

# 智能电网技术在电力系统优化中的应用研究

刘 创 李 婕 周冬萍

中国能源建设集团广西水电工程局有限公司 广西南宁 530000

**摘要:** 随着能源结构调整与电力供需复杂化,传统电网面临效率瓶颈、安全风险及新能源消纳困境。智能电网作为融合先进传感、通信、信息与控制技术的新型电力系统,为系统性优化提供了核心支撑。本研究深入分析智能电网在电网运行效率提升、安全可靠保障、新能源高效消纳及用户侧互动优化中的关键作用,探讨其技术架构与应用模式,并通过某省网智能电网示范工程进行实证,结果验证其在降低网损、减少停电时长与提高新能源接纳率方面的显著成效。研究揭示,智能电网是实现能源转型与构建高弹性现代化电力系统的必由之路。

**关键词:** 智能电网; 电力系统优化; 可再生能源消纳; 高级量测体系; 需求响应; 能源互联网

## 一、提升电网运行效率与经济效益

智能电网通过部署覆盖广泛的先进传感器网络与高速通信系统(如PMU广域测量系统、智能电表高级量测体系AMI),实现对电力系统状态(电压、电流、相位角、频率、设备温度、负荷等)的实时、高精度、全景感知与动态监控。借助高速通信网络(光纤、5G、电力载波等)与统一信息平台(如IEC61850/61970),电网各环节数据得以高效汇聚与共享。强大的数据处理中心利用云计算、大数据分析、人工智能(AI)技术,对海量实时数据与历史数据进行深度挖掘与分析,为精确掌握系统运行状态、准确预测未来趋势(如负荷预测、新能源出力预测)奠定坚实基础,并为后续优化决策提供核心数据支持。基于上述信息感知与处理能力,智能电网显著提升了输电网优化潮流(OPF)与配电网无功电压优化的实时性与精细化水平。OPF计算能快速响应系统变化,实现损耗最小化或输电能力最大化等目标;配电网可基于实时数据实现无功补偿设备的精准投切、有载调压变压器分接头的自适应调节、分布式能源逆变器无功支撑的协调控制,显著降低输电网的有功损耗(网损)与电能质量波动。美国能源部(DOE)研究报告指出,充分应用智能电网技术可使电网整体损耗降低5%~15%。

## 二、增强系统安全性与运行可靠性

### 1. 快速准确的故障监测、定位、隔离与自愈

智能电网依托其高密度部署的传感网络(包括配电网的馈线终端单元FTU、配电终端单元DTU以及多功能智能终端)与广域同步相量测量系统(WAMS),形成

了对电力系统全景状态的精细监测能力。这些先进感知装置能够以毫秒级精度捕捉电网中突发的扰动信号,包括短路电流冲击、电压瞬时骤降、频率异常偏移等关键故障特征。通过基于多源异构数据融合的实时状态感知,结合自适应保护算法及广域保护协同机制(如差动保护、方向比较保护),系统能够实现故障范围的精准判别和位置的精确定位(定位误差可控制在百米级以内)。尤其在配电网层面,基于馈线自动化(FA)技术构建的智能故障诊断与处理系统(FDIR),利用预先部署的自动化开关设备(如智能重合器、分段器)和通信网络,执行预定的自愈策略:在检测到永久性故障后,系统自动定位故障区段,迅速分断故障点两侧开关(通常在1~2秒内完成),随后通过遥控联络开关启动非故障区段的供电恢复操作(如负荷转供),完整隔离与复电流程控制在数十秒至数分钟内。该自愈机制替代了传统依赖人工巡线排查的处置方式,大幅缩短用户平均停电时间(SAIDI),显著提升了高可靠性供电区域的运营韧性。国际工程实践验证表明,成熟的自愈系统可减少故障影响用户数达70%以上,停电时长缩短60%~90%。

### 2. 提升电网态势感知与稳定控制能力

广域测量系统(WAMS)基于高精度同步相量测量单元(PMU)构建,能以毫秒级时间分辨率(通常30~120帧/秒)实时捕获全网关键节点的电压相角、幅值、频率及功率等动态数据流。这些全域同步量测信息通过高速通信网汇聚至调度中心,与增强型状态估计(动态SE)技术融合,构建覆盖输电网的实时动态数字

孪生体。结合深度学习和并行计算驱动的动态安全评估 (DSA) 平台, 调度员可透视系统运行状态, 精准识别静态安全边界 (如线路热稳定、电压越限)、暂态稳定极限 (功角失稳风险) 和动态稳定裕度 (振荡阻尼水平), 实现从“被动响应”向“主动防御”的范式转变。基于此全景感知能力, 系统可优化部署三级防御体系: 在预防控制层, 基于预测数据进行最优潮流 (OPF) 校正和预防性调度, 预留充足稳定裕度 (如提升旋转备用); 在紧急控制层, 利用广域信号触发的智能稳控装置 (如切机切负荷策略、HVDC 功率紧急支援、FACTS 阻尼控制), 在 20–300 毫秒内阻断失稳路径; 在校正控制层, 协调 AGC 与 AVC 系统快速恢复频率电压。AI 赋能的在线稳定预警模块 (如基于 LSTM 的暂态稳定快速判别) 更将传统耗时数十分钟的暂稳计算压缩至秒级, 显著提升对多故障连锁演变、新能源脱网等复杂场景的预判能力与精准处置效率, 使大电网安全防御能力迈入主动化、协同化、智能化新阶段。

