

关于变压器主保护的若干问题

王增平, 马静

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 随着超高压大容量电力变压器不断投入运行, 现场对变压器主保护的可靠性、快速性和灵敏性提出了更高的要求, 完善变压器差动保护和提出新型主保护原理势在必行。首先分析了变压器差动保护中尚未很好解决的一些关键性问题, 在此基础上, 讨论了若干种与差动保护迥然不同的新原理。仿真和动模实验结果表明, 新原理不受励磁涌流和 Y/Δ 接线方式的影响, 能够灵敏、可靠地切除内部故障, 在与差动保护原理进行对比后, 给出了变压器主保护技术的发展路线。

关键词: 电力系统; 变压器主保护; 励磁涌流; 内部故障

Some problems about power transformer main protection

WANG Zeng-ping, MA Jing

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Recently, with the EHV large capacity transformers putting into operation continuously, reliability, rapidity and sensibility are in highly demand. It is imperative to consummate transformer differential protection and bring forward novel transformer main protection. Novel principles and algorithms are analyzed to solve some key problems still existing in power transformer main protection. Simulation and dynamic testing results verify this scheme is independent of core characteristics and transformer parameters and is suitable for the Y/Δ connected transformers. By comparing with the transformer differential protection, technical routes of power transformer main protection is proposed.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50777016).

Key words: power system; power transformer main protection; inrush current; internal fault current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0004-09

0 引言

随着我国电力工业的发展, 大容量电力变压器在系统中的应用越来越多。作为整个电力系统的转换枢纽, 变压器的安全正常运行直接关系到整个电力系统的连续稳定工作。特别是现代大型变压器容量大, 电压等级高, 造价昂贵, 结构复杂, 一旦因故障遭到破坏, 将会带来波及范围广, 检修难度大, 检修时间长, 经济损失惨重等一系列问题。最新统计资料显示^[1], 2001~2005 期间, 220 kV 及以上变压器保护的平均正确动作率仅为 79.97%, 远低于线路保护的正确动作率(99%以上)。

无论是传统的模拟式保护, 还是目前普遍采用的数字式保护, 差动保护一直是电力变压器的主保护之一, 它的理论基础是基尔霍夫电流(KCL)定律, 它在线路和发电机上的应用比较成功, 但是作为变压器内部故障的主保护, 却面临着许多问题^[2]。从电路上看, 变压器一次绕组和二次绕组并非是一个节点, 各侧电压不相等, 各侧之间也不相通; 从原理上看, 变压器差动保护是建立在稳态磁路平衡基础上的, 在暂态过程中这种平衡关系将被打破, 只有等到暂态过程结束后, 这种关系才能重新建立。因此, 变压器差动保护在实施的过程中需要考虑多重不利因素的影响:

- (1) 电流互感器变比的匹配及误差;
- (2) 变压器调节分接头;
- (3) 外部故障电流的暂态过程加大了 CT 传变误差;

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777016); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060079009)

- (4) 变压器高压侧高阻接地单相短路;
- (5) 具有流出电流的小匝数匝间短路;
- (6) 励磁涌流。

其中, 前五点不利因素主要依靠差动保护自身特性加以解决; 而最后一点需要额外增加励磁涌流闭锁环节防止误动。本文首先针对各种差动保护原理及励磁涌流闭锁措施中出现的问题进行研究和讨论, 在此基础上, 分析了若干种变压器主保护新原理, 仿真和动模实验结果验证了新原理的正确性和可行性。在对比研究的基础上, 给出了变压器主保护技术的发展路线。

1 差动保护原理的研究

1.1 按相差动保护原理

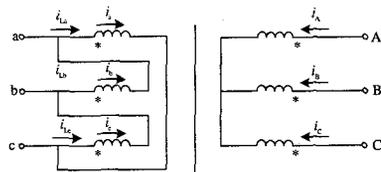


图1 Y/Δ-11接线的三相变压器

Fig.1 Three-phase transformer with Y/Δ-11 connection

图1中, i_a 、 i_b 、 i_c 为Δ绕组中的电流, i_A 、 i_B 、 i_C 为Y绕组中的电流; u_a 、 u_b 、 u_c 为Δ绕组中的电压; u_A 、 u_B 、 u_C 为Y绕组中的电压; i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 为Δ绕组外 A、B、C 三相的电流。

按相差动保护又可以分为以下两种方式:

1) 绕组差动保护原理

对于绕组差动保护原理, 由图1可写出两侧差动电流的关系为:

$$\begin{bmatrix} I_{da} \\ I_{db} \\ I_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $K = \frac{U_Y}{\sqrt{3}U_\Delta} = \frac{w_Y}{w_\Delta}$ 。

绕组电流差动保护存在的问题:

- (1) 对于Y/Δ接线的变压器无法获得绕组电流;
 - (2) 不能和过流保护配合, 会产生保护死区。
- #### 2) 相间差动保护原理

同样可以写出相间电流差动保护两侧差动电流的关系:

$$\begin{bmatrix} I_{da} \\ I_{db} \\ I_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

