

基于Prony的故障电流相控分断零点预测算法

李红蕾¹, 冯英², 袁召¹, 李辉², 喻新林¹, 何俊佳¹, 潘垣¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 目标过零点的快速、准确预测是实现短路故障电流相控开断的基础。笔者根据短路电流信号特点, 提出将Prony算法应用于故障电流相控分断时的零点预测。推导了Prony算法的求解过程, 通过计算频率、幅值、相位等参数, 得到采样信号的还原波形, 进而求取目标电流零点。在MATLAB中设置理想信号进行算例验证, 结果说明Prony算法的参数计算误差小, 波形拟合度高。在谐波环境下, 采用1/4周期长数据与安全点算法进行了对比。结果显示, 相比安全点算法, Prony算法对谐波更加稳定, 波形拟合精度更高。

关键词: 过零点; 故障电流相控开断; Prony算法; 安全点算法

中图分类号: TM835; TP206

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0029-06

Prediction Algorithm for Phase-controlled Fault Interruption Based on Prony Method

LI Honglei¹, FENG Ying², YUAN Zhao¹, LI Hui², YU Xinlin¹, HE Junjia¹, PAN Yuan¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Fast and accurate prediction of zero-crossing points of fault current lays the foundation of the phase-controlled fault interruption. In this paper, a new algorithm is proposed to predict the zero-crossing points based on Prony method. By calculating the frequencies, amplitudes, phases, etc., the original waveform is obtained through fitting the sampled signal to calculate the objective zero points. An ideal signal is set in MATLAB to test the effectiveness of the proposed algorithm, and the result shows that the algorithm gains high SNR and very small margin of error. Moreover, compared with the safe-point algorithm, Prony algorithm demonstrates better fitting degree of waveform and higher stability to harmonics in the condition of 1/4 sampling cycle and triple-frequency harmonics.

Key words: zero-crossing points; phase-controlled fault interruption; Prony algorithm; safe-point algorithm

0 引言

选相控制技术, 又称同步开关或相控开关技术^[1], 是一种可根据不同的负荷状态 (容性、感性、短路等), 控制开关在预期的电压或电流最佳相位完成合闸或者分闸动作的新技术。选相控制技术目前已成为智能化开关电器的研究热点和发展方向之一。

选相关合技术可以克服电容器、电抗器等负载投入瞬间的过电压及浪涌电流, 进而避免由此引起的电力系统不稳定^[2-3]。实际产品已在国内外市场得

到了广泛应用, 电磁暂态的抑制效果明显^[3-4]。而另一具有应用前景的故障电流选相分断技术 (controlled fault interruption, CFI), 则仍停留在探索开发阶段。

故障电流选相分断通过控制开关的动作时刻, 使其经过短时燃弧并在最佳开距范围内实现开断, 可有效减小触头的电侵蚀, 延长开关的使用寿命。同时, 选相分断也可以大大提高开关的短路电流开断水平, 1台低成本的小容量开关可分断10倍以上容量的电流^[5]。在目前线路断路器开断水平明显不

收稿日期: 2014-05-09; 修回日期: 2014-05-21

基金项目: 中国电力科学研究院院士团队项目 (GY-7113013)。

Project Supported by China Electric Power Research Institute, Academician Group Project (GY-7113013).

足的背景下,发展故障电流的选相分断技术对于电力系统的发展具有重要意义^[6-7]。

由于短路电流包含有衰减直流分量,采样信号不再周期性变化,使得参考过零点也变得难以准确获取。同时,故障开断过程也受到继电保护“速动

性”的要求。因此,要实现故障电流的选相开断,必须根据有限的采样点还原故障电流,并据此预测出可用的目标过零点。短路电流的选相分断流程图见图1,与传统开断过程①相比增加了路径②的零点预测环节。

