

DOI: 10.7667/PSPC160615

# 同步发电机辨识参数对数据误差的敏感性分析

陈剑<sup>1</sup>, 王茂海<sup>2</sup>, 刘连光<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 国家电网公司华北电力调控分中心, 北京 100053)

**摘要:** 为了从理论上描述参数辨识结果受数据误差的影响程度, 针对同步发电机六阶模型, 给出了一种参数对数据误差的敏感性分析方法。基于稳态参数与暂态参数的辨识模型, 分别构造了同步发电机稳态参数、暂态参数与数据误差的关系式, 给出了参数对数据误差的上界估计。基于实测 PMU 数据, 利用该分析方法, 以电流误差为例, 进行了计算参数对数据误差估计式的实例分析。结果表明, 同步发电机参数受到电流数据误差的影响程度依次为稳态、暂态、次暂态参数。

**关键词:** 数据误差; PMU; 参数辨识; 敏感性分析; 同步发电机

## Sensitivity of identification parameters to PMU data error of synchronous generator

CHEN Jian<sup>1</sup>, WANG Maohai<sup>2</sup>, LIU Lianguang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China

Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. North China Branch of State Grid Power

Dispatch & Control Center, Beijing 100053, China)

**Abstract:** The results of parameters identification are usually imprecise due to the data error. In order to illustrate the influence, based on six order model of the synchronous generator, the sensitivity of the parameters and the data errors is studied. Firstly, a model between the steady parameters and transient parameters and the data errors are built respectively, and then the upper bound estimates of the sensitivity between the parameters and the data errors are derived. Using the proposed analysis method and taking current error for example, a numerical example of estimate equation of calculation parameter to data error is given based on the PMU current data. The conclusion shows that influence degree of current data error to synchronous generator parameter in order is static parameters, transient parameters and sub-transient parameters.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577060).

**Key words:** data errors; PMU; parameter identification; sensitivity analysis; synchronous generator

## 0 引言

随着电网智能化和计算技术的发展, 广域测量系统(WAMS)中相量测量单元(PMU)布点的规模不断增加, 大大提高了电网动态过程的可观测性, 该项动态监测手段的数据为电网的动态安全分析和运行调度的决策提供了基础数据<sup>[1-4]</sup>。目前, 500 kV 及以上电压等级的变电站、发电厂普遍装配了 PMU 装置, 在电力系统的运行分析中, 已可得到内容广泛的实时动态数据。然而, 如何优质高效地利用这

些数据, 发挥 WAMS 应用分析功能及作用, 发现电力系统运行的问题, 为调度提供科学决策, 仍是需要研究的课题。

同步发电机参数的实时准确辨识是电力系统分析的基础, 能够为系统安全运行提供保障, 因而, 同步发电机参数辨识一直是电力系统分析研究的热点<sup>[5-7]</sup>。国内外研究同步发电机参数辨识的方法基本可分为两类: 一是采用智能算法直接或分步进行参数辨识; 二是采用灵敏度分析的方法进行参数辨识。采用智能算法辨识的本质是在给定的参数区间上进行寻优<sup>[8-9]</sup>, 而灵敏度分析的辨识参数方法的本质在于确定辨识区间<sup>[10-12]</sup>。

基于灵敏度方法的参数辨识或潮流计算已有许

基金项目: 国家自然科学基金(51577060); 国家电网公司科技项目(52011013508K)

多研究。文献[10-11]提出基于潮流计算的电力系统动态灵敏度方法,在系统发生故障时不至于重新求解大量方程。文献[12]将轨迹灵敏度用于同步发电机的参数辨识,计算了辨识参数之间的敏感程度。基于 PMU 数据应用分析功能之一的同步发电机参数辨识需某一时段(多个连续时刻断面)的数据,在针对一段数据分析时,常规以时刻点为基础的灵敏度方法已不适用,而通过数值模拟确定参数灵敏度又缺乏普遍性,且由于数据带有随机性,使得分析计算的结果往往不具有说服力,因此,分析输出结果对输入数据误差的敏感程度是一个技术难点,文献[13]中指出参数辨识受到扰动类型以及数据噪声的影响,通过仿真分析了功角偏差对辨识参数的影响程度。

