

电力电子变压器在智能配电网中的应用与关键技术

徐亦迅

长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430000

摘要: 电力电子变压器 (Power Electronic Transformer, PET) 作为一种融合电力电子变换、高频磁技术与先进控制策略的新型智能配电装备, 凭借其快速动态响应、多端口能量管理、电能质量治理及故障隔离等优势, 正逐步成为构建高弹性、高可靠、高效率智能配电网的关键使能技术。本文系统阐述了PET的基本拓扑结构与工作原理, 深入分析了其在智能配电网中的典型应用场景, 并重点探讨了实现高性能PET所依赖的核心关键技术, 包括高频磁元件设计、宽禁带半导体器件应用、先进调制与控制策略、故障保护机制等。旨在为相关领域的研究与工程实践提供参考。

关键词: 电力电子变压器; 智能配电网; 高频隔离; 宽禁带半导体

引言

配电网是连接主网与用户的“最后一公里”, 其运行效率等关乎电力系统安全稳定与用户满意度。在全球能源与数字技术融合背景下, 配电网正从传统模式向智能模式变革, 大量非线性等设备接入, 使其呈现源-网-荷-储互动、潮流双向流动等新特征, 给传统工频配电变压器带来挑战。传统变压器基于电磁感应原理, 存在体积大、功能单一、无法主动调节等缺陷, 其“哑设备”属性制约配电网升级。电力电子变压器 (PET) 结合电力电子变流与高频磁耦合技术, 改变了传统变压器形态与功能, 集多种功能于一体, 被誉为智能配电网“智能心脏”。近年来, 随着宽禁带半导体器件成熟等技术进步, PET技术可行性与经济性提升, 应用研究与示范增多。本文将梳理其应用价值, 剖析关键技术, 展望发展方向, 推动其深入研究与规模化应用。

1 电力电子变压器的基本结构与工作原理

1.1 典型拓扑结构

输入级, 即整流级, 负责将中压配电网交流电转为稳定直流母线电压。中高压等级中, 模块化多电平换流器 (MMC) 因模块化架构、易扩展电压等级、输出波形质量高、开关频率低等优势, 成为主流选择; 低电压等级或成本敏感场景则常用三相PWM整流器。隔离级是PET与传统变压器的本质区别。它先将输入级产生的直流电压通过高频逆变器转为高频交流信号, 经小型高频变压器完成电气隔离与电压变换, 再通过同步整流电路还原为直流。高频化处理大幅压缩了磁性元件尺寸重量。输出级根据下游负荷需求, 将隔离级输出的直流电转换为低压交流或直流。交流输出通常采用三相PWM逆变器结构, 并可通过控制算法赋予有源滤波能力。整个PET系统由高速数字控制器统一协调, 确保各级协同工作, 实

现能量高效可控流动。

1.2 工作原理与功能优势

PET能量转换遵循“AC-DC-HFAC-DC-AC/DC”路径, 性能卓越源于电力电子技术的可控性。相较于传统变压器, PET能够实现毫秒级电压电流动态调节, 应对电网瞬时扰动, 保障敏感负荷供电。它功能多样, 在电能质量方面, 可实时补偿负载谐波与无功电流, 治理三相不平衡; 在能源接入方面, 多端口架构能整合分布式电源、储能装置及交直流混合负荷, 实现能量双向流动与优化调度^[1]。高频化设计提升了功率密度, 配合先进技术降低系统损耗, 提高运行效率。此外, PET内置通信与传感单元, 具备数字化属性, 可作为智能感知与执行节点, 参与上层应用, 实现从“哑设备”到“智能终端”的跨越。

2 PET在智能配电网中的典型应用场景

2.1 高渗透率分布式能源接入点

在配电网的末端台区, 屋顶光伏、小型风电等分布式能源的大规模接入常常引发局部电压越限、反向潮流甚至保护误动等一系列运行难题。在此类场景下部署PET, 可将其作为台区的智能融合终端, 发挥多重作用。PET能够通过快速调节其输出电压的幅值与相位, 主动维持台区内用户侧电压始终处于合格范围之内, 有效解决因分布式电源出力波动导致的电压抬升问题。同时, 当PET与本地配置的储能系统协同工作时, 可以吸收分布式电源在光照或风力充足时段的过剩功率, 并在出力不足时释放储存的能量, 从而平滑分布式电源的整体功率输出曲线, 减轻其对上级电网的冲击。更为关键的是, 在外部电网发生故障导致失电的情况下, PET具备切换至孤岛运行模式的能力, 可为区域内的重要负荷提供不间断的应急电力供应, 展现出类似UPS的功能, 并在条件允许时支持局部网络的黑启动, 极大提升了配电网的韧性与

