

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.026

基于特征电流波宽判据的变压器差动保护方法

夏家辉¹, 方园¹, 刘卜瑞¹, 曹志², 田玄玄³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力有限公司荆门供电公司, 湖北 荆门 448000; 3. 四川电力送变电建设有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: 变压器差动电流波形在区内故障后第一周期内由于非周期分量和高次谐波的影响而存在较大偏移, 导致保护容易出现误判。为解决该问题, 在 PSCAD 中建立变压器差动保护仿真模型, 对三相差流瞬时值取绝对值后求和得到特征电流。研究发现励磁涌流与内部故障电流的特征电流在波形间断角和纵向偏移上存在明显差异, 可以通过在时间轴上方设置合理的门槛值, 取特征电流波形在该门槛值以下的波宽作为识别涌流与内部故障电流的判据, 由此提出一种基于特征电流波宽判据的变压器差动保护方法。仿真表明该方案能有效提高保护动作速度, 维持在 20 ms 左右, 弥补了波形对称性原理的差动保护在可靠性和速动性上的不足。

关键词: 变压器; 差动保护; 励磁涌流; 特征电流; 波宽

中图分类号: TM771

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)01-0184-07

0 引言

变压器差动保护的安全可靠动作对区域电网的经济、稳定运行有至关重要的作用。随着新能源和特高压直流输电等设备的接入, 电力系统容量和电压等级不断提升, 电网结构更加复杂, 传统差动保护的缺点逐渐显现^[1-5], 对励磁涌流与内部故障电流的识别一直是困扰电网运行人员的难题。

因此, 研究新型差动保护十分重要。国内外学者在涌流识别上做过大量研究, 包括间断角原理^[6]、波形空间特征差异识别法^[7-10]、波形相似性原理^[11-15]、逻辑斯蒂回归及形态学骨架等方法^[16-21]。文献[10]利用波形占空比和波形密度系数来识别励磁涌流, 但在处理对称性较好的涌流时存在误判的情况。文献[13]采用自适应数据窗和余弦相似度算法, 但畸变严重的涌流波形可能在一个周波内出现多个极值点, 计算结果波动性会很大。文献[16]借助小波分析和智能算法, 通过逻辑斯蒂回归法来识别涌流; 文献[18]通过对比涌流与故障电流二者的非周期分量与基波分量比值的衰减速率的差异来判别, 但受谐波影响较大; 文献[21]计算了差流波形的形态学骨架, 借助骨架特征来识别涌流, 对称性较好的涌流可能会影响其判别结果, 但这些方案均为传统差动保护方法引入了新的研究思路。

为解决传统方法在鉴别涌流与故障电流时识

别速度和可靠性上的不足, 文中考虑到涌流与内部故障电流的波形差异, 提取三相差流的特征电流, 使涌流与故障电流在波形上的差异得到最大化并容易量化, 引入门槛值 ε 截取波宽作为识别涌流与故障电流的判据。仿真验证了该方法计算结果波动性很小, 能够快速准确地识别内部故障与励磁涌流。

1 励磁涌流产生机理

以单相变压器为例, 其空载合闸等效电路如图 1 所示。

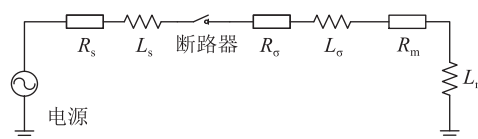


图 1 单相变压器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of single-phase transformer for no-load switching-in

图中, R_s, L_s 分别为系统等效电阻和等效电感; $R_σ, L_σ$ 分别为变压器一次绕组的漏电阻和漏电感; R_m, L_m 分别为变压器等效励磁电阻和等效励磁电感。根据变压器电流与磁链的关系, 变压器空载合闸时励磁涌流的近似表达式^[11]如下:

$$i_{\mu}(t) = \left[-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_r + \psi_m \cos\alpha) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] / L_T \quad (1)$$

式中: ψ_m 为稳态磁通幅值; α 为合闸角; ψ_r 为铁芯剩磁; τ 为时间常数; $L_T = L_s + L_σ + L_m$, 为变压器等效电感参数。变压器励磁涌流波形在磁化曲线上的反映如图 2 所示。

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-09-27

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(Z2019240); 国家自然科学基金资助项目(51477090)