考虑到数据误差对参数辨识准确性影响更大,且数据误差难以避免的事实,本文从理论上分析了辨识参数受 PMU 数据量测误差的影响程度,给出了计算参数关于数据误差的灵敏度公式,并通过算例验证了该公式的可靠性。给出的灵敏度公式为调度人员根据参数辨识结果做出决策提供了参考。

## 1 同步发电机基本模型

同步发电机六阶实用模型具有良好的可辨识性,在工程实践中利用 PMU 量测数据进行在线参数辨识多采用六阶实用模型<sup>[14-15]</sup>。本文不计及转子运动方程的影响,采用发电机四阶电气量方程<sup>[16]</sup>。由于同步发电机六阶模型  $d$  轴与  $q$  轴解耦,可分别辨识<sup>[17-18]</sup>,考虑到  $d$  轴参数与  $q$  轴参数的辨识过程相似,下面以  $d$  轴为例进行详细分析。 $d$  轴模型为

$$\begin{cases} T'_{d0} \cdot \frac{dE'_q}{dt} = E_f - E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x''_d} (E'_q - E''_q) \\ T''_{d0} \cdot \frac{dE''_q}{dt} = E'_q - E''_q - (x'_d - x''_d) i_d^* + T''_{d0} \cdot \frac{dE'_q}{dt} \\ u_q^* = E''_q - x''_d i_d \\ E_f = k \cdot u_{fd}^* \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中输入量为 PMU 装置直接量测得到的数据,观测量是通过求解方程得到的数据。式(1)中  $u_q^*$ ,  $u_{fd}^*$ ,  $i_d^*$  为输入量,  $i_d$  为观测量。模型中其他各参数与变量的定义参照文献[14]。

为建立参数辨识模型,求参数满足上述模型,记参数向量  $\beta = (x_d, k, x'_d, x''_d, T'_{d0}, T''_{d0})$ , 其中,参数  $x_d$  与  $k$  是稳态参数,  $x'_d, x''_d, T'_{d0}, T''_{d0}$  是暂态与次暂态参数。

从式(1)中选取观测量  $i_d$  的表达式

$$i_d = \frac{E''_q - u_q^*}{x''_d} \quad (2)$$

以式(2)作为构建目标函数的基础,利用观测量  $i_d$  与输入量  $i_d^*$  的最小二乘给出目标函数

$$\min \int (i_d - i_d^*)^2 dt \quad (3)$$

从而得到带有辨识参数  $\beta$  的优化模型

$$\min_{\beta} \int \left( \frac{E''_q - u_q^*}{x''_d} - i_d^* \right)^2 dt \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} T'_{d0} \cdot \frac{dE'_q}{dt} = k \cdot u_{fd} - E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x''_d} (E'_q - E''_q) \\ T''_{d0} \cdot \frac{dE''_q}{dt} = E'_q - E''_q - (x'_d - x''_d) i_d^* + T''_{d0} \cdot \frac{dE'_q}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)或写成矩阵形式

$$\text{s.t.} \frac{d\mathbf{E}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{E} + \mathbf{f}(t) \quad (6)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_d - x''_d}{x'_d - x''_d} & \frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x''_d} \\ -\frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_d - x''_d}{x'_d - x''_d} + \frac{1}{T''_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x''_d} - \frac{1}{T''_{d0}} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E'_q \\ E''_q \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{T'_{d0}} k \cdot u_{fd}^* \\ \frac{1}{T''_{d0}} k \cdot u_{fd}^* - \frac{1}{T''_{d0}} (x'_d - x''_d) i_d^* \end{pmatrix}.$$

