

DOI: 10.7667/PSPC171407

# 基于双端电流波形相关度识别的线路零序差动保护启动元件

石吉银<sup>1</sup>, 邓超平<sup>1</sup>, 范桂有<sup>2</sup>, 施晟<sup>1</sup>, 晁武杰<sup>1</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003)

**摘要:** 对一起线路保护误动案例的分析结果表明: 若某侧电流互感器在区外故障时发生轻微暂态饱和, 因其电流波形畸变不明显使饱和判据失效, 零序差动保护容易误动作。为解决这一问题, 对三相电流互感器的暂态饱和特性进行了分析, 得到了暂态饱和时间与故障角、故障电流的关系, 并采用迭代方法计算出进入饱和的最小时间和使电流互感器饱和的最小全偏移故障电流。在此基础上, 以两端零序电流作为识别对象对电流互感器饱和状态进行鉴别, 构建了改进的零序差动保护启动元件。在电流互感器有剩磁和无剩磁工况下对各种故障进行了仿真, 结果表明该启动元件可大幅提高零序差动保护动作的准确率, 证明了其可行性和有效性。

**关键词:** 电流互感器; 暂态饱和; 零序差动保护; 相关度识别; 启动元件

## Starting element of line zero-sequence differential protection based on correlation identification of double-terminal current waveform

SHI Jiyin<sup>1</sup>, DENG Chaoping<sup>1</sup>, FAN Guiyou<sup>2</sup>, SHI Sheng<sup>1</sup>, CHAO Wujie<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350007, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** Analysis results of line protection mal-operation case show that, if a current transformer is in slight transient saturation when external fault occurs, zero-sequence differential protection is easy to malfunction because of the saturation criterion failure due to unobvious current waveform distortion. To solve this problem, transient saturation characteristics of three-phase current transformers are analyzed, by which the relationship between transient saturation time and fault angle and fault current is obtained, and minimum saturation time and minimum fully offset fault current that makes the current transformer saturated are calculated by iterative method. On this basis, improved zero-sequence differential protection starting element is constructed by using double-terminal zero-sequence current as the recognition object to identify the saturation state of current transformers. Simulated by all kinds of faults under residual magnetism and no residual magnetism conditions of the current transformer, the results show that the starting element can greatly improve the accuracy of zero-sequence differential protection by which its feasibility and effectiveness are proved.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Fujian Electric Power Company Limited (No. 52130416001U).

**Key words:** current transformer (CT); transient saturation; zero-sequence differential protection; correlation identification; starting element

## 0 引言

零序差动保护对高阻接地故障有很高的灵敏度, 在输电线路、变压器、高压电抗器等设备的保护装置中得到广泛应用。线路零序差动保护的启动值通常按照躲过最大负荷电流下的不平衡电流并要求对高阻接地故障有足够的灵敏度来整定<sup>[1]</sup>, 其整

定值较小。由于种种原因, 线路两侧 CT(电流互感器)的变比、拐点、二次负载等参数难以做到完全一致, 其暂态特性因此也存在差异。当外部故障存在暂态非周期分量时, 两侧 CT 饱和的程度便可能不同, 甚至出现一侧饱和而另一侧不饱和的情形。CT 暂态饱和使流过穿越故障电流(或者励磁涌流)的保护设备产生零序差流, 容易造成零序差动保护误动作<sup>[2-4]</sup>。

针对 CT 的暂态饱和问题, 国内文献已有不少

基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目 (52130416001U)