相间电流差动保护存在的问题: 对于Y/Δ接线的三相变压器, 反应Y侧单相接地时, 保护灵敏度

会降低。为了解决保护的灵敏度问题, 提出零序差动保护方案。

1.2 零序差动保护原理

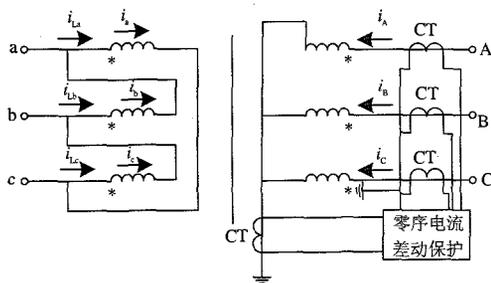


图2 零序电流差动保护接线图

Fig.2 Connecting diagram of zero-sequence current differential protection

单相超高压大型变压器绕组的短路类型主要是绕组对铁心(即地的绝缘损坏), 即单相接地短路, 相间短路(箱内故障)可能性较小, 因此认真对待变压器的单相接地短路是十分必要的。

零序差动保护构成: 在Y侧三相电流互感器二次侧接成零序滤过器方式, 再与中性点互感器二次组成差动接线, 就构成了变压器的接地零序差动保护, 如图2所示。

零序差动保护的优点:

- (1) 对Y侧绕组单相接地故障有较高的灵敏度;
- (2) 动作电流与变压器调压分接头的调整无关;
- (3) 不直接受励磁涌流的影响;
- (4) 所用电流互感器变比相同, 与变压器变比无关。

零序差动保护的缺点:

- (1) 不能反应相间故障, 更不能反应低压侧故障;
- (2) 高阻接地故障时, 保护的灵敏度较低;
- (3) 二次接线错误的检验比较麻烦。

1.3 分侧差动保护原理

由于各种按相差动保护都有一个励磁涌流和过励磁工况下防止保护误动的问题, 因此有必要探讨一种新的变压器差动保护方案, 与励磁涌流和过励磁电流都无关, 这就是变压器分侧差动保护, 其接线图如图3所示。

现代大型变压器出于运输上的考虑, 基本都做成三个单相变压器组, 每一绕组的两个端子均引出壳外, 这为装设分侧差动保护提供了有利条件。这种保护的优点是:

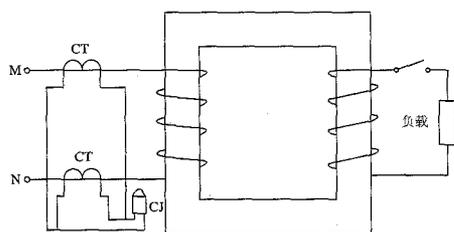


图3 分侧差动保护接线图

Fig.3 Connecting diagram of split-side differential protection

- (1) 对单相接地故障有较高的灵敏度;
- (2) 不受分接头调压的影响;
- (3) 不直接受励磁涌流的影响;
- (4) 大型电力变压器采用分侧差动保护可使装置简化;

(5) 保护原理简单, 装置可靠, 调试方便。

分侧差动保护的缺点是:

- (1) 不能反应常见的匝间故障;
- (2) 只有每个绕组具有两个引出端子才能采用此方案;
- (3) 保护继电器数目几乎增加1倍。

从上面的分析可以看出, 尽管零序差动保护和分侧差动保护有相间差动保护不可替代的优点, 但是鉴于变压器的实际接线情况和保护自身的特点, 现场中更多采用相间差动保护——纵联差动保护作为其主保护。在纵联差动保护中, 励磁涌流是一直以来无法回避的难题, 需要采取特殊措施加以解决。

1.4 励磁涌流闭锁措施

现场中识别励磁涌流的方法主要是利用励磁涌流波形特征, 包括二次谐波制动原理^[3~10], 间断角原理^[11~13], 波形对称原理^[14~16], 波形比较原理^[17]等。这些原理看似简便易行, 但在实际应用中却暴露出了纵差保护无法克服的三大难题: ①由于变压器铁心饱和的非线性特性, 励磁涌流最大峰值可达变压器额定电流的十几倍。②励磁涌流具有随机性、多样性的特点, 其波形特征与合闸初相角、剩磁大小、系统电压和阻抗等因素有关, 利用波形特征保护整定困难。③对于 Y/Δ 接线的变压器, 差动电流同时包含励磁涌流和故障电流, 其结果是降低了保护的灵敏性和速动性。

为了说明基于波形特征的励磁涌流制动原理存在的缺陷和不足, 笔者分别利用仿真和动模实验数据^[28,29]对波形比较判据和二次谐波制动判据进行了分析, 计算结果分别如表1和表2。

其中波形比较判据给出的是差流的波形系数, 正常空投情况下考虑三相的波形系数, 而空投于故障情况下仅对每组数据中波形系数的最大值进行统

计; 二次谐波制动判据给出的是差流中二次谐波占基波的百分比, 正常空投情况下考虑三相差流的二次谐波百分比, 而空投于故障情况下仅对每组数据中百分比的最小值进行统计。

表1 波形比较和二次谐波制动原理的仿真实验结果
Tab.1 Simulation results of wave comparison and secondary harmonic restraint algorithm

运行状态	波形比较原理	二次谐波原理/(%)
正常空投	0.078~0.526*	8.94~79.82*
带星侧空投	A1.8%	0.164~0.262*
	A3.6%	0.459~0.875
	A5.4%	0.573~1.031
带角侧空投	A7.2%	0.526~0.998
	A14.4%	0.648~0.827
	A1.8%	0.142~0.314*
带星侧空投	A3.6%	0.516~0.947
	A5.4%	0.677~1.184
	A7.2%	0.701~1.278
A10.8%	0.839~1.145	6.89~9.64

