

特高压变压器差动保护改进

牛红星¹, 耿英三², 段周朝³, 蔡常群¹, 温选尧⁴

(1. 许继集团, 河南 许昌 461000; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049;

3. 平顶山姚孟发电有限责任公司, 河南 平顶山 467031; 4. 成都电力职工大学, 四川 成都 610072)

摘要: 针对特高压系统变压器的特点及对保护带来的问题, 通过合理配置差动保护, 以及对变压器运行方式的智能识别, 细分保护动作特性区间, 提出利用短数据窗高比例制动特性来保证在特征明显的区内故障时差动保护的快速动作。该方案已应用于 WBH - 800 变压器保护装置并通过实验验证。

关键词: 差动; 励磁涌流; 短数据窗; 高比例

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)19-0014-05

0 引言

变压器保护工作者一直在寻求既能解决空投时励磁涌流造成差动保护误动, 又保证空投少匝间短路快速动作的完美解决方案, 但由于考虑励磁特性的变压器内部短路微机保护理论本身在模型建立的过程中做了很多假设, 而且尚无丰富的运行经验, 短期内难以运用于实际工程, 而其他原理均基于对涌流波形的分析, 尽管从不同的特征分析能够对保护性能有所改善, 但由于影响涌流的因素很多, 波形本身的特征并不稳定^[1], 尤其特高压变压器由于制造工艺及制造材料的改进空投时涌流中谐波含量减小, 波形特征发生变化, 并且特高压系统暂态分量衰减时间长, 短路电流中含有大量的谐波^[2], 从而混淆了短路电流与励磁涌流的界限, 对基于波形特征的差动保护原理带来挑战。因此在目前具有成熟运行经验的保护理论基础上, 寻求一种对于明显区内故障时动作特性改进的方案具有实用价值。

1 特高压系统变压器保护的特点

1.1 更灵活的保护配置

大容量超高压等级的变压器, 一般采用单相变压器以便于制造和运输, 为了提高变压器的效率、减轻重量、缩小尺寸, 一般采用自耦变。这种单相变压器每一绕组有两个引出端子, 一般有条件装设零序差动(中性点可采取三相 CT, 从而有利于零序差动的极性校验)或分侧差动(图 1)。

1.2 差动保护难以区分涌流和故障

随着电网电压等级的提高和系统规模的扩大以及变压器单台容量的增大, 在变压器等值电路中必须考虑绕组与铁芯之间的电容^[5], 大型变压器内部

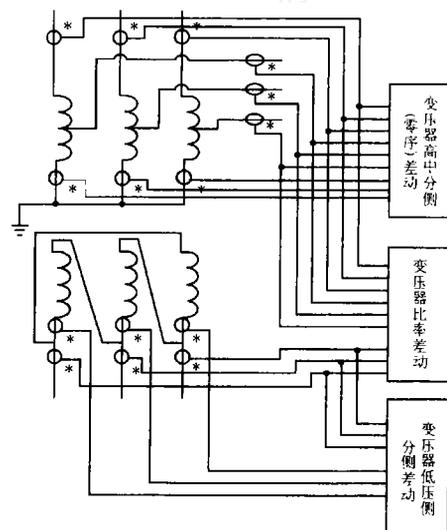


图 1 变压器保护配置

Fig 1 Transformer protection configuration

故障时由于谐振使短路电流中的二次谐波明显增大, 有可能使得二次谐波原理的差动保护延迟动作; 变压器端部接长线或静电容串联电抗器后接入系统, 变压器内部故障时, 暂态电流的频率可能接近二次谐波, 同样有可能使二次谐波制动; 大容量变压器故障电流非周期分量衰减时间常数的增大使得空投故障变压器时二次谐波原理的差动保护动作速度减慢, 在空投小匝间故障时甚至拒动; 在高电压系统, 为提高系统稳定性经常采取无功就地自然补偿措施, 往往在变压器低压侧装有(1/4~1/3)倍额定容量的电力电容器组。在低压侧出口差动范围内故障时, 电容的反馈电流将流向故障点。由于该反馈电流中含有幅值较大的谐波成分, 它作为差流的一部分将对依赖波形特征来区分涌流和故障的差动保护产生影响。

