

DOI: 10.7667/PSPC150831

一种变权重风电功率最优组合预测模型

马斌¹, 张丽艳¹, 郭成²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 云南电力研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 针对单项预测方法的局限性, 利用改进的基于灰色关联度的 IOWGA 算子组合预测模型, 建立了一种风电功率最优组合预测模型, 并通过改进多种群遗传算法(MPGA)对该模型进行优化。采用 RBF 神经网络法、相似日法和支持向量机(SVM)法对预测日和预测日前一日的风电功率分别进行预测, 通过提出的最优组合预测模型及优化算法对预测日的 24 h 风电功率进行组合预测。根据云南某风电场的实测数据, 进行了实例分析。结果表明, 风电功率最优组合预测模型能够有效提高风电功率预测精度, 具有较强的实用性。

关键词: 风电功率; 最优组合预测; 对数灰关联度; IOWGA 算子; 多种群遗传算法

An optimal combination forecasting model with variable weight for wind power

MA Bin¹, ZHANG Liyan¹, GUO Cheng²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Yunnan Electrical Power Research Institute, Kunming 650217, China)

Abstract: Aiming at the limitations of single forecasting method, the improved combination prediction model based on IOWGA operator for degree of logarithm grey incidence is used to build an optimal combined forecasting model for wind power, and the model is optimized by improved multiple population genetic algorithm (MPGA) RBF neural network method, similar day method and support vector machine (SVM) method are respectively used to predict wind power for predicting daily and the day before, the optimal combined forecasting model is used to predict 24 h wind power for predicting daily. The actual example is analyzed, according to the measured data of a wind farm in Yunnan province, the results show that the optimal combined forecasting model could effectively improve the forecasting accuracy for wind power, and has stronger practicality.

Key words: wind power; optimal combination forecasting; degree of logarithm grey incidence; IOWGA operator; multiple population genetic algorithm

0 引言

当前, 无污染可再生的风力发电在世界各国得到迅速发展, 尤其在中国。风速的随机性和间歇性导致风电功率具有波动性的特点, 对风电功率进行准确预测是提高电网运行稳定性, 保障电力系统调度部门制定合理调度计划的有效途径^[1]。

目前, 国内外已经提出的风电功率及风速的预测方法主要有: 小波变换法^[2]、神经网络法^[3]、最小二乘支持向量机法^[4]、组合预测法^[5-7]等。Bates 和 Granger 于 1969 年首次提出组合预测方法^[8], 由

于该方法能够有效提高预测精度而成为目前研究的热点^[9-10]。文献[9]证明了基于灰色关联度的组合预测模型是一种有效地组合预测方法。文献[10]将 IOWGA 算子与对数关联度相结合, 提出了一种最优组合预测方法, 并通过实例分析证明了所提组合预测方法的有效性。文献[11]分析了以误差平方和为准则的基于 IOWGA 算子组合预测模型的两大缺陷, 并针对这两大缺陷提出了相应的解决方法, 但其在解决对实际中, 预测期数据未知这一缺陷时存在自相矛盾(将精度高的值作为实际值, 而精度也是通过实际值获取的)。

本文利用一种改进的基于对数灰关联度的 IOWGA 算子最优组合预测模型, 建立了风电功率最优组合预测模型。此改进在文献[11]的基础上更

基金项目: 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院资助项目(K-YN2014-028)

进一步,很好地克服了直接应用原模型时需要已知预测期数据,而实际中,预测期的数据是未知的这一缺陷。另外,本文将量子计算引入多种群遗传算法(MPGA)中,提出改进的多种群遗传算法,以对所提出的组合预测模型进行优化,获取权值。

1 基于灰关联度的 IOWGA 算子预测模型

1.1 IOWGA 算子

文献[12],提出了诱导有序加权几何平均(IOWGA)算子:

设 $(u_1, a_1), (u_2, a_2), \dots, (u_m, a_m)$ 为 m 个二维数组, $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ 是 IOWGA 算子(ϕ)的加权向量,则 IOWGA 算子为^[12]

$$\phi((u_1, a_1), (u_2, a_2), \dots, (u_m, a_m)) = \prod_{i=1}^m a_{u-index(i)}^{w_i} \quad (1)$$

式中: u_i 为 a_i 的诱导值; $u-index(i)$ 是 u_1, u_2, \dots, u_m 按降序排列的第 i 大的数的下标; $\sum_{i=1}^m w_i = 1, w_i \geq 0$ 。

