

DOI: 10.7667/PSPC160315

基于自适应算法的触电事故电流检测

熊晓祎, 肖先勇, 赵恒

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对如何快速有效检测触电事故电流的问题, 给出了一种基于自适应算法的触电事故电流检测方法。基于自适应滤波原理, 建立了自适应触电电流检测模型, 并结合归一化最小均方(N-LMS)算法对测量的总剩余电流噪声消除和自然剩余电流分离, 实现了触电事故电流的检测。利用触电实验的实测数据对该方法进行验证, 并与增量检测法、BP神经网络检测法、最小二乘支持向量机(Least squares support vector machine, LS-SVM)检测法以及电流幅值检测法进行比较分析。仿真结果表明, 基于自适应算法的触电事故电流检测方法具有响应时间短、噪声鲁棒性好并且能有效消除保护动作死区的优点, 对新一代剩余电流保护装置开发有一定的参考价值。

关键词: 剩余电流保护技术; 触电事故电流; N-LMS 自适应算法; 事故检测; 自适应模型

Adaptive algorithm based electrical shock current detection method

XIONG Xiaoyi, XIAO Xianyong, ZHAO Heng

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aimed at the problem of detecting electrical shock current fast and correctly, this paper proposes an N-LMS adaptive algorithm based electrical shock detection method. According to the principle of adaptive filter, it establishes adaptive electrical shock current detection model, and then applies adaptive filters to eliminate the influence of noise and normal residual current in turns from the measured total residual current detected and separates the electrical shock current out. Finally, the proposed method is testified by the electrical shock experimental data which proves the validity of the method. Compared with the increment method, BP neural network based method, LS-SVM based method, and present current-amplitude based method for RCDs, the results conclude that the proposed method has short response time and great noise robusticity and eliminates protection dead-zone. In short, the method could help develop novel RCDs.

This work is supported by Science and Technology Department of Sichuan Province, China (No. 2015RZ0055).

Key words: residual current protection technology; electrical shock current; normal least mean square; fault detection; adaptive model

0 引言

当前, AC型剩余电流保护装置, 以总剩余电流幅值作为触电事故动作依据, 是触电事故防护的重要措施^[1]。事实上, 由于三相负荷不平衡、线路设备绝缘老化、气象变化等因素^[1], 总剩余电流幅值并不能正确反映触电事故, 导致保护装置存在动作死区, 容易误动作、拒动作^[2-3]。这严重影响了供电连续性, 并增大了触电伤亡风险。因此, 研究触电事故电流检测, 具有重要的理论价值和现实意义。

目前, 国内外的触电事故电流检测方法主要包

括特种波形检测法^[1]、增量检测法^[2-3]、BP神经网络检测法^[4-5]以及最小二乘支持向量机(Least squares support vector machine, LS-SVM)检测法^[6]。由于不同的故障具有各自的信号特征^[7-9], 上述研究方法均认为触电信号存在独有特征。特种波形检测法假设特种波形与真实触电信号一致, 但假设缺乏理论依据; 增量检测法认为触电信号就是增量, 不能区分噪声等引起的电流突变; BP神经网络检测法和LS-SVM检测法均属于人工智能法, 目的在于更准确地识别触电信号, 在样本满足要求时具有优势, 但自然剩余电流、负荷变化引起的漏电流、电网运行方式等因素均会影响上述方法的实际应用。基于此, 如何自适应准确识别和检测触电是当前值得深

入研究的重要课题。

自适应滤波具有抗干扰性强、响应时间短、计算量小等特点,能很好地从检测信号中分离出目标信号,广泛应用于生物医学、图像处理、电能质量检测等领域^[8-13],与现有方法比,受其他因素影响小。基于上述原因,本文首次将自适应滤波的思想引入触电保护领域中,提出一种基于归一化最小均方(Normalized least mean square, N-LMS)自适应算法的触电事故快速检测方法。针对 AC 型剩余电流保护技术,以解决触电事故检测为目标,研究 LMS 自适应滤波原理,建立了自适应触电电流检测模型,结合 N-LMS 自适应算法从检测信号中分离噪声和自然剩余电流,实现触电事故电流提取。最后,通过实验和仿真分析,验证方法的正确性和可行性,与现有方法对比,本文方法具有噪声鲁棒性好、响应时间短、消除保护死区的优点,可作为开发新型剩余电流保护装置的一种技术参考。