2 差动保护性能分析

对于变压器保护中由于计算变比与实际变比不一致,变压器接线组别引起的差流已有成熟的方案(对内部接地故障灵敏度有可能产生影响),本文不再论述。

2.1 与励磁涌流无关的差动保护

考虑励磁特性的变压器内部短路微机保护在理论上与励磁涌流、过励磁电流无关,不需要附带防误动技术措施,因而不会混淆特高压系统中短路电流与励磁涌流的界限^[1],但由于在模型建立的过程中做了很多假设,而且尚无丰富的运行经验,短期内难以运用于实际工程。对于零序差动及分侧差动,由于从理论上可以避免涌流,因为涌流对这两种保护来说是穿越性的。因此具有固有的优点:保护原理简单、可靠,整定调试方便;分接头调压不产生不平衡电流,两侧互感器同型也使不平衡电流减小,因此保护动作电流小,灵敏度高;不存在角差引起的差流,无需消除零流,对于单相接地故障(大电流接地系统)有较高灵敏度。但其缺点也很明显:不能保护变压器绕组常见的匝间短路,因为空载合闸涌流、过励磁电流对分侧差动或零序差动而言是穿越性电流,因此为提高保护动作速度可以去掉鉴别涌流波形的闭锁判据,从而采用常规比例制动特性的差动在外部故障且CT饱和时容易误动。

2.2 基于励磁涌流分析的差动保护

二次谐波原理由于傅氏滤波的动态特性,需要一个周波的数据窗才能计算出稳定的谐波分量,如图2,其中线1为所输入的信号包括1A基波和0.5A的二次谐波,线3为滤出的基波,线4为滤出的二次谐波,线2为基波与二次谐波的比值,输入的信号为: $\text{Input}(1,1) = 1.414 \cdot (\sin(i) + 0.5 \cdot \sin(2 \cdot i))$ 。基于波形对称及采样点差动尽管能较快速地判别出涌流,但为避免非周期分量的影响,外部故障CT饱和,往往也需要综合较长一段的数据进行综合判别。因此基于磁涌流分析的差动保护动作速度不可能太快,为解决在严重故障时保护动作时间长的问题,专门配置了不受谐波影响的差流速断保护,但一般整定值较高。

3 基于励磁涌流分析的差动保护动作特性改进

分析变压器产生涌流时的运行状态主要有两种,即空投变压器和故障切除后电压恢复,如果能够

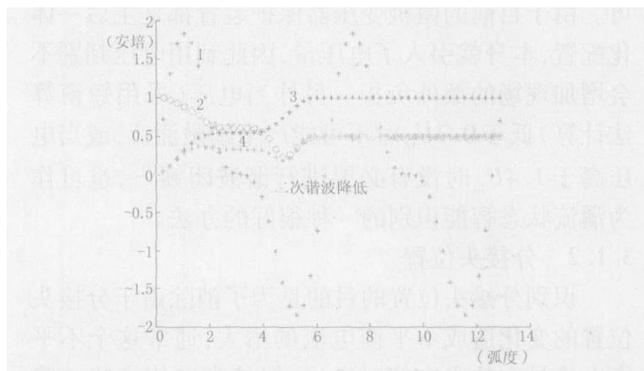


图2 傅氏算法滤出二次谐波动态特性图

Fig 2 Dynamic characteristic diagram of secondary harmonic filtered by Fourier algorithm

可靠地识别这两种运行状态,就可以仅在此时投入涌流鉴别元件,从而消除涌流鉴别元件对区内故障的影响,对于区内故障就可以采用短数据窗快速判别,快速切除故障。

3.1 变压器运行状态的智能识别

3.1.1 识别涌流状态

涌流状态的识别实质就是空投和电压恢复的识别。对于空投可利用启动前后的开关位置和启动前后的电流相比较来确定,启动元件可采用中断处理程序中的突变量和主流程中的差流稳态量进行判别,突变量启动判据为:

$$I_{\phi\phi\max} > I_{qd} \quad (1)$$

其中: $I_{\phi\phi} = |I_{\phi\phi}(t) - 2 \cdot I_{\phi\phi}(t - T) + I_{\phi\phi}(t - 2T)|$ 为相间电流差突变量; I_{qd} 为定值,用户可根据具体情况整定。一般推荐整定值为 $0.2I_n$; $I_{\phi\phi\max}$ 是取三相相间电流中最大值。如果启动前三侧均为跳位启动后仅有一侧为合位或启动前三侧均无流,且启动后仅一侧有流则认为空投。由于利用开关位置进行空投判别,一是需要引入位置节点增加现场接线,另外微机保护在读入位置节点时需要延时进行去抖或防止现场对开入光隔的干扰,而识别涌流的时间越快越好,如果超过一个工频周波将对提高保护的動作速度没有太大的意义。因此采用半波傅氏或更短的数据窗对电流粗略计算来判别启动前后的电流变化更实用,因为投变压器时空投侧总有一相电流在半个工频周期内幅值较大,而其他侧的电流仅为通道影响及计算精度所带来的误差,因为仅仅是做有流或无流的判别,因此对算法的精度及滤波的要求都不高,所以采用半波傅氏或更短的数据窗对电流粗算足以满足判别要求。对于电压恢复则比较容易判别,只要比较启动前后的利用短窗计算的电压即

