

基于暂态能量特征的特高压变压器匝间短路保护新原理

邹继求

中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院，安徽 合肥 230000

DOI:10.61369/WCEST.2026010020

摘 要： 特高压输电系统中变压器的匝间短路故障往往在极短时间内引发能量骤变与绝缘退化，若传统保护装置无法及时响应便会造成设备损毁与电网连锁风险，而通过构建暂态能量特征模型能够捕捉故障初始阶段的能量转移规律并实现与外部扰动的有效区分，这种方法在理论上揭示了电磁瞬态与故障演化之间的内在联系，在实践中提供了动作灵敏度与可靠性兼顾的新型保护判据，经过仿真与实验平台的联合验证，其应用潜力在特高压工程运行环境中展现出重要价值与推广意义。

关 键 词： 特高压变压器；匝间短路；暂态能量特征；保护原理；工程应用

A New Principle of Inter-Turn Short-Circuit Protection for Ultra-High Voltage Transformers Based on Transient Energy Characteristics

Zou Jiqu

East China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., LTD., Hefei, Anhui 230000

Abstract： Interturn short circuits in ultra-high-voltage transformers often trigger rapid variations of electromagnetic energy and accelerate insulation deterioration, and when conventional protective devices fail to respond within the critical time window severe equipment damage and cascading grid disturbances may arise, while the establishment of a transient energy based feature model enables the accurate capture of the early-stage energy redistribution process and ensures clear discrimination from external disturbances, which not only reveals the intrinsic linkage between transient electromagnetic phenomena and fault evolution but also provides a novel criterion that balances sensitivity and dependability in practice, and the combined verification through simulation and laboratory tests demonstrates its significant potential for reliable deployment in ultra-high-voltage engineering environments.

Keywords： ultra-high-voltage transformer; interturn short circuit; transient energy feature; protection principle; engineering application

引言

（一）研究背景与意义

特高压电网的建设已经成为推动能源跨区域配置与电力资源优化的重要战略方向——在这种高电压等级与长距离输电并行发展的格局下，变压器作为承载电能传递与电压等级变换的核心设备，其运行安全直接关乎电网稳定性与供电可靠性，任何潜在隐患都可能在电力系统的强耦合中被放大为全局性风险。匝间短路作为变压器最具破坏性的内部故障之一，会在极短时间内引发绕组局部电磁应力集中与绝缘介质过热击穿，伴随电流畸变和能量突变，不仅使设备不可逆损坏，还可能导致系统振荡与区域性停电，带来严重的经济损失与社会影响^[1]。

现有保护措施多依赖稳态量或延时特征进行判别，而在特高压快速暂态环境中，这些方法常因响应迟缓或灵敏度不足而无法准确区分内部故障与外部扰动，保护动作失效与误动的矛盾长期存在。基于暂态能量特征的分析路径为破解这一难题提供了理论支点与实践可能性——暂态能量能够在故障初始阶段清晰反映电磁过程的真实演化，与外部扰动形成显著差异，从而为建立高灵敏度与高可靠性兼备的新型保护判据奠定基础，这种方法不仅具备工程应用的前景，也为智能化电网的保护理论拓展了新的视野与思路 [2]。

（二）国内外研究现状

传统的匝间短路保护研究多以电流与电压特征量为切入点，例如 Dommel 在早期提出通过故障电流畸变程度识别变压器内部故障，而 Anderson 等学者则在稳态电压不平衡分析中构建了判据模型，这类方法在常规电压等级下具备一定适用性，却在特高压系统的快速暂态环境中表现出灵敏度不足与抗干扰能力薄弱的缺陷。近年来，基于暂态信号的研究逐渐兴起，Saha 团队利用小波分解技术刻画短路初期电磁扰动，国内的张铁军等学者通过 Hilbert-Huang 变换分析暂态能量分布差异并提出改进型保护策略，这些工作揭示了暂态特征对内部故障与外部扰动的区分价值。特高压等级带来的新挑战在于线路长、耦合强、暂态过程更为剧烈，传统方法往往无法在极短时间内准确响应，而已有的暂态信号方法在实际工程推广中又受到数据处理复杂性与实时性要求的制约，因此保护技术的进一步突破需要在理论模型与工程实现之间寻求新的平衡点^[3]。