1 自适应滤波原理

1.1 滤波器结构

自适应滤波器可以根据传输环境和要求对自身系数进行调整,从而得到理想的信号。目前,应用最为广泛的自适应算法是最小均方差(Least mean square, LMS)算法,具有无需先验知识、抗干扰性强、计算量小等优点^[13]。

自适应滤波器原理,如图1所示。在源信号不可观测和混合模型未知的情况下,自适应滤波器通过瞬时误差信号 $e(n)$ 不断地对权重 $w(n)$ 进行反馈调节至理想权重 $w^*(n)$,使输出信号 $y(n)$ 逼近目标源信号 $s(n)$,最终达到分离信号的目的。其中 n 表示采样点对应时刻。

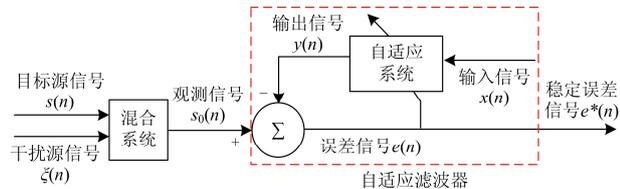


图1 自适应滤波原理

Fig. 1 Principle of adaptive filter

应特别指出,为了自适应滤波器输出效果理想,需要满足特定的统计特性条件^[13]:(1)目标源信号 $s(n)$ 与干扰源信号 $\zeta(n)$ 非相关;(2)输入信号 $x(n)$ 应选择与 $s(n)$ 强相关、与 $\zeta(n)$ 非相关的。

1.2 N-LMS 自适应算法

对于自适应滤波器,瞬时输出信号 $y(n)$ 及误差信号 $e(n)$ 可以表示为

$$\begin{cases} y(n) = w(n) * x(n) = \sum_{i=0}^{M-1} w_i(n)x(n-i) \\ e(n) = s_0(n) - y(n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: * 为卷积运算; M 表示滤波器阶数。

由式(1)可以看出,为了达到最优的自适应滤波效果,即求得理想权重 $w^*(n)$ 使得输出信号逼近目标源信号,需要对滤波器权重 $w(n)$ 进行合理调整。LMS 算法以瞬时误差信号 $e(n)$ 的均方误差(Mean square error, MSE)最小作为目标,通过迭代对权重进行更新,表示为

$$w(n+1) = w(n) + \Delta w(n) \quad (2)$$

对应权重调整量 $\Delta w(n)$ 的表达式为^[13]

$$\Delta w(n) = f(\mu, e, x) = 2\mu(n)e(n)x(n) \quad (3)$$

式中: μ 为步长,控制收敛速度和收敛稳定; $f(*)$ 是以步长、瞬时误差、参考信号为自变量的函数。

μ 的选择是 LMS 算法的关键。固定步长 LMS 算法,即步长 μ 是常量,无法在增大收敛速度时保证较小的稳态误差。而变步长 LMS 算法则可以根据收敛程度及时调节步长,兼顾收敛速度与算法稳定性,并且算法简单、易于硬件编程^[11-13]。本文采用变步长 LMS 算法。N-LMS 算法是一种变步长 LMS 算法,计算复杂度低,灵活性强,易于在线使用^[12]。该算法利用输入信号 $x(n)$ 对步长进行调整,达到良好的跟踪效果^[13]。

$$\mu(n) = \frac{\mu_0}{\gamma + \|x(n)\|^2} \quad (4)$$

式中: $\|*\|$ 为欧氏范数运算; μ_0 为初始步长,取值满足 $0 < \mu_0 \leq 1$; γ 为步长控制参数,通常为一个极小的常数。

2 自适应触电电流检测模型

理论上,总剩余电流由触电事故电流与自然剩余电流随机混合而成,但在实际检测中易受到噪声干扰,一般方法难以提取触电事故电流。考虑噪声的影响,假设发生单相触电事故^[1],保护装置检测的含噪总剩余电流 $i_{t0}(n)$ 为

$$i_{t0}(n) = i_t(n) + \varepsilon(n) = i_s(n) + i_t(n) + \varepsilon(n) \quad (5)$$

