

电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向

葛宝明¹, 王祥珩², 苏鹏声², 王维俭²

(1. 北方交通大学电气工程学院, 北京市 100044; 2. 清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 励磁涌流与内部故障电流的判别一直是伴随电力变压器差动保护的关键问题, 围绕这一主题, 世界各国的科技工作者先后提出了许多方法, 但仍不能很好地满足当前电力变压器保护的需求——可靠(不拒动)、安全(不误动)及快的动作速度。文中对各种判别方法的原理、优缺点、关键技术及研究和应用现状进行了较详细的分析与客观评价, 对比研究后给出了今后励磁涌流判别方法的发展方向。

关键词: 电力变压器; 保护; 励磁涌流; 内部故障

中图分类号: TM41; TM772

0 引言

近年来, 我国的超高压、大容量电力变压器不断投产, 远距离输电系统越来越多地建成、运行, 电力工业已有了可喜的发展。但是, 国内变压器保护的发展却远远落后, 其保护正确动作率长期偏低。造成这一结果的原因有管理上的不足, 有当前工作人员的素质问题(设计、制造、整定调试、运行维护诸方面的失误), 但最主要的是由于电力变压器继电保护技术上的缺陷^[1]。

差动保护一直是电力变压器的主保护, 其理论根据是基尔霍夫电流定律, 对于纯电路设备, 差动保护无懈可击。所以, 在发电机和线路保护的应用中, 差动保护写下了辉煌的一页, 例如, “九五”期间发电机保护的正确动作率为 98.2%, 系统保护的正确动作率达 99.33% (见: “九五”期间全国电网继电保护统计资料汇编. 南京: 2001), 充分体现了差动保护的明确选择性、高灵敏度和高速动作性。但是, 对于变压器而言, 由于内部磁路的联系, 本质上不再满足基尔霍夫电流定律, 变压器励磁电流成了差动保护不平衡电流的一种来源。然而, 大型电力变压器正常运行时的励磁电流通常低于额定电流的 1%, 所以适当设定差动保护动作值仍可准确区分变压器内部故障与外部故障。但是, 电力变压器运行条件复杂, 过励磁时励磁电流可达额定电流的水平, 空载合闸或者变压器外部短路被突然切除而端电压突然恢复时, 暂态励磁电流(即励磁涌流)的大小有时可与短路电流相比拟。这样大的不平衡电流必然导致差动保护误动, 为此, 变压器差动保护的主要矛盾一直集

中在准确鉴别励磁涌流和内部故障电流上。

围绕电力变压器励磁涌流的判别, 先后涌现出许多方法。本文较详细地对各种判别方法的原理、优缺点及应用情况和前景进行了分析与评判。

1 电流波形特征识别法

电流波形特征识别法一直是人们研究的热点, 目前仍占据主流。该方法以励磁涌流和内部故障电流波形特征的差异为依据, 已运用于实践的有二次谐波制动原理和间断角原理^[2], 新近提出的有采样值差动原理^[3]、波形对称原理^[4]、波形叠加原理^[5]、波形相关性分析法^[6]和波形拟合法^[7]。其中, 采样值差动原理是间断角原理的衍生, 波形对称原理是间断角原理的改进, 而波形叠加原理、波形相关性分析法和波形拟合法则是波形对称原理的衍生或改进。

另外, 随着人们研究领域的逐步扩大, 研究层次的逐渐加深, 产生的若干新兴学科也为判别励磁涌流提供了新的手段, 其中有代表性的是神经网络和小波变换。然而, 就目前发表的文献看, 这些新兴手段也只是局限于对电流波形进行一些简单的加工, 所以仍属于电流波形特征识别法的范畴。

