

# 基于 AOK-TFR 和 TLS-ESPRIT 的电压闪变参数提取方法

杨海霞, 王永宏, 曾丰

(华北电网张家口供电公司, 河北 张家口 075000)

**摘要:** 针对统计评价的指标不能给出电压闪变具体参数的问题, 将 TLS-ESPRIT (总体最小二乘-旋转矢量不变技术) 和 AOK-TFR (自适应核最优时频分布) 引入到电压闪变参数的求取中, 闪变参数的提取可转化为求取一系列边频分量参数的问题。首先应用 AOK-TFR 进行闪变类型的判别, 然后将电压信号数据形成的 HANKEL 矩阵通过奇异值分解进行信号子空间和噪声子空间的划分, 通过 TLS 的再次消噪和抗干扰处理, 提高了闪变参数提取的精度。仿真算例表明, 在周期性和暂态电压闪变信号中, 该方法仍具有较高的精度。实例分析进一步验证了该法的可行性和有效性。

**关键词:** 电压闪变; 总体最小二乘-旋转矢量不变技术; 奇异值分解; 子空间划分; 自适应核时频分布

## Extracting the parameters of voltage flicker based on AOK-TFR and TLS-ESPRIT

YANG Hai-xia, WANG Yong-hong, ZENG Feng

(Zhangjiakou Power Supply Company, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** Because International Electro Technical Commission standard can't get the parameters of flicker, this paper obtains the parameters in TLS-ESPRIT (total least squares-estimation of signal parameters via rotational invariance technique) and AOK-TFR (adaptive kernel time-frequency distribution). This paper judges the type of voltage flicker according to AOK-TFR and applies TLS-ESPRIT to obtain the parameters of side-frequency. This method divides HANKEL matrix which is decomposed by singular value decomposition into signal subspace and noise subspace and is processed by TLS in computing, which improves the capacity of flicker parameters extracting. The simulation example demonstrates that this method is capable of high precision in periodical and transient flicker signals. The actual example proves that this method is feasible and available.

**Key words:** voltage flicker; total least squares-estimation of signal parameters via rotational invariance technique; singular value decomposition; subspace-partition; adaptive optimal kernel time-frequency distribution

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0029-06

## 0 引言

电压闪变是衡量电能质量的一个重要方面。随着国民经济的发展, 电力系统冲击性负荷的广泛应用, 使电力系统中存在的电压波动, 电压闪变日趋严重。在电压波动, 闪变严重时可能使某些重要电子仪器、控制系统或保护装置误动作, 故电压闪变问题越来越引起人们的重视<sup>[1]</sup>。为了抑制电压波动和闪变, 电力系统中引入了一定的静止无功补偿设备, 而这些设备均需要准确的闪变参数, 以提供正确的治理决策<sup>[2]</sup>。

判断闪变检测有无最直接的方法是通过白炽灯观察, 但这种方法不能给出闪变的具体参数。常用的电压闪变的测试方法有半波有效值法、平方解调法和全波整流法<sup>[3]</sup> 然而半波有效值法需将积分区间定在半个工频周期之内, 实现起来比较困难。而设计

严格的带通滤波器是平方解调法和全波整流法的关键。文献[4-6]中均是用小波变换提取闪变信号, 该类方法的共同缺点就是小波基的选择问题, 不可能找到一种与信号完全匹配的小波基, 小波基的选择, 大多使用都采用试验的方法。文献[7]提出了一种基于独立分量技术 (ICA) 与同步滤波相结合的方法, 但由于 ICA 算法对噪声敏感, 使该方法的使用同样也受到了限制。为此, 需寻找一种新的提取闪变信号或参数的方法。

Esprit (旋转矢量不变技术) 是阵列信号处理的一种方法, 用来解决波达方向估计问题<sup>[8]</sup>。目前, 已被应用在电力系统的振荡模态参数提取中<sup>[10]</sup>。本文利用 TLS-ESPRIT 方法进行闪变信号参数的提取, 对周期闪变信号, 可直接使用该法提取闪变参数; 对于短时暂态闪变信号, 与自适应最优核时频分布相结合, 进行闪变参数的提取。仿真信号和实

例信号均验证了该法的可行性和有效性。

## 1 电压闪变的数学模型

具有波动和闪变的电网电压可以看成以工频电压为载波、其电压的均方根值或峰值受到以电压波动分量作为调幅波的调幅波的调制。定义波动调制信号为  $u_f(t)$ 。电压闪变信号  $u(t)$  可以用  $u_f(t)$  对一工频正弦信号线性振幅调制表示：

$$u(t) = (u_0 + u_f(t))\cos(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中： $u_0$  为调幅波中的直流分量， $u_f(t)$  可以是单频或是多频正弦信号的叠加。

