

## 基于实测 PMU 数据的风电综合负荷参数辨识

季文伟<sup>1</sup>, 王茂海<sup>2</sup>, 马平<sup>1</sup>, 吴新振<sup>1</sup>

(1. 青岛大学电气工程系, 山东 青岛 266071; 2. 国家电网华北电力调控分中心, 北京 100053)

**摘要:** 根据配网侧负荷特点, 构建含风力发电机的综合负荷数学模型。以实测 PMU 数据为基础, 利用总体测辨法进行模型参数辨识。将负荷节点输入电压和负荷模型参数代入数学模型, 通过改进 Euler 法求解模型的状态方程, 得出负荷节点电流, 将其与实测电流误差加权最小作为目标函数, 采用遗传算法辨识出负荷模型的参数。以华北电网某线路实测 PMU 数据为依据, 辨识出考虑风电综合负荷的模型参数。辨识结果体现了负荷中以双馈异步发电机为主体的特征, 与负荷特点相吻合, 由此说明了辨识方法的有效性与辨识结果的合理性。

**关键词:** 综合负荷模型; 总体测辨法; PMU 数据; 参数辨识; 遗传算法

### Wind power comprehensive load parameter identification based on PMU data

Ji Wenwei<sup>1</sup>, Wang Maohai<sup>2</sup>, Ma Ping<sup>1</sup>, Wu Xinzhen<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. North China Branch of State Grid Power Dispatch & Control Center, Beijing 100053, China)

**Abstract:** The comprehensive load model with wind power generation involved is established based on the load model of distribution network. The overall measuring identification method is then used for parameter identification with measured node voltages. Substituting the node voltage into mathematical model of load, the corresponding current can be calculated through solving its state equation with improved Euler method. The weighted error between measured and calculated currents is selected as the objective function, which can be solved with the genetic algorithm to determine the parameters of the load model. Given measured PMU data from north China power grid, parameters of comprehensive load model are identified with the method proposed above considering wind power generation. The identified results reflect that the main part of load are double fed induction generators for wind power generation, which is in good agreement with the characteristic of load and verifies both the validity of identification method and rationality of identification results.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corp of China (No. 52011013508K).

**Key words:** comprehensive load model; overall measuring identification method; PMU data; parameter identification; genetic algorithm

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)18-0042-06

## 0 引言

为实现区域电网互为备用、紧急事故支援、促进电力市场开发等联网效益, 电网规模在不断扩大且伴随着新能源利用步伐的加快, 对电力系统建模又提出了新的要求。作为电力系统模型中最难把握的负荷建模, 模型及其参数对电力系统的设计、分析与控制影响甚大<sup>[1-4]</sup>。因此, 辨识电力系统负荷模型的参数是电力系统运行、分析与控制领域重要的研究课题。

随着智能电网应用的逐步开展, 利用广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)进行系统运行PMU数据的实时采集与传送, 为智能电网在线实时仿真计算提供了准确反映系统实际运行情况原始信息, 基于WAMS系统的实测PMU数据, 采用总体测辨法进行负荷模型的参数辨识正好能满足这种要求。从理论上说, 利用PMU数据辨识负荷模型的参数能直接计及不同负荷在运行中所受多种因素的影响, 对推动广义负荷建模研究具有重要意义, 从应用上讲, 准确的模型参数提高了分析电力系统运行状态的准确性, 为运行人员的科学决策提供了依据, 是电力系统安全运行的重要保障<sup>[5-11]</sup>。

基金项目: 国家电网公司科技项目(52011013508K)

本文先采用遗传算法<sup>[12]</sup>通过实测 PMU 数据对负荷模型进行参数辨识。首先构建含双馈异步风力发电机的机理性综合负荷模型, 以负荷节点电流计算值与实测值误差加权最小作为目标函数, 然后利用总体测辨法进行参数辨识。以华北电网某线路实测 PMU 数据为依据, 辨识考虑风电综合负荷的模型参数, 以验证辨识方法的有效性, 并对辨识结果合理性作出判断。

