

DOI: 10.7667/PSPC161012

配电网继电保护一二次联合数字仿真系统研究

刘亚丽, 周 昀, 王少荣

(强电磁工程与新技术国家重点实验室, 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对目前配电网继电保护数字仿真系统只能实现二次侧仿真、仿真效果不明显的缺陷, 提出了能同时进行一、二次仿真的配电网继电保护一二次联合数字仿真系统。给出了仿真系统的总体设计方案, 并从故障数据获取、对外数据接口、故障数据转换以及保护算法4个方面, 阐述了该仿真系统的关键技术及相应的实现方法。基于PSCAD/EMTDC和VC++构建了一二次联合仿真系统, 并应用该仿真系统对线路过电流保护算例进行了仿真。算例仿真结果与理论分析一致, 验证了所研究仿真系统的正确性和有效性。

关键词: 配电网; 继电保护算法; 一二次联合数字仿真方法; 仿真系统构建; 短路故障

Research on the primary and secondary combined digital simulation system of distribution network relay protection

LIU Yali, ZHOU Yun, WANG Shaorong

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Current digital simulation system used in relay protection can only achieve the secondary side protection simulation. Considering the defect, a primary and secondary combined digital simulation system of distribution network relay protection is put forward. Overall design scheme is given, the key technologies and related realizing methods are introduced from the aspects of fault data obtaining, external data interface, fault data conversion and protection algorithm. The proposed simulation system based on PSCAD/EMTDC and VC++ is constructed, and an over-current protection simulation example is performed. The simulation results are consistent with theoretical analysis, which verify the correctness and effectiveness of the simulation system.

Key words: distribution network; relay protection algorithm; primary and secondary combined digital simulation method; simulation system construction; short circuit fault

0 引言

继电保护装置是电力系统安全运行的必要保障, 对其进行分析与研究具有十分重要的意义^[1-3]。

在进行继电保护装置开发时, 为了验证所设计的继电保护方案的正确性, 通常采用的方法是将编译的程序烧写至控制芯片, 再利用继电保护测试仪对保护装置的动作行为进行仿真分析。此种方法往往会出现各种各样的实际应用问题, 需要对程序进行反复修改、编译和烧写, 从而需要较长的开发周期和较高的开发费用与人力投入^[4]。

基于传统继电保护^[5]方案验证方法存在的此种缺陷, 对继电保护方案进行验证的数字仿真系统^[6-9]

被提出。数字仿真系统通过模拟保护装置的各种功能元件和采用与实际保护装置相同的保护算法, 实现了继电保护装置的全功能仿真。

为了实现一、二次侧的全面仿真, 进一步增强继电保护数字仿真的实用性和高效性, 本文将研究广义的配电网继电保护数字仿真系统, 进而提出一种适用于配电网^[10-11]继电保护的一二次联合数字仿真系统。

1 总体技术方案

该配电网继电保护一二次联合数字仿真系统由一次系统短路故障数字仿真和二次系统继电保护数字仿真组成。其具体定义和整体架构分别如图1和图2所示。

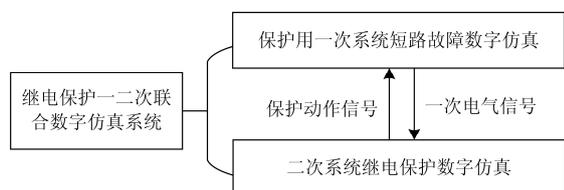


图 1 继电保护一二次联合数字仿真系统定义

Fig. 1 Definition of the primary and secondary combined digital simulation system of relay protection

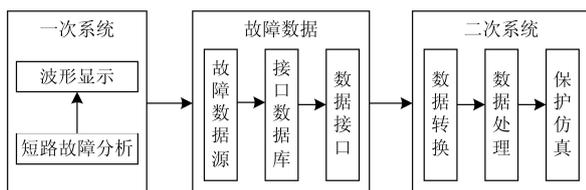


图 2 继电保护一二次联合数字仿真系统整体架构

Fig. 2 Whole structure of the primary and secondary combined digital simulation system of relay protection

