

南阳特高压断路器失灵保护的研究

姜自强, 刘建勇

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 晋东南-南阳-荆门特高压示范工程的正式投运标志着特高压电网的建设已进入快速发展阶段, 但是特高压二次系统时间常数的增大使得 CT 拖尾现象变得不可忽视。一方面, 对特高压断路器 CT 电流互感器的选型提出了新的问题, 只选择 TPY 次级则会进一步恶化 CT 拖尾现象, 选择 P 次级则增加成本。另一方面, CT 拖尾对断路器失灵保护的正常动作造成了负面的影响。针对该情况, 对特高压 3/2 断路器接线方式下断路器的失灵保护进行了研究, 并提出一种针对性的改进方案。通过对比分析、仿真实验以及数模实验结果, 证明该修改方案是切实可行的。既能有效地解决特高压断路器 CT 电流互感器的选型问题, 也能有效地解决 CT 拖尾对失灵保护的危害问题。

关键词: 特高压; 断路器; 失灵保护; CT 拖尾

Study on Nanyang substation of UHV circuit breaker failure protection

JIANG Ziqiang, LIU Jianyong

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: The formal commissioning Jindongnan-Nanyang-Jingmen UHV demonstration project identifies that the construction of special high-voltage power grid has entered a rapid development stage, but the increase of UHV two system time constant makes the CT become tailing phenomenon can not be ignored. On the one hand, it puts forward a new problem for the selection of UHV circuit breaker CT current transformer, namely selecting only the TPY secondary will deteriorate further CT tailing phenomenon and selecting the P secondary will increase the cost. On the other hand, CT trailing influences breaker failure protection, making it unable to right action. In view of this situation, it studies the failure protection under the wiring mode of 3/2 breaker in UHV and proposes an improved scheme. The contrast analysis, simulation and RTDS experimental results prove that the modified scheme is feasible, which can both effectively solve the problems of the selection of UHV circuit breaker CT current transformer and CT tailing hazard failure protection.

Key words: UHV; breaker; failure protection; CT tailing

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)12-0117-06

0 引言

根据国际电工委员会对输电电压等级的划分, 高压(HV)通常指 35~220 kV, 超高压(EHV)通常指 330~1 000 kV 以下, 特高压(UHV)指 1 000 kV 及以上。

早在 2004 年, 为解决我国能源资源和电力负荷分布极不均衡的状况, 国家电网公司就提出了兴建以百万伏级交流特高压和±800 kV 级直流特高压为骨干的特高压电网^[1]。2009 年 1 月, 国内首条 640 km

长的特高压示范工程晋东南-南阳-荆门 1 000 kV 特高压交流输电示范工程正式投运, 标志着我国特高压电网正式进入快速发展阶段。

但是随着电网电压等级的提高, 一方面增加了电能的输送容量和传输距离, 提高了电能的传输经济性。另一方面由于输电线路的导线截面积的相应增大, 导线的电阻值则相应减小, 导致一次系统直流分量的时间常数值 T_1 (短路电流流过的电路电感和电阻之比)的增大。

T_1 的增大会延迟短路电流中非周期分量的衰减速度, 一方面容易造成电流互感器的暂态饱和, 从而导致二次电流的畸变; 另一方面造成了断路器断

开后的 CT 拖尾现象。

严重的 CT 拖尾会影响到断路器失灵保护的动作可靠性^[2]。

1 电流互感器的特性

1.1 电流互感器的拖尾

电流互感器的等值电路如图 1 所示。

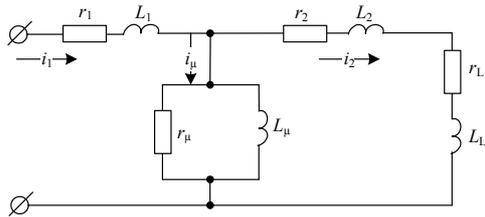


图 1 电流互感器等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of current transformer

在正常运行情况下，电流互感器的铁芯工作在低磁密条件下，励磁阻抗很大，励磁电流 i_{μ} 则很小。

在系统发生短路故障时，一次侧流过含有非周期分量的暂态短路电流，这种在时间轴上向一侧偏移的短路电流，会使电流互感器的铁芯磁密快速趋向饱和值，此时励磁阻抗下降，励磁电流大大增加， i_1 中的大部分作用为 i_{μ} ，以维持铁芯中的磁通。