报道, 主要阐述 CT 暂态饱和的识别方法<sup>[5-12]</sup>和 CT 饱和后的应对措施<sup>[2-4, 13-15]</sup>。CT 暂态饱和的识别方法主要有基于突变量采样值的饱和平面识别方法、小波包能量识别方法、虚拟电流识别方法、基于局部均值分解(LMD)原理的检测方法等。这些方法对存在畸变的单个 CT 电流波形有较好的识别效果, 但不适用于因暂态穿越故障电流使 CT 轻微饱和而产生零序差流的场合。对于 CT 饱和后的应对措施, 文献[2]和文献[3]均提出采用改变差动比率制动特性的方法, 或者提高差动保护启动值, 或者加大比率制动曲线的斜率, 降低保护误动的概率。然而, 在仅有单侧 CT 饱和时, 这些方法因零序差动电流不带制动特性而失效。文献[3-4]提出了投入谐波闭锁判据的做法, 这种方法在轻微暂态饱和时, 因波形畸变较小也将失效。文献[13]提出差动保护动作出口延时采用反时限的方式, 躲过故障切除后因局部暂态饱和引起的差流; 文献[14]提出在较大的故障电流时, 相量差动保护延时 200 ms 动作以避免 CT 饱和。文献[13-14]都是通过牺牲保护动作的快速性来躲过 CT 饱和, 而文献[14]在较小的暂态故障电流时仍有可能出现误判。文献[15]采用引入换流变三角形侧零序环流分量作为桥差保护制动分量的方法, 可有效防止交流系统接地故障或励磁涌流导致的 CT 饱和而引起的保护误动, 但对三角形侧无环流的故障(如相间故障、三相故障等)不起制动作用。

本文对现场发生的一起线路零序差动保护误动案例进行了分析, 其结果表明该误动由两侧 CT 饱和程度不一致引起。在分析了三相 CT 暂态饱和特性的基础上, 采用对延时出现的线路两侧零序电流进行对比的思路, 提出了基于双端电流相关度识别的零序差动保护启动元件。仿真结果表明, 本文提出的启动元件可以有效防止区外故障时 CT 饱和引起的零序差动保护误动作。

## 1 线路零序差动保护误动案例分析

某 110 kV 水电厂一次接线如图 1 所示, 其中  $S_{110}$  为电网等效电源。2017 年 4 月 19 日 5 点 14 分 39 秒, 该厂发电机在并网过程中自动准同期装置发生异常, CB12 断路器非同期合闸并网。并网后约 196 ms, GC 线路保护报“零序差动保护动作”, 线路两侧断路器跳闸。

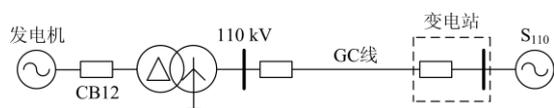


图 1 电气一次接线图

Fig. 1 Electrical primary wiring diagram

GC 线路的二次电流波形如图 2 所示, 其中变电站侧二次电流已经折算为电厂侧二次电流(电厂侧 CT 变比为 800/5, 变电站侧 CT 变比为 600/5)。图 2 中, 线路两侧 A、B 相电流波形在整个故障过程中完全重合; 而 C 相电流波形在机组并网约 46 ms 后出现差异, 同一时刻起变电站侧开始出现零序电流, 最大值为 7.6 A, 但电厂侧并无零序电流出现。进一步分析可知, 故障发生后, 线路电流的非周期分量很大, C 相接近全偏移电流。通过以上现象, 再考虑该线路两侧 CT 变比存在的差异, 可以判定变电站侧 C 相 CT 出现了轻微饱和, 但故障电流波形畸变较小。仅单侧存在零序电流时, 零序差动保护无制动特性, 零序差动电流达启动值(1.0 A)后即动作跳闸。

