

DOI: 10.7667/PSPC150874

变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究

姚东晓¹, 邓茂军¹, 倪传坤¹, 王立德², 马和科¹, 吕利娟¹, 黄继东¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网湖南省电力公司检修公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 多侧励磁涌流特征类似区内故障, 容易造成变压器差动保护快速动作区误动作。研究了两种多侧励磁涌流产生的机理并分析了其对不同类型差动保护快速动作区的影响。第一, 变压器高压侧空投致铁芯饱和时高压侧和低压绕组中均产生励磁涌流的机理及其对分相差快速动作区的影响; 第二, 自耦变区外故障切除致铁芯饱和时高、中压侧及低压绕组均出现励磁涌流的机理及其对纵差快速动作区的影响。基于对两种励磁涌流产生机理及特征的分析, 提出分相差不宜配置快速动作区, 而纵差快速动作区判据也应采取防误措施, 并提出了具体防误方案。经多次实验验证, 该方案可有效防止纵差快速动作区误动作。

关键词: 变压器; 多侧励磁涌流; 差动保护; 快速动作区; 恢复性涌流; 区内故障

Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone

YAO Dongxiao¹, DENG Maojun¹, NI Chuankun¹, WANG Lide², MA Heke¹, LÜ Lijuan¹, HUANG Jidong¹

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Maintenance Company of State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410000, China)

Abstract: Multiple sides' inrush currents of transformer are similar to inside fault currents, which is likely to cause the differential protection's fast action zone malfunction. This paper studies two multi-side inrush current's mechanism and analyzes the effects on two different types of differential protection fast action zones. First, the inrush current's mechanism generated from high-side and low-side windings when closing the high-side breaker without load led to core saturation and its effect on phase differential protection fast action zone; second, the inrush current's mechanism generated from high-side, mid-side and low-side windings when cutting off the outside region fault led to core saturation and its effect on longitudinal differential protection fast action zone. Based on the analysis of two inrush current generation mechanism and characteristics, it puts out that the winding differential protection should not deploy fast action zone, and the longitudinal differential protection's fast action zone should add error prevention measures. And it puts forward specific improvement program which has been proven to prevent malfunction in many experiments.

Key words: transformer; multi-side inrush current; differential protection; fast action zone; restorative surge; fault zone

0 引言

励磁涌流是引起变压器差动保护误动作的重要因素之一。经过长期的研究完善, 励磁涌流的判别方法越来越成熟^[1-8], 已很少出现因励磁涌流判据问题导致差动保护误动作的情况。然而, 对一些快速差动保护, 由于励磁涌流判据开放较慢, 一般需要 20 ms 左右, 不宜经励磁涌流闭锁, 比如差动速断保护、差动快速动作区。差动速断保护定值门槛高, 整定时考虑躲避励磁涌流, 因此不易出现励磁涌流导致的误动。而差动保护快速动作区定值门槛

不足以躲避励磁涌流, 虽然其判据本身具有抗单侧励磁涌流功能, 但对多侧励磁涌流, 仍存在误动作可能。

本文研究了多侧励磁涌流产生的原理, 并分析了两种产生多侧励磁涌流的情况及对差动快速动作区的影响。首先介绍了差动保护快速动作区的动作方程和条件, 然后对多侧励磁涌流产生的原理进行了详细分析, 通过建立变压器在空投和区外故障切除时的等值电路, 详细研究了变压器在空投和区外故障切除时出现多侧励磁涌流的机理, 得出分相差动保护不宜配置快速动作区, 而纵差保护快速动作

区也要考虑防误措施, 提出了具体防误方案, 经过多次动模及数模仿真实验验证, 该方案可有效防止多侧励磁涌流纵差快速动作区误动作。

1 差动保护快速动作区条件

差动保护快速动作区动作方程如式(1)。

$$\begin{cases} I_{op} > K_1 I_e \\ I_{op} > K_2 I_{res} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} I_{op} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n| \\ I_{res} = \max\{I_1, I_2, \dots, I_n\} \end{cases}$$

式中: I_{op} 为差动电流; I_e 为主变基准电流, 一般取主变高压侧额定电流; I_{res} 为制动电流; K_1 为固定门槛系数, 为防止重负荷 CT 断线影响, 可取 1.3; K_2 为差动制动系数, 为防止区外故障 CT 严重饱和导致误动作, 可取 1.2。