随后保护动作跳开故障断路器，在短路电流被切除瞬间，电流互感器的铁芯仍工作在高磁密的条件下，随后铁芯的磁密按照二次回路的时间常数 T_1 做指数函数衰减。由励磁电流产生并存储在 CT 副边绕组的能量将通过副边电阻和电感组成的回路逐渐释放，必然形成 CT 二次电流的拖尾情况，而且 T_1 越大，拖尾现象越严重。

因此对于特高压系统，CT 拖尾是不可回避的问题。

1.2 特高压电流互感器的选型

特高压保护用电流互感器的选型原则，根据 2004 版《电流互感器和电压互感器选择及计算导则》中要求，所选电流互感器的性能必须满足继电保护正确动作的要求。一方面保证在稳态对称短路电流下的误差不超过规定值，另一方面对于短路电流中非周期分量和互感器剩磁等暂态的影响，还必须根据互感器所在系统暂态问题的严重程度以及所接保护装置的特性、暂态饱和和可能引起的后果等因素，来综合考虑合理选型。

对于特高压系统，考虑到系统一次时间常数较大，电流互感器暂态饱和较严重，因此宜选用 TP 类(TP 意为暂态保护)电流互感器。

1.3 TPY 电流互感器的问题

TPY 级电流互感器的铁芯中带有小气隙，使得其剩磁系数接近于 1，相比较不带气隙的 TPS、TPX 电流互感器约为 2~3 的剩磁系数而言，可以有效地减小剩磁，具有良好的暂态特性^[3-4]。

剩磁的减小，可以改善电流互感器的暂态特性，但是另一方面，使得一次短路电流被切除后励磁回路释放的能量也增大，CT 拖尾形成的二次电流衰减会更慢，即 CT 拖尾情况会更严重^[5]。

1.4 CT 拖尾对失灵的影响

对于特高压 3/2 断路器接线方式，按照断路器配置的断路器保护是一种近后备保护，在发生电力设备故障或线路故障后又同时发生断路器拒动的情况下动作出口跳开联系电源的所有相关断路器，保证故障的可靠切除，避免出现损坏发电机、变压器等主设备或引起火灾甚至造成电网的崩溃瓦解等严重后果。

断路器失灵保护动作逻辑如图 2 所示。在满足有外部保护跳令开入且判别相应的失灵电流元件动作后，可以选择先经 T_1 延时跳本断路器三相，然后经 T_2 延时跳其他相关断路器；或者直接经 T_2 延时跳其他相关断路器^[6]。

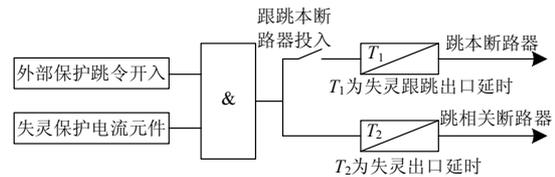


图 2 断路器失灵保护动作逻辑

Fig. 2 Logic of circuit breaker failure protection action

系统发生故障后，如果同时发生断路器拒动故障，则失灵电流元件持续满足条件，直至失灵保护动作出口。

但是如果断路器断开后出现 CT 拖尾现象，会导致失灵保护电流元件不能快速返回，如果拖尾电流不能在失灵延时 T_2 的时间内衰减完，就会造成失灵保护的误动作。

1.5 CT 拖尾的处理

由于断路器失灵保护的电流判别元件有快速返回的要求，一般不超过一个周波(20 ms)，所以直接采用 TPY 级 CT 的二次电流肯定无法满足要求。

为了防止这种情况的出现，对于特高压站一般要求线路用 CT 必须具备不同的 CT 次级，对于线路保护应接用 TPY 次级，而断路器失灵保护要求使用独立的 CT 次级，应接用 P 级次级^[7-9]。但是单独增加一组 P 级 CT 给失灵保护专用，势必增加一次

系统的投资。

为了更好地解决该问题, 充分利用微机断路器保护在数字处理技术上的优势, 本文提出可采用一种专门的改进方案来消除或削弱“CT 拖尾电流”的影响, 以确保断路器失灵保护能够在使用 TPY 级 CT 二次电流时获得良好的动作性能, 不受 CT 拖尾电流的影响。