当  $u(t)$  中只包含单频调制信号时，设调制信号的频率为  $f_1$ 、幅值为  $u_1$ ，则  $u(t)$  为

$$u(t) = (u_0 + u_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1))\cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (2)$$

将上式展开得

$$u(t) = u_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} u_1 \cos(2\pi(f_0 - f_1)t + (\varphi_0 - \varphi_1)) + \frac{1}{2} u_1 \cos(2\pi(f_0 + f_1)t + (\varphi_0 + \varphi_1)) \quad (3)$$

可见， $u(t)$  可展开为一系列余弦信号的叠加。根据欧拉公式，可划为式一系列指数信号和的形式。

## 2 TLS-ESPRIT 算法及其时变特性分析

### 2.1 TLS-ESPRIT 方法介绍

ESPRIT 方法最早是由 ROY 等人<sup>[8]</sup>于 1989 年提出的，假设信号由  $p$  个谐波和一个加性噪声组成，

$$x(n) = \sum_{k=1}^p s_k e^{(j\omega_k + \sigma_k)n} + w(n) \quad (4)$$

式中： $s_k = a_k e^{j\theta_k}$ ， $a_k$  和  $\theta_k$  分别为第  $k$  个谐波的幅值和初始相位， $s_k$ ， $\omega_k$ ， $\sigma_k$  分别为第  $k$  个谐波的幅值，频率和衰减因子， $w(n)$  为高斯白噪声。当信号为实信号时， $p$  为信号实际含有的实正弦分量个数的两倍。

对于  $Q$  个快拍数据式 (4) 可以写成

$$X = [x(0), \dots, x(Q-1)]^T = AS + W(n) \quad (5)$$

其中： $S$  为信号复幅值矩阵。

$$S = [s_1, \dots, s_p]^T, \quad A = [\alpha(\omega_1), \dots, \alpha(\omega_p)]$$

$$\alpha(\omega_k) = [1, \dots, e^{j(Q-1)\omega_k}]^T.$$

$$\text{令 } A = \begin{bmatrix} A_1 \\ \text{最后一行} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{第一行} \\ A_2 \end{bmatrix}$$

据  $A$  结构可知

$$A_2 = A_1 \Phi \quad (6)$$

其中：旋转矩阵  $\Phi = \text{diag}(e^{j\omega_1 + \sigma_1}, \dots, e^{j\omega_p + \sigma_p})$ 。

根据旋转矩阵可求出信号的频率，从而进一步可求出某一频率信号的所有参数<sup>[8]</sup>。

ESPRIT 的实现方法有很多种，本文采用根据 HANKEL 矩阵计算信号参数的方法。具体实现步骤如下：

(1) 由采样矩阵形成如下 HANKEL 矩阵

$$X_{(Q-L) \times (L+1)} = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(L) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(Q-L-1) & x(Q-L) & \dots & x(Q-1) \end{bmatrix}$$

$L$  通常取  $N/4 \sim N/3$ 。

(2) 对  $X$  进行奇异值分解

$$X = U \Sigma V^T \quad (7)$$

$\Sigma$  对角元素为  $\xi_1 \geq \xi_2, \dots, \geq \xi_p > \xi_{p+1} \approx \dots, \xi_{\min(N, M)} \approx 0$ ，此时，可将  $V$  按奇异值大小划分为信号子空间  $V_1$  和噪声子空间  $V_2$ 。 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p$  所对应的右奇异向量对应于信号子空间  $V_1$  的各列向量，定义  $V_2$  为噪声子空间，使  $V = [V_1 \ V_2]$ 。