## 2 参数辨识流程

PMU 装置所测量的数据均为有名值,而在参数辨识时为了减少辨识算法的复杂度,需要转换为标么值,按式(7)对发电机的机端电压和机端电流进行 Park 变换

$$\begin{cases} u_q = U_1 \cdot \cos \delta \\ u_d = U_1 \cdot \sin \delta \\ I_d = I_1 \cdot \sin \psi \\ I_q = I_1 \cdot \cos \psi \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\delta$  为发电机功角;  $\psi$  为发电机内功率因数角;  $U_1$  为正序定子电压幅值;  $I_1$  为正序定子电流幅值。

由于所要辨识的  $d$  轴参数较多,同时考虑到 PMU 实测数据中存在大量稳态数据,为减少辨识的工作量,辨识时通常先利用稳态数据计算出  $d$  轴稳态参数,进而辨识暂态参数,此为分步辨识方法<sup>[18]</sup>。

稳态参数的辨识不涉及微分方程, 计算公式简单, 根据文献[14, 18]由稳态数据直接计算得到

$$x_q = \frac{u_d}{i_q} \quad (8)$$

在隐极式同步发电机中有  $x_d = x_q$ , 从而得到  $d$  轴同步电抗  $x_d$ , 然后根据式(9)求取稳态参数  $k$ 。

$$k = \frac{u_q + i_d x_d}{u_{fd}} \quad (9)$$

暂态参数的辨识基于扰动后的数据, 可由辨识模型式(4)一式(5)得出, 具体通过迭代求解微分方程并利用最小二乘法进行寻优来实现。本文利用工程计算中常用的改进 Euler 法进行电气量状态方程的求解, 并用粒子群算法进行寻优, 从而辨识暂态参数<sup>[9, 14]</sup>。

稳、暂态参数辨识的具体流程如图 1 所示。

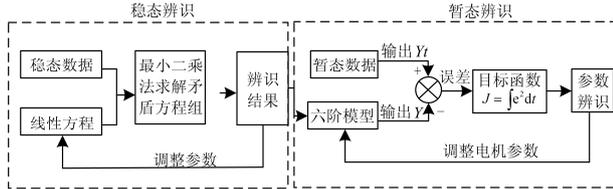


图 1 辨识流程图

Fig. 1 Flow chart of identification

### 3 参数对数据误差的灵敏度计算

#### 3.1 稳态参数对数据误差的敏感性

联立式(7)一式(9)得稳态参数的计算公式为

$$\begin{cases} x_d = \frac{U \cdot \sin \delta}{I \cdot \cos \psi} \\ k = \frac{U \cdot \cos \delta + U \cdot \sin \delta \cdot \tan \psi}{u_{fd}} \end{cases} \quad (10)$$

在研究参数对数据误差的灵敏度时, 由于不同参数之间数量级相差较大, 不便选用直接灵敏度, 因此本文采用相对灵敏度进行分析。假设量测电流的单元出现故障, 量测数据存在误差, 即存在增量  $\Delta I$ , 此时稳态参数与数据误差  $\Delta I$  的灵敏度通过式(10)可得

$$\begin{cases} \left\| \frac{\Delta x}{x_d} \right\| / \left\| \frac{-\Delta I}{I} \right\| = x_d \\ \left\| \frac{\Delta k}{k} \right\| / \left\| \frac{\Delta I}{I} \right\| = \left\| \frac{U \cdot \sin \delta \cdot \tan \psi}{u_{fd}} \right\| \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 稳态参数与数据误差之间为线性关系, 参数的准确度受到数据本身的影响更大。

