图如图 3 所示。

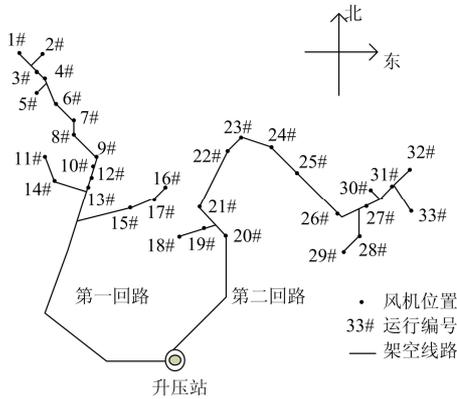


图 3 某实际风电场机组位置平面图

Fig. 3 Location plan view of wind turbine units for an actual wind farm

选取 2010 年 6 月 5 日 20:00 至 2010 年 6 月 6 日 8:00 的实测数据进行分析, 该时间段内, 1#机组停机, 对 2#机组至 33#机组按本文提出的基于 K-means 的聚类方法进行机群划分, 划分为 3 个机群, 结果如表 1 所示。

表 1 某实际风电场机群划分结果

Table 1 Clusters division result of an actual wind farm

机群号	机群内包含的风机编号
1	2#、3#、4#、12#、14#、23#、26#
2	5#、7#、8#、9#、10#、11#、13#、16#、17#、18#、19#、20#、27#、29#、31#
3	6#、15#、21#、22#、24#、25#、28#、30#、32#、33#

从表 1 可以看出, 由于地形复杂、机组排列方式不规则的大型风电场的风速分布不是均匀变化的, 地理位置相隔较近的机组也可能风速差别很大, 划分在不同的机群内, 如 26#机组与 27#机组; 而地理位置相隔较远的机组也可能由于风速变化相近, 划分在同一个机群内, 如 26#机组与 2#机组。可见按这种聚类算法划分机群的结果, 与按机组地理位置划分的结果是不同的。

进而根据上述基于 K-means 聚类算法的等效风速-功率模型得出整个风电场的输出功率, 同时将由传统的风速-功率模型得到的风电场输出功率、实际风电场输出功率表示如图 4, 分别计算传统的风速-功率模型和本文建立的等效风速-功率模型输出功率与实际功率的绝对百分比误差, 如图 5 所示。

造成风速-功率模型的不准确性有很多因素, 如湍流、风向、尾流效应和迟滞效应等。传统的风速-

功率模型的平均百分比误差为 20%、最大百分比误差为 50.38%, 均方根误差为 13.553。本文提出的等效风速-功率模型的平均百分比误差为 7.29%、最大百分比误差为 18.06%, 均方根误差为 6.104。

通过以上分析可以看出, 对于地形复杂、机组布局不规则的大型风电场, 使用本文提出的风速-功率模型比使用传统模型具有更高的准确性。

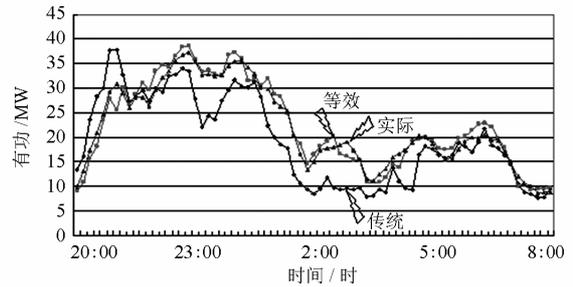


图 4 传统模型、等效模型风电场输出功率与实际输出功率对比

Fig. 4 Wind power output for the traditional model, equivalent model and the actual wind power output

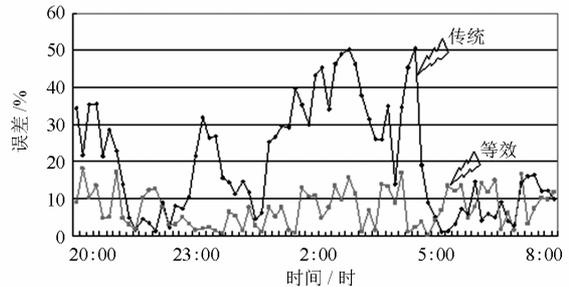


图 5 传统模型、等效模型输出功率的绝对百分比误差

Fig. 5 Absolute percentage error of the wind power output for traditional model and equivalent model

