

基于 PMU 实测数据的同步发电机参数在线辨识方法

孙昊¹, 王茂海², 齐霞³

(1. 国网新源控股有限公司, 北京 100053; 2. 国家电网华北电力调控分中心, 北京 100053;
3. 冀北电力有限公司电力经济技术研究院, 北京 100045)

摘要: 由于试验条件与发电机运行的实际工况有较大差异, 常规的电机试验难以得到与饱和、涡流等密切相关的发电机动态参数的准确值, 满足不了离线和在线安全分析及控制的要求。将 PMU 上传的定子电压和励磁电压量测作为输入信号、定子电流和励磁电流作为输出信号, 基于 PMU 实测数据和同步发电机派克模型, 考虑定子绕组暂态过程, 实现了同步发电机原始参数的辨识。电力系统实际算例表明, 与设计参数相比, 基于该参数辨识结果的仿真曲线与实测发电机动态曲线的拟合程度明显要高, 所提方法能够有效提高同步发电机的参数辨识精度。

关键词: 同步发电机; Park 模型; 参数辨识; 相量测量装置

Synchronous generator parameters identification based on PMU data

SUN Hao¹, WANG Mao-hai², QI Xia³

(1. State Grid Xin Yuan Company Limited, Beijing 100053, China;
2. North China Branch of State Grid Power Dispatch & Control Center, Beijing 100053, China;
3. Jibei Electric Economic Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: Since test conditions are quite different from actual working conditions, it's difficult for conventional test method to identify the exact value of synchronous machine dynamic parameters which are related to saturation and eddy currents. Thus, conventional test method cannot satisfy requirements of offline/online security analysis and control. Based on PMU measurements and taking transient processes of d-axis and q-axis stator windings into account, this paper proposes an online algorithm to estimate synchronous machine parameters in Park model. With stator voltage and field voltage as input signals, stator current and field current as output signals, the proposed algorithm chooses particle swarm algorithm as optimization algorithm. Practical examples show that, compared with the design parameters, the similarity between simulation data derived from identified parameters and measured data is much better. The proposed method can effectively improve the identification accuracy of synchronous machine parameters.

Key words: synchronous generator; Park model; parameter identification; phasor measurement unit (PMU)

中图分类号: TM933 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0031-06

0 引言

同步发电机被称为“电力系统的核心”, 是电力系统中最重要的动态元件。作为绕组结构复杂的旋转铁磁性元件, 同步发电机的动态特性对电力系统的运行性能有极大影响, 因此同步发电机的模型及其参数在电力系统数值仿真计算中具有至关重要的作用^[1-3]。

常规的电机试验(如三相稳态短路试验、抛载法、低转差法、电压恢复法, 等)的特点是从参数的物理意义出发去做测量, 方法比较成熟。但由于试验条件与电机运行的实际工况有较大差异, 难以

得到与饱和、涡流等密切相关的发电机动态参数的准确值, 所获得的参数不能完全真实地反映电机在实际运行中的动态行为, 严重影响了动态计算的准确度和可信度, 不能满足日益严格的离线和在线安全分析要求。

伴随着系统辨识理论的发展, 利用在线测量和系统辨识相结合的方法成为获取电力系统参数的另一种途径^[4-8]。基于实际量测数据对同步发电机参数进行参数辨识的显著优点是: 直接计及电机运行各种因素, 一旦辨识成功, 即可包含各种因素的效应, 计算简单, 不用附加过多的假设条件, 不影响电机的正常运行, 所得参数能很好地反映电机动态行为。

在电网实测生产数据中,同步相量测量数据(PMU数据)具有时间同步精度最高、时间分辨率最高的双重优点。基于同步相量测量的广域测量系统在国内发展十分迅速。根据国家电网公司十二五智能化规划,十二五期间,我国500kV及以上厂站PMU覆盖率将达到100%。基于WAMS系统的同步动态数据开展电力系统参数在线辨识是调度环节智能化一项重要内容,具有重要的理论和实践意义。

除参数准确性外,影响电力系统离线和在线安全分析结果可靠性的另一因素是同步发电机本身模型的精确程度。目前,已有的同步电机参数辨识方法,大部分都是针对实用模型^[9-17]。在实用模型中,最详细的是六阶模型。六阶模型中包含两阶转子运动方程,实际反映绕组电磁暂态的只有四阶(忽略了定子绕组电磁暂态)。与Park模型相比,实用模型的精确度要低。