如图 2 所示, 一次系统负责短路故障分析仿真, 显示故障电压、电流的波形, 并提供故障数据源; 故障数据库负责存储一次系统提供的故障数据, 并且为一次系统和二次系统的数据传输提供数据接口; 二次系统负责对由一次系统传输过来的模拟量数据进行转换、处理等操作, 最后利用相关保护算法仿真保护装置动作情况。将仿真系统设计成这样的结构在一定程度上降低了仿真系统的复杂程度和开发难度, 提高了仿真系统的通用性^[12]。

2 关键技术及实现方法

2.1 故障数据获取

目前, 常用的产生故障电气量信号的方法有人为设定、手工计算、软件仿真等。由于人为设定的方法跟实际故障情况存在较大偏差, 而手工计算的方法需要自己编写程序计算故障数据源, 更适用于简单短路故障的分析计算, 故采用软件仿真的方法来模拟生成故障电气量信号。

通过设置合理的仿真参数并选取合适的仿真算法, 可以仿真得到与实际电网短路故障暂态过程一致的结果。仿真过程中故障电压、电流变化的波形可以实时显示, 同时也能得到故障数据。

本文将借助 PSCAD/EMTDC^[13]仿真软件进行配电网一次系统短路故障仿真分析。原因在于 PSCAD/EMTDC 用于短路故障仿真分析时可以将短路数据以后缀名为.out 的文件形式存储到指定的根目录下, 以便之后的二次系统继电保护仿真使用。

2.2 对外数据接口

目前, 各种电力系统一次仿真程序的对外数据接口还未形成一个统一的规范, 二次系统仿真程序和不同的一次系统仿真程序之间不能通过相同的数据接口格式进行数据交换, 需要根据一次系统仿真程序的变化对数据接口格式进行调整。针对目前情形, 通过建立故障数据库来使一次系统仿真程序对外数据接口一致成为一种快捷有效的方法^[14]。

故障数据库用于存储配电网一次系统仿真得到的故障数据源, 比如电流互感器的二次侧电流、电压互感器的二次侧电压等模拟量数据等, 二次保护仿真系统通过格式化文件函数读/写操作从数据库读取保护仿真所需数据。

本文采用 C 语言中的文件读/写函数实现故障数据源读取, 以打开文本文件 text.txt 为例, 用 C 语言程序实现文件读/写的操作语句如下:

(1) 检查能否以读/写方式打开文本文件 text.txt:

```
If (fp = fopen("text.txt", "r") == NULL)
{
    printf("不能打开文件.\n");
    getch();
    exit(1);
}
```

(2) 以读方式将文本文件 text.txt 中的数据读入到数组:

```
fscanf(fp, "%f", &data[i]);
fclose(fp);
```

通过以上语句实现了将文本文件 text.txt 中数据读入到 data[i] 数组中的操作, 这种方法简单可靠。

2.3 故障数据转换

通过使用电压/电流互感器, 将一次系统得到的高电压、大电流等模拟信号转换成符合二次侧要求的电压/电流信号。本文采用变比分别为 3.53 V/6 A 和 3.53 V/150 V 的互感器对一次侧电压、电流进行线性转换。将得到的模拟信号送入 16 位数模转换器 AD7606, 进而转换成上位机能够识别的数字信号。

进行继电保护仿真时, 将输入电压设置为 5 V, AD7606 的传递函数如式(1)所示。

$$CODE = \frac{V_{IN}}{5} \times 32768 \quad (1)$$

以电压信号为例, 一次系统传递过来的模拟电压信号需要经过 PT/CT 和 AD7606 转换过程, 对电压信号进行转换的公式如式(2)。

$$V' = \text{int}\left(\frac{V \times 3.53/150}{5} \times 32768 + 0.5\right) \quad (2)$$

至此,一次系统模拟信号经过电压/电流互感器变换、AD 采样过程后得到可供二次系统保护使用的数字信号,并被送入 DSP 进行保护的运算和判断,以上操作较好地模拟了实际继电保护信号处理的整个过程。

