

500kV 变压器纵差保护励磁涌流识别方法研究

李代杰

国网四川电力送变电建设有限公司 四川 成都 610000

摘要: 500kV 变压器纵差保护易受励磁涌流影响导致误动。传统识别方法在复杂工况下存在局限性。本文提出新型励磁涌流识别方法,构建多维度融合识别框架,采用“粗筛-精判”双阶段策略,整合时域波形动态演化特征、频域能量分布规律及暂态磁通变化轨迹。筛选并提取时域畸变指数、频域谐波熵等互补特征,采用图神经网络与模糊逻辑结合的混合算法,融入自适应机制与动态阈值调整策略。经理论分析,该方法能有效提升识别精度与鲁棒性,为特高压变压器保护提供可靠技术支撑。

关键词: 500kV 变压器; 纵差保护; 励磁涌流识别; 多维度特征融合; 图神经网络

引言: 随着电力系统规模扩大与特高压工程推进, 500kV 变压器作为电网核心设备, 其保护可靠性直接影响系统安全稳定运行。纵差保护作为变压器主保护, 在快速切除内部故障方面发挥关键作用, 但励磁涌流导致的误动问题长期制约保护性能提升。传统识别方法多依赖单一特征或固定判据, 在新能源高渗透率、复杂工况下适应性不足。探索具备动态适应能力的多维度融合识别方法, 成为突破技术瓶颈的关键方向。

1 500kV 变压器纵差保护工作原理

1.1 纵差保护的基本构成

500kV 变压器纵差保护作为变压器主保护体系的核心组成, 其构成需适配特高压设备的运行特性, 遵循磁势平衡基本原理搭建完整回路。构成体系以电流互感器、保护装置主体及出口执行元件为核心, 各部分协同运作实现故障监测与响应^[1]。电流互感器需按变压器各侧接线方式合理配置, 高压侧、中压侧及低压侧分别选取对应精度等级的电流互感器, 且各侧互感器极性端均设置于远离变压器一侧, 确保各侧电流以流入变压器为正方向。保护装置主体集成数据采集、信号处理及逻辑判断功能, 依托微处理器技术实现电流信号的实时转换与分析, 搭配光纤通信技术保障数据传输的精准性。出口执行元件则与断路器联动, 接收保护装置指令后完成跳闸操作, 形成从信号采集到故障隔离的完整闭环, 契合特高压变压器保护的速动性与可靠性要求。

1.2 纵差保护的動作逻辑

500kV 变压器纵差保护動作逻辑围绕差动电流与制动电流的协同判断展开, 核心是通过电流矢量分析区分区内故障与区外故障。正常运行及区外故障时, 变压器各侧电流经电流互感器转换后, 在保护装置内部完成相位调整与幅值校准, 消除因变比差异及接线方式导致的不

平衡电流。此时差动电流趋近于零, 保护装置处于制动状态, 不启动跳闸指令。当保护区内发生短路故障时, 各侧电流平衡关系被打破, 差动电流急剧增大并超过设定启动值, 保护装置快速解除制动。结合比率制动特性, 制动电流随故障电流增大而提升, 既保证内部故障时的动作灵敏度, 又可靠躲过外部故障引发的不平衡电流。同时, 保护装置集成启动元件、速断元件及闭锁元件, 进一步优化動作逻辑, 避免电流互感器饱和等异常情况导致的误动或拒动。

1.3 纵差保护中励磁涌流的影响

励磁涌流是 500kV 变压器纵差保护误动的主要诱因, 其产生与变压器空载合闸、区外故障切除后的电压恢复等工况密切相关。励磁涌流幅值较大, 可达到额定电流的数倍, 且含有大量非周期分量与谐波分量, 流入差动保护回路后会打破电流平衡状态, 使差动电流异常增大。这种异常电流易被保护装置误判为区内短路故障, 进而触发跳闸指令, 影响变压器正常投运及电力系统稳定。励磁涌流的波形畸变特性的谐波含量不稳定, 会导致传统谐波制动闭锁方式的可靠性下降, 尤其在变压器本体消磁不充分的情况下, 励磁涌流的谐波含量可能低于闭锁门槛, 进一步增加保护误动风险。此外, 励磁涌流的衰减规律受合闸角、铁芯剩磁等因素影响, 其暂态特性会干扰保护装置的逻辑判断, 给纵差保护的可靠运行带来挑战。

2 励磁涌流的产生机理与特征

2.1 励磁涌流的产生条件

变压器励磁涌流的形成与电力系统运行状态及设备特性密切相关。当变压器空载合闸或外部故障切除后电压恢复时, 铁芯磁通需经历瞬态调整过程^[2]。若合闸瞬间电源电压过零, 铁芯中剩磁与稳态磁通方向一致, 二者

