

电力技术

电力系统变压器继电保护差动判据优化技术应用

柳芝戎

国能双辽发电有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8408

[摘要] 就 220kV/500kV 发电厂变压器继电保护里面差动判据所呈现出的适应程度欠佳情况，本文以差动判据的核心技术原理作为出发点展开深入分析，将目前工程应用中当所面临的技术难点进行解析，进而提出具备实际可操作性的优化落实方案。借助对诸如差动潮流计算、制动特性调整等关键方面展开研究，同时紧密结合发电厂变压器的运行参数特征，进一步增强差动保护的可靠性能以及灵敏性能，致力于为大型发电厂变压器的安全稳定运转提供技术层面的有力支持。相关优化举措能够直接应用在工程实际操作之中，有着较高的实用价值。

[关键词] 变压器差动保护；判据优化；220kV/500kV 发电厂

Application of Differential Criterion Optimization Technology for Transformer Relay Protection in Power System

Liu Zhirong

Guoneng Shuangliao Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] Regarding the inadequate adaptability of differential criteria in the relay protection of transformers in 220kV/500kV power plants, this article takes the core technical principles of differential criteria as the starting point for in-depth analysis, analyzes the technical difficulties currently faced in engineering applications, and proposes an optimized implementation plan with practical operability. By conducting research on key aspects such as differential power flow calculation and brake characteristic adjustment, and closely combining with the operating parameter characteristics of power plant transformers, we aim to further enhance the reliability and sensitivity of differential protection, and provide strong technical support for the safe and stable operation of large power plant transformers. The relevant optimization measures can be directly applied in practical engineering operations and have high practical value.

[Key words] transformer differential protection; Criterion optimization; 220kV/500kV power plant

引言

在 220kV/500kV 的发电厂电力系统之中，变压器算得上是能量转换和传输的关键设备，它的运行安全状况对于电网的稳定程度起着决定性作用。差动保护凭借自身所具备的快速特点和选择特性，成为变压器主保护的重要设置。但实际上，现有的差动判据在遇到变压器励磁涌流、区外故障穿越电流、CT 暂态特性存在差别等情况时，容易出现误动作或者拒绝动作的风险。随着发电厂机组容量不断增大以及电网结构变得越来越复杂，传统的差动判据已经很难满足高精度保护的实际需求。文章将重点放在差动判据的优化技术上面，从它的原理、存在的难点以及工程实现等几个方面展开较为深入的探究，目的是

解决在实际运行过程当中出现的技术阻碍，确保发电厂变压器能够可靠运行。

1 变压器差动保护差动判据核心技术原理

1.1 差动电流与制动电流计算原理

变压器差动保护的关键要点，在于依据两侧电流差值来判断是否出现故障。这里所说的差动电流 I_d ，其实就是两侧电流向量的差值，简单来讲，在忽略励磁电流的情况下， I_d 等于两侧电流相减取绝对值，即 $I_d = |I_1 - I_2|$ 。在实际的工程计算工作当中，还得充分考虑到变压器变比以及接线组别存在的差异情况。要通过 CT 变比匹配和相位补偿等方式，来消除相关固有的不平衡电流^[1]。

1.2 励磁涌流识别技术原理

当变压器处于空载合闸的情形，或者在外部故障消除后电压得以恢复之际，会出现励磁涌流这一现象。其幅值能够达到额定电流的六至八倍，而且其中包含着大量的二次以及三次谐波成分。传统的差动判据运用谐波制动原理来对励磁涌流加以识别，也就是在差动电流里的谐波含量超出预先设定的阈值之时（比如二次谐波含量大于 15%），对保护出口实施闭锁操作。针对 220kV/500kV 的大型变压器而言，鉴于铁芯饱和特性方面存在差异，励磁涌流的谐波分布展现出非线性的特性，所以需要吸合电流波形间断角的特性来进行辅助判别，从而更进一步地提高涌流识别的精准程度^[2]。