式中: $i_t(n)$ 为总剩余电流; $i_s(n)$ 为触电事故电流; $i_t(n)$ 为自然剩余电流; $\varepsilon(n)$ 为服从高斯分布的零均值噪声,与 $i_s(n)$, $i_t(n)$ 具有不相关性。

由式(5)可以看出,触电事故电流的检测需要依次消除随机噪声和自然剩余电流的影响。由此,可以将触电事故电流检测分为噪声消除以及自然剩余电流分离两个阶段,建立触电事故电流检测模型,原理如图2所示。

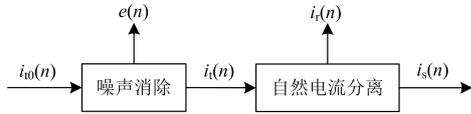


图 2 触电事故电流检测模型

Fig. 2 Shock current detection model

2.1 噪声消除

考虑到现场设备及测量装置等可能对检测信号造成干扰, 因此在开始检测事故发生时刻前, 需选用自适应滤波器对含噪声的总剩余电流进行消噪处理。触电事故消噪模型, 如图3所示。

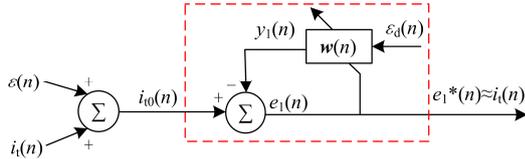


图 3 检测信号消噪模型

Fig. 3 Denoising model of detection signal

在消噪环节中, 将 $i_{0}(n)$ 作为观测信号 $s_0(n)$, $\varepsilon(n)$ 作为目标源信号 $s(n)$, $i_i(n)$ 作为干扰源信号 $\zeta(n)$, $\varepsilon_d(n)$ 作为输入信号 $x(n)$ 。在这一过程中, 实际是利用与 $\varepsilon(n)$ 具有相关性的信号 $\varepsilon_d(n)$ 进行信号重构。由此, 得到稳定的输出信号 $y_1^*(n) \approx \varepsilon(n)$, 可以从 $i_{0}(n)$ 减去 $y_1^*(n)$ 得到稳定误差信号, 即消噪后的总剩余电流 $e_1^*(n) \approx i_i(n)$ 。

2.2 自然剩余电流分离

经过消噪后的电流为总剩余电流 $i_i(n)$, 包括自然剩余电流 $i_r(n)$ 和触电事故电流 $i_s(n)$ 两部分, 需要分离自然剩余电流, 才能得到触电事故电流。

在不同的触电情景下, 触电事故电流具有明显差异。自然剩余电流虽然受季节、气象和用电行为等影响, 变化相对缓慢, 故而可以认为触电前剩余电流与触电后剩余电流是强相关的。结合自适应滤波的思想, 考虑将触电后自然剩余电流 $i_r(n)$ 作为目标信号, 对应地将触电前自然剩余电流 $i_{rd}(n)$ 作为输入信号, 而将触电事故电流 $i_s(n)$ 作为干扰源信号。可构造自然剩余电流分离模型, 如图4所示。

自然电流分离环节中的稳定误差信号逼近于触电事故电流, 即 $e_2^*(n) \approx i_s(n)$ 。至此, 完成触电事故电流提取。

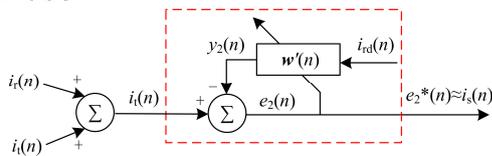


图 4 自然电流分离模型

Fig. 4 Normal residual current separation model

3 基于 N-LMS 的触电检测算法

当电网中发生触电事故, 需要立即从总剩余电流信号中分离出触电事故电流。在上一节建立的触电事故电流检测模型基础上, 本文基于 N-LMS 提出触电事故检测算法。

一般认为, 触电事故电流在 2~5 个工频周期内基本达到稳定^[1]。考虑提取完整的触电事故电流, 假设信号每个工频周期采样点数 N , 检测含噪总剩余电流 $i_{0}(n)$ 取 $2t$ 个工频周期长度, 包括触电前 t 个工频周期以及触电后 t 个工频周期, $t=2, \dots, 5$ 。