(3) TLS (总体最小二乘求解)：

令  $V^\uparrow$  和  $V^\downarrow$  分别表示信号子空间矩阵  $V_1$  删除第一行和第二行的矩阵，有如下方程：

$$(V^\uparrow + e_1) = (V^\downarrow + e_2)\phi \quad (8)$$

$e_1, e_2$  为扰动矩阵 (可认为信号中存在的噪声和其他一些干扰)，求方程 (8) 的解，即使扰动矩阵  $D = [-e_1, e_2]$  的 Frobenius 范数取得最小的、最优的  $\phi$  值，这是 TLS 的求解思想<sup>[10]</sup>。对  $[V^\downarrow \ V^\uparrow]$  进行奇异值分解

$$[V^\downarrow \ V^\uparrow] = R \Lambda P^T \quad (9)$$

式 (9) 中, 将  $\mathbf{P}$  划分为  $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}$ , 通过计算  $P_{11}P_{21}^{-1}$  的特征值  $\lambda_k (k=1, 2, \dots, p)$  后, 便可计算出原信号中各分量的频率, 衰减因子, 计算公式如下:

$$f_k = \frac{\arg(\lambda_k)}{2\pi T_s} \quad (10)$$

$$\sigma_k = \frac{\ln|\lambda_k|}{T_s} \quad (11)$$

$$\mathbf{X} = \lambda \mathbf{S}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda_1^{Q-1} & \lambda_2^{Q-1} & \dots & \lambda_p^{Q-1} \end{bmatrix}, \text{ 据最小二乘法,}$$

$\mathbf{S} = (\lambda^T \lambda)^{-1} \lambda^T \mathbf{Y}$ , 从而, 可估计出信号中各分量的幅值和相位:

$$a_k = 2|\mathbf{S}| \quad (12)$$

### 1.2 信号子空间的划分及时频分析

信号子空间的划分即是求 HANKEL 矩阵  $\mathbf{X}$  有效秩  $p$ 。对于不含噪声的信号,  $\mathbf{X}$  的非零奇异值的个数也就是信源数目的个数。对于含噪声的信号, 只要噪声较闪变信号弱, 也可通过奇异值分解的原理来进行求解。如根据式 (7) 得出得奇异值

$$\xi_i (i=1, \dots, \min(Q-L, L+1))$$

只要满足

$$\begin{cases} \frac{\xi_i}{\xi_{i+1}} > k \\ \frac{\xi_i}{\xi_{i-1}} < k \end{cases} \quad (13)$$

此时, 可认为  $p=i$ 。  $k$  的确定可根据观察奇异值的变化趋势人为设定。考虑下面电压闪变信号。

$$u(t) = (1 + u_1 p(t) \cos(2\pi f_1 t)) \cdot \cos(2p_i f_0 t) \quad (14)$$

考虑周期性闪变和暂态闪变两种情况, 周期性

闪变  $M=0.1, u_1=0.1, p(t)=1, f_1=10 \text{ Hz}, f_0=50 \text{ Hz}$ ; 暂态闪变  $0.4 < t < 0.7 \text{ s}, p(t)=1$ , 其他时刻  $p(t)=0$ 。取  $f_s=1000 \text{ Hz}$ , 按照式 (7) 求出的两种闪变情况下的 HANKEL 矩阵的奇异值变化曲线如图 1、图 2 所示(取前 20 个奇异值)。

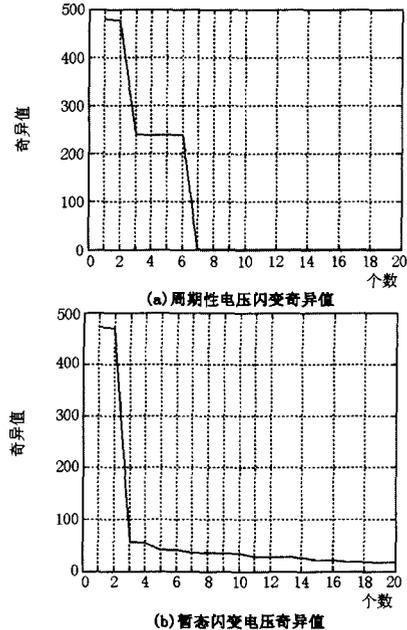


图 1 闪变信号奇异值变化曲线

Fig.1 Singular value curve of flicker signal

图 1(a)、(b)可分析可知, 周期性闪变信号在第 6 个以后奇异值已经接近为 0, 此时  $p$  应取 6, 与理论分析一致。而暂态电压闪变信号, 极容易将  $p$  取 2, 此时, 计算出的参数就会出现严重的错误。因此, 在应用 TLS-ESPRIT 进行闪变参数提取时, 首先应对闪变电压信号时变特性进行判断。而自适应最优核时频分布已被证明是一种优于小波变换的时频分析工具<sup>[11]</sup>, 故引入自适应最优核时频分布来定位闪变时刻。自适应最优核时频 (AOK TFR) 可表示为:

$$P_{AOK}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint A(t; \theta, \tau) \Phi_{opt}(t; \theta, \tau) \cdot e^{-j\theta t - j\omega \tau} d\theta d\tau \quad (15)$$