差动保护快速动作区逻辑如图 1 所示。在区内、区外故障同步识别逻辑判为区内故障的情况下, 若同时差流满足快速动作区特性方程, 经短延时 t , 差动保护快速动作区动作。其中 t 可设为 5 ms。

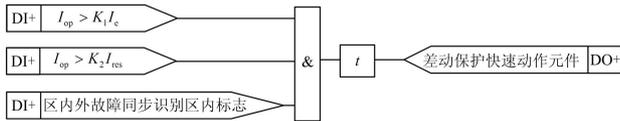


图 1 差动保护快速动作区动作逻辑

Fig. 1 Differential protection's fast action zone action logic

2 变压器多侧励磁涌流产生原理分析

变压器在空投或区外故障切除时, 若铁芯磁密过高, 便会出现励磁涌流。磁密计算如式(2)。

$$\begin{aligned} e_m(t) &= \frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{d[N \cdot \phi(t)]}{dt} \Rightarrow \\ \phi(t) &= \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\tau} e_m(t) dt \Rightarrow \\ B_m(t) &= \frac{\phi(t)}{S} = \frac{1}{NS} \int_{-\infty}^{\tau} e_m(t) dt = \\ &= \frac{1}{NS} \left(\int_{-\infty}^0 e_m(t_p) dt_p + \int_0^{\tau} e_m(t) dt \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $e_m(t)$ 为励磁电动势, 即励磁电抗两端电压; $\psi(t)$ 为绕组磁链; $\phi(t)$ 为铁芯磁通; N 为线圈匝数; $B_m(t)$ 为铁芯磁密; S 为铁芯截面积。对特定变压器, N 、 S 是固定值, 因此磁密主要决定于剩磁

$\frac{1}{NS} \int_{-\infty}^0 e_m(t_p) dt_p$ 、合闸角决定的电动势初始值 $e_m(0)$ 和时间 τ 。

变压器空投时, 在系统阻抗、变压器结构、绕组物理参数一定的情况下, 剩磁和合闸角的组合关系决定了励磁涌流的大小: 若剩磁较大, 且合闸角在系统电压过零点附近, 同时磁通变化方向与剩磁方向一致时, 会导致铁芯磁密过高而严重饱和, 产生较大励磁涌流。在变压器区外故障切除时, 决定励磁涌流大小的因素主要为故障合闸角及故障切除角。若故障合闸角在系统电压过零点附近, 此时相当于变压器铁芯中含较大剩磁; 由于断路器切除故障必须在电流过零点切除, 因此故障切除角往往在 $\pm 90^\circ$ 附近, 若故障切除后磁通变化方向与剩磁方向一致, 可导致铁芯磁密过高而饱和。

为分析铁芯饱和时多侧励磁涌流产生的原理, 首先分析两侧均有电源的双绕组变压器产生多侧励磁涌流的情况。双绕组变压器 A 相等值电路如图 2 所示。

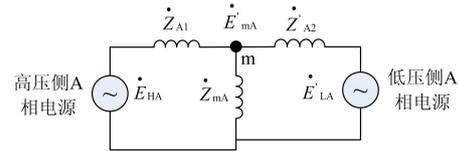


图 2 两侧均有电源的双绕组变压器等值电路

Fig. 2 Double winding transformer equivalent circuit with power supply at each side

图 2 中: \dot{E}_{HA} 为高压侧 A 相电源; \dot{E}'_{LA} 为低压侧电源; \dot{E}'_{mA} 为 A 相高低压绕组互感电动势。 \dot{Z}_{A1} 为高压侧 A 相等效漏阻抗; \dot{Z}_{mA} 为励磁阻抗; \dot{Z}'_{A2} 为低压侧等效漏抗。以上低压侧参数均为折算到高压侧后的值。

根据图 2 等值电路, 可计算出励磁阻抗两端的电动势为

$$\dot{E}'_{mA} = \frac{\dot{Z}'_{A2} \dot{E}_{HA} + \dot{E}'_{LA}}{1 + \frac{\dot{Z}'_{A2}}{\dot{Z}_{A1}} + \frac{\dot{Z}'_{A2}}{\dot{Z}_{mA}}} \quad (3)$$

