

基于 $\alpha\beta$ 坐标系模型的双馈风力发电机参数辨识

王红¹, 梁俊霞², 胡佳琳³

(1. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 云南电网北京能源新技术研究发展中心, 北京 100084;
3. 中国电能成套设备有限公司, 北京 100000)

摘要: 目前双馈式风力发电机(DFIG)为国内外风力发电机的主流机型。要研究大规模风电并网对电力系统可靠性和稳定性等方面产生的影响, 必须要有准确的风力发电机的模型和参数。研究了双馈风力发电机的模型参数辨识方法。首先在 Matlab/Simulink 环境中搭建了风力发电机并网的仿真模型, 得到并网的实测数据。然后选用发电机的 $\alpha\beta$ 坐标系数学模型, 在对模型进行可辨识性分析的基础上得到定子自感、定转子互感的表达式。最后利用遗传算法, 并采用分步辨识策略, 进一步辨识出转子初相位 θ_0 角、定子自感、定转子互感、转子互感等风力发电机参数。为研究大规模风电并网等课题提供了可靠的理论依据。

关键词: 双馈风力发电机; 参数辨识; 遗传算法

Doubly-fed wind power generator parameter identification based on the $\alpha\beta$ coordinate model

WANG Hong¹, LIANG Jun-xia², HU Jia-lin³

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Yunnan Power Grid Beijing New Energy Technology Research and Development Center, Beijing 100084, China;
3. China Power Complete Equipment Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: Doubly-fed wind power generator (DFIG) type is the mainstream model of the wind turbine at home and abroad at present. To study the impact on reliability and stability of power system with large-scale wind power grid, it must have accurate model and parameters of wind turbine. Therefore, this paper studies the model parameter identification method of doubly-fed wind power generator. First, in the Matlab/Simulink environment, it sets up a simulation model for the wind turbine grid-connected and gets the measured data. Afterwards, by using the generator $\alpha\beta$ coordinate system (mathematical) model, it analyzes the identifiability to illustrate the convergence for the proposed model, and then through the analysis of the mathematical model, gets an expression of stator self-inductance and the mutual inductance. Finally, the rotor initial phase angle θ_0 , stator self inductance, mutual inductance, and mutual inductance between rotor and stator can be identified by using genetic algorithm with identification strategy step by step. It provides reliable theory for the study of large-scale wind power grid.

Key words: doubly-fed wind power generator; parameter identification; genetic algorithm

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0081-05

0 引言

风电并网的技术日臻完善, 因此大量的风电场投入了商业运营^[1]。现如今, 风力发电机(WTG)的主流机型为双馈式风力发电机(DFIG)^[2]。越来越多的风力发电机组接入电网, 会对电力系统的安全稳定运行产生重大影响^[3]。风电机组参数表征其本质机理和特性, 形式表现为机组各组成部分的具体参数, 如风力发电机的电抗、电阻、时间常数、转动惯量等。要研究大规模风电接入对电网产生的影响及解决措施, 就必须要有准确的风力发电机组参数^[4]。

从双馈式风力发电机参数辨识新情况来看, 文献[5]运用最小二乘法, 研究了 2.2 kW 实验风机的三参数辨识问题, 仿真和实验验证结果具有很好的精度。文献[6]基于 LabVIEW2009 软件搭建的双馈电机参数辨识平台, 采用图形化编程语言, 实现了双馈电机的参数辨识。文献[7]运用 Matlab/Simulink 仿真工具, 给定一些参数, 对 1.5 MW 双馈风电机组故障状态进行仿真分析。

在选用风力发电机数学模型上也各有不同, 国内外研究者大多选用风力发电机的三阶、五阶暂态数学模型或者选用经坐标变换得到的 dq0 坐标系模型。 $\alpha\beta$ 坐标系与 dq0 坐标系之间有一定的角度, 当由 $\alpha\beta$ 坐标系变换到 dq0 坐标系时附加了一个角度参数, 而

辨识时这个角度参数是未知的,因此运用 $\alpha\beta$ 坐标系模型辨识要比dq0坐标系模型少辨识一个参数,辨识过程简单化。由于风力发电机的电气参数能够表征其并网后的电气特性,磁链的变化与并网后的稳定情况密不可分,因此本文只对风力发电机的电气参数进行了辨识。本文选用 $\alpha\beta$ 坐标系数学模型,对该模型参数进行可辨识性分析。由于定子自感、转子自感及定转子互感无法同时辨识,因此选用分步辨识策略^[8]。辨识算法选用遗传算法,将参数估计问题转化为参数寻优问题,在一定的范围内搜索得到最优解,得到辨识的参数。