式(1)表明 IOWGA 算子是诱导值按降序排列后,对所对应的 a_1, a_2, \dots, a_m 中的数进行有序加权几何平均, w_i 仅与数 a_i 的诱导值所在位置有关^[12]。

1.2 最优组合预测模型

令:

$$p_{it} = \begin{cases} 1 - |(x_t - x_{it})/x_t|, & |(x_t - x_{it})/x_t| < 1 \\ 0, & |(x_t - x_{it})/x_t| \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m, t = 1, 2, \dots, N$; x_t 是 t 时刻的实际值; x_{it} 表示 t 时刻第 i 种预测方法的预测值; p_{it} 表示 t 时刻第 i 种预测方法的预测精度,将其值看作预测值 x_{it} 的诱导值,可构成 m 个二维数组 $(p_{1t}, x_{1t}), (p_{2t}, x_{2t}), \dots, (p_{mt}, x_{mt})$ 。

设 $L = (l_1, l_2, \dots, l_m)^T$ 为各种预测方法的加权向量,将第 t 时刻预测精度序列 $p_{1t}, p_{2t}, \dots, p_{mt}$ 按降序排列,则 t 时刻的 IOWGA 算子组合预测值为

$$\hat{x}_t = \text{IOWGA}_t((p_{1t}, x_{1t}), \dots, (p_{mt}, x_{mt})) = \prod_{i=1}^m x_{p-index(it)}^{l_i} \quad (3)$$

式中, $p-index(it)$ 表示 t 时刻第 i 大预测精度的下标。

令 $e_{it} = \ln x_t - \ln x_{it}$,则第 i 种单项预测方法的对数灰关联度为^[10]

$$\gamma_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq t \leq N} |e_{it}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|}{|e_{it}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|} \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$; $\rho \in (0, 1)$ 为分辨系数,通常可

取 $\rho = 0.5$ 。

令 $e_{a-index(it)} = x_t - x_{a-index(it)}$,则 $e_t = \ln x_t - \ln \hat{x}_t = \sum_{i=1}^m l_i e_{a-index(it)}$,所以基于 IOWGA 算子组合预测值的对数灰色关联度为^[10]

$$\gamma(L) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq t \leq N} |e_{it}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|}{|e_t| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|} \quad (5)$$

由式(4),式(6)可改写成如下形式:

$$\gamma(L) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq t \leq N} |e_{it}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|}{\left| \sum_{i=1}^m l_i e_{a-index(it)} \right| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|} \quad (6)$$

综上,基于对数灰关联度的 IOWGA 算子组合预测模型可由式(3)及式(7)表示。

$$\begin{cases} \max \gamma(L) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq t \leq N} |e_{it}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|}{\left| \sum_{i=1}^m l_i e_{a-index(it)} \right| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^m l_i = 1 \\ l_i \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

记 $\gamma_{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \gamma_i$, $\gamma_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \gamma_i$ 。若 $\gamma(L) < \gamma_{\min}$,则称组合预测模型为劣性组合预测模型;若 $\gamma_{\min} < \gamma(L) < \gamma_{\max}$,则称组合预测模型为非劣性组合预测模型;若 $\gamma(L) > \gamma_{\max}$,则称组合预测模型为优性组合预测模型^[9]。上述表明,当组合预测方法的对数灰关联度大于各单项预测方法的对数灰关联度最大者时,该组合预测模型才是优性的^[10]。

2 风电场输出功率的最优组合预测模型

首先对 1.2 所述的组合预测模型进行改进,然后通过改进多种群遗传算法对该模型进行优化,进而完成风电场输出功率的最优组合预测。

2.1 改进

由文献[11]可知,1.2 所述组合预测模型有两大缺陷:(1)无法反映各个预测时刻对预测值的影响程度,即将各个预测时刻所引起的误差同等对待;(2)直接应用原模型时需要已知预测期数据,而实际中,预测期的数据是未知的。本文在文献[11]的基础上,根据风电预测这一目的,对 1.2 所述模型做如下改进。

为克服原模型将各个预测时刻所引起的误差同等对待这一缺陷,本文引进权系数 k_t 对组合预测值的对数灰关联度进行改进^[11],则式(7)可改为

$$\begin{cases} \max \gamma(\mathbf{L}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq t \leq N} |e_{it}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|}{k_i \left| \sum_{i=1}^m l_i e_{a-\text{index}(it)} \right| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq t \leq N} |e_{it}|} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^m l_i = 1 \\ l_i \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中, } k_i = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_i - x_{it}|}{\sum_{i=1}^N k_i \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_i - x_{it}|}, 0 < k_i \leq 1.$$