#### 3.2 暂态参数对数据误差的敏感性

在稳态参数既定之后, 参数向量简化为四维,

即,  $\beta = (x_d', x_d'', T_{d0}', T_{d0}'')$ 。

暂态参数除了数目较多外, 其与稳态参数的最大不同在于需要对微分方程求解进行辨识, 因此不易找到数据误差与辨识参数误差之间的确切关系, 依据暂态参数辨识的原理, 本文提出了一种估计的方法, 给出了参数误差与数据误差间的关系式。下面给出数据误差与参数误差的灵敏度关系的推导过程。暂态参数的辨识通过式(4)一式(5)进行, 调整参数使其满足微分方程式(5), 观察状态方程式(6)可知, 量测数据均包含在右端  $f$  向量中, 即数据误差体现在  $f$  的变化  $\Delta f$  上, 此处先把  $f$  做整体考虑。

设数据有一个误差增量  $\Delta f$ , 则数据的误差导致状态方程解的改变, 从而影响基于最小二乘法的目标函数的求解。状态方程式(6)的增量方程满足

$$\frac{d(E + \Delta E)}{dt} = A(E + \Delta E) + \Delta f \quad (12)$$

式(12)与式(6)相减得到

$$\begin{cases} \frac{d\Delta E}{dt} = A\Delta E + \Delta f \\ \Delta E(0) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

设  $A$  的特征值为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 对应的特征向量为  $u_1$  和  $u_2$ , 则式(13)可以写成

$$\frac{dP^{-1}\Delta E}{dt} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} P^{-1}\Delta E + P^{-1}\Delta f \quad (14)$$

其中,  $P = (u_1, u_2)$ 。

解得

$$\Delta E(t) = \int_0^t P \begin{pmatrix} e^{\lambda_1(t-\tau)} & \\ & e^{\lambda_2(t-\tau)} \end{pmatrix} P^{-1} \Delta f(\tau) d\tau \quad (15)$$

记式(15)中  $\bar{\lambda} = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1(t-\tau)} & \\ & e^{\lambda_2(t-\tau)} \end{pmatrix}$ , 且由于  $E$  是

衰减的, 因此有  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的实部小于 0。

引理 1: 对向量函数  $\varphi(t)$ , 在  $[0, t]$  上可积, 则有

$$\left( \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right)^T \left( \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) \leq t \int_0^t \varphi^T(\tau) \varphi(\tau) d\tau$$

证明见附录 A。

由引理 1 和式(15)可得

$$\Delta E(t)^T \Delta E(t) \leq t \int_0^t \Delta f(\tau)^T P^{-1} \bar{\lambda} P^T P \bar{\lambda} P^{-1} \Delta f(\tau) d\tau \quad (16)$$

为区别于 2-范数, 本文记数据误差的均方模为

$$\| \Delta E \| = \left[ \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} \Delta E(\tau)^T \Delta E(\tau) d\tau \right]^{1/2} \quad (17)$$

则由式(16)、式(17)可得

$$\begin{aligned} \|\Delta E\|^2 &= \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} \Delta E(t)^T \Delta E(t) dt \leq \\ & \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} [t \int_0^t \|\mathbf{P}\bar{\lambda}\mathbf{P}^{-1}\|_2^2 \|\Delta f(\tau)\|_2^2 d\tau] dt \leq \\ & \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \|\mathbf{P}\bar{\lambda}\mathbf{P}^{-1}\|_2^2 \right\} \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} [t \int_0^t \|\Delta f(\tau)\|_2^2 d\tau] dt \leq \quad (18) \\ & \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \|\mathbf{P}\bar{\lambda}\mathbf{P}^{-1}\|_2^2 \right\} \|\Delta f\|^2 \end{aligned}$$

因此

$$\|\Delta E\| \leq \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \|\mathbf{P}\bar{\lambda}\mathbf{P}^{-1}\|_2 \right\} \|\Delta f\| \quad (19)$$

考虑数据误差对参数的影响, 由式(19)可得

$$\frac{\|\Delta E\|}{\|\Delta \beta\|} = \frac{\|\Delta E\|}{\|\Delta f\|} \leq \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \|\mathbf{P}\bar{\lambda}\mathbf{P}^{-1}\|_2 \right\} \quad (20)$$

