

基于随机子空间的同步电机参数高精度辨识新方法

李玲¹, 李天云², 黄绍平¹, 金国彬¹

(1. 湖南工程学院 电气信息学院, 湖南省 湘潭市 411101;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

A High-Precision Approach to Identify Synchronous Generator Parameters Based on Stochastic Subspace Identification

LI Ling¹, LI Tianyun², HUANG Shaoping¹, JIN Guobin¹

(1. Department of Electrical and Information Engineering, Hunan Institute Engineering, Xiangtan 411101, Hunan Province, China;

2. School of Electric Engineering, Northeast China Dianli University, Jinlin 132012, Jinlin Province, China)

ABSTRACT: The stochastic subspace identification is applied to identification of synchronous generator parameters, and a new method to process three-phase short-circuit current based on stochastic subspace identification is proposed. The stochastic subspace identification is a method to identify model parameters of linear system in time-domain, it construct Hankel matrix by output data of the system and then the system matrix and output matrix are separated from state equation of the system, thus the modal parameters, including inherent frequency, damping ratio and oscillation modes, can be identified. Analyzing short-circuit current of synchronous generator by the proposed method, firstly the time constants are identified, then the cancellation of time constants is performed in turn to identify reactance parameters. Simulation analysis on simulation signals under the condition free of damping and noise and under the background with damping and that on three-phase short circuit current of synchronous generator are carried out respectively, and based on oscillation modes the automatic ordering of the system is implemented in the calculation. Comparison of the obtained parameter identification results with those by Prony method shows that the proposed method possesses strong anti-noise performance and the identification results by the proposed method are more accurate.

KEY WORDS: parameter identification; synchronous machine; stochastic subspace identification; modal parameter

摘要: 将随机子空间辨识方法应用于同步电机的参数辨识中, 提出基于随机子空间辨识的三相短路电流处理新方法。随机子空间辨识是一种线性系统时域模态参数识别方法, 利用系统输出的数据构造汉克矩阵, 进而分离出系统状态方程的系统矩阵和输出矩阵, 从而识别系统的模态参数: 固有频

率、阻尼比、振型。应用该法分析同步电机短路电流, 首先识别时间常数, 进而依次消去时间常数识别各电抗参数。分别针对无阻尼、噪声和有阻尼背景下的仿真信号和同步电机三相短路电流进行仿真分析, 计算中基于振型实现系统自动定阶, 同时与普罗尼法作对比, 结果表明该法抗噪性强、检测精度高。

关键词: 参数辨识; 同步电机; 随机子空间辨识; 模态参数

0 引言

同步电机是电力系统中重要的设备, 同步电机参数辨识的准确性, 直接影响到电机设计、电力系统分析计算、电力系统稳定运行及控制^[1-8]。同步电机空载状态下出口突然三相短路试验作为电机出厂时必须完成的考核试验, 是测取同步电机瞬态参数较为理想的方法^[2], 也是国标 GB/T-1029、GB577-89 推荐使用的方法。传统同步电机瞬态参数辨识方法是通过对短路电流曲线上上下包络线加减来获取其周期分量和非周期分量, 再应用最小二乘法拟合求得瞬态参数, 但该方法精度不高^[9]。文献[10]采用最小二乘法辨识同步电机参数, 算法简单, 但检测误差较大; 文献[11]应用普罗尼方法辨识同步电机的参数, 但该方法对噪声敏感, 辨识结果误差较大; 文献[9]首先应用小波变换提取同步电机短路电流的直流量、基波分量及二次谐波分量, 在此基础上采用普罗尼法作参数辨识, 该法的辨识精度得到改善, 但小波基的合适选取使得该方法受到一定限制; 文献[12]结合小波变换和神经网络辨识同步电机参数, 该法的辨识结果同样受限于小波基的合适选取。应用希尔伯特-黄变换方法辨识同步电机参数分析精度较高, 但其经验模态分解存在

端点效应问题^[13]。总体最小二乘旋转不变技术法是现代谱估计方法，能高精度检测信号的频率，但同步电机其他参数的辨识取决于分析方法的适当选取^[14-15]。因此，需寻求同步电机参数的高精度识别方法。