直接应用上述组合预测模型时需要已知预测期数据, 而实际中, 预测期的数据是未知的。为克服这一缺陷, 本文首先对预测期前一日数据进行预测, 并通过预测日前一日各单项预测数据和实际值获取预测日的预测精度及权值, 从而完成预测日风电功率的最优组合预测。

2.2 改进多种群遗传算法

多种群遗传算法虽能在一定程度上克服遗传算法不成熟收敛的缺陷, 但在优化过程中不同种群之间个体的差异性不显著, 且结果具有波动性^[13]。为使多种群遗传算法快速高效地收敛至全局, 本文构造了如图 1 所示的改进多种群遗传算法。本文引入副精华群吸收种群 1 至种群 m 的信息, 并通过迁徙算子与种群 1 至种群 m 进行信息交换, 并且其自身也执行 SGA 的相关操作, 以更加快速的收敛至最优; 精华种群用以保存种群 1 至种群 m 及副精华种群的最优个体。

为解决种群规模及多样性问题, 本文在上述改进 MPGA 基础上, 对每个种群引入量子计算, 其主要思想为^[14]: 采用量子计算中的量子比特表达种群基因; 采用量子旋转门更新各个种群, 并将种群 1 至种群 m 的最优子个体按概率作为量子旋转门的更新方向。

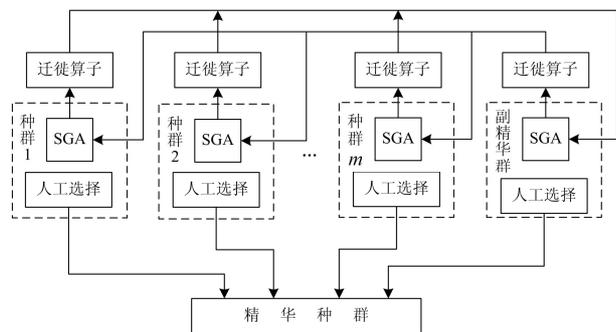


图 1 改进多种群遗传算法结构示意图

Fig. 1 Improved multiple population genetic algorithm scheme

2.3 风电功率最优组合预测

综上, 变权重风电功率最优组合预测步骤如下:

1) 利用单项预测方法分别对预测日前一日及预测日的风电功率进行预测。

2) 根据预测日前一日的预测值和实际值, 通过式(2)获得 p_{it} ; 再通过式(8)及 2.2 所述的改进多种群遗传算法得到权系数向量 \mathbf{L} 。

3) 根据预测日各单项方法的预测值, 通过式(3)完成风电功率组合预测。

4) 分别计算 $\gamma(\mathbf{L})$ 和 γ_i 的值, 取 $\max\{\gamma(\mathbf{L}), \gamma_i\}$, ($i=1, 2, \dots, m$) 所对应的预测值作为预测日的最终预测值, 即取最大对数灰关联度值所对应的预测方法为最终预测方法, 并取该方法的预测值作为最终预测值。

3 实例分析

本文选用云南某风电场的 2014 年 8 月 1 日至 8 月 31 日的 A 相实测有功功率(原采样间隔为 3 min, 现每 30 min 取一次平均值, 即每日的数据维度为 48)作为样本; 选用 RBF 神经网络法^[15]、支持向量机(SVM)法^[15]和相似日法(根据文献[16]构造的模式向量, 选取与预测日相似度最高的日期作为相似日)作为单项预测方法; 并将 8 月 31 日作为预测日。

根据 2.3 所述步骤完成预测日风电场输出功率的单一方法预测和最优组合预测。图 2 显示了改进的 MPGA 和 MPGA 对目标函数的优化记录。由图 2 可以看出改进 MPGA 在收敛速度和优化效果上都优于原 MPGA。

