

变压器继电保护差动保护异常分析及处理对策

李龙碧

国能宝清煤电化有限公司 黑龙江 双鸭山 155600

摘要: 变压器差动保护是变压器电气量的主保护,其动作可靠性直接影响电力系统安全运行。然而,受CT饱和、励磁涌流、定值整定等因素影响,差动保护误动、拒动及差流异常等问题时有发生。本文系统分析了差动保护异常的类型特征与成因机理,重点探讨CT回路、涌流影响、定值匹配等关键问题,并提出针对性处理对策。CT极性错误、饱和特性变化及二次回路问题是导致差动异常的主要原因,通过优化定值、改进涌流识别及加强运维监测可有效提升保护正确动作率。

关键词: 变压器;差动保护;励磁涌流;CT饱和;差流异常

引言: 变压器是电力系统的核心设备,差动保护以其选择性好、灵敏度高而被广泛用作主保护。然而,在实际运行中,差动保护异常动作现象时有发生,主要包括区外故障误动、空载合闸误动、区内故障拒动及正常运行差流越限等。这些异常不仅影响供电可靠性,还可能造成设备损坏。造成差动保护异常的原因复杂多样,涉及CT特性、涌流特征、定值配合及装置性能等多个方面。本文从差动保护基本原理出发,系统梳理异常类型与成因,提出切实可行的处理对策,为现场运维人员提供技术参考。

1 变压器差动保护基本原理

变压器差动保护基于基尔霍夫电流定律,通过比较变压器各侧电流的矢量和判断区内故障。由于变压器两侧电压等级不同、接线组别存在相位差,保护装置需进行幅值平衡和相位校正。幅值平衡通过引入平衡系数实现,使各侧二次电流在正常运行时相等;相位校正通常将星形侧电流进行三角形变换,以消除 30° 相位差。差动保护的動作特性由差动电流与制动电流的关系曲线描述,一般采用比率制动特性,并辅以二次谐波制动或间断角原理识别励磁涌流。差动速断保护作为辅助段,在严重区内故障时快速动作。正确理解差动保护的工作原理是分析异常和处理故障的基础^[1]。

2 差动保护异常类型与表现特征

2.1 差动保护误动

差动保护误动是指无故障或区外故障时保护装置误动作。空载合闸时,励磁涌流峰值可达额定电流的4-8倍,且含有大量二次谐波,若谐波制动比整定不当或涌流衰减缓慢,易造成误动。区外故障时,故障电流可能使一侧CT饱和,导致二次电流波形畸变、差流增大,若制动特性无法有效约束,同样引发误动。此外,正常运行

时CT断线或回路接触不良也会产生差流,若未配置有效的CT断线闭锁功能,可能造成误动。误动发生后应首先检查故障录波,判断是否为真动作。

2.2 差动保护拒动

差动保护拒动是指区内故障时保护未能正确动作,后果更为严重。常见原因包括:CT饱和导致二次电流严重畸变,差流无法达到动作门槛;定值整定过大,轻微匝间短路产生的故障电流不足以启动保护;平衡系数计算错误,导致正常运行时差流已接近动作区,故障时增量不足;装置采样回路故障或A/D转换异常,使保护无法正确计算差流。拒动往往伴随设备损坏扩大,需通过定期传动试验和采样核对提前发现隐患。

2.3 差流异常

差流异常是指正常运行或负荷变化时,差动回路出现超过额定值的不平衡电流。轻微差流越限仅发出告警信号,严重时可能导致保护误动。常见原因包括:CT极性接反(单侧或双侧),使两侧电流矢量相加而非相减;平衡系数按额定变比计算,而变压器实际运行分接头位置不同;CT变比选择不当或不同型号CT特性差异;二次回路接触电阻过大或绝缘下降。差流异常可通过在线监测及时发现,是预防误动的重要预警信息^[2]。

2.4 装置异常告警

装置异常告警包括CT断线、采样异常、装置故障等。CT断线时,装置检测到某相电流为零而其他相有流,自动闭锁差动保护并发出告警。采样异常表现为各通道采样值波动或突变,通常与A/D转换器、前置放大器或采样回路有关。装置内部故障如电源模块老化、CPU死机、存储器错误等,也会导致保护功能失效或误动。对于装置异常告警,应首先确认是否影响保护功能,必要时退出保护进行检查。

3 变压器继电保护差动保护异常原因分析

3.1 CT回路相关问题

CT回路问题是导致差动异常的最常见原因。极性错误是典型问题,若某一侧CT极性接反,正常运行时该侧电流与其他侧反向叠加,产生幅值接近负荷电流的差流,直接导致保护误动。CT变比选择不当或平衡系数计算错误,使各侧二次电流无法平衡,正常差流可达额定值的10%-30%。CT饱和是区外故障误动的主要原因,当故障电流很大时,CT铁芯磁通饱和,二次电流波形出现缺损,差流增大。不同类型CT的饱和特性差异(如P级和TP级)也会影响差流计算。此外,CT二次回路开路、接触不良或多点接地均会造成采样异常。