首先, 对检测到的总剩余电流进行噪声消除。考虑到输入信号应与目标源信号具有相关性, 因此, 设置输入信号 $\varepsilon_d(n)$ 为零均值的高斯性噪声信号, 长度为 $L_1 = 2t \times N$ 。滤波器参数设置: 迭代次数 k_1 , $M < k_1 \leq L_1$; 初始权重 $w = [0 \dots 0]$, 长度为 L_1 。根据 N-LMS 的思想, 利用式(1) — 式(4)分离噪声。

完成消噪后, 提取总剩余电流。当迭代结束后, 可得到稳定输出信号 $y_1^*(n) \approx \varepsilon(n)$ 。而对应地, 消噪后总剩余电流为

$$i_i(n) = i_{0}(n) - y_1^*(n) \quad (6)$$

式中, $n = 1, \dots, L_1$ 。

接着, 完成自然剩余电流分离。令自然剩余电流 $i_{rd}(n') = i_r(n' - tN)$, 以此作为输入信号, 长度为 $L_2 = tN$ 。滤波器参数设置: 迭代次数 k_2 , $M < k_2 \leq L_2$; 权重 $w' = [0 \dots 0]$, 长度为 L_2 。同样根据式(1) — 式(4), 得到可得到稳定输出信号 $y_2^*(n') \approx i_r(n')$, 即分离自然剩余电流。此时, 提取出触电事故电流

$$i_s(n') = i_i(n') - y_2^*(n') \quad (7)$$

式中, $n' = 1, \dots, L_2$ 。

4 实验与仿真分析

4.1 实验平台与条件

在实验室条件下搭建低压触电平台, 原理图如图5。忽略线路阻抗。电源接地阻抗 $R_g = 5 \Omega$, 线路正常漏电电阻(滑动变阻器) $R_f = 50 \text{ k}\Omega$, 漏电容 $C_f = 0.07 \mu\text{F}$ 。保证所有设备的绝缘水平, 忽略设备漏电流, 用白炽灯作负载。用高精度录波仪 DL750 记录数据。以模拟市电为电源进行实验。模拟市电由标准扰动源 Fluke 6100A 和线性功率放大器产生。

实验对象为兔子为代表的生命体。其中, 实验用兔由专业动物中心提供, 体重 2.5 kg。该实验经所在单位学术伦理道德委员会批准。触电部位为兔子左前肢和右后肢。实验前, 在保证皮肤完整性的同时, 剃除触电部位毛发。

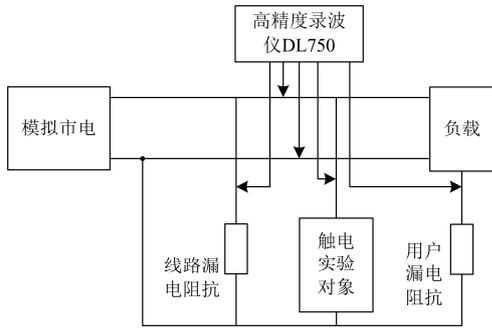


图 5 低压触电实验平台

Fig. 5 LV experimental platform of electrical shocks

4.2 实验数据获取

触电事故情况考虑了不同触电时刻(峰值、过零点、上升过程的点和下降过程的点),并设置了不同的自然剩余电流,测试过程中取样随机。设置 DL750 录波仪采样频率 5 kHz,每次记录 2 s,采集 200 组数据进行分析验证,包括触电支路电流、漏电支路电流和总剩余电流。以其中一组实测触电波形与总剩余电流波形,如图 6 所示。