1.3 CT 暂态特性影响及补偿原理

针对 220kV/500kV 系统里 CT 暂态特性所呈现出的差异情况，差动判据需要引入一种暂态补偿机制。具体而言，就是借助采集 CT 二次侧电流的暂态分量，依照等效电路模型来计算暂态不平衡电流的幅值以及相位，进而在差动电流的计算过程中，将这部分暂态不平衡电流予以抵消。并且，还要采用一种自适应制动系数调整的策略，依据 CT 暂态误差的实际大小，对制动特性进行动态的优化，以此来抑制暂态不平衡电流给保护带来的不利影响。

2 220kV/500kV 发电厂变压器差动判据应用难点

2.1 励磁涌流与内部故障电流判别混淆难点

在 220kV/500kV 这类大型变压器进行空投操作时，若是同时出现像匝间短路、局部铁芯过热这样的轻微内部故障，故障电流跟励磁涌流叠加之后，电流波形的特性以及谐波的分布就会产生畸变。具体而言，一方面，故障电流会让励磁涌流的谐波含量降低，这就使得二次谐波制动阈值很难精准确定。若是此阈值设得太高了，有可能无法有效地闭锁涌流；若是设得太低，在出现故障的情况下，就会导致保护动作被闭锁^[3]。另一方面，涌流里面的非周期分量会把故障电流的暂态特征给遮盖住，使得依据波形间断角来判别故障的方法不能发挥作用。除此之外，当变压器处在过激磁状态的情况下，励磁电流会增大，要区分它跟内部故障电流的难度就更大了。传统的判据很容易陷入“拒动”或者“误动”的两难境地，特别是在发电厂机组刚开始启动的阶段，因为系统电压波动比较大，此问题会显得更加突出。

2.2 CT 暂态不平衡电流抑制不足难点

在 220kV 与 500kV 的系统当中，变压器两边的 CT 装置，其型号以及变比或许会出现不一样的情况。比如，高压一侧采用的是 5P20 级别的 CT，而低压一侧采用的则是 5P10 级别的 CT。在区域外部发生故障的暂态阶段，由于 CT 的饱和程度有所不同，致使暂态不平衡电流的幅值能够达到额定电流的 3 至 4 倍。目前现有的差动判据里面，关于暂态补偿的机制大多是依据固定的等效模型来设置的。这种模型无法适应

在不同故障类型下 CT 暂态特性的改变。像三相短路时，故障电流呈现对称状态，CT 的饱和程度较为均匀；但单相接地短路的情况下，电流是不对称的，两边 CT 饱和存在时间上的差别，暂态不平衡电流呈现出非对称的分布状况，因此依靠固定的补偿模型很难精确地抵消暂态分量。

2.3 有载调压分接头动态调整适配难点

220 千伏以及 500 千伏的发电厂变压器，其有载调压分接头进行调整的频次相对较高，像每天大概会调整 3 至 5 次，此种做法的目的在于稳定系统电压，或是满足负荷方面的需求。现有的差动判据虽然能够接收分接头档位相关信号，但存在两个层面的适配性问题。第一个问题是信号传输存在延迟情况，当分接头做出调整之后，档位信号要通过遥信回路传输到保护装置，这一过程所需时间在 100 毫秒到 200 毫秒之间。在这段时间内，变压器的变比已然发生变化，可是保护装置依旧依据原来的变比来计算差动电流，如此一来就会产生瞬时的不平衡电流。第二个问题是对于档位信号异常状况的处理能力有所欠缺，若是分接头档位信号出现丢失现象，或者发出错误报告（比如信号回路出现接触不良这类情况），故此保护装置就无法获取到准确的变比，只能按照默认变比展开计算。在这种时候，若是分接头和额定档位的偏离幅度较大（比如偏离 5 档以上），不平衡电流便会明显增大，如此可能造成保护制动失去效用，或者是灵敏度降低，最终对变压器的正常运行造成影响。