3.2 励磁涌流与和应涌流影响

变压器空载合闸时,铁芯磁通可达稳态的2倍以上,产生含有大量二次谐波和间断角的励磁涌流。涌流幅值可达额定电流4-8倍,持续时间0.1-1秒。传统差动保护利用二次谐波制动比(通常15%-20%)识别涌流,但当涌流中二次谐波含量低于整定值(如长线路末端变压器)或涌流衰减缓慢时,可能误动。和应涌流发生在并联运行变压器中,一台空充时另一台产生涌流,其谐波含量低、持续时间长,对谐波制动方案构成挑战。此外,恢复性涌流出现在外部故障切除后电压恢复时,同样可能引起误动。

3.3 定值及整定问题

定值整定不合理是差动保护异常的重要原因。差动启动电流定值过低(如低于0.3倍额定电流)时,正常运行的微小不平衡电流就可能越限;过高则降低区内故障灵敏度。制动系数反映保护抗区外故障能力,系数过小(< 0.3)时CT饱和易误动,过大(> 0.6)时区内故障可能拒动。谐波制动比整定过高($> 20\%$)涌流闭锁不充分,过低($< 10\%$)可能闭锁区内故障。平衡系数按额定电压和变比计算,但变压器运行中分接头调整会导致变比变化,产生附加差流。定值复核应结合现场实际参数和运行工况进行。

3.4 装置及软件因素

装置硬件故障和软件缺陷同样不可忽视。采样回路中CT输入变换器损坏、滤波电路参数漂移、A/D转换器非线性等,会导致采样数据失真,差流计算错误。CPU或DSP芯片死机、看门狗失效会使保护功能中断。软件方面,相位校正算法错误、谐波提取精度不足、逻辑判断时序问题等缺陷,可能在特定工况下触发异常。部分早期装置对和应涌流识别能力不足,软件升级后可改善^[3]。装置因素导致的异常往往具有偶发性和隐蔽性,排查难

度较大,需结合装置自检信息和版本记录综合判断。

3.5 一次设备因素

一次设备状态也会间接影响差动保护。变压器有载调压分接开关位置变化时,实际变比偏离额定值,若保护装置未实时获取分接头位置,平衡系数无法自适应调整,产生附加差流。变压器内部轻微匝间短路时,故障电流小,差动保护可能无法启动,仅通过差流越限告警反映。CT本体故障如绝缘劣化、剩磁过高,也会改变传变特性。此外,变压器过励磁运行时励磁电流增大,差流相应增加,若超过定值可能误动。一次设备因素需结合油气色谱分析、局部放电检测等手段辅助判断。

4 变压器继电保护差动保护异常处理对策

4.1 CT回路检查与处理

CT回路检查是处理差动异常的首要且需系统规范开展的工作。极性验证可用直流法或一次通流试验,直流法将干电池正极接CT一次侧L1、负极接L2,用指针万用表测二次回路指针偏转方向判断;一次通流试验在变压器一次侧施加100-200A电流,测各侧CT二次电流相位,以母线侧为基准确认极性指向变压器内部。变比核对应现场实测,用CT综合测试仪测各绕组变比,与保护定值平衡系数比对,误差超2%需重算修改定值。CT伏安特性测试判断饱和特性,电压升至额定拐点电压1.2倍记录曲线,与出厂值偏差超30%,铁芯可能受损或剩磁高,应换CT。二次回路完整性测试含直流电阻测量(各相间误差小于5%)、绝缘电阻测试(用500V兆欧表,阻值大于10M Ω)、通流试验(通小电流查二次回路通畅性)。多点接地问题用钳形电流表沿接地线逐段测,找异常电流分支,保留唯一接地点,拆除其余。

4.2 定值优化与整定复核

定值优化要结合现场实际参数与运行工况,不可照搬典型值。差动启动电流按躲最大正常不平衡电流整定,通常取0.3-0.5倍额定电流。老旧变压器或CT特性差异大时,实测不平衡电流大,启动电流可适当上调至0.5倍,但不宜超0.6倍,防降低区内故障灵敏度。制动系数依CT饱和特性与区外故障最大短路电流确定,一般取0.4-0.6,CT饱和特性差或区外故障短路电流大时取大值增强抗饱和能力,变压器阻抗大、区外故障电流受限时取下限值。谐波制动比在15%-20%整定,长线路末端变压器涌流二次谐波含量可能低于10%,可适当降至12%,但需空载合闸试验验证。平衡系数按实际运行分接头位置变比重算,避免分接头调整产生附加差流^[4]。有条件引入有载调压分接头位置在线采集功能,实现平衡系数自适应调整,使正常运行差流小于0.1倍额定电流。定值整定