2.4 保护算法

继电保护算法种类繁多,如常用的基于正弦函数模型的半周积分算法^[15]、基于周期函数模型的全波傅氏算法以及基于相电流差突变量的启动元件算法^[16]等。本文以一种改进的全波傅氏算法^[17]和相电流差突变量启动元件算法为例进行介绍。

2.4.1 改进全波傅氏算法

由于配电网中的信号不都是标准的正弦信号,但却都是周期信号,所以采用全波傅氏算法进行继电保护运算是行之有效的方法。但传统全波傅氏算法假定被采样的周期型函数信号所包含的直流分量是不衰减的,从而给计算带来很大误差。对此,采用一种能完全滤除衰减直流分量的改进全波傅氏算法对输入信号进行处理。其基本原理如下。

以电流信号为例,假设它的表达式为

$$i(t) = I_0 e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \theta_n) \quad (3)$$

式中: I_0 是直流分量开始衰减前的值; τ 是 I_0 衰减的时间常数; I_n 为第 n 次谐波分量的幅值; ω_n 为第 n 次谐波分量的角频率; θ_n 为第 n 次谐波分量的初始相位角。

$$\text{令 } g(t) = I_0 e^{-t/\tau}, \quad h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \theta_n)$$

则电流表达式可改写为

$$i(t) = g(t) + h(t) \quad (4)$$

假设各次分量的正弦和余弦项的幅值的准确值分别为 a_n 和 b_n , 采用传统的全波傅氏算法进行采样时,得到各次分量的正弦和余弦项的幅值分别为 a'_n 和 b'_n , 由衰减直流分量引起的误差分别为 Δa_n 和 Δb_n , 则有:

$$\begin{cases} a'_n = a_n + \Delta a_n \\ b'_n = b_n + \Delta b_n \end{cases} \quad (5)$$

a'_n 和 b'_n 的离散化公式为

$$\begin{cases} a'_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g(k) \sin \frac{2\pi n}{N} k + \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \sin \frac{2\pi n}{N} k \\ b'_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g(k) \cos \frac{2\pi n}{N} k + \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \cos \frac{2\pi n}{N} k \end{cases} \quad (6)$$

式中, N 为每周期采样点数。式(5)中的 a_n , Δa_n 和 b_n , Δb_n 分别与式(6)中的各分量对应如下:

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \sin \frac{2\pi n}{N} k, \Delta a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g(k) \sin \frac{2\pi n}{N} k \\ b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \cos \frac{2\pi n}{N} k, \Delta b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g(k) \cos \frac{2\pi n}{N} k \end{cases} \quad (7)$$

若将 Δa_n 和 Δb_n 求出,即可根据式(5)将 a_n 和 b_n 求出,即将各次分量的正弦和余弦项幅值的准确值求出。

将 $g(t) = I_0 e^{-t/\tau}$ 代入式(7)中,可得到 Δa_n 和 Δb_n 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta a_n = \frac{2}{N} \cdot \frac{I_0(1 - e^{-T/\tau}) \cdot (1 - e^{-T_s/\tau}) \cdot \sin \frac{2\pi n}{N}}{1 - 2e^{-T_s/\tau} \cdot \sin \frac{2\pi n}{N} + (e^{-T_s/\tau})^2} \\ \Delta b_n = \frac{2}{N} \cdot \frac{I_0(1 - e^{-T/\tau}) \cdot (1 - e^{-T_s/\tau}) \cdot \cos \frac{2\pi n}{N}}{1 - 2e^{-T_s/\tau} \cdot \cos \frac{2\pi n}{N} + (e^{-T_s/\tau})^2} \end{cases} \quad (8)$$

为了利用式(8)求出 Δa_n 和 Δb_n , 还需求解

$$\begin{cases} A = 1 - e^{-T/\tau} \\ B = e^{-T_s/\tau} \end{cases} \quad (9)$$

为了求解 A 和 B , 这里将每工频周期采样点数设置为 4 的整数倍,因为当 k 为偶数时,有 $\sum_{k=0}^{N-1} h(k) = 0$ 成立^[18]。分别对 $i(k)$ 和 $i(k)$ 中的偶序列求和,可得到

