

过电流保护在变压器合闸过程中的自适应策略

陈奎, 程天华, 陈景波, 彭伟光

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 变压器铁磁材料的激磁特性呈现非线性, 这将导致在变压器合闸过程中产生励磁涌流现象。过电流保护往往反映单一的电流幅值特征而动作, 当变压器合闸过程发生时, 励磁涌流及邻近区域内的穿越电流均可能导致相关联的过电流保护误动。从序分量的角度出发, 构建了一个可通过标志函数的大小和突变, 区分故障与涌流的序分量标志函数。通过 PSCAD/EMTDC 仿真表明, 该标志函数能够充分反映电网结构的变化, 有效区分变压器励磁涌流和故障。将该标志函数应用于过电流保护上可以减小励磁涌流的影响。

关键词: 序分量; 标志函数; 对称分量; 励磁涌流

Adaptive strategy for overcurrent protection in process of transformer closing

CHEN Kui, CHENG Tian-hua, CHEN Jing-bo, PENG Wei-guang

(School of Information & Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The excitation characteristics of transformer ferromagnetic material present nonlinearity, which leads to inrush current phenomenon in the process of transformer closing. Overcurrent protection often acts reflecting single current amplitude characteristic. When transformer closing, inrush current and through current in the neighboring region may cause correlative overcurrent protection malfunctions. This paper, from the view of sequence components, constructs a mark function. The mark function can distinguish fault and inrush current by its value and sudden change. The simulation by PSCAD/EMTDC tool shows that this function can reflect the changes of power network structure fully, and the function can distinguish transformer inrush current and fault effectively. The application of mark function to current protections can reduce the effect of inrush current on overcurrent protections.

Key words: sequence components; mark function; symmetrical components; inrush current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)11-0136-06

0 引言

过电流保护因简单实用而被广泛应用为各种电力元件的保护。然而, 采用单一电流幅值特征构建的保护判据容易受电网暂态过程的影响。变压器合闸是一种正常的电网换路过程。但是, 由于存在变压器铁磁材料非线性因素, 变压器空载合闸过程会导致励磁涌流产生。若不采取相应措施, 这可能造成过电流保护误动。为躲过励磁涌流造成的干扰, 可以采用增大过电流保护动作时限的方法, 但动作时限的增大会使保护的性能下降, 当线路级数较多时, 更会带来上级线路动作时限整定的困难, 严重时电源侧的过电流保护动作时限整定值会无法满足电力规程的规定。本文阐述了一种在变压器合闸过程中通过标志函数 $s(t)$ 闭锁过电流保护的策略。在该策略中, 通过电流序分量比例系数的零极点配置

构建反映暂态过程类型的标志函数 $s(t)$, 由 $s(t)$ 闭锁变压器合闸过程中的过电流保护, 可使过电流保护能够自适应变压器合闸过程和电网故障状态。通过 PSCAD/EMTDC 的仿真研究表明: 新策略能够快速准确地区分变压器合闸过程和电网故障状态, 因此可以提升辐射式多级线路的过电流保护性能。

1 变压器合闸对过电流保护的影响

1.1 变压器合闸过程概述

空载合闸时, 变压器一次绕组由空载向额定电压状态过渡, 这一过程可等效为将一个巨大的非线性电感投入电网。在此情形下, 绕组中将产生很大的励磁涌流以建立变压器内部磁场。文献[1]给出了单相变压器忽略漏抗时的励磁涌流表达式, 假定变压器电压为 $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$, 将铁磁材料特性分段线性化后分析可得

$$i_{\mu} = \begin{cases} 0 & (\phi < \phi_{\text{sat}}) \\ \frac{U_m}{\omega L} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha) - \frac{\phi_r - \phi_{\text{sat}}}{\phi_m}] & (\phi > \phi_{\text{sat}}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U_m 为电源电压幅值; α 为合闸相位角; ϕ_r 为变压器铁心剩磁; ϕ_{sat} 为铁心的饱和磁通; ϕ_m 为变压器额定磁通。