2 改进方案

2.1 拖尾的解决方案

针对断路器断开后出现的 CT 拖尾现象对失灵保护的不利影响, 对于断路器失灵保护而言, 可采用以下三种方案予以解决。

方案一: 抬高失灵电流定值门槛, 但是会降低断路器失灵保护的灵敏度, 存在拒动风险, 违背继电保护灵敏性、可靠性原则。

方案二: 增加失灵保护延时时间定值, 在断路器真正失灵时会延长系统切除故障的时间, 可能会影响到系统的稳定, 违背继电保护快速性原则。

方案三: 采用更好的保护电流采样处理方法, 从根本上来抑制 CT 拖尾时衰减直流分量对失灵保护电流判据元件的影响, 这才是最佳的解决方案, 新的改进方案也是据此而来。

2.2 常规滤波算法

傅里叶算法是目前电力系统微机继电保护中广泛应用的算法, 可以精确地计算输入的电流、电压信号中的基波和各次谐波, 且具有很强的滤除谐波能力, 但是它无法滤除衰减的直流分量。

针对断路器断开后不同的 CT 拖尾情况, 对失灵保护进行实际的模拟测试分析, 其中 CT 拖尾时衰减直流分量参数为: 初值 $10I_n$ (I_n 为二次额定电流, 以下均同), 衰减时间常数 90 ms; 失灵电流定值 $0.08I_n$ 。测试结果如表 1 所示。

表 1 CT 拖尾对失灵元件的影响

Table 1 Effect of CT tailing on the failure element

断路器断开后 拖尾情况	失灵保护 电流滤波算法	失灵保护电流元 件返回时间/ms
未发生 CT 拖尾	全周傅里叶	≤20
发生 CT 拖尾	全周傅里叶	170

全周傅里叶算法又称全周傅氏算法, 是微机继电保护最常用的傅氏算法^[10-11], 它由一个全周的正弦滤波器和一个余弦滤波器构成, 在全周傅氏算法中, 输入信号 $x(t)$ 的 n 次谐波分量及其实部、虚部系数分别如式(1)~式(3)所示。

$$x_n(t) = a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t \quad (1)$$

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N x_k \cos kn \frac{2\pi}{N} \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N x_k \sin kn \frac{2\pi}{N} \quad (3)$$

式中: N 为周期采样点数; n 为谐波次数。对于余弦滤波器和正弦滤波器的幅频响应如图 3 所示。

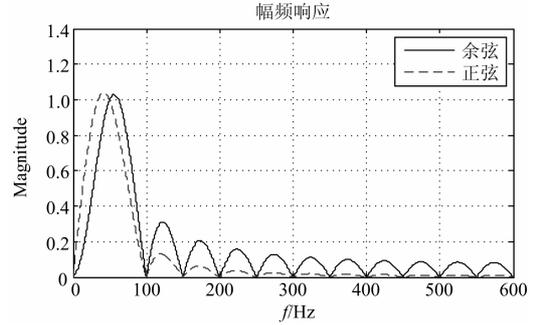


图 3 正弦、余弦滤波器幅频响应

Fig. 3 Amplitude frequency response of sine, cosine filter

根据图 3 分析可知, 余弦滤波器对于低频部分的响应较正弦滤波器要低; 但是在高频部分则相反, 正弦滤波器的响应要比余弦滤波器低。因此对于常规的全周傅氏算法, 由于其虚部系数是由正弦滤波器组成的, 导致其对低频的直流分量的滤波效果较差。因此如果对其虚部的正弦滤波器加以改进, 就能满足滤除衰减直流分量的效果。