在变压器 A 相铁芯未饱和时, 励磁阻抗 \dot{Z}_{mA} 非常大, 远大于高低压侧漏抗, 此时可忽略式(3)中的 $\frac{\dot{Z}'_{A2}}{\dot{Z}_{mA}}$ 项, 式(3)可变换为

$$\frac{1}{\dot{Z}'_{A2}} (\dot{E}'_{mA} - \dot{E}'_{LA}) + \frac{1}{\dot{Z}_{A1}} (\dot{E}'_{mA} - \dot{E}_{HA}) \approx 0 \quad (4)$$

由于漏抗的阻抗角基本相等, 因此式(4)表明,

$(\dot{E}'_{mA} - \dot{E}'_{LA})$ 与 $(\dot{E}'_{mA} - \dot{E}'_{HA})$ 相位相反, 以指向节点 m 为正方向, 流过 \dot{Z}'_{A1} 的电流与流过 \dot{Z}'_{A2} 的电流幅值相等, 相位相反, 不会形成多侧同相位励磁电流。

在变压器 A 相铁芯饱和时, 铁芯磁导率大大降低, 励磁阻抗 \dot{Z}'_{mA} 变小, 式(3)中的 $\frac{\dot{Z}'_{A2}}{\dot{Z}'_{mA}}$ 项不能忽略, 式(3)可变换为

$$\frac{1}{\dot{Z}'_{A2}}(\dot{E}'_{mA} - \dot{E}'_{LA}) + \frac{1}{\dot{Z}'_{A1}}(\dot{E}'_{mA} - \dot{E}'_{HA}) = -\frac{1}{\dot{Z}'_{mA}}\dot{E}'_{mA} \quad (5)$$

式(5)中等号右边不为 0, 且所有阻抗的阻抗角均基本相同, 若同时 \dot{E}'_{HA} 与 \dot{E}'_{LA} 相位相同, 根据式(3), \dot{E}'_{mA} 相位也必然与 \dot{E}'_{HA} 和 \dot{E}'_{LA} 相同, 而且 \dot{E}'_{mA} 随着 \dot{Z}'_{mA} 变小而降低, 若 \dot{E}'_{mA} 降低到小于 \dot{E}'_{HA} 和 \dot{E}'_{LA} , 则导致 $(\dot{E}'_{mA} - \dot{E}'_{LA})$ 与 $(\dot{E}'_{mA} - \dot{E}'_{HA})$ 相位相同, 此时会造成高、低压侧产生同相位的励磁涌流。

3 空投主变高压侧多侧励磁涌流产生机理及对分相差快速动作区影响分析

3.1 空投主变多侧产生励磁涌流的机理

以 Y/D11 接线形式的变压器为例, 在空投主变高压侧时, 由于除高压侧外其他侧开关均处于断开状态, 只有高压侧和低压侧三角绕组有电流回路。我们以主变 A 相为例进行分析。空投时, 主变 A 相等值电路如图 3 所示, 低压侧 A 相等效电源的合成相量图如图 4 所示。

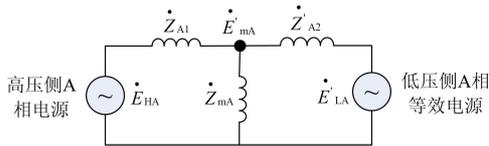


图 3 空投主变高压侧等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit for closing transformer's

high-side breaker without load

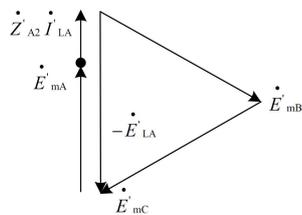


图 4 低压侧感应电动势

Fig. 4 Low-side induced electromotive force

其中: \dot{E}'_{HA} 为高压侧 A 相电源; \dot{E}'_{mA} 、 \dot{E}'_{mB} 、 \dot{E}'_{mC} 分别为 A、B、C 三相低压绕组中感应出的电动势; \dot{Z}'_{A1} 为高压侧 A 相等效漏阻抗; \dot{Z}'_{mA} 为励磁阻抗; \dot{Z}'_{A2} 为