由式(1)可知: 空载合闸涌流与开关转换瞬间施加到绕组上的电压及绕组的阻抗相关, 同时, 变压器铁心剩磁也会影响激磁过程, 极端情况下, 合闸涌流初始值可以达到变压器额定电流的数倍。相关研究表明: 涌流中含有大量的谐波和直流衰减分量, 绕组感性越大, 变压器时间常数就越大, 合闸暂态过程持续的时间也就越长, 从而合闸过程对过电流保护动作时限整定的影响也就越大^[1-2]。

由文献[3]和仿真可知: 励磁涌流是随时间逐渐衰减的, 在衰减过程中三相涌流逐渐趋向对称, 如图1所示。

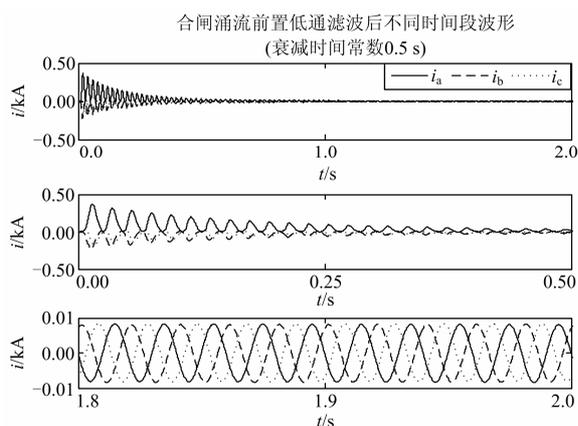


图1 励磁涌流发展过程示意图

Fig. 1 Development process diagram of inrush current

1.2 变压器合闸对过电流保护的影响

当电网中发生变压器合闸过程时, 变压器临近区域内(扰动域)的保护都会受到合闸过程的影响^[4]。为克服变压器合闸过程对过电流保护的影响, 已有多种方法得以应用。传统方法中, 可以增加过电流保护的動作时限以确保躲过变压器励磁涌流, 但该方法受变压器特性和保护整定值限制。过电流保护通常依据负荷电流整定, 其整定值较小, 当变压器时间常数较大时, 保护必然在动作过程中经过较长时间闭锁。对于辐射式多级线路, 过电流保护动作时限的整定按照阶梯原则进行, 从而上级线路的过电流保护也会受到影响, 线路级数较多时近电源端的过电流保护动作时限甚至无法满足应用要

求。从另一角度出发考虑躲过涌流的方法, 参考变压器复式比率差动保护中的谐波制动特性, 利用谐波分量闭锁过电流保护。然而, 现代电网中电力电子装置或非线性元件的大量应用使得谐波在电网故障和正常运行时都可能存在, 一些情况下谐波幅值甚至会超过合闸过程产生的谐波, 这就带来谐波闭锁策略的应用难题。现代变压器铁芯材料的改进使得变压器合闸产生的二次谐波更小, 从而使得这种利用谐波闭锁过电流保护的方法实现难度更大^[5]。

许多智能方法被应用于励磁涌流的鉴别^[6-12]。但这些方法有的需要装设昂贵的电压互感器, 有的则需要大量的数学运算。就主要应用于中低压配电网的过电流保护而言, 其保护装置的软、硬件配置限制了上述智能方法的实施。

2 合闸过程的标志函数区分原理

2.1 变压器合闸过程与非对称故障的区分思想

关于励磁涌流, 学者们已做过许多研究^[3,13-14]。其中, 文献[3]阐述了变压器合闸过程和电网故障对电网状态不对称程度的影响, 文章表明: 相较于不对称故障, 变压器合闸过程导致的电网状态不对称程度较小。在此, 图2给出了励磁涌流及不对称故障电流经过低通滤波和差分滤波后的波形。由图可见: 不对称故障发生时, 三相电流在相位和幅值上都发生了很大变化, 而三相励磁涌流在幅值与相位上与正常电流相比差异相对小一些。以上现象可以从两方面进行解释: 一方面, 从电网拓扑结构来看, 变压器合闸时, 施加于绕组的三相电压对称, 加之绕组间的差异较小, 所以合闸造成的电网状态不对称程度较小; 而不对称故障发生时, 电网结构会迅速变化为极不对称, 这种极不对称结构决定了电网呈现较大不对称状态。另一方面, 从暂态过程的发展趋势来看, 变压器合闸暂态会经非线性过程过渡