注: “*”表示在波形比较和二次谐波制动原理下识别不清实验数据。

对于波形比较判据, 如果整定值取为 0.3(常用值), 并采用分相制动方案, 由表1和表2的计算结果可以看出, 某些试验数据(用“*”标出)就有可能识别不清。例如: 正常空投数据中, 对于波形系数大于 0.3 的情况, 保护可能误动; 此外, 对变压器空投于小匝比内部故障的情况, 由于三相电流的波形系数均小于 0.3, 保护可能要经历较长时间延时动作。对于二次谐波制动判据, 如果整定值取为 15%, 在变压器空投于内部匝间故障(用“*”标出)的情况下, 保护也将延时动作。

表2 波形比较和二次谐波制动原理的动模实验结果
Tab.2 Experimental results of wave comparison and secondary harmonic restraint algorithm

运行状态	波形比较原理	二次谐波原理/(%)	
正常空投	0.014~0.451*	15.30~72.69	
带星侧空投	A2.4%	0.153~0.299*	
	A6.1%	0.428~1.107	
	A9%	0.349~0.887	
	A18%	0.641~1.080	
带角侧空投	B18%	0.655~1.143	
	接地	A	0.609~1.058
带星侧空投	B	0.627~1.106	2.16~3.95
	A1.8%	0.142~0.278*	2.55~3.36
A4.5%	0.860~1.115	24.72~42.41*	
		9.68~12.97	

注: “*”表示在波形比较和二次谐波制动原理下识别不清实验数据。

近年来, 随着人们研究领域的逐渐扩大, 研究层次的逐渐加深, 产生的若干新兴学科为判别励磁涌流提供了新的手段, 其中比较有代表性的是小波变换和数学形态学方法。这些新方法的出现解决了波形比较原理和二次谐波制动原理缺乏空间局部性的问题, 有助于提高变压器差动保护的整体性能,

但却无法从根本上改变差动保护的原理缺陷, 无法避免保护不正确动作情况的发生。上述种种情况表明差动原理应用于变压器保护困难重重, 前途黯淡, 为走出技术困境, 继电保护科技工作者必须更弦易辙, 另辟蹊径。

2 新型保护原理的研究

随着微机技术的迅猛发展及变压器主、后备保护一体化方案的认可和广泛采用, 在变压器保护装置中引入多个电气量进行复杂计算已经不成问题。由于变压器是一个非线性时变系统, 其电压、电流并非线性相关, 而是系统中独立的两个变量, 因此充分利用电压量和电流量来描述变压器的运行状态, 信息更具完备性, 也为寻找灵敏度更高、可靠性更强的保护判据提供了新的方法和途径。目前同时利用电压量和电流量的变压器保护新原理主要有: 磁通特性原理^[18-23], 序阻抗原理^[24, 25], 回路方程原理^[26-29], 功率差动原理^[30, 32]等。

磁通特性原理从励磁支路的非线性特性出发, 很有应用前景, 然而目前它仅适用于单相变压器组。对于 Y/Δ 接线的三相变压器, 由于 Δ 侧绕组内部环流不易测量, 因此如何利用磁通特性反映励磁支路的非线性变化特征和规律, 还有待详细的分析和研究。

下面重点讨论序阻抗原理、回路方程原理以及功率差动原理的优缺点, 在此基础上, 分析若干种变压器主保护的新原理和新方法。

2.1 序阻抗原理

序阻抗原理的基本思想是: 在变压器故障前后正负序等值网络必然会发生一定的变化, 利用正负序电压电流的变化量计算出变压器两侧保护安装处所感受到的正负序阻抗, 根据其方向的不同来达到识别变压器区内外故障的目的。为说明方便以双绕组变压器为例, 系统模型如图 4 所示, 保护位于变压器两侧, 电流的正方向如图所示。

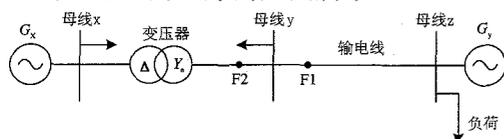


图 4 系统模型

Fig.4 System model

对于变压器区外故障, 例如在输电线 F1 点发生故障, 根据故障前后的正序等值网络可有:

$$\Delta V_{x1}/\Delta I_{x1} = -Z_{Gx1}, \Delta V_{y1}/\Delta I_{y1} = +(Z_{Gx1} + Z_{tran1}) \quad (3)$$

其中: ΔV_{x1} , ΔI_{x1} , ΔV_{y1} , ΔI_{y1} 分别表示故障前

后变压器两侧的正序电压和正序电流的变化量, Z_{Gx1} , Z_{tran1} 分别表示 x 侧系统和变压器的正序等值阻抗。同理, 根据故障前后的负序等值网络可得:

$$\Delta V_{x2}/\Delta I_{x2} = -Z_{Gx2}, \Delta V_{y2}/\Delta I_{y2} = +(Z_{Gx2} + Z_{tran2}) \quad (4)$$

其中: ΔV_{x2} , ΔI_{x2} , ΔV_{y2} , ΔI_{y2} 分别表示故障前后变压器两侧的负序电压和正序电流的变化量, Z_{Gx2} , Z_{tran2} 分别表示 x 侧系统和变压器的负序等值阻抗。

对于变压器区内故障, 如 F2 点故障, 采用同样的分析方法, 可得变压器两侧的正负序计算阻抗如式(5)和式(6)所示。

$$\Delta V_{x1}/\Delta I_{x1} = -Z_{Gx1}, \Delta V_{y1}/\Delta I_{y1} = -(Z_{Gy1} + Z_{Line1}) \quad (5)$$

$$\Delta V_{x2}/\Delta I_{x2} = -Z_{Gx2}, \Delta V_{y2}/\Delta I_{y2} = -(Z_{Gy2} + Z_{Line2}) \quad (6)$$

