

电气工程中的电力传输与配电技术

陈菲讯

广东雷能电力集团有限公司 广东 湛江 524000

摘要：电力传输以不同电压等级网络为骨架，关键技术包括 HVDC 与 FACTS 等，需优化损耗与效率。配电核心有配电网构成、自动化监控及分布式电源接入等。输配需协同优化，包括协调规划、潮流控制及提升可靠性与电能质量。未来趋势是智能化等转型，面临高比例可再生能源接入等挑战，需构建多层次技术协同创新体系应对。

关键词：电气工程；电力传输；配电技术

引言

电力传输与配电作为电力系统的核心环节，其技术发展直接影响能源供应的可靠性与经济性。当前，随着能源转型加速，特高压输电、柔性交流输电、分布式电源与微电网等创新技术不断涌现，推动输配电网向智能化、绿色化方向演进。然而，高比例可再生能源接入、电力电子设备规模化应用及网络安全风险等挑战日益凸显，亟需通过输配协同规划、潮流优化控制及多层级电能质量治理等技术路径实现突破。本文系统梳理电力传输与配电技术的演进逻辑、协同机制及未来趋势，为新型电力系统建设提供理论支撑。

1 电力传输技术概述

1.1 传输网络结构与电压等级

电力传输网络以输电线路与变电站为核心构成骨架，依据电压等级划分为高压（110kV - 220kV）、超高压（330kV - 750kV）及特高压（1000kV及以上交流、 ± 800 kV及以上直流）三个层级。其中，高压输电主要承担区域电网内的电力分配任务；超高压输电作为跨省电力输送的主通道，通过提升电压等级降低线路电流，实现大容量电能的经济传输；特高压输电则凭借其超远距离、超大容量的技术优势，将输电损耗控制在3%以内，成为构建全国统一电力市场的关键支撑。输电线路采用架空与电缆两种形式：架空线路以低成本、易维护见长，但易受气象条件影响；电缆线路则凭借占地小、抗干扰强的特性，广泛应用于城市核心区及特殊地理环境^[1]。

1.2 电力传输的关键技术

电力传输领域的关键技术体系以高压直流输电（HVDC）与柔性交流输电（FACTS）为核心，二者共同构建起现代电网高效、灵活、稳定的输电骨架。高压直流输电技术凭借其独特的点对点输电特性，在远距离、大容量电力输送场景中展现出显著优势：其采用直流电传输模式，不仅可规避交流输电中的感抗损耗与无功功率流动问题，使线路走廊利用率提升30%以上，还能有效隔离不

同频率或相位交流系统的互联风险，实现跨区域电网的异步稳定并网。柔性交流输电技术则通过晶闸管、IGBT等电力电子器件的快速开关特性，实现对输电线路阻抗、相位、电压等参数的实时动态调节，其代表装置如静止无功补偿器（SVC）可实现毫秒级无功功率响应，晶闸管控制串联电容器（TCSC）则能灵活调节线路电抗，二者协同作用可提升线路输送容量20%-40%，同时显著抑制电压波动与低频振荡，增强系统抗扰能力。

1.3 传输过程中的损耗与效率优化

电力传输过程中的损耗主要包括电阻损耗、电晕损耗和电磁感应损耗等。电阻损耗与电流平方成正比，降低输电电流是减少电阻损耗的关键，通过提高输电电压可实现这一目标；电晕损耗在高压输电线路中较为明显，可通过优化导线结构（如采用分裂导线）、增加导线直径等方式减少；电磁感应损耗主要存在于电缆线路中，合理设计电缆敷设方式和屏蔽层可降低其影响。此外，采用高效变压器、加强输电线路维护等措施也能提升传输效率。

2 配电技术核心内容

2.1 配电网的构成与运行特点

配电网作为电力系统中连接变电站与终端用户的关键环节，承担着将电能安全、高效分配至千家万户的重任。其核心构成包括配电线路（架空或电缆）、配电变压器（实现电压变换）、开关设备（控制电路通断）及无功补偿装置（提升功率因数）等关键设备。运行上，配电网呈现显著特点：网络拓扑复杂，具有多级分支且负荷分布广泛；负荷类型涵盖工业大用户、商业综合体及居民生活用电等，导致负荷波动性强、峰谷差大；同时，对供电可靠性（如SAIDI、SAIFI等指标）和电能质量（电压偏差、谐波等）要求严苛，任何局部故障均可能引发用户停电。按电压等级划分，配电网分为高压（10kV-35kV）、中压（0.4kV-10kV）和低压（220V/380V）三级，各级网络在拓扑结构、设备选型及