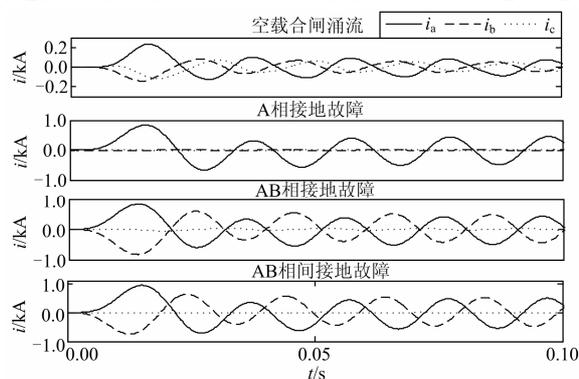


图2 励磁涌流与不对称故障电流对比

Fig. 2 Comparison of inrush current and unsymmetrical fault current

到电网对称状态；而故障时，电网较为迅速地发展成不对称结构，电网最终也将呈现极不对称状态。由此可得：非对称性故障和变压器合闸过程的区分可以通过分析电网状态的不对称程度实现。

2.2 变压器合闸过程与非对称故障的区分

仅采用序分量的值难以体现电网结构的变化，因此，本文采用序分量的相对关系构建合闸过程与故障状态的区分判据^[15]。

假定电网中电流的正、负、零序分量具有以下关系。

$$k(t)I_1(t) = [I_2(t) + \alpha I_0(t)] \quad (2)$$

式中： $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 和 $I_0(t)$ 为正、负、零序电流的有效值； α 设为零序分量相对于正、负序分量的比例系数。其中，设置 $\alpha > 1$ 以放大接地故障发生时零序分量的作用。

当电网发生非对称故障时，存在如下关系。

(1) 单相接地故障

$$I_1(t) = I_2(t) = I_0(t) = \frac{U_F(t)}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_g} \quad (3)$$

(2) 两相相间故障

$$I_0(t) = 0, I_2(t) = -I_1(t) = \frac{U_F(t)}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (4)$$

(3) 两相接地故障

$$I_0(t) = I_1(t) \cdot \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2 + 3Z_g} \quad (5)$$

$$I_2(t) = I_1(t) \cdot \frac{Z_0 + 3Z_g}{Z_0 + Z_2 + 3Z_g}$$

式(3)~式(5)中： $U_F(t)$ 为故障点电压； Z_f 为故障综合过渡阻抗； Z_g 为故障对地综合阻抗； Z_0 、 Z_1 、 Z_2 分别为电网零序、正序、负序综合阻抗。