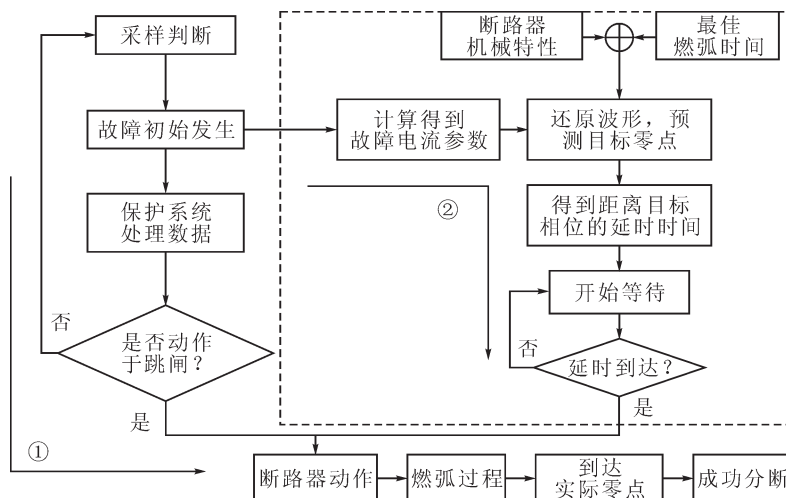


图1 短路电流的选相分断流程

Fig. 1 Process of controlled fault interruption for short-circuit

目前,国内外学者已提出了多种故障电流预测算法。文[8]提出的安全点算法假定短路电流中的直流分量恒定,用安全点去代替实际过零点。该方法没有考虑到故障电流直流分量的衰减,较为粗糙,零点精度较低。文[9-11]将衰减直流分量进行泰勒展开,计算参数可能不收敛。文[12]中提出基于支持向量机的过零点预测方法,但是需要大量数据进行离线学习。文[13-14]提出对半波傅氏算法进行改进,消除直流分量的影响,但是算法受数据采集精度的影响。

上述算法均对短路电流模型做了简化和近似处理,计算结果难免存在误差。笔者则根据短路电流的信号特点,提出将Prony算法应用于短路故障电流的选相分断技术。该算法可以完整描述短路电流,理论上不受谐波及直流衰减的影响,因此,计算参数精度也大为提高。笔者推导了Prony算法的求解过程,并在MATLAB中进行了算例验证。最后结合安全点算法,对比分析了Prony算法的计算效果,得到了理想的信号波形。

1 基本原理

1.1 Prony算法原理

Prony算法的提出是在1795年,在电力系统参数辨识、谐波检测等领域均有所应用^[15-17],但用于短路故障选相分断的零点预测则未有尝试。算法的数学模型描述见式(1)。

$$x(t) = \sum_{i=1}^p A_i \cdot e^{\alpha_i t} \cdot e^{j(2\pi f_i t + \theta_i)} \quad (1)$$

式(1)中: A_i 为拟合幅值; α_i 为衰减因子; f_i 为拟合频率; θ_i 为拟合相位; P 为Prony的拟合阶数。

根据欧拉公式,两个复指数可以描述一个正弦信号,即式(1)可继续表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^p A_i \cdot e^{\alpha_i t} \cdot \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (2)$$

式(2)中:当 $\alpha_i=0$ 时,采样信号可以看作由各次的周期正弦信号拟合而成;当 $f_i=0$ 时,则对应由衰减直流信号组成。而当电力系统发生短路故障时,电流形式为

$$i(t) = I_0 e^{-\alpha t} + \sum_{i=1}^n I_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (3)$$

将上述直流部分看作频率为0的周期信号,则结合式(2)、(3)可知Prony的数学模型与短路故障电流模型一致,这也是该算法可以用于短路故障选相分断的关键。因此,采用Prony算法时不会存在安全点、自适应拟合等算法因模型简化带来的精度问题。

1.2 Prony算法求解

式(2)的离散表达式为

$$x(n) = \sum_{i=1}^p A_i \cdot e^{\alpha_i n \Delta t} \cos(2\pi f_i n \Delta t + \theta_i) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad (4)$$

式(4)中: Δt 为采样间隔; n 为采样点, $n=0, \dots, N-1$, N 为采样点个数。

$$\begin{cases} b_i = A_i \cdot e^{j\theta_i} \\ z_i = e^{(\alpha_i + j2\pi f) \Delta t} \end{cases} \quad (5)$$

Prony 算法的求解关键在于意识到式(4)是一组常系数线性差分方程的齐次解。定义特征多项式为

$$\psi(z) = \prod_{i=1}^p (z - z_i) = \sum_{i=0}^p \alpha_i z^{p-i} \quad (6)$$

式(6)中, $\alpha_0 = 1$ 。

由式(4)知

$$x(n-k) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^{n-k}, 0 \leq n-k \leq N-1 \quad (7)$$

式(7)两边同乘 α_k 并求和, 则有

$$\sum_{k=0}^p [\alpha_k \cdot x(n-k)] = \sum_{k=0}^p \alpha_k \sum_{i=1}^p b_i z_i^{n-k} \quad (8)$$