从而

$$\frac{\|\frac{\Delta \beta_k}{\beta_k}\|}{\|\frac{\Delta f}{f}\|} \leq \frac{\max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \|\mathbf{P}\bar{\lambda}\mathbf{P}^{-1}\|_2 \right\}}{\|\frac{\Delta E}{\Delta \beta_k}\|} \quad k=1, 2, \dots, 4 \quad (21)$$

因此, 数据误差对参数的灵敏度计算转为对式(21)右端的估计, 其分母部分可用导数值近似。

## 4 算例分析

本算例基于华北电网广域测量系统所记录的实际扰动数据。2010年4月14日9点47分, 托克托电厂1号机组发生扰动, 截取00~60s共60s长度的数据, 其机端正序电压、正序电流以及励磁电压的波形如图2。算例同样以d轴为例。

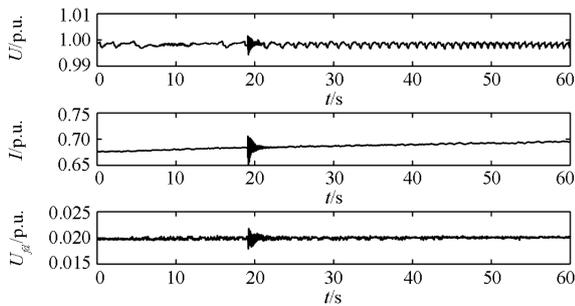


图2 实测数据波形

Fig. 2 Waveform of PMU measurements data

由图2可以看出, 扰动发生约为2s的时长, 从所截取的数据中选取19~21s扰动时段作为暂态参数辨识的原始数据, 取扰动前后其他时段平缓的数据作为稳态参数辨识的原始数据。假设原始数据为理想数据, 不存在误差。

### 4.1 稳态参数变化值计算与验证

稳态参数对数据误差的灵敏度计算可基于PMU数据按式(11)求得, 对结果的验证步骤为: 假设实测数据为理想数据, 在此数据上模拟产生0.1单位的正序电流误差, 并利用两组数据分别据式(10)得到稳态参数, 计算参数相对误差并与数据相对误差相除, 即得到仿真值, 结果如表1所示。

表1 稳态参数灵敏度

参数	$x_d$	$k$
原始数据辨识值	1.2389	73.4671
仿真数据辨识值	1.4506	73.4764
灵敏度仿真值	1.1712	0.0009
灵敏度计算值	1.2389	0
误差(%)	5.46%	0

### 4.2 暂态参数变化值计算与验证

类似于稳态参数的计算方法, 暂态参数灵敏度的计算值由式(21)得到, 验证方法同样假设正序电流存在0.1单位的误差, 先用原始数据由式(4)、式(5)辨识得到初始辨识值, 进而模拟误差数据辨识得到新参数, 并由电流的相对变化量得到灵敏度仿真值, 结果如表2所示。为了保证验证的有效性, 利用两组数据进行暂态参数辨识时, 尽可能保证了目标函数的一致性, 两次辨识的拟合效果如图3、图4所示。

表2 暂态参数灵敏度计算

参数	$x'_d$	$x''_d$	$T'_{d0}$	$T''_{d0}$
原始数据辨识值	0.5642	0.0925	9.4663	0.0416
仿真数据辨识值	0.6219	0.1017	8.3293	0.0381
灵敏度仿真值	0.7240	0.6817	0.8232	0.5647
灵敏度计算值	0.7343	0.6877	0.8576	0.6195
误差(%)	1.40	0.87	4.01	8.85