由此可得：在故障稳态时， k 有以下关系。

(1) 单相接地故障

$$k = \alpha + 1 \quad (6)$$

(2) 两相相间故障

$$k = 1 \quad (7)$$

(3) 两相接地故障

$$1 < k < \alpha \quad (8)$$

(4) 对称故障状态或正常状态

$$k \approx 0 \text{ 或 } k = 0 \quad (9)$$

在此，根据 k 在不同故障状态时对应的值，进行零点配置并设计标志函数 $s(t)$ 为

$$s(t) = (1 - k(t)) / (ak(t)(b - k(t)) + c) \quad (10)$$

式(10)中：分子 $1 - k(t)$ 对应 $k = 1$ 时函数的零点，用于将两相相间故障发生时的函数值映射到0值附

近；分母中的 $k(t)$ 对应 $k = 0$ 时函数的极点，此极点的设置将对称状态时的函数值映射为绝对值较大的值，由于此时分子为正，所以此时 $s(t)$ 为较大正值；同理： $b - k(t)$ 的设置对应 $k = \alpha + 1$ 时函数的极点以放大单相接地故障发生时的函数值，由于此时分子为负，所以单相接地故障发生且电源与故障点间存在零序回路时， $s(t)$ 为绝对值较大的负值。根据以上阐述，总结 $s(t)$ 的配置方法如下： a 取较小正值以放大不同状态对应的模式间距， b 应满足 $0 < b - 1 - \alpha < \sigma$ （ σ 为较小正数）， c 的设置用于保证 $s(t)$ 的计算过程不会出现零除错误，同时 c 的值应不至于导致映射区间内各状态的模式间距过小。实际配置中，可将极点配置在理论极点的邻域。分析 $s(t)$ 可知： α 的值不宜过大，过大时零序分量对函数值的影响过大而负序分量相对较小，太小则会产生相反的效果。经过大量仿真数据的分析比较，本文取 $\alpha = 4$ 、 $a = 0.1$ 、 $b = 5.1$ 、 $c = 0.1$ ，由此设计的标志函数 $s(t)$ 为

$$s(t) = \frac{1 - k(t)}{0.1k(t)(5.1 - k(t)) + 0.1} \quad (11)$$

经以上分析可得：在变压器合闸过程中，虽然存在暂态序分量，但电网状态不对称程度较小，相较于不对称故障， $s(t)$ 值的下降程度要小，随着涌流的衰减， $s(t)$ 值会逐渐回升；而不对称故障状态发生时， $s(t)$ 值会更大程度上下降，由于此时电网是极不对称结构，所以 $s(t)$ 值不会回升，呈现稳定状态。

2.3 合闸过程与对称故障的区分

三相故障时电网对称，所以仅通过 $s(t)$ 的大小难以区分变压器合闸过程和三相故障状态。然而，可以从两种过程的发展速度、过程中电流的变化趋势两方面考虑区分策略。从两种过程的发展速度方面考虑，本文研究的是励磁涌流衰减时间常数较大的情况，在这种情形下， $s(t)$ 的变化速度较慢；而当三相故障发生时，故障瞬间会出现负序分量，由于负序分量存在的时间很短，因此 $s(t)$ 在短时间内下降，但 $s(t)$ 会随着负序分量的消失迅速恢复到较大值，表现为 $s(t)$ 曲线会出现一个骤降。从两种过程中的电流变化来看，励磁涌流呈现衰减状态，而三相故障电流不会发生严重衰减。因此，可以结合 $s(t)$ 的变化速度及过程中电流的变化趋势进行励磁涌流与三相故障的区分。

3 仿真分析

仿真系统如图3所示。系统中，线路采用Bergeron模型，阻抗设为 $0.032\ 06\ \Omega/\text{km}$ ；变压器励磁涌流衰减时间常数设为 $0.5\ \text{s}$ ，膝点电压为 1.25

pu, 励磁电流占额定电流的 1%, 变压器中性点不接地。在仿真中, 设置二阶巴特沃兹低通滤波器模拟微机保护前置滤波, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真模型库中的 On-Line Frequency Scanner 模块实时提取对称分量有效值。本文将电源中性点分为直接接地和不接地两种情况进行分析, 仿真设计合闸或故障发生在不同电角度 (取每 5 个电角度为一时间点), 仿真分别设置了金属性故障和电阻性故障, 并利用直流电源注入法模拟变压器铁心剩磁对策略的影响。