振动信号处理领域有一先进且较为成熟的参数识别方法——随机子空间辨识(stochastic subspace identification, SSI)^[16]。该法是一种线性系统识别方法，利用系统的输出数据构造汉克矩阵或类似矩阵，进而分离出系统状态方程的系统矩阵和输出矩阵，从而识别系统的模态参数。

本文应用基于参考点的 SSI 算法实现同步电机各时间常数、电抗等参数的辨识，并依据振型实现系统的自动定阶，分别针对无阻尼、噪声和有阻尼背景下的仿真信号和同步电机三相短路电流进行仿真分析，同时与普罗尼法进行仿真对比，以验证该方法的有效性。

1 随机子空间理论

1.1 随机子空间辨识

受白噪声激励的结构动力系统用一离散随机状态空间模型描述

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (1)$$

$$E \begin{bmatrix} \mathbf{w}_p \\ \mathbf{v}_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_p^T & \mathbf{v}_q^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & \mathbf{R} \end{bmatrix} \delta_{pq} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{y}_k \in \mathbf{R}^{l \times 1}$ 是第 l 个测点在第 $k(k \in N)$ 个采样间隔 Δt 的输出向量； $\mathbf{x}_k \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 是系统在采样时刻 $k\Delta t$ 的状态向量， n 是系统的阶数； $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是状态矩阵； $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{l \times n}$ 是输出矩阵； E 是数学期望符号； δ_{pq} 是 kronecker 函数； $\mathbf{w}_k \in \mathbf{R}^{l \times 1}$ 是过程噪声； $\mathbf{v}_k \in \mathbf{R}^{l \times 1}$ 是测量噪声； \mathbf{w}_k 与 \mathbf{v}_k 均假定为白噪声，且 $E[\mathbf{w}_k]=0$ ， $E[\mathbf{v}_k]=0$ 。 $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 、 $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{n \times l}$ 、 $\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{l \times l}$ 是噪声序列 \mathbf{w}_k 、 \mathbf{v}_k 的协方差矩阵。构造汉克矩阵为

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0^{\text{ref}} & \mathbf{y}_1^{\text{ref}} & \cdots & \mathbf{y}_{j-1}^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_1^{\text{ref}} & \mathbf{y}_2^{\text{ref}} & \cdots & \mathbf{y}_j^{\text{ref}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}_{i-1}^{\text{ref}} & \mathbf{y}_i^{\text{ref}} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j-2}^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_i & \mathbf{y}_{i+1} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j-1} \\ \mathbf{y}_{i+1} & \mathbf{y}_{i+2} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}_{2i-1} & \mathbf{y}_{2i} & \cdots & \mathbf{y}_{2i+j-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{\text{ref}} \\ \mathbf{Y}_f \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $\mathbf{y}_i^{\text{ref}}$ 为 r 个参考点测试通道在第 k 个采样间隔的输出向量； $\mathbf{y}_i^{\text{ref}} = \mathbf{L}\mathbf{y}_i$ ， $\mathbf{y}_i^{\text{ref}} \in \mathbf{R}^{r \times 1}$ ， \mathbf{L} 为参考点

选择矩阵； $r(r \leq l)$ 为每组参考点数^[16]。

对 \mathbf{H} 作 \mathbf{LQ} 分解

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{\text{ref}} \\ \mathbf{Y}_f \end{bmatrix} = \mathbf{L}\mathbf{Q}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{22}^{r \times r_i} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{L}_{22}^{r \times r} & \mathbf{L}_{22}^{r \times r} & 0 & 0 \\ \mathbf{L}_{31}^{(l-r) \times r_i} & \mathbf{L}_{32}^{(l-r) \times r} & \mathbf{L}_{33}^{(l-r) \times (l-r)} & 0 \\ \mathbf{L}_{41}^{l(i-1) \times r_i} & \mathbf{L}_{42}^{l(i-1) \times r} & \mathbf{L}_{43}^{l(i-1) \times (l-r)} & \mathbf{L}_{44}^{l(i-1) \times l(i-1)} \end{bmatrix} \mathbf{Q}^T \quad (4)$$

式中： \mathbf{L} 矩阵块的维数标注于右上角。 $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{(l+r) \times j}$ 为标准正交矩阵。对矩阵 $\mathbf{L}_i = [\mathbf{L}_{21}^T \ \mathbf{L}_{31}^T \ \mathbf{L}_{41}^T]^T$ 作奇异值分解