对式(8)变换得到

$$\sum_{i=1}^p b_i \sum_{k=0}^p \alpha_k z_i^{n-k} = \sum_{i=1}^p b_i z_i^{n-p} \sum_{k=0}^p \alpha_k z_i^{p-k} \quad (9)$$

结合式(6)可知, $z = z_i$ 正是该多项式的特征根, 因此式(9)右端第2个求和项恰好为0, 即式(9)右端为0。则有

$$\sum_{k=0}^p \alpha_k x(n-k) = 0 \quad (10)$$

因为 $\alpha_0 = 1$, 因此式(10)的矩阵表示为

$$\begin{cases} -x(p) = \alpha_1 x(p-1) + \alpha_2 x(p-2) + \cdots + \alpha_p x(0) \\ -x(p+1) = \alpha_1 x(p) + \alpha_2 x(p-1) + \cdots + \alpha_p x(1) \\ \vdots \\ -x(N-1) = \alpha_1 x(N-2) + \alpha_2 x(N-3) + \cdots + \alpha_p x(N-1-p) \end{cases} \quad (11)$$

经过一次最小二乘运算即可求解得到 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ 。根据(6)式有

$$z_p + \alpha_1 z^{p-1} + \alpha_2 z^{p-2} + \cdots + \alpha_p = 0 \quad (12)$$

即可求出其特征根 $z_1, z_2, \dots, z_p$ 。从而使得非线性方程(4)转化为关于 b 的线性方程: $Zb = X$ 。即

$$\begin{cases} x(0) = b_1 + b_2 + \cdots + b_p \\ x(1) = b_1 z_1 + b_2 z_2 + \cdots + b_p z_p \\ \vdots \\ x(N-1) = b_1 z_1^{N-1} + b_2 z_2^{N-1} + \cdots + b_p z_p^{N-1} \end{cases} \quad (13)$$

求解该关于 b 的范德蒙矩阵方程即可得到 $b_1, b_2, \dots, b_p$ 。

综上, 根据采样值 $x(n)$, 求解 b_i, z_i 后, 结合式(5)即可得到最终的拟合参数。

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \angle(b_i) \\ \alpha_i = \ln(|z_i|) / \Delta t \\ f_i = \angle(z_i) / (2\pi \Delta t) \end{cases} \quad (14)$$

文[18]中公式(3.8.24)对于 θ 参数的表述有误。式(14)构成采样信号的物理描述, 可据此预测其波形, 并通过牛顿迭代等方法求解得到目标过零点。

2 Prony 算法验证

2.1 信号设置

为了检验 Prony 算法在短路故障选相中的应用可行性, 利用 MATLAB 设置理想信号, 并观察其参数计算精度及波形的拟合效果。理想信号设置见表1。

表1 理想信号设置

Tab. 1 Parameters setting for Prony test

信号	数值
直流分量起始值/A	10
衰减时间常数	32
工频周期信号/A	30
基波起始相位/rad	$\pi/6(0.523\ 6)$
采样频率/kHz	1
采样长度	1/2 周期

阶数 p 的选取与采样信号特征相关, 文中算例中设置为5阶。

算法的计算精度用信噪比 SNR 来描述。经验认为当拟合数据的 SNR 达到 20 dB 时, Prony 法得到可以接受的结果, 超过 40 dB 时结果更为理想。具体定义为

$$SNR = -20 \lg \sqrt{\frac{(I_d - I_c)^2}{I_d^2}} \quad (15)$$

式(15)中: I_d 代表采样值; I_c 代表 Prony 算法的计算值。

2.2 计算结果

故障电流选相分断要求预测过零点误差必须小于 1 ms 才能达到理想的选相效果。因此, 在上述 SNR 指标的基础上同时观察过零点的预测误差以评判该算法的计算精度。

按照 Prony 算法采样求解表1中的设置信号, 得到式(14)中的频率、幅值、相位等参数, 按照式(1)进行指数项拟合即可还原被采样信号。具体参数计算结果见表2, 设置信号与拟合信号的波形对比见图2。

表2 计算拟合参数

Tab. 2 Calculated Prony parameters

参数	幅值	
频率/Hz	49.999 999 999 999	0.000 000 000 000
衰减时间常数	0.000 000 000 000	31.999 999 999 956
幅值/A	30.000 000 000 004	9.999 999 999 995
拟合相位/rad	0.523 598 775 598 221	1.165 718 944 850 410×10 ⁻¹⁶
SNR/dB	570	
零点误差/ps	-0.007, 0.375, 1.169	

