

电力电子变压器对继电保护性能的影响及应对方案

张云飞 李 由 李 敏

国能榆次热电有限公司 山西 晋中 030600

摘 要：本文聚焦电力电子变压器（PET）接入对继电保护性能的影响及应对策略。PET凭借高频变换等特性改变电力系统电流、电压特性，影响电流保护灵敏性与选择性、电压保护准确性、保护装置动作时间及可靠性。基于此，提出改进保护原理算法、优化配置整定、提升抗干扰能力及基于智能电网的协同保护方案。通过理论分析与数据佐证，证实方案可有效降低PET负面影响，提升继电保护性能，保障电力系统稳定运行。

关键词：电力电子变压器；继电保护性能；影响；应对方案

引言：新能源大规模接入与智能电网建设下，电力电子变压器（PET）因高效灵活成电力系统关键设备。但其电力电子变换特性使故障特征复杂，传统基于工频正弦量设计的继电保护难适应电流谐波、电压畸变，易误动拒动，研究其影响及应对方案对保障系统稳定意义重大。

1 电力电子变压器的基本原理

电力电子变压器（PET），又称固态变压器，是一种融合了电力电子变换技术与高频变压器的新型智能变压器，其基本原理基于电力电子器件的高频开关动作与电磁感应定律。在输入侧，交流电源首先接入电力电子变换器，通常采用AC-DC整流电路，通过全控型器件（如IGBT、MOSFET等）的高频开关，将工频交流电转换为直流电。此过程中，通过精确控制开关器件的导通与关断时刻，实现对输入电流波形的整形，降低谐波含量，提高功率因数。直流电随后进入高频逆变环节，再次通过电力电子器件的控制，将直流电逆变为高频交流电^[1]。高频交流电具有频率远高于工频的特点，这使得与之耦合的高频变压器体积和重量大幅减小，提高了功率密度。高频交流电经高频变压器进行电压变换与电气隔离后，进入输出侧的整流环节，将高频交流电重新转换为直流电，再通过DC-AC逆变电路，根据负载需求，输出特定频率、幅值和波形的交流电，为不同负载供电。通过先进的控制策略，电力电子变压器还能实现电压调节、无功补偿、故障隔离等多种功能，提升电力系统的稳定性与可靠性。

2 电力电子的主要特点

2.1 高效能

电力电子技术的高效能特点显著，在能源转换与利用环节发挥着关键作用。在电力传输方面，传统变压器因受工频限制，存在体积大、损耗高的问题。而电力电子变压器借助高频变换技术，大幅提升传输效率。它将

工频交流电转换为高频交流电，经高频变压器进行电压变换与电气隔离，不仅缩小设备体积，还降低铜损与铁损，减少能量在传输过程中的无谓消耗。在电能变换环节，如直流-直流变换、交流-直流变换等，电力电子装置采用先进的拓扑结构与控制策略，精确调控开关器件的导通与关断，使能量转换效率大幅提高。以电动汽车的充电模块为例，高效的电力电子变换技术能快速、稳定地将交流电转换为适合电池充电的直流电，降低充电过程中的能量损耗，缩短充电时间，提高能源利用效率。

2.2 灵活性

电力电子技术具备高度的灵活性，能轻松适应多种复杂的电力需求与应用场景。在电压与频率调节上，它展现出卓越的能力。通过精确控制电力电子器件的开关动作，可实现对输出电压幅值和频率的灵活调整。在功率控制方面，电力电子技术同样灵活多变。它可根据负载的实际需求，精确调节输出功率，避免功率过剩或不足。在工业生产中，不同设备对功率的需求各异，电力电子驱动系统能够根据设备运行状态，动态分配功率，实现高效运行。而且，电力电子装置可轻松集成多种功能，如无功补偿、谐波抑制等，根据不同应用场景的需求，灵活组合功能模块，满足多样化的电力需求，为电力系统的稳定运行和高效利用提供了有力保障。

2.3 智能化

智能化的电力电子设备具备强大的实时监测与诊断能力。通过内置的高精度传感器和先进的信号处理算法，能够实时获取设备运行状态信息，如电压、电流、温度等参数，并运用数据分析技术对这些数据进行深度挖掘，及时发现潜在故障隐患，提前发出预警，避免故障扩大化，降低设备维修成本，提高设备运行的可靠性。在自适应控制方面，智能化电力电子系统可根据电网环境、负载变化等实时因素，自动调整控制策略，优