后进行通流测试,变压器带负荷时测各侧电流及计算差流,验证正常运行差流小于0.1倍额定电流。

4.3 励磁涌流识别改进

为解决励磁涌流识别难题,可采取多项措施提升差动保护在空载合闸时的可靠性。二次谐波制动比自适应调整是有效办法,初始合闸涌流峰值高、谐波丰富,采用较高比值(25%)可靠闭锁;涌流衰减至3倍额定电流以下,恢复常规值(15%),避免区内故障拒动。增加间断角判据辅助识别,涌流波形有明显间断角(大于 60°),故障电流无,二者配合提高可靠性,对和应涌流识别效果也好。和应涌流识别可用波形对称原理或三相差流综合判断,波形对称法计算正负半周相似度,和应涌流对称度低;三相差流法比较三相涌流特征,和应涌流三相不对称。频繁空充变压器可延长涌流闭锁时间至0.5-1秒。软件升级引入新算法后,要进行空载合闸试验(额定电压下合闸5-10次)和区内故障模拟试验验证效果。

4.4 装置及软件处理

装置硬件故障的处理应遵循“先检测、后更换、再验证”的步骤。采样回路校准是首要工作,用标准源(精度0.05级)依次向各电流、电压通道输入额定值,检查装置显示值,调整零漂和增益参数,使误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。故障板件更换时,优先更换电源模块(使用5年以上建议预防性更换)、A/D转换器(采样异常时重点检查)、CPU板(死机或逻辑错误时更换)。更换后应进行整机检验,按照DL/T995标准执行采样精度测试(至少5个测试点)、动作时间测试(1.2倍动作值下测量)、逻辑功能测试(模拟各类故障验证出口正确)。首先核查版本号是否为最新稳定版,与厂家确认是否存在已知缺陷及是否已修复。版本升级前必须备份定值(导出至U盘或拍照记录),升级后进行模拟量校验(与升级前对比)和传动试验(验证各出口回路正确)。装置处理完成后应连续观察24小时,确认采样稳定、差流正常、无异常告警后,方可投入正常运行。

4.5 运行维护与在线监测

建立常态化运维机制是预防差动异常的长效措施,应贯穿设备全生命周期。差流在线监测是最有效的预警

手段,正常运行差流应小于0.1倍额定电流,当差流超过0.2倍时发出告警,运维人员应及时分析原因。建议每日登录保护装置查看差流数值,每周导出一次差流曲线进行趋势分析。当发现差流持续上升时,应优先检查CT二次回路接触电阻和负荷电流变化。定期检验按DL/T995规定执行:新投产保护1年内进行首次检验,之后每3-6年一次,检验内容包括采样核对(各通道误差 $\leq \pm 5\%$)、定值核查(与定值单完全一致)、传动试验(模拟区内、区外故障验证动作逻辑)。CT饱和特性应每5年复测一次,采用伏安特性测试仪测量拐点电压和励磁电流,与原始值比对。建立差动保护异常案例库,记录每次异常的现象、原因、处理过程和效果,定期组织运维人员学习,总结典型故障模式和处理经验,提升应急处理能力。采用数字化运维平台,接入保护装置的实时数据,实现差流趋势自动分析和预警功能,当差流变化超过设定阈值时自动推送告警信息,将被动消缺转变为主动预防,全面提升差动保护的运行可靠性。

结束语

变压器差动保护异常是影响主设备安全运行的突出问题。本文从基本原理出发,系统分析了误动、拒动、差流异常及装置告警四类异常的表现特征,深入探讨了CT回路、励磁涌流、定值整定、装置软件及一次设备等因素的成因机理。针对各类原因提出了CT回路检查、定值优化、涌流识别改进、装置处理及运维监测等处理对策。实际工作中应坚持“预防为主、在线监测、定期复核”的原则,通过差流趋势分析提前发现隐患,将事故处理转变为事前预防,全面提升差动保护的运行可靠性。

参考文献

- [1]柳芝戎.电力系统变压器继电保护差动判据优化技术应用[J].工程管理,2025,6(9):118-120.
- [2]赵力军.电力系统变压器差动保护配置优化研究[J].电力技术与环境,2021,37(05):43-44.
- [3]陈明畅.变压器差动保护配置方法的应用与研究[J].高电压技术,2022,47(12):231-232.
- [4]王忠权,彭宇南.电力变压器的继电保护策略分析[J].模具制造,2023,23(09):220-222.