2.3 改进方案

根据 Mann-Morrison 算法可知, 对于纯正弦波形, 即 $y(t) = Y_c \cos \omega_0 t + Y_s \sin \omega_0 t$, 其中 Y_c 和 Y_s 为实数, 可推导出式(4)。

$$\begin{bmatrix} Y_c^{(k)} \\ Y_s^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_k \\ \frac{y_{k+1} - y_{k-1}}{2 \sin \frac{2\pi}{N}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于常规的全周傅氏算法, 其实部系数如式(5)所示。

$$y_c = \frac{2}{N} \cos \frac{2\pi k}{N} \quad (5)$$

式中, $k=0,1,2,\dots,N-1$ 。则可构建一个全新的傅氏算法, 其实部系数仍然为 y_c , 其虚部根据 Mann-Morrison 算法, 用实部来表示虚部, 为 $y_s = \frac{y_c(k+1) - y_c(k-1)}{2 \sin \frac{2\pi}{N}}$, 其滤波系数如式(6)、式(7)所示。

$$M_c = [0, y_c, 0] \quad (6)$$

$$M_s = \frac{1}{2 \sin \frac{2\pi}{N}} ([-y_c, 0, 0] + [0, 0, y_c]) \quad (7)$$

再采用差分, 得到一个全新的傅氏算法, 称之为余弦傅氏算法, 其滤波系数如式(8)、式(9)所示。

$$DM_c = [0, dy_c, 0] \quad (8)$$

$$DM_s = \frac{1}{2 \sin \frac{2\pi}{N}} ([-dy_c, 0, 0] + [0, 0, dy_c]) \quad (9)$$

式中

$$dy_c = \frac{1}{2 \sin \frac{2\pi}{N}} ([y_c, 0, 0] + [0, 0, -y_c])$$

其相应的向量算法公式如式(10)、式(11)所示。

$$\text{Re}(k) = \sum_{i=0}^N x_{(k-i)} DM_c(i) \quad (10)$$

$$\text{Im}(k) = \sum_{i=0}^N x_{(k-i)} DM_s(i) \quad (11)$$

则构建的该余弦差分傅氏算法, 由于其虚部使用实部推导而来, 因此解决了虚部原来采用的正弦滤波器存在的对衰减直流分量滤波效果差的问题。

全周差分、余弦傅氏(无差分)和余弦傅氏(两点差分)的幅频响应图如图 4 所示。

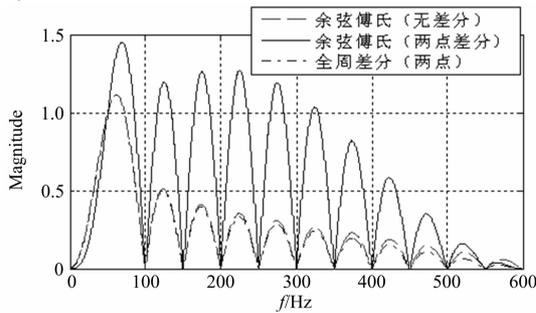


图 4 全周差分、余弦傅氏的幅频响应

Fig. 4 Amplitude frequency response of a full week difference and cosine Fourier

根据图 4 分析, 可见余弦傅氏(两点差)的高频段响应比全周差分(两点)和余弦傅氏(无差分)要高, 但是其低频段响应明显要低。

3 改进滤波算法的仿真

3.1 静态仿真

1) CT 拖尾时衰减直流分量参数为: 初值 $A=10I_n$, 衰减时间常数 $T=30 \text{ ms}$; 失灵电流定值 $0.08I_n$ 。断路器保护失灵电流采样值在采用不同的滤波算法时的采样值如图 5 和图 6 所示。

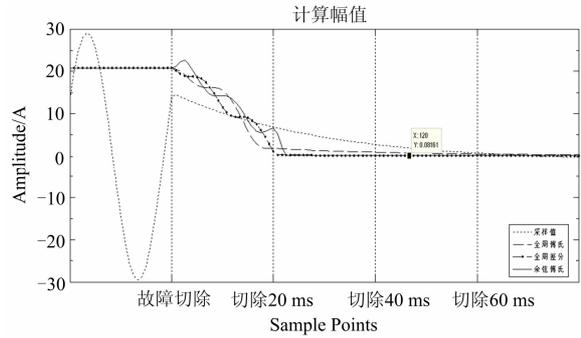


图 5 在 $A=10 \text{ A}$, $T=30 \text{ ms}$ 下的衰减仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform at the current amplitude=10 A, attenuation time constant=30 ms

