

基于 PRONY 法的超高压线路单相自适应重合闸故障识别原理

胡亚平¹, 吕飞鹏¹, 周鑫¹, 焦征南¹, 钟俊毅²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司超高压运行检修公司, 四川 成都 610065)

摘要: 针对带并联电抗器的超高压输电线路, 瞬时性故障时断开相恢复电压中存在由于储能元件初始储能引起的自由分量, 该自由分量幅值接近或高于其稳态基波分量的幅值, 频率低于且接近于工频, 分析了单相瞬时性故障恢复电压的拍频振荡特点, 提出了基于 PRONY 法对恢复电压信号进行快速辨识, 通过得到的各分量的振幅、频率等信息能判别瞬时性故障与永久性故障, 从而实现线路单相自适应重合闸。大量仿真结果表明该方法的有效性和准确性。

关键词: 超高压输电线路; 并联电抗器; 单相自适应重合闸; 普罗尼法; 恢复电压; 瞬时性故障

Identification of faults occurred on the extra high voltage transmission line based on PRONY method

HU Ya-ping¹, Lü Fei-peng¹, ZHOU Xin¹, JIAO Zheng-nan¹, ZHONG Jun-yi²

(1. College of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. EHV Operation & Maintenance Co., Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at EHV transmission lines with shunt reactors, because of the initial stored energy of shunt reactors, the recovery voltage of fault phase exists a free component, whose amplitude is close to or higher than steady component, whose frequency is lower and close to industrial frequency, when transient fault occurred, the study shows that in the case of single-phase transient fault, the character of its recovery voltage is different from permanent fault. A PRONY signal analytic method is developed to fleetly identify recovery voltage, then fault type can quickly be distinguished according to the swing and frequency of the different signals. The method is validated by a lot of simulation results.

Key words: EHV transmission lines; shunt reactor; single-phase autorecloser; PRONY; recovery voltage; transient fault

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0023-04

0 引言

超高压输电线路是整个大型电力系统的重要组成部分, 由于分布在户外, 受到自然条件的影响最为显著。根据运行经验, 在 110 kV 以上大接地电流系统的高压架空线路上, 超过 70% 的故障为单相接地短路, 而其中 80% 以上又为瞬时性故障。为保证系统稳定和供电的连续性, 超高压输电线路广泛采用单相自适应重合闸技术。但同时也给电力系统带来一些不利的影 响: 若重合于永久性故障时对系统造成的冲击甚至比正常情况下短路时对系统的冲击更大, 而且还会使电气设备的工作条件恶化。如果能对故障为永久性或瞬时性故障进行预先判断, 若为瞬时性故障则重合, 可减少对系统的冲击, 对电力系统具有重大的意义, 目前已有 很多科研人员做了很多的研究工作^[1-7], 单相自适应重合闸理论也逐渐完善并得到应用。

在超、特高压长距离输电线路中, 由于无功补偿和调节电压的需要, 一般应装设并联电抗器^[8-10]。由于存在并联电抗器, 瞬时性故障时断开相恢复电压中存在由于储能元件初始储能引起的自由分量, 该自由分量幅值接近或高于其稳态基波分量的幅值, 频率低于且接近于工频, 因此断开相的恢复电压呈拍频性质; 而永久性故障时故障点始终存在, 线路上各储能元件所储存的能量快速衰减, 断开相电压中没有低频振荡分量而仅含有基波量^[4]。依据此问题的研究主要有以下几种方法: 文献[3]提出了识别故障性质的电压拍频判据, 该判据判断结果无交叉模糊区, 判断时间约为半个拍频周期; 文献[4]提出通过检测断开相端电压自由分量实现的故障性质判据, 该判据灵敏度高, 判断速度快, 但是受自由分量频率估算误差的影响。本文提出一种基于 PRONY 辨识算法的新判据, 本判据原理清晰, 判断时间小于半个拍频周期。理论分析与仿真表明本

判据同样可适用于特高压线路。

1 Prony 信号分析法^[11]

Prony分析是近年来得到深入研究和广泛应用的信号处理方法。该方法用指数函数的线性组合来模拟等间隔采样数据的方法，采用最小二乘意义上的拟合，可以帮助消除测量过程中噪声对拟合结果的影响。适宜于含有噪声环境的测量，特别是能够从时域响应中分析出信号的阻尼因子，是一种非线性的多维滤波方法，具有较高的精度。最早于1975年由Prony提出假设按等时间间隔 Δt 进行采样的 N 个数据，可由 p 个指数函数的线性组合模拟，即：

$$y(n) \approx \mathbf{ZB}^T = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad (1)$$