自愈能力。

2.2 交直流混合配电系统枢纽

随着数据中心、5G通信基站、电动汽车充电设施等直流负荷的迅猛增长，构建交直流混合配电系统已成为提升能效和简化供配电架构的重要趋势。在这一新兴架构中，PET凭借其天然的多端口交直流变换能力，成为连接不同电能形式、实现能量高效互济的理想枢纽^[2]。PET可以同时接入中压交流配电网、低压交流负荷母线以及一个或多个直流母线（如用于光伏、储能或直流负荷），在其内部完成多种形式电能之间的灵活、高效转换。这种一体化的设计不仅避免了传统方案中需要分别配置多个独立AC/DC和DC/AC变换器所带来的系统复杂性、额外损耗和高昂成本，还通过集中协调控制，实现了全局能量的最优调度，为交直流混合配电网的经济、可靠运行提供了坚实的技术支撑。

2.3 电能质量综合治理中心

在工业聚集区或大型商业中心，大量非线性电力电子负荷（如变频驱动器、电弧炉、开关电源等）的运行会向电网注入丰富的谐波电流并消耗大量无功功率，严重恶化公共连接点的电能质量。将PET部署于此类区域的供电入口，可将其打造为一个功能强大的电能质量综合治理中心。通过对其输出级逆变器的电流进行精密闭环控制，PET能够实时检测负载电流中的谐波分量与无功分量，并生成与之大小相等、相位相反的补偿电流注入电网，从而在源头上抵消这些有害成分，实现近乎单位功率因数的运行和极低的总谐波畸变率。此外，针对三相负载严重不平衡的问题，PET能够对每一相的输出电流进行独立调控，有效平衡三相电流，改善系统的不对称度，为精密制造、数据中心等对电能质量要求严苛的用户提供高品质的电力保障。

2.4 柔性互联与区域协同

在城市核心负荷密集区或工业园区，多条配电网馈线之间常因负荷分布不均而出现部分线路过载、另一些线路轻载的状况，且单一馈线故障可能导致大范围停电。基于PET构建的柔性多状态开关（SOP）为此类问题提供了创新的解决方案。它取代了传统的机械式联络开关，在正常运行状态下，能够主动、连续地调节馈线间的潮流分布，实现负载均衡，充分挖掘现有电网资产的输送潜力。一旦某条馈线发生故障，SOP能够在毫秒级时间内快速隔离故障区域，并通过其电力电子接口将非故障区域的负荷无缝转供至相邻健康馈线，从而将停电范围和时间降至最低，显著提升供电可靠性。进一步地，PET还可作为微电网与主网之间，乃至多个微电网相互之间的

智能接口，协调各自自治单元的运行状态，实现更大时空尺度下的源-网-荷-储资源优化配置与协同互动，支撑区域综合能源系统的高效运行。

3 PET的关键技术挑战与解决方案

3.1 高频磁性元件设计与制造

高频变压器作为PET实现电气隔离与功率传输的核心部件，其设计与制造构成了技术攻关的重点。在数十至数百千赫兹的高频工作条件下，磁芯材料的铁损（包括涡流损耗和磁滞损耗）会急剧增加，同时绕组中的趋肤效应和邻近效应也会导致铜损显著上升，这不仅降低了系统效率，还带来了严峻的散热挑战。此外，在高dv/dt的开关应力下，高频变压器的绝缘设计也变得异常复杂。为应对这些挑战，研究者们一方面致力于开发和应用超薄硅钢片、非晶/纳米晶合金以及高性能铁氧体等低损耗磁芯材料；另一方面，通过采用利兹线、箔式绕组乃至印刷电路板（PCB）平面变压器等先进绕组结构来有效抑制高频下的附加损耗。在拓扑层面，引入LLC谐振或双有源桥（DAB）等具备软开关特性的电路，可以在降低开关器件应力的同时，间接缓解对磁性元件性能的苛刻要求^[3]。与此同时，借助电磁-热-力多物理场耦合仿真工具进行精细化设计，并发展高精度、自动化的绕制与真空灌封工艺，是确保高频变压器性能与可靠性的关键路径。

