

# 电力系统中柔性变电站的关键技术及发展趋势

文 / 刘涛 国网安徽省电力有限公司泾县供电公司

徐永超 国网安徽省电力有限公司泾县供电公司

**摘要：**柔性变电站在现代电力系统中扮演着至关重要的角色。随着可再生能源发电规模的持续扩张，以及用电需求曲线的日益复杂，传统变电站面临调节灵活度不足、系统互联性不佳等难题。通过应用高压电力电子技术与先进的控制策略，柔性变电站可在不同运行模式下实现快速切换与自适应调度，同时有效应对多源并网带来的冲击与波动。高性能的换流装置、可控阻抗及能量路由等关键环节，为电力系统提供更宽范围、更高精度的动态支撑。配合智能化监测平台与大数据分析手段，柔性变电站的运行可靠性与经济效益均得以提升。本文将从关键技术原理、网络互联方案、控制策略优化与未来发展趋势四个方面展开探讨，希望为推动柔性变电站在新型电力系统中的广泛应用提供参考与思路。

**关键词：**柔性变电站；电力电子；可再生能源；控制策略；系统互联

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.111

## 引言

电力系统正经历深刻的结构性调整，分布式可再生能源与储能技术的迅猛发展，使电网运行工况趋于复杂。传统变电站虽能满足基本输配电需求，但在应对多方向潮流、高频率波动以及多样化负荷时显得力不从心。柔性变电站依托电力电子器件与智能控制，可在较短响应时间内实现电网的动态调节，平衡发电与负荷波动，提升系统整体的稳定性。柔性变电站以多功能交直流电力电子变压器（power electric transformer, PET）为核心，融合控制保护技术、信息通信技术以及先进计算技术，高度集成多种设备功能，可以实现能量传输、电网调控和负荷调控功能，具有潮流柔性控制、可再生能源“即插即用”、交直流及分级供电、负荷控制、无功电压灵活控制、高度智能集成等优越性能。<sup>[1]</sup>针对此演化趋势，本文将聚焦柔性变电站的关键技术以及前沿发展动向，为后续研究与实践提供启示。

### 一、柔性变电站的核心技术基础

#### （一）功率电子器件与高压变换技术

功率电子器件是柔性变电站的核心组成部分，其性能直接决定了电能变换的效率与稳定性。在高压变换领域，器件的耐压特性与高频性能匹配是关键因素。通过采用先进的绝缘栅双极型晶体管（IGBT）及其升级版，如碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）器件，可实现高频下的高压转换。这些器件具备低开关损耗、高耐压和快速响应的特性，能够在复杂电网条件下保证变换过程的可靠性。同时，多级拓扑结构在高压变换中是利用模块化多电平变换器（MMC），可将高压电流分解为多级低压波形，从而有效抑制谐波，降低设备的散热需求并提升整体效率。在变换器的控制方面，脉宽调制（PWM）技术成为不可或缺的一部分。通过调整开关的通断时间，PWM技术能够精确控制输出电压与频率，满足动态负载的需求。高压变换技术还需配合完善的散热与保护机制，以应对频繁切换与高负载运行环境下可能出现的热失效与短路风险。

#### （二）先进控制算法与数字化系统

柔性变电站需要高度智能化的控制算法以应对电网复杂性与多变性。预测控制与自适应算法在这一领域得到了广泛应用。预测控制基于数学模型，能够根据当前状态与历史数据预测系统的未来行为，从而提前调整控制参数，优化功率分配与电压稳定。自适应算法则通过实时调整控制策略，适应动态变化的电网条件，如负荷波动与故障扰动。这两种算法的结合能够显著提升柔性变电站在多源环境中的响应速度与稳定性。<sup>[2]</sup>数字化系统作为算法执行的载体，提供了全局协调与实时联动的基础。通过分布式控制模块与中央监测平台的协作，数字化系统能够实现的关键节点的联动监测与状态评估。