式中： $n=0,1,\dots,N-1$ ； $y(n)$ 为第 n 个采样点； $\mathbf{Z}=[z_1, z_2, \dots, z_p]$ 为 Prony 极点， $z_i = e^{(\sigma_i + j2\pi f_i)\Delta t}$ ； $\mathbf{B}=[b_1, b_2, \dots, b_p]$ 为相应留数， $b_i = A_i e^{j\theta_i}$ ； A_i 为幅值， f_i 为振荡频率， θ_i 为相位， σ_i 为衰减因子， Δt 为采样时间间隔。

Prony 辨识算法的计算步骤如下：

1) 利用采样数据点构造矩阵 \mathbf{Y} ，并求解方程组 (2)：

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(n) & y(n-1) & \dots & y(0) \\ y(n+1) & y(n) & \dots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y(N-1) & y(N-2) & \dots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \quad \mathbf{YC}^T = 0 \quad (2)$$

式中： $\mathbf{C}=[1, c_1, c_2, \dots, c_p]$ 。当 $N > 2p$ 时， \mathbf{C} 为方程组的最小二乘解。

2) 求解多项式：

$$\mathbf{Z}^p + c_1 \mathbf{Z}^{p-1} + \dots + c_{p-1} \mathbf{Z} + c_p = 0 \quad (3)$$

该多项式的根就是 Prony 的 p 个极点。

3) 进一步利用最小二乘法求解方程组 (4)，求得留数 \mathbf{B} 。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

4) 由式 (3) 和式 (4)，代入式(5)：

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ f_i = \frac{\arctan[\text{Im}(z_i) / \text{Re}(z_i)]}{2\pi\Delta t} \\ \theta_i = \arctan[\text{Im}(b_i) / \text{Re}(b_i)] \\ \sigma_i = \ln |z_i| / \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

则式(1)中模拟输入信号的幅值、振荡频率、相位、衰减因子可以求得。本文的判据只需利用各分量的频率与振幅，在利用 Prony 进行故障信号分析时，极点数的确定十分重要，本文仿真结果表明，极点数 p 取为 4 效果良好，相关文献介绍采用奇异值分解 (SVD) 法来确定极点数是一个很不错的选择。根据判据对数据精度的需要，数据采样时间一般取为 20~50 ms 即可；采样频率取为 5 kHz；而利用傅里叶变换较精确地分离基波与自由分量需要较长数据窗。

2 判别故障性质的基本原理

2.1 瞬时性故障

在有并联电抗器的超高压线路上，当潜供电弧熄灭后，各储能元件所储存的电磁能量将以自由振荡的方式衰减。计算和实测表明，自由振荡的频率与并联补偿度有关，一般在 30~45 Hz 左右，恢复电压的瞬时值可以用式(6)表示：

$$U(t) = U_s * \sin(2\pi f_s t + \varphi_1) + U_t * e^{-\theta t} * \sin(2\pi f_t t + \varphi_2) \quad (6)$$

式中： U_s 和 U_t 为工频分量和自由分量的幅值； f_s 和 f_t 为工频分量和自由分量的频率； φ_1 和 φ_2 为工频分量和自由分量的初相角； θ 为自由分量的衰减系数。图 1 给出了本文仿真系统中线路中点发生单相瞬时性故障时断开相电压波形图。

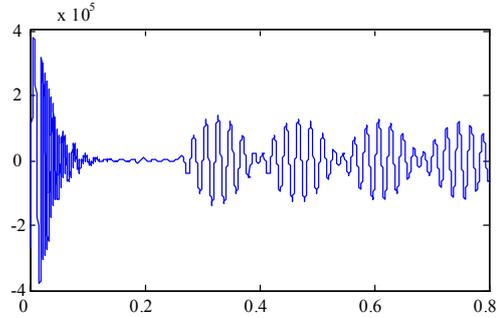


图 1 带并联电抗器输电线路单相瞬时性故障的仿真波形

Fig.1 Simulation wave of single-phase transient fault in transmission line with shunt reactors

利用 Prony 对上述故障信号进行分析的结果如表 1 所示。容易得出拟合的结果与理论分析基本一致。恢复电压信号主要是由一个工频的稳态分量和一个频率低于工频的自由分量组成，且自由分量幅值通常大于工频稳态分量，且自由分量是带一定衰减系数，而工频分量是幅值恒定的，因此拟合结果中其衰减系数非常小。