文献[18]基于Park模型,证明d轴和q轴参数可唯一辨识,基于RTDS仿真获得了较好效果。但该文在应用中采用了转速恒定的假设,并且在参数辨识的目标函数中只考虑了定子绕组磁链,未考虑转子绕组磁链,同时,该文结果未经实际算例验证。

本文从模型精度和参数精度两个方面开展同步发电机参数辨识研究:

(1) 采用Park模型,考虑定子绕组的暂态过程。

(2) 以广域测量系统的实测数据为数据基础,开展基于PMU实测数据的同步发电机参数辨识。

1 dq0 坐标下同步发电机基本方程

设同步发电机转子励磁绕组中心轴为d轴,q轴沿转子旋转方向领先d轴90°电角度。在d轴上有励磁绕组f、等值阻尼绕组D,q轴上有与暂态过程对应的等值阻尼绕组g、与次暂态过程对应的等值阻尼绕组Q。经典Park变换矩阵为

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,θ为d轴领先定子a相绕组轴线的角度。

采用x_{ad}标么值系统,且采用以下假设:

1) 公共磁链的假定。

2) 不考虑零轴分量。

3) d轴和q轴的漏抗相等,即x_{dl}=x_{ql}=x_l。

采用以上假设后,dq0坐标下的同步发电机电压方程和磁链方程分别如式(2)和式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & & & & & \\ & r_a & & & & \\ & & r_f & & & \\ & & & r_D & & \\ & & & & r_g & \\ & & & & & r_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_g \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_g \\ \psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ \omega\psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_g \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & x_q & 0 & 0 & x_{aq} & x_{aq} \\ x_{ad} & 0 & x_f & x_{ad} & 0 & 0 \\ x_{ad} & 0 & x_{ad} & x_D & 0 & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & 0 & x_g & x_{aq} \\ 0 & x_{aq} & 0 & 0 & x_{aq} & x_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_g \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中:d/f/D绕组的电抗为x_{ad}及对应绕组的漏抗之和;q/g/Q绕组的电抗为x_{aq}及对应绕组的漏抗之和。由式(2)和式(3)可以看出,同步电机原始参数为12个、状态量为6个(ψ_d、ψ_q、ψ_f、ψ_D、ψ_g、ψ_Q)。

当忽略定子电磁暂态(定子电压方程中取dψ_d/dt=dψ_q/dt=0),可得到同步发电机实用六阶模型。实用六阶模型中,转子运动方程占两阶,电磁方程占四阶。与Park模型相比,实用模型更加简化。

2 基于Park模型的同步发电机原始参数辨识

2.1 辨识流程

发电机作为一个模型结构已定、参数待定的待辨识对象,其参数辨识流程如图1所示。

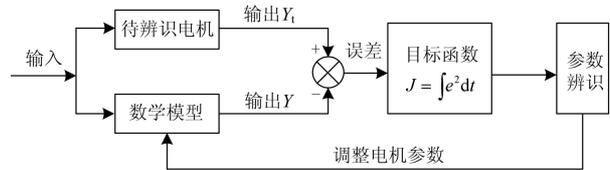


图1 同步发电机参数辨识流程

Fig. 1 Flow chart of synchronous machine parameters identification

图1中参数辨识的目标函数指的是在PMU实测输入量的作用下,给定一组参数,经过仿真得到的输出量(d轴电流和q轴电流)与PMU实测输出量间的误差。当这一误差达到最小时,认为对应的参数辨识结果与真实参数最接近。

由图1可以看出,同步发电机参数辨识与三个因素有关:一是发电机数学模型的精度;二是扰动

$$\begin{cases} u_d = U_1 \cdot \sin \delta \\ u_q = U_1 \cdot \cos \delta \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_d = I_1 \cdot \sin \psi \\ i_q = I_1 \cdot \cos \psi \end{cases} \quad (12)$$

下面对 PMU 量测的适用性做进一步说明。目前, PMU 装置的相量计算窗口的滑移步长为 10 ms, 窗口宽度为 20 ms。发电机铭牌参数中, 暂态时间常数一般大于 30 ms 以上, PMU 的测量结果在工程应用上能够反映暂态过程的特征。因此, 在工程应用中, PMU 的相量测量结果能够应用到电力系统仿真分析中。