可。由于目前的微机变压器保护装置都是主后一体化配置,本身就引入了电压量,因此利用电压判别不会增加现场的额外负担。另外当电压(采用短窗算法计算)低于 $0.7U_n$ 时不可能产生励磁涌流,或当电压高于 $1.4U_n$ 时没有必要进行谐波闭锁^[3],也可作为涌流状态智能识别的一种很好的办法。

3.1.2 分接头位置

识别分接头位置的目的是为了消除由于分接头位置的变化造成不平衡电流的增大,通常这个不平衡电流是在整定定值时考虑,但抬高定值意味着降低保护的灵敏度。变压器分接位置改变,相当于变压器变比改变,将破坏已调整好的平衡。通过将档位通过转换成 BCD 码后接入微机保护装置,装置便可自动识别运行时的档位,由于 $K_{ph2} = \frac{CT_2 \cdot u_2}{CT_1 \cdot u_1}$,其中 CT_1 和 CT_2 为两侧电流互感器的变比, u_1 和 u_2 为两侧电压的有效值,改变分接头的实质是改变 U_2 ,此时 $U_2 = U_{2min} + U_{2(tap)} \cdot (n - 1)$,这里 n 为分接头的位置, U_{2min} 为第二绕组的最小电压 ($n = 1$ 时), $U_{2(tap)}$ 为每改变一个相邻分接头位置第二绕组的电压变化量。通过识别开关位置,实时计算平衡系数调整不平衡电流,从而消除由于变压器分接位置改变对差动保护的影响。

3.2 细分动作区间

变压器差动保护通常采用比例制动特性,两折线或三折线如图 3,这样的特性只是区分了动作区和非动作区,只有在差流非常大的时候才利用采用快速算法的差流速断动作。既然能够可靠识别涌流状态,那么寻求一种在非涌流状态下的快速动作区显然具有实用价值。

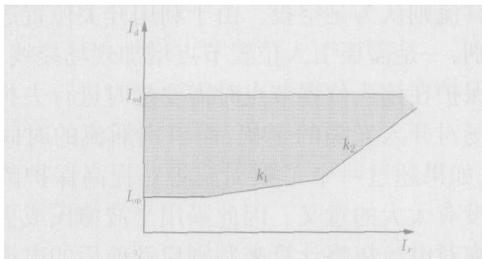


图 3 比例制动特性

Fig 3 Ratio restraint characteristics

如果以各侧电流中的最大值为另一侧,其他侧的电流相量和为另一侧,则任何变压器都可看做两绕组变压器,因此以两绕组变压器为例进行分析,如图 4。

设 M 侧为最大电源侧, N 侧为其余侧的和电流侧;即正常运行时, M 侧为送电侧, N 侧为受电侧。

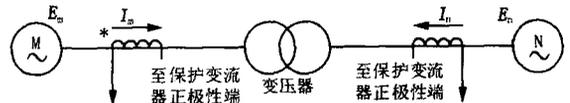


图 4 差动保护原理图

Fig 4 Block diagram of differential protection

取制动特性过原点的差动保护分析动作特性,其动作方程为:

$$I_{op} = k \cdot I_{res} \quad (2)$$

$$I_{op} = |I_m + I_n|, I_{res} = \frac{1}{2} |I_m - I_n|$$

其中: I_{op} 为差流; I_{res} 为制动电流; k 为制动系数,是一个整定值。

当一次侧电流由 CT 的正极性端流入时,保护所测量的该电流为正值;当一次侧电流由 CT 的负极性端流入时,保护所测量的该电流为负值。因此图 4 中 I_m 或 I_n 由 CT 的正极性端流入时,保护所测量的 I_m 或 I_n 本身为正值;反之, I_m 或 I_n 由 CT 的负极性端流入时,保护所测量的 I_m 或 I_n 本身为负值。

以整定 $k = 1$ 为例,忽略负荷电流,只计短路电流,分析在各种运行工况下纵差保护的动作为。区外短路:理论上 $I_{op} = 0, I_{res} = I_{\phi}$ (I_{ϕ} 为外部短路电流),实际上 $I_{op} = I_{unb}$ (I_{unb} 为不平衡电流)。式 (2) 可靠满足,保护能够可靠不动。双侧电源区内短路:见图 5 相量图,送电侧 E_m 必超前于受电侧的 E_n ,所超前的角度为功率角 δ ,必小于 60° (因正常运行中 δ 应远小于静稳角 90°)。图 5 中设 $\delta = 45^\circ$;区内短路时,认为短路点距两侧等值电源 $E_m、E_n$ 之间的阻抗角相等为 $\phi_L = 70^\circ$ 。由相量图分析可见,区内短路时,两侧短路电流 $I_m、I_n$ 之间的夹角 ϕ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间,图例中 $\phi = 45^\circ; I_m$ 远大于 I_{res} ,保护灵敏