表 1 图 1 故障信号的仿真结果

Tab.1 Simulation result of the above fault signal

序号	频率/Hz	幅值/($\times 10^4$ V)	初相角/ ($^\circ$)	衰减系数
1	43.9	7.21	1.4	-0.818
2	51.2	4.59	-6.2	-0.015
3	267.2	0.011	-205	-2.020
4	388.4	0.003	-63.2	-1.551

断开相恢复电压幅值包络线的最大、最小值分别为 $U_{\max} = U_s + U_t$, $U_{\min} = |U_t - U_s|$; 瞬时性故障断开相线路端电压的工频分量为^[3]:

$$|U_s| = |U_y + 0.5 * U_{xL}| > |0.5 * U_{xL}| \quad (7)$$

式中: U_y 为电容耦合电压; U_{xL} 为电磁耦合电压。

设线路单位长度互感为 Z_M , C 相断开后, A、B 相电流为 I_A 、 I_B , 断开相上单位长度互感电压为 U_x , 则线路互感电压 U_{xL} 为

$$U_{xL} = U_x * L = (I_A + I_B) * Z_M * L \approx I_0 * (Z_0 - Z_1) * L \quad (8)$$

式中: I_0 为两相运行时的零序电流; L 为线路全长; Z_0 、 Z_1 为单位长度线路的零序、正序阻抗。

两相运行时的零序电流 I_0 可以用式 (9) 求得:

$$I_0 = \frac{-I_C}{1 + 2 \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}} \quad (9)$$

式中: I_C 为故障前 C 相电流; $Z_{0\Sigma}$ 和 $Z_{1\Sigma}$ 为断开端口的零序和正序综合阻抗。

I_C 由电流互感器可测得, $Z_{0\Sigma}$ 和 $Z_{1\Sigma}$ 通过各序网络可求得, Z_0 、 Z_1 、 L 已知, 即 U_{xL} 可通过式 (8)、(9) 求得。

由文献[3, 6]可知: 瞬时性故障时, $|U_t|$ 接近或大于 $|U_s|$, 即故障相电压信号中含有两个幅值大于 $|0.5 * U_{xL}|$ 的分量, 且两分量的频率小于等于 $k_k * f_s$ (k_k 取 1.2, f_s 取 50 Hz)。

2.2 永久性故障

当线路发生单相永久性接地时故障点始终存在, 线路的对地电容可靠放电, 导致 $U_y = 0$, 所以线路断开相两端的电压由接地点位置、健全相负荷电流、接地电阻 R_f 和线路参数决定。断开相电压瞬时值可以表示为^[6]:

$$U(t) = U_s * \sin(\omega_s * t + \theta) \quad (10)$$

对于永久性故障, $|U_s|$ 与 $|0.5 * U_{xL}|$ 的大小是不确定的, 当故障发生在近保护安装处时 $|U_s| < |0.5 * U_{xL}|$; 当发生远离保护安装处的高阻接地且为重负荷时, $|U_s| > |0.5 * U_{xL}|$ 。

2.3 整定原则

设断开相电压信号为 $U(t)$, 经 Prony 分解为四个频率相异的分量 $s(i)$, 其中 $i=1,2,3,4$ 。由以上分析可知, 瞬时性故障时, 断开相的工频分量电压和自由分量电压必然大于 $|0.5 * U_{xL}|$, 即必然有两个幅值大于 $|0.5 * U_{xL}|$ 的电压信号分量: $Num(s(i))=2$; 而永久性故障时, 各分量中大于 $|0.5 * U_{xL}|$ 的至多为一个: $Num(s(i)) \leq 1$ 。具体流程如图 2 所示。

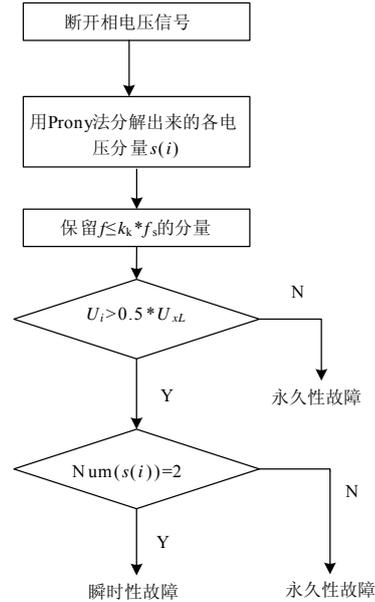


图 2 故障判定流程图

Fig.2 Flow chart of faults distinguishing

3 仿真系统参数及仿真结果

3.1 仿真系统参数

为了验证上述分析的正确性, 本文采用了 Matlab 建立一系统进行仿真。实验系统为重庆市万县至龙泉 500 kV 输电系统^[1], 如图 3 所示。对恢复电压信号进行 Prony 法拟合, 并采用本文提出判据进行整定。设定仿真时间为 0~0.6 s, 采样频率为 5 kHz。