其中: Z_{Gy1} , Z_{Line1} , Z_{Gy2} , Z_{Line2} 分别表示 y 侧系统和线路的正负序等值阻抗。

当变压器发生区外故障时, 由式(3)、(4)可得: 变压器两侧所感受到的正负序阻抗总是一正一负; 当变压器发生区内故障时, 由式(5)、(6)可得: 变压器两侧所感受到的正负序阻抗总为负。基于此, 文献[24]提出了一种区分变压器内外部故障的方法(为叙述方便, 下文简称为“象限划分法”): 当变压器两侧正负序阻抗一个位于象平面的第一象限, 另一个位于象平面的第三象限时, 判为区外故障; 当变压器两侧正负序阻抗全部位于象平面的第三象限时, 判为区内故障。文献[25]在“象限划分法”的基础上, 修正了象平面区域的划分: 在保留原有区域的基础上, 将区域边界拓展到第 2、4 象限。仿真结果表明该方案较“象限划分法”在可靠性和灵敏性方面均有较大的改善和提高, 并具有一定的抗 CT 饱和能力。然而, 即便是改进方法, 都无法克服励磁涌流带来的不利影响, 在保护的构成上还需要与其他判据配合使用。因此, 如何正确识别正常空投和空投于内部故障情况仍将是基于序阻抗原理的变压器保护亟待解决的关键性问题。

2.2 回路方程原理

基于回路方程的变压器微机型主保护与传统的差动保护迥然不同, 从解决问题的开始就避开了励磁涌流的困扰, 不再以励磁涌流的波形特征来区分励磁涌流和内部短路电流, 同时也不受接线方式的影响, 构思新颖, 原理简明。以单相变压器为例, 由图 5 所示的变压器模型可由式(7)中的两个微分方程来描述, 通过消去其中直接体现变压器铁心磁通

的非线性项 $d\psi_m/dt$, 可得式(8)。

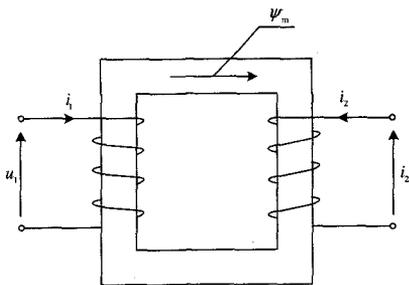


图5 双绕组单相变压器

Fig.5 Two-winding single-phase transformer

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} \\ u_2 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{12} = L_1 \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \\ u_{12} = u_1 - u_2 - i_1 r_1 + i_2 r_2 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, u_1 , u_2 分别为一、二次绕组的电压, i_1 , i_2 分别为一、二次绕组的电流, L_1 , L_2 分别为一、二次绕组的漏感, ψ_m 为一、二次绕组的互感磁链, r_1 , r_2 分别为一、二次绕组的电阻。

变压器正常运行情况下有 $r_1+r_2=r_k$ 和 $L_1+L_2=x_k/\omega$ 成立。其中 r_k 和 x_k 分别为变压器绕组电阻和短路电抗。将这两个式子代入式(8), 可得到2组变压器正常运行情况下的等值回路平衡方程:

$$u_1 - u_2 + i_2 r_k + \frac{x_k}{\omega} \frac{di_2}{dt} = (i_1 + i_2) r_1 + L_1 \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} \quad (9)$$

$$u_1 - u_2 - i_1 r_k - \frac{x_k}{\omega} \frac{di_1}{dt} = -(i_1 + i_2) r_2 - L_2 \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} \quad (10)$$

式(8)是根据变压器正常运行的模型得到的, 它适合于除变压器内部故障外的任何情况, 因此, 可通过判别此式是否成立, 来决定保护的動作行为。然而该方法在以下两个方面有待改进:

(1) 目前尚无可行的方法实时获取各种情况下各个绕组的漏感参数。

(2) 即使取得了漏感参数, 保护方案如何选取, 保护判据如何整定, 灵敏度如何校验, 还有赖于用准确的变压器内部故障数据进行研究。

针对上述问题, 提出的改进措施如下:

在变压器回路方程的基础上, 构造各个绕组的等效瞬时漏感参数来反映变压器漏磁场的变化情况。等效瞬时漏感参数和实际的漏感参数具有相近的变化规律, 即在励磁涌流、过激磁或外部故障等情况下求出的各个等效瞬时漏感参数, 其值均为常

量, 而变压器绕组发生故障时, 故障相的等效瞬时漏电感将会发生明显地变化, 并且故障相漏感值与正常漏感值也会存在明显的差异, 基于这种差异或变化量形成新的变压器主保护判据。

2.2.1 等效瞬时漏感参数的构造^[28]