1.1 二次谐波制动原理

二次谐波制动法是计算差流中的二次谐波分量, 若其值较大则判定为涌流, 常用的判别式为:

$$\frac{I_{d2}}{I_{d1}} > K \quad (1)$$

式中: I_{d2} 和 I_{d1} 分别为差流中的二次谐波和基波幅值; K 为二次谐波制动比。

二次谐波制动原理简单明了, 有多年的运行经验, 目前国内外实际投入运行的微机变压器保护大

都采用该原理。但是,采用二次谐波制动原理的变压器保护,面临着以下几个问题:

a. 励磁涌流是暂态电流,不适合用傅里叶级数的谐波分析方法。因为对于暂态信号而言,傅里叶级数法的周期延拓将导致错误的结果。

b. 很难适当选择制动比 K 。美国西屋公司的制动比为 7.0%~7.5%,但 ABB 取 10%,我国和大部分国家则取 15%~20%^[1]。谁更科学较难评判。

c. 现代变压器磁特性的变化,使得涌流时二次谐波含量低,导致误动;而大容量变压器、远距离输电的发展,使得内部故障时暂态电流产生较大的二次谐波,导致拒动。

1.2 间断角原理^[2]

间断角原理利用了涌流波形有较大间断角的特征,通过检测差流间断角的大小实现鉴别涌流的目的。该原理的模拟式保护装置已得到应用,但面临着因电流互感器传变引起的间断角变形问题。当电流互感器饱和时,在涌流的间断角区域将产生反向电流,电流互感器饱和越严重则反向电流越大,最终使得涌流间断角消失;对于内部故障电流而言,电流互感器饱和将导致差流的间断角增大,而且电流互感器饱和越严重,其差流间断角越大。前者将使得变压器发生涌流时差动保护误动,后者将使得变压器内部故障时差动保护拒动。此外,用微机实现间断角原理时硬件成本高,主要表现在以下 2 个方面^[8]:

a. 需要较高的采样率以准确测量间断角,结果对 CPU 的计算速度提出了更高的要求。

b. 涌流间断角处的电流非常小,几乎接近于 0,而 A/D 转换芯片正好在零点附近的转换误差最大。因此,需要高分辨率的 A/D 转换芯片。

1.3 波形对称原理

波形对称原理是利用差电流导数的前半波与后半波进行对称比较,根据比较的结果去判断是否发生了励磁涌流。对称的定义由下式给出:

$$\left| \frac{I_i' + I_{i+180}'}{I_i' - I_{i+180}'} \right| \leq K \quad (2)$$

式中: I_i' 为差电流导数前半波第 i 点的数值; I_{i+180}' 为后半波对应第 i 点的数值; K 为比较阈值。

当第 i 点的数值满足式(2)时称为对称,否则称为不对称。连续比较半个周期,对于内部故障,式(2)恒成立;对于励磁涌流,至少有 1/4 周期以上的点不满足式(2)。

该原理基于对励磁涌流导数波宽及间断角的分析,是间断角原理的推广,且比间断角原理容易实现。但是,涌流波形与许多因素有关,具有不确定

性、多样性,如果 K 值取得太大,保护可能误动;而故障电流也并非总是正弦波,实际系统中必须考虑故障情况的多样性和故障波形的复杂性。当系统有分布电容较大的电缆线路存在时,故障波形中就含有大量的谐波,此时如果 K 值选得太小,保护就有可能拒动;而且电流互感器饱和必将引起差流变形。因此,该原理的应用必将遇到如下问题:

a. 比较阈值 K 如何确定? 应为多大?

b. 故障时式(2)不一定总是恒成立,那么应当有多少点满足式(2)时才能判为故障? 换言之,对称范围^[9](对称角度)应当取多大?

这两个问题很难通过严格的理论分析或推导予以解决,应用中只能根据实际情况,通过试验的方式设定或修正^[10],结果潜伏了误判的隐患(已有误动的事实)。

1.4 小波变换方法

20 世纪 80 年代后期发展起来的小波变换在时、频两域都具有表征信号局部特征的能力,被誉为分析信号的数学显微镜,非常适合于非平稳信号的分析,克服了傅里叶变换只能适应稳态或准稳态信号分析、时域完全无局部性的缺点,可以准确地提取信号的特征。所以,小波变换的出现立刻引起了科技界时、频分析方法的新革命,当然也为励磁涌流和内部故障电流的判别带来了福音。自从小波变换的妙用被继电保护工作者认识以来,就前仆后继地涌现出一大批从事励磁涌流判别的科研人员,都试图通过小波变换彻底解决 100 年前留给我们的技术难题——变压器励磁涌流与内部故障的判别。