#### （三）模块化设计与可扩展结构

模块化设计的目的是实现功能的高灵活性与升级的低成本化。采用标准化单元与可插拔接口，可使系统在安装、维护与扩展时更加高效。不同模块可独立运行，故障模块能够迅速被替换，而无需影响整个系统的正常运作。这种设计显著提升了柔性变电站的可用性与运行效率。可扩展结构为系统的长期发展提供了保障。通过模块化设计，各电压等级与负荷需求可在初期进行定制，同时保留未来扩展的接口，以应对负载增加或技术升级的需要。例如，在容量扩展场景中，新增模块可直接接入现有架构，无需对原系统进行大规模改造。可扩展结构为兼容不同种类的电网设备与新能源发电设施提供了可能性，还使柔性变电站能够适应更多样化的场景需求。

### 二、柔性变电站的网络互联与拓扑优化

#### （一）多端互联与潮流分配机制

柔性变电站的多端互联特性提升了区域电网的协调能力。在实际运行中，多个并网点之间的潮流协调是实现电网稳定与高效运行的关键。通过动态潮流分配机制，各并网点可以根据负载变化和电力需求进行实时调整。此调度方式不仅能够均衡馈线载荷，还有效降低了传输过程中的能量损耗。在区域电网的运行中，多端互联能

够形成冗余路径，当某一线路出现故障时，其他路径可迅速介入，恢复电力供应。<sup>[3]</sup>为进一步优化潮流分配，可以利用分布式控制策略与预测算法，实时计算最优的潮流分布方案。这一机制增强了电网的自愈能力。

### (二) 交直流混合网络结构设计

交直流混合网络在柔性变电站中是通过直流环节与交流网络的耦合特性，交直流混合网络结构能够充分发挥两者的优势。在直流环节中，电能可以以低损耗的方式在远距离传输，同时在交直流接口处实现灵活的功率转换。交流网络则为分布式能源与传统电力系统之间提供了可靠的连接路径。结合这两种特性，可以构建多层级的功率路由路径，将电力从高密度供电区输送至负载中心。在优化网架结构时，交直流混合网络能够缓解传统网架的阻塞问题，例如减少节点过载或线路拥堵情况的发生。通过引入先进的换流技术和功率路由算法，柔性变电站可以根据实时负载需求调节功率分配路径。交直流混合的动态调整能力不仅提升了电网资源的利用率，还为未来多能源系统的深度融合提供了拓展空间。

### (三) 分布式能源与储能接入策略

柔性变电站通过灵活的接入策略，使分布式能源能够更加高效地融入电网。在分散布局的微电网中，每个节点可以通过柔性接口实现与主网的无缝连接。接口支持双向电能流动，既可以将分布式能源的发电并入主网，又可以在负载高峰时从主网获取电力。储能单元在这一过程中扮演着关键角色，作为调节电网负荷与平衡供需的重要工具，储能单元能够存储过剩的可再生能源发电，并在用电高峰期释放能量，满足动态需求。<sup>[4]</sup>通过结合柔性变电站的智能化调度系统，可以实现分布式能源与储能单元的协同优化，提高了清洁能源的利用效率。

## 三、柔性变电站的关键控制与运行策略

### (一) 协同控制与多目标调度

柔性变电站的高效运行依赖于协同控制与多目标调度策略。协同控制与多目标调度策略的核心是整合电网中的多种控制要素，包括频率、电压和相角等，通过设计多目标优化模型实现系统的动态平衡。此调度方式需要充分考虑经济性与安全性的双重需求。例如，频率控制的精确度直接影响整个电网的稳定性，而电压调节则需要满足不同负载的动态需求。为了兼顾多个目标，优化模型通常采用启发式算法或深度强化学习方法，根据实时运行数据调整调度方案。协同控制还需要在各子系统之间实现信息的实时共享，以确保不同功能模块能够快速响应调度命令。

### (二) 动态补偿与电能质量提升

柔性变电站通过动态补偿技术，提升了电能质量。在复杂电网环境中，谐波干扰和电压波动是影响电能质量的主要问题。柔性变电站利用可控无功功率模块和先进滤波技术，能够快速抵御谐波干扰，保持电网的稳定运行。可控无功功率模块通过调整电网的无功功率输出，实现对电压水平的动态控制，从而有效减小电压波动范

围。滤波模块则通过高性能谐波抑制技术，滤除特定频率的电流或电压成分，改善电网的谐波环境。<sup>[5]</sup>动态补偿系统通常结合分布式传感网络，对关键节点的电能质量进行实时监测。此监测方式可以快速识别电压偏移或谐波升高等问题，并通过自动调整补偿策略恢复电网的平稳状态。