由式(9)可知, 一个方程中含有两个未知参数 (r_1 和 L_1) 是无法求解的, 因此可以通过选取不同时刻的测量数据建立相互独立的方程, 联立求解。为能实时计算瞬时漏感参数, 可以选择两个相邻时刻 t_1 和 t_2 建立如下方程:

$$u_{121}(t_1) = \eta i_d(t_1) + L_1 \frac{di_d(t_1)}{dt} \quad (11)$$

$$u_{121}(t_2) = \eta i_d(t_2) + L_1 \frac{di_d(t_2)}{dt} \quad (12)$$

式中: $u_{121} = u_1 - u_2 + i_2 r_k + (x_k/\omega)(di_2/dt)$, $i_d = i_1 + i_2$ 。

具体实现时, 可以采用电流的差分代替式(11)和式(12)中电流的微分, 为此, 可选择三个相邻时刻的采样值(数字滤波后连续三点)。设 u_{k-1} 、 u_k 、 u_{k+1} 分别为 t_{k-1} 、 t_k 、 t_{k+1} 时刻电压信号的采样值; i_{k-1} 、 i_k 、 i_{k+1} 分别为 t_{k-1} 、 t_k 、 t_{k+1} 时刻电流信号的采样值; 取 t_1 时刻在 t_{k-1} 、 t_k 的中间, t_2 时刻在 t_k 、 t_{k+1} 的中间, t_1 、 t_2 时刻的间隔为一个采样间隔。式(11)和式(12)中的 $u_{121}(t_1)$ 、 $u_{121}(t_2)$ 、 $i_d(t_1)$ 、 $i_d(t_2)$ 、 $di_d(t_1)/dt$ 、 $di_d(t_2)/dt$ 可由采样值插值得:

$$u_{121}(t_1) = \frac{u_k + u_{k-1}}{2} \quad u_{121}(t_2) = \frac{u_k + u_{k+1}}{2} \quad (13)$$

$$i_d(t_1) = \frac{i_k + i_{k-1}}{2} \quad i_d(t_2) = \frac{i_{k+1} + i_k}{2} \quad (14)$$

$$D_1 = \frac{di_d(t_1)}{dt} = \frac{i_k - i_{k-1}}{T_s} \quad D_2 = \frac{di_d(t_2)}{dt} = \frac{i_{k+1} - i_k}{T_s} \quad (15)$$

联立式(11)和式(12), 可得 t_1 时刻瞬时漏电感 L_1 的计算式(16)。利用此算法得到的瞬时漏电感, 是根据变压器正常运行的模型得到的, 对于内部故障情况, 由于回路方程不再成立, 此时计算得到的漏感值并不是实际测得的漏感值, 因此, 可以将其定义为等效瞬时漏电感:

$$L_1 = \frac{u_{121}(t_1)i_d(t_2) - u_{121}(t_2)i_d(t_1)}{i_d(t_2)D_1 - i_d(t_1)D_2} \quad (16)$$

同理, 可以计算出 t_1 时刻等效瞬时漏电感 L_2 的表达式:

$$L_2 = \frac{u_{122}(t_1)i_d(t_2) - u_{122}(t_2)i_d(t_1)}{i_d(t_2)D_1 - i_d(t_1)D_2} \quad (17)$$

式中: $u_{122} = -(u_1 - u_2 - i_1 r_k - (x_k/\omega)(di_1/dt))$ 。

2.2.2 保护方案设计

主判据: 保护启动后, 在线计算各相等效瞬时漏感参数, 同时利用一个长度为 1/4 周波的滑动数据窗, 实时计算窗内漏感参数的平均值, 通过比较各相平均等效瞬时漏感参数之间的差异构成保护判据。其中, 未启动相的平均等效瞬时漏感参数由该相正常漏感参数代替。

以 Y/Δ 接线的三相变压器 Δ 侧为例, 各相平均等效瞬时漏感之间的差异用 σ_1^2 来描述, 如式(18); 当满足 $\sigma_1^2 > \sigma_{zd}^2$ 时, 判定变压器发生内部故障, 保护动作。

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{3}((L'_{1ac} - L'_{1be})^2 + (L'_{1be} - L'_{1ce})^2 + (L'_{1ce} - L'_{1ac})^2) \quad (18)$$

式中: L'_{1ac} 、 L'_{1be} 、 L'_{1ce} 为 Δ 侧各相平均等效瞬时漏感值; 若其中某相为未启动相, 那么就将该相的平均等效瞬时漏电感用 $L'_{1ic}(i=1, 2, 3)$ 代替, L'_{1ic} 为 Δ 侧各相的正常漏感参数。

辅判据: 当变压器发生严重内部故障时, 由于差动电流数值较大, 计算出的 3 组漏感数值较小且差别不大, 仅采用主判据可能会使保护拒动。为此, 可以引入常规的差动电流速断保护作为辅助判据, 进行综合判断。

2.2.3 方案验证

表 3 变压器各种工况下 σ_2^2 的计算结果

Tab. 3 Calculation results of σ_2^2 under various kinds of situations

运行状态	$\sigma_{22}(\times 10^{-4}H)^2$	序号		
正常空投	0.9538~1.2152	1		
空 匝	A9%	112.7443~125.3236	2	
	B18%	216.7854~223.7382	3	
	C18%	220.8367~231.1159	4	
星 接	A	197.2485~222.1532	5	
	B	148.5279~160.2373	6	
	相 AB	1.9634~3.1248	7	
故障 间	BC	1.5586~3.0747	8	
	匝 A9%	98.0825~111.3468	9	
	B18%	205.4478~218.4637	10	
中 间	C18%	161.2256~172.6055	11	
	星 接	A	212.6494~223.1037	12
	地 B	155.3819~160.6530	13	
故障 相	AB	1.7832~2.9875	14	
	间 BC	1.6329~2.8321	15	

考虑到不同的合闸时刻, 每种运行状态的数据分别测取 20 次, 表 3 中列出了这 20 组数据的计算结果。由表中的 σ_2^2 列可知, 故障情况下(不包括相间故障) σ_2^2 的最小值是正常空投情况下 σ_2^2 最大值的 80.65 倍, 如果按照正常空投情况下 σ_2^2 的最大值