叠加可能导致磁通瞬时值远超饱和磁通阈值。这种极端磁通状态使铁芯迅速进入深度饱和区,导致励磁电感急剧下降,进而引发电流的剧烈畸变。此外,变压器绕组电阻损耗、漏磁通分布及铁芯材料非线性特性均会强化这一过程。系统电源容量与变压器容量比值、合闸角相位差以及铁芯剩磁水平共同构成励磁涌流产生的边界条件,其中剩磁方向与幅值对涌流形态具有决定性影响。

2.2 励磁涌流的形成过程

电压突变瞬间,铁芯磁通无法突变的基本特性导致暂态磁通的产生。在电压过零合闸场景下,稳态磁通与剩磁同向叠加形成初始磁通峰值,该值可能达到正常工作磁通的数倍。当磁通超过铁芯饱和限值时,磁导率骤降引发电感参数非线性变化,使得励磁电流呈现尖峰状畸变。随着铁芯交替进入饱和与非饱和区,电流波形呈现周期性衰减振荡特征。在此过程中,绕组电阻消耗能量导致磁通逐渐衰减,但非线性磁化曲线使电流衰减速度显著慢于线性系统。当磁通回落至接近饱和限值时,电流波形开始呈现明显的间断特征,直至最终过渡至稳态励磁电流状态。

2.3 励磁涌流的典型特征

励磁涌流波形具有显著的非正弦特征,其幅值可达额定电流的数倍至十余倍。波形中包含大量非周期分量,导致电流偏移时间轴,形成明显的直流分量。间断角是区分涌流与故障电流的关键特征,当铁芯退出饱和区时,电流波形出现明显断口,间断角宽度通常超过一定角度,一般励磁涌流的间断角宽度在 60° ~ 120° 之间。谐波分析显示,二次谐波分量占比显著,其含量随铁芯饱和程度加深而增大。此外,三相涌流波形存在显著差异,受变压器绕组接线方式影响,可能呈现一相涌流幅值远大于其他两相的不对称特征。波形衰减过程呈现非线性特征,初始阶段衰减较快,随后逐渐趋于平缓,整个过程可能持续数个工频周期。

3 现有励磁涌流识别方法梳理与剖析

3.1 波形特征类识别方法

波形特征类方法聚焦于励磁涌流与故障电流的形态差异,通过提取波形关键参数实现区分。间断角判据基于涌流波形在铁芯退出饱和区时出现的明显断口,通过检测电流过零点间的停顿宽度构建识别逻辑^[3]。波形对称性分析则通过比较电流前半波与后半波的镜像相似度,利用涌流波形固有的非对称特性形成判据。部分研究进一步引入波形畸变系数,量化电流波形与正弦基波的偏离程度,通过设定动态阈值提升识别适应性。这类方法对采样率要求较高,需精确捕捉波形细节变化,硬件实现

成本随精度提升而显著增加。

3.2 谐波特征类识别方法

谐波特征类识别方法基于励磁涌流的谐波含量特性构建识别框架,理论基础源于铁芯磁饱和的非线性效应,其中二次谐波制动法是目前应用最广泛的形式。此类方法通过提取电流中的谐波分量,结合谐波含量阈值完成识别,核心利用励磁涌流中二次谐波含量显著高于故障电流的特性,通过计算二次谐波与基波的比值,与设定阈值对比实现两类电流的区分。针对变压器不同接线方式,部分研究扩展至五次谐波分析,通过多频段谐波组合提升识别鲁棒性。谐波群分析方法则将频带划分为多个子区间,计算各频段能量占比,构建多维特征向量进行模式识别。这类方法原理简单且可靠性较高,但易受系统背景谐波干扰,当电网中存在非线性负载或谐波源时,谐波基值波动可能导致误判,在超高压、大容量变压器中,还可能因铁芯材料优化导致涌流二次谐波含量降低,存在制动失败风险。

3.3 暂态分量类识别方法

暂态分量类识别方法聚焦励磁涌流的暂态特性,依托暂态信号分析技术发展而成,适配高压变压器暂态过程复杂的运行特点。此类方法通过捕捉电流中的暂态分量,分析其幅值、衰减速度等特征实现识别。虚拟制动量法通过构造包含非周期分量的制动函数,利用涌流中直流分量衰减缓慢的特性实现区分。磁通轨迹法基于电压积分计算铁芯磁通,通过分析磁通轨迹的饱和特性判断电流性质,对电压互感器精度要求较高。小波变换技术也广泛应用于此类方法,以多分辨分析为理论依据,通过提取小波系数并计算其方差变化率,设定合理阈值实现两类电流的区分,能够快速捕捉暂态信号变化,不过这类方法对数据同步性要求严格,时延误差可能导致特征提取失效,部分算法还存在算力与时间成本较高的问题。