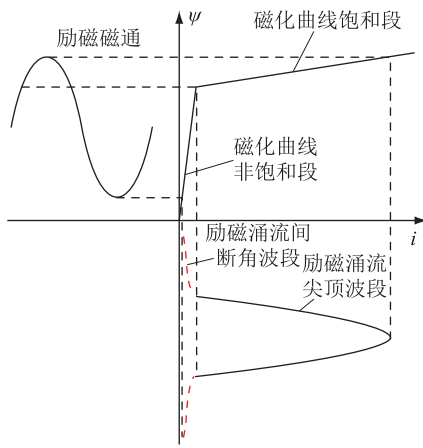


图2 涌流与磁通的关系特性曲线

Fig.2 Characteristic curve of inrush current and magnetic flux

由图2可见,励磁涌流的间断角部分波形产生于磁化曲线的非饱和段,电流幅值很小,尖顶波波形产生于饱和段,幅值很大。当变压器发生二次侧绕组短路故障时,暂态过程近似表示如下^[18]:

$$L_T \frac{di}{dt} + R_T i = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

式中: U_m 为系统电压幅值; R_T 为变压器等效电阻。因内部故障电流的各次谐波及直流分量的含量相对涌流较少,故障电流波形接近正弦波,无间断角。

2 特征电流波形分析与波宽比较判别方案

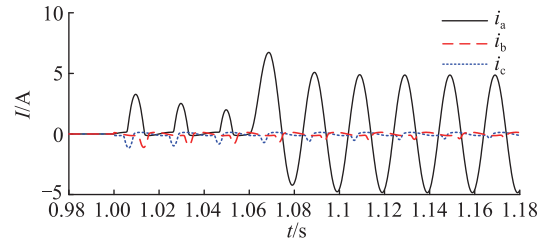
2.1 特征电流波形分析

基于波形分析方法,为了提取变压器励磁涌流与故障电流在波形特征上的差异,在此对实时采样得到的变压器三相差动电流 i_a, i_b, i_c 取绝对值后进行求和,得到对应的特征电流 I_{abc} ,即:

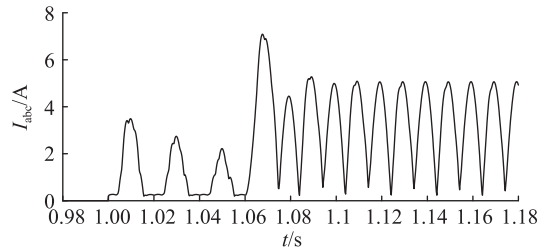
$$I_{abc} = |i_a + i_b + i_c| \quad (3)$$

为更明显地揭示变压器典型励磁涌流和内部故障电流在特征电流波形上的差异,对Yy接变压器空载合闸后又发生二次侧A相绕组接地短路故障进行仿真,三相差流波形和特征电流波形如图3所示。

由图3(a)可以看到,变压器在1.0s空载合闸至1.06s期间,因铁芯饱和而产生幅值很大的励磁涌流,三相差流均表现为存在间断角的尖顶波波形;在1.06s发生二次侧A相绕组接地短路故障,A相差流表现为幅值更大的对称性故障电流,近似正弦波波形。在图3(b)中,通过取绝对值求和后,三相差流形成叠加,空载合闸期间的特征电流波形依然表现为典型涌流特征,仍具有很大间断角,波形有较小偏移,而内部故障期间,特征电流波形产生



(a) 三相差流



(b) 特征电流

图3 合闸后故障仿真情况

Fig.3 Simulation waveforms of fault after switching

很大偏移,且波形畸变严重。

显然,经过波形叠加之后,在三相涌流原始波形的间断角部分的重叠波形成了特征电流波形的间断角部分;而在内部故障期间,虽然故障类型和变压器接线方式因场合而不尽相同,但是至少有一相的差流波形会表现为正弦波波形,另外两相可能会表现为励磁涌流、故障电流或正常负荷电流等特征。由于内部故障差流幅值相对很大,三相差流叠加后的特征波形在时间轴上方偏移也会很大,且叠加后存在大量高次谐波成分,会导致特征电流波形发生畸变,出现尖顶波特征。

2.2 波宽比较判别方案

由于变压器运行于磁化曲线的线性段时(如间断角处),其励磁电流大小一般为额定电流的2%~10%^[12-13],在此设置一横向门槛值 $\varepsilon = 0.25I_{NF}$, I_{NF} 为额定电流的幅值,用于获取特征波形靠近时间轴部分的波宽。算法如下:当检测到任一相差动电流基波的幅值超出门槛值 ε 时启动算法,将特征波形曲线在门槛值 ε 以下的部分波段宽度作为截取的波宽,该部分对应的电平信号取为1。