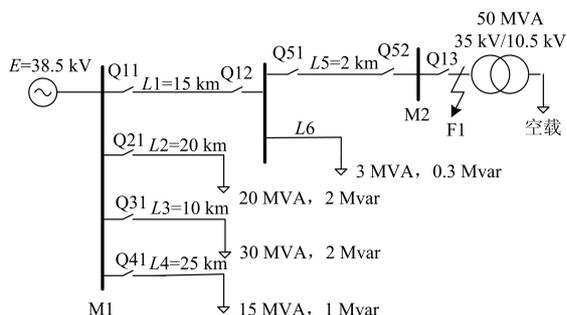


图3 仿真系统示意图

Fig. 3 Diagram of simulation system

3.1 电源中性点直接接地时的仿真分析

故障设为 F1, 利用开关 Q13 投入变压器, 采用 Q13 处的电流采样值进行分析。

图 4 为正常合闸与合于故障时的 $s(t)$ 仿真信息图, 其中, 曲线从上到下依次对应于合闸于三相故障、变压器正常合闸、合闸于两相相间故障、合闸于两相接地故障和合闸于单相接地故障。从图 4 可以看出, $s(t)$ 可以迅速地将不对称故障和合闸涌流过程区分开来, 表现在涌流过程对应的 $s(t)$ 值在大多时间内大于不对称故障对应的 $s(t)$ 值。不同系统及故障设置下的仿真结果表明: 正常合闸时, 虽然合闸初期的 $s(t)$ 最小值可以达到 0 到 0.1 区间, 但 $s(t)$ 在合闸后 0.05 s 内即可恢复到 1.5 以上, 随后逐渐回升; 而合闸于不对称故障时, 两相相间故障对应的 $s(t)$ 曲线最高, 仿真表明其值在整个过程中不超过 0.5。当不对称接地故障发生时, 系统会出现零序分量, 因为 α 对零序分量有放大作用, 不对称接地故障对应的 $s(t)$ 值在整个过程中均为负值。至于合闸于三相故障, 图 4 表明其对应 $s(t)$ 值在合闸后 0.05 s 就已经恢复到较大值 ($s > 8$), 相较于励磁涌流过程, 三相故障发生时的 $s(t)$ 变化速度快很多, 因此可以利用这种速度变化结合电流特征进行两种过程的辨识。

本文对不同合闸电角度、过渡电阻、剩磁情况

进行了仿真分析, 结果表明: $s(t)$ 在上述因素变化时不会发生太大变化。这充分说明: 变压器正常合闸与不对称故障可以通过 $s(t)$ 的大小区分, 而合闸过程与三相故障的区分则可以综合考虑 $s(t)$ 值的变化速度与三相电流的变化趋势实现。

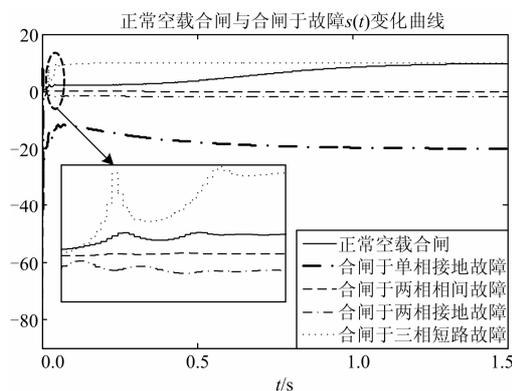
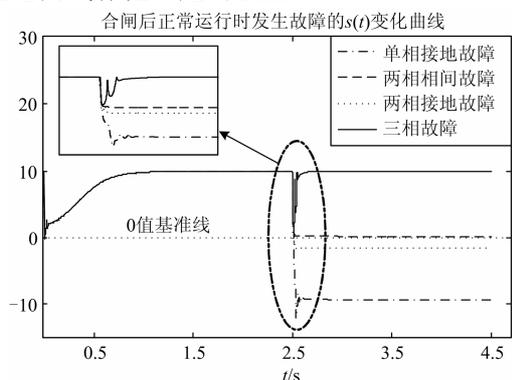
图4 正常合闸与合于故障时 $s(t)$ 的信息Fig. 4 $s(t)$ information of normal condition and faults when transformer closing

