

# 电力工程技术在智能电网建设中的应用

赵俊

杭州益瑞电力科技有限公司 浙江 杭州 311115

**摘要：**本文旨在系统性地探讨电力工程技术在智能电网建设中的关键应用。文章首先阐述了智能电网的基本内涵、核心特征及其发展背景，继而从输电、变电、配电、用电及信息通信五大核心环节出发，深入剖析了柔性交流输电技术（FACTS）、特高压输电技术（UHV）、智能变电站技术、配电自动化技术（DA）、高级量测体系（AMI）、分布式能源并网技术以及信息物理融合系统（CPS）等关键技术的应用。最后，文章指出了当前技术应用面临的挑战，并对未来发展趋势进行了展望，以期为我国乃至全球智能电网的高质量、可持续发展提供理论参考与实践指导。

**关键词：**智能电网；电力工程技术；柔性输电；智能变电站；配电自动化；高级量测体系

## 引言

21世纪，人类面临能源安全、环保与气候变化挑战。在此背景下，风能、太阳能等可再生能源大规模接入电网，电动汽车等新型负荷涌现，用户对供电需求日益多样。这些变革给传统电网的规划、运行与管理带来严峻考验，传统电网在信息感知、灵活调控等方面存在短板，难以适应新常态。智能电网应运而生，它融合先进传感测量、信息通信等技术，目标是实现电网“安全、可靠、经济、高效、环境友好和使用安全”。智能电网是电网的技术革命，也是构建新型电力系统的关键基础设施。电力工程技术作为电网的物理支撑，内涵与外延不断拓展，融入数字化等元素。系统梳理并深入研究其在智能电网各环节的应用，对把握技术方向、攻克瓶颈、推动电网转型升级意义重大，本文将围绕此主题全面论述。

## 1 智能电网的核心内涵与技术架构

智能电网区别于传统电网，核心特征显著：自愈性可预警故障并快速恢复供电；互动性实现电网与用户双向交互，用户能主动参与调节；兼容性安全接纳各类分布式能源，助力能源绿色转型；高效性通过精细调度提升全系统能效；集成性让电力、信息、业务流高度融合，形成有机整体。其技术架构分物理、信息、应用三层<sup>[1]</sup>。物理层是电网实体，含发电厂、线路等，是电力工程发挥作用的主战场；信息层由传感器、通信网络和数据中心构成，负责数据采集、传输与存储，为决策提供支撑；应用层基于信息层数据，通过软件和系统实现优化控制与管理。电力工程技术不仅作用于物理层，还通过多种方式深度渗透至信息与应用层，成为连接三者的关键纽带，赋予智能电网灵活性与智能性。

## 2 电力工程技术在智能电网各环节的应用

### 2.1 在输电环节的应用：构建坚强灵活的骨干网架

#### 2.1.1 柔性交流输电技术（FACTS）

该技术通过在输电线路上部署基于大功率半导体器件的动态控制器，如静止同步补偿器（STATCOM）、晶闸管控制串联电容器（TCSC）或统一潮流控制器（UPFC），能够对线路电压、阻抗和相角进行毫秒级的连续调节，从而实现对潮流分布的精准、动态控制。这种能力使得电网运营商可以在不新建输电走廊的前提下，充分挖掘现有线路的输电潜力，有效缓解局部阻塞问题。更重要的是，FACTS装置能够快速提供无功支撑，抑制电压波动与闪变，并有效阻尼区域间的低频功率振荡，显著增强系统的暂态与动态稳定性。在我国华北-华中电网互联工程中，UPFC的成功投运便是一个典型范例，它不仅实现了联络线潮流的灵活调控，还大幅提升了两大区域电网之间的互济能力与安全裕度，充分展现了FACTS技术在构建灵活坚强骨干网架中的核心价值。

#### 2.1.2 特高压输电技术（UHV）

特高压输电技术是我国为应对能源资源与负荷中心逆向分布这一基本国情而自主创新的重大电力工程成就，涵盖1000千伏交流与 $\pm 800$ 千伏乃至 $\pm 1100$ 千伏直流输电系统。该技术凭借其输电容量大、距离远、损耗低、占地省等显著优势，已成为构建国家能源互联网的物理骨干。在智能电网框架下，特高压不仅承担着“西电东送、北电南供”的能源输送重任，更是支撑大规模可再生能源跨区域消纳的关键通道。西部和北部地区丰富的风、光资源通过特高压直流通道被高效、低损地输送到东部沿海负荷中心，为实现“双碳”战略目标提供了坚实保障<sup>[2]</sup>。与此同时，现代特高压工程已不再是孤立的输