2.4 优化算法及扰动数据长度选取

发电机参数辨识研究的另一个重点是优化算法的选择。目前研究和应用的算法主要有: 进化算法、神经网络法、遗传算法、粒子群优化算法、Prony 算法、最小二乘法、扩展卡尔曼滤波法等。在电机参数辨识中优化算法的选取有着十分重要的作用, 本文选用粒子群优化算法进行辨识。

在发电机出现扰动时, 参数辨识所截取的实测数据长度及起始取值点必须考虑。截取数据过少, 则激发不充分; 截取数据过多, 则进入发电机稳定运行区域, 也影响参数辨识精度。由于暂态电抗与次暂态电抗相差较大, 暂态时间常数与次暂态时间常数也相差较大, 截取固定时间长度数据同时辨识所有参数的做法未必合适。此外, 截取数据的起始点问题也需考虑, 起始点至扰动出现点中间是一段稳态运行数据, 这段稳态数据的长短对参数辨识结果也会有影响。有研究表明合适的区间应该是电气时间常数的 10 倍左右^[15]。分别取扰动数据时间长度为 1 s、2 s、4 s、8 s 进行参数辨识, 经多次验证发现扰动时间长度选为 2~4 s, 辨识效果较好。

3 实际算例分析

本部分算例均基于华北电网广域测量系统所记录的实际扰动数据。在本文算例中, 目标函数的计算仍然分 d 轴和 q 轴。

3.1 算例 1

某电厂通过两回出线与 500 kV 主网相连。2012 年 3 月 3 日上午 8:57, I 回出线跳闸, 两套主保护动作, 选 B、C 相, 直接跳三相, 故障切除时间为 61 ms。

该电厂某机组 d、q 轴目标函数分别为 0.022 2、0.025 3。基于参数辨识结果的定子电流仿真曲线与实际定子电流曲线的对比如图 4 所示。

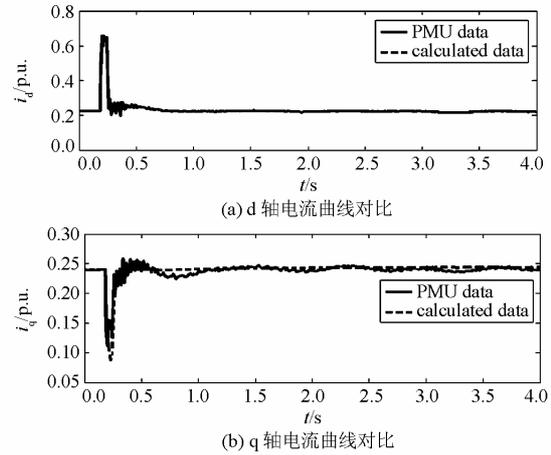


图 4 定子电流仿真曲线与实际定子电流曲线的对比(算例 1)
Fig. 4 Comparison between simulation data and PMU data (example 1)

3.2 算例 2

与算例 1 为同一机组。2012 年 3 月 3 日中午 12:23, 该厂 II 回出线跳闸, 两套主保护动作, 选 A、B 相, 直接跳三相, 发电机组解列, 故障切除时间为 60 ms。

d、q 轴目标函数分别为 0.000 384 38、0.188 8。基于参数辨识结果的定子电流仿真曲线与实际定子电流曲线的对比如图 5 所示。

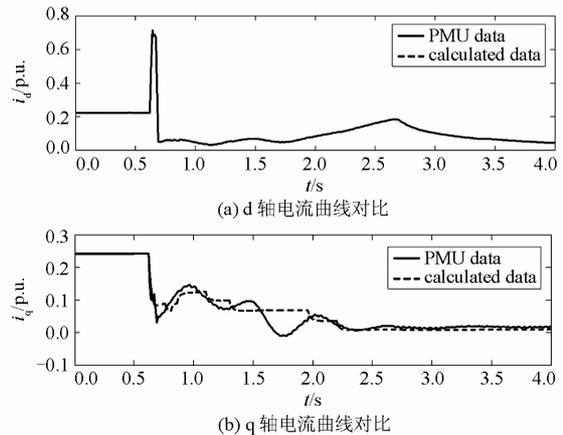


图 5 定子电流仿真曲线与实际定子电流曲线的对比(算例 2)
Fig. 5 Comparison between simulation data and PMU data (example 2)