1 DFIG 数学模型的可辨识性分析

本文中选用的是 $\alpha\beta$ 坐标系数学模型,运用此模型进行参数辨识时需要进行可辨识性分析, $\alpha\beta$ 坐标系数学模型只有在可辨识的情况下才能用于参数的辨识。

1.1 $\alpha\beta$ 磁链动态模型方程

选用定子侧的模型进行辨识,采用分步辨识策略,在定子侧参数已辨识的情况下,辨识转子侧参数。

$\alpha\beta$ 坐标定子磁链动态模型方程为

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sa} \\ -i_{sb} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sa} \\ -i_{sb} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra}' \\ i_{rb}' \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: ψ_{sa} 和 ψ_{sb} 为 $\alpha\beta$ 轴磁链,该模型中不含有转子电压分量,且 $u_{sa}, u_{sb}, i_{sa}, i_{sb}, i_{ra}', i_{rb}'$ 均为测量的瞬时值,其中 i_{ra}, i_{rb} 为由 i_{ra}', i_{rb}' 从转子侧经绕组归算到定子侧得到;式(3)中 $\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega dt$ 为转子位置, θ_0 为转子初始位置, ω 为转换为电角度的转子角速度,如果电机匀速运行,则 $\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega dt$; r_s 为定子电阻, L_s 为定子自感, L_m 为定转子互感, p 为微分算子。由于同处一个坐标系下,电感矩阵已经是常数矩阵。待辨识的参数为 r_s, L_s, L_m, θ_0 。

1.2 可辨识性分析

可辨识性是指根据所测量到的输入-输出量的动态数据,能唯一确定模型的参数^[9]。除了唯一能确定模型的参数外,还要求模型是收敛的,若模型是收敛

的且能唯一确定模型参数,则可认为所选用的模型具有可辨识性。

假设若干组 r_s, L_s, L_m, θ_0 值,根据式(1)计算每一组假设值对应的 ψ_{sa} 和 ψ_{sb} ,再根据式(2)计算该组假设值对应的 i_{ra}, i_{rb} ,反变换计算求得对应的 i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} ,与实测值 $i_{ra}', i_{rb}', i_{rc}'$ 进行比较,定义目标函数 F 为

$$F = \frac{1}{\sum_{i=1}^l (i_{rai} - i_{rai}')^2 + \sum_{i=1}^l (i_{rbi} - i_{rbi}')^2 + \sum_{i=1}^l (i_{rci} - i_{rci}')^2} \quad (4)$$

式中, l 为观测量采样点数。

如此重复上述过程,直至目标函数得到的值最大,即得到最优解。

总之,进行 $\alpha\beta$ 坐标系数学模型可辨识性分析,就是分析在一组 r_s, L_s, L_m, θ_0 数值时,其中一个量发生变化,分析目标函数值的变化情况。该分析的意义在于判断目标函数是不是具有收敛性。

假设一组参数,如表1所示,以此参数结合模型方程,求式(4)的20 000个点的目标函数值。分别对表中 r_s, L_s, L_m, θ_0 这四个参数值进行单一变化,无论偏差大小,观看目标函数的大小,参数单一变化后,目标函数值如表1所示。

表1 参数变化引起目标函数收敛性变化值

Table 1 Value of objective function convergence due to parameters change

参数	变化情况	目标函数值
r_s (设定值为 0.023)	降低1%	24.228 1
	降低5%	16.572 0
	降低10%	10.647 2
	增加1%	24.122 8
	增加5%	16.197 0
	增加10%	10.624 3
L_s (设定值为 0.18)	降低1%	19.684 21
	降低5%	16.617 9
	降低10%	15.471 2
	增加1%	19.954 3
	增加5%	16.417 9
	增加10%	15.942 6
L_m (设定值为 2.9)	降低1%	19.615 5
	降低5%	16.319 8
	降低10%	14.946 8
	增加1%	18.731 6
	增加5%	14.971 6
	增加10%	12.718 2
θ_0 (设定值为 200°)	降低1%	15.605 5
	降低5%	14.559 5
	降低10%	12.034 6
	增加1%	16.067 5
	增加5%	14.856 7
	增加10%	12.031

从表中的数据可以看出, 无论参数降低多少, 目标函数值 F 的变化呈现了明显的单调特性, 参数增加也亦如此。符合辨识搜索的收敛性要求, 说明参数可辨识。

2 改进的遗传算法

遗传算法(GA)是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法, 非常适用于处理传统搜索算法难以解决的复杂和非线性优化问题。它是根据适应度的好坏从上一代中选择一定数量的优秀个体, 通过交叉、变异形成下一代群体。经过若干代的进化之后, 算法收敛于最好的染色体, 即是问题的最优解或次优解^[10]。