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T = [\mathbf{U}_1 \ \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 是正交矩阵； $\mathbf{S}_1 \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是奇异值组成的对角矩阵，且奇异值沿对角线降序排列； $n < ri$ ； \mathbf{S}_2 是噪声导致的虚假模态对应的奇异值。计算系统矩阵 \mathbf{A} 和输出矩阵 \mathbf{C}

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{i-l}^+ (\mathbf{L}_{41} \ \mathbf{L}_{42} \ 0) \\ \mathbf{L}_{21} \ \mathbf{L}_{22} \ 0 \\ \mathbf{L}_{31} \ \mathbf{L}_{31} \ \mathbf{L}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{i-l}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{21} \ 0 \ 0 \\ \mathbf{L}_{31} \ 0 \ 0 \\ \mathbf{L}_{41} \ 0 \ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}^+ \quad (6)$$

式中： $[\cdot]^+$ 表示求广义逆； $\mathbf{O}_i = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2}$ 是可观测矩阵； \mathbf{O}_{i-l} 由 \mathbf{O}_i 去掉 l 行得到。矩阵 \mathbf{A} 特征值分解

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Psi}\mathbf{\Lambda}\mathbf{\Psi}^{-1} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_i) \in \mathbf{C}^{n \times n}$ ， λ_i 为 \mathbf{A} 的特征值， $i=1, \dots, n$ 。

令 $\lambda_i^c = \ln \lambda_i / (\Delta t)$ ，则系统无阻尼特征频率 f_i 、阻尼比 ξ_i 、结构振型 ϕ_i 分别是

$$f_i = |\lambda_i^c| / (2\pi) \quad (8)$$

$$\xi_i = \text{real}(\lambda_i^c) / |\lambda_i^c| \quad (9)$$

$$\mathbf{\Phi} = \mathbf{C}\mathbf{\Psi} = [\phi_1 \ \cdots \ \phi_n] \quad (10)$$

式中 $|\cdot|$ 表示求模。

1.2 系统的定阶

从 1.1 节可知，随机子空间辨识方法仅需确定系统的阶数 n 。但是由于噪声的影响， \mathbf{S}_2 阵的对角元素并不都等于零，因此 n 取决于非零奇异值数量的合适选取， n 值选的偏大则会出现虚假模态，反之则会出现模态遗漏。 n 的选取常应用奇异值跳跃法、奇异熵及标准化奇异熵^[16]，但实际应用中效果并不十分理想。本文中应用随机子空间辨识法分析单通道信号，分析得到的振型对应于电流信号各频率分量的幅值^[17]，因此系统的定阶问题转化为各频率分量幅值的截断阈值选定问题。

2 同步电机的参数辨识

同步电机在空载情况下发生突然三相短路，A 相的短路电流^[18]表示为

$$i_a = -E/2e^{-t/T_a} [(1/x_d''+1/x_q'')\cos\phi_0 + (1/x_d''-1/x_q'')\cos(2\omega t + \phi_0)] + [(1/x_d''-1/x_d')e^{-t/T_d'} + (1/x_d'-1/x_d)e^{-t/T_d'} + 1/x_d]E\cos(\omega t + \phi_0) + e(t) \quad (11)$$

式中前 3 部分分别为直流分量、二次谐波分量和基波分量，最后一部分为噪声。基于 SSI 实现同步电机参数辨识需要以下 2 个步骤：

1) 直流分量、二次谐波分量分析。基于 SSI 分析有阻尼信号时，直接求得的幅值由于受阻尼的影响将不准确，因此，文中首先基于 SSI 分析得到二次谐波分量的频率及其对应的时间常数 T_a ；然后，消去由它决定的阻尼衰减 e^{-t/T_a} ，这样就可以求得直流分量和二次谐波分量的幅值，从而实现直轴次暂态电抗和交轴次暂态电抗的辨识。

2) 基波分量分析。直流分量、二次谐波分量分析完成之后，可以将已知的直流分量、二次谐波分量部分从 A 相电流中剔除掉，然后辨识基波分量中的参数。对比基波分量三部分幅值的数量级和两时间常数的数量级，可按照 1) 中类似的方法先行准确辨识一部分的时间常数及电抗参数，然后再求另一时间常数及电抗参数。