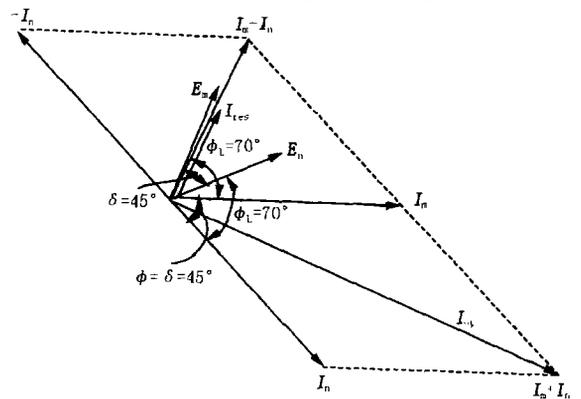


图 5 两侧电源系统内部故障相量分析

Fig 5 Vector analysis of inter fault in two-side source power system

地动作。单侧电源区内短路 (N 侧无电源): $I_{op} = |I_m|$, $I_{res} = \frac{1}{2} |I_m|$, 则动作灵敏度 $K_{sen} = \frac{I_{op}}{KI_{res}} = 2$, 保护灵敏地动作。

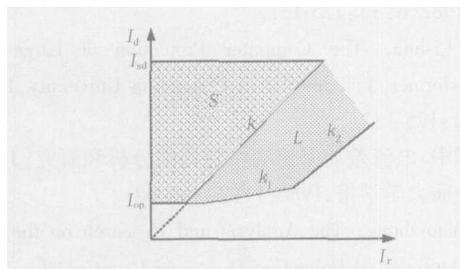


图 6 改进后的比例制动特性

Fig 6 Improved ratio restraint characteristics

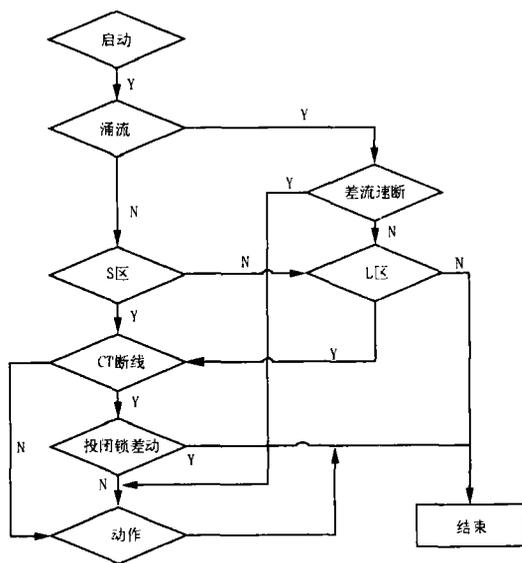


图 7 动作流程

Fig 7 Operation flow chart

考虑到区外故障两侧 CT 暂态特性不一致, 一侧 CT 饱和, 以及 CT 的局部暂态饱和产生的角差, 两侧电流的相角差可能不是理想值 180° ; 但显然只要两侧 CT 二次电流相位角偏差 $< 90^\circ$; 保护就能可靠区分区内、外故障。所以当制动系数 $k = 1$ 时能够可靠区分区内、外故障, 而且有相当好的抗区外故障 CT 饱和的能力。由于区内外的判别裕度很大, 此时对算法的精度和滤波要求都不高, 可以采取短窗快速算法以提高动作速度。但此时在内部故障所允许的流出电流很小^[4], 因此不利于有很大流出电流的内部故障如小匝间故障。综合上述分析对保护的动作用区间划分如图 6 所示, 采用三折线比例制动特性划分 L 区, 以保证差动保护的灵敏度和可靠性, 此区采用傅氏全波冗余计算, 通过冗余判别, 可

以消除 CT 暂态特性不一致对差动保护带来的影响。再增加制动系数 $k = 1$ 的一条直线, 形成 S 区, 此区为采用短窗算法的快速动作区。差动保护启动后, 当发现有 CT 断线的特征, 某侧有一相电流减小其他侧电流无变化, 如果定值中控制字的整定为当 CT 断线闭锁差动保护时, 闭锁快速算法。由于 S 区并不考虑空投严重故障的变压器, 因此仍需保留原差流速断动作区, 动作流程如图 7。