保护配置等方面存在差异化设计,以适应不同电压等级下的供电需求与运行约束。

2.2 配电自动化与监控技术

配电自动化技术深度融合计算机、通信及控制技术,构建起对配电网全环节的智能化管控体系。其核心功能涵盖实时监测电网运行状态、精准定位故障区段、快速隔离故障并恢复非故障区域供电,从而显著提升配电网的运行效率与供电可靠性。该技术体系主要由配电管理系统(DMS,负责全局数据整合与优化调度)、馈线自动化(FA,实现馈线级故障自愈)、远程终端单元(RTU,执行数据采集与远程控制)等关键模块构成。配套的监控技术则依托部署于配电设备上的高精度传感器与监测装置,实时采集电压、电流、功率、开关状态等关键参数,并通过高速通信网络将数据汇聚至监控中心。管理人员可借助可视化监控界面,全面掌握配电网实时运行态势,快速识别潜在异常,及时采取调控措施,确保电网安全稳定运行。

2.3 分布式电源与微电网接入技术

在可再生能源大规模开发利用的背景下,分布式电源(包括光伏发电、风力发电、储能系统等)在配电网中的渗透率持续攀升。此类电源的接入打破了传统配电网“单向辐射”的潮流分布模式,导致功率双向流动成为常态,进而对配电网的规划布局、保护配置、协调控制及电能质量治理提出全新挑战。微电网作为一种集成分布式电源、储能装置、可控负荷及智能控制系统的局部供电网络,具备与主网灵活交互(并网运行)或自主供电(孤岛运行)的双重能力,可显著提升分布式能源的本地消纳效率,并增强配电网在极端工况下的供电韧性。当前,分布式电源与微电网接入技术的研发重点聚焦于多源并网协同控制策略、继电保护装置的适应性改造、谐波与电压波动等电能质量问题的主动治理,以及微电网与主网间的无缝切换技术等关键领域^[2]。

3 电力传输与配电的协同与优化

3.1 输配电网的协调规划

输配电网的协调规划是构建高效、可靠电力系统的核心环节,其本质在于实现输电网与配电网在物理架构与运行逻辑上的深度耦合。规划过程中,需统筹电源出力特性、负荷时空分布、网络拓扑约束等多元要素,确保输电网的输电容量、电压支撑能力与配电网的负荷承载能力、供电质量需求形成动态匹配。具体而言,输电网规划应基于电源集散特征与跨区输电需求,科学预留输电走廊及变电容量裕度,为配电网提供稳定可靠的电力输入;配电网规划则需紧密衔接输电网供电能力,通过优化变电站选址、馈线布局及分段开关配置,构建“手拉手”环网或“网格化”供电结构,提升负荷转供

与故障自愈能力。通过输配协同规划,可有效避免网络重复建设、设备利用率失衡等问题,显著提升电力系统全生命周期的经济性与运行可靠性。

3.2 电力潮流的协同控制

电力潮流的精准调控是保障输配电网安全经济运行的核心手段。通过构建输配协同的潮流控制体系,可实现全电压等级电网的功率动态优化。在输电层面,依托柔性交流输电系统(FACTS)装置(如SVC、STATCOM等)的快速响应特性,实时调节关键输电通道的潮流分布,有效抑制线路过载风险及电压波动越限,提升电网输送能力;在配电层面,通过分级投切电容器组、电抗器等无功补偿设备,结合分布式电源的主动出力调节和储能装置的充放电策略,实现局部网损最小化与电压质量改善。进一步地,基于广域测量系统(WAMS)的实时数据交互,可构建输配电网潮流的联合优化模型,通过协调控制各层级可控资源,实现功率的跨区域动态平衡,显著提升电力系统整体运行效率与抗扰动能力^[3]。

3.3 可靠性与电能质量的协同提升

电力系统的可靠性与电能质量提升需通过输配环节的深度协同实现。在输电侧,采用差动保护、自适应重合闸等智能继电保护技术,结合相量测量单元(PMU)的广域同步监测,可快速识别并隔离输电故障,最大限度限制故障扩散范围,降低对配电系统的冲击;同时,通过灵活交流输电(FACTS)装置的动态电压支撑,有效抑制电压波动与频率偏差,保障输电通道的电能质量基准。在配电侧,依托配电自动化系统的故障自愈功能,实现馈线故障的秒级定位、隔离与非故障区域自动恢复供电,显著缩短用户停电时间;针对谐波污染、三相不平衡等配电侧特有质量问题,通过部署有源电力滤波器(APF)、静止无功发生器(SVG)等补偿设备,结合分布式电源的谐波源主动治理,构建多层级电能质量净化体系,全面提升用户端供电质量。