目前,小波变换在此方面的应用研究如火如荼,但一直以来主要集中于高次谐波检测^[11,12]和奇异点检测^[13],此外并未发现大的突破。实际上,两者都是间断角原理的一种推广,高频检测反映的是差流状态突变产生的高次谐波,高频细节出现的位置对应于变压器饱和、退饱和时刻或故障发生时刻。若差流的高频细节突变周期出现,则为励磁涌流;若出现一次后便很快衰减为 0,则为内部故障。奇异点检测利用了小波变换模极大值原理,检测的是差流状态突变而产生的第 2 类间断点,奇异点与涌流间断角相对应。

但是,对微机保护来讲,获得高频分量势必要提高采样频率,从而增加了技术难度和成本,而且可能会受到系统谐波的影响,能否经受住环境高频噪声的考验,有待进一步研究。另外,如何正确检测模值亦是一个难题。

1.5 神经网络方法

人工神经网络(ANN)应用于变压器内部故障

和励磁涌流判别,主要是利用 ANN 优秀的模式识别能力进行电流波形识别。1994 年,ANN 首次被用于变压器差动保护,进行了励磁涌流辨识^[14],之后此类应用便层出不穷^[15,16],而且有的文献已经不只局限于励磁涌流和内部故障电流的判别,如文献[15]用于区别变压器的励磁涌流、外部故障和内部故障。

不管用于何种目的,设计 ANN 时都要经历如下几个过程:①ANN 类型的确定;②输入和输出层中各节点数目的确定:输入是差流采样或原、副边电流的采样,而且每时刻要有若干个包含足够信息的采样点输入网络,如此可确定输入节点数,输出节点数与网络要实现的功用有关,如仅用于励磁涌流和内部故障判别,则有 1 个二进制输出即可,需要 1 个输出节点;③隐含层及其节点数需多次试凑确定;④传递函数的选择;⑤训练样本的获取;⑥数据预处理;⑦训练;⑧对已训练好的神经网络进行测试。

上述过程需反复进行,若在训练过程或检验时不能满足要求,那么网络结构及各种参数都需要调整,然后重新训练,可见,训练神经网络是一件非常烦琐的事。而且,训练时需要大量的样本数据,其获取及预处理的工作量很大,尽管如此,仍难以保证训练样本集的完备性,从而导致误判。

实际上,由于三相变压器励磁涌流的波形特征随系统电压和等值阻抗、合闸初相角、剩磁大小和方向、三相绕组接线方式和中性点接地方式、三相铁心结构(三相三柱、三相五柱、单相变压器组等)、铁心材料和组装工艺、磁滞回线和局部磁滞环等不同而改变,所以任何以涌流波形特征为依据的防止空投误动的措施均不能保证变压器差动保护不误动,差别仅是误动次数的多少^[1]。

2 磁通特性识别法

利用内部故障和励磁涌流时变压器磁链-差流($\Psi-i_d$)曲线的差别,文献[17]提出了励磁涌流的磁通特性识别法。变压器发生励磁涌流时, $\Psi-i_d$ 曲线即为变压器的空载磁化曲线;发生内部故障时, $\Psi-i_d$ 曲线将偏离磁化曲线,且故障越严重则偏离越严重。所以,通过计算铁心磁链 Ψ 和差流 i_d 可正确判别励磁涌流。具体判据为:如果 $\Psi-i_d$ 位于磁化曲线上,则该不平衡电流为励磁涌流,否则为内部故障电流。

此判据尽管理论上可行,但实际上由于受变压器不确定剩磁的影响,在励磁涌流情况下计算得到的 $\Psi-i_d$ 将偏离磁化曲线,进而导致误判。

为消除剩磁不确定性的影响,文献[17]又对上述方法进行了改进,即采用 $\Psi-i_d$ 曲线斜率 $d\Psi/di_d$

区分励磁涌流和内部故障电流,如图 1 所示。变压器正常运行于未饱和时, $d\Psi/di_d$ 数值较大且为一常数;铁心饱和时, $d\Psi/di_d$ 数值较小;发生励磁涌流时,铁心交替饱和, $d\Psi/di_d$ 将在大值与小值间周期变化;而内部故障时, $d\Psi/di_d$ 数值较小且为常数。