2.4 复杂故障工况下判据适应性不足难点

220kV 与 500kV 发电厂的变压器，有可能遭遇到各式各样繁杂的故障情形。比如变压器区外出现故障的同时，CT 发生饱和；或者变压器内部产生故障，且伴有励磁涌流；此外在多侧电源供电的情况下，故障电流发生叠加等。在这些状况下，传统的差动判据，其适应性存在欠缺。比如，若是变压器的高压侧出现区外故障，而与此同时，低压侧的 CT 因为故障电流太大，从而出现饱和现象，故此饱和一侧的电流波形就会产生畸变，差动电流之中会出现大量的高次谐波。若是判据仅仅依靠谐波制动，就很可能把区外故障错误地判定成内部故障。再比如，对于有多侧电源供电的变压器而言，当内部发生故障时，故障电流会从多个侧面流入，电流的相位关系变得很复杂，传统那种基于两侧电流进行比较的判据，很难精准地计算出差动电流，如此，就容易出现保护动作延迟或者拒动的情况。

3 220kV/500kV 发电厂变压器差动判据工程优化实现

3.1 基于多特征融合的励磁涌流识别优化实现

运用“谐波特性 + 波形特点 + 幅值变化速率”多特性融合的办法来优化励磁涌流的识别工作：其一，在保护设备中增添三次谐波含量的检测部件，使其和二次谐波共同进行判别。设置二次谐波的阈值在 12% - 18%（依据变压器铁芯的相关参数做出调整），三次谐波的阈值设定为 5% - 8%，若是两者情

况都符合设定标准，故此就初步判定为涌流^[4]。其二，引入电流波形间断角的检测方式，借助滑动窗口算法实时算出电流波形的间断角，如果间断角大于 60° ，并且持续的时间超过 2 个周波，就进一步认定是涌流。其三，增添对电流幅值变化率的判别，算出相邻周波电流幅值的变化率，若是此变化率小于 0.2kA/ms （针对 220kV 变压器而言）或者 0.3kA/ms （针对 500kV 变压器而言），就要闭锁保护。在实际开展工程的情况下，需要借助现场空投试验收集不同运行状况下的涌流数据，对设定的阈值加以校验并修正，要确保在 -10°C 到 40°C 环境温度范围里，识别的准确率能够达到 99% 以上。与此同时，当出现内部故障的情况时，要把保护动作的时间控制在 50ms 以内。

3.2 CT 暂态不平衡电流自适应补偿优化实现

实现 CT 暂态不平衡电流自适应补偿主要通过三个步骤达成。首先，在保护装置内接入 CT 型号相关参数（比如变比、准确等级、暂态特性系数等），构建 CT 暂态误差数据库，依据故障的类别（借助零序电流、负序电流来识别判断）调用与之相对应的补偿模型。其次，运用卡尔曼滤波算法对 CT 暂态不平衡电流进行实时的估算，通过收集 CT 二次电流以及电压信号，搭建状态方程与观测方程，每隔 1 毫秒就更新一次暂态分量的估算数值，并在差动电流计算过程中将其予以扣除。最后，对制动系数进行动态调整，按照 CT 暂态误差的估算数值，让制动系数在 0.2 到 0.6 的范围以内进行自适应的调整（简单而言，就是误差越大，制动系数也就越大）。在工程实际应用的情况下，需要针对 CT 二次回路开展参数测试工作，获取电缆电阻、电容的数值（例如电缆电阻为 $1.5\ \Omega/\text{km}$ 、电容为 $0.1\ \mu\text{F}/\text{km}$ ），并输入到保护装置里面，用于对补偿模型进行修正，以此保证在区外出现故障时，暂态不平衡电流的抑制率能够提升到 80% 以上^[5]。