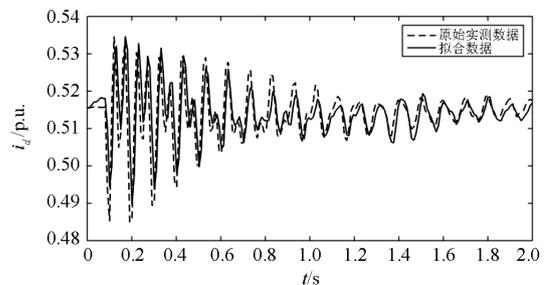


图3 原始数据拟合效果

Fig. 3 Fitting curve of initial data

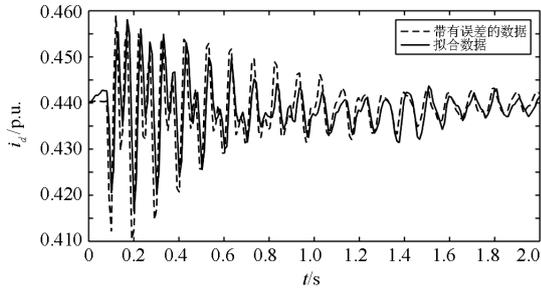


图 4 带有误差数据拟合效果  
Fig. 4 Fitting curve of error data

由表 1、表 2 的灵敏度的计算结果可得, 受到电流数据误差影响程度最大的是稳态参数, 其次是暂态、次暂态参数, 常数  $k$  不受到电流误差的影响。由于灵敏度计算值考虑了最恶劣的情况, 一般会偏大一些, 但通过相对误差的比对来看, 误差可以接受。本文得到的参数受到电流误差的影响程度的结果与文献[13]中得到的参数受功角偏差的影响程度的结果类似, 由此也进一步说明了文中所用分析方法与计算结果的有效性。

## 5 结论

本文推导了参数与数据误差的灵敏度计算公式, 给出了电流数据误差对参数辨识敏感性大小的估计方法, 并把此方法类推至其他数据误差的处理。根据实测 PMU 数据计算了在正序电流有 0.1 单位误差时参数对数据的灵敏度, 判断了受到数据扰动较大的参数并计算了相应数值。通过计算结果, 得到以下结论:

1) 稳态参数  $x_d$  受到电流数据误差的影响较大, 而稳态参数  $k$  不受电流误差的影响, 由此可见稳态参数与暂态参数分别辨识的方法更为可靠, 从而尽可能减小  $x_d$  受到数据误差的影响, 并且由于  $k$  不受电流误差的影响, 由稳态数据所得的辨识值在暂态数据辨识中可直接使用。

2) 参数受电流数据误差的影响程度从大到小依次为稳态, 暂态, 次暂态, 次暂态参数的辨识受到数据误差的影响较小, 但稳态参数受到数据误差的影响不可忽视。

3) 由仿真值与计算值的误差比较可知, 计算公式可靠。公式的计算结果能够根据 PMU 设备正常运行时的实际情况为辨识提供一定的参考, 当辨识结果出现较大波动时, 应当考虑设备存在数据误差的影响, 从而为调度决策提供理论依据。

## 附录 A

引理 1 对向量函数  $\varphi(t)$ , 在  $[0, t]$  上可积, 则有

$$\left( \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right)^T \left( \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) \leq t \int_0^t \varphi^T(\tau) \varphi(\tau) d\tau$$

证明: 记  $\varphi(t) = (\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_m(t))^T$ , 则有

$$|\varphi(\tau_1)^T \varphi(\tau_2)| = \left| \sum_{k=1}^m \varphi_k(\tau_1)^T \varphi_k(\tau_2) \right| \leq$$

$$\sum_{k=1}^m |\varphi_k(\tau_1)^T \varphi_k(\tau_2)| \leq \frac{1}{2} \left( \sum_{k=1}^m \varphi_k(\tau_1)^2 + \sum_{k=1}^m \varphi_k(\tau_2)^2 \right)$$

从而,

$$\left( \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right)^T \left( \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) = \int_0^t \int_0^t \varphi(\tau_1)^T \varphi(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \leq$$

$$\int_0^t \int_0^t \frac{1}{2} \left( \sum_{k=1}^m \varphi_k(\tau_1)^2 + \sum_{k=1}^m \varphi_k(\tau_2)^2 \right) d\tau_1 d\tau_2 = t \int_0^t \varphi^T(\tau) \varphi(\tau) d\tau$$