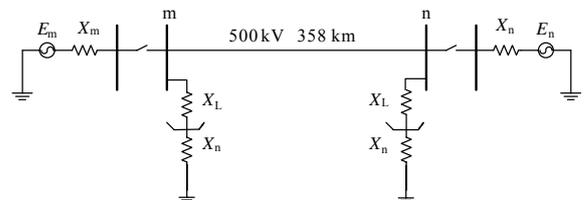


图 3 两端带并联电抗器 500 kV 输电系统

Fig.3 500 kV-transmission-system with two shunt reactors

系统和线路参数如下:

m 侧系统 $X_{m1} = 49.34 \Omega$, $X_{m0} = 41.34 \Omega$; n 侧系统 $X_{n1} = 46.03 \Omega$, $X_{n0} = 103.36 \Omega$; 线路参数 $r_1 = 0.0195 \Omega/\text{km}$, $r_0 = 0.1675 \Omega/\text{km}$, $l_1 = 0.9134 \text{ mH}/\text{km}$, $l_0 = 2.7190 \text{ mH}/\text{km}$, $c_1 = 14.00 \text{ nF}/\text{km}$, $c_0 = 8.34 \text{ nF}/\text{km}$; 电抗器参数 $X_L = 1680.56 \Omega$, $X_N = 434 \Omega$ 。

3.2 仿真结果及分析

用 Matlab 分别对故障发生在线路首端 30%、70%和当发生永久性故障时通过不同的过渡电阻（金属性、100 Ω 、500 Ω ）接地等故障情况进行大量的仿真实验。由表 2 可知，瞬时性故障时存在两个符合条件的频率分量且其幅值大于永久性故障时的值，故障性质判别准确度高，并且不会受过渡电阻和短路位置的影响。仿真实验和理论分析基本一致。

表 2 仿真结果
Tab.2 Results of simulations

故障位置	过渡电阻 / Ω	频率 /Hz	幅值 / ($\times 10^4 \text{V}$)	整定值 / ($\times 10^4 \text{V}$)	是否满足	判定结果	
距离首端 30%	瞬时	44.0	10.450	1.316	是	瞬时	
		50.5	6.310	1.316	是		
	0	50.0	0.472	1.316	否	永久	
		58.4	0.052	1.316	否		
	100	50.0	0.643	1.316	否	永久	
		58.6	0.079	1.316	否		
	500	50.0	1.083	1.316	否	永久	
		58.5	0.195	1.316	否		
	距离首端 70%	瞬时	44.3	10.630	1.316	是	瞬时
			50.4	7.620	1.316	是	
0		50.0	0.581	1.316	否	永久	
		58.5	0.077	1.316	否		
100		50.0	0.737	1.316	否	永久	
		58.4	0.095	1.316	否		
500		50.0	1.754	1.316	是	永久	
		58.5	0.198	1.316	否		

4 结束语

本文提出一种基于 PRONY 法的超高压线路单相自适应重合闸故障识别方法。其主要优点为：(1) 与现有算法相比，此算法只需要小于半个拍频周期的信号就可以辨别出故障类型；(2) 该判据原理清晰；(3) 算法不受接地电阻、负荷电流、接地位置等因素的影响；(4) 算法简单且具有很高的精确度。(5) 能分析按指数项规律衰减的信号，可以直接得出各个模态的振幅、频率、相位和衰减因子，在电

力系统信号分析有着广泛的应用前景。

参考文献

[1] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟, 等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (11): 75-81. SUONAN Jia-le, SUN Dan-dan, FU Wei, et al. Identification of Permanent Faults for Single-Phase Auto-Reclosure on Transmission Lines with Shunt Reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (11): 75-81(in Chinese).

[2] 商立群, 白维祖, 程刚, 等. 带并联电抗器的线路单相自适应重合闸故障判别原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (6): 81-84. SHANG Li-qun, BAI Wei-zu, CHENG Gang, et al. Fault Nature Identification for Single-Phase Adaptive Reclosure on Transmission Lines with Shunt Reactors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (6): 81-84(in Chinese).