$A(t; \theta, \tau)$  为模糊函数, 是被窗函数截断的一小段信号的模糊函数。

$$A(t; \theta, \tau) = \int s^*(u - \frac{\tau}{2}) \omega^*(u - t - \frac{\tau}{2}) s(u + \frac{\tau}{2}) \cdot$$

$$\omega(u-t+\frac{\tau}{2})e^{j\theta u} du \quad (16)$$

式中： $\omega(u)$  为对称的窗函数； $t$  为  $\omega(u)$  的中心位置。令  $|u| > T$  ( $T$  是窗长) 时， $\omega(u) = 0$ 。对于信号的任意细节部分，短时模糊函数都可以准确地刻画出来。对一多分量信号来说，它的模糊函数的自分量分布在原点附近，互分量往往远离原点，因此，式 (15) 中第二项  $\Phi_{opt}(t; \theta, \tau)$  为一低通函数，可以有效抑制互分量的影响，提高时频分辨率。其具体参数设置可参考文献[11]。自适应最优核核时频分布的引入可准确确定电压是否发生闪变和发生闪变的时刻。其与 TLS-ESPRIT 相结合提取闪变参数的流程图如图 2 所示。



图 2 提取闪变参数流程图  
Fig.2 Flow chart of extracting the parameters

### 3 仿真算例

#### 3.1 周期性闪变信号

假设一电压闪变信号为

$$u(t) = [1 + u_1 * p(t) \cos(2 * \pi * f_1 * t)] * \cos(2 * \pi * f_0 * t) \quad (17)$$

取  $f_s = 1000$ ,  $u_1 = 0.1$ ,  $p(t) = 1$ ,  $f_1 = 5$  Hz,  $f_0 = 50$  Hz, 该电压信号时域波形如图 3(a), 该电压闪变的自适应最优核时频分布如图 3(b)。

该闪变信号在时频分布图上能量呈周期性变化 (颜色深浅交替出现), 频率变化以 50 Hz 为中心周期性变动, 表明该闪变信号为周期性闪变信号。可直接应用 TLS-ESPRIT 提取闪变参数。将该电压信号形  $1400 \times 601$  HANKEL 矩阵, 进行奇异值分解奇异值变化曲线为图 3(c), 第 6 个奇异值为 22, 第 7 个奇异值为 0, 可定出有效秩为 6。经 TLS-ESPRIT 计算, 提取的各边频分量参数如表 1。

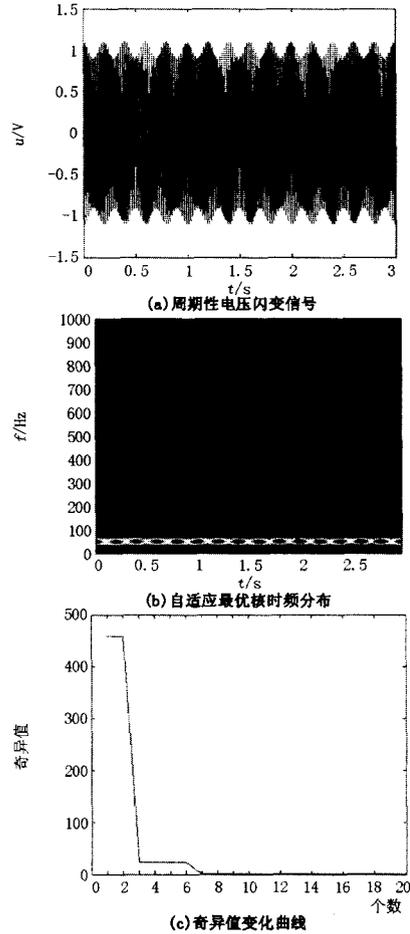


图 3 周期性闪变信号分析  
Fig.3 The analysis of periodic flicker

表 1 TLS-ESPRIT 提取的闪变参数

Tab.1 The extracted parameters in TLS-ESPRIT

参数分量	$f$ / Hz	$u$ / V
基频	50	1
边频分量 1	45	0.05
边频分量 2	55	0.05

根据式(2),(3)之间的关系可知, 此时, 求取的电压闪变参数如表 2 所示。

表 2 调幅参数与理想参数对比

Tab.2 The comparison of the computing and original parameters

参数类型	$f$ / Hz	$u$ / V
计算参数	5	0.1
实际参数	5	0.1

从表 2 可知, 求出的闪变参数与理想参数完全一致。

### 3.2 暂态电压闪变信号

式 (17) 中, 0.58 s ~ 1.95 s 时,  $p(t)=1$ , 其他时刻  $p(t)=0$ , 其他条件不变。其时域波形, 自适应最优核时频分布分别如图 4(a)、(b), 从图 4 (b) 可知, 闪变发生时刻大致在 0.58 ~ 1.95 s, 有稍微偏差, 但并不影响对闪变的分析。故利用 TLS-ESPRIT 进行参数提取时, 只去闪变时段的数据进行分析。计算后的参数与表 1 分析结果相同, 证明 AOK-TFR 与 TLS-ESPRIT 的有效性。