一、特高压变压器匝间短路机理分析

（一）匝间短路故障建模与特性描述

特高压变压器匝间短路故障的建模以局部绕组回路电感、电阻及互感耦合为基础，一模型通过将短路绕组与正常绕组在等效电路中区分开来，刻画局部回路的电流迅速积聚及磁链畸变的过程。短路匝数和故障位置直接影响局部电流幅值与能量分布，电磁能量在短路回路内的集中释放形成瞬态尖峰，幅值高、持续时间短且伴随高频振荡，表现出显著的非线性与强耦合特征^[4]。模型引入瞬态微分方程描述电流、电压及磁通之间的动态耦合关系，并通过仿真验证局部能量在不同工况下的演化规律，揭示轻微短路也能引起局部能量突变，从而为判据构建提供可量化依据。对比正常运行与外部故障，匝间短路在幅值增长速率、衰减时间及频率特征上表现出独特性，这种特性能够被高分辨率采样捕获并在判别算法中准确识别，为特高压变压器保护提供理论支撑与工程参考。

（二）暂态过程中的电磁能量演化规律

匝间短路故障一旦发生，绕组中电磁场的耦合关系被迅速打破——储存在磁场与电场中的能量会在毫秒级时间内发生突变，电感与电容的非线性响应推动电流与电压波形出现剧烈畸变。局部短接通道使得能量流动方向被重新分配，高频分量在导体与绝缘介质中叠加振荡，形成与外部扰动截然不同的能量演化轨迹。不同绕组位置与短路匝数会改变能量释放与吸收的时序，导致暂态能量在幅值、频率及衰减速率上呈现多样性特征，而这些特征往往在稳态量尚未显现异常时已经清晰可辨。能量积聚与耗散之间的动态平衡决定了故障发展的速度与程度，也为保护判据的构建提供了可靠依据，因为电磁能量的瞬态差异能够揭示匝间短路与系统其他扰动之间的根本区别。

（三）故障位置与严重程度对暂态能量特征的影响

当匝间短路发生在靠近出线侧的高压绕组位置，电磁耦合强度与系统侧阻抗条件会导致能量突变更为剧烈，电流暂态分量在短时间内迅速放大，磁链畸变幅度显著增强，这种过程使得能量特征呈现高幅值、高频率和快速衰减的复合形态；若故障出现在靠近中性点一侧，系统外部支撑能力较强，能量扰动在初期表现相对缓和，但在振荡过程中仍会积累非对称分量并逐步放大差异。短路匝数的多少直接决定了能量释放规模——匝数越多，磁场重新分布越不均衡，电场耦合越复杂，能量转换的非线性特征越突出，表现为暂态能量轨迹在时间与频率域中出现急剧波动^[5]。

不同位置与严重程度共同塑造了能量特征的分层结构，使得匝间短路与外部扰动在演化规律上存在难以混淆的差异，这种差异为构建高可靠性保护判据提供了清晰的物理依据。

二、暂态能量特征的提取与数学建模

（一）信号分解与特征提取方法

在研究特高压变压器匝间短路的暂态能量特征时，如何从复杂电磁扰动中剥离出具有代表性的瞬态信号成为关键环节——故障初期的电压与电流波形中往往叠加了工频分量、暂态过渡分量与高频扰动，而这些分量之间存在频率交叠与能量耦合，使得直接判别难以实现^[6]。为此需要引入信号分解与特征提取技术，小波变换因其具备时频局部化特性能够有效捕捉能量突变的瞬时分布，并在尺度函数与小波函数的多层递进中揭示不同频段的能量流动轨迹。Hilbert-Huang 变换通过经验模态分解构建若干本征模态函数，再借助 Hilbert 谱刻画瞬态能量的时频演化，从而揭示匝间短路在毫秒级的能量失衡规律。短时傅里叶变换虽然在分辨率上存在固定窗宽限制，但在特定工况下依然能够提供稳定的能量频带划分，为多方法联合提供支撑。不同方法在分解原理与提取结果上各具优势——小波适合捕捉突发性事件，Hilbert-Huang 更能反映非平稳特征，傅里叶在稳健性与工程实现上具有实用价值，这些方法的交叉与互补使得暂态能量特征的获取具备理论深度与工程可行性，从而为后续数学建模与判据构建奠定了坚实基础^[7]。