由于特征电流为三相差流的绝对值之和,考虑到一定的裕度,引入可靠系数 $\lambda_1 = 1.5$,门槛值 ε 的修正计算如下:

$$\varepsilon = 3\lambda_1 \times 0.25I_{NF} \quad (4)$$

通过修正后的门槛值对图3(b)特征电流波形进行横向截取,得到截取后的电平信号如图4所示。需要说明的是,当特征波形曲线处于门槛值下方时电平信号取为1。由图4观察发现,变压器在1.0s合闸后产生励磁涌流至1.06s期间,特征波形的波宽较大,而在1.06s发生内部故障后,特征电流波形

在纵坐标轴方向出现很大偏移且为尖顶波波形,特征电流波形的波宽很小甚至为0。很明显,涌流时的波宽远大于故障时的波宽,因此可以设置合适的整定值 L_{set} ,通过比较波宽 L 的大小来识别涌流和内部故障电流。

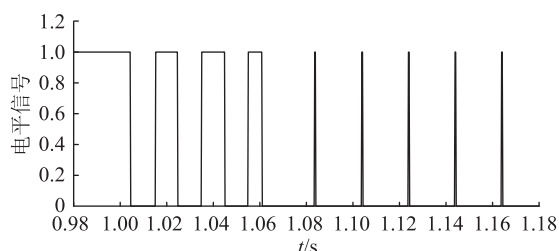


图4 特征电流波形的电平信号

Fig.4 Level signal of characteristic current waveform

鉴于传统间断角闭锁原理整定值为 $\theta_{set} = 65^\circ$,在设置 L_{set} 时,同样考虑到一定裕度,引入可靠系数 $\lambda_2 = 1.3$,即:

$$L_{set} = 65\lambda_2 T / 360 \quad (5)$$

式中: $T = 0.02$ s,为工频周期,通过计算可以得到 L_{set} 为 0.0047 s。

由图4获取的整周期波宽值 L 如图5所示。

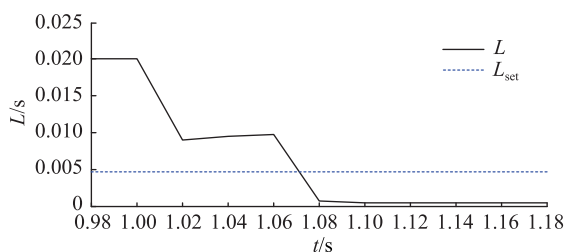


图5 特征电流波形的波宽

Fig.5 Characteristic current waveform width

由图5可知,在空载合闸后的第一周期内,总波宽为 0.009 s,高于整定值 0.0047 s,因此保护持续闭锁,直至 1.06 s 时发生内部故障,在故障后第一周期 ($1.06 \sim 1.08$ s) 内,总波宽为 0.00075 s,低于整定值,保护在 1.08 s 时动作。

相对于波形对称性原理,该方法的优越性在于:变压器发生内部故障后的第一周期内,由于前 $1/4$ 周波的差流波形突变和偏移较大,导致整体波形对称性较差,传统方法可能会存在误判,而文中通过求取特征电流波形波宽的方法能够很好地避免这一问题,通过设置合理的阈值,既能够在涌流期间充分保留和提取波形的间断角特征,又能够在故障期间进行准确可靠判别。

2.3 差动保护判据实现

首先根据式(3)实时求取特征电流,当特征电流幅值超过门槛值 ε 时启动判据,即满足:

$$I_{abc} \geq \varepsilon \quad (6)$$

然后截取特征电流的电平信号,计算相应的波宽 L 。当 $L < L_{set}$ 时,判断为内部故障电流;当 $L \geq L_{set}$ 时,判断为励磁涌流。该判据的实施流程如图6所示。

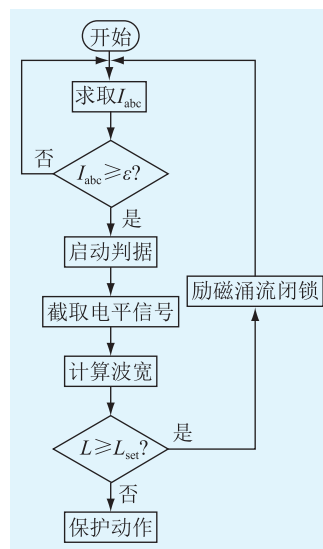


图6 判据实施流程

Fig.6 Criteria implementation process

3 仿真实验

为验证文中方法应对变压器多种运行工况时的可行性,在 PSCAD 中搭建仿真模型如图7所示。变压器容量设为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$,变比 $220 \text{ kV}/35 \text{ kV}$ 。对变压器发生内部故障、不同合闸角下空载合闸、合闸于内部故障、合闸于 5% 匝间短路故障、合闸后故障等情况进行仿真,采样 10 个工频周期的数据进行计算,仿真数据如表1所示。