4 结语

本文针对地形复杂、机组排列不规则的大型风电场风速差异性问题, 基于 K-means 聚类算法提出了基于实测运行数据的风电场等效风速-功率模型, 并以某实际风电场为例, 验证了本文所提模型的有效性。从笔者研究来看, 可以得出: ①基于 K-means 聚类算法进行风电场机群划分与简单按地理位置划分机群的结果有明显差异, 对于地形复杂、机组排列不规则的大型风电场的机群划分更有指导意义; ②本文仅对一个月的实测数据进行分析, 若能采用更长时间的、具有相近季节变化特征的实测风速数据进行建模, 能有效提高模型的精确性。③机群数目的选择与机群划分结果、模型输出精度有重要关系, 一般可以通过风电场测风塔位置、机组地理分布来初步选

择,并通过模型输出是否满足精度要求来重新设定,相关研究笔者将在后续工作中继续展开。

参考文献

- [1] 钱少锋, 林俐, 沈辉, 等. 基于 PSS/E Wind 大型风电场并入输电网的动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 11-16.
QIAN Shao-feng, LIN Li, SHEN Hui, et al. Dynamic characteristic analysis of transmission grid including large wind farm by PSS/E wind package[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 11-16.
- [2] 洪芦诚, 石立宝, 姚良忠, 等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 116-122, 130.
HONG Lu-cheng, SHI Li-bao, YAO Liang-zhong, et al. Fuzzy modelling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 116-122, 130.
- [3] 何洵. 加快我国风力发电规模开发和利用势在必行[J]. 广东电力, 2005, 18(7): 17-18, 53.
HE Xun. Necessity of accelerating large-scale wind power development and utilization in China[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(7): 17-18, 53.
- [4] 乔嘉赓, 鲁宗相, 闵勇, 等. 风电场并网的新型实用等效方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 199-213.
QIAO Jia-geng, LU Zong-xiang, MIN Yong, et al. New dynamic equivalence method for grid-connected wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 199-213.
- [5] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD_EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 62-66.
LI Huan-ping, YANG Jin-ming. Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD_EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 62-66.
- [6] 苏勋文, 徐殿国, 卜树坡. 风速波动下风电场变参数等效建模方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 277-284.
SU Xun-wen, XU Dian-guo, BU Shu-po. Variable parameter equivalent modeling method of wind farms under wind speed fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 277-284.
- [7] 李光允, 陈小虎, 唐国庆. 大型风力发电场等效建模研究综述[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(1): 42-46.
LI Guang-yun, CHEN Xiao-hu, TANG Guo-qing. Review on equivalent modeling for large-scale wind power field[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(1): 42-46.
- [8] 孙建锋, 焦连伟, 吴俊玲, 等. 风电场发电机动态等值问题的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 58-61.
SUN Jian-feng, JIAO Lian-wei, WU Jun-ling, et al. Research on multi-machine dynamic aggregation in wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 58-61.
- [9] 曹娜, 赵海翔, 陈默子, 等. 潮流计算中风电场的等值[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 53-56.
CAO Na, ZHAO Hai-xiang, CHEN Mo-zi, et al. Equivalence method of wind farm in steady-state load flow calculation[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 53-56.
- [10] 严干贵, 李鸿博, 穆钢, 等. 基于等效风速的风电场等值建模[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(3): 13-19.
YAN Gan-gui, LI Hong-bo, MU Gang, et al. Equivalent model of wind farm by using the equivalent wind speed[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2011, 31(3): 13-19.
- [11] 余洋, 刘永光, 董胜元. 基于运行数据的风电场等效建模方法比较[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(12): 80-83.
YU Yang, LIU Yong-guang, DONG Sheng-yuan. Comparative study on wind farm equivalent modeling based on operation data[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(12): 80-83.
- [12] 范高峰, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于神经网络的风电功率预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 118-123.
FAN Gao-feng, WANG Wei-sheng, LIU Chun, et al. Artificial neural network based wind power short term prediction system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 118-123.
- [13] 郎斌斌, 穆钢, 严干贵, 等. 联网风电机组风速-功率特性曲线的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 70-74.
LANG Bin-bin, MU Gang, YAN Gan-gui, et al. Research on wind speed vs output power characteristic curve of wind power generator interconnected with power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 70-74.
- [14] 胡雅娟. 基于实测运行数据风电场整体模型的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2007.
HU Ya-juan. Research on global wind farm model based on measured operation data[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2007.
- [15] 田春箐, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51.
TIAN Chun-zheng, LI Qiong-lin, SONG Xiao-kai. Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 46-51.

收稿日期: 2013-04-28; 修回日期: 2013-06-24

作者简介:

王 铃 (1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析、新能源分析、高电压技术。E-mail: wqandwl@gmail.com