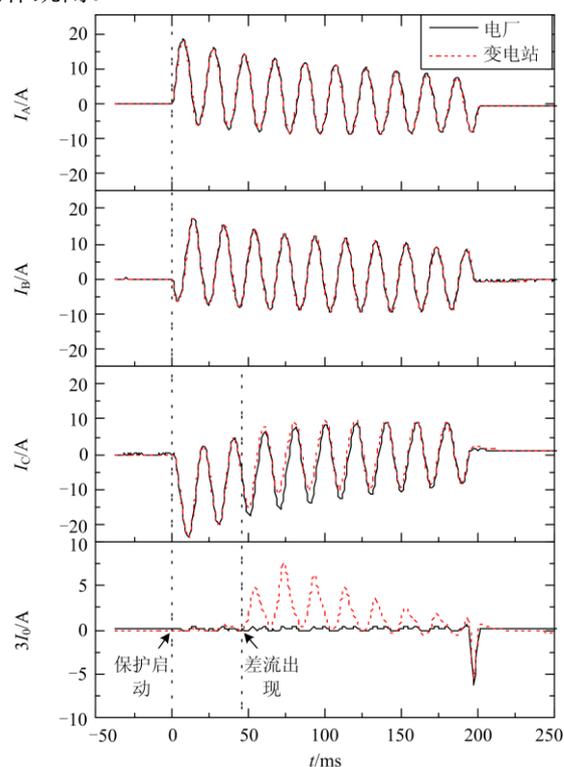


图 2 GC 线路二次电流波形

Fig. 2 Secondary current waveform of GC line

## 2 三相电流互感器暂态饱和特性分析

第 1 节所述案例中, 故障电流周期分量一次值仅约 1.5 kA, 不足 CT 额定电流的 2 倍。然而, 由于非周期分量的存在, CT 还是出现了延时饱和现象。

三相故障电流经  $t$  s 后铁芯中的全磁通与交流磁通幅值之比, 即暂态系数  $K_{tt_i}$  ( $i=A, B, C$ ) 可表示为<sup>[16]</sup>

$$\left\{ \begin{aligned} K_{tf\_A} &= \frac{\omega T_s T_p}{T_s - T_p} (e^{-t/T_s} - e^{-t/T_p}) \cos \theta + \\ &\quad \sin \theta e^{-t/T_s} - \sin(\omega t + \theta) \\ K_{tf\_B} &= \frac{\omega T_s T_p}{T_s - T_p} (e^{-t/T_s} - e^{-t/T_p}) \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) + \\ &\quad \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) e^{-t/T_s} - \sin(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi) \\ K_{tf\_C} &= \frac{\omega T_s T_p}{T_s - T_p} (e^{-t/T_s} - e^{-t/T_p}) \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) + \\ &\quad \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) e^{-t/T_s} - \sin(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中： $T_p$  为 CT 一次时间常数； $T_s$  为 CT 二次侧时间常数； $\theta$  为故障时刻电压相位。由式(1)可知这种延时饱和现象在三相电流互感器中并不是同时出现的，在特定的系统中，各相电流互感器进入饱和的时间差异主要由  $\theta$  和故障电流大小决定。

根据文献[16]，P 级电流互感器按 2 倍暂态系数设计，据此，可由式(1)计算 CT 的饱和时间。考虑式(1)方程不易求解，可采用迭代算法求取各相 CT 第一次进入饱和状态的时间。令  $K_{tf\_i}$  为 2，取  $T_p$  为 0.05 s、 $T_s$  为 5.0 s，选取不同的故障角  $\theta$ ，可得到相应的各相 CT 饱和时间  $t$ ，二者关系如图 3 所示。图 3 表明，各相 CT 饱和时间  $t$  随故障角  $\theta$  呈 2 倍工频周期变化；对于任意故障角  $\theta$ ，存在最小饱和时间  $T_{th}$ (本文参数对应为 7 ms)。

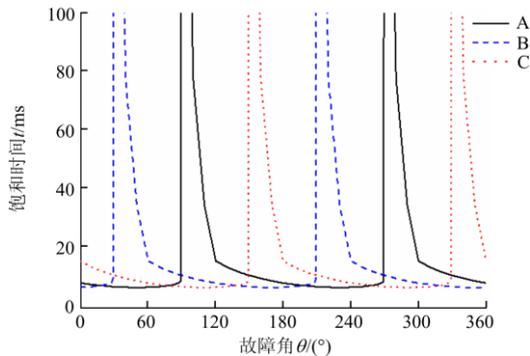


图 3 故障角与三相 CT 饱和时间的关系

Fig. 3 Relationship between fault angle and three-phase CTs saturation time

类似地，假设额定准确限值一次电流为  $I_{pal}$ ，某相电流为全偏移电流(如 A 相)，电流幅值与饱和时间的关系如图 4 所示。由式(1)可求得 CT 暂态系数最大值  $K_{tfmax}$  为[16]

$$K_{tfmax} = \omega T_p \left( \frac{T_p}{T_s} \right)^{T_p / (T_s - T_p)} + 1 \quad (2)$$