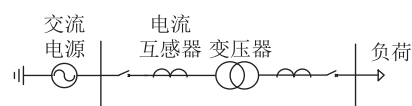


图7 仿真模型

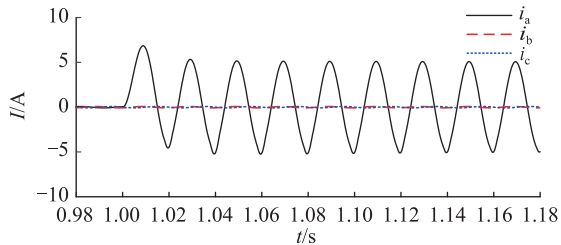
Fig.7 Simulation model

表1 仿真运行结果

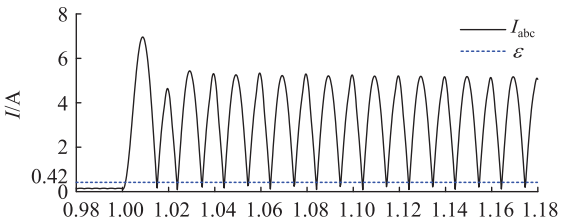
Table 1 Simulation results

运行工况	接线方式	故障后第一周期的波宽/s	保护动作情况
A相接地短路	Yy	0.00150	1.02 s后动作
三相接地短路	Yd	0.00050	1.02 s后动作
0°空载合闸	Yy	0.00900	始终制动
30°空载合闸	Yd	0.00850	始终制动
合闸于5%匝间短路	Yy	0.00075	1.02 s后动作
合闸后发生A相接地短路	Yy	0.00078	1.02 s后动作

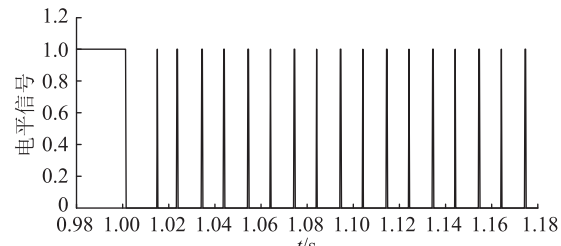
案例 1: 变压器正常运行时发生内部故障。图 8 (a)至(d)为 Yy 接变压器 A 相接地故障情况, 可以看到, 在 1.0 s 时发生 A 相二次侧绕组接地故障后, 仅 A 相有故障电流, 特征电流波形的波宽在故障发生后迅速降低至 0.001 5, 低于整定值 0.004 7, 因此保护在 1.02 s 动作; 图 8(e)至(h)为 Yd 接变压器发生 A 相接地故障且存在电流互感器饱和的情况, 受互感器饱和的影响, A、C 相故障差流出现部分畸变, 但由于故障差流本身幅值很大, 其特征电流的波宽不受太大影响, 文中判据依然能够使保护在 1.02 s 快速动作。