3.3 算例 3

与算例 2 事件相同, 基于铭牌参数的仿真曲线与实际曲线的对比如图 6 所示。

3.4 算例分析

算例 1 和算例 2 的参数辨识结果及发电机铭牌参数的对比如表 1 所示。

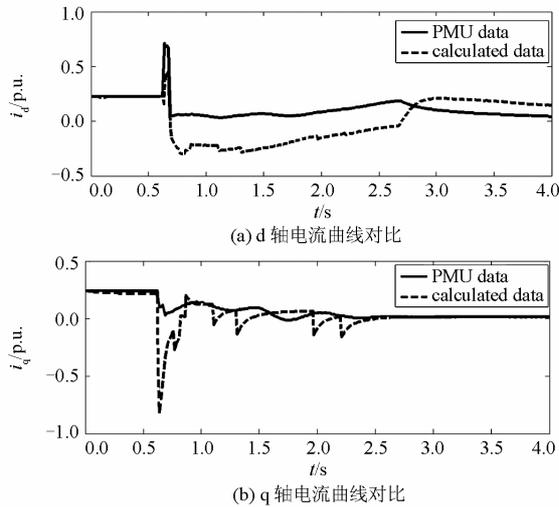


图 6 基于铭牌参数的定子电流仿真曲线与实际定子电流曲线的对比(算例 2)

Fig. 6 Comparison between simulation data derived from nameplate parameters and PMU data (example 2)

表 1 辨识结果对比

Table 1 Comparisons of identified parameters

参数	铭牌值	辨识值 1	辨识值 2
$X_d/p.u.$	1.795	1.509	1.520 3
$X_d'/p.u.$	0.265	0.230 9	0.296 3
$X_d''/p.u.$	0.205	0.025 3	0.078 8
T_{d0}/s	8.61	0.4	0.1
T_{d0}''/s	0.045	0.042 7	0.014 7
$X_q/p.u.$	1.7	1.443	1.432 2
$X_q'/p.u.$	0.395	0.342 4	0.4
$X_q''/p.u.$	0.208	0.044 2	0.061 3
T_{q0}/s	0.956	0.144	0.1
T_{q0}''/s	0.069	0.034 4	0.028 2

通过算例 1、算例 2 和算例 3 的对比, 可以看出:

1) 基于参数辨识结果的仿真曲线与实际曲线之间的拟合程度, 要比基于铭牌参数的仿真曲线与实际曲线的拟合程度好得多。

2) 两次事件中, 对同一机组的参数辨识结果不完全相同, 但仿真曲线均与实际曲线拟合得比较好。这主要是因为同步发电机的 Park 模型并不能够完全反映电机的真实结构。但是, 如果要求模型越精确, 模型必然就会变得越复杂, 计算量和计算难度随之增大。这就是说, 建立实际过程的模型时, 存

在着精确性和复杂性这一对矛盾。在电力系统分析中, Park 模型已经足够复杂。

4 结论

本文开展了以下工作:

1) 指出 Park 模型与实用六阶模型的本质区别。在同步发电机参数辨识过程中, 发电机数学模型采用 Park 模型, 考虑了定子绕组的暂态过程。

2) 利用 PMU 实测的转速(频率)数据使得 Park 模型变为严格的线性模型。

3) 以 PMU 实测数据为数据基础, 全面地考虑了发电机与外部的接口: 以 PMU 实测的定子电压、励磁电压为输入量, 以 PMU 实测的定子电流和励磁电流为输出量。

4) 采用 500 kV 电网中的实际算例, 验证了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] 李天云, 祝磊, 宋莉, 等. 基于 TLS-ESPRIT 的同步电机参数辨识[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 38-42.
LI Tian-yun, ZHU Lei, SONG Li, et al. Parameter identification of synchronous machine based on TLS-ESPRIT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 38-42.
- [2] 李勋, 龚庆武, 贾晶晶, 等. 基于原子稀疏分解的低频振荡模态参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 124-133.
LI Xun, GONG Qing-wu, JIA Jing-jing, et al. Modeling and parameter identification of turbine-governor based on response characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 124-133.
- [3] 武诚, 徐政, 倪秋龙, 等. 基于响应特性的原动机及调速器建模与参数辨识[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 226-231.
WU Cheng, XU Zheng, NI Qiu-long, et al. Modeling and parameter identification of turbine-governor based on response characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 226-231.
- [4] 王正风, 葛斐, 戴长春. 基于 PMU 的电力系统建模及参数辨识[J]. 继电器, 2007, 35(增刊): 375-382.
WANG Zheng-feng, GE Fei, DAI Chang-chun. Power system modeling and parameter identification based on PMU[J]. Relay, 2007, 35(S): 375-382.
- [5] 郭磊, 孙建华, 鞠平, 等. 多机系统参数辨识的观测变量选取[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 24-29.
GUO Lei, SUN Jian-hua, JU Ping, et al. Observed variables selection for parameter identification of multi-generators in power systems[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 24-29.
- [6] 宋人杰, 李文明. 一种提高静态负荷模型参数辨识精