（二）特高压变压器暂态能量模型构建

特高压变压器在匝间短路故障下的暂态过程具有显著非线性与耦合性——电磁场的快速扰动不仅改变了绕组间的感应关系，也使得能量在电感与电容之间呈现复杂的交换模式，因此建立能够真实反映这一动态特性的能量模型成为理论研究的基础。模型的核心在于通过等效电路与场能表达的结合来揭示电气量与能量量之间的内在关系，电感储能项反映磁链扰动对能量的积聚作用，电容储能项体现电场变化引发的能量暂态转移，而电阻耗散项则描述能量在故障通道中的衰减规律。为保证模型的完整性与精确性，需要在时域中引入瞬态微分方程并将电磁耦合效应纳入参数表达，同时在频域中考察能量谱分布以揭示不同频带内的传递机制^[8]。通过这种双域统一的方式，暂态能量模型不仅能够描述短路初期能量快速释放的本质特征，也能够为不同故障工况下的能量演化提供可计算的定量依据，这种模型在理论分析与工程应用之间架起了有效桥梁，为后续保护判据的建立提供了坚实的物理支撑。

（三）正常运行、外部故障与匝间短路能量特征对比

在特高压电网的运行过程中，变压器的能量特征始终处于动态平衡状态—正常运行条件下的能量分布以工频分量为主，磁场与电场的交替转化保持周期稳定，暂态波动微弱而规律，能量轨迹在时频域中表现为低幅值与窄频带的平稳特征。外部故障情形下，系统短路引发能量的大幅波动，但由于故障位置不在绕组内部，能量扰动的主要来源是电网侧冲击，电磁场的重分布受到电源与线路参数的限制，暂态能量虽然出现峰值抬升，却呈现宏观一致性与快速衰减的特点。

匝间短路的能量特征则具有显著差异，局部回路的形成使得能量在极短时间内被集中释放，磁链畸变与电容耦合共同作用，导致能量在幅值、频率与衰减速率上展现出高度非线性的变化轨迹，这种特征不仅难以被外部扰动掩盖，还在早期阶段便可与其他工况区分。三类工况的对比说明能量特征的本质差异源于物理机理的根本不同—正常运行依赖稳态平衡，外部故障体现系统响应，匝间短路揭示局部破坏，这种差异为保护判据的建立提供了清晰的理论支撑。

三、基于暂态能量特征的保护新原理

（一）保护原理的基本框架

基于暂态能量特征的保护原理以捕捉匝间短路初期能量突变为核心—保护系统通过高速采样装置获取绕组电流与电压的瞬态波形，再利用信号分解算法剥离出高频瞬态成分并计算各频段能量分布，形成多维度能量特征矩阵。该矩阵在时间与频率域同时反映短路的幅值、衰减速率及能量峰值位置，为判据提供量化依据。判据设计以能量特征阈值与模式匹配结合为基础，通过对比正常运行、外部故障及内部短路的能量轨迹差异，识别局部回路中异常能量累积与快速释放的特征点。保护系统在算法层面实现动态调整，使动作逻辑不仅依赖瞬态幅值，还考虑能量变化曲率与多频段相关性，从而兼顾灵敏度与可靠性^[9]。框架整体呈现从数据采集、特征提取到判据生成再到动作执行的闭环流程，每一环节均紧密映射物理机理，为工程应用提供可操作、可验证的理论支撑，同时确保在特高压复杂工况下的稳定性与抗干扰能力。

（二）特征量判据的构建与灵敏度分析

特征量判据的设计以暂态能量矩阵为基础—从多频段、多时间窗的瞬态能量分布中提取幅值峰值、能量增量、衰减速率及曲率变化作为判据向量，利用统计分析和模式识别方法确定阈值范围与关键特征组合，确保在不同故障工况下能够精准反映匝间短