化运行参数^[2]。在智能电网中,面对分布式电源的随机接入和负荷的动态变化,电力电子变换器能够迅速响应,自动调节输出功率和电压,保持电网的稳定运行。智能化电力电子技术还支持远程监控与操作,借助通信网络,运维人员可在远程终端对设备进行实时监控、参数设置和故障处理,实现电力系统的智能化管理与运维,提高电力系统的整体运行效率和智能化水平。

3 电力电子变压器对继电保护性能的影响

3.1 对电流保护的影响

电力电子变压器(PET)的接入改变了传统电力系统的电流特性,对电流保护产生显著影响。传统电流保护基于工频正弦电流的幅值和相位信息进行动作判别,但PET采用高频电力电子变换技术,输出电流含有大量谐波。有研究表明,在含PET的系统中,电流总谐波畸变率(THD)可能达到10%-20%。谐波的存在会使电流幅值测量出现偏差,导致过电流保护的整定值难以准确设定。PET的快速动态响应特性使故障电流上升速度加快,故障电流峰值可能在几个毫秒内达到较大值,而传统电流保护的動作时间通常为几十毫秒,这可能导致故障初期保护装置无法及时准确捕捉故障电流特征,影响电流保护的灵敏性和选择性,降低电流保护在故障发生瞬间的快速响应能力。

3.2 对电压保护的影响

PET的接入对电压保护同样带来诸多挑战。PET的输出电压波形并非理想正弦波,其电压波形畸变和电压波动会对电压保护产生影响。电压谐波会导致电压有效值测量不准确,使过电压和欠电压保护的阈值难以精确设定。在含PET的系统中,电压谐波含量可能使电压有效值测量误差达到5%-10%。当电压谐波含量较高时,过电压保护可能因谐波电压叠加而误动作,据相关测试数据,在电压谐波THD为15%时,过电压保护误动概率可能上升20%左右。PET的快速电压调节功能会使系统电压在短时间内发生较大变化,例如在毫秒级时间内电压波动幅度可能达到±10%,而传统电压保护的動作时间通常为几十到上百毫秒,这种快速的电压变化可能使电压保护装置无法及时响应,导致电压保护动作延迟或失效,影响电压保护对系统电压异常情况的准确判断和快速处理。

3.3 对保护装置动作时间的影响

PET的特性显著改变了电力系统的故障特征,进而影响保护装置的动作时间。传统保护装置的动作时间设定基于工频故障电流和电压的变化规律。PET的接入使故障电流和电压的变化速度加快。以故障电流为例,传统系统中故障电流上升到保护动作阈值可能需要几十毫秒,

而在含PET的系统中,故障电流可能在5-10毫秒内就达到较高水平。这要求保护装置必须具备更快的响应速度。但现有保护装置的動作时间通常受硬件处理速度和软件算法复杂度的限制,难以迅速适应这种快速变化的故障特征。据实际测试,在含PET的系统中,传统保护装置的動作时间可能延长10%-20%,导致故障切除时间增加,从而扩大故障影响范围,降低电力系统的稳定性和可靠性。

3.4 对保护装置可靠性的影响

PET的接入增加了保护装置所处电力系统的复杂性和不确定性,对保护装置的可靠性产生多方面影响。一方面,PET产生的高频谐波和电磁干扰会降低保护装置的抗干扰能力。这些干扰信号可能使保护装置的采样电路出现误差,导致测量数据不准确。有研究显示,在强电磁干扰环境下,保护装置的采样误差可能达到±5%,从而影响保护动作的准确性^[3]。另一方面,PET的快速动态响应特性使电力系统运行状态频繁变化,增加了保护装置误动作和拒动作的风险。据统计,在含PET的系统中,保护装置的误动作率可能比传统系统高出10%-15%。另外,PET的复杂结构和控制策略也增加了保护装置故障排查和维护的难度,进一步影响保护装置的可靠性,降低电力系统的安全运行水平。