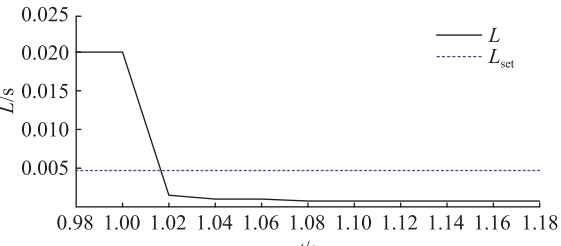
(a) 三相差流



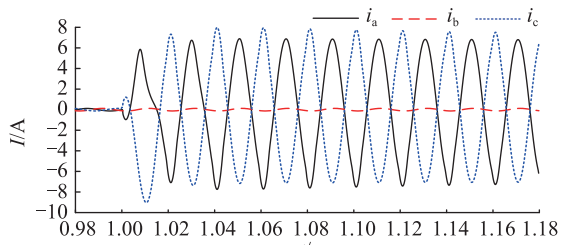
(b) 特征电流



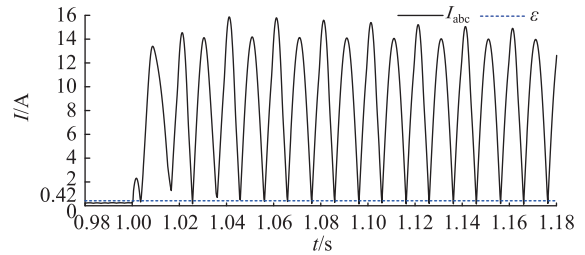
(c) 电平信号



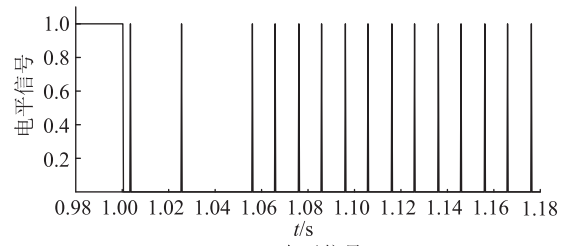
(d) 特征电流的波宽



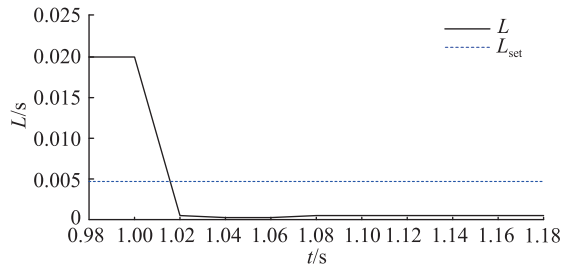
(e) 三相差流



(f) 特征电流



(g) 电平信号

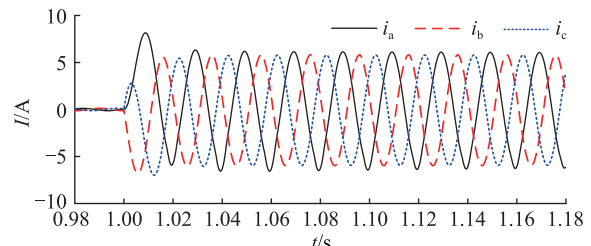


(h) 特征电流的波宽

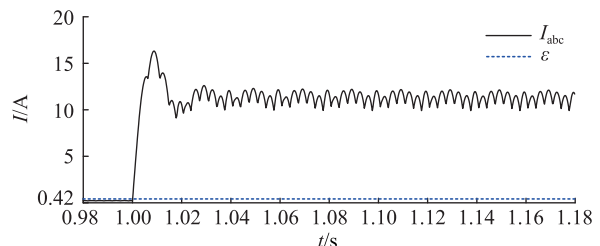
图 8 A 相接地故障仿真

Fig.8 Phase A ground fault simulation

图 9 为最严重的三相短路故障的仿真结果, 很明显, 由于三相均为故障电流, 经过叠加后的特征电流波形偏移非常大, 远超出阈值, 因此波宽为 0, 保护同样在一个工频周期后动作, 为节省篇幅不在此附图。



(a) 三相差流



(b) 特征电流

图 9 三相短路故障仿真

Fig.9 Three phase fault simulation

案例 2: Yy 接变压器 0°, Yd 接变压器 30°空载

合闸,分别如图 10、图 11 所示。在 1.0 s 合闸后,三相电流均表现为涌流特征,不管是对称性涌流还是非对称性涌流,其特征电流的波宽始终高于整定值,保护持续闭锁。