[3] 李斌, 李永丽, 盛鸥, 等. 带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (5): 51-56. LI Bin, LI Yong-li, SHENG Kun, et al. The Study on Single-Pole Adaptive Reclosure of EHV Transmission Lines with the Shunt Reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (5): 51-56(in Chinese).

[4] 刘浩芳, 王增平, 徐岩, 等. 带并联电抗器的超/特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J]. 电网技术, 2006, 30 (18): 29-34. LIU Hao-fang, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. Criterion for Determining Fault Nature in Adaptive Single-Phase Reclosing for Shunt Compensated EHV/UHV Transmission Lines[J]. Power System Technology, 2006, 30 (18): 29-34(in Chinese).

[5] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18 (2): 23-31. GE Yao-zhong. Method of Distinguishing Between Instant and Permanent Faults During Automatic Single-Phase Reclosing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18 (2): 23-31(in Chinese).

[6] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996. GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location with Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

[7] Bo Z Q, Aggarwal R K, Johns T A, et al. New Concept in Transmission Line Reclosure using High-Frequency Fault Transients[J]. IEEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 1997, 144 (4): 351-356.

(下转第 42 页 continued on page 42)

Exploration of CIM Modeling for the Secondary Equipments[J]. Relay, 2007, 35 (11) : 65-68, 78.

[10] 丁明, 张征凯, 毕锐. 面向分布式发电系统的CIM扩展[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20) : 83-87,96.
DING Ming , ZHANG Zheng-kai , BI Rui. CIM Extensions to Distributed Generation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20) : 83-87,96.

[11] 顾强, 王守相, 李晓辉, 等. 配电系统元件的公共信息模型扩展[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (10) : 91-95.
GU Qiang, WANG Shou-xiang, LI Xiao-hui, et al. CIM Extension to Distribution System Components[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (10) : 91-95.

[12] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (24) : 39-44.
WANG Cheng-shan, ZHENG Hai-feng, XIE Ying-hua, et al. Probabilistic Power Flow Containing Distributed Generation in Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (24) : 39-44.

[13] Feijóo A E, Cidrás J. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (1) : 110-115.

[14] Jung J W. Modeling and Control of Fuel Cell Based Distributed Generation Systems[D]. Columbia: The Ohio State University, 2005.

[15] 李荔芳, 刘东, 陈清鹤. 公共信息模型在配电网建模工具中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (24) : 55-59.
LI Li-fang, LIU Dong, CHEN Qing-he. Application of CIM in Distribution Grid Modeling Tool[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (24) : 55-59.

[16] 刘崇茹, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于CML XML电网模型的互操作研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (14) : 45- 48,74.
LIU Chong-ru, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. An Investigation on a Common Information Model for Energy Management System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (14) : 45-48,74.

收稿日期: 2009-05-31; 修回日期: 2009-08-05
作者简介:

丁 银 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电系统; E-mail: ding_yin1980@126.com

丁 明 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、柔性输电系统的仿真与控制。

(上接第 26 页 continued from page 26)

[8] 林湘宁, 刘沛, 程时杰. 超高压输电线路故障性质的复值小波识别[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (2): 33-38.
LIN Xiang-ning , LIU Pei , CHENG Shi-jie. Identification of the Instant Faults Occurred on the Extra High Voltage Transmission Line with a Complex Wavelet Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (2): 33-38(in Chinese).

[9] 索南加乐, 邵文权, 宋国兵, 等. 基于参数识别的单相自适应重合闸研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 1 (29): 48-54.
SOUNAN Jia-le, SHAO Wen-quan, SONG Guo-bing, et al. Study on Single-Phase Adaptive Reclosure Scheme Based on Parameter Identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 1 (29): 48-54(in Chinese).

[10] 董新洲, 苏斌, 薄志谦, 等. 特高压输电线路继电保护特殊问题的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (22): 19-22.
DONG Xin-zhou, SU Bin, BO Zhi-qian, et al. Study of Special Problems on Protective of UHV Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (22): 19-22(in Chinese).

[11] 伍凌云, 李兴源, 孙衢, 等. 基于 Prony 辨识的复杂交流系统次同步振荡特性分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40 (3): 155-160.
WU Ling-yun , LI Xing-yuan , SUN Qu , et al. Subsynchronous Oscillation Analysis Based on Prony Identification Method[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40 (3): 155-160(in Chinese).

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-10-19
作者简介:

胡亚平 (1986-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护研究; E-mail: huyp04229@163.com

吕飞鹏 (1968-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究;

周 鑫 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护研究。