在电流小于  $I_{th}$  时，因暂态过程最大磁通小于饱和磁通，CT 不会出现暂态饱和，其值由式(3)决定(考虑 2 倍暂态系数)：

$$I_{th} = \frac{2}{K_{tfmax}} \quad (3)$$

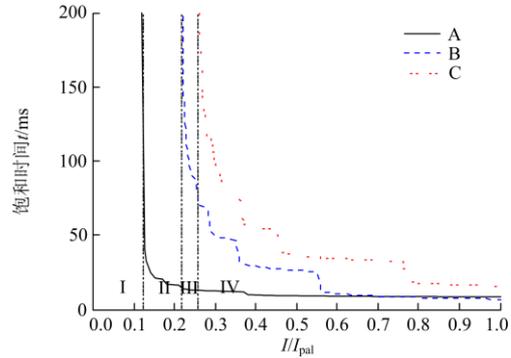


图 4 故障电流与三相 CT 饱和时间的关系

Fig. 4 Relationship between fault current and three-phase CTs saturation time

根据本文选取的参数由式(2)、式(3)计算  $I_{th}$  为 12.3%，小于该值的区域在图 4 中对应区域 I，CT 工作在该区域时不会饱和。图 4 中的区域 II 中仅全偏移电流相 CT 会进入饱和，区域 III 中全偏移电流相及其滞后相 CT 会进入饱和，而区域 IV 中三相 CT 均会进入饱和。本文误动案例中变电站侧 CT 准确级为 5P20，故障电流稳态分量约为 12.5%，即工作在区域 II，出现了仅 C 相 CT 饱和的现象。

### 3 改进的零序差动保护启动元件

由以上分析可知，三相电流互感器暂态饱和有以下特征：① 延时饱和特性，最小饱和的时间  $T_{th}$  由式(1)根据电流互感器设计的暂态系数、一次时间常数和二次时间常数决定；② 故障电流小于  $I_{th}$  时，三相电流互感器不会饱和。利用以上两个特征，可对零序差动保护启动元件进行改进。

图 5 为线路零序差动保护动作逻辑，其中  $I_{310.dif}$  为零序差动元件，启动元件包含相电流突变量元件  $\Delta I_{\Phi\Phi}$  和零序过流元件  $I_{310}$ ， $T_d$  为保护动作延时。

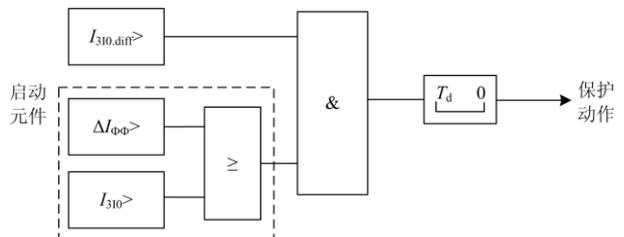


图 5 零序差动保护动作逻辑

Fig. 5 Zero-sequence differential protection trip logic

对采样点数为  $N$  的数据窗, 定义线路两侧零序电流波形相关度函数为

$$\rho(n) = \frac{-\sum_{k=n-N+1}^N 3i_{0,M}(k)3i_{0,N}(k)}{\max\left[\sum_{k=n-N+1}^N 3i_{0,M}^2(k), \sum_{k=n-N+1}^N 3i_{0,N}^2(k), (\sqrt{2}k_a I_{2n})^2\right]} \quad (4)$$

其中:  $n$  为采样点编号;  $3i_{0,M}$  为本侧零序电流;  $3i_{0,N}$  为对侧零序电流, 均采用瞬时值;  $k_a$  为精确工作电流系数, 可取为 0.05;  $I_{2n}$  为 CT 二次额定电流。式 (4) 计算的相关系数越大, 表明两侧的零序电流波形越一致。设置相关度阈值为  $\rho_{zd}$  (可按躲过电流互感器误差整定), 当相关度小于  $\rho_{zd}$  时, 双端波形识别元件输出 0; 当相关度大于或等于  $\rho_{zd}$  时, 双端波形识别元件输出 1。