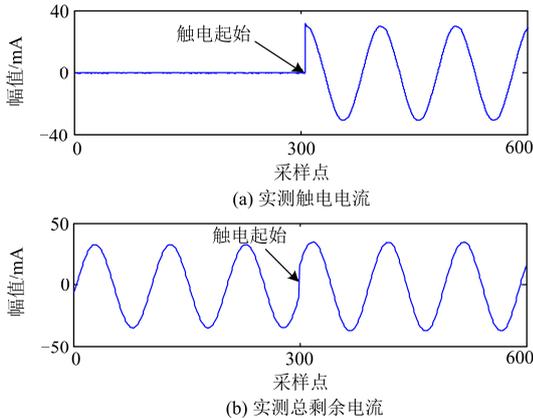


图 6 触电时电流波形

Fig. 6 Waveform of real total residual current and shock current

4.3 仿真分析

为了验证本文方法的有效性,利用 Matlab 对实验数据进行仿真分析。

4.3.1 检测效果检验准则

本文以算法时间和分离出的触电事故电流与相关系数对检测效果进行评价。算法时间应满足剩余电流保护装置运行要求^[14],考虑到机械动作时间,算法时间应越短越好。相关系数能反映方法分离信号与理想信号的特征相似性^[15],相关系数 r 为

$$r = \frac{\left| \sum_{n=1}^N i^*(n)i(n) \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [i^*(n)]^2 \sum_{n=1}^N [i(n)]^2}} \quad (8)$$

式中: i^* 表示理想信号; i 表示方法分离信号。当检测效果最差时, $r \approx 0$; 效果最佳时, $r \approx 1$ 。

4.3.2 检测效果验证

本文选择触电前后各 3 个工频周期长度 ($L_2=300$) 的装置检测电流信号,共 600 个采样点,即 $L_1=600$ 。

(1) 信号消噪

设置参数:滤波器阶数 $N=10$,初始步长 $\mu_0=0.5$, $\gamma=0.005$ (经过实验统计得到最佳值)。考虑到实际中可能存在大量的噪声干扰,在 Matlab 中对物理实验获取的总剩余电流,添加不同强度的零均值高斯白噪声(信噪比 20~80 dB),并以此作为输入信号 $\varepsilon_d(n)$ 。

通过实验统计得到,本文方法在弱噪声下平均消噪时间 0.001 s,平均相关系数 r 为 0.98,而在强噪声下平均消噪时间 0.005 s,平均相关系数 r 为 0.90,均有所下降,但经过消噪后波形能反映真实信号,满足后期检测要求。

(2) 触电事故电流分离

按照本文方法,在消噪后,用已消噪的检测电流中的触电事故发生时刻前 3 个工频周期的数据作为输入信号 $i_{rd}(n)$,事故发生时刻后 3 个工频周期的数据作为观测信号 $i_t(n)$,共计各 300 点。利用第 3 节的方法进行触电事故电流分离,如图 7 所示,其中弱噪声以 80 dB 为例,强噪声以 20 dB 为例。

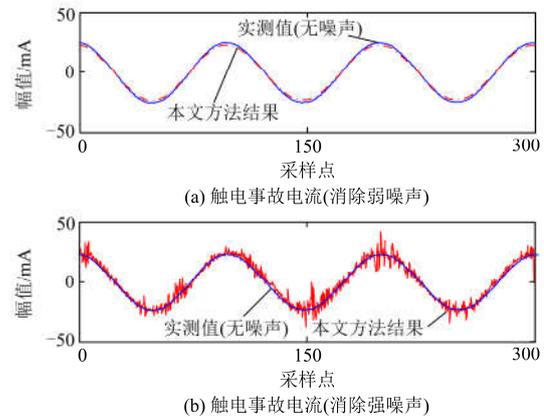


图 7 本文方法检测效果

Fig. 7 Denoising effects of method

(3) 与已有触电事故电流检测方法比较

首先,将本文方法与增量检测法、BP 神经网络检测法和 LS-SVM 检测法进行对比,如表 1 所示。

在平均相关系数方面,无噪声时,4 种方法得到的触电事故电流的平均相关系数均保持在 0.99 以上,检测效果好。弱噪声时,随着噪声强度增大而略有下降。但是,当检测信号受到强噪声干扰时,由于消噪效果存在差异,相关系数降低较明显,但

