

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

古 斌^{1,2}, 谭建成²

(1. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 绍兴文理学院工学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 在有功差动原理的基础上, 提出一种基于变压器基波正序功率因数以实现变压器保护的新原理。该原理利用帕克变换, 构造了d-q坐标系上变压器端口电压、电流的基波正序分量的旋转向量, 进而可计算变压器在各种暂态过程中的基波正序功率因数。根据变压器基波正序功率因数的大小, 来判断变压器是否发生内部故障。该原理基于能量守恒, 物理意义清晰, 算法简洁, 无需任何先验参数, 不受变压器接线方式的影响, 易于工程实现。经仿真试验验证, 新原理能够快速、可靠地切除变压器内部故障, 在性能上优于传统的以波形特征为主的变压器保护原理, 对空投轻微故障有足够的灵敏度。

关键词: 变压器保护; 差有功法; 帕克变换; 内部故障; 励磁涌流

A novel transformer protection algorithm to effectively distinguish switching the transformer with an internal fault from switching inrush current

GU Bin^{1,2}, TAN Jian-cheng²

(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. College of Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: On the basis of real power differential method, a novel principle of transformer protection using fundamental frequency positive sequence power factor is presented. By using the PARK transformation, the fundamental frequency positive sequence rotating vectors of the transformer's terminal voltage and current are generated, then the fundamental frequency positive sequence power factors of transformer in various transient process are obtained. According to the fundamental frequency positive sequence power factor of transformer, magnetizing inrush and internal fault can be distinguished. The principle based on energy conservation has clear physics significance, simple algorithm, easy engineering realization, and need not any transformer internal parameters, and is free from the impact of transformer wind connection mode. Simulation testing results verify that this scheme has stability during inrush current and is able to clear internal fault reliably and quickly, and its performance is superior to the traditional transformer protection principle based on the differential current waveform characteristics, having sufficient sensitivity for energizing into light turn-to-turn fault.

Key words: transformer protection; real power differential method; PARK transformation; internal fault; inrush current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0034-04

0 引言

区分励磁涌流与内部故障电流, 是变压器差动保护的技术难点之一, 目前对励磁涌流的识别方法中, 二次谐波、间断角等判据在区分单纯的故障和励磁涌流方面没有什么困难, 基本上都能正确判断, 主要是难以区分空载合闸与空载合闸于故障变压器的情况, 特别是空载合闸于匝间短路的情况。国内外变压器保护研究者已提出了许多区分方法, 这些方法本质上大多以识别差流波形特征为主^[1-3], 并没反映变压器励磁涌流状态和内部故障状态的本质差别, 这样保护无法完全避免误动或拒动。由于电流差动保护应用于变压器主保护时的原理性缺陷^[3],

人们一直努力研究更加适合于变压器的主保护新原理^[4-8]。

功率差动变压器保护原理^[7]从能量守恒观点出发, 基于这样一个事实: 正常运行(包括空投涌流)时流入变压器有功很小, 而在变压器内部故障情况下, 由于弧光放电, 将消耗较大的能量, 这样通过计算变压器消耗有功的大小, 可判断变压器是否发生内部故障。该原理利用变压器端口电压和电流数据, 并不再纠缠于差流波形特征, 使励磁涌流不再成为纵差保护的动作因素, 是一种新的思路。在文献[7]的基础上, 文献[6]基于电流畸变状态下的有功无功直流分量比来区分涌流与故障电流, 但电流畸变状态下的无功定义及物理意义目前尚未有定论;

文献[8]利用变压器空投侧端口电压、电流参数提出了一种区分空投涌流与空投于故障电流的有效方法,但需要知道变压器内部参数。由于电路畸变状态下基波正序有功、无功处于主导地位^[9],本文基于帕克变换^[10],提取变压器端口电压、电流的基波正序分量,进而可根据向量运算得到变压器基波正序分量的功率因数,从而可获得励磁涌流状态与内部故障状态的显著的不同特征,该原理只利用变压器端口电压、电流采样数据,而无需任何变压器内部参数,算法简洁,利于实施,仿真试验结果验证了该原理的正确性和可行性,可有效区分空投涌流与空投于故障电流,避免了传统差动保护中空投于故障时保护延时动作或拒动,对现有变压器保护原理是有力的补充。

1 基本原理

1.1 电路畸变状态下基波正序分量的提取^[10]