电设施，而是深度集成了世界领先的监控保护系统、广域测量系统（WAMS）与智能调度接口。其运行状态数据可实时上传至国家级调度中心，参与全网的优化调度与安全校核，从而成为智能电网全局协同运行不可或缺的组成部分。

## 2.2 在变电环节的应用：打造智能化的枢纽节点

### 2.2.1 智能变电站技术

智能变电站采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为核心要求，不仅能够自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，还可根据需要提供支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策与协同互动等高级应用。其实现路径在于一次设备与二次系统的深度融合。一方面，通过将光学互感器、局放传感器、温度传感器等感知单元直接嵌入变压器、断路器、GIS等一次设备内部，实现了对设备本体状态的实时、精准感知；另一方面，依托IEC61850国际标准，构建全站统一的信息模型与高速通信网络（如SV/GOOSE网络），彻底取代了传统繁杂的电缆硬接线，实现了信息的“即插即用”与高效共享。在此基础上，智能变电站能够开展顺序控制（一键顺控）、智能告警、故障综合分析、设备状态检修等一系列高级应用，不仅极大提升了运维人员的工作效率与安全性，也使得变电站本身成为一个具备感知、计算、决策与执行能力的智能体，为上层电网的智能调度与自愈控制提供了坚实的数据与执行基础。

## 2.3 在配电环节的应用：实现精益化与自愈化

### 2.3.1 配电自动化技术（DA）

配电自动化技术利用现代电子、计算机、通信与控制技术，对配电网进行离线与在线的智能化监控管理，旨在使配电网始终处于安全、可靠、优质、经济、高效的运行状态。其核心在于馈线自动化（FA）系统的构建，该系统通过在馈线上广泛部署智能终端（如FTU、DTU），并与主站系统协同工作，能够在发生故障时迅速完成故障区段的定位、隔离，并自动恢复非故障区域的供电，真正实现了配电网的“自愈”功能。这一能力将城市核心区的故障平均恢复时间从传统的小时级大幅缩短至分钟级，显著改善了用户的用电体验。此外，配电网SCADA系统为运行人员提供了全景可视化的监控界面，实现了对开关、变压器等关键设备的遥信、遥测、遥控与遥调<sup>[3]</sup>。在此基础上发展而来的高级配电管理系统（ADMS），进一步集成了网络重构、电压无功优化（VVO）、分布式能源管理等高级功能，使得配电网能

够从开环监控走向闭环优化运行，为应对高比例分布式电源接入带来的复杂运行挑战提供了有力工具。

### 2.3.2 分布式能源并网与微电网技术

随着屋顶光伏、小型风电、储能系统等分布式能源（DERs）的爆发式增长，配电网正从传统的无源网络向有源网络演进。如何安全、有序、高效地接纳这些分散、间歇性的电源，成为配电环节面临的核心挑战。为此，一系列新的电力工程技术应运而生。现代并网逆变器已不仅是简单的能量转换装置，更是具备无功调节、低电压穿越（LVRT）、孤岛检测等“电网友好”特性的智能接口，能够在电网异常时主动支撑系统稳定。微电网技术则将地理上邻近的分布式电源、储能与负荷整合为一个小型自治系统，可在并网与孤岛两种模式下无缝切换，其核心在于微电网能量管理系统（MG-EMS）与先进的协调控制策略，确保内部功率实时平衡，并与主网平滑互动。更进一步，虚拟电厂（VPP）技术通过先进的信息通信与聚合控制算法，将海量、分散的DERs、可控负荷与储能资源聚合为一个可调度的整体，使其能够像传统电厂一样参与电力市场竞价与电网辅助服务，从而释放出巨大的灵活性价值，为构建未来高弹性、高韧性的有源配电网奠定了技术基础。

## 2.4 在用电环节的应用：促进供需互动与能效提升

### 2.4.1 高级量测体系（AMI）

高级量测体系（AMI）是智能电网的“神经末梢”，其核心载体是智能电表。与传统机械表仅能记录累计电量不同，智能电表集成了强大的通信与数据处理能力，不仅能精确计量电能，还能实现双向通信、远程抄表、分时电价计量、电能质量监测乃至停电事件自动上报等多种功能。这些能力为用户提供了前所未有的用电透明度，使其能够清晰了解自身的用电习惯与费用构成，从而做出更理性的用电决策<sup>[4]</sup>。更重要的是，AMI为电网公司实施需求侧响应（DSR）策略提供了技术基础。通过向用户发送实时电价信号或直接控制指令，电网可以引导用户在系统高峰时段减少非必要用电，或在低谷时段增加用电（如为电动汽车充电），有效实现削峰填谷，提升电网整体运行效率。此外，海量的AMI数据也成为开展能效诊断、节能改造、智能家居联动等综合能源增值服务的重要基石，开启了能源服务从“产品导向”向“服务导向”转型的新篇章。