将 σ_{zd}^2 整定为 $10(\times 10^{-4}H)^2$, 利用主判据便可有效地区分出励磁涌流和内部故障(不包括相间故障)。若进一步与辅判据配合使用, 则能够保证保护在各种内部故障情况下正确、可靠地动作。

2.3 功率差动原理

基于功率差动原理的变压器微机型主保护从能量守恒的观点出发综合考虑电压、电流信息, 它的基本原理是: 正常运行时变压器消耗有功非常小, 而变压器绝缘损坏时, 电弧放电发热将消耗大量的有功, 通过检测变压器消耗有功的大小, 可以判别变压器是否发生内部故障。功率差动原理不再纠缠于励磁涌流的波形特征, 是一种全新的主保护方案。然而该方案仍有以下 3 个问题亟待解决:

(1) 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第 1 周期的充电过程, 结果导致判别延时。

(2) 涌流时铜损耗难以精确计算, 铁损耗增加, 整定不容易。

(3) 对 Y/Δ 接线的变压器, 由于 Δ 侧绕组内部电流无法获取, 导致铜损耗无法确定, 结果降低了保护的灵敏度。

针对上述问题, 本文利用变压器正常运行时的回路方程, 得到了仅含漏电感和绕组电阻的二端网络, 从分析输入端口的广义瞬时功率入手, 进一步揭示了变压器出现励磁涌流状态与发生内部故障状态在本质上的不同。

2.3.1 二端网络设计^[28]

以双绕组单相变压器为例, 设计基于电压、电流信息的二端网络。

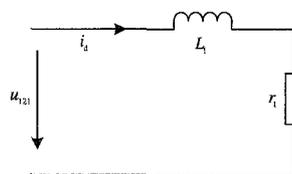


图 6 原边侧二端网络

Fig.6 Two-terminal network of primary side

由式(9)和式(10)两个方程可构造出两组二端网络, 其中一组仅含 r_1 和 L_1 , 如图 6 所示, 可定义为原边侧二端网络; 另一组仅含 r_2 和 L_2 , 如图 7 所示, 可定义为副边侧二端网络。

图 6 中二端网络的端电压: $u_{121}=u_1-u_2+i_2r_k+(x_k/\omega)(di_2/dt)$, 图 7 中二端网络的端电压: $u_{122}=-u_1-u_2-i_1r_k-(x_k/\omega)(di_1/dt)$, 两图中箭头方向均为电压降的方向, 注入二端网络的电流均为 $i_d=$

$i_1 + i_2$ 。

对于空载合闸情况, 设变压器副边侧空载, 由式(8)可以得到类似于图 6 所示的二端网络。此时二端网络的端电压: $u_{121}=u_1-u_2$, 注入二端网络的电流为 i_1 。

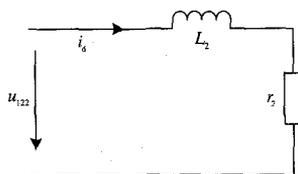


图 7 副边侧二端网络

Fig.7 Two-terminal network of secondary side

以图 6 所示的原边侧二端网络为例, 输入端口的 $i_d(t)$ 与 $u_{121}(t)$ 在实际系统中虽没有一一对应的关系, 但两者乘积却具有瞬时功率的性质, 因此可将其定义为广义瞬时功率, 即 $s_{gy1}(t)=u_{121}(t) i_d(t)$, 也可表示成 $s_{gy1}(t)=\bar{s}_{gy1}+\tilde{s}_{gy1}(t)$ 的形式, 且其直流分量 \bar{s}_{gy1} 为原边侧二端网络吸收的广义有功功率。同样的处理方法, 还可以得到副边侧二端网络吸收的广义有功功率 \bar{s}_{gy2} 。在此基础上, 定义原边侧吸收的广义有功功率 \bar{s}_{gy1} 与正常绕组电阻 r_1 消耗的有功功率之差为 P_1 , 副边侧吸收的广义有功功率 \bar{s}_{gy2} 与正常绕组电阻 r_2 消耗的有功功率之差为 P_2 , P_1 和 P_2 计算公式如下:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{121}(t) i_d(t) - i_d^2(t) r_1) dt \\ P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{122}(t) i_d(t) - i_d^2(t) r_2) dt \end{cases} \quad (19)$$

由式(19)可以分析出, 变压器正常运行情况下(包括空投和外部故障), 二端网络吸收的广义有功功率全部消耗在绕组电阻上, 利用端口的电压和电流以及正常绕组电阻计算出的功率差 P_1 、 P_2 都等于零(不考虑各种误差因素的影响); 但在内部故障情况下, 由于故障支路的损耗和发热, 利用故障后端口的电压和电流以及未故障时的电阻值计算出的功率差 P_1 、 P_2 必然都不为零。通过设定合适的阈值, 便能有效地区分出正常和故障情况。

2.3.2 原理验证

表 4 给出了变压器在各种情况下差有功原理和新原理的动模实验计算结果, 其中 P_m 为各相有功功率 $P_i(i=1\sim3)$ 的最大值。考虑到不同的合闸时刻, 每种运行状态的数据分别测取 20 次, 表中列出了这

20 组数据的综合结果。

表 4 各种情况下差有功原理与新原理的计算结果
Tab. 4 Calculation results of the power differential method and the novel method when the transformer is energized