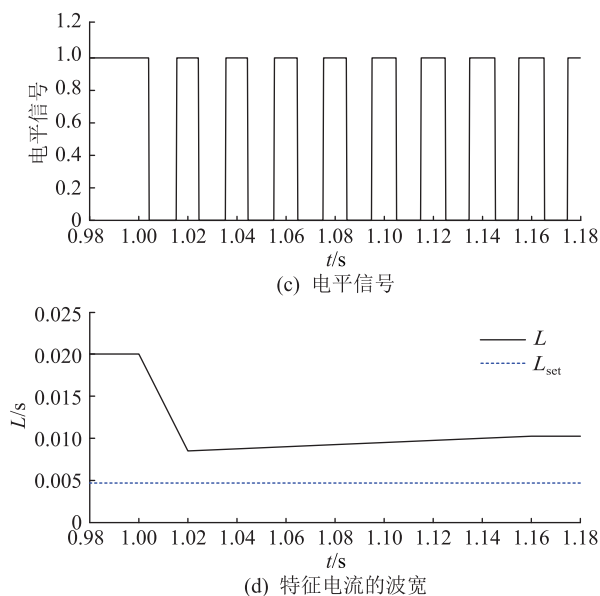
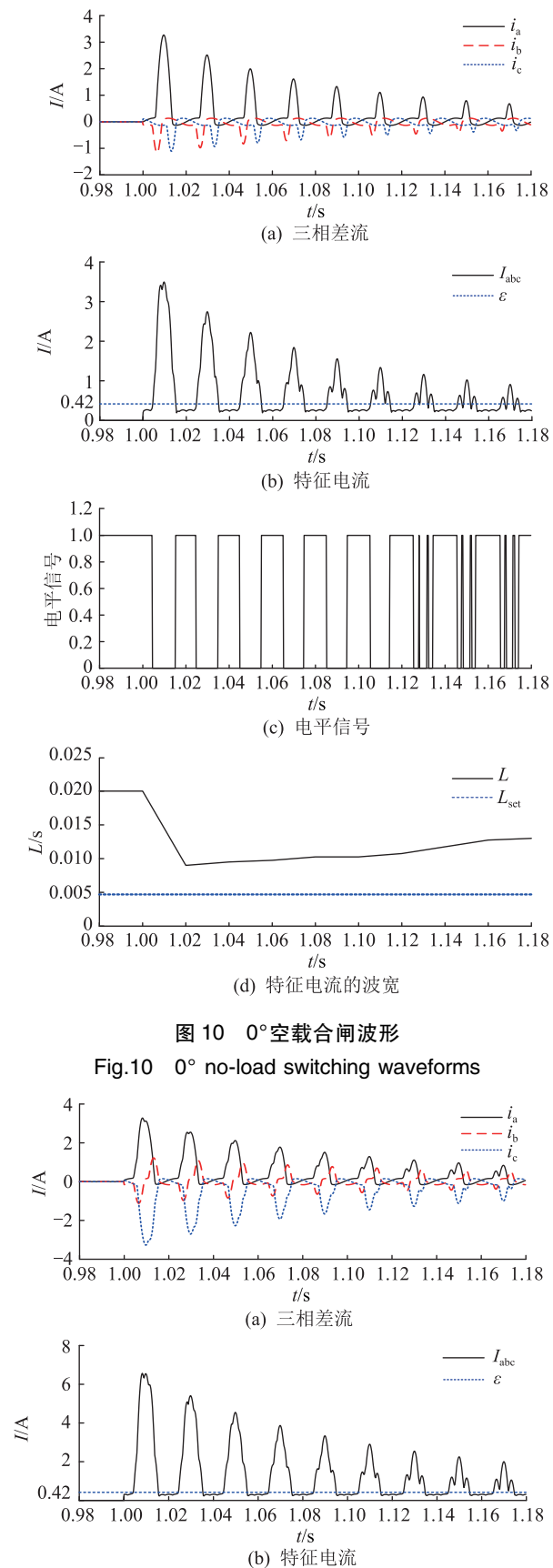
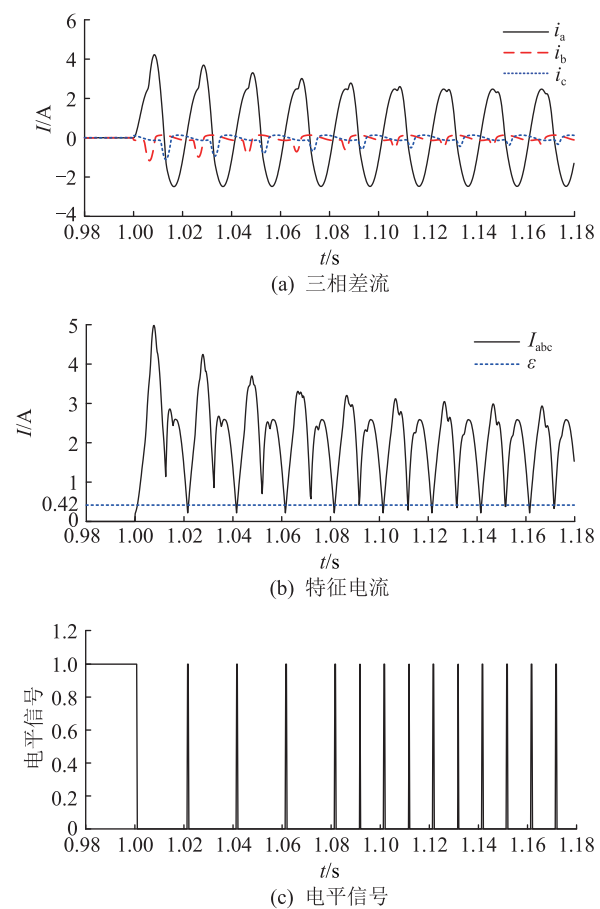