### 2.4.2 电动汽车（EV）与电网互动（V2G）技术

电动汽车的大规模普及对电网既是挑战也是机遇。一方面，无序的集中充电可能加剧电网峰谷差，带来局部过载风险；另一方面，电动汽车庞大的电池组构成了

一个潜在的、分布式的移动储能网络。V2G (Vehicle-to-Grid) 技术正是挖掘这一机遇的关键。它允许具备双向充放电能力的电动汽车在停放期间,根据电网的实时需求,将其电池中的电能反向输送回电网,从而作为一种宝贵的灵活性资源参与系统调频、备用等辅助服务。这一愿景的实现,依赖于双向充电桩、先进的电池管理系统(BMS)以及与电网调度系统深度协同的控制算法等一系列电力工程技术的支撑。V2G不仅有助于提升电网对可再生能源的消纳能力,也为电动汽车用户创造了新的收益来源,是未来车网融合(VGI)生态体系的核心技术支柱。

### 3 面临的挑战与未来发展趋势

#### 3.1 面临的挑战

尽管电力工程技术在智能电网建设中取得了丰硕成果,但仍面临诸多深层次挑战。未来电网将演变为电、热、冷、气、氢等多能耦合的综合能源系统,如何实现跨能源品种的协同规划、运行与市场交易,对现有电力工程技术体系提出了更高要求。同时,高比例电力电子设备的接入,虽然带来了灵活性,但也改变了电网的动态特性,引发了宽频带振荡、谐波谐振等新型稳定性问题,亟需发展新的分析方法与控制策略。此外,信息物理系统的深度融合使得网络安全与物理安全界限模糊,安全防护必须从传统的“IT安全”思维转向覆盖生产控制大区的“OT安全”新范式。最后,不同厂商、不同年代设备间存在的标准不统一、接口不兼容问题,严重制约了系统整体效能的发挥。

#### 3.2 发展趋势

数字孪生(DigitalTwin)技术将被广泛应用于电网的全生命周期管理,通过在数字世界中构建物理电网的精准映射,实现规划方案的仿真推演、运行状态的实时镜像与故障风险的超前预警。人工智能(AI)将在负荷预测、设备故障诊断、电网调度决策、智能运维等领域发挥核心引擎作用,推动电网从“自动化”向具备自主

学习与决策能力的“自主化”阶段演进。新材料与新器件的突破,特别是宽禁带半导体(如碳化硅SiC、氮化镓GaN)的规模化应用,将进一步提升电力电子装备的效率、功率密度与可靠性,催生新一代高性能电网装备。最终,“云-边-端”协同的智能架构将成为主流,计算任务将在云端、边缘节点(如变电站、配电房)和终端设备之间进行合理分配,以实现响应速度与计算能力的最佳平衡,为构建一个更加坚强、智能、绿色、高效的现代化电网提供持续动力。

### 4 结语

电力工程技术是智能电网建设的根基与引擎。从特高压骨干网架的构建,到智能变电站的落地,再到配电自动化和高级量测体系的普及,每一项关键技术的突破与应用,都在重塑着电网的形态与能力。它们不仅解决了传统电网面临的瓶颈问题,更为大规模可再生能源消纳、用户深度互动、能源互联网构建等未来愿景铺平了道路。面对能源革命与数字革命交汇的历史机遇,我们必须持续推动电力工程技术的原始创新与集成创新,加强其与信息、通信、控制、材料等学科的交叉融合,着力攻克高比例新能源接入、多能协同、网络安全等关键难题。唯有如此,才能建成一个更加坚强、智能、绿色、高效的现代化电网,为经济社会高质量发展和“双碳”战略目标的实现提供坚实的能源保障。

### 参考文献

- [1]孙鹏亮.电力工程技术在智能电网建设中的应用[J].办公自动化,2025,30(19):120-122.
- [2]赵鑫.电力工程技术在智能电网建设中的应用[J].光源与照明,2025,(09):239-241.
- [3]刘杰.电力工程技术在智能电网建设中的应用研究[J].光源与照明,2025,(06):245-247.
- [4]张燕,汤如伟.智能电网建设中电力工程技术应用分析研究[J].电力设备管理,2025,(09):197-199.