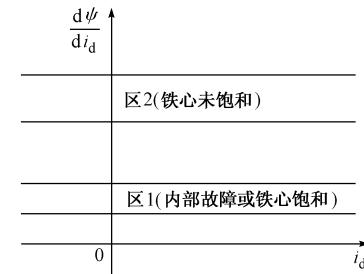


图 1 变压器的 $d\Psi/di_d-i_d$ 平面
Fig. 1 The $d\Psi/di_d-i_d$ plane of transformer

根据图 1,内部故障时 $d\Psi/di_d$ 值落于区 1,励磁涌流时 $d\Psi/di_d$ 值将在区 1 和区 2 间摆动。令 k_r 为制动指数,如果 $(d\Psi/di_d)_k$ 值位于区 1,则 k_r 加 1,当 $(d\Psi/di_d)_k$ 位于区 2 时, k_r 减 1。这样,内部故障时 k_r 几乎单调增加,而励磁涌流时 k_r 将从不大于 1 个阈值。

该方法由于计及了励磁涌流时变压器铁心饱和,深入到励磁涌流的产生原因而实现判别励磁涌流的目的,因而具有先进性。但存在如下不足:

a. 确定区 1 与区 2 较困难。特别是内部轻微故障时 $d\Psi/di_d$ 数值较大,几乎可与正常运行情况相比拟,这样,区 1 范围较大,而且可能与区 2 重合,最终导致判据失效。

b. 制动指数 k_r 的阈值需要通过实验确定,整定复杂。

与磁通特性法阐述的理论基础一致,文献[18]从变压器励磁涌流的产生是由于变压器励磁阻抗的变化出发,提出了一种利用测量阻抗变化区分励磁涌流与短路电流的方法。文献[19]则提出一种通过检测瞬时励磁电感基频分量的有无来区分励磁涌流和内部故障的方法,理论根源是:涌流时变压器铁心工作于非线性区,瞬时励磁电感剧烈变化;而内部故障时铁心工作在线性区,瞬时励磁电感为常值。这 3 种方法具有异曲同工之妙,很有应用前景,而且后 2 种方法更容易整定。但是,目前它们仅适合于三单相变压器组,尚未推广到三柱式或五柱式变压器。

3 等值电路参数鉴别法

文献[20]提出了一种基于变压器导纳型等值电路的参数鉴别方法,而且无论是励磁涌流还是内部故障,三绕组变压器的统一等值电路如图 2 所示。

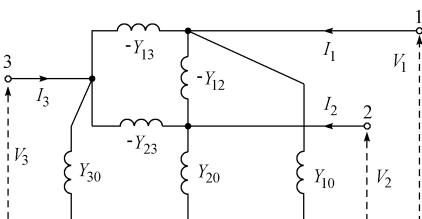


图 2 三绕组变压器等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of 3-winding transformer

对于该电路,有如下特点:

a. 导纳 Y_{13} , Y_{23} 和 Y_{12} 与变压器运行状况无关,是一个常数。

b. 导纳 Y_{10} , Y_{20} 和 Y_{30} 与变压器的运行状况相关,对于内部故障和励磁涌流,它们表现出极大的不同。具体地,如果主绕组 1 在最外层,第 3 绕组在最里层,则:励磁涌流时, Y_{10} 和 Y_{30} 为大于 0 的常值; 内部故障时, 故障绕组的导纳 (Y_{10} , Y_{20} 或 Y_{30}) 随故障匝比的增加而增加, 但非故障绕组的导纳仍旧几乎为 0 或稍微变负。

所以,根据导纳 Y_{10} 和 Y_{30} 的瞬时值可以建立判据,如果

$$Y_{10} \leq \xi_1 \text{ 或 } Y_{30} \leq \xi_2 \quad (3)$$

则变压器为内部故障。其中, ξ_1 和 ξ_2 为非负实常数, 对于某具体变压器应经过分析或实验确定, 文献给出的参考值分别为 $\xi_1=0$ 和 $\xi_2=2$ 。

但是,该方法需要获取变压器漏电感参数,以求取 Y_{13} , Y_{23} 和 Y_{12} , 进而根据实时采样得到的各相绕组电压、电流值计算瞬时导纳 Y_{10} 和 Y_{30} ; 而且 ξ_1 和 ξ_2 的整定较难。