如式(1)所示,系统不对称及畸变状态下三相电压或电流 f_a 、 f_b 、 f_c 可以分解为各次正序、负序及零序分量:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_n f_{am}^p \\ \sum_n f_{bm}^p \\ \sum_n f_{cm}^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_m f_{am}^n \\ \sum_m f_{bm}^n \\ \sum_m f_{cm}^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_z \\ f_z \\ f_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:上标 p、n 分别表正序、负序分量;下标 m 表示谐波次数;零序分量 $f_z = (f_a + f_b + f_c)/3$ 。单次谐波正序分量可表示为:

$$\begin{cases} f_{am}^p = A_m^p \sin(m\omega t + \varphi_m^p) \\ f_{bm}^p = A_m^p \sin(m\omega t - 120^\circ + \varphi_m^p) \\ f_{cm}^p = A_m^p \sin(m\omega t + 120^\circ + \varphi_m^p) \end{cases} \quad (2)$$

Park 变换矩阵为:

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

相坐标系下的 m 谐波正序分量经 Park 变换后在 dq 坐标下为:

$$\begin{bmatrix} f_{dm}^p \\ f_{qm}^p \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} A_m^p \begin{bmatrix} \sin[(m-1)\omega t + \varphi_m^p] \\ -\cos[(m-1)\omega t + \varphi_m^p] \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可知,相坐标系下的 m 次正序分量经 Park 变换后变为 dq 坐标系下的 $m-1$ 次分量,经同样分析可知 m 谐波负序分量经 Park 变换后在 dq 坐标下为 $m+1$ 次分量。而 abc 坐标下的零序分量经变换后不出现 dq 轴上,且 0 轴上保持不变仍为交流。这样把电路畸变状态下的三相电压、电流变换到 dq 坐标下,然后提取其直流分量,此直流分量即对应于基波正序分量。

现假设三相不对称且畸变的三相电压的基波正序分量幅值和 a 相初相角分别为 V_m 、 φ_u ;同样,设三相不对称且畸变的三相电流基波正序分量幅值和 a 相初相角分别为 I_m 、 φ_i ;相坐标系下的电压、电流基波正序分量在 dq 坐标下为:

$$\begin{bmatrix} u_{d1}^p \\ u_{q1}^p \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \begin{bmatrix} \sin \varphi_u \\ -\cos \varphi_u \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{d1}^p \\ i_{q1}^p \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \begin{bmatrix} \sin \varphi_i \\ -\cos \varphi_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2 基波正序分量功率因数

如图 1 所示可得基波正序功率因数:

$$\cos \Delta\varphi = \cos(\varphi_u - \varphi_i) = \frac{u_{d1}^p i_{d1}^p + u_{q1}^p i_{q1}^p}{\sqrt{(u_{d1}^p)^2 + (u_{q1}^p)^2} \sqrt{(i_{d1}^p)^2 + (i_{q1}^p)^2}} \quad (7)$$

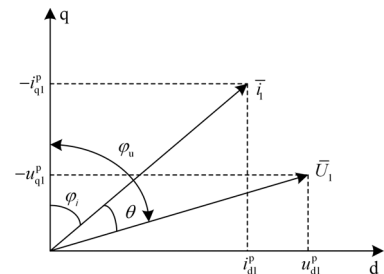


图1 dq坐标下的基波正序电压、电流矢量

Fig. 1 Vectors of positive fundamental voltage and current in dq coordinate

2 新原理的构造

本文在文献[6-8]的基础上,直接利用变压器端口的电压、电流采样值计算出变压器的基波正序功率因数。若是变压器正常空载合闸,由于铁芯饱和,励磁电抗急剧减少,励磁涌流可达 8~12 倍有铭电流量,由无功的磁化电流和有功铁耗电流两部分组成,主要体现为无功的磁化电流,有功电流只占很小一部分,因而其基波正序功率因数极小;若是空投于故障,由于电弧放电发热将消耗大量有功,其

基波正序功率因数较大。因而可根据变压器在不同状态下的功率因数大小，决定保护的動作行为。变压器空载合闸后，计算式（7），若结果大于整定的门槛值 ζ ，就判定变压器发生内部故障，保护跳闸。

3 仿真验证

利用 EMTDC 建立如图 2 所示的仿真系统，变压器磁化曲线数据如表 1^[5]所示。变压器由 3 个单相变压器组成，容量为 100 MVA，短路电压百分比为 14%，铜耗为 0.01 pu。仿真给出了三相电压、电流及变压器基波正序功率因数。图 3 给出了 A 相合闸角为 0° 时的仿真波形（合闸时间都为 0.2 s）。图中电压、电流为变压器合闸侧电压、电流波形。图 3（a）为正常空投涌流情况，可见 Δ 侧三相线电流呈现明显的涌流波形特征，三相涌流在 Δ 侧系统阻抗的压降使变压器 Δ 侧端口三相电压出现明显畸变，合闸后 15 ms 左右，算法输出值稳定，此时基