3.3 有载调压分接头动态适配优化实现

着重从信号采集以及变比修正这两个层面来推进分接头的动态适配优化工作。其一，针对档位信号的传输路径予以优化，具体做法是采用光纤传输的方式来代替传统的电缆传输，如此能把信号传输所产生的延迟降低至 50ms 以内。与此同时，增添信号冗余方面的设计，接入分接头机构所具备的辅助触点信号。这一设计的目的在于，一旦主信号出现丢失的情况，便能够自动切换到辅助信号。其二，构建变比实时计算模型。依据分接头档位和额定变比两者之间存在的对应关系（例如每一档位对应的变比调整幅度为 1.25%），对当下的变比进行实时计算，计算公式为 $K=K_0 \times (1 + 0.0125 \times \Delta n)$ （这里面的 K_0 代表的是额定变比， Δn 代表的是偏离额定档位的挡数），并且同步对两侧电流的折算系数进行更新。在开展工程调试工作的情况下，需要模拟分接头从最低档位一直到最高档位的整体范围的调整过程，对各个档位之下的不平衡电流相关数据进行采集。其核心目标是保证在整体调整过程当中，不平衡电流所

达到的最大值不可以超过额定电流数值的 5%。另外，还要确保保护装置在进行档位切换操作时，不会出现错误报警的情况，也不会有误动作发生。

3.4 复杂故障工况下判据自适应调整优化实现

对于复杂故障状况，采取的是“故障类别识别 + 判定依据参数动态转换”的优化举措。具体而言，第一步是增添故障类别识别的部分，借由收集变压器各侧的电压以及电流信号，算出负序分量、零序分量、故障电流幅值等特征数据，在 10 毫秒的时间范围内识别出故障的类别（像区外故障、内部匝间故障、单相接地故障等等）。第二步是构建判定依据参数的库，为不同的故障类别预先设定有差异的参数。例如，当区外故障出现并伴随着 CT 饱和的情况，就将制动系数提升到 0.5 至 0.7 此区间，与此同时开启暂态补偿强化的模式；若是内部故障伴有励磁涌流的情况，就把谐波制动的阈值降低至 8% - 12%，并且缩短保护动作的延迟时间。最后一步是达成参数的自动转换，在完成故障类别识别之后，保护装置要在 2 毫秒之内完成判定依据参数的转换，以此来保障在复杂工况下保护装置的性能。

结语

本文聚焦于 $220\text{kV}/500\text{kV}$ 发电厂变压器差动判据的优化技术展开探讨。对差动判据的核心原理进行了深入分析，详尽研究了在励磁涌流识别、CT 暂态补偿、分接头适配以及复杂故障时应等领域所面临的应用难题。进而提出了一系列工程优化举措，包括多特征融合的涌流识别办法、自适应的暂态补偿方式、分接头的动态适配手段以及复杂故障参数的切换策略等。通过明确具体的技术参数设定以及实施步骤，切实保障经过优化的差动判据能够显著增强保护的可靠性与灵敏性，攻克实际运行过程中的技术瓶颈。值得一提的是，这些优化方法并不需要引入繁杂的模型，可直接用于现有保护装置的改造工作。这为大型发电厂变压器的安全稳定运行提供了极具可行性的技术方案，拥有较高的工程实用价值。

[参考文献]

- [1]王臻，史晟玮. 变电工程中变压器安装调试研究[J]. 仪器仪表标准化与计量，2025，（04）：31-33.
- [2]郑福春. 基于智能控制的高效电力变压器监测系统设计与[J]. 电气时代，2025，（08）：141-144.
- [3]李兆鑫，董晟怡. 空港经济开发区 220kV 变电站电气部分一次设计[J]. 电器工业，2025，（08）：79-83.
- [4]张勇飞. 电力变压器故障诊断及电力技术监督系统研究[J]. 电力设备管理，2025，（14）：176-178.
- [5]糊汉兵，莫蓝菊. 电力变压器故障诊断及在线监测系统优化研究[J]. 中国新技术新产品，2025，（14）：48-50.D01: 10.13612/j.cnki.cntp.2025.14.005.