以图 5 的启动元件为基础引入双端波形识别元件, 得到图 6 所示的零序差动保护启动元件。为防止电流太小双端波形识别元件出现误判, 启动元件中加入  $I_{\Phi} > I_{th}$  电流判据。启动元件在相电流突变量元件动作后, 对双端零序电流波形进行识别 (须获得对侧保护的瞬时采样值), 若在  $T_{th}$  时间内双端波形识别元件输出为 1, 即表明没有接地故障发生, 则闭锁零序差动保护。该元件中返回时间  $T_r$  可按照躲过后后备保护动作时间整定。

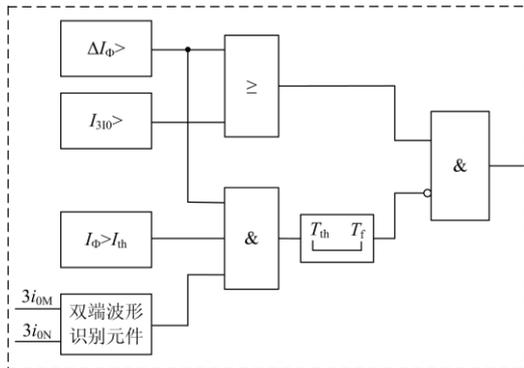


图 6 改进的零序差动保护启动元件

Fig. 6 Improved zero-sequence differential protection starting element

#### 4 仿真验证

在 PSCAD 中搭建图 1 所示的发电输电系统, 电流互感器采用基于铁芯磁滞理论的 Jiles-Atherton 模型<sup>[17]</sup>。仿真系统参数如下:

110 kV 系统  $S_{110}$ : 正序阻抗  $(1.856+j29.150)\Omega$ , 零序阻抗  $(1.741+j27.355)\Omega$ 。

GC 线路: 正序阻抗  $(0.056+j0.317)\Omega/\text{km}$ , 正序电容  $0.013\ \mu\text{F}/\text{km}$ ; 零序阻抗  $(0.219+j1.105)\Omega/\text{km}$ ,

零序电容  $0.011\ \mu\text{F}/\text{km}$ ; 线路长度 8.2 km。

变压器: 额定功率 40 MVA, 变比 115/10.5 kV, 阻抗电压 10.5%, 接线组别为 YND11。

发电机: 额定电压 10.5 kV, 额定功率 22 MW, 额定功率因数 0.8, 次暂态电抗 13%, 暂态电抗 21%, 同步电抗 199%。

电厂侧 CT: 变比 800/5, 容量 20 VA, 准确级 5P20, 二次负载  $0.9\ \Omega$ ; 变电站侧 CT: 600/5, 容量 25 VA, 准确级 5P20, 二次负载  $1\ \Omega$ 。

设置最小饱和时间  $T_{th}$  为 6 ms, 全偏移故障电流门槛  $I_{th}$  为 12.3%, 波形相关函数阈值  $\rho_{zd}$  为 0.95, 数据窗长度  $N$  取 3。

#### 4.1 不考虑 CT 剩磁仿真分析

假设 CT 无剩磁, 在 15%  $I_{pal}$  和 100%  $I_{pal}$  全偏移故障电流下对各种故障类型进行仿真, 线路零序差动保护的動作结果如表 1 所示。仿真结果表明, 对于区内接地故障, 零序差流在 CT 饱和前就已经出现, 不论是改进前的启动元件还是改进后的启动元件, 零序差动保护均能可靠动作; 区外故障时, 对于改进后的启动元件, 零序差流出现前启动元件已闭锁, 线路零序差动保护不会出现误动作现象。但在模拟区外单相接地转区内相间接地故障时, 由于区外故障期间线路保护启动且无零序差流出现, 本文启动元件被闭锁, 在区内故障时零序差动保护出现了拒动。

表 1 不考虑 CT 剩磁时零序差动保护动作仿真结果

Table 1 Simulation results of zero-sequence differential protection action without regard to CT residual magnetism