高压侧 B、C 相漏抗与低压侧三相绕组等效漏阻抗之和; \dot{E}'_{LA} 为低压侧 A 相等效电源。以上参数均为折算到高压侧的值。图 4 中, \dot{I}'_{LA} 为低压绕组电流; \dot{E}'_{LA} 前面的负号表示低压侧 11 点接线方式下 B、C 相合成电压施加在 A 相绕组的尾端。低压侧 A 相等效电源计算如公式(6)。

$$\dot{E}'_{LA} = -(\dot{E}'_{mB} + \dot{E}'_{mC}) \quad (6)$$

由于高压侧三相电源为对称电源, 不难推出 \dot{E}'_{LA} 与高压侧 A 相电源相位一致, 幅值也基本相同。若不考虑 B、C 相的饱和, 相当于在主变 A 相高压绕组和低压绕组同时投入了相位与幅值均基本相同的电源, 若因剩磁及合闸角原因导致主变 A 相铁芯饱和, 根据式(5), 高、低压侧绕组会出现同相位励磁涌流, 各侧励磁电流的大小仅决定于其漏抗及励磁阻抗的大小。低压侧等效电源由非饱和相绕组电动势合成, 因此其饱和相励磁涌流会流过低压侧 3 相绕组, 表现出环流的特点。

3.2 多侧励磁涌流对分相差快速动作区影响分析

某 500 kV 变电站在空投主变(自耦变)高压侧时, 高压侧和低压绕组中均出现了励磁涌流, 如图 5 所示。

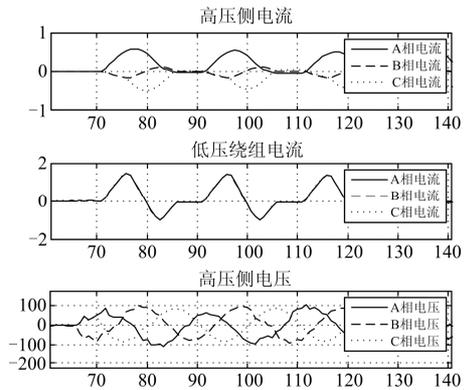


图 5 空投电流电压波形

Fig. 5 Current and voltage waveforms when closing high-side breaker without load

根据现场变压器参数, 主变高压侧额定电流(即分相差动基准电流)为 0.206 A, 高压侧平衡系数为 1, 低压绕组平衡系数为 0.114 5。

根据第 1 节差动电流与制动电流的计算公式, 得到空投时分相差动电流与制动电流如图 6 所示。

考察 A 相的差动电流和制动电流, 采用傅里叶变换后, A 相差流有效值为 0.276 A 左右, 制动电流有效值为 0.226 A 左右, 满足分相差快速动作区动作方程。同时由于涌流为纯差流, 区内外故障同步识别

逻辑应判为区内, 因此满足分相差快速动作区条件。

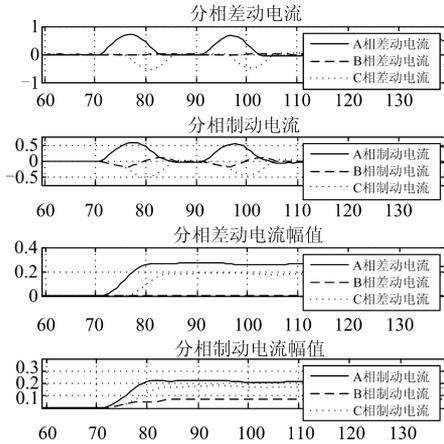


图 6 分相差流和制动电流

Fig. 6 Winding differential current and restraint current

4 区外故障切除致多侧涌流机理及对纵差快速动作区影响分析

4.1 区外故障切除致多侧励磁涌流机理

330 kV 以上变压器一般以自耦变为主, 其高、中压侧一般均有电源接入。以 3 绕组自耦变为例, 分析其在区外故障切除过程中, 励磁涌流的分布情况。图 7 为自耦变区外故障时系统的简化模型, 故障类型为高压侧区外三相对称故障。

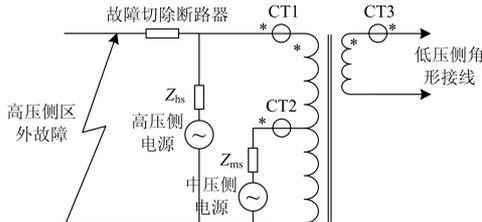


图 7 自耦变区外故障系统简化模型

Fig. 7 System's simplified model for autotransformer's external fault

图 7 中, 高压侧和中压侧均有电源, Z_{hs} 、 Z_{ms} 分别为高压侧和中压侧的系统阻抗。

高压侧三相短路故障后, 低压绕组电流很小, 可以认为无流, 自耦变可从中压侧出线端分解开^[9], 形成一个双绕组变压器, 其等效电路如图 8 所示。

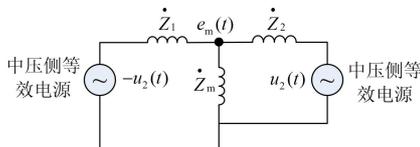


图 8 高压侧区外三相故障时自耦变等效电路

Fig. 8 Autotransformer equivalent circuit for the external three-phase fault on the high-side of autotransformer