4 基于变压器回路方程的算法

该方法基于变压器原、副边的互感磁链平衡方程与原、副边电压关于电流和互感磁链的方程, 消去互感磁链, 得到只包含原、副边电压和电流的线性模型。该模型不直接反映变压器铁心磁通的非线性, 只表达变压器原、副绕组漏感 (l_1 , l_2)、电阻 (r_1 , r_2)、电压 (u_1 , u_2) 及电流 (i_1 , i_2) 间的关系, 以单相变压器为例, 有如下表达式(为简明起见, 设变比为 1):

$$u_1 = u_2 + r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + r_2 i_2 + l_2 \frac{di_2}{dt} \quad (4)$$

据此,引出 2 条思路:

a. 当变压器无故障时(正常运行、空载合闸、外部故障及其切除), 式(4)恒等; 而内部故障时, 式(4)不再成立。定义

$$\epsilon = u_1 - u_2 - r_1 i_1 - l_1 \frac{di_1}{dt} - r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} \quad (5)$$

则当 $|\epsilon| > \alpha$ 时, 变压器为内部故障; α 为阈值^[21]。

b. 变压器在正常运行、励磁涌流、过励磁或外

部短路时, 绕组漏感和电阻为恒定不变的常值, 而在内部故障时却要发生变化。基于此特性, 可将绕组漏感和电阻是否发生变化作为区分变压器内部故障的判据, 为此产生了变压器保护的参数辨识法^[22]。

该方法完全摆脱了励磁涌流和过励磁电流的困扰, 实现了与差动保护迥然不同的变压器主保护, 构思新颖, 原理简明。但实践中存在如下困难: 变压器原、副边绕组漏电感极难准确获得, 目前尚无可行的测取方法, 导致整定困难。

5 差有功法^[23]

差有功法的基本原理是: 正常运行时变压器消耗有功非常小(铜损耗和铁损耗之和小于变压器容量的 1%), 励磁涌流时由于绕组存储磁能, 第 1 个周期流入变压器的有功较大, 但是第 2 个周期之后变压器消耗的有功却非常小(尽管涌流时铁损耗和铜损耗都有所增加); 然而当变压器绝缘损坏时, 电弧放电发热将消耗大量的有功。所以, 通过检测变压器消耗有功的大小, 即差有功, 可判别变压器是否发生内部故障。具体实现时, 在差有功中去除铜损耗以提高保护的灵敏度, 对于单相两绕组变压器有:

$$W(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t (u_1 i_1 + u_2 i_2 - r_1 i_1^2 - r_2 i_2^2) dt \quad (6)$$

式中: u_1 , u_2 , i_1 , i_2 , r_1 , r_2 分别是变压器原、副绕组的瞬时电压、电流和电阻。

差有功法的判据为: 如果 $W(t) > \zeta$, 则变压器为内部故障。设定阈值 ζ 的目的是为了避免涌流时误动。此外, 电压互感器和电流互感器的测量误差将影响 ζ 的大小, 例如电压互感器和电流互感器的时延导致电压、电流相位误差, 从而引起差有功误差。

差有功法不再纠缠于励磁涌流波形特征, 从物理机理出发综合考虑电压、电流信息, 是一种全新的主保护方案。然而, 该方法仍无法回避励磁涌流带来的不利影响, 首先需要避开涌流时变压器第 1 周期的充电过程, 结果导致判别延时; 其次, 由于涌流时铜损耗很难精确计算, 铁损耗增加, 整定不容易。而且, 变压器外部故障时由于变压器流过较大的穿越电流, 使变压器消耗较大的有功, 其对差有功法的影响也不容忽视。所以, 文献[23]使用了辅助判据以提高灵敏度。

6 基于模糊逻辑的多判据法

该方法基于对现有励磁涌流识别算法的认识, 借助模糊逻辑隶属度和权重的概念, 综合了各判据的优点, 使各判据之间取长补短。该方法弥补了严格按照精确定量判别涌流的不足, 避免了“一票否决”, 真正做到了“集思广益”, 体现了智能化特点。

例如,文献[24]综合二次谐波制动原理、波形特征识别法、磁通特性识别法和低电压判据的优点,利用模糊集合理论提出了一种多判据方法。

该方法只是变压器励磁涌流识别中的一个新探索,目前有很多问题难以解决,如模糊逻辑中隶属函数与权重应当如何选择?这个问题的回答建立在原有认识的基础上,而且需要技术人员对问题有较深入的认识。所以,该方法仍需要科研工作者进行深入而细致的研究。