### 3. 优化资产管理与提升设备健康管理水平

智能电网通过构建覆盖全环节的设备状态感知网络, 部署多维度在线监测装置 (如变压器内置油色谱分析仪实时追踪特征气体浓度、电缆高频局部放电传感器捕捉绝缘缺陷、架空线路微气象与视频覆冰监测终端、基于北斗定位的杆塔倾斜监测仪以及红外热像仪自动巡检系统), 实现关键电力设备运行参数的秒级采集与异常预警。这些海量异构数据通过边缘计算节点预处理后, 上传至电力物联网平台, 依托大数据分析引擎进行特征提取与模式识别 (如应用 CNN 识别局放图谱、LSTM 预测变压器热老化曲线), 并借助 AI 预测模型 (随机森林设备风险评估、贝叶斯网络故障概率诊断) 构建设备健康指数 (HI) 画像与剩余寿命 (RUL) 预测体系。该体系推动资产管理从“定时计划检修”向“状态检修 (CBM)”及“预测性维护 (PdM)”转型, 实现检修策略动态优化: 依据设备健康状态智能生成工单、调配备件与人力 (如对高风险变压器提前停运更换、对电缆局部放电点精确定位消缺)。实际运维表明, 该模式可将非计划停运率降低 40%–60% (国网某省公司应用案例), 减少过度维修成本 20%–30%, 延长关键设备寿命周期约 15%。中国电机工程学会统计显示, 规模化部署智能化监测后输电设备故障率平均下降 32.6%, 有效遏制了设备老化引发的连锁故障风险, 系统性提升电网可用率与经济运行水平。

## 三、支持高比例可再生能源消纳与需求侧资源协调

### 1. 提升新能源发电预测精度与调度水平

智能电网基于气象大数据 (数值天气预报)、卫星遥感、历史出力曲线和先进的人工智能算法 (如深度学习 LSTM、GAN), 显著提高了风电场和光伏电站超短期和短期发电功率预测的精度。高精度的预测是可再生能源纳入电力系统平衡计划的基础, 极大减轻了因出力不确定性给系统调度带来的压力。准确预测也使得新能源电站在电力市场环境中更具竞争力。

### 2. 优化协调源网荷储多元灵活性资源

面对可再生能源的强波动性与间歇性, 智能电网的先进能量管理系统 (EMS/DMS) 与虚拟电厂 (VPP)、负荷聚合商 (LA) 平台, 能够实现对大规模分布式能源、储能系统 (电化学、抽水蓄能、压缩空气等)、以及可控负荷 (如需求响应资源) 的高效聚合与统一协调调度。在电网发生阻塞或新能源出力剧变时, 系统可智能调用储能进行充放电调节、快速启动燃气轮机等灵活电源、或启动需求响应项目削减/转移负荷, 以平抑波动、缓解阻塞、保障频率和电压稳定, 提升系统接纳高比例可再生能源的能力与安全裕度。

### 3. 支撑主动配电网与微网优化运行

在配电网层面, 随着大量分布式光伏、小型风机、电动汽车及用户侧储能的接入, 传统单向供电的配电网正向“主动配电网” (Active Distribution Network, ADN) 甚至微电网 (Microgrid) 转变。智能配电网管理系统 (DMS) 通过先进的网络拓扑分析、能量优化算法与区域协调控制策略, 实现分布式能源的本地化平衡优化调度, 在确保配电网安全经济运行的前提下, 最大化利用本地可再生能源, 减少对大电网的依赖和倒送功率引起的电压越限等问题。VPP 技术进一步实现了跨区域微网资源的聚合与市场参与。

### 4. 深化需求侧参与与需求响应机制

智能电网的核心载体——高级量测体系 (AMI), 尤其是智能电表, 为电网公司与用户之间建立了实时双向通信桥梁。基于此架构, 智能化的需求响应管理系统可自动或半自动地实现精细化负荷管理: 根据电网运行状态或市场价格信号 (如分时电价、实时电价、尖峰电价), 自动向用户发送控制信号或价格激励信息, 引导用户 (或智能家居系统自动响应) 调整用电行为 (如空调调高温度、电动汽车改变充电时间、工厂调整生产班次), 在高峰时段削减负荷、在低谷时段增加用电或为电

网提供调频服务，有效削峰填谷、平衡供需，增强系统灵活性。根据中电联数据，成熟的需求响应项目可在高峰时段降低区域负荷5%–15%。

#### 四、某省级电网智能电网示范工程优化实践案例分析

以中国某电力负荷大省（简称为“某省网”）实施的省级智能电网综合示范工程为例，展示智能电网技术在提升省级电网综合性能方面的显著成效。该省能源结构正处于转型期，面临着可再生能源装机快速增长、区外来电依赖性高以及负荷峰谷差持续扩大等现实挑战。传统电网在应对新能源出力波动性、提升整体运行效率以及保障供电可靠性方面承受着巨大压力，特别是在极端天气事件或新能源出力低谷时段，问题尤为突出。针对这些挑战，该示范工程重点实施内容主要包括：在智能感知与通信层面，全面建设了基于广域监测系统（WAMS）的监测网络，实现了关键输变电设备状态在线监测全覆盖，并将核心区域的配电网自动化覆盖率提升至95%，同时部署了覆盖千万用户的智能电表（AMI）接入省级统一信息平台，构建了坚实的感知基础；在智能调度与控制领域，对调度中心系统进行了全面升级，构建了基于云平台和大数据分析的调度决策支持系统，显著强化了多时间尺度的源网荷储协同优化（SCUC/SCED）能力和自动发电控制（AGC）能力；针对新能源消纳优化，部署了高精度风力和光伏功率预测集群，使风/光短期和超短期预测平均精度达到了85