4 动模结果

在三圈自耦变压器模型中, 通过不同负荷下区内、外金属性故障及区外断线故障、大方式下金属性故障、相间及接地经过渡电阻故障、空投变压器、变压器匝间故障、手合故障变压器、发展性故障、模拟变压器运行时投切低压侧电容器、系统振荡及振荡中故障、以及 CT、PT 断线、CT 饱和情况下的各类故障, 在保证保护可靠性的前提下, 对于特征明显的区内故障保护能够快速动作, 整组动作时间在 15 ms 以内, 动作时间明显优于未做改进的保护装置。图 8 为高压侧接地故障时保护动作录波。



图 8 高压区内 C 相接地 (改进后动作时间 12.0 ms)

Fig 8 Inter area phase C fault on high voltage side

5 结论

1) 特高压系统变压器有条件配置分侧差动, 使其在物理模型上完全满足基尔霍夫电流定律, 不受励磁回路影响, 提高接地故障灵敏度, 可采用短窗算法提高引线故障时的保护动作速度。且微机保护已消除了接线复杂以及需要的保护设备个数多的缺点。

2) 通过智能识别, 在非变压器空投及电压恢复时退出涌流鉴别, 根据区内故障特征的明显程度利用短数据窗高比例特性划分动作区间, 不同区间进行不同的处理。在区内特征明显区利用短窗算法快

速动作,在区内特征不明显区利用傅氏全波算法冗余计算,保证可靠性和灵敏度。

3) 大部分区内故障特征明显,因而可以快速动作,而对于区内特征不明显的少匝间故障因其危害不大,允许保护延迟动作。

4) 快速动作区由程序根据区内外故障特征内部划分,不用整定,避免整定不当带来的问题。

5) 对特高压系统变压器,在具有成熟运行经验的涌流判别原理的差动保护基础上,进行差动配置方案的补充以及通过智能识别变压器运行状态,适时地仅在空投及电压恢复时投入涌流判别原理能够有效地解决变压器保护可靠性与快速性之间的矛盾。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996
WANG Wei-jian Electric Main Equipment Protection Their Theory and Application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996
- [2] 候炳蕴. 对电力变压器差动保护两个问题的分析 [A]. 全国电力主设备保护学术年会论文集. 1988. 39-43
HOU Bing-yun Analysis on Two Issues of Power Trans-

form's Differential Protection [A]. Domestic Power Main Equipment Protection Science Annual Paper Collection 1988. 39-43.

- [3] 胡立华. 大型变压器的计算机保护 [J]. 重庆大学学报, 1982, 6 (3): 125-137.
HU Li-hua The Computer Protection of Large-scale Transformer [J]. Journal of Chongqing University, 1982, 6 (3): 125-137.
- [4] 葛耀中. 电流差动保护动作判据的分析和研究 [J]. 西安交通大学学报, 1980, 11 (2): 36-42
GE Yao-zhong The Analysis and Research on the Current Differential Protection Operating Criterion [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1980, 11 (2): 36-42
- [5] 许实章. 电机学 (上册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988
XU Shi-zhang Electromechanics, Part One [M]. Beijing: China Machine Press, 1988

收稿日期: 2005-01-20; 修回日期: 2005-03-07

作者简介:

牛红星 (1972 -), 男, 工程硕士, 长期从事变压器保护的开发工作; E-mail: hongxingn@xjgc.com

耿英三 (1963 -), 男, 博士, 教授, 从事电器智能化理论与技术的 CAD 工程方面的研究工作。

Improvement of ultra high voltage transformer differential protection

NIU Hong-xing¹, GENG Ying-san², DUAN Zhou-chao³, CAI Chang-qun¹, WEN Xuan-yao⁴
(1. XJ Electric Protection and Automation Business Department, Xuchang 461000, China;
2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Yaomeng Power Supply Co., Ltd,
Pingdingshan 467031, China; 4. Chengdu Power Staff University, Chengdu 610072, China)

Abstract: To ultra high voltage system transformer's characteristics and its requirement to protection, this paper configures differential protection reasonably, recognizes transformer's mode intelligently, and devises protection characteristics area delicately. Based on the above, a method using short data windows and high ratio restraint to ensure the differential protection speed while obviously fault in inter area happened is presented. This scheme has adopted in WBH-800 transformer device and passed the examination.

Key words: differential; inrush current; short data windows; high ratio

《继电器》杂志社投稿邮箱已改为：
relay@powerkingdom.com
同时，欢迎读者朋友登录本社网站：
www.powerkingdom.com/rep ress