按照以上 2 步辨识后经过简单加减运算即可求得最终的同步电机瞬态参数。

3 仿真

3.1 振型幅值法自动定阶

电流信号为

$$y(t) = e^{-5t} \cos(2\pi 50.5t + \pi/3) + 0.3e^{-t} \cos(2\pi 100.1t) + e_1$$

式中： e_1 是白噪声，信噪比是 34.27 dB。采样频率为 1 kHz，假定系统阶数是 8，采样数据时间为 0~0.1s。分析结果如图 1 所示。

图 1(b)是奇异值矩阵分解的奇异值柱状图，从图 1(b)中可得 2 阶到 3 阶处奇异值有跳跃，但实际应用中跳跃的程度定量具很大主观性；图 1(c)是振型图，据图 1(c)明显确定系统的阶数是 4。

3.2 噪声背景下的参数辨识

电流信号为

$$y(t) = 0.2 \cos(2\pi 28t) + \cos(2\pi 50.2t) + e_1$$

信噪比是 13.48 dB，采样频率为 1 kHz，采样数据时间为 0~0.3s，假定系统阶数是 30。噪声背景下应用 SSI 法的参数辨识结果如图 2 及表 1 所示。

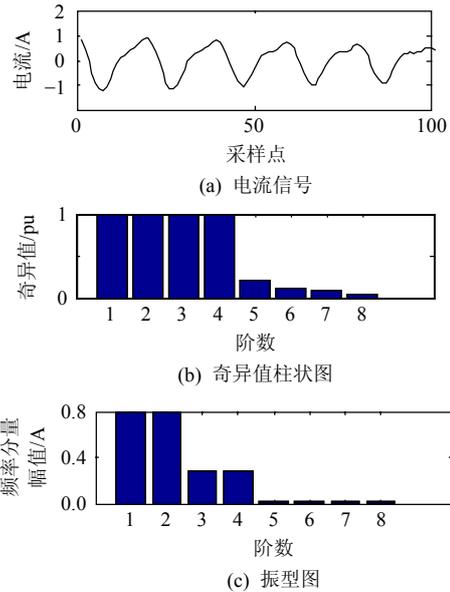


图 1 振型法系统定阶

Fig. 1 Determining the order of system by model shape

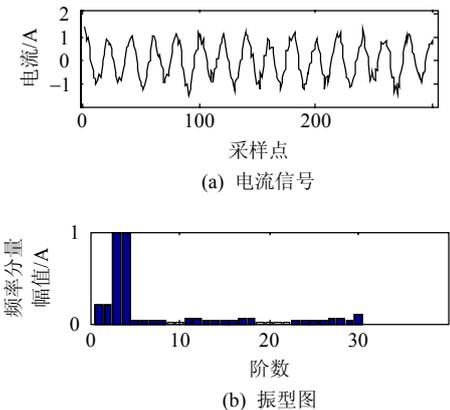


图 2 噪声背景下的参数辨识

Fig. 2 Parameters identification in noise

表 1 噪声背景下参数辨识结果比较

Tab. 1 Result of parameters identification in noise

参数	真实值	SSI 法	普罗尼法
频率/Hz	28.00	27.98	27.43
	50.20	50.25	50.21
幅值/A	0.20	0.21	0.22
	1.00	1.00	0.97
衰减因子/rad	0.00	1.07	-4.40
	0.00	-0.12	-0.32

据图 2(b)可确定系统阶数是 4。表 1 中，普罗尼分析方法依据各频率分量能量所占比重有效剔除虚假频率分量。结果表明：基于 SSI 方法的检测结果只有 50.2 Hz 频率分量的检测结果误差稍大于普罗尼方法，其余的参数检测精度明显优于普罗尼法，因此，基于 SSI 方法的参数辨识具强抗噪声性。

3.3 有阻尼信号的参数辨识

应用 SSI 辨识有阻尼信号的幅值参数时，得到的幅值受阻尼影响，需要用第 2 章所述方法进行

修正。

电流信号为

$$y(t) = e^{-14t} \cos(2\pi 50t) + 0.2e^{-2t} \cos(2\pi 100t) + 0.1e^{-t} + e_1$$