故障类型	改进前启动元件		改进后启动元件	
	15% $I_{pal}$	100% $I_{pal}$	15% $I_{pal}$	100% $I_{pal}$
非同期并网	× <sup>1</sup>	×	—	—
单相接地(区内)	√	√	√	√
两相短路(区内)	— <sup>2</sup>	— <sup>2</sup>	—	—
两相短路接地(区内)	√	√	√	√
三相短路(区内)	×	×	—	—
单相接地(区外)	×	×	—	—
两相短路(区外)	— <sup>2</sup>	— <sup>2</sup>	—	—
两相短路接地(区外)	×	×	—	—
三相短路(区外)	×	×	—	—
区外单相接地转区内	×	×	—	—
相间接地故障	×	×	—	—

注 1: “×”表示误动作, “√”表示正确动作, “—”表示不动作, 下同; 注 2: 相间故障仿真时, 因同侧两相 CT 饱和程度相同, 不产生零序电流, 启动元件改进前的零序差动保护在两相短路时也不会误动作。

#### 4.2 考虑 CT 剩磁仿真分析

模拟区外发生三相短路, 分别在 15%  $I_{pal}$ 、50%

$I_{pal}$ 、75% $I_{pal}$ 、100% $I_{pal}$ 全偏移故障电流下对 CT 不同剩磁工况进行仿真, 线路零序差动保护的動作结果如表 2 所示。仿真结果表明, 在反向剩磁工况下, 因暂态饱和时间变长, 本文启动元件可靠闭锁, 零序差动保护未出现误动作。在同向剩磁工况下, 对于 100% $I_{pal}$ 全偏移故障电流, 由于 CT 饱和时间变短, 本文启动元件不满足闭锁要求, 動作结果与改进前相同; 对于 15%  $I_{pal}$ 、50%  $I_{pal}$ 、75%  $I_{pal}$ 全偏移故障电流, 在剩磁分别小于 70%、50%、40% 时均可靠不动作。

表 2 考虑 CT 剩磁时零序差动保护動作仿真结果

Table 2 Simulation results of zero-sequence differential protection action considering CT residual magnetism

剩磁	故障电流			
	15% $I_{pal}$	50% $I_{pal}$	75% $I_{pal}$	100% $I_{pal}$
100%	×	×	×	×
70%	—	×	×	×
50%	—	—	×	×
40%	—	—	—	×
30%	—	—	—	×
20%	—	—	—	×
10%	—	—	—	×
-10%	—	—	—	—
-50%	—	—	—	—
-100%	—	—	—	—

4.1 节和 4.2 节的仿真结果表明, 本文启动元件能显著提高零序差动保护動作的正确率。另外, 本文仿真中的故障电流均采用全偏移故障电流, 而在 100 kV 以上的电网中, 线路短路故障都是发生在电压峰值前 40° 之内<sup>[6]</sup>, CT 暂态饱和的时间较全偏移故障电流时有所增加, 本文启动元件正确動作的概率将进一步提高。

## 5 结论

区外故障导致 CT 轻微暂态饱和时, 现有的 CT 饱和判据容易失效, 线路零序差动保护容易误动作。针对此问题, 本文研究了三相电流互感器暂态延时饱和的特性, 提出了利用双端电流波形相关度识别饱和的方法, 构建了改进后的零序差动保护启动元件。主要结论如下:

1) 基于双端电流波形相关度识别的启动元件在区内故障时能可靠启动; 而在区外故障时, 利用零序差流延时出现的特点, 能可靠防止零序差动保护误启动。

2) 不论 CT 是否存在剩磁, 本文所提出的启动元件均能明显降低零序差动保护误動作的概率。当

故障过程中线路两侧 CT 零序电流波形一致的时间不足  $T_{th}$  时, 启动元件仍然开放, 零序差动保护仍然按照改进前的启动元件进行逻辑判断, 保护性能不受影响。