运行状态		P_c/W	P_m/W	序号	
正常情况	正常空投	854~1393	0.76~2.2	1	
	正常运行	309~348	0.53~0.96	2	
带故障空投故障	星侧故障	A2.4%	1161~1484	27~36	3
	间故障	A6.1%	1659~1827	48~58	4
		A9%	2471~2539	62~69	5
		B18%	8363~8432	104~115	6
		C18%	8016~8109	112~124	7
	接地	A	14142~14275	1032~1087	8
		B	16057~16148	651~734	9
	相间	AB	23814~23906	2212~2320	10
		BC	25689~25762	2146~2199	11
		角侧匝间故障	A1.8%	1123~1415	25~32
运行发生故障情况	星侧故障	A4.5%	1582~1737	38~46	13
		A2.4%	1098~1217	26~31	14
	间故障	A6.1%	1769~1895	53~61	15
		A9%	2430~2512	65~76	16
	星侧故障	B18%	8567~8642	124~135	17
		C18%	7834~7911	96~107	18
	接地	A	13986~14095	876~892	19
		B	14260~14363	535~568	20
	相间	AB	22381~22476	2054~2139	21
		BC	23905~24019	1963~2017	22
	角侧匝间故障	A1.8%	1112~1228	25~29	23
	A4.5%	1594~1703	42~51	24	

由表 4 可以看出, 对差有功原理而言, 若按正常情况下 P_c 最大值的 1.5 倍, 将阈值整定为 2100 W, 那么序号为 3, 4, 12, 13, 14, 15, 23 和 24 等 8 种情况将无法识别。

对新原理来说, 正常情况下 P_m 的最大值与故障情况下 P_m 的最小值相差 10 倍以上, 若将 P_m 的阈值按照正常情况下它的最大值整定为 4 W, 那么就可以对各种故障进行辨识, 并有很大的冗余度。因此, 新原理在可靠性和灵敏性上优于差有功原理。

从实验的整体情况来看, 新原理无论在可靠性还是灵敏性上均明显优于已有的功率差动原理。

3 结论

关于变压器主保护技术的发展路线, 应当“坚持两手抓, 一手抓老问题, 一手抓新思路”。一方面, 在目前尚没有找到比差动保护性能更好的变压器主保护方案情况下, 要面对现状, 针对励磁涌流和故障电流识别的老问题, 总结已有的较为成功的运行经验和方法, 同时不断地探索和尝试新理论、新技术的应用, 力求将差动保护性能提高到一个新水平。

这里主要包括以下几个方面的内容:

- (1) 探索变压器差动保护新的构成方案;
- (2) 研究励磁涌流和故障电流识别问题;
- (3) 研究 CT 饱和和识别问题;
- (4) 重视差动保护用 CT 暂态传变特性。

另一方面,努力寻找新途径探索新思路,彻底抛开差动保护方案的束缚,研究与差动保护迥然不同的新原理作为变压器主保护方案,完全从识别励磁涌流和故障电流的羁绊中解脱出来,这应当始终是继电保护工作者不断追求的目标。本文从阻抗、漏感和功率的角度出发分析了三种与差动保护迥然不同的新原理:①序阻抗原理;②等效瞬时漏感原理;③广义瞬时功率原理。仿真和动模实验结果验证了新原理的正确性和有效性。

电子技术、计算机技术与通信技术的迅猛发展,为变压器保护提供了更广阔的发展空间。而“主后一体化”思想的采用以及新原理、新技术的开发,也必将极大地改善和提高变压器保护的性能和运行水平。在不久的将来,变压器保护将利用新型光学电流互感器(OCT)、光学电压互感器(OVT)送出的电流、电压数字信号实现保护功能,解决传统 CT、PT 存在的问题,并向信息化、一体化、智能化的方向飞速发展。

参考文献

- [1] 沈晓凡,程道,章激扬. 2005 年全国电网继电保护装置运行情况分析[J]. 电力设备, 2007, 8(2): 26-29.
ZHANG Xiao-fan, CHENG Xiao, ZHANG Ji-yang. Operation Condition and Analysis of Protective Relaying in 2005 [J]. Electrical Equipment, 2007, 8(2): 26-29.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [3] 李永丽,贺家李. 电力变压器新型微机保护原理的研究[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(7): 15-19.
LI Yong-li, HE Jia-li. New Principle Relay for Protecting Power Transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(7): 15-19.
- [4] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(第三版)[M]. 北京:水利电力出版社, 1994.
- [5] 王维俭. 变压器保护运行不良的反思[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(10): 1-3.
WANG Wei-jian. Consideration of Improper Operation of Transformer Protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(10): 1-3.
- [6] Hermanto I, Murty Y V S, Rahman M A. A Stand-alone Digital Protective Relay for Power Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(1): 85-92.
- [7] Liu Pei, Malik O P, Chen Deshu, et al. Improved Operation of Differential Protection of Power Transformer for Internal Faults [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(4): 1912-1919.
- [8] Lin C E, Cheng C L, et al. Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformers I. Numerical Simulation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(1): 246-254.
- [9] Sidhu T S, Sachdev M S. Online Identification of Magnetizing Inrush and Internal Faults in Three-phase Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(4): 1885-1891.
- [10] Verma H K, et al. Algorithm for Harmonic Restraint Differential Relaying Based on the Discrete Hartly Transform [J]. Electrical Power System Research, 1990, (18): 125-129.
- [11] 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1979, 3(1): 18-30.
WANG Zu-guang. Transformer Differential Protection on the Principle of Dead Angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 1979, 3(1): 18-30.
- [12] 朱亚明, 郑玉平, 叶锋, 等. 间断角原理的变压器差动保护的性能特点及微机实现[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(11): 36-40.
ZHU Ya-ming, ZHENG Yu-ping, YE Feng, et al. Performance and Digital Realization of Transformer Differential Relay Based on Dead Angle Philosophy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(11): 36-40.
- [13] 刘建飞, 马锁明, 任冰. 间断角原理变压器微机保护装置的实用化研究[J]. 现代电力, 1998, 15(3): 1-6.
- [14] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 42-46.
SUN Zhi-jie, CHEN Yun-lun. Transformer Differential Protection Based on the Characteristic Analysis of the First and Second Half of the Magnetizing Inrush Current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4): 42-46.
- [15] 苗友忠, 贺家李, 孙雅明. 变压器波形对称原理差动保护不对称度 K 的分析和整定[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 26-29.
MIAO You-zhong, HE Jia-li, SUN Ya-ming. Analysis and Setting of Asymmetry Degree K of Transformer Differential Protection Based on Symmetry Principle of Current Waveforms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 26-29.
- [16] 林湘宁, 刘世明, 杨春明, 等. 几种波形对称法变压器差动保护原理的比较研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(4): 44-49, 70.
LIN Xiang-ning, LIU Shi-ming, YANG Chun-ming, et al. Study on Comparisons Among Some Waveform Symmetry Principle Based Transformer Differential Protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(4): 44-49.