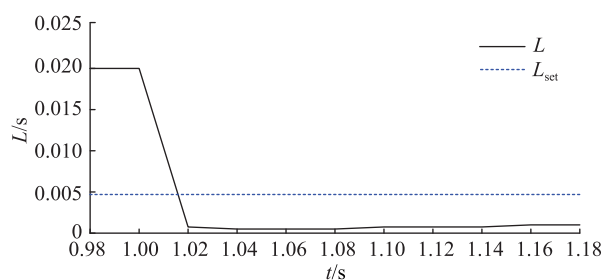
图 11 30°空载合闸波形

Fig.11 30° no-load switching waveforms

案例 3:合闸于轻微匝间故障。如图 12 所示,变压器在 1.0 s 合闸于 A 相二次侧绕组 5%匝间接地短路故障。

另外,由于在变压器外部故障的情况下,差流低于整定值,文中算法不会启动,因此文中对此不作分析。





(d) 特征电流的波宽

图 12 合闸于轻微匝间故障

Fig.12 Switching at a slight turn-to-turn short

4 结语

文中针对传统差动保护在变压器发生内部故障后的第一个周期内存在误判的缺陷,定义一种特征电流,提取该电流波形在门槛值以下部分的波宽作为识别变压器励磁涌流与内部故障电流的判据,大量仿真数据表明:该判据算法输出结果稳定、可靠,能够在在一个工频周期内快速、准确识别变压器励磁涌流和各种内部故障电流,并在内部故障且发生电流互感器饱和时依然判断正确,但是在励磁涌流且电流互感器饱和的情况下,其应用仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 沈晓凡,舒治淮,刘宇,等. 2008 年国家电网公司继电保护装置运行情况[J]. 电网技术,2010,34(3):173-177.
SHEN Xiaofan, SHU Zhiwei, LIU Yu, et al. Statistics and analysis on operation situation of protective relays of state grid corporation of China in 2008 [J]. Power System Technology, 2010,34(3):173-177.
- [2] 王小辉. 某钢铁厂电炉变变差动保护误动作分析[J]. 冶金动力,2019(6):13-15.
WANG Xiaohui. Analysis of malfunction of the main transformer differential protection for a electrical arc furnace [J]. Metallurgical Power, 2019(6):13-15.
- [3] 黄少锋,申洪明,刘玮,等. 交直流互联系统对换流变压器差动保护的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):158-164.
HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, LIU Wei, et al. Effect of AC/DC interconnected network on transformer protection and its countermeasures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(23):158-164.
- [4] VISHWAKARMA D N, BALAGA H, NATH H. Application of genetic algorithm trained master slave Neural Network for differential protection of power transformer [C]// International Conference on Computer Engineering & Systems. IEEE, 2014: 164-169.
- [5] 翁汉琰,刘雷,林湘宁,等. 涌流引起换流变压器零序过电流保护误动的机理分析及对策[J]. 电力系统自动化,2019,43(9):171-182.

WENG Hanli, LIU Lei, LIN Xiangning, et al. Mechanism and countermeasures of mal-operation of converter transformer zero-sequence overcurrent protection caused by inrush currents [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(9):171-182.

- [6] 张小钊,兰生. 变压器励磁涌流的识别方法综述[J]. 电气开关,2016,54(3):1-6.
ZHANG Xiaofan, LAN sheng. Review of the methods to identify transformer inrush current [J]. Electrical Switch, 2016,54(3):1-6.
- [7] 刘鹏辉,黄纯,石雁祥,等. 配线路励磁涌流自适应闭锁方案[J]. 电工技术学报,2019,34(11):2395-2404.
LIU Penghui, HUANG Chun, SHI Yanxiang, et al. An adaptive blocking scheme for magnetizing inrush current in distribution lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,34(11):2395-2404.
- [8] 闫富平,段建东,李笑,等. 利用动态四边形分析的配电网励磁涌流识别方法[J]. 电网技术,2015,39(7):2017-2022
YAN Fuping, DUAN Jiandong, LI Xiao, et al. Identification method of inrush current in distribution network based on analysis of dynamic quadrilateral [J]. Power System Technology, 2015,39(7):2017-2022.
- [9] 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.
- [10] 黄景光,罗亭然,林湘宁,等. 励磁涌流波形密度系数鉴别算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(7):34-40.
HUANG Jingguang, LUO Tingran, LIN Xiangning, et al. Identification algorithm for magnetizing inrush current in terms of waveform density coefficient [J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2017,29(7):34-40.
- [11] 王友怀,张浩,周虎兵,等. 计及涌流影响的零序电流保护风险评估[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10):120-126.
WANG Youhuai, ZHANG Hao, ZHOU Hubing, et al. Risk assessment of zero sequence current protection considering inrush current [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(10):120-126.
- [12] 翁汉琰,刘华,林湘宁,等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报,2018,38(2):475-483,678.
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(2):475-483,678.
- [13] 王业,陆于平,蔡超. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):702-711.
WANG Ye, LU Yuping, CAI Chao, et al. A magnetizing inrush identification method applying adaptive data-window currents [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(4):702-711.