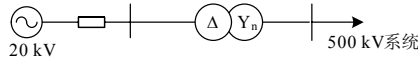


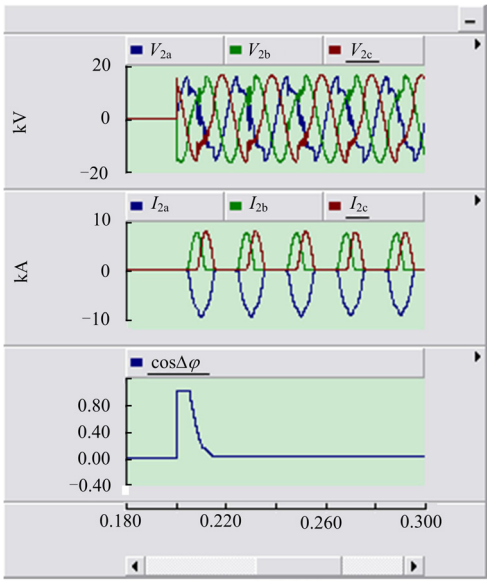
图2 Y/Δ 接线变压器保护仿真系统

Fig.2 System of transformer with wye-delta connection

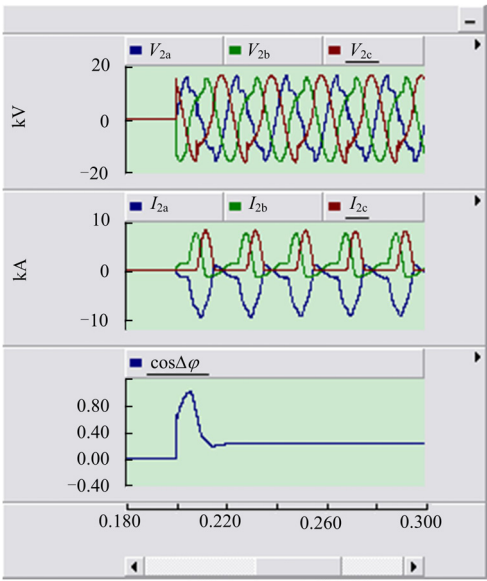
表1 变压器磁化曲线

Tab.1 Excitation curve of transformer

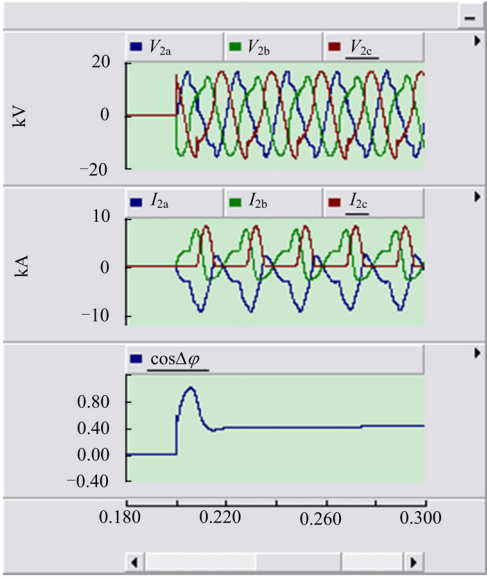
I/pu	U/pu	I/pu	U/pu
0	0	0.1	1.28
0.002 5	1	0.2	1.32
0.005	1.1	0.3	1.36
0.02	1.2	1	1.535
0.04	1.25	10	3.7



(a) 空载合闸



(b) 空投于A相10%匝间故障



(c) 空投于A相15%匝间故障

图 3 空载合闸时的仿真波形

Fig.3 Simulation waveform of energized transformer without load

波正序功率因数几乎为零。图 3（b）为空投 A 相 10%匝间故障，合闸后 15 ms 左右基波正序功率因数稳定为 0.22。图 3（c）为空投 A 相 15%匝间故障，合闸后 15 ms 左右基波正序功率因数稳定为 0.42。合闸前后 15 ms 左右算法的输出误差是由算法动态特性造成的，但算法可确保合闸后一周波内保护出口，通过算法动态特性的改进可能进一步提高保护出口速度。