## 1 电力负荷模型

由于负荷模型结构中 110 kV 母线下只有等值静态负荷和等值异步电机负荷, 所以电力系统的综合负荷模型是按一定比例的静态负荷和动态负荷的组合, 其中考虑了配电网对模型的影响<sup>[13-14]</sup>。

### 1.1 模型结构

机理动态负荷模型的结构如图1所示。

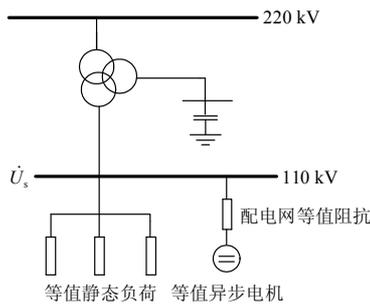


图1 传统模型结构

Fig. 1 Traditional model

在等值异步电机中, 由于配电网的等值阻抗实际上并不直接考虑, 而是加在电机的等值定子阻抗上。在计算中电机采用三阶等值电路模型, 如图2所示。

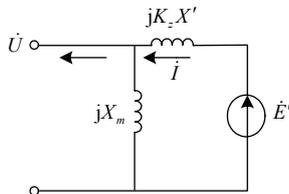


图2 异步电机暂态等值电路

Fig. 2 Transient equivalent-circuit of induction machine

$$\frac{ds}{dt} = \frac{T_M - T_E}{T_J} \quad (1)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{[-K_z(X - X')I_q + T'_{do}E'_q s - E'_d]}{T'_{do}} \quad (2)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{[-K_z(X - X')I_d - T'_{do}E'_d s - E'_q]}{T'_{do}} \quad (3)$$

其中, 机械负载力矩由式(4)确定。

$$T_M = K_L [\alpha + (1 - \alpha)(1 - s)^p] \quad (4)$$

电磁力矩方程为

$$T_E = -(E'_d I_d + E'_q I_q) K_p \quad (5)$$

$$\begin{cases} X' = X_s + \frac{X_r X_m}{X_s + X_m} \\ X = X_s + X_m \\ X_m = T'_{do} R_r - X_r \end{cases} \quad (6)$$

电机定子电流与电压的关系为

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(E'_q - U_q)] \\ I_q = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(E'_d - U_d)] \end{cases} \quad (7)$$

在等值静态负荷中, 功率方程为

$$\begin{cases} P_s = P_{s0}(U/U_0)^{P_v} \\ Q_s = Q_{s0}(U/U_0)^{Q_v} \end{cases} \quad (8)$$

### 1.2 模型参数

考虑风力发电的综合负荷包括等值异步电机和静态负荷两部分, 根据对电机数学模型描述, 待确定的参数有: 定子电抗  $X_s$ ; 转子初始滑差  $s_0$ ; 电机负荷的比例  $P_{MP}$ ; 定子电阻  $R_s$ ; 转子电抗  $X_r$ ; 转子电阻  $R_r$ ; 定转子互感抗  $X_m$ ; 转子惯性时间常数  $T_J$ ; 与转速有关的阻力矩的方次  $P$ ; 与转速无关的阻力矩系数  $a$ 。对于静态负荷采用恒阻抗模型, 在不考虑频率特性的情况下, 用指数形式来描述, 包括有功电压特性参数  $P_v$  和无功电压特性参数  $Q_v$ , 这样综合负荷模型中共有 12 个独立参数待确定。

### 1.3 计及风力发电机负荷的特点

本文主要考虑加入双馈异步风力发电机的电力系统进行负荷建模, 通过对该系统进行结构分析可知, 双馈异步发电机与异步电动机的组合可以用异步电机来等效描述。加入异步发电机只是改变负荷模型中的滑差  $s$ , 其可正可负, 当转差率  $s > 0$  时, 异步电机工作在电动机状态; 当  $s < 0$  时, 异步电机工作在发电机状态。采用电动机惯例的异步发电机和异步电动机在数学描述上有相同的形式, 其 3 阶暂态微分方程如式(2)和式(3)来表示。

在异步电动机并联静态负荷的传统负荷模型的基础上, 文献[15]把风力发电机看成一个功率消耗为负的动态负荷, 将异步发电机和异步电动机统一

等效为异步电机，这样就用异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型结构来描述含风力发电的配电网综合负荷特性，文献[16]已经论证了该等值方法的合理性。综合负荷模型结构如图3所示。