7 结语

当前存在的励磁涌流与内部故障判别方法虽然种类繁多,但都不够完善,远不能满足电力变压器继电保护的要求。为此,加速研制新判据非常迫切与重要。科学地讲,由于变压器发生励磁涌流时磁路的饱和,变压器是一个非线性时变系统,其电压、电流并非线性相关,而是系统中独立的2个变量。所以,只有应用电压、电流2个状态变量同时表述变压器的运行状态,信息才具有完备性。就理论而言,存在2种途径判别变压器励磁涌流与内部故障:一种途径是抛开差动保护的思路,应用变压器电流、电压信息,从解决问题的开始就避开励磁涌流的问题,如基于变压器回路方程的算法消去了直接体现变压器铁心磁通的非线性项,从而避开了励磁涌流的纠缠;另一种途径就是直面励磁涌流,寻求判别励磁涌流和内部故障的方法,这种途径应充分考虑励磁涌流时变压器铁心的非线性,如磁通特性法。此外,这一问题的解决还必须借助先进的科技识别手段,随着科学技术的发展,这一问题必将得到解决。

参 考 文 献

- 1 王维俭 (Wang Weijian). 变压器保护运行不良的反思 (Consideration on the Improper Operation of the Transformer Protection). 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2001, 21(10): 1~3
- 2 王祖光 (Wang Zuguang). 间断角原理的变压器差动保护 (Transformer Differential Protection Based on the Dead-angle). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1979, 3(1): 18~30
- 3 胡玉峰, 陈德树 (Hu Yufeng, Chen Deshu). 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法 (A New Method to Identify Inrush Current Based on Sampled Values). 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(9): 55~58, 63
- 4 孙志杰, 陈云伦 (Sun Zhijie, Chen Yunlun). 波形对称原理的变压器差动保护 (Transformer Differential Protection Based on the Characteristic Analysis of the First and Second Half Cycle of the Magnetizing Inrush Current). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1996, 20(4): 42~46
- 5 董洁, 于莉萍, 焦志先, 等 (Dong Jie, Yu Liping, Jiao Zhixian, et al). 变压器差动保护涌流制动原理的研究 (A Research into Inrush Current Restraint Principle for Transformer Differential Protection). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(12): 30~33
- 6 李贵存, 刘万顺, 滕林, 等 (Li Guicun, Liu Wanshun, Teng Lin, et al). 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法 (A New Algorithm of Discrimination between Inrush Current and Fault Current of the Transformer Based on Self-correlation Analysis). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(17): 25~28
- 7 李贵存, 刘万顺, 刘建飞, 等 (Li Guicun, Liu Wanshun, Liu Jianfei, et al). 用波形拟合法识别变压器励磁涌流和短路电流的新原理 (New Principle of Discrimination between Inrush Current and Fault Current of the Transformer Based on Forecasted Waveform). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(14): 15~18
- 8 唐跃中, 刘勇, 郭勇, 等 (Tang Yuezhong, Liu Yong, Guo Yong, et al). 几种变压器励磁涌流判别方法的特点及其内在联系的分析 (Analysis of Some Typical Methods for Checking Magnetizing Surge in Transformer). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1995, 19(9): 53~59
- 9 林湘宁, 刘世明, 杨春明, 等 (Lin Xiangning, Liu Shiming, Yang Chunming, et al). 几种波形对称法变压器差动保护原理的比较研究 (Study on Comparisons Among Some Waveform Symmetry Principle Based Transformer Differential Protection). 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2001, 16(4): 44~49, 70
- 10 苗友忠, 贺家李, 孙雅明 (Miao Youzhong, He Jiali, Sun Yaming). 变压器波形对称原理差动保护不对称度K的分析和整定 (Analysis and Setting of Asymmetry Degree K of Transformer Differential Protection Based on Symmetry Principle of Current Waveforms). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(16): 26~29, 44
- 11 Mao P L, Aggarwal R K. A Wavelet Transform Based Decision Making Logic Method for Discrimination between Internal Faults and Inrush Currents in Power Transformers. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22(6): 389~395
- 12 林湘宁, 刘沛, 程时杰 (Lin Xiangning, Liu Pei, Cheng Shijie). 基于小波包变换的变压器励磁涌流识别新方法 (A Wavelet Packet Based New Algorithm Used to Identify the Inrush). 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1999, 19(8): 14~19, 38
- 13 焦邵华, 刘万顺, 刘建飞, 等 (Jiao Shaohua, Liu Wanshun, Liu Jianfei, et al). 用小波理论区分变压器的励磁涌流与短路电流的新原理 (A New Principle of Discrimination between Inrush Current and Fault Current of Transformer Based on Wavelet). 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1999, 19(7): 1~5, 76
- 14 Perez L G, Flechsig A J, Meador J L, et al. Training an Artificial Neural Network to Discriminate Between Magnetizing Inrush and Internal Faults. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(1): 434~441
- 15 Orille-Fernandez A L, Ghonaim N K I, Valencia J A. A FIRANN as a Differential Relay for Three Phase Power Transformer Protection. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 215~218
- 16 Zaman M R, Rahman M A. Experimental Testing of the Artificial Neural Network Based Protection of Power Transformers. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(2): 510~517