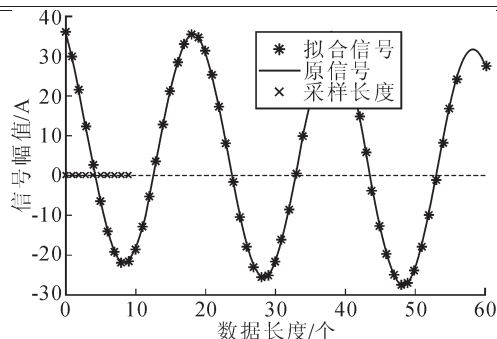


图2 Prony 算法求解信号波形

Fig. 2 Calculated waveform of Prony method

由表2及图2的计算结果可知,在笔者的设置信号下,Prony算法求解得到的参数误差可以忽略不计,波形拟合的信噪比也很高。因此,由预测波形计

表3 Prony计算基波相位

Tab. 3 Trend of calculated fundamental phase by Prony method

采样长度	频率/kHz				rad
	1	2	5	10	
1/2 周期	0.523 598 775 598	0.523 598 775 598	0.523 598 775 492	0.523 598 771 376	
1/4 周期	计算出错	0.523 598 775 601	0.523 598 775 599	0.523 598 786 072	

由表3可以看出,当采样频率只有1 kHz时,采用1/4周期长度,即5个数据点时无法进行Prony计算,得不到可用参数。而采用半个波长时,则可以得到准确的设置参数。在拟合阶数不变的情况下(即 p 设置为5),随着采样频率和采样长度的改变,基波相位的计算误差几乎不发生大的改变,均处于可以忽略的范围内。

2.4 与安全点算法对比

安全点算法采用1/4周期长的采样信号预测过零点,使用的数据点少,计算简便,因此在故障选相中发展较早。文[21-22]中对其与自适应算法进行了对比,说明在谐波情况下安全点算法不存在波形的发散问题,且计算精度可以满足要求。但是,安全点算法仅在谐波含量较少时预测结果可以接受,以3次谐波为例,当其含量较大时,计算精度会大大降低。而基于其模型描述的准确性,谐波含量并不会对Prony算法的计算结果造成影响。

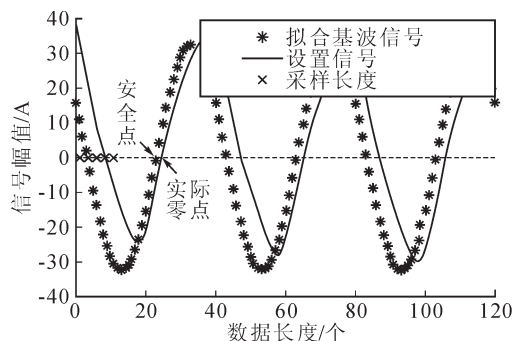
为了观察安全点算法与Prony算法的谐波处理效果,在上述算例中加入幅值为3(与基波幅值相比为10%时)的3次谐波,起始相位设置为 $\pi/6$,采样率为2 kHz,其他设置同上。2种算法均采用1/4周期,即10个数据点进行参数计算,波形的拟合结果对比见图3。

可以看出,在同样的信号设置下,采样数据长度一致时,Prony算法的计算结果明显优于安全点算法,波形拟合度更高,预测零点误差更小。与理想信号不同,实际系统中的电流信号更加复杂。笔者利

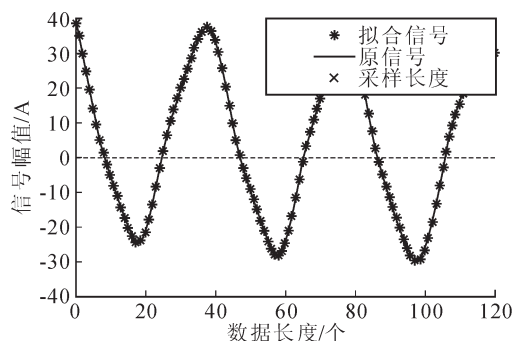
算的过零点与实际过零点几乎完全重合,满足选相的技术要求。

2.3 影响因素分析

由上述分析计算过程可知,Prony算法本质上依然是1种数据拟合方法。在短路电流的选相分断过程中,采样点不会太多,而Prony算法的固有计算参数较多,计算结果必然受到采样数据的影响。因此,该算法对噪声较为敏感,实际使用中需要参考相应更优的滤波算法处理^[19-20],但这暂不在考虑范围之内。除此之外,在理想算例下,拟合结果的精度与采样波长、采样频率等均有关系。改变采样频率及采样波长,观察在上述信号设置条件下基波相位的计算误差,结果见表3。