3.2 宽禁带半导体器件的应用

宽禁带（WBG）半导体器件，特别是碳化硅（SiC）MOSFET和氮化镓（GaN）HEMT，是推动PET性能跃升的关键使能技术。与传统的硅基IGBT相比，WBG器件拥有更高的开关频率、更低的导通与开关损耗、更高的工作结温以及更强的耐压能力。这些优异特性使得PET得以在更高频率下运行，从而进一步缩小磁性元件和滤波电容的体积，大幅提升系统功率密度；同时，系统整体效率也能获得1至3个百分点的显著提升。然而，WBG器件的广泛应用也带来了新的挑战，其高速开关特性对驱动电路的设计、电磁兼容（EMC）防护以及封装技术都提出了更高要求。此外，尽管成本正在持续下降，但WBG器件的价格目前仍高于成熟的硅基器件，这在一定程度上制约了PET的经济性。因此，围绕WBG器件的驱动保护、可靠性评估以及成本优化的研究仍是当前的热点。

3.3 先进调制与分层协调控制策略

PET作为一个包含多个时间尺度和强耦合子系统的复杂电力电子装置，其高性能运行高度依赖于先进而鲁棒的控制策略。在调制层面，针对广泛应用于中高压PET的模块化多电平换流器（MMC），需要研究适用于低开关频率工况下的最近电平逼近调制（NLM）及其改进算法，

以在保证输出波形质量的同时,有效均衡各子模块电容电压。对于隔离级常用的双有源桥(DAB)拓扑,则需探索移相控制、PWM加移相等混合调制策略,以期在全负载范围内实现软开关,最大限度地降低损耗^[4]。在控制架构上,通常采用分层协调的控制体系。底层负责各功率单元(如子模块、H桥单元)的快速电压或电流内环控制;中层则聚焦于实现PET的核心功能,包括输入级的单位功率因数控制、隔离级的功率前馈与稳压控制、输出级的高质量电压/电流跟踪以及集成的电能质量治理算法;上层控制则负责与配电网的能量管理系统(EMS)进行信息交互,接收来自上层的调度指令,使PET能够积极参与系统级的优化运行,例如削峰填谷、电压无功协同优化(VVO)等,从而最大化其在智能配电网中的价值。

3.4 故障穿越与保护机制

作为由大量脆弱的半导体开关器件构成的电力电子系统,PET的短路耐受能力和过载能力远逊于坚固的电磁式变压器,因此必须构建一套完善、快速的故障穿越与保护机制。对于内部故障,例如子模块电容失效或功率开关管发生开路/短路,系统需要通过硬件冗余设计、在线故障诊断算法以及容错控制策略,确保在部分单元失效的情况下,PET仍能降额运行或安全有序地停机,避免故障扩大。对于外部电网故障,如配电网侧发生短路导致电压骤降,PET必须具备低电压穿越(LVRT)能力,通过快速切换至限流控制模式,维持与电网的连接并向系统提供必要的无功或有功支撑,防止因大规模电力电子设备连锁脱网而引发更严重的系统稳定性问题。同样,在电网电压异常升高时,高电压穿越(HVRT)能力也至关重要。

此外,PET内部基于电力电子器件的微秒级快速保护动作,必须与上游传统继电保护装置的动作时限和逻辑进行精心协调,以避免出现保护误动或拒动,确保整个配电系统的保护选择性与可靠性。

4 结语

电力电子变压器作为智能配电网的核心装备,以其卓越的灵活性、可控性和多功能性,为解决高比例可再生能源接入、电能质量恶化、交直流负荷共存等现代配电网难题提供了革命性的技术路径。本文系统论述了PET的拓扑原理、应用场景,并深入剖析了其在高频磁技术、宽禁带半导体、先进控制、故障保护等方面的关键技术挑战与应对策略。尽管在成本、可靠性和标准化方面仍面临挑战,但随着相关技术的持续突破和示范工程的积累,PET必将在构建清洁低碳、安全高效、灵活智能的未来配电网中扮演不可或缺的角色,成为能源互联网时代的关键基石。

参考文献

- [1]张文涵.应用于智能配电网的电力电子变压器研究[D].天津大学,2020.DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.003977.
- [2]辛彤,刘洪正,刘强.“双碳”目标下新型电力电子变压器行业信用分级与市场准入机制研究[J].中国信用,2025,(11):72-75.
- [3]李岳华,王帅,马卓然,等.基于混合电力电子变压器的配电网潮流优化调控方法[J].中国电力,2025,58(10):171-179.
- [4]季振东,王亚祥,李东野,等.电力电子变压器参与配电网调压调频的应用研究[J].太阳能学报,2024,45(06):182-190.