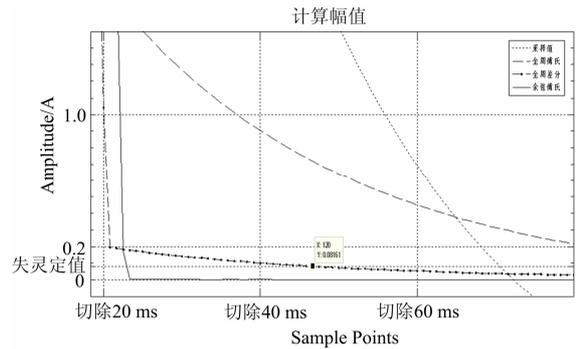


图 6 故障切除 20 ms 后的放大仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform after amplifying when the fault is removed 20 ms

2) CT 拖尾时衰减直流分量参数为: 初值 $10I_n$, 衰减时间常数 90 ms ; 失灵电流定值 $0.08I_n$ 。断路器保护失灵电流采样值在采用不同的滤波算法时的采样值如图 7 和图 8 所示。

3) 改变衰减直流分量的初始值以及衰减时间常数的大小, 失灵定值 $0.08I_n$, 对采用不同滤波算法时失灵保护返回时间的仿真结果如表 2 所示。

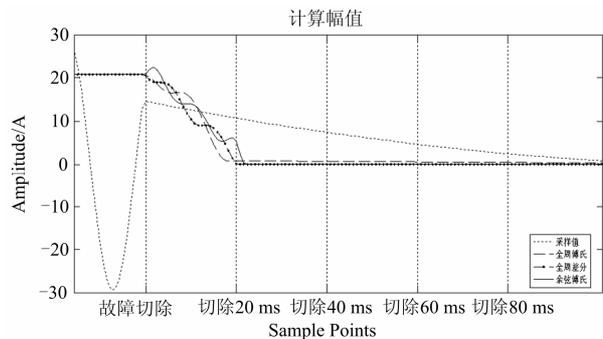


图 7 在 $A=10 \text{ A}$, $T=90 \text{ ms}$ 下的衰减仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform at the current amplitude=10 A, attenuation time constant=90 ms

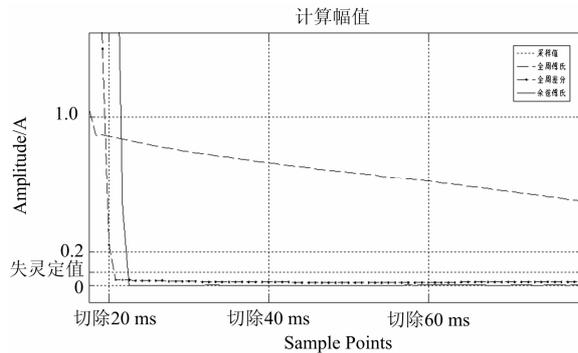


图 8 故障切除 20 ms 后的放大仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform after amplifying when the fault is removed 20 ms

表 2 不同条件的 CT 拖尾对失灵元件的影响

Table 2 Effect of CT tailing on failure element under different conditions

衰减直流分量初始条件		故障切除后失灵保护返回时间/ms		
初值/A	衰减时间常数 T /ms	全周傅氏算法	全周差分算法	余弦傅氏算法
1	30	44	21	23
1	60	42	21	23
1	90	33	21	23
1	200	19	21	23
3	30	74	21	23
3	60	100	21	23
3	90	114	21	23
3	200	130	21	23
5	30	88	28	23
5	60	124	21	23
5	90	148	21	23
5	200	>150	21	23
10	30	103	47	23
10	60	142	21	23
10	90	>150	21	23
10	200	>150	21	23
15	30	108	61	23
15	60	>150	23	23
15	90	>150	22	23
15	200	>150	21	23
20	30	110	75	23
20	60	>150	21	23
20	90	>150	21	23
20	200	>150	21	23

3.2 静态仿真结果

1) 断路器断开后发生 CT 拖尾时, 衰减时间常数越小, 直流分量衰减越快, 此时采用全周差分傅

氏算法滤波的效果就越差。

2) 断路器断开后发生 CT 拖尾时, 直流分量的初值越大, 此时采用全周差分傅氏算法滤波的效果就越差。

3) 断路器断开后发生 CT 拖尾时, 不管衰减时间常数以及初值如何改变, 采用改进的余弦傅氏算法的滤波效果比全周差分傅氏算法明显要好(两种算法下最大的返回时间差达到 52 ms), 基本在保证故障切除后 25 ms 内就能完全滤除直流分量。