4 电力传输与配电技术的发展趋势与挑战

4.1 未来发展趋势

未来,电力传输与配电技术将深度融合智能化、信息化与绿色化转型需求,构建新型电力系统技术体系。智能电网技术将成为核心支撑,通过部署物联网感知终端与数字孪生平台,实现输配电网设备状态全息感知、运行工况实时映射及控制策略自适应优化;大数据与人工智能技术将深度渗透至电力系统全链条,基于多源数据融合的负荷精准预测、基于深度学习的故障智能诊断、基于强化学习的运行优化调度等技术将显著提升系统决策水平。特高压输电技术将持续突破,通过柔性直流输电、超导电缆等创新方案,进一步拓展远距离、大容量电力输送的经济性与可靠性边界。分布式能源与微电网

技术将加速规模化应用，配合虚拟电厂聚合调控模式，推动能源生产与消费的双向互动。同时，电力电子化设备占比将大幅提升，借助模块化多电平换流器（MMC）、智能软开关（SOP）等装备，实现系统灵活性与可控性的质的飞跃。

4.2 面临的主要挑战

电力传输与配电技术的创新发展正遭遇多重复杂挑战。高比例可再生能源的接入，使系统运行特性发生深刻变化，其间歇性与波动性对输电网的调频调压及惯量支撑能力提出极高要求，传统电网的平衡机制亟待创新升级。同时，电力电子设备的大规模应用，使系统呈现强非线性特征，谐波谐振、宽频振荡等新型电能质量问题不断涌现，迫切需要高效的动态无功补偿和宽频带监测等治理技术。随着电网数字化程度的提升，网络攻击面扩大，数据泄露、控制指令篡改等安全风险显著增加，构建全方位的安全防护体系刻不容缓。此外，老旧电网设备改造面临技术迭代、资产置换和停电协调等多重难题，需平衡经济性与可靠性，制定差异化升级策略。最后，跨区域、跨电压等级电网的协同运行缺乏统一标准，调度控制、市场交易等环节存在机制障碍，制约了系统整体效能的发挥^[4]。

4.3 应对挑战的技术路径

为系统性破解电力传输与配电技术发展难题，需构建多层次技术协同创新体系。在可再生能源消纳方面，加速推进锂离子电池、液流电池、压缩空气储能等多元储能技术的规模化应用，结合虚拟电厂聚合调控技术，提升系统对波动性电源的灵活调节能力；针对电力电子化引发的电能质量问题，研发宽禁带半导体器件及高鲁棒性控制算法，构建涵盖谐波源辨识、动态补偿装置协

同的治理体系；在网络安全领域，采用量子加密通信、基于人工智能的入侵主动防御等前沿技术，构建覆盖全场景的电力网络安全免疫系统；通过部署智能传感器与数字孪生平台，实现电网设备的状态全息感知与预测性维护，延长设备生命周期；同时，加快制定涵盖设备接口、通信协议、控制策略的统一技术标准，推动输配电网、微电网及分布式能源的互联互通与协同优化，最终实现电力系统安全、高效、绿色运行。

结束语

电力传输与配电技术作为能源体系的核心支柱，正经历着智能化、绿色化与数字化的深度变革。面对高比例可再生能源接入、电力电子化设备普及、网络安全威胁加剧等多重挑战，唯有通过技术创新与机制协同双轮驱动，加速储能技术突破、电能质量治理体系完善、网络安全防护升级及设备智能化改造，同时推动跨区域电网标准化建设与虚拟电厂等新型运营模式落地，才能实现输配环节的高效耦合与系统整体效能跃升。未来，随着多元技术融合与产业生态重构，电力传输与配电技术将向更加灵活、可靠、低碳的方向持续演进，为构建新型电力系统与实现“双碳”目标提供坚实支撑。

参考文献

[1]李华. 数字化电力分配与传输系统的发展趋势[J]. 电力工程技术, 2020, 39(12): 65-71.

[2]刘伟, 杨静. 大数据分析在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 28-34.

[3]蔡来梅. 电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (01): 5-7.

[4]刘冰欣. 电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用[J]. 光源与照明, 2024, (12): 201-203.