(下转第30页 continued on page 30)

- 17 Phadke A G, Thorp J S. A New Computer-based Flux-restrained Current-differential Relay for Power Transformer Protection. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1983, 102(11): 3624~3629
- 18 宗洪良,金华烽,朱振飞,等(Zong Hongliang, Jin Huafeng, Zhu Zhenfei, et al). 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法(Transformer Inrush Detected by the Variation of Magnetizing Impedance). *中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE)*, 2001, 21(7): 91~94
- 19 葛宝明,苏鹏声,王祥珩,等(Ge Baoming, Su Pengsheng, Wang Xiangheng, et al). 基于瞬时励磁电感频率特性判别变压器励磁涌流(Distinguish Inrush Currents for Transformers Using Frequency Characteristic of Instantaneous Excitation Inductance). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 2002, 26(17): 35~40
- 20 Keizo Inagaki, Masaru Higaki, Yoshiaki Matsui, et al. Digital Protection Method for Power Transformers Based on an Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1988, 3(4): 1501~1510
- 21 王维俭(Wang Weijian). 电气主设备继电保护原理与应用(Principle and Application of Electric Power Equipment Protection). 第2版(2nd ed). 北京: 中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 2002
- 22 熊小伏, 邓祥力, 游波(Xiong Xiaofu, Deng Xiangli, You Bo). 基于参数辨识的变压器微机保护(Transformer Protection Using Parameter Identification Method). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 1999, 23(11): 18~21
- 23 Kuniaki Yabe. Power Differential Method for Discrimination Between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1997, 12(3): 1109~1118
- 24 王增平, 高中德, 张举, 等(Wang Zengping, Gao Zhongde, Zhang Ju, et al). 模糊理论在变压器保护中的应用(Application of Fuzzy Set Theory in Transformer Protections). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 1998, 22(2): 13~16, 45

葛宝明(1971—),男,博士,副教授,主要研究领域为电力变压器保护、电气传动自动化等。E-mail: bm-ge@263.net

王祥珩(1940—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为电机及其系统的分析和控制、电力系统主设备内部故障分析与保护等。

苏鹏声(1946—),男,硕士,副教授,主要从事电机、电力电子、故障诊断等领域的教学和科研工作。

CRITERIA AND DEVELOPMENT TREND TO IDENTIFY INRUSH CURRENT OF POWER TRANSFORMERS

Ge Baoming¹, Wang Xiangheng², Su Pengsheng², Wang Weijian²

(1. Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Distinguishing magnetizing inrush currents from internal faults has been a key problem of the power transformer differential protection. Many methods have been proposed for this purpose around the world, but they have not yet fulfilled the requirements of power transformer relay protection, including dependability (no missing operation), security (no false tripping), and speed of operation (short fault clearing time). This paper focuses on the detailed analyses and evaluations for all kinds of the proposed methods, such as their principles, advantages and disadvantages, key technologies, state of arts on their studies and applications. Furthermore, the prescient methods used for distinguishing magnetizing inrush currents from internal faults are proposed through extensive studies.

Key words: power transformer; protection; magnetizing inrush currents; internal faults