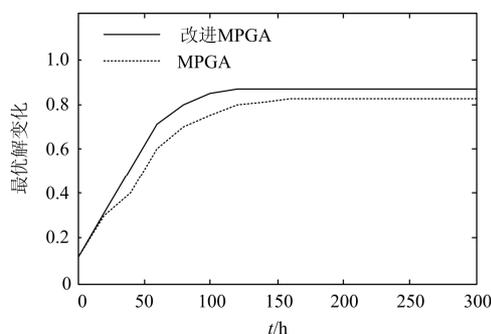


图 2 两种算法的优化记录

Fig. 2 Optimal record of two algorithms

由改进 MPGA 获得的权系数 $\mathbf{L} = (0.71, 0.20, 0.09)$; 各单项预测方法和组合预测方法的对数灰关联度值如表 1 所示; 预测日的各方法预测结果及实际值如图 3 所示; 预测日前一日的各方法预测结果及实际值如图 4 所示。

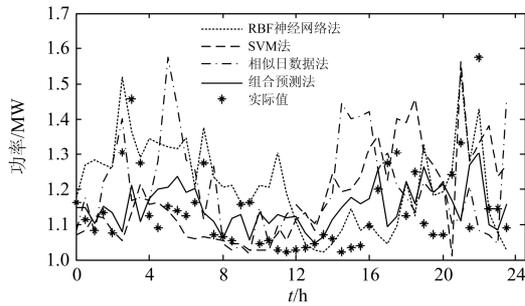


图3 预测日的预测结果

Fig. 3 Forecasting results for predicting daily

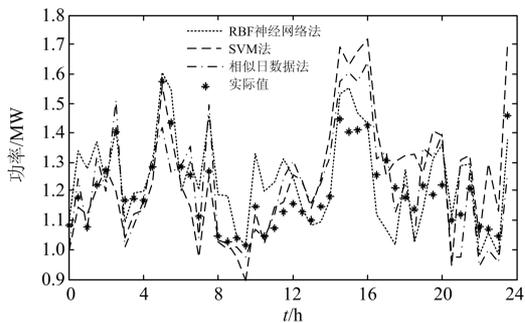


图4 预测日前一日的预测结果

Fig. 4 Forecasting results for day before predicting daily

表1 四种方法的对数灰关联度值

Table 1 Value of degree of logarithm grey incidence for four methods

方法	对数灰关联度值
RBF神经网络法	0.66
SVM法	0.61
相似日数据法	0.45
组合预测法	0.87

由表1所示,组合预测方法的对数灰关联度值为0.87,大于三种单项预测方法的对数灰关联度值,所以本次预测为优性组合预测,将组合预测值作为最终预测值。

为进一步说明组合预测方法的有效性,本文引进平均绝对误差(e_{MAPE})和均方根误差(e_{RMSE})^[17]。三种单项预测方法和组合预测方法的 e_{MAPE} 和 e_{RMSE} 如表2所示。

表2 四种方法的误差

Table 2 Error of four methods

方法	$e_{MAPE}/\%$	e_{RMSE}/MW
RBF神经网络法	10.57	0.14
SVM法	10.28	0.15
相似日数据法	13.19	0.19
组合预测法	8.03	0.11

由表2知,组合预测方法的 e_{MAPE} 和 e_{RMSE} 分别为8.05%和0.11,均小于其它三种单项预测方法的相应值,由此进一步说明了组合预测方法的有效性。

4 结论

本文基于对数灰色关联度的IOWGA算子组合预测模型,提出了一种变权重的风电功率最优组合预测模型,并将量子计算引入MPGA中,对原MPGA进行改进,以完成对组合预测模型的最优化。最后,经实例分析,表明了:(1)改进MPGA算法具有快速收敛性;(2)所提最优组合预测模型能够有效改善预测精度。

参考文献

- [1] 黄学良,刘志仁,祝瑞金,等.大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J].电工技术学报,2010,25(4):142-149.
HUANG Xueliang, LIU Zhiren, ZHU Ruijin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [2] 田中大,李树江,王艳红,等.基于小波变换的风电场短期风速组合预测[J].电工技术学报,2015,30(9):112-120.
TIAN Zhongda, LI Shujiang, WANG Yanhong, et al. Short-term wind speed combined prediction for wind farms based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 112-120.
- [3] 刘爱国,薛云涛,胡江鹭,等.基于GA优化SVM的风电功率超短期预测[J].电力系统保护与控制,2015,43(2):90-95.
LIU Aiguo, XUE Yuntao, HU Jianguo, et al. Ultra-short-term wind power prediction based on SVM optimized by GA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 90-95.
- [4] 李霄,王昕,郑益慧,等.基于改进最小二乘支持向量和预测误差校正的短期风电负荷预测[J].电力系统保护与控制,2015,43(11):63-69.
LI Xiao, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Short-term wind load forecasting based on improved LSSVM and error forecasting correction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 63-69.
- [5] 王丽婕,冬雷,高爽.基于多位置NMP与主成分分析的风电功率短期预测[J].电工技术学报,2015,30(5):79-84.
WANG Lijie, DONG Lei, GAO Shuang. Wind power short-term prediction based on principal component