3) 对于区外转区内故障, 区外故障启动时, 不论线路 CT 是否饱和, 零序差动保护都将被闭锁。该情形中的线路金属性接地故障可由纵联相电流差动切除; 线路高阻接地故障可由零序过流保护切除, 保护動作时间将变长。这是本文启动元件的不足之处, 需要进一步研究解决。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 559—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.  
National Development and Reform Commission of the PRC. Setting guide for 220 kV~750 kV power system protection equipment: DL/T 559—2007[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [2] 宋志明, 余高旺, 邢文, 等. 负荷电流下并联电抗器差动误动现象及解决措施[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 145-150.  
SONG Zhiming, YU Gaowang, XING Wen, et al. Phenomenon and resolution of differential protection mal-operation for shunt reactor under load current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 145-150.
- [3] 戚宣威, 尹项根, 张哲, 等. 变压器空投导致相邻元件差动保护误动分析及防范措施[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 129-134.  
QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Analysis on mal-operation for current differential due to adjacent transformer switch-on and its countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 129-134.
- [4] 尹项根, 张哲, 王友怀, 等. 变压器间及其电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 1-9.  
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, WANG Youhuai, et al. Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 1-9.
- [5] 柳焕章, 王兴国, 周泽昕, 等. 一种利用电流突变量采样值的电流互感器饱和和识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3574-3579.  
LIU Huanzhang, WANG Xingguo, ZHOU Zexin, et al. A CT saturation identification method using sampled current fault component data[J]. Power System Technology, 2016,

- 40(11): 3574-3579.
- [6] 李美蓉, 公茂法, 公政, 等. 利用小波包能量区分变压器内外部故障[J]. 电测与仪表, 2015, 52(16): 21-24.  
LI Meirong, GONG Maofa, GONG Zheng, et al. Distinguish between transformer internal and external fault based on wavelet packet energy[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2015, 52(16): 21-24.
- [7] 李肖博, 谭凌, 揭萍, 等. 基于虚拟电流波形特征的母线保护原理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 115-150.  
LI Xiaobo, TAN Ling, JIE Ping, et al. An algorithm based on virtual current for bus-bar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 115-150.
- [8] 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 transformer on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [9] 罗慧, 周卿松, 苗洪雷, 等. 基于 LMD 母线差动保护 CT 饱和和检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 49-54.  
LUO Hui, ZHOU Qingsong, MIAO Honglei, et al. A method for CT saturation detection based on LMD in busbar differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 49-54.
- [10] 毕大强, 冯存亮, 葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和和识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 184-190.  
BI Daqing, FENG Cunliang, GE Baoming. Research on identification of partial transient saturation in current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 184-190.
- [11] 公茂法, 夏文华, 张晓明, 等. 基于 HHT 的抗 CT 饱和和变压器故障识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 64-70.  
GONG Maofa, XIA Wenhua, ZHANG Xiaoming, et al. New method to identify transformer fault with anti-CT saturation based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 64-70.
- [12] 任龙飞, 郝治国, 张保会, 等. 继电保护抗 TA 暂态饱和和改进 Prony 算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 126-132.  
REN Longfei, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Improved Prony algorithm against transient CT saturation for relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 126-132.
- [13] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.  
YUAN Yubo, LU Yuping, XU Yang, et al. The influence and countermeasure to transformer differential protection of CT partial saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [14] 吴大立, 尹项根, 张哲, 等. 输电线路复合差动保护方案[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 87-91.  
WU Dali, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Research on multi-differential protection scheme for transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 87-91.
- [15] 张侃君, 戚宣威, 胡伟, 等. YD 型换流变三角形绕组 CT 饱和对直流保护的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 99-105.  
ZHANG Kanjun, QI Xuanwei, HU Wei, et al. Impact of the CT saturation of the delta winding on the HVDC protection and its countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 99-105.
- [16] 国家能源局. 电流互感器和电压互感器选择及计算规程: DL/T866—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
National Energy Administration of China. Code for selection and calculation of current transformer and voltage transformer: DL/T866—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [17] ANNAKAGE U D, MCLAREN P G, DIRKS E, et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.

收稿日期: 2017-09-20; 修回日期: 2017-11-25

作者简介:

石吉银(1981—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: shi\_jiyin@126.com

邓超平(1971—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护、柔性直流输电技术。

范桂有(1967—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行管理。

(编辑 葛艳娜)