- [14] TSOTNIASHVILI S, ZARNADZE D. Selfadjoint operators and generalized central algorithms in frechet spaces[J]. Georgian Mathematical Journal, 2006, 13(2):363-382.
- [15] CHEN Lingji, RAVICHANDRAN R. Automated track projection bias removal using Frechet distance and road networks [C]//Information Fusion (FUSION), 2014 17th International Conference on, 2014.
- [16] 丁晓兵,周红阳,黄佳胤,等. 基于逻辑斯蒂回归的变压器涌流识别[J/OL]. 电力系统及其自动化学报:1-9(2019-07-05) [2019-08-13]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000287>.
DING Xiaobing, ZHOU Hongyang, HUANG Jiayin, et al. Transformer inrush current identification based on logistic regression[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSSA: 1-9(2019-07-05) [2019-08-13]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000287>.
- [17] 黄少锋,李姗姗,肖远清. 基于非周期分量衰减速率的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15):9-15.
HUANG Shaofeng, LI Shanshan, XIAO Yuanqing. A novel identification criterion for transformer inrush current based on decay rate of aperiodic component[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15):9-15.
- [18] 许文杰. 变压器励磁涌流与故障识别研究[D]. 西安:西安科技大学, 2018.
XU Wenjie. Research on inrush current and fault identification of transformer[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [19] 莫品豪,郑超,张晓宇,等. 一种抽能型高抗的抽能绕组匝间短路保护方案研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3):157-162.
MO Pinhao, ZHENG Chao, ZHANG Xiaoyu, et al. A new scheme of inter-turn winding short circuit protection for energy extraction shunt reactor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3):157-162.
- [20] 张凌浩,刘建坤,卜京. 基于浮动门槛值的改进电流互感器饱和识别方法研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3):115-120.
ZHANG Linghao, LIU Jiankun, BU Jing. An improved method of identifying the CT's saturation considering line parameters[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3):115-120.
- [21] 曾杰,张禄亮,吴青华. 基于形态学骨架的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23):68-76.
ZENG Jie, ZHANG Luliang, WU Qinghua. Morphological skeleton based differential protection for power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23):68-76.

作者简介:



夏家辉

夏家辉(1993),男,硕士在读,研究方向为变压器差动保护(E-mail: 1317599718@qq.com);

方园(1992),男,硕士在读,研究方向为变压器差动保护;

刘卜瑞(1999),女,本科在读,研究方向为电力系统继电保护。

The transformer differential protection method based on characteristic current waveform width criterion

XIA Jiahui¹, FANG Yuan¹, LIU Burui¹, CAO Zhi², TIAN Xuanxuan³

- (1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. State Grid Jingmen Power Supply Company of Hubei Electric Power Co., Ltd., Jinmen 448000, China;
3. Sichuan Electric Power Transmission & Transformation Construction Co., Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: The differential current waveform of the transformer has a large offset due to the influence of non-periodic components and higher harmonics in the first period after the internal fault, which causes the protection to be misjudged. In order to solve this problem, a transformer differential protection simulation model is established in PSCAD. The absolute value of the three-phase differential current is summed as the characteristic current. It is found that there is a significant difference in the waveform discontinuity angle and longitudinal offset of the characteristic current between the magnetizing inrush current and the internal fault current, which can be measured by setting a reasonable threshold above the time axis, and the width of the waveform whose characteristic current waveform is below the threshold is taken as the identification of inrush current and internal fault current. Therefore, a new method based on characteristic current waveform width criterion of Transformer Differential Protection is proposed. The simulation shows that the scheme can effectively improve the speed of protection action and maintain it at around 20 ms, which makes up for the lack of reliability and quickness of differential protection based on the principle of waveform symmetry.

Keywords: transformer; differential protection; inrush current; characteristic current; waveform width

(编辑 方晶)