除了增量检测法, 其余方法但均在 0.90 以上, 效果仍较好。增量检测法噪声鲁棒性相对较差, 这是由于增量检测法每次检测单一工频周期的幅值变化值, 检测效果极易受到噪声影响。同样地, 对于由负荷变化等情况引起的电流突变, 增量检测法无法区别。而在算法速度方面, 4 种方法差异比较明显。增量检测法的平均时间最短, 其次为本文方法(平均时间 0.0126 s), 而 LS-SVM 方法和 BP 神经网络方法则分别长达 0.1 s 和 0.65 s, 这是因为当已有样本无法检测新的总剩余电流情况, 上述两种人工智能方法需要重新训练网络结构, 即对自然漏电流、负

荷变化引起的漏电流、电网运行方式等不同情况下存在响应速度慢、灵活性差等缺点。可以看出, 本文方法具有良好的噪声鲁棒性, 并且算法速度快, 适应性强。

为进一步分析本文方法的保护动作特性, 与以总剩余电流幅值为动作依据的现有剩余电流保护方法作对比(下面简称为“电流幅值检测法”), 结果如表 2, 表中 I_r 、 I_s 、 I_{10} 分别表示自然剩余电流有效值, 触电事故电流有效值, 总剩余电流有效值。 I_{s1} 、 I_{s2} 分别表示两种剩余电流保护装置检测触电事故电流有效值。

表 1 触电电流检测效果对比

Table 1 Effects of simulating electric shock detection

No.	仿真条件	本文方法		增量检测法		BP 神经网络检测法		LS-SVM 检测法	
		平均相关系数 r	平均时间/s	平均相关系数 r	平均时间/s	平均相关系数 r	平均时间/s	平均相关系数 r	平均时间/s
1	无噪声	0.996	0.0093	0.998	0.001	0.998	<u>0.625</u>	0.997	0.079
2	弱噪声	0.980	0.0106	0.890	0.001	0.987	<u>0.697</u>	0.982	0.101
3	强噪声	0.907	0.0175	<u>0.632</u>	0.001	0.921	<u>0.724</u>	0.924	<u>0.164</u>

注: 表中平均时间包括样本训练(参考文献[7], 选择 20 组样本训练, 每组数据均为 3 个工频周期)和检测时间。下划线表示检测效果不满意。

表 2 与现有剩余电流保护方法的检测效果对比

Table 2 Comparison of results between the present residual current protection methods

No.	I_r /mA	I_s /mA	I_{10} /mA	I_r 与 I_s 的夹角/(°)	本文方法		电流幅值检测法 ^[1]	
					I_{s1} /mA	相对误差	I_{s2} /mA	相对误差
1	7.1	30.3	23.7	55.2	30	0.99%	23.7*	21.75%
2	21.2	13	30.6	45.1	12.7	2.31%	30.6	-135.26%
3	14.1	21.6	19.0	155.1	21.2	1.85%	19.0	11.84%
4	35.4	17.3	46.9	121.9	16.9	2.31%		
5	42.3	19.5	26.0	94.5	19.1	2.05%	无法投运	
6	38.9	32.5	51.5	91.8	31.8	2.15%		

注: 表中双下划线表示保护装置误动作, *表示保护装置拒动作。根据文献[14]选取最小动作电流有效值为 30 mA。

从表 2 中可以看出, 现有方法存在拒动作、误动作甚至无法投运现象。当自然剩余电流较小时, 两种方法虽然能够投运, 但均存在欠灵敏问题。在第 1 种情况下, 触电事故电流已经达到 30 mA, 但电流型保护方法存在拒动。而在第 2 种情况下, 电流型保护方法由于触电电流与自然剩余电流夹角较小, 使得总剩余电流在触电电流还未达到额定动作电流值时, 保护就已经误动作。而当自然剩余电流很大时, 电流型已经无法投运。这是由于现有方法无法克服自然剩余电流的影响, 而存在动作死区。相比之下, 本文方法仅根据触电事故电流大小进行动作, 因此并不存在动作死区。在上述情况下, 本文方法均能正确动作, 并且相对误差能控制在-3%~3%以内, 具有理想的动作特性。