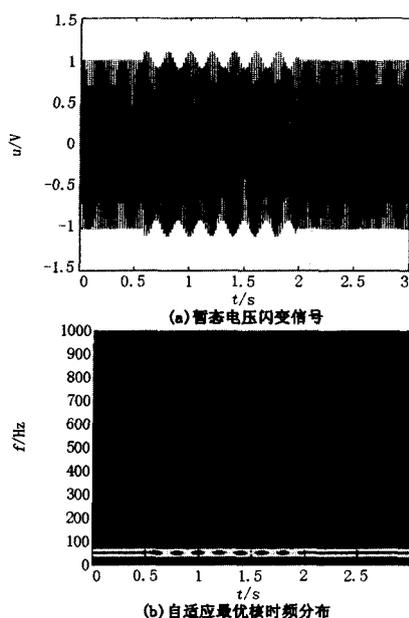


图 4 暂态电压闪变信号分析

Fig.4 The analysis of transient flicker signal

表 3 TLS-ESPRIT 提取的闪变参数

Tab.3 The extracted parameters in TLS-ESPRIT

参数分量	$f / \text{Hz}$	$u / \text{V}$
基频	50	1
边频分量 1	45	0.05
边频分量 2	55	0.05

通过式 (2)、(3) 的推导, 仍可得到与表 2 同样准确的结果。

经过大量的仿真试验证明, 该方法对多频闪变同样适有效。

## 4 实例分析

为了进一步验证本方法的有效性, 采集一段现场具有电压闪变特征的数据如图 5 所示, 该数据来

自 Electrotek 公司 PQmonitoring 实时监测系统。现场电压因工业负荷有闪变波动, 系统基频为 50 Hz, 监测系统采样频率为 10 kHz, 采样时间为 1.0 s。经提取后的闪变参数如表 4。由于现场环境噪声的存在和各类谐波的存在, 使求出的值与真实值有稍微偏差。由于偏差不大, 并不影响对闪变的治理。

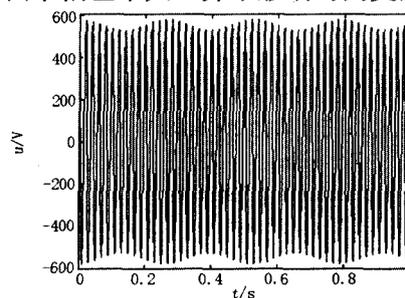


图 5 现场采集到电压闪变信号

Fig.5 Field collected flicker waveform

表 4 实测闪变参数的估计值(有效值)

Tab.4 Estimated parameters of field collected flicker (effective value)

$u_0 / \text{V}$	$f_1 / \text{Hz}$	$u_1 / \text{V}$
380.212	3.7999	17.7286

为描述本文方法提取的参数与采集波形之间的吻合程度, 用提取的参数拟合原电压闪变波形, 拟合后波形与采集数据波形 (已经过滤波处理) 如图 6。计算出两者的均方根差为 0.66%, 可见, 两者取得了较好的吻合, 验证了该方法在实例分析中的可行性和有效性。