信噪比是 48.62dB, 采样频率 1kHz, 采样数据时间 0~0.3 s, 假定系统阶数是 12。有阻尼信号的 SSI、普罗尼法分析结果如图 3 和表 2 所示。

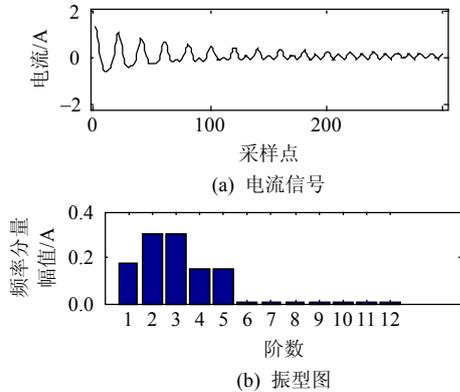


图 3 有阻尼信号参数辨识

Fig. 3 Parameters identification for damping signal

表 2 有阻尼信号参数辨识结果比较

Tab. 2 Result of parameters identification in damping signal

参数	真实值	SSI 法	普罗尼法
频率/Hz	0.00	0.01	0.00
	50.00	50.03	50.00
	100.00	100.00	100.00
幅值/A	0.10	0.10	0.10
	1.00	0.99	1.00
	0.20	0.20	0.20
衰减因子/rad	-1.00	-1.03	-1.24
	-14.00	-13.89	-14.08
	-2.00	-2.00	-2.02

从图 2(b)的振型图中明显可以判定阶数是 5, 其中第 1 阶对应直流量。对比 2 种方法的分析结果可见: SSI 法和普罗尼法辨识的频率及幅值的精度相当, 但应用本文方法识别衰减因子的精度明显高于普罗尼法。

3.4 同步电机的参数辨识

为验证本文提出方法的有效性, 以一理想同步电机三相短路电流为例进行仿真分析。具体参数及分析结果如图 4 及表 3 所示。其中, 信噪比是 74.14dB, 采样频率 1kHz, 采样数据时间 0~1.2s,

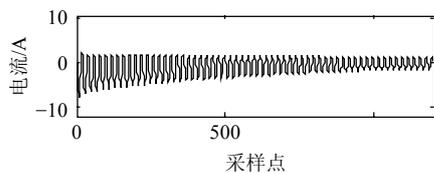


图 4 同步电机三相短路电流

Fig. 4 Three phase short-cut current of synchronous machine

表 3 同步电机参数辨识结果比较

Tab. 3 Result of parameters identification of synchronous machine

参数	真实值	SSI 法	普罗尼法
T_d/s	0.434 8	0.434 6	0.434 6; 0.433 2
T'_d/s	0.825 0	0.824 8	1.000 0
T''_d/s	0.017 0	0.016 9	0.017 6
X'_d/pu	0.229 0	0.232 2	0.230 0
X''_d/pu	0.183 0	0.183 0	0.183 0
X''_q/pu	0.185 5	0.185 5	0.185 5

假定系统阶数是 30, 基频取 50Hz, $E=1$ (标么值), $x_d=2.169$ (标么值), 初相位是 $\pi/3$ 。应用普罗尼法辨识时间常数 T_a , 基于直流量和二次谐波分量的辨识结果依次标于表 3 中, 2 者识别的结果有较大出入; 时间常数 T'_d 的识别误差较大。而应用本文方法的辨识结果整体上明显优于普罗尼法。