图 8 中 $u_2(t)$ 为短路后中压侧电压; \dot{Z}_1 为串联绕组漏阻抗, \dot{Z}_2 为公共绕组漏阻抗; $e_m(t)$ 为励磁电动势; \dot{Z}_m 为励磁阻抗。

由图 8 可推导出励磁电动势, 如公式(7)。

$$e_m(t) = -u_2(t) + 2u_2(t) \frac{\dot{Z}_1 \parallel \dot{Z}_m}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_1 \parallel \dot{Z}_m} \quad (7)$$

由于故障时励磁阻抗远大于串联绕组漏阻抗^[10], 公式(7)可简化为

$$e_m(t) \approx u_2(t) \frac{\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_1} \quad (8)$$

\dot{Z}_1 和 \dot{Z}_2 均为感性相量, 二者相角应相同, 因此在故障持续过程中, $e_m(t)$ 应小于 $u_2(t)$, 而故障中 $u_2(t)$ 本身会比较小, $e_m(t)$ 应更小, 因此故障持续过程中其对铁芯磁通的影响较小。这样在故障持续时间内铁芯磁通主要决定于故障发生时的铁芯磁通, 若故障合闸角在电压过零点附近, 则在故障持续期间, 铁芯将一直维持高偏磁。

故障切除后, 高、中压侧电压恢复。此时自耦变等效电路如图 9 所示。

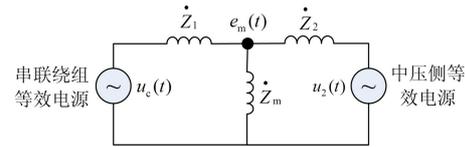


图 9 故障切除后自耦变等效电路

Fig. 9 Autotransformer equivalent circuit after fault cutting off

图中 $u_c(t)$ 为串联绕组两端电压, 其值为高压侧电压减去中压侧电压, $u_2(t)$ 为中压侧电压, 其余参数含义同图 7。

故障切除后, $u_c(t)$ 与 $u_2(t)$ 恢复, 且基本同相位, 根据高压侧与中压侧电压变比近似为 2 的关系, 二者幅值也相差不大。若故障切除后磁通变化方向与铁芯偏磁方向一致, 可导致铁芯饱和, 根据式(4), 高压侧、中压侧和低压绕组可同时出现励磁涌流。

4.2 多侧励磁涌流对纵差快速动作区影响分析

在 500 kV 自耦变动模实验中, 模拟自耦变高压侧区外三相故障, 故障切除时, 高压侧、中压侧及低压绕组均产生了恢复性涌流, 验证了以上分析的正确性。实验模型与图 5 相同, 模型中主变高压侧额定电流(即分相差动基准电流)为 0.923 7 A, 高压侧平衡系数为 1, 中压侧平衡系数为 0.968。纵差保护差流计算采用了星转角运算, 即将星侧的电气量等效折算到角侧。对低压侧三角形 11 点接线形式, 高、中压侧星转角折算如式(9)。

$$\begin{cases} \dot{i}_a = C_{\text{coef}}(\dot{i}_{aY} - \dot{i}_{bY})/\sqrt{3} \\ \dot{i}_b = C_{\text{coef}}(\dot{i}_{bY} - \dot{i}_{cY})/\sqrt{3} \\ \dot{i}_c = C_{\text{coef}}(\dot{i}_{cY} - \dot{i}_{aY})/\sqrt{3} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: C_{coef} 为被折算侧平衡系数; \dot{i}_{aY} , \dot{i}_{bY} , \dot{i}_{cY} 为星侧电流; \dot{i}_a , \dot{i}_b , \dot{i}_c 为折算后电流。