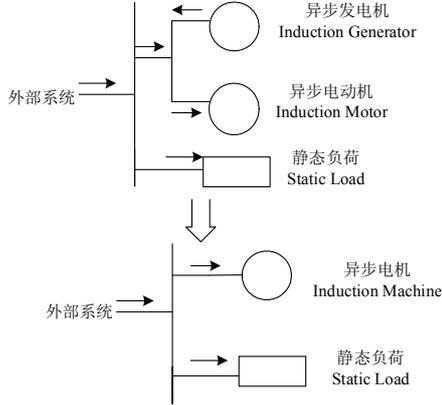


图3 考虑风力发电的综合负荷模型

Fig. 3 Comprehensive load model including wind generation

在目前的风力发电场中，风力发电机通常为变速发电机，如本文研究所涉及的变速恒频双馈异步发电机。风力发电机速度变化与风能大小、即所发出的电量大小相关，体现为综合负荷模型中参数不同，根据不同情况下 PMU 的数据，即可辨识出不同的参数。因此，本文所采用的综合负荷模型能有效考虑发电机转速变化的情况。

## 2 负荷模型参数辨识过程

负荷参数辨识和一般系统的参数辨识基本相似。在建立负荷模型后，选取合适的量测量作为输入，通过特定的优化方法寻找一组参数，使得经过模型计算得到的输出量和实际输出量误差最小，此时对应的参数就是辨识出的参数<sup>[17]</sup>。

### 2.1 相量坐标变换

实测 PMU 原始数据是有效值与相角，在使用数学模型之前，首先要进行坐标变换<sup>[18]</sup>。电压相量变换为电压直轴分量  $U_d$  与交轴分量  $U_q$ ；电流相量变换为电流直轴分量  $I_d$  与交轴分量  $I_q$ 。

### 2.2 微分方程求解

在确立配网侧负荷的数学模型结构后，将负荷节点输入电压和待辨识参数代入数学模型，通过改进 Euler 法求解式(1)~式(3)组成微分状态方程组。解微分方程组之前方程式(2)、式(3)中的电流要根据式(7)转化为电压表达式。

### 2.3 目标函数构建

将节点电压作为已知量输入，将电流作为输出量，通过状态变量与式(7)计算出电流值与实测电流

值进行比较，以二者的误差最小作为目标函数，辨识出综合负荷模型的参数。

负荷模型优化目标函数可简写成

$$J = \sum_{k=1}^N [I(k) - I_m(k)]^T W(k) [I(k) - I_m(k)] \quad (9)$$

式中： $I(k)$ 为  $k$  时刻电流计算值； $I_m(k)$ 为  $k$  时刻电流测量值； $W(k)$ 为加权矩阵。

## 2.4 模型的初始化计算

在已知负荷母线初始电压  $U_0$ 、电机初始有功负荷  $P_{M0}$  ( $P_{M0} = P_0 - P_{MP}$ )、负荷母线上的总功率  $P_0$  及其他参数的情况下，模型的初始化基本公式为

$$K_z = -\frac{C_I U_0^2}{P_{M0} X'} \quad (10)$$

$$K_p = \frac{P_{M0}^*}{P_{M0}} \quad (11)$$

$$K_L = \frac{P_{M0}^*}{\alpha + (1 - \alpha)(1 - s_0)^P} \quad (12)$$

静态负荷的初始功率  $P_{s0}$ 、 $Q_{s0}$  为

$$\begin{cases} P_{s0} = P_0 - P_{M0} \\ Q_{s0} = Q_0 - Q_{M0} \end{cases} \quad (13)$$

上述所有公式中的变量与参数的物理意义参见文献[14]。

## 3 负荷模型参数辨识结果

针对华北电网某负荷节点的模型参数进行辨识。以该节点实测 PMU 的正序电压为输入量，以正序电流为输出量，对模型的参数进行辨识。

通过灵敏度分析发现，在前述待辨识的 12 个参数中， $X_s$ 、 $s_0$ 、 $P_{MP}$  的参数灵敏度较大，其他 9 个参数的灵敏度较小。在进行实际的参数辨识时，只辨识  $X_s$ 、 $s_0$ 、 $P_{MP}$  这 3 个参数，其他 9 个参数取典型值，这样既不影响辨识效果，又能减少程序运算时间。