确定编码策略是设计遗传算法的首要任务, 不仅影响交叉算子、变异算子等的运算方法, 而且与遗传算法收敛性及算法精度有密切的关系。二进制编码方式的编码、解码简单, 交叉、变异等遗传操作也易于实现。但是, 算法运行时需要进行编码和解码操作, 使得算法效率下降; 求解连续参数问题时, 二进制编码方式会产生编码和解码误差, 从而降低算法计算精度; 若要提高算法精度则必须加长码串, 这使得算法效率更加低; 而对于多维、高精度优化问题往往需要加长码串, 由此则造成计算量过大和“早熟”现象, 不利于反映所要求解问题的特性, 在进行数值优化时精度难以达到。

因此本文针对遗传算法的这一局限性, 对遗传算法的编码方式及求解过程进行了改进, 采用了实数编码的遗传算法, 不存在编码和解码的过程, 能大大提高算法的收敛速度和解的精度, 便于进行大范围搜索。另外, 在一次迭代循环的基础上加了 20 次大循环, 每次迭代得到的最好染色体作为下一次大循环的初始种群, 直至满足精度从而跳出大循环, 迭代结束, 得到极值。

3 双馈式风力发电机参数辨识

根据搭建的仿真模型得到辨识所需要的输入输出数据, 对选用的 $\alpha\beta$ 坐标系数学模型方程进行分析, 得到待辨识参数的数学表达式, 进而构造目标函数, 代入算法中进行搜索, 将参数辨识问题转化为参数寻优求解问题, 利用改进的遗传算法的全局寻优特性, 得到辨识参数的最优解。

3.1 测量数据的获取

根据文献[11], 设定 1.5 MW, 690 V 的风机参数(标么值)为: $r_s = 0.023$, $r_r = 0.016$, $L_s = 0.18$, $L_r = 0.16$, $L_m = 2.9$ 。将其与电网并网得到定子侧三相电压电流, 转子侧三相电压电流值。根据坐标变换, 将定子侧与转子侧三相电压电流变换到 $\alpha\beta$ 坐标系下, 得到辨识所需要的电压电流测量值。搭建的仿真模型如图 1 所示。

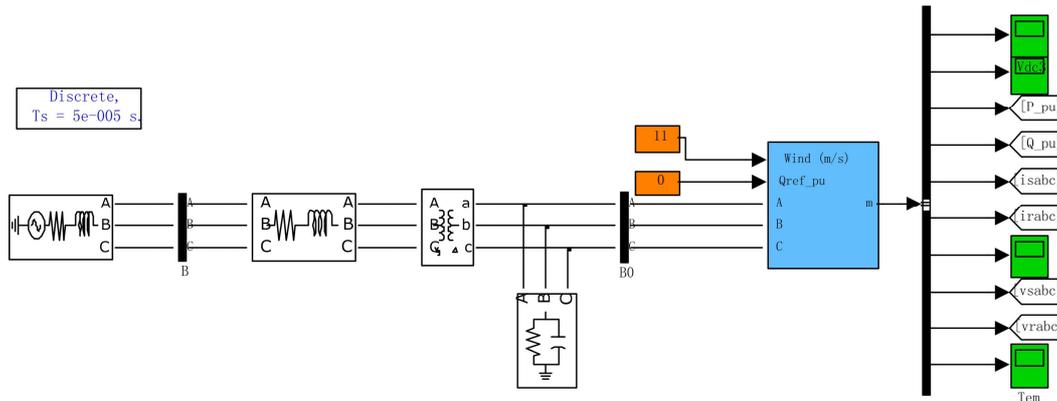


图 1 风机并网仿真图

Fig. 1 Wind turbine grid-connected simulation

3.2 待辨识参数分析

将式 (2) 变形得到

$$\begin{cases} \psi_a = -L_s i_{sa} + L_m i_{ra} \\ \psi_\beta = -L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \end{cases} \quad (5)$$

再将其进一步分解, 得到式 (6)。

$$\begin{cases} \psi_{sa} = \psi_s \cos(\omega t + \sigma_0) = \\ \quad -L_s I_{sa} \cos(\omega t + \delta_0) + L_m I_{ra} \cos(\omega t + \rho_0) \\ \psi_{s\beta} = \psi_s \sin(\omega t + \sigma_0) = \\ \quad -L_s I_{s\beta} \sin(\omega t + \delta_0) + L_m I_{r\beta} \sin(\omega t + \rho_0) \end{cases} \quad (6)$$