- 度方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 89-92.
- SONG Ren-jie, LI Wen-ming. Research on improving the precision of static load model parameter identification[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 89-92.
- [7] 王茂海, 鲍捷, 齐霞, 等. 基于 PMU 实测数据的变压器参数在线估计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 25-27.
- WANG Mao-hai, BAO Jie, QI Xia, et al. Online estimation of transmission line parameters based on PMU measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 25-27.
- [8] 王茂海, 齐霞, 牛四清, 等. 基于相量测量单元实测数据的变压器参数在线估计方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 61-65.
- WANG Mao-hai, QI Xia, NIU Si-qing, et al. Online estimation of transformer parameters based on PMU measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 61-65.
- [9] 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 Ming-kai, HAN Chao-xian, 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.
- [10] 伍双喜, 张伯明, 吴文传, 等. 基于实测系统扰动的同步发电机参数辨识与验证[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 87-93.
- WU Shuang-xi, ZHANG Bo-ming, WU Wen-chuan, et al. Identification and validation for synchronous generator parameters based on recorded on-line disturbance data[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 87-93.
- [11] 贺仁睦, 郑晓雨, 马进, 等. 基于轨迹灵敏度的负荷参数辨识范围调整方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 17-21.
- HE Ren-mu, ZHENG Xiao-yu, MA Jin, et al. A method of parameter range adjustment in load parameter identification based on the trajectory sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 17-21.
- [12] 李兴源, 朱瑞可, 王渝红, 等. 基于 EMD 和 Prony 算法的同步电机参数辨识[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 136-139.
- LI Xing-yuan, ZHU Rui-ke, WANG Yu-hong, et al. Parameter identification of synchronous machine based on empirical mode decomposition and Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 136-139.
- [13] 黄淼, 李文沅, 颜伟, 等. 使用辨识得到的运算电感模型估计同步发电机 d 轴等值电路参数[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 82-87.
- HUANG Miao, LI Wen-yuan, YAN Wei, et al. Estimation of d-axis equivalent circuit parameters of synchronous generator by operational inductance model obtained from identification[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 82-87.
- [14] 李玲, 李天云, 黄绍平, 等. 基于随机子空间的同步电机参数高精度辨识新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 156-160.
- LI Ling, LI Tian-yun, HUANG Shao-ping, et al. A high-precision approach to identify synchronous generator parameters based on stochastic subspace identification[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 156-160.
- [15] 李天云, 高磊, 王鸿懿, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的同步电机参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 153-158.
- LI Tian-yun, GAO Lei, WANG Hong-yi, et al. Parameter identification of synchronous machine based on Hilbert-Huang transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 153-158.
- [16] 朱瑞可, 李兴源, 赵睿, 等. 矩阵束算法在同步电机参数辨识中的应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 52-55.
- ZHU Rui-ke, LI Xing-yuan, ZHAO Rui, et al. Application of matrix pencil algorithm in synchronous machine parameters identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 52-55.
- [17] 鞠平, 郭磊, 高昌培, 等. 频域灵敏度及其在电力系统参数辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 19-24.
- JU Ping, GUO Lei, GAO Chang-pei, et al. Frequency-domain sensitivities with application to power system modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 19-24.
- [18] 孙黎霞, 鞠平, 高运华, 等. 基于 Park 模型的同步发电机参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 50-56.
- SUN Li-xia, JU Ping, GAO Yun-hua, et al. Parameter estimation of synchronous generator based on Park model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 50-56.

收稿日期: 2013-06-06; 修回日期: 2013-08-06

作者简介:

孙昊(1983-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为参数辨识、新能源管理;

王茂海(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 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等; E-mail: wmmhw@tom.com

齐霞(1983-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电力技术经济。