应用华北电网御道口/御桥线 5 个不同时段的实测 PMU 数据进行参数辨识，其中时段 1 的标幺值电压量波形如图 4 所示。在含风力发电机的综合负荷模型中，根据辨识参数特点，其中重点辨识参数的初始搜索范围为： $X_s$  取 0.1~0.3， $s_0$  取 -0.08~0， $P_{MP}$  取 1~8。表 1 列出了 5 个不同时段参数的典型值与根据 PMU 数据所得辨识值，从表 1 中可以看出，在同一条母线上，不同时段内辨识出的结果比较平稳。对  $P_{MP}$  而言，因为该母线上安装大量双馈异步风力发电机，致使该母线不需要系统向它输送有功，相反还可以向系统倒送功率，即该母线输入负的有功功率，而所接静态负荷与输入有功功率绝

对值相比较小, 使得  $P_{MP}$  略大于 1。定子阻抗  $X_s$  的范围为 0.128 0~0.142 9, 比电科院推荐的值 0.18 略小, 与目前配电网结构有较大改善致使等效定子

电抗有所下降的情况相符。转子的初始滑差范围为 -0.076 6~-0.042 3, 平均值为 -0.056 0, 这说明该母线下异步风力发电机容量所占比例很高。

表 1 实测算例参数的典型值与辨识值

Table 1 Typical and identification values of the measured example

参数名称	$X_s$	$s_0$	$P_{MP}$	$R_s$	$X_r$	$R_r$	$X_m$	$T_j$	$P$	$a$	$P_v$	$Q_v$
典型值	0.180 0	-0.050 0	1.100	0	0.12	0.02	3.5	2	2	0.15	2	2
时段 1	0.134 9	-0.066 0	1.080	0	0.12	0.02	3.5	2	2	0.15	2	2
时段 2	0.128 0	-0.076 6	1.085	0	0.12	0.02	3.5	2	2	0.15	2	2
时段 3	0.142 9	-0.042 8	1.124	0	0.12	0.02	3.5	2	2	0.15	2	2
时段 4	0.130 4	-0.042 3	1.170	0	0.12	0.02	3.5	2	2	0.15	2	2
时段 5	0.129 8	-0.052 2	1.158	0	0.12	0.02	3.5	2	2	0.15	2	2

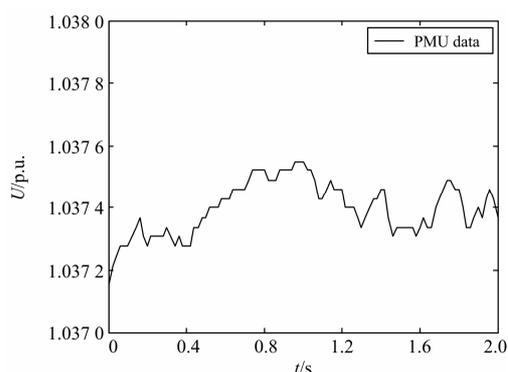


图 4 实测 PMU 电压波形

Fig. 4 Waveform of measured PMU voltage

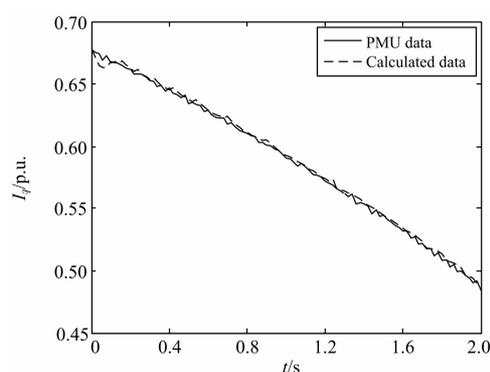


图 6 q 轴电流拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of q-axis current

为分析方便起见, 下面各图均对应于时段 1。从图 5、图 6 的辨识结果可以看出, 在实例中电流的计算值与实测值吻合度较高, 其辨识结果理想, 验证了所采用目标函数的有效性。