### (三) 故障自愈与紧急控制机制

面对突发故障，柔性变电站能够通过分布式监测诊断系统快速定位故障点，并隔离故障区域以避免其扩散至整个电网。其快速响应能力得益于实时数据采集与分析技术的应用。诊断系统可以基于故障波形特征与运行状态数据，精准判断故障类型与位置。在故障隔离后，柔性变电站通过快速切换机制调整电力流向，保障未受影响区域的持续供电。紧急控制机制通过限流技术有效降低故障电流对设备的冲击，减少了电网恢复所需的时间与资源。

## 四、柔性变电站的发展趋势与应用前景

### (一) 智能感知与边缘计算技术

柔性变电站正逐步与智能感知和边缘计算技术融合，这一趋势正在重新定义电力系统的运行模式。通过部署大规模传感器网络，柔性变电站能够捕获广泛的实时数据，包括电压、电流、频率等关键参数，这些数据为精准控制和动态调节提供了支持。边缘计算的引入使数据处理从集中式服务器转移至分布式计算节点，实现了近源处理。在运行中，边缘计算节点利用分布式算法对本地数据进行实时计算与反馈，快速响应负载变化和突发故障（如图1 边缘计算架构图）。<sup>[6]</sup>例如，当负载异常升高时，边缘节点能够立即调节功率分配，避免电网过载。智能感知与边缘计算的结合，推动了柔性变电站从传统的响应式调控向预测性和主动性管理的转变。

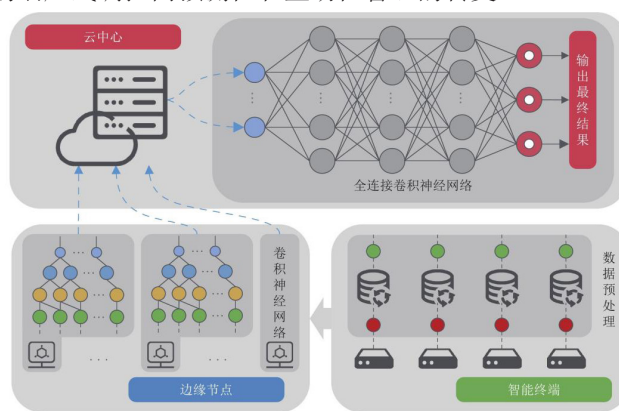


图1 边缘计算架构图

### (二) 超导材料与新型储能融合

超导材料与新型储能技术的融合为柔性变电站的未来发展开辟了新的方向。超导材料因其零电阻特性，能够在电力传输与储能中极大降低能量损耗。在柔性变电站的应用中，超导线圈和超导储能单元可以存储和快速释放大量电能，为负荷波动和短时峰值需求提供有效支持。结合飞轮储能或超级电容等新型储能单元，这些技

术能够实现能量在高密度状态下的动态调配。飞轮储能利用旋转机械能实现快速的能量充放电，而超级电容则因其高功率密度和快速响应能力适用于瞬态功率调节。通过集成这些储能单元，柔性变电站在短时间内可以灵活平衡供需，为电网提供无缝支持。超导材料与新型储能技术的融合，还在一定程度上缓解了传统储能系统的环境影响，如减少有害化学物质的使用，为电力行业的可持续发展提供了技术保障。

### （三）氢能耦合与低碳电力系统

氢能作为清洁能源的重要形式，正在柔性变电站中逐步显现其潜在价值。氢能的高能量密度和可储存性，使其成为连接可再生能源与电力系统的重要媒介。在柔

性变电站的未来应用中，电-氢融合平台有望成为调度灵活性和低碳目标的双重驱动引擎。通过电解水制氢技术，可将过剩的可再生能源电力转化为氢能存储（如图2电氢耦合示意图），在电力需求高峰期，通过燃料电池或氢气发电系统将氢能重新转化为电力，满足用电需求。<sup>[7]</sup>这种双向能源流动的特点，使柔性变电站能够更加灵活地应对负荷波动，同时减少了化石燃料的依赖。氢能的低碳属性对于实现电力系统的碳中和目标具有深远意义。结合柔性变电站的控制和运行策略，氢能耦合平台将助力构建高效、低碳的电力网络，为能源系统的深度转型提供更广阔的技术路径。