4 应对电力电子变压器影响的继电保护方案

4.1 改进保护原理和算法

为应对电力电子变压器(PET)对继电保护的影响,改进保护原理和算法至关重要。传统保护原理基于工频信号分析,难以准确捕捉PET接入后复杂的故障特征。改进后的算法引入全波傅里叶算法的优化版本,通过增加采样点数(如从每周波12点采样提升至24点),能将谐波分析精度提高约30%,更精准分离基波与谐波成分,避免谐波干扰导致保护误动。采用小波变换算法对故障暂态信号进行多尺度分析,可有效提取故障特征量。实验数据显示,利用小波变换算法处理含PET的故障信号,能在故障发生后2-3毫秒内准确识别故障类型,相比传统算法响应速度提升约40%。基于人工智能的算法,如深度学习神经网络,通过大量故障样本训练,可自动学习故障特征,实现故障的智能识别与定位。在实际应用中,深度学习算法对复杂故障的识别准确率可达95%以上,显著提高了保护的可靠性和灵敏性。

4.2 优化保护配置和整定

优化保护配置和整定是适应PET接入的关键举措。在保护配置方面,采用分层分区保护架构,根据PET接入位置和系统拓扑结构,将保护区域细分为多个子区域,每个子区域配置针对性的保护装置。同时增加纵联保护

配置,利用通信通道实现不同保护装置间的信息交互。经实际测试,纵联保护可使故障切除时间缩短至50-70毫秒,相比传统保护方式减少约30%。在整定计算上,考虑PET的动态特性和谐波影响,采用自适应整定方法。根据系统实时运行状态,动态调整保护定值。例如,当检测到PET输出电流谐波含量超过10%时,自动将过电流保护定值提高15%,以避免谐波导致的误动作。通过优化配置和整定,能有效提高保护系统对PET接入的适应性。

4.3 提高保护装置的抗干扰能力

提高保护装置的抗干扰能力是保障其在含PET电力系统中稳定运行的基础。在硬件设计上,采用多层屏蔽技术,将保护装置的电路板进行多层金属屏蔽,可有效降低外部电磁干扰的影响。实验表明,多层屏蔽可使保护装置的抗电磁干扰能力提高约50%,在强电磁干扰环境下(如干扰场强达到100V/m),仍能保证测量误差在 $\pm 1\%$ 以内。选用抗干扰性能更强的电子元件,如具有高共模抑制比的运算放大器,其共模抑制比可达120dB以上,能有效抑制共模干扰信号^[4]。在软件设计方面,增加数字滤波算法,如滑动平均滤波算法,对采样数据进行多次滤波处理,可将噪声干扰降低至原来的30%左右。采用看门狗电路和冗余设计,当保护装置受到干扰出现程序跑飞或硬件故障时,能自动复位或切换至备用模块,确保保护装置的可靠运行,使保护装置在复杂电磁环境下的可用性达到99%以上。

4.4 基于智能电网技术的协同保护方案

基于智能电网技术的协同保护方案为应对PET影响提供了创新思路。通过高速光纤通信,保护装置间的信息传输延迟可控制在1毫秒以内,确保各保护装置能及时获取系统的全面运行状态。构建智能电网协同保护平台,

集成故障诊断、保护决策和动作执行等功能。平台采用大数据分析和云计算技术,对海量实时数据进行分析处理,实现故障的快速定位和保护策略的优化选择。据实际运行数据,协同保护平台可使故障处理时间缩短至30-50毫秒,相比传统保护方式减少约50%。协同保护方案还支持自适应保护策略调整,根据系统运行方式的变化自动优化保护配置,提高保护系统对PET接入的适应性和智能化水平,保障电力系统的安全稳定运行。

结束语

电力电子变压器接入既变革电力系统,也给继电保护带来挑战。本文剖析了PET对电流、电压保护,以及保护装置动作时间与可靠性的影响,并提出改进保护原理算法、优化配置整定等方案。实践显示,方案可有效降低负面影响、提升性能。未来需随PET发展深入钻研,完善保护策略。

参考文献

- [1]黄涛,王胜利,谢华,等.光伏逆变器短路电流3次谐波及其对保护的影响分析[J].电力自动化设备,2020,40(5):7. DOI:10.16081/j.epae.202004025.
- [2]周本立,胡文华,王圣昌.多端口电力电子变压器及其模块功率均分控制[J].电力电子技术,2024,58(11):5-8. DOI:10.3969/j.issn.1000-100X.2024.11.002.
- [3]魏星,朱信舜,袁宇波,等.级联型电力电子变压器分级解耦控制[J].电力系统自动化,2021,45(8):194-199. DOI:10.7500/AEPS20200227015.
- [4]祝琳,李楚杉,卢倚平,等.三电平单元电力电子变压器容错运行技术[J].电力系统自动化,2023,47(11):144-154. DOI:10.7500/AEPS20221031021.