(a) 一定谐波下安全点算法求解波形



(b) 一定谐波下Prony算法求解波形

图3 2种算法求解波形对比

Fig. 3 Comparison between safe-point and Prony methods with harmonics

用部分简单短路故障录波数据进行了Prony算法的分解处理,计算波形与原始波形的对比见图4。由过零点可以看出,拟合精度在可接受的范围内。

3 结语

笔者根据电力系统短路信号的特点,提出将

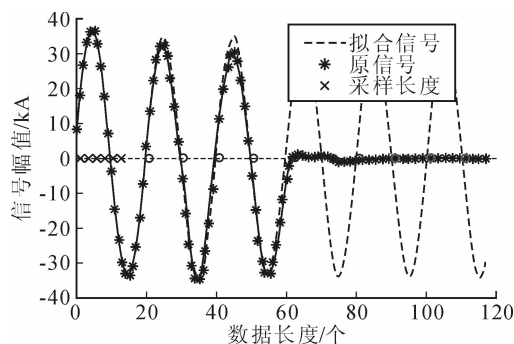


图4 Prony 算法的故障录波数据检验

Fig. 4 Test of Prony method with recorded fault data

Prony算法应用于故障电流相控开断中电流零点的预测。理想设置信号下的算例分析说明该方法模型描述准确,参数计算精度高,波形拟合及零点预测误差小,理论上在一定谐波环境下也能得到良好的计算结果。并与安全点算法进行了对比,还原波形显示Prony算法的计算结果更优。但Prony算法对噪声敏感,需要对采样信号进行一定的滤波处理。另外,该算法需要完成2次矩阵方程求解及一次复数求根运算,因此计算时间较安全点算法更长,可以采用更高速的数字信号处理器。

参考文献:

- [1] 钱家骊. 相位控制高压断路器动向[J]. 高压电器, 2001, 37(1):38-40.
QIAN Jiali. Tendency on phase-controlled HV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(1):38-40.
- [2] 段雄英, 廖敏夫, 丁富华, 等. 相控开关在电网中的应用及关键技术分析[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 113-117.
DUAN Xiongying, LIAO Minfu, DING Fuhua, et al. Application and key technology analysis of controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 113-117.
- [3] KOBAYASHI T, TSUKAO S. Application of controlled switching to 500 kV shunt reactor current interruption[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4):480-486.
- [4] 郑旭, 康健, 杜治, 等. 智能合闸控制器的原理及其在江陵换流站的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 72-76.
ZHENG Xu, KANG Jian, DU Zhi, et al. Working principle of controlled switcher with artificial intelligence technology and its application in jiangling converter station[J]. Power System Technology, 2007, 31(24):72-76.
- [5] 邹积岩. 开关智能化的概念及相关理论问题[J]. 高压电器, 2000, 36(6):43-46.
ZOU Jiyan. Concept of intelligent switch and related issues [J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(6):43-46.
- [6] 刘焱, 杜治, 王江虹. 湖北电网2011-2012年短路电流分析[J]. 湖北电力, 2010, 34(5):57-59.
LIU Yan, DU Zhi, WANG Jianghong. Analysis of short-circuit current of Hubei Power Grid in 2011-2012[J]. Hubei Electric Power, 2010, 34(5):57-59.
- [7] 刘焱. 湖北电网短路电流限制措施研究[J]. 湖北电力, 2013, 37(3):47-52.
LIU Yan. Restrictive measures for short-circuit of Hubei power grid[J]. Hubei Electric Power, 2013, 37(3):47-52.
- [8] POLTL A, FROHLICH K. A new algorithm enabling controlled short circuit interruption[J]. IEEE Trans.on Power Delivery, 2003, 18(3):802-808.
- [9] THOMAS R, DAALDER J, SOLVER C E. An adaptive self-checking algorithm for controlled fault interruption[C]//8th International Conference on Electricity Distribution.Turin, Italy:[s.n.], 2005: 19-23.
- [10] THOMAS R, SOLVER C E. A method for controlled fault interruption for use with HV SF₆ circuit breakers[C]//IEEE Power Tech.Lausanne, Switzerland;IEEE, 2007:1135-1140.
- [11] 方春恩, 林蔓, 李伟, 等. 基于WLMS算法的高压断路器可控开断故障电流研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 40-43.
FANG Chun'en, LIN Man, LI Wei, et al. Investigation on controlled fault current interruption of high voltage circuit breaker based on WLMS algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6):40-43.
- [12] PARIKH U B, BHALLA B R. SVR-based current zero estimation technique for controlled fault interruption in the series-compensated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3):1364-1372.
- [13] 罗楚军, 袁召, 尹小根, 等. 基于改进半波傅氏算法的故障电流相控开断零点预测研究[J]. 高压电器, 2012, 48(6):1-6.
LUO Chujun, YUAN Zhao, YIN Xiaogen, et al. Zero-cross point prediction of short circuit current for phase controlled interruption based on improved half-wave fourier algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6):1-6.
- [14] 袁召, 罗楚军, 方春恩, 等. 基于半波Fourier算法的故障选相控制系统的设计[J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 869-875.
YUAN Zhao, LUO Chujun, FANG Chun'en, et al. Design of control system for controlled fault interruption based on half-wave Fourier algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4):869-875.
- [15] 张旭俊. Prony分解的本质及其算法改进的新途径[J]. 江西电力, 2012, 36(2):4-8.
ZHANG Xujun. The Prony method nature and new ways for algorithm improvement[J]. Jiangxi Electric Power, 2012, 36(2):4-8.
- [16] 徐立新, 王伯翰. 复杂衰减振荡波形的模型参数估计[J]. 清华大学学报, 1993, 33(4):68-73.