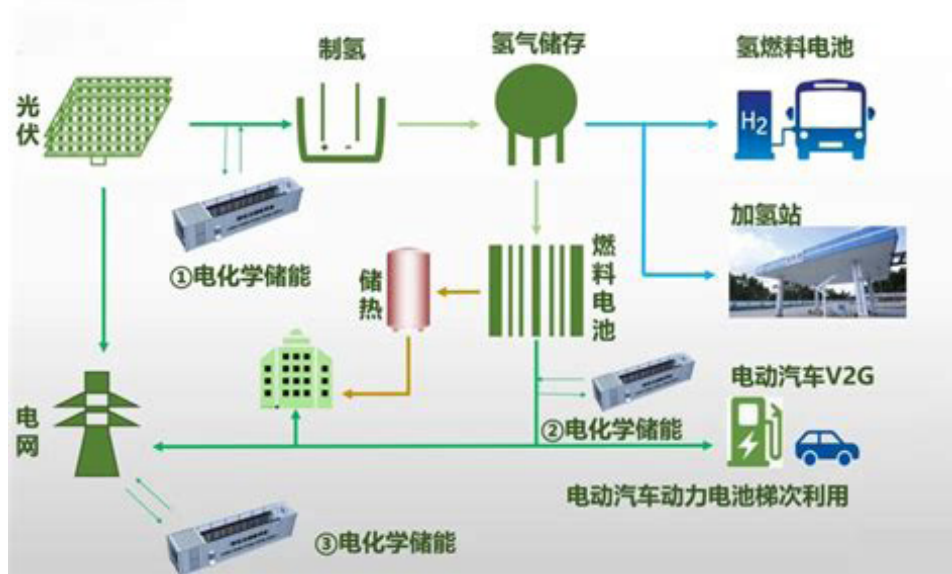


图2 电氢耦合示意图

### 结语

柔性变电站作为新兴的电力系统核心节点，正逐步成为大规模可再生能源并网、区域负荷高峰管理以及智能调度平台的重要技术支撑。在关键器件与核心算法领域的不断突破，为系统提供了更灵敏的动态调节能力，保障了电网的平稳运行。通过网络互联与拓扑优化，柔性变电站可在多端互联与交直流混合环境中，灵活分配潮流并缓解电网拥塞，进而最大限度提升资源利用效率；在控制与运行策略方面，柔性变电站的多目标调度与动态补偿手段，进一步提升了电网的抗扰动能力与电能质量水平，为高比例清洁能源接入创造了条件。故障自愈和紧急控制机制的建立，也增强了电力网络面对突发状况的韧性。展望未来，随着数字化技术、传感与计算能力的跃升，柔性变电站将更深度地融合人工智能与边缘计算，实现实时监测、即时决策与全局协同的全新运行模式。新型储能材料以及氢能耦合的出现，更为低碳转型提供了多样化的手段，并预示了电力系统架构的进一步进化。在这一进程中，相关行业与科研机构需加强协作，共同突破关键技术瓶颈，为建设高效、安全、可持续的智慧电网打下坚实基础。相信在持续的创新与优化之下，

柔性变电站必将在能源转型与经济发展中扮演更加举足轻重的角色。

### 参考文献

- [1] 沈卫东, 傅守强, 李红建, 等. 基于柔性变电站的交直流配电网成套设计 [J]. 电力建设, 2020, 41 (03): 100-109.
- [2] 于腾. 智能电网中的输变电技术应用 [J]. 集成电路应用, 2022, 39 (07): 295-297.
- [3] 刘乃桓. 柔性输电技术在智能电网中的应用分析 [J]. 科技经济市场, 2017, (12): 25-27.
- [4] 张忠昊. 输变电线路施工技术及管理措施 [J]. 光源与照明, 2022, (08): 201-203.
- [5] 唐学军. 输变电技术在智能电网中的应用 [J]. 低碳世界, 2014, (01): 67-68.
- [6] 傅守强, 高杨, 陈翔宇, 等. 基于柔性变电站的交直流配电网技术研究与工程实践 [J]. 电力建设, 2018, 39 (05): 46-55.
- [7] 卞翔. 柔性变电站交直流配电网技术经济效益综合评估模型构建 [J]. 现代工业经济和信信息化, 2023, 13 (12): 226-228.