针对图 1 系统，本文还进行了各种不同合闸角的仿真，表明合闸角并不影响算法的灵敏性和可靠

性。

变压器正常运行时空载损耗即铁耗极小, 空投涌流时即使在最严重的情况(使磁通幅值接近稳态值的三倍), 铁损也就是正常值的 9 倍左右(铁损近似正比于磁通幅值的平方), 实际上远不能达到。而空投涌流时由于电感线圈的磁通不能突变而导致产生的大量的励磁电流, 其主要成分是无功电流, 即此时变压器无功损耗极大^[11]。对比文献[7]及本文算法, 文献[7]只通过计算变压器有功损耗来区分涌流与故障电流, 忽视了变压器空投涌流时无功大而内部故障时无功小的显著特点, 使算法灵敏度受限。本文方案充分利用变压器故障时有功损耗大无功损耗小而空投涌流时变压器有功损耗小无功损耗大的特点, 根据基波正序功率因数来区分空投涌流或空投故障, 极大地凸显了空投涌流与空投于故障的差异特征。综合上述分析再结合大量仿真验证, 若将 $\cos\Delta\varphi$ 的门槛值 ξ 整定为 0.1, 就能有效识别空投涌流与空投于内部故障电流, 并有一定的冗余度。从整体的试验情况来看, 新原理无论在可靠性还是安全性、灵敏性上均明显优于以波形特征为主的传统变压器保护原理。

4 结论

基于功率差动原理, 提出了一种基于基波正序功率因数的新型变压器保护原理。该原理通过计算空投情况下, 变压器基波正序功率因数的大小, 来判断变压器是否发生内部故障。该方法计算简洁, 无需任何先验参数, 不受变压器接线方式的影响, 大量仿真试验结果均表明该原理在性能上优于传统的以波形特征为主的变压器保护原理, 有较好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 吕珍, 刘沛. 变压器差动保护二次谐波制动判据的仿真研究 [J]. 继电器, 2003, 31(6): 69-74.
Lü Zhen, LIU Pei. The simulation of scheme of second harmonic restraint for power transformer[J]. Relay, 2003, 31(6): 69-74.
- [2] 吕志娟, 刘万顺, 肖仕武. 一种鉴别变压器励磁涌流和内部故障的新原理 [J]. 继电器, 2006, 34(12): 1-5.
Lü Zhi-juan, LIU Wan-shun, XIAO Shi-wu. Novel scheme to discriminate inrush current from internal fault of power transformer [J]. Relay, 2006, 34(12): 1-5.
- [3] 张晓宇, 毕大强, 苏鹏声. 变压器外部故障切除后差动保护误动原因的分析[J]. 继电器, 2006, 34(1): 5-10.
ZHANG Xiao-yu, BI Da-qiang, SU Peng-sheng. Analysis of the maloperation of transformer differential protection after external fault removed[J]. Relay, 2006, 34(1): 5-10.
- [4] GE Bao-ming, Anibal T, ZHENG Qiong-lin, et al. An equivalent instantaneous inductance-based technique for discrimination between inrush current and internal faults in power transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (4): 2473-2482.
- [5] 索南加乐, 焦在滨, 宋国兵, 等. 基于故障分量综合阻抗的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (34): 94-100.
SUONAN Jia-le, JIAO Zai-bin, SONG Guo-bing, et al. A fault component comprehensive impedance based transformer protection principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (34): 94-100.
- [6] 古斌, 谭建成. 基于有功无功直流分量比值的变压器涌流新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (20): 65-69.
GU Bin, TAN Jian-cheng. New criterion to identify transformer inrush current based on ratio of DC component of real power and reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (20): 65-69.
- [7] Kuniaki Yabe. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12 (3): 1109-1118.
- [8] 马静, 王增平, 吴劫. 基于广义瞬时功率的新型变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 78-83.
MA Jing, WANG Zeng-ping, WU Jie. A novel principle of transformer protection based on generalized instantaneous power[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 78-83.
- [9] Emanuel A. Summary of IEEE standard 1459: definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2004, 40 (3): 869-875.
- [10] 杨欢, 赵荣祥, 程方斌. 无锁相环同步坐标变换检测法的硬件延时补偿[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (4): 54-59.
YANG Huan, ZHAO Rong-xiang, CHENG Fang-bin. Delay compensation for harmonics detection based on synchronous reference frame without phase lock loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (4): 54-59.
- [11] 孙鸣. 大型电力变压器快速主保护新原理及其应用问题的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
SUN Ming. Research on adaptive digital differential protection principle and method for transformer[D]. Hefei: Hefei Industry University, 2008.

收稿日期: 2010-03-31; 修回日期: 2010-06-18

作者简介:

古 斌 (1969-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统主设备继电保护; E-mail: gb1108@126.com

谭建成 (1963-), 女, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 主要研究方向为电力系统运行规划及继电保护。