- XU Lixin, WANG Bohan. Parameters calculation of complex damping oscillation signals[J]. Journal of Tsinghua University, 1993, 33(4): 68-73.
- [17] 张少康, 李兴源, 王渝红. Prony算法在电力系统参数辨识中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 21-24.
- ZHANG Shaokang, LI Xingyuan, WANG Yuhong. Application of Prony algorithm in power system parameter identification[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 21-24.
- [18] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 119-125.
- [19] 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. Parameters calculation of synchronous machine based on the wavelet and the Prony method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 38-42.
- [20] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 采用改进Prony算法的电力系统故障暂态信号分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 89-93.
- WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Transient signals processing by the improved Prony method in the power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 89-93.
- [21] POLTL A, FROHLICH K. Two new methods for very fast fault type detection by means of parameter fitting and artificial neural networks[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(4): 1269-1275.
- [22] 段雄英, 黄智慧, 李蕊, 等. 两种故障电流相控开断电流零点预测算法对比[J]. 高压电器, 2011, 47(1): 5-9.
- DUAN Xiongying, HUANG Zhihui, LI Rui, et al. Comparison between two methods of zero-cross point prediction for controlled fault current interruption[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1): 5-9.
- 李红蕾(1989—), 女, 硕士研究生, 从事高压开关方面的科研工作。
- 何俊佳(1968—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电弧电接触、高电压与绝缘技术及脉冲功率技术领域的教学与研究工作。

(上接第28页)

- 波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 66-70.
- DENG Feng, ZENG Xiangjun, CHEN Nan, et al. A network-adapted traveling-wave fault location method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 66-70.
- [19] YU Tian, FAN Chunju, GONG Zhendong. A study on accurate fault location algorithm for parallel transmission line with ateed connection[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(6): 697-703.
- [20] 曾祥君, 陈楠, 李泽文, 等. 基于网络的故障行波定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 48-53.
- ZENG Xiangjun, CHEN Nan, LI Zewen, et al. Network-based algorithm for fault location with traveling wave[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(31): 48-53.
- [21] 束洪春, 朱盛强, 田鑫萃, 等. ± 800 kV 特高压直流线路故障选极的极波面积比值法[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 888-896.
- SHU Hongchun, ZHU Chengqiang, TIAN Xincui, et al. Polarity wave area ratio method of 800 kV UHVDC transmission line fault line selection[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 888-896.
- [22] SONG H, TEKAMP L, FRANCISCO F, et al. Development of a compact and lightweight S-band traveling-wave tube for microwave power module[C]//2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). [S.l.]: IEEE, 2010: 89-90.
- 何柏娜(1977—), 女, 博士, 讲师, 从事电力系统仿真及高电压绝缘技术方面的教学与科研工作。
- 赵云伟(1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事机电系统检测、诊断与控制方面的教学与研究工作。