由图 4~图 6 所示的电压和电流可以求解出有功和无功功率在各个时段的计算与实测值, 曲线如图 7、图 8 所示。

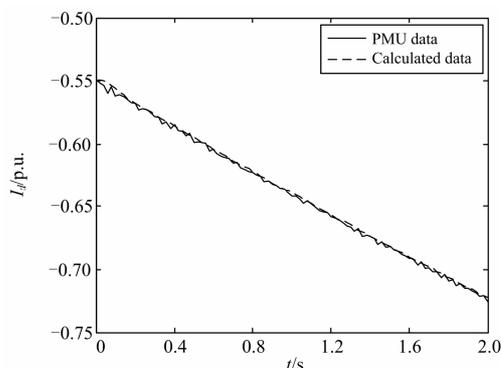


图 5 d 轴电流拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of d-axis current

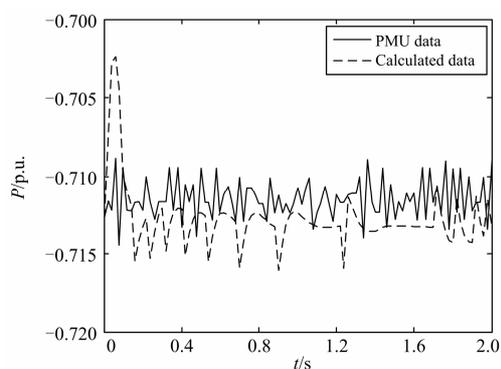


图 7 有功功率拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of active power

从图 7、图 8 的辨识结果可以看出有功功率和无功功率吻合稍有误差。有功功率的拟合误差范围为 0~0.005 69, 平均误差为 0.001 74; 无功功率的拟合误差范围为 0~0.004 67, 平均误差为 0.001 53。其误差原因如下: 1) 辨识理论要求辨识的起始点是稳定平衡点, 但实际的运行系统很难找到真正的稳定平衡点; 2) 负荷虽然当成恒定情况考虑, 但在实

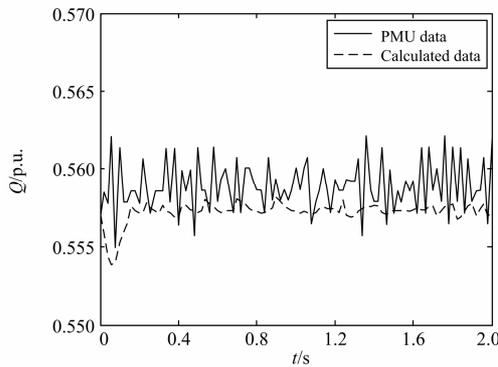


图 8 无功功率拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of reactive power

际运行中存在随机的小扰动，系统中没有真正的恒定负荷；3) 节点综合负荷模型的参数本身具有时变性，而进行参数辨识时认为参数在该时段保持不变；4) 实际电网中 PMU 装置所测的数据本身有误差。

由以上分析可知，综合负荷参数辨识结果的误差较小，产生误差的原因清楚，表明了参数辨识方案的合理性。

#### 4 结论

以并联的等值异步电机负荷与静态阻抗负荷为基本结构，建立了含双馈异步风力发电机的机理性综合负荷模型。负荷模型中滑差为负体现了负荷含有异步风力发电机的特点，此种综合负荷建模方法能有效反映风力发电电力系统的实际运行状况。

根据实测 PMU 数据并采用总体测辨法对综合负荷模型进行参数辨识，最终辨识出灵敏度较大的 3 个参数，这样既不影响辨识效果，又能减少程序运算时间。

以计算电流值和相应实测电流值二者误差加权最小作为目标函数，利用优化算法中的遗传算法进行程序编程。根据华北电网御道口/御桥线 5 个不同时段实测 PMU 数据，辨识出考虑风力发电综合负荷模型的参数，辨识结果体现了负荷中以双馈异步发电机为主体的特征。负荷模型中主要参数辨识结果符合实际运行状况，以辨识参数为基础的电、功率等变量的计算值与实测值相互吻合，都说明了所用辨识方法的有效性与准确度。

#### 参考文献

[1] 余一平, 张骥, 鞠平. 电力系统中发电机和负荷参数同时辨识的可行性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 97-101.  
YU Yiping, ZHANG Ji, JU Ping. Feasibility studies on simultaneous identification of parameters of generators

and loads in power systems[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 97-101.