由式 (1), r_s 已知, 根据测到的电压电流瞬时

值可以得到 ψ_{sa} 和 ψ_{sb} ，经快速傅里叶变换(FFT)就可以得到其幅值和相角，则 ψ_s 和 σ_0 可求，定子电流经 FFT 后， $I_{sa\beta}$ 、 δ_0 可求， $I_{ra\beta}$ 是由原转子电流幅值旋转而来，即进行绕组归算后的值。进一步分析得

$$\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_0) & -\sin(\omega t + \theta_0) \\ \sin(\omega t + \theta_0) & \cos(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra'} \\ i_{rb'} \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据式 (6)，求解得

$$\begin{cases} L_s = \frac{[\psi \cos \sigma_0]/[I_{ra\beta} \cos \rho_0] - [\psi \sin \sigma_0]/[I_{ra\beta} \sin \rho_0]}{[I_{sa\beta} \sin \delta_0]/[I_{ra\beta} \sin \rho_0] - [I_{sa\beta} \cos \delta_0]/[I_{ra\beta} \cos \rho_0]} \\ L_m = \frac{[\psi \cos \sigma_0]/[I_{sa\beta} \cos \delta_0] - [\psi \sin \sigma_0]/[I_{sa\beta} \sin \delta_0]}{[I_{ra\beta} \cos \rho_0]/[I_{sa\beta} \cos \delta_0] - [I_{ra\beta} \sin \rho_0]/[I_{sa\beta} \sin \delta_0]} \end{cases} \quad (8)$$

将式 (8) 得到的值代入式 (5) 中发现只有一个未知量即 ρ_0 ，根据转子电流变换到定子侧的式 (7) 知，如果要求 ρ_0 ，必须求出 θ_0 的值。因此整个辨识过程就可以看作只有一个变量参数 θ_0 。

3.3 构建目标函数

针对每一个测点，式 (5) ~ 式 (8) 都应该成立，可选择定子电流作为比较量，代入 L_s 、 L_m 、 θ_0 到式 (9) 求电流。

$$\begin{cases} i_{sap} = (L_m i_{ra} - \psi_a) / L_s \\ i_{sbp} = (L_m i_{rb} - \psi_b) / L_s \end{cases} \quad (9)$$

目标函数值 T 为

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^j [(i_{sap} - i_{sai})^2 + (i_{sbip} - i_{sbi})^2]} \quad (10)$$

式中，带 p 的量为辨识过程的计算量，其他量为根据实测量的计算量， T 越大，表明 θ_0 值越接近目标真值。

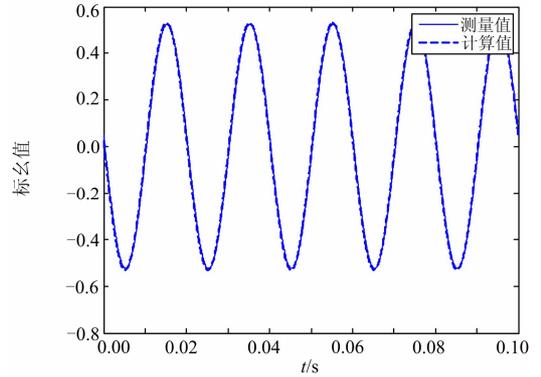
3.4 改进的遗传算法参数辨识

由于辨识过程中只有一个未知量 θ_0 ，且未知量 θ_0 的搜索范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ，搜索范围大，因此运用改进的遗传算法对其进行分段搜索，很快就可以求得最优值 $\theta_0 = 209.89^\circ$ 。将 $\theta_0 = 209.89^\circ$ 代入式 (7) 和式 (8) 中，得到 L_s 、 L_m 的辨识结果如表 2 所示。由算法得到的 i_{sap} 与测量变换得到的 i_{sa} 波形的比较图如图 2 所示。