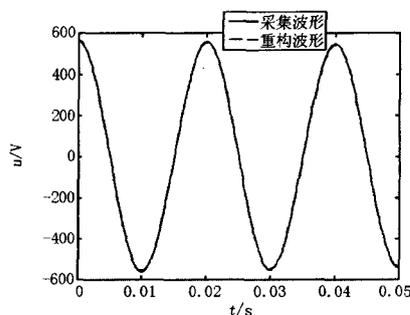


图 6 重构波形与实际波形

Fig.6 Waveform of reconstructed and field collected

## 5 结论

本文应用 AOK-TFR 良好的时频特性较准确地定位出闪变时刻, 在结合 TLS-ESPRIT 算法提取电压闪变中的一系列边频分量参数, 推过推导可以求

出具有闪变特征的低频闪变信号的参数。仿真和实际信号均证明该方法的可行性和有效性。

### 参考文献

- [1] 陈祥训. 实时跟踪电压闪变幅度的移动不变小波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1-7.  
CHEN Xiang-xun. A Shift-invariant Wavelet-based Method for Tracking Voltage Flicker Level [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 1-7.
- [2] 王志祥, 朱守真, 周双喜. Hilbert 变换求取电压闪有关参数[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 34-38.  
WANG Zhi-xiang, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Parameter Estimation of Voltage Flicker Through Hilbert Transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 34-38.
- [3] 同向前, 余健明. 电网电压中波动信号检出方法的研[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(3): 234-238.  
TONG Xiang-qian, YU Jian-ming. Study on the Detection of Voltage Flicker [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1998, 19(3): 234-238.
- [4] Zheng T, Makram E B. Wavelet Representation of Voltage Flicker [J]. Electric Power System Research, 1998, 48: 133-140.
- [5] CHEN Ming-tang, Meliopoulos A P. Wavelet-based Algorithm for Voltage Flicker Analysis [A]. in: Proceedings of the Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power [C]. 2000.
- [6] 堵俊, 邵振国, 郭晓丽, 等. 用小波分析提取电压闪变的幅值调制信号[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(3): 34-37.  
DU Jun, SHAO Zhen-guo, GUO Xiao-li, et al. Tracking the Envelope of Voltage Flicker Using Wavelet Analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(3): 34-37.
- [7] 刘阳, 杨洪耕. 基于独立分量分析的电压闪变检测方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 34-37.  
LIU Yang, YANG Hong-geng. Voltage Flicker Detection Based on Independent Component Analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 34-37.
- [8] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] 张静, 徐政, 王峰, 等. TLS-ESPRIT 算法在低频振荡分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 84-88.  
ZHANG Jing, XU Zheng, WANG Feng, et al. TLS-ESPRIT based Method for Low Frequency Oscillation Analysis in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 84-88.
- [10] Golub G H, Van Loan C F. An Analysis of the Total Least Squares Problem [J]. SIAM J Number Anal, 1980, 17: 883-893.
- [11] 张宇辉, 金国彬, 李天云. 基于自适应最优核时频分布理论的间谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 84-89.  
ZHANG Yu-hui, JIN Guo-bin, LI Tian-yun. A Novel Approach to Interharmonics Analysis Based on Adaptive Optimal Kernel Time-frequency Distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 84-89.

收稿日期: 2008-09-12; 修回日期: 2009-03-18

作者简介:

杨海霞 (1973-), 女, 工程师, 从事电网规划及调度自动化研究及设计工作; E-mail: yhx9413@yahoo.com.cn

王永宏 (1975-), 男, 工程师, 从事电力系统变电工程设计;

曾丰 (1979-), 男, 工程师, 从事电力系统变电工程设计。

(上接第 19 页 continued from page 19)

LIU Chang-yu, FU Wei-sheng, LI Zhao-hui. The Study of Intelligent Speed Governor of Hydro-turbine [J]. Water Resources and Power, 2001, 19(1): 66-67.

[4] 魏守平. 水轮机调速器的 PLC 测频方法[J]. 水电能源科学, 2000, 18(4): 12-16.

WEI Shou-ping. Frequency Measurement Method Based on PLC for Hydro-turbine Speed Governor [J]. Water Resources and Power, 2000, 18(4): 12-16.

[5] 伍哲身. 新型调速器在小水电站中的应用[J]. 小水电, 2003, (6): 34-36.

WU Zhe-shen. Application of the New-type Speed Governor in SHP Station [J]. Small Hydro Power, 2003, (6): 34-36.

[6] 沈祖诒. 水轮机调节(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.

SHEN Zu-yi. Regulation of Hydro-turbine, Second

Edition [M]. Beijing: China Water Power Press, 1988.

[7] 陶永华, 伊怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

TAO Yong-hua, YI Yi-xin, GE Lu-sheng. New Type of PID Control and Its Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.

[8] 江涛. 国产大型冲击式机组专用调速器的研制[J]. 中国农村水利水电, 2007: 25-27.

JIANG Tao. The Development of the Special Speed Governor of Large-scale Projectile Hydro-turbine Unit [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007: 25-27.

收稿日期: 2008-11-18

作者简介:

涂振祥 (1972-), 男, 硕士, 研究方向为控制理论与应用。E-mail: tuzx@whut.edu.cn