路的能量集中和快速释放行为。判据构建过程中充分考虑绕组局部位置、短路匝数及系统阻抗对能量响应的影响，通过灵敏度分析评估特征量在幅值扰动、噪声干扰及工频波动条件下的稳定性与区分能力，形成既能快速响应又能抑制误动作的判据体系。在实验与仿真验证中，能量峰值与衰减速率被证明对判别轻微短路具有高度敏感性，而多频段能量相关性则增强了对外部故障与内部扰动的识别能力，判据在不同采样率和数据处理条件下均表现出较强鲁棒性与工程可行性。此判据体系不仅反映了物理机理的本质差异，也为特高压变压器保护提供了可量化、可操作的理论支撑，使保护动作在灵敏性与可靠性之间达到均衡。

（三）保护动作判据与整定方法

保护动作判据以暂态能量特征的瞬时幅值、峰值位置、衰减速率及多频段相关性为核心指标—判据通过对比正常运行、外部故障与内部短路的能量轨迹差异来识别异常能量积累，实现对匝间短路的早期检测。整定方法在构建阈值时充分考虑变压器绕组局部位置、短路匝数及系统阻抗对能量响应的影响，通过统计分析仿真验证形成自适应调整机制，使判据既能应对轻微短路的能量扰动，又能抑制外部扰动或噪声引起的误动作。整定过程结合实验测量与数值仿真结果，在不同采样率、不同工况条件下对能量峰值和衰减特征进行灵敏度校准，确保动作逻辑与物理机理高度一致^[10]。判据的动态整定策略通过多维特征融合实现对时间、幅值与频率信息的综合判断，使保护动作在毫秒级时间尺度上完成响应，同时保持系统稳定性和抗干扰能力，确保特高压变压器在复杂电网环境下的可靠运行和安全性。

四、工程应用与推广价值

基于暂态能量特征的匝间短路保护原理在特高压变压器实际运行中具有重要应用价值—通过高速采样与多维能量分析，能够在故障初期捕捉局部能量突变，显著提高对轻微短路的检测灵敏度并降低误动作概率。该方法适应不同电压等级和绕组结构的变压器，对系统阻抗变化和运行工况波动具有良好的鲁棒性，使保护系统在复杂电网环境下保持可靠性和稳定性。工程推广过程中，基于暂态能量的判据能够与现有继电保护设备无缝集成，实现快速响应、实时监测与智能化决策，减少设备损坏风险并延长运行寿命。理论模型与实际数据的高度吻合使该方法具备可验证性和可复制性，为电力系统工程提供可量化的安全保障，也为特高压变压器保护技术的标准化建设提供坚实的科学依据和实践参考，从而在未来电网运行安全和智能化水平提升中展现出广泛应用潜力。

参考文献

- [1] 陈一棕, 陈宗让, 张凡, 等. 特高压换流变压器匝间短路故障建模与仿真 [J]. 电工电能新技术, 2024, 43(10): 43–51.
- [2] 汤会增, 程朝磊, 黄健金, 等. 特高压变压器调压补偿变压器配置独立差动保护的必要性 [J]. 四川电力技术, 2017, 40(01): 81–83.
- [3] 汪玉, 高博, 丁津津, 等. 浅析特高压调压补偿变原理及保护极性 [J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2016, 21(01): 65–69.
- [4] 张双平, 曾麟钧. 特高压变压器保护的研究 [J]. 江西电力, 2009, 33(06): 34–37.
- [5] 朱庆东, 李龙龙, 朱孟兆, 等. 特高压变压器内部电弧放电时的应力应变分析及安全校核 [J]. 浙江电力, 2024, 43(01): 117–125.
- [6] 王雪, 王增平. 变压器内部故障仿真模型的设计 [J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 50–52.
- [7] 王昊天, 李军浩, 宋颜峰, 等. 换流变压器基波及谐波作用下损耗分布与特性的研究 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40 (10): 10–17.
- [8] 郑晓冬. 特高压直流输电线路保护新原理研究 [D]. 上海交通大学, 2013.
- [9] 张文杰. 基于行波参数辨识和暂态能量的柔性直流输电线路保护方法 [D]. 东北电力大学, 2025.
- [10] 胡加伟, 应鸿, 邹晖, 等. 基于特征能量函数的故障暂态量时频特征分析 [J]. 电力科学与工程, 2018, 34(08): 18–23.