- [17] 何奔腾, 徐习东. 波形比较法变压器差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 395-398, 404. HE Ben-teng, XU Xi-dong. Protection Based on Wave Comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 395-398, 404.
- [18] 唐跃中, 刘勇, 郭勇, 等. 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[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9): 53-59. TANG Yue-zhong, LIU Yong, GUO Yong, et al. Analysis of Some Typical Methods for Checking Magnetizing Surge in Transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 53-59.
- [19] Phadke A G, Thorp J S. A New Computer-based Flux-restrained Current-differential Relay for Power Transformer Protection [J]. IEEE Trans Power Appl Syst, 1983, 102(11).
- [20] 王国兴, 张传利, 黄益庄. 变压器励磁涌流判别方法的现状及发展[J]. 中国电力, 1998, 31(10): 19-22. WANG Guo-xing, ZHANG Chuan-li, HUANG Yi-zhuang. The Present State and Development of the Method for Identifying Transformer Inrush Current[J]. Electric Power, 1998, 31(10): 19-22.
- [21] 宗洪良, 金华峰, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 91-94. ZONG Hong-liang, JIN Hua-feng, ZHU Zhen-fei, et al. Transformer Inrush Detection by the Variation of Magnetizing Impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94.
- [22] 葛宝明, 苏鹏声, 王祥珩, 等. 基于瞬时励磁电感频率特性判别变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 35-39. GE Bao-ming, SU Peng-sheng, WANG Xiang-heng, et al. Distinguish Inrush Currents for Transformer Using Frequency Characteristic of Instantaneous Excitation Inductance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 35-39.
- [23] 葛宝明, 于学海, 王祥珩, 等. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 44-48. GE Bao-ming, YU Xue-hai, WANG Xiang-heng, et al. A Novel Equivalent Instantaneous Inductance Based Algorithm Used to Distinguish Inrush Currents for Transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 28(7): 44-48.
- [24] Sidhu T S. A Power Transformer Protection Technique with Stability During Current Transformer Saturation and Ratio-mismatch Conditions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 798-804.
- [25] 郑涛. 变压器数字仿真和数字式主保护新原理的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2005.
- [26] Sidhu S T S, Wood H C. A Digital Relaying Algorithm for Detecting Transformer Winding Faults[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(3): 1638-1648.
- [27] 熊小伏, 邓祥力, 游波. 基于参数辨识的变压器微机保护[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(11): 18-21. XIONG Xiao-fu, DENG Xiang-li, YOU Bo. Transformer Protection Using Parameter Identification Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 18-21.
- [28] 马静. 变压器主保护新原理和新算法的研究(博士学位论文)[D]. 保定:华北电力大学, 2008.
- [29] 王增平, 徐岩, 王雪, 等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 54-58. WANG Zeng-ping, XU Yan, WANG Xue, et al. Study on the Novel Transformer Protection Principle Based on the Transformer Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58.
- [30] Yabe K. Power Differential Method for Discrimination Between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.
- [31] 孙鸣, 梁俊滔, 冯小英. 基于功率差动原理的变压器保护实现方法的分析[J]. 继电器, 2001, 29(12): 13-15. SUN Ming, LIANG Jun-tao, FENG Xiao-ying. Analysis on the Implementation of Transformer Protection in Power Differential Protection Principle[J]. Relay, 2001, 29(12): 13-15.
- [32] 郑涛, 刘万顺, 吴青华, 等. 基于瞬时功率的变压器励磁涌流和内部故障电流识别新方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 51-55. ZHENG Tao, LIU Wan-shun, WU Qing-hua, et al. A New Approach to the Discrimination Between Inrush Current and Internal Fault Current Based on Instantaneous Power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 51-55.

本文为2007年12月中国电力系统继电保护应用技术学术研讨会大会发言稿

作者简介:

王增平(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化;E-mail: wangzp1103@sina.com

马静(1981-),男,讲师,博士,研究方向为电力系统继电保护。