本文方法保证了触电动作实际值与整定值的一致性, 基本消除自然剩余电流的影响, 从而可以达

到比较理想的剩余电流保护动作特性。

5 结论

(1) 本文建立了自适应触电电流检测模型, 结合基于 N-LMS 自适应算法, 能快速、准确地检测触电事故发生时刻, 平均检测时间 0.0126 s, 较之 BP 神经网络检测法和 LS-SVM 检测法, 适应性强, 响应时间更短, 算法时间平均缩短 90%, 满足检测需要。

(2) 本文方法分离触电事故电流效果良好, 与实测值的相关系数平均 0.961, 相比增量检测法噪声鲁棒性更好。

(3) 提出的方法与现有电流型保护技术相比, 相对误差能控制在-3%~3%以内, 具有理想的动作特性, 消除了动作死区, 可为触电安全保护提供技术支持。

参考文献

[1] 滕松林, 杨校生. 触电漏电保护器及其应用[M]. 北京:

- 机械工业出版社, 1994.
- [2] 武一, 李奎, 岳大为, 等. 消除剩余电流保护动作死区的理论与方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 44-49.
WU Yi, LI Kui, YUE Dawei, et al. Theory and method of eliminating operating dead zone of residual current protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 44-49.
- [3] 李奎, 陆俭国, 武一. 消除漏电保护死区的新技术及其试验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(20): 28-32.
LI Kui, LU Jianguo, WU Yi. Technology of eliminating dead zone of leakage current protection and its examining method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(20): 28-32.
- [4] 李春兰, 苏娟, 杜松怀, 等. 基于小波分析和 BP 神经网络的触电信号检测模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 130-134.
LI Chunlan, SU Juan, DU Songhuai, et al. Detecting model of electric shock signal based on wavelet analysis and BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S2): 130-134.
- [5] 关海鸥, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种触电信号的自动快速检测模型[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2328-2335.
GUAN Haiou, DU Songhuai, SU Juan, et al. An automatic and quick detection model of electric shock signals[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2328-2335.
- [6] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 基于参数优化的最小二乘支持向量机触电电流检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 238-245.
HAN Xiaohui, DU Songhuai, SU Juan, et al. Determination method of electric shock current based on parameter-optimized least squares support vector machine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 238-245.
- [7] 凌光, 苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.
LING Guang, SU Bin. A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 19-24.
- [8] 任琴, 舒勤, 刘勇. 基于对称注入法反射波特征提取的配电网故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 19-24.
REN Qin, SHU Qin, LIU Yong. A fault location algorithm for distribution network based on extracting features from the reflected wave of symmetrical injection method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 19-24.
- [9] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [10] 刘尹, 罗建, 陈刚, 等. 基于解相关 LMS 自适应滤波算法的低频振荡模式在线辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 72-76, 82.
LIU Yin, LUO Jian, CHEN Gang, et al. On-line identification of low frequency oscillation modes based on de-correlation LMS adaptive filtering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 72-76, 82.
- [11] 刘传林, 刘开培. 基于新型变步长算法的自适应三相电路谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 123-128.
LIU Chuanlin, LIU Kaipei. Adaptive harmonic detection of 3-phase circuits based on a novel variable step-size algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 123-128.
- [12] 王宗臣, 包志华, 张士兵, 等. 一种改进的变步长 LMS 谐波电流检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 73-77, 82.
WANG Zongcheng, BAO Zhihua, ZHANG Shibing, et al. Improved variable step-size LMS algorithm for harmonic current detection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 73-77, 82.
- [13] PAULO S R D. 自适应滤波算法与实现[M]. 4 版. 刘郁林, 万群, 王锐华, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. GB 16916.1-2014 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB)第 1 部分:一般规则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 16916.1-2014 residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RCCB)—part 1: general rules[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [15] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.
SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-04-18

作者简介:

熊晓祎(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为漏电保护与安全用电; E-mail: staceyxiongscu@sina.com

肖先勇(1968-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 从事不确定性理论在电力系统的应用、电能质量、智能电网等的教学和科研; E-mail: xiaoxianyong@163.com

赵恒(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为漏电保护与安全用电. E-mail: zhaohengscu@sina.cn

(编辑 张爱琴)