证毕

## 参考文献

- [1] 任子晖, 刘昊岳, 徐进霞. 基于小波变换和改进 Prony 方法的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 1-7.  
REN Zihui, LIU Haoyue, XU Jinxia. Power quality disturbance analysis based on wavelet transform and improved Prony method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 1-7.
- [2] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-147.  
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-147.
- [3] 王茂海, 赵玉江, 齐霞, 等. 电网实际运行环境中相量测量装置性能在线评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 86-92.  
WANG Maohai, ZHAO Yujiang, QI Xia, et al. Proposal of index for PMU field performance evaluation in actual operating environment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 86-92.
- [4] 季文伟, 王茂海, 马平, 等. 基于实测 PMU 数据的风电综合负荷参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 42-47.  
JI Wenwei, WANG Maohai, MA Ping, et al. Wind power comprehensive load parameter identification based on PMU data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 42-47.
- [5] 李志强, 汤涌, 罗炜. 基于时频变换的同步发电机参数辨识中权函数选择与误差分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 828-835.  
LI Zhiqiang, TANG Yong, LUO Wei. Choice of weight

- function and error analysis for time-frequency transform based identification method of synchronous generator parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 828-835.
- [6] 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 area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [7] 林国汉, 章兢, 刘朝华, 等. 改进综合学习粒子群算法的PMSM参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(1): 51-57.  
LIN Guohan, ZHANG Jing, LIU Zhaohua, et al. Parameter identification of PMSM using improved comprehensive learning particle swarm optimization[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(1): 51-57.
- [8] 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 Lixia, JU Ping, GAO Yunhua, et al. Parameter estimation of synchronous generator based on park model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 50-56.
- [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] 孙元章, 杨新林. 电力系统动态灵敏度计算的伴随方程方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(3): 6-12.  
SUN Yuanzhang, YANG Xinlin. Adjoint equation methods for dynamic sensitivity calculation in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 6-12.
- [11] 赵晋泉, 钱莉, 陈刚. 一种基于EEAC和轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 9-14.  
ZHAO Jinquan, QIAN Li, CHEN Gang. A novel EEAC and sensitivity based model and algorithm of transient stability constrained optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 9-14.
- [12] 周鲲鹏, 陈允平. 运用轨迹灵敏度的电力系统动态安全控制[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 46-50.  
ZHOU Kunpeng, CHEN Yunping. Power system dynamic security control based on trajectory sensitivity[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 46-50.
- [13] 伍双喜, 吴文传, 张伯明, 等. 用PMU实测数据辨识同步发电机参数的关键问题[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 50-55.  
WU Shuangxi, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Key issues of synchronous generator parameter identification using PMU measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 50-55.
- [14] 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.
- [15] 汤涌. 基于电机参数的同步电机模型[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 47-51.  
TANG Yong. A discussion about standard parameter model of synchronous machine[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 47-51.
- [16] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 157-185.
- [17] 韩英铎, 严剑峰, 谢小荣, 等. 电力系统机电暂态过程主导动态参数的在线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 1-6.  
HAN Yingduo, YAN Jianfeng, XIE Xiaorong, et al. Research on the identification of dominant dynamic parameters of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 1-6.
- [18] 韩睿, 郑竞宏, 朱守真, 等. 基于灵敏度分析的同步发电机参数分步辨识策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 74-80.  
HAN Rui, ZHENG Jinghong, ZHU Shouzhen, et al. Step identification of synchronous generator parameters based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 74-80.

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-08-10

作者简介:

陈剑(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统灾变防治与灾害控制、电力系统稳定性; E-mail: sdqzjane316@gmail.com

王茂海(1976-), 男, 博士, 教授级高工, 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; E-mail: wmhmw@tom.com

刘连光(1954-), 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统灾变防治与灾害控制、电力系统分析与控制。E-mail: liulianguang@ncepu.edu.cn

(编辑 张爱琴)