- analysis of NWP of multiple locations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 79-84.
- [6] 王恺, 关少卿, 汪令祥, 等. 基于模糊信息粒化和最小二乘支持向量机的风电功率联合预测建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 26-32.
WANG Kai, GUAN Shaoqing, WANG Lingxiang, et al. A combined forecasting model for wind power prediction based on fuzzy information granulation and least squares support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 26-32.
- [7] 李玲玲, 许亚惠, 田晓越, 等. 基于组合模型的风电功率短期预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 475-480.
LI Lingling, XU Yahui, TIAN Xiaoyue, et al. Based on the combined model of short-term wind power prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 475-480.
- [8] BATES J M, GRANGER C W J. Combination of forecasts[J]. Operations Research Quarterly, 1969, 20(4): 451-468.
- [9] 陈华友, 赵佳宝, 刘春林. 基于灰色关联度的组合预测模型的性质[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(1): 130-134.
CHEN Huayou, ZHAO Jiabao, LIU Chunlin. Properties of combination forecasting model based on degree of grey incidence[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2004, 34(1): 130-134.
- [10] 周礼刚, 陈华友, 韩冰, 等. 基于对数灰关联度的 IOWGA 算子最优组合预测模型[J]. 运筹与管理, 2010, 19(6): 33-38.
ZHOU Ligang, CHEN Huayou, HAN Bing, et al. The combination forecasting model based on degree of logarithm grey incidence and induced ordered weighted geometric averaging (IOWGA) operator[J]. Operations Research and Management Science, 2010, 19(6): 33-38.
- [11] 敖培, 牟龙华. 一种改进的基于 IOWGA 算子的组合预测方法及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 53-56.
AO Pei, MU Longhua. An improved combination forecasting method based on IOWGA operator and application[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 53-56.
- [12] 陈华友, 盛昭瀚. 一类基于 IOWGA 算子的组合预测新方法[J]. 管理工程学报, 2005, 19(4): 39-42.
CHEN Huayou, SHENG Zhaohan. A kind of new combination forecasting method based on Induced ordered weighted geometric averaging (IOWGA) operator[J]. Journal of Industrial Engineering Management, 2005, 19(4): 39-42.
- [13] 余健明, 吴海峰, 杨文宇. 基于改进多种群遗传算法的配电网规划[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 36-41.
YU Jianming, WU Haifeng, YANG Wenyu. An improved poly-population genetic algorithm based power distribution network planning[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 36-41.
- [14] 田远, 穆平, 林琪. 基于量子多种群遗传算法的蛋白质二级结构预测[J]. 中国农学通报, 2013, 29(30): 166-172.
TIAN Yuan, MU Ping, LIN Qi. Prediction of protein secondary structure based on quantum multiple population genetic algorithm[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(30): 166-172.
- [15] 刘纯, 范高锋, 王伟胜, 等. 风电场输出功率的组合预测模型[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 74-79.
LIU Chun, FAN Gaofeng, WANG Weisheng, et al. A combination forecasting model for wind farm output power[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 74-79.
- [16] 蒋小亮, 蒋传文, 彭明鸿, 等. 基于时间连续性及季节周期性的风速短期组合预测方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 75-79.
JIANG Xiaoliang, JIANG Chuanwen, PENG Minghong, et al. A short-term combination wind speed forecasting method considering seasonal periodicity and time-continuity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 75-79.
- [17] 乔梁, 张露, 许懿, 等. 基于最大-最小贴近度和诱导有序加权算子的风电功率短期预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 114-121.
QIAO Liang, ZHANG Lu, XU Yi, et al. Wind power short-term forecast model based on maximum-minimum approach degree and induced ordered weighted operator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 114-121.

收稿日期: 2015-05-18; 修回日期: 2015-10-15

作者简介:

马 斌(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制及风电并网技术; E-mail: 247150729@qq.com

张丽艳(1979-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量分析与控制. E-mail: xphfy@home.swjtu.edu.cn

郭 成(1978-), 男, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为电能质量分析与控制、电力系统分析. E-mail: gc325@126.com

(编辑 张爱琴)