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^{N-1} i(k) = \frac{I_0(1 - e^{-T/\tau})}{1 - e^{-T_s/\tau}} \\ \sum_{k=0}^{N-1} i(2k) = \frac{I_0(1 - e^{-T/\tau})}{1 - e^{-2T_s/\tau}} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可得 A 的表达式为

$$A = (1 - B) \sum_{k=0}^{N-1} i(k) \quad (11)$$

B 的表达式为

$$B = \sum_{k=0}^{N/2-1} i(2k+1) / \sum_{k=0}^{N/2-1} i(2k) \quad (12)$$

至此, Δa_n 和 Δb_n 可根据式(8)求解,进而 a_n 和 b_n 可根据式(5)求解。

对输入信号 $i(t) = 20 \cdot e^{-t/0.03} + 30 \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) + 15 \sin(3\omega t + \frac{\pi}{3}) + 5 \sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3})$ 进行采样,利用

VC++6.0 编写程序实现改进的全波傅氏算法, 得到电流信号的基频、三次谐波和五次谐波分量的幅值分别为 30.00, 15.00 和 5.00, 与真实值完全一致。由此证明改进的全波傅氏算法是精确无误的, 能够完全消除衰减直流分量产生的计算误差。

2.4.2 相电流差突变量启动元件算法

在配网发生短路故障时, 需开放保护跳闸出口继电器的电源和保护处理程序, 而保护装置中的启动元件正是起到这样的作用。启动元件有多种类型, 包括电流、阻抗、相电流突变量等元件, 本文依据相电流差突变量启动元件算法, 在配网发生故障时采用相电流差突变量元件启动保护。

3 仿真验证

以线路过电流保护为例, 利用该继电保护一二次联合数字仿真系统进行保护仿真。采用 PSCAD/EMTDC 进行一次系统仿真, 其主程序结构如图 3 所示。

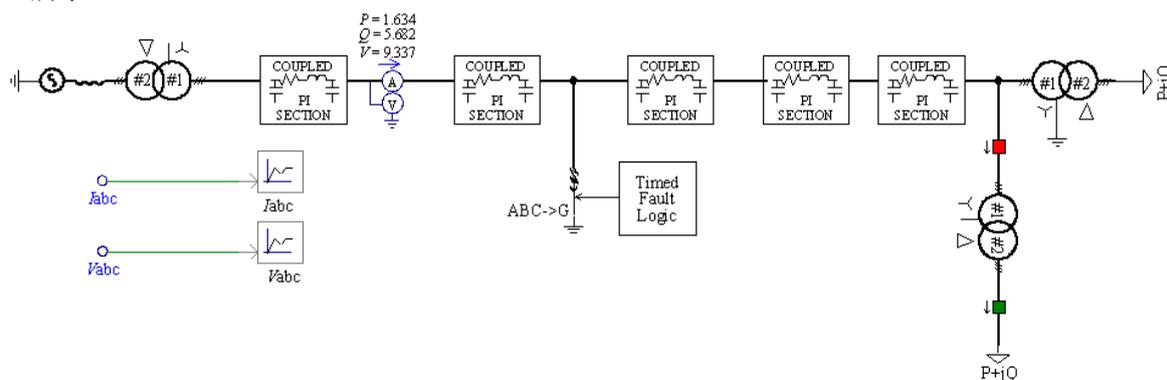


图 3 PSCAD/EMTDC 主程序结构

Fig. 3 Main program structure by using PSCAD/EMTDC

建立输电线路模型如图 4 和图 5 所示。



图 4 输电线路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of transmission lines

图 5 输电线路仿真模型

Fig. 5 Simulation model of transmission lines

假定在 AB 段线路全长的 30% 处发生三相短路故障, 故障开始时间为 0.1 s, 故障持续时间为 0.3 s, 仿真步长为 250 μ s, 与实际保护装置的采样间隔一致。