3.4 现有识别方法的局限性分析

传统识别方法在复杂工况下面临多重挑战。波形特征类方法对采样率与噪声抑制能力依赖性强,低采样率下间断角检测精度下降,高频噪声可能导致波形对称性误判。谐波特征类方法受系统谐波背景影响显著,新能源接入导致的谐波特性变化可能使原有判据失效。暂态分量类方法对参数敏感性高,变压器剩磁、绕组电阻等参数波动会直接影响磁通计算精度。单一特征量判据存在固有缺陷,多特征融合虽能提升识别准确率,但需解决特征权重分配与阈值整定难题,现有方法在动态适应性与工程实用性间仍存在平衡困境。

4 新型励磁涌流识别方法的设计

4.1 识别方法的设计思路

新型励磁涌流识别方法的设计需突破传统方法对单一特征或固定判据的过度依赖,转向构建具备动态适应能力的多维度融合识别框架^[4]。核心思路在于整合时域波形动态演化特征、频域能量分布规律以及暂态磁通变化轨迹,通过分层递进式处理实现识别精度与计算效率的平衡。具体而言,采用“粗筛-精判”双阶段策略:初始阶段利用电流波形瞬时变化率与间断角候选区域快速定位潜在涌流时段,缩小后续分析范围;核心阶段构建包含时域畸变指数、频域谐波熵以及磁通饱和度在内的复合特征向量,通过机器学习模型挖掘特征间非线性关联关系。该设计融入自适应机制,根据系统运行状态实时调整特征权重分配,例如在新能源高渗透率场景下增强谐波特征占比,在重载工况下突出磁通特征作用,确保方法在不同工况下的鲁棒性。

4.2 识别特征的筛选与提取

特征筛选遵循“互补性增强、冗余性消除”原则,从时域、频域、磁域三个维度构建特征体系。时域特征方面,除传统间断角参数外,引入波形曲率因子,通过计算电流波形各点曲率半径的统计分布,量化波形局部弯曲程度,该指标对铁芯饱和程度变化敏感度高。频域特征扩展至九次谐波群分析,采用变窗长傅里叶变换提升高频分量分辨率,重点提取三次、五次、七次谐波能量占比的相对变化率,构建谐波能量迁移特征。磁域特征基于电压积分法计算铁芯动态磁通,提取磁通轨迹的饱和和区间宽度与回环面积,这两个参数分别反映铁芯剩磁水平与磁滞损耗特性。特征提取过程嵌入信号预处理模块,利用变分模态分解将电流信号分解为多个模态分量,通过相关系数筛选有效分量进行重构,有效抑制噪声干扰。为解决特征量纲差异问题,采用分位数归一化方法对各特征进行标准化处理,确保不同特征在模型训练中具有同等重要性。

4.3 识别算法的构建与优化

算法架构采用图神经网络与模糊逻辑相结合的混合模型。图神经网络部分通过构建特征关联图,自动学习

不同特征间的空间依赖关系,利用图卷积操作实现特征信息的多层次传递与融合;模糊逻辑模块用于处理模型输出的不确定性,通过构建隶属度函数将数值型判断结果转换为概率型决策,增强算法对边界工况的适应能力。模型训练引入对抗训练策略,通过构造扰动样本提升模型对噪声干扰的鲁棒性,同时采用知识蒸馏技术将大型模型的学习成果迁移至轻量化模型,在保持识别性能的同时降低计算复杂度。针对实际工程中工况动态变化的特点,设计动态阈值调整机制,根据系统运行状态实时修正判断阈值,例如在电压波动较大时放宽谐波特征判据,在负载率较低时增强磁通特征权重^[5]。为提升算法实时性,对模型进行剪枝优化,通过移除对识别结果贡献度低的神经元连接,在保持精度的前提下将计算延迟控制在工程允许范围内。最终构建的识别系统具备自学习、自优化能力,能够在复杂电网环境下实现励磁涌流与故障电流的准确区分。

结束语

500kV变压器纵差保护中,励磁涌流识别至关重要。传统方法在复杂工况下存在诸多局限,难以满足电力系统发展需求。新型励磁涌流识别方法构建了多维度融合识别框架,采用“粗筛-精判”双阶段策略,整合多维度特征,运用图神经网络与模糊逻辑结合的混合算法,并融入自适应机制与动态阈值调整策略。该方法有效提升了识别精度与鲁棒性,为保障特高压变压器安全稳定运行、提高电力系统可靠性提供了有力的技术支撑。

参考文献

- [1]楚皓翔,宋宇,李涵.500kV变压器纵差保护试验方法[J].电气技术,2022,23(3):87-91.
- [2]尹羽,钱毅.大容量单相发电机主变压器纵联差动保护的自适应控制模型[J].自动化与仪表,2023,38(3):22-26.
- [3]张伟,刘晓倩.电流互感器变比对变压器纵联差动保护的影响[J].电力系统装备,2023(4):86-88.
- [4]李杰.500kV自耦变压器差动保护调试方法[J].云南电业,2025(3):11-16.
- [5]夏经德,苗思雨,邵文权,等.基于纵向阻抗的变压器虚拟相位保护[J].西安工程大学学报,2023,37(2):54-62.