图 5 为合闸进入正常运行后再发生故障的 $s(t)$ 仿真信息 (正常运行时变压器负荷取其额定容量的 70%)。由图可知, 在正常运行中发生两相相间故障时, $s(t)$ 会下降到 0 附近, 而不对称接地故障发生时, $s(t)$ 值变为负值, 同样从 $s(t)$ 值的大小上便可以区分正常运行与不对称故障; 当三相故障发生时, $s(t)$ 曲线仍会出现骤降。仿真中还利用 Q12 开关处的测量电流进行过仿真, 结果表明: 由于支路 L6 对称负荷的存在, 在励磁涌流过程中, Q12 开关处的 $s(t)$ 上升速度较 Q51 开关处的 $s(t)$ 上升速度更快, 故障发生时 $s(t)$ 曲线则变化不大, 此情况对策略的应用更加有利。值得注意的是在正常运行情况下各 $s(t)$ 计算采用的正序电流中包含负荷分量, 因此 $s(t)$ 与理论曲线存在一定的误差。

图5 正常运行时发生故障 $s(t)$ 的信息Fig. 5 $s(t)$ information of faults under normal operation

由此可得：利用 $s(t)$ 的大小可以区分正常运行与不对称故障，而正常运行状态与三相故障的区分可综合比较 $s(t)$ 变化与三相电流的变化来实现。

3.2 电源中性点不接地时的仿真分析

图 6、图 7 为电源中性点不接地时的仿真信息。此时，单相接地故障与合闸涌流过程对应 $s(t)$ 曲线重合，两相相间故障与两相接地故障对应的 $s(t)$ 曲线重合。造成上述现象的原因是：电源中性点不接地时，电源与故障点间不存在零序回路，故障造成的零序电流很小， α 对零序分量的放大效果弱化所致。此时，电网为小电流接地系统，当单相接地故障发生时，电网按规定可以继续运行一定时间，且单相接地故障通常配置专用的零序保护来切除。因此，虽然中性点不接地时， $s(t)$ 无法反应单相接地故障和合闸涌流过程，单相接地故障却不会影响过电流保护中 $s(t)$ 策略的应用。至于其他类型故障与正常状态的区分策略，其结论与中性点接地时相同。

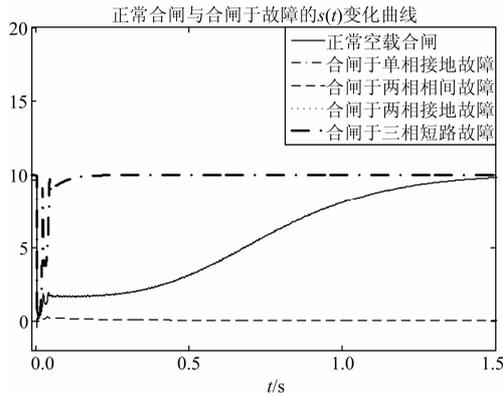


图 6 正常合闸与合于故障 $s(t)$ 的信息

Fig. 6 $s(t)$ information of normal condition and faults when transformer closing

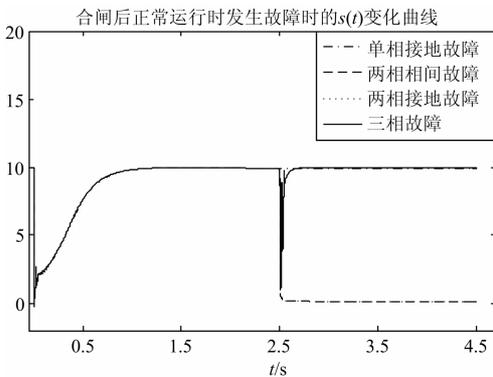


图 7 正常运行中发生故障 $s(t)$ 的信息

Fig. 7 $s(t)$ information of faults under normal operation

通过上述仿真分析可知，对于变压器的过电流保护，通过增加辅助判据判断 $s(t)$ 的大小可以有效

区分变压器合闸涌流过程和不对称短路故障。在原有简单过电流保护的基础上再增加判断 $s(t)$ 是否存在突变和电流是否存在衰减等判据可以区分三相短路故障和合闸涌流。因此利用 $s(t)$ 可以改进过电流保护动作时限方面的性能。

4 结论

研究变压器合闸过程与电网故障状态下的电流序分量比例系数 k ，继而利用零极点配置法找到标志函数 $s(t)$ 。仿真研究表明： $s(t)$ 能够迅速准确地反映变压器合闸过程和电网故障状态。

将 $s(t)$ 应用于变压器过电流保护中，利用 $s(t)$ 在变压器合闸过程中闭锁过电流保护，在故障中开放过电流保护，可以降低励磁涌流对过电流保护的影响。当变压器处于辐射式多级线路末端且合闸造成的过电流时间较长时， $s(t)$ 的应用可以提升过电流保护动作时限方面的性能，具有一定的实用意义。

参考文献

[1] 和敬涵, 李静正, 姚斌, 等. 基于波形正弦度特征的变压器励磁涌流判别算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 54-59.