- [2] 黄玉龙, 陈迅, 刘明波, 等. 动态负荷模型参数辨识的微分进化算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 270-277.  
HUANG Yulong, CHEN Xun, LIU Mingbo, et al. Differential evolution algorithm for dynamic load model parameter identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 270-277.
- [3] 杨强, 郝文斌, 洪行旅, 等. 考虑负荷时变性和动态补偿的电力系统负荷建模[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 17-21.  
YANG Qiang, HAO Wenbin, HONG Xinglü, et al. Load modeling of power system considering time-variant load and dynamic compensation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 17-21.
- [4] 谢永涛, 贾嵘, 董开松, 等. 交流微网整体建模及仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 101-107.  
XIE Yongtao, JIA Rong, DONG Kaisong, et al. Modeling and simulation of an AC microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 101-107.
- [5] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.  
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide and measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [6] 徐振华, 李欣然, 宋军英, 等. 考虑双馈风电机的配网广义综合负荷建模[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 234-242.  
XU Zhenhua, LI Xinran, SONG Junying, et al. Load modeling considering doubly-fed induction generation (DFIG) integrated into distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 234-242.
- [7] 孙国霞, 张剑, 吴海江. 包含多种分布式电源的广义负荷模型辨识与适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 105-111.  
SUN Guoxia, ZHANG Jian, WU Haijiang. Research on the identification and adaptation of generalized load modeling based on distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 105-111.
- [8] 韩冬, 马进, 贺仁睦. 基于 Bootstrap 的实测负荷模型参数优选[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 141-146.  
HAN Dong, MA Jin, HE Renmu. Parameter optimization of measurement-based load model based on Bootstrap[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 141-146.

- [9] 孙昊, 王茂海, 齐霞. 基于 PMU 实测数据的同步发电机参数在线辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 31-36.  
SUN Hao, WANG Maohai, QI Xia. Synchronous generator parameters identification based on PMU data[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 31-36.
- [10] 曹明凯, 韩超先, 马平, 等. 利用励磁电压扰动后的同步发电机参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 116-120.  
CAO Mingkai, HAN Chaoxian, MA Ping, et al. Identification of synchronous generator parameters after the exciting voltage fluctuates[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 116-120.
- [11] 党存禄, 张佳宾. 基于 WAMS 的电网故障检测新方法[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 1-7.  
DANG Cunlu, ZHANG Jiabin. A novel method of grid fault diagnosis based on WAMS[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 1-7.
- [12] 徐岩, 鄧静. 基于改进自适应遗传算法的 PMU 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 55-62.  
XU Yan, ZHI Jing. Optimal PMU configuration based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 55-62.
- [13] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [14] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [15] 李欣然, 惠金花, 钱军, 等. 风力发电对配电网侧负荷建模的影响[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 89-94.  
LI Xinran, HUI Jinhua, QIAN Jun, et al. Impact of wind power generation on load modeling in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 89-94.
- [16] 李欣然, 钱军, 王立德, 等. 配电网集结等效的异步电动机综合负荷模型及其总体测辨建模[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 175-185.  
LI Xinran, QIAN Jun, WANG Lide, et al. Synthesis induction motor model of power composite load considering distribution network structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 175-185.
- [17] 鞠平. 电力系统非线性辨识[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [18] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2014-11-27; 修回日期: 2015-01-16

作者简介:

季文伟(1987-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统参数辨识方面的研究;

王茂海(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为广域同步动态监测技术及基于广域同步动态监测信息的应用分析技术;

吴新振(1964-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电机系统分析与控制, 电机系统与电力系统参数辨识. E-mail: wuxinzen81@163.com

(编辑 周金梅)