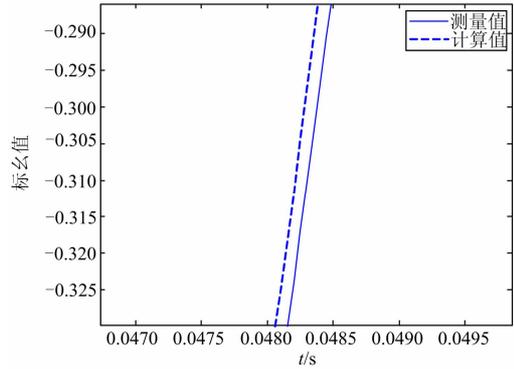
表2 定子侧参数辨识值

Table 2 Parameter identification value of stator side

参数	真实值	辨识值	相对误差/%
L_s	0.18	0.1704	5.33
L_m	2.9	2.764	4.690



(a) i_{sap} 和 i_{sa} 的波形比较图



(b) a图的局部放大图

图 2 i_{sap} 和 i_{sa} 的波形图和局部放大图

Fig. 2 i_{sap} and i_{sa} the waveform of figure and local amplification figure

由于转子电压的波形为方波并非正弦波，幅值和相角不能经 FFT 得到，因此利用已辨识出来的定子侧的参数，对转子侧参数进行辨识。

$$\begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \psi_{ra} = -L_m i_{sa} + L_r i_{ra} \\ \psi_{rb} = -L_m i_{sb} + L_r i_{rb} \end{cases} \quad (12)$$

上述式 (11) 和式 (12) 中只有一个 L_r 是未知量，需要辨识。将得到的数据代入式 (12) 中，得到辨识过程中的 L_r 如表 3 所示。

表3 转子侧参数辨识值

Table 3 Parameter identification value of rotor side

参数	真实值	辨识值	相对误差/%
L_r	0.16	0.1497	6.4375

综上所述，利用参数辨识算法得到的参数与其真实值比较，误差在一定的范围内，因此经过算法辨识出来的双馈式风力发电机的参数能够有效地表示其真实参数。

4 结论

双馈式风力发电机的参数辨识算例分析结果显示, 本文选用的 $\alpha\beta$ 坐标系模型用于辨识风力发电机的稳态参数是可行的。在辨识之前需要进行可辨识性分析, 只有在目标评价函数收敛的情况下, 参数才可以唯一被辨识。在辨识参数的过程中, 通过变换和分解 $\alpha\beta$ 磁链动态模型方程, 得到被辨识参数的方程表达式, 进而得到求解其他参数的关键参数 θ_0 , 由于 θ_0 的范围很大, 因此采用了分段搜索, 进而辨识出所需要的各个参数。根据相对误差, 可以看出所辨识出的参数是正确的, 所选用的模型和辨识算法也是可行的。

参考文献

- [1] 田春箐. 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, 33(6): 11-13.
TIAN Chun-zheng. Modeling of wind farms connected to the grid and its impact on the stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2009, 33(6): 11-13.
- [2] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 54-56.
MI Zeng-qiang, SU Xun-wen, YANG Qi-xun, et al. Characterization of multi-machine dynamic equivalent model in wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 54-56.
- [3] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 继电器, 2007, 31(20): 16-23.
HE Shi-en, DONG Xin-zhou. Off-grid cause analysis and countermeasures in wind turbines[J]. Relay, 2007, 31(20): 16-23.
- [4] 马祎炜, 俞俊杰, 吴国祥, 等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 70-74.
MA Yi-wei, YU Jun-jie, WU Guo-xiang, et al. Maximum power point tracking control strategy in double-fed wind power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 70-74.
- [5] SENJYU T, YASUTAKA O, YONA A, et al. Parameter identification of wind turbine for maximum power point tracking control[C] // Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea, 2007: 248-252.
- [6] DORIGO M, BIRATTARI M, STUTZLE T. Ant colony optimization[J]. Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(4): 28-39.
- [7] 庄哲民, 殷国华, 李芬兰, 等. 基于小波神经网络的风力发电机故障诊断[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 29-31.
ZHUANG Zhe-min, YIN Guo-hua, LI Fen-lan, et al. Wind turbine fault diagnosis based on wavelet neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 29-31.
- [8] 潘学萍, 鞠平, 徐倩, 等. 双馈风力发电机参数分步辨识及观测量的选择[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 71-78.
PAN Xue-ping, JU Ping, XU Qian, et al. Parameters step identification and selection of observables in DFIG[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 71-78.
- [9] 鞠平. 电力系统非线性辨识[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
JU Ping. Nonlinear identification of electric power systems[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1999.
- [10] 李辉, 王荷生, 史旭阳, 等. 基于遗传算法的风电场等值模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 35(8): 34-36.
LI Hui, WANG He-sheng, SHI Xu-yang, et al. Research on wind farms equivalent model based on genetic algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2011, 35(8): 34-36.
- [11] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, JENKINS N. Comparison of 5th order and 3th order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines[J]. IEEE Electric Power Systems Research, 2003, 67(3): 207-215.

收稿日期: 2014-01-13; 修回日期: 2014-05-12

作者简介:

王红(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为含大规模新能源的电力系统参数辨识; E-mail: wanghong365@126.com

梁俊霞(1982-), 女, 工程师, 研究方向为新能源技术;

胡佳琳(1986-), 女, 工程师, 研究方向为新能源发电技术。