经如上折算算法后, 纵差差动电流和制动电流如图 10 所示。

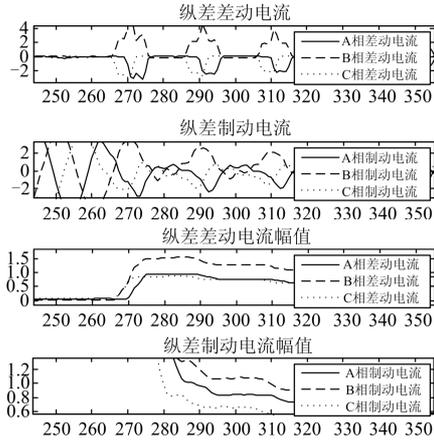


图 10 纵差差动电流及制动电流

Fig. 10 Longitudinal differential current and restraint current

在故障切除后 35~55 ms, 纵差 B 相差动电流为 1.282 A 左右, 制动电流为 1.066 A 左右, 满足快速动作区特性方程。同时由于区外故障持续时间内差流很小, 区外故障标志的差流保持逻辑无效。在 190 ms 后故障切除时产生较大恢复性涌流, 且远大于负荷电流, 区内外故障识别逻辑识别为区内故障, 因此能够满足纵差快速动作区条件。

5 防止差动快速动作区误动的措施研究

设置差动快速动作区的目的是在发生区内故障时快速切除故障, 其动作时间短, 一般为 10~20 ms。做为一般动作区的补充, 首先应保证快速动作区的可靠性和快速性, 不考虑区外转区内等复杂故障时靠快速动作区切除故障。基于此原则, 可以从限制快速动作区投入条件来解决多侧励磁涌流可能导致的误动作问题。

分相差由于计入低压绕组电流, 而铁芯饱和时, 低压绕组中往往会产生励磁环流, 因此分相差快速动作区在主变空投及时及恢复性涌流时均易误动作, 不宜设置快速动作区。

而纵差保护未计入低压绕组电流, 在主变空投时, 只有空投侧有电流, 差动电流与制动电流相等,

因此不会误动作; 但是在区外故障切除多侧产生较大恢复性涌流时, 仍然存在误动作可能。为防止多侧恢复性涌流导致误动作, 纵差快速动作区可考虑仅在保护启动 30 ms 内投入, 且在区内外同步识别逻辑识别为区外故障时直接闭锁纵差快速动作区 12 s, 长时间退出纵差快速动作区, 以保证区外故障切除时快速动作区处于退出状态。改进后逻辑经多次动模及数模实验验证, 能够可靠防止纵差快速动作区误动作。

6 结语

本文通过研究变压器空投及区外故障切除时多侧产生励磁涌流的原理及特征, 得出多侧励磁涌流可能造成差动电流大于制动电流, 从而满足差动保护快速动作区特性方程, 导致差动保护快速动作区误动作。用 Matlab 软件分析现场故障波形, 与分析结论完全一致, 验证了分析方法的正确性。

分析得出分相差动保护因低压绕组在铁芯饱和时往往会产生励磁环流, 不宜配置快速动作区。而纵差保护因未使用低压绕组电流, 可对纵差快速动作区增加防误方案, 并提出了具体改进措施, 经多次数模及动模实验检验, 该方案可有效防止纵差快速动作区误动作。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张炳达, 黄杰. 基于差分双正交小波熵的变压器励磁涌流识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 9-13.
ZHANG Bingda, HUANG Jie. Identification of transformer inrush current based on difference biorthogonal wavelet entropy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 9-13.
- [3] 何越, 林湘宁, 黄景光. 一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 141-149.
HE Yue, LIN Xiangning, HUANG Jingguang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2011, 26(11): 141-149.
- [4] 袁宇波, 陆于平, 李澄, 等. 基于附加相位判别的自适应二次谐波励磁涌流制动方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 19-24.
YUAN Yubo, LU Yuping, LI Cheng, et al. An adaptive second harmonic restrained method using phase angle and amplitude for inrush detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 19-24.
- [5] 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.
- [6] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.
- [7] 王雪, 王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.
WANG Xue, WANG Zengping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 148-154.
- [8] 赵永彬, 陆于平. 基于磁通对称特性的变压器励磁涌流判别新算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 66-71.
ZHAO Yongbin, LU Yuping. A new algorithm based on flux symmetry character for judging transformer inrush current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 66-71.
- [9] 王维俭. 电气主设备继电保护原理及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10] 王毓东. 电机学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994.
-
- 收稿日期: 2015-07-25; 修回日期: 2015-12-20
作者简介:
姚东晓(1982-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为继电保护; E-mail: yaodongxiao1@163.com
邓茂军(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护;
倪传坤(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护。
- (编辑 葛艳娜)