4 结论

1) SSI 基于振型幅值法能够实现自动、准确的系统定阶。

2) 基于随机子空间辨识方法检测频率、幅值和衰减因子具有强抗噪声性, 抗噪性能优于普罗尼法。

3) 随机子空间辨识方法能够实现平稳频率分量的频率、幅值和衰减因子的高精度检测, 特别是频率和衰减因子的识别不受阻尼的影响, 检测精度优于普罗尼方法。

参考文献

- [1] 孙宇光, 王祥珩, 桂林, 等. 场路耦合法计算同步发电机定子绕组内部故障的暂态过程[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 136-141.
Sun Yuguang, Wang Xiangheng, Gui Lin, et al. Transient calculation of stator's internal faults in synchronous generator using FEM coupled with multi-loop method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 136-141(in Chinese).
- [2] 马宏忠, 胡虔生, 方瑞明. 同步电机的瞬变参数测量[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(2): 8-12.
Ma Hongzhong, Hu Qiansheng, Fang Ruiming. Transient parameter measurement of synchronous machine[J]. Proceedings of EPSA, 2000, 12(2): 8-12(in Chinese).
- [3] 李伟, 杨红霞, 熊佩华, 等. 基于 PMU 实测数据调整发电机模型参数的方法[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 89-93.
Li Wei, Yang Hongxia, Xiong Peihua, et al. Parameter adjustment of generator model by use of PMU-measured data[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 89-93(in Chinese).
- [4] 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 models of synchronous machine[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 47-51(in Chinese).
- [5] 汤涌. 简化同步电机模型中的运动方程[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 28-31.

- Tang Yong. A discussion about equations of motion of simplified synchronous machine models[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 28-31(in Chinese).
- [6] 丁孝华, 孙国城, 顾锦汉. 一种同步发电机功角测量的同步电抗折算法[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 188-190.
- Ding Xiaohua, Sun Guocheng, Gu Jinhan. A new synchronous reactance conversion approach to power angle measurement of synchronous generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement): 188-190(in Chinese).
- [7] 丁坚勇, 陈允平. 基于 ELMAN 神经网络的同步电机动态参数在线辨识[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 22-25.
- Ding Jianyong, Chen Yunping. On-line dynamic parameter identification of synchronous machines based on ELMAN neural networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 22-25(in Chinese).
- [8] 周济, 罗应立, 崔翔. 一种改进的遗传算法及其在同步电机辨识中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 16-19.
- Zhou Ji, Luo Yingli, Cui Xiang. An improved genetic algorithm and its application in synchronous machine identification[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 16-19(in Chinese).
- [9] 吴旭升, 马伟明, 王公宝, 等. 基于小波变换和 Prony 算法的同步电机参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 38-42.
- Wu Xusheng, Ma Weiming, Wang Gongbao, et al. Parameter identification of synchronous machine based on wavelet transform and Prony algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 38-42(in Chinese).
- [10] Emile M, Slim T, Gérard C. Synchronous generator modelling and parameters estimation using least squares method[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(6): 678-689.
- [11] 苏小林, 周双喜. Prony 法在同步发电机参数辨识中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(9): 1-4.
- Su Xiaolin, Zhou Shuangxi. Application of Prony method to parameter identification of synchronous generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(9): 1-4(in Chinese).
- [12] 王亮, 王公宝, 马伟明, 等. 基于小波变换和神经网络的同步电机参数辨识新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 1-6.
- Wang Liang, Wang Gongbao, Ma Weiming, et al. A new method for parameters identification of synchronous electric machine based on wavelet transform and neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 1-6(in Chinese).
- [13] 李天云, 高磊, 陈晓东, 等. 基于 HHT 的同步电机参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 153-158.
- Li Tianyun, Gao Lei, Chen Xiaodong, et al. Parameter identification of synchronous machine based on Hilbert-Huang transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 153-158(in Chinese).
- [14] 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 Tianyun, 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(in Chinese).
- [15] 马秉伟, 周莉. 基于 TLS_ESPRIT 算法和支持向量机的间谐波检测[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1468-1471.
- Ma Bingwei, Zhou Li. Interharmonics detection based on TLS-ESPRIT and SVM algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1468-1471(in Chinese).
- [16] 肖祥, 任伟新. 实时工作模态参数数据驱动随机子空间识别[J]. 振动与冲击, 2009, 28(8): 148-153.
- Xiao Xiang, Ren Weixin. Improved data driven stochastic subspace identification of online operational modal parameter[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(8): 148-153(in Chinese).
- [17] 李恒增, 徐新济. 结构力学(下册)[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004: 200-233.
- [18] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M] 北京: 清华大学出版社, 1993: 90-110.



李玲

收稿日期: 2011-03-07。

作者简介:

李玲(1978), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力系统电能质量的分析, E-mail: muziwangling@126.com;

李天云(1945), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为自动控制理论、信号处理、非线性系统理论在电力系统中的应用;

黄绍平(1963), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电能质量控制、电力系统分析;

金国彬(1977), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为信号处理、非线性系统理论在电力系统中的应用。

(责任编辑 褚晓杰)