4) 所以如果这种根据 Mann-Morrison 算法和傅氏、差分相结合的改进算法, 就可以很好地滤除衰减非周期分量。同时考虑到高频段信号对余弦傅氏算法的影响较大, 建议在实际应用时可采用常规傅氏算法和余弦傅氏算法与逻辑的滤波方案, 这样既削弱了高频段信号的影响, 还保留了余弦傅氏算法对衰减直流分量的较强滤波效果。

3.3 数模测试

采用这种改进方案的断路器保护装置, 在实际参加网局组织的针对拖尾问题的 RTDS 测试中表现良好, 失灵保护能够可靠正确地动作。

4 结论

采用这种改进方案的 3/2 接线断路器失灵保护完全可以支持使用暂态特性较好的 TPY 级电流互感器, 可以解决断路器断开时 CT 拖尾对失灵保护返回的不利影响, 且不存在无误动风险。在特高压系统上会有更好的应用前景, 也为电力系统的稳定运行提供了可靠的保证。

参考文献

- [1] 张宁, 刘静琨. 影响特高压电网运行的因素及应对策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 109-114.
ZHANG Ning, LIU Jingkun. The ultra high voltage grid risk analysis and its assessment framework[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 109-114.
- [2] 余江, 周红阳, 陈朝晖, 等. 500 kV 断路器失灵保护优化方案研究[C] // 2013 年第十四届全国保护和控制系统学术研讨会.
YU Jiang, ZHOU Hongyang, CHEN Zhaohui, et al. Research of improvement of 500 kV breaker failure protection[C] // The Fourteenth Session of the National Protection and Control Conference, 2013.
- [3] 武一, 李奎, 王尧, 等. 磁调制式剩余电流传感器的动态励磁过程分析与仿真[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 244-252.

WU Yi, LI Kui, WANG Yao, et al. Analysis and simulation of dynamic process of excitation current of magnetic modulation residual current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 244-252.

[4] 李旭, 黄继东, 倪传坤, 等. 不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 141-145.

LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.

[5] 黄莉, 杨卫星, 张雪松. 基于 PSCAD / EMTDC 的带气隙电流互感器建模及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 178-182.

HUANG Li, YANG Weixing, ZHANG Xuesong. Modeling and simulation of current transformer with air-gap based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 178-182.

[6] Q / GDW_422-2010 国家电网继电保护整定计算技术规范[S].

Q/GDW_422-2010 technical specification for protection setting of state grid[S].

[7] 赵曼勇, 舒双焰, 赵有铖. 高压电网防保护死区电流互感器保护绕组的配置及反措[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 132-134.

ZHAO Manyong, SHU Shuangyan, ZHAO Youcheng. Configuration scheme of current transformer coils used by protections and measures against dead zone in high voltage power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 132-134.

[8] 张健康, 粟小华, 胡勇, 等. 智能变电站保护用电流互感器配置问题及解决措施[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 140-145.

ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, HU Yong, et al. Problems and solutions of configuration scheme of current transformer used by protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 140-145.

[9] DL866-2004 电流互感器和电压互感器选择及计算导则[S].

DL866-2004 the guide for selection and calculation of current transformers and voltage transformers[S].

[10] 朱超, 梅军, 王椿丰, 等. 基于低延迟有限冲击响应滤波器的差动保护采样率转换算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 241-248.

ZHU Chao, MEI Jun, WANG Chunfeng, et al. FIR filter with reduced group delay based a sampling frequency conversion algorithm for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 241-248.

[11] 李毅, 吴政球, 汪泓, 等. UHV 输电暂态信号的动力学分析新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 44-51.

LI Yi, WU Zhengqiu, WANG Feng, et al. New research approach using dynamic analysis for ultra high voltage (UHV) transmission transient signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 44-51.

收稿日期: 2014-09-18; 修回日期: 2014-11-04

作者简介:

姜自强 (1979-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: jzq3i@aliyun.com

刘建勇 (1976-), 男, 工程师, 研究方向为智能变电站。

(编辑 魏小丽)