HE Jing-han, LI Jing-zheng, YAO Bin, et al. A new approach of transformer inrush detected based on the sine degree principle of current waveforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 54-59.

[2] 程旭, 张浩然. 空载投入变压器造成继电保护动作的简要分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 116-118.

CHENG Xu, ZHANG Hao-ran. Brief analysis and solution of the protection trip caused by no-load transformers input[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 116-118.

[3] LOTFI-FARD S, FAIZ J, IRAVANI R. Improved overcurrent protection using symmetrical components[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(2): 843-850.

[4] 曹国臣, 韩蕾, 祝滨. 大电网分布式自适应继电保护系统的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 19-22.

CAO Guo-chen, HAN Lei, ZHU Bin. Realization method of adaptive protection system with distributed structure for large-scale transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 19-22.

[5] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 195-197.

- [6] 古斌, 谭建成. 一种有效区分空投涌流与空投于故障的变压器保护新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 34-37.
GU Bin, TAN Jian-cheng. A novel transformer protection algorithm to effectively distinguish switching the transformer with an internal fault from switching inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 34-37.
- [7] 孙洋, 黄家栋. 基于磁通频域特征的变压器励磁涌流识别新方法[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(1): 21-25.
SUN Yang, HUANG Jia-dong. Identification of transformer magnetization inrush current based on frequency-domain characteristics of magnetic flux[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(1): 21-25.
- [8] BASTARD P, MEUNIER M, REGAL H. Neural network-based algorithm for power transformer differential relays[J]. Proc Inst Elect Eng C, 1995, 142(4): 386-392.
- [9] 朱可, 姜杰, 张太勤. 基于等效瞬时电感参数辨识的变压器励磁涌流判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 12-16.
ZHU Ke, JIANG Jie, ZHANG Tai-qin. Distinguishing magnetizing inrush based on characteristic of equivalent instantaneous inductance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 12-16.
- [10] 田有文, 王睿. 基于小波变换的变压器励磁涌流识别方法[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(2): 247-250.
TIAN You-wen, WANG Rui. Detection method for transformers inrush current using wavelet[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(2): 247-250.
- [11] SHIN M C, PARK C W, KIM J H. Fuzzy logic-based for large power transformer protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 718-724.
- [12] 黄永红, 马锋, 沈敏. 基于最小二乘支持向量机的变压器励磁涌流识别方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 93-96.
HUANG Yong-hong, MA Feng, SHEN Min. Research of magnetizing inrush current identification method based on LS-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 93-96.
- [13] 何越, 熊元新, 姜山, 等. 变压器空载合闸励磁涌流的仿真分析研究[J]. 电力学报, 2010, 25(1): 33-36.
HE Yue, XIONG Yuan-xin, JIANG Shan, et al. Simulation research on magnetizing inrush current when transformer is energized under no-load condition[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(1): 33-36.
- [14] 夏成军, 代文良, 黄冬燕, 等. 考虑参数不对称的变压器励磁涌流统计分析[J]. 变压器, 2012, 49(2): 24-27.
XIA Cheng-jun, DAI Wen-liang, HUANG Dong-yan, et al. Statistical analysis of transformer magnetizing inrush current based on unbalanced parameters[J]. Transformer, 2012, 49(2): 24-27.
- [15] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 137-211.

收稿日期: 2012-09-14; 修回日期: 2013-01-15

作者简介:

陈奎(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和煤矿供电安全与保护;

程天华(1987-), 男, 通讯作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: cth7635515@163.com