仿真得到故障发生时三相短路电流 I_a , I_b , I_c 和三相电压 V_a , V_b , V_c 的变化波形分别如图 6 和图 7 所示。将得到的故障电压、电流数据从 PSCAD 中

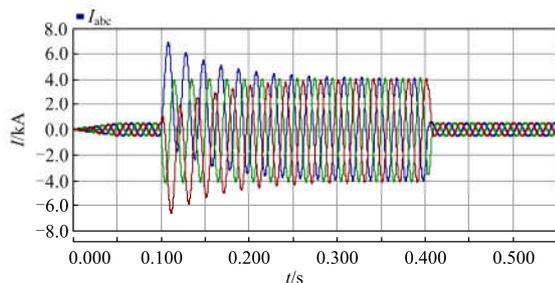


图 6 三相短路电流变化曲线

Fig. 6 Variation curve of three-phase short circuit current

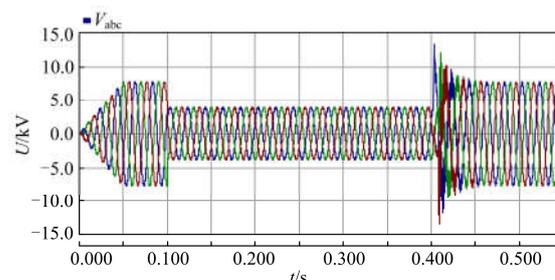


图 7 三相短路电压变化曲线

Fig. 7 Variation curve of three-phase short circuit voltage

导出, 并分别以 $I_{a.txt}$, $I_{b.txt}$, $I_{c.txt}$, $V_{a.txt}$, $V_{b.txt}$, $V_{c.txt}$ 形式命名存储到文本文件中, 作为仿真系统的故障数据来源使用。

通过 C 语言的文本读写功能读取故障数据, 并对得到的故障数据进行一系列处理后, 送入保护主程序进行保护仿真。

运行保护仿真程序得到的结果如图 8 所示。

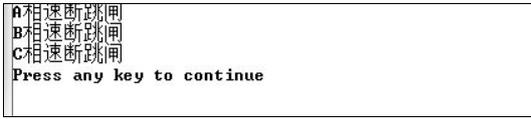


图 8 三相短路时线路过电流保护动作结果

Fig. 8 Operation of the line current protection during three phase short circuit

其他条件不变，将故障类型分别设置为两相短路和单相短路故障，得到线路过电流保护动作结果分别如图 9 和图 10 所示。



图 9 两相短路时线路过电流保护动作结果

Fig. 9 Operation of the line current protection during two phase short circuit



图 10 单相短路时线路过电流保护动作结果

Fig. 10 Operation of the line current protection during one phase short circuit

由仿真程序运行结果可知：当系统发生三相短路故障时，保护的 A、B、C 三相均动作跳闸；当系统发生两相(A、B 两相)短路故障时，保护的 A、B 两相动作跳闸，而故障不在 C 相保护区域内，所以 C 相保护不动作；当系统发生单相(A 相)短路故障时，保护的 A 相动作跳闸，而故障不在 B 相和 C 相保护区域内，所以 B 相和 C 相保护不动作。这与实际继电保护装置动作情况一致。

4 结论

本文对配电网继电保护一二次联合数字仿真系统进行了研究，提出了仿真系统的总体设计方案，并重点阐述了构建仿真系统需要解决的关键技术和相应的实现方案。最后借助 PSCAD/EMTDC 和 VC++构建了继电保护一二次联合数字仿真系统，并利用该仿真系统对具体线路过电流保护算例进行了仿真，以此验证了所研究仿真系统的正确性和合理性。考虑到如今配电网的实际情况，该配电网继电保护一二次联合数字仿真系统具有较高的实用性和市场价值。

参考文献

- [1] 易永辉. 继电保护装置寿命分析及寿命影响机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 79-83.
YI Yonghui. Research of relay protection device's life and relative effect mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 79-83.
- [2] 王忠, 张晓莉, 李忠安, 等. 继电保护装置自动测试系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 130-135.
WANG Zhong, ZHANG Xiaoli, LI Zhongan, et al. Design of automatic test system for relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 130-135.
- [3] 李志兴, 蔡泽祥, 许志华. 继电保护装置动作逻辑的数字仿真系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 97-101.
LI Zhixing, CAI Zexiang, XU Zhihua. Digital simulation system of relay protection movement logic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 97-101.
- [4] 冯小玲, 郭袞, 谭建成. 继电保护仿真系统的现状及其应用[J]. 广西电力, 2004, 27(6): 50-52.
FENG Xiaoling, GUO Niao, TAN Jiancheng. The application of current simulated system for relay protection[J]. Guangxi Electric Power, 2004, 27(6): 50-52.
- [5] 尹项根, 李振兴, 刘颖彤, 等. 广域继电保护及其故障元件判别问题的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 1-9.
YIN Xianggen, LI Zhenxing, LIU Yingtong, et al. Study on wide area relaying protection and fault element identification[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 1-9.
- [6] 陈礼义, 顾强. 电力系统数字仿真及其发展[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 1-6.
CHEN Liyi, GU Qiang. Power system digital simulation and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 1-6.
- [7] 陈德辉, 王丰, 杨志宏. 智能变电站二次系统通用测试平台方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 139-143.
CHEN Dehui, WANG Feng, YANG Zhihong. Unified test platform for smart substation secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 139-143.
- [8] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.

- [9] 田芳, 李亚楼, 周孝信, 等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 17-22.
TIAN Fang, LI Yalou, ZHOU Xiaoxin, et al. Advanced digital power system simulator[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 17-22.
- [10] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.
LIU Chunfang. An integrated design method of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.
- [11] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 一种馈线自动化仿真培训系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 131-136.
GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. A simulation training platform for feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 131-136.
- [12] LAN Zhihui, XU Yonghai, XIAO Xiangning. Research of the influence to the measurement unit of digital distance protection from electric locomotive loads[C] // Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada: IEEE, 2008: 1-6.
- [13] ANAYA-LARA O, ACHA E. Modeling and analysis of custom power systems by PSCAD/EMTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 266-272.
- [14] 郭保伟. 输电线路继电保护仿真平台的开发与研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
GUO Baowei. Development and research on the relay protection simulation platform for the electric transmission line[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007.
- [15] 王明磊, 常湧. 半周积分算法的几种改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 66-69.
WANG Minglei, CHANG Yong. Some new algorithms of the half-cycle integral algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 66-69.
- [16] 孔凡坊, 王三桃, 潘佩芳, 等. 基于小波变换模之和的奇异性检测启动元件算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 24-27.
KONG Fanfang, WANG Santao, PAN Peifang, et al. Singularity detection starting element algorithm based on wavelet transform modulus sum[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 24-27.
- [17] 齐先军, 丁明, 温阳东. 一种完全滤除衰减直流分量的短数据窗改进全波傅氏算法[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(17): 14-16.
QI Xianjun, DING Ming, WEN Yangdong. An improved short data window full-wave Fourier algorithm for completely filtering decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(17): 14-16.
- [18] 黄恺, 孙苓生. 继电保护傅氏算法中滤除直流分量的一种简便算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 50-52.
HUANG Kai, SUN Lingsheng. A compact algorithm for filtering decaying DC component in relay protection Fourier algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 50-52.

收稿日期: 2016-07-06; 修回日期: 2016-08-12

作者简介:

刘亚丽(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划、继电保护与先进电力设备; E-mail: liuylhust@126.com

周 昀(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网智能监控与评估、继电保护与先进电力设备; E-mail: zhouyun@hust.edu.cn

王少荣(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电网规划、配电网智能监控与评估、电力系统巡视及检测机器人等。E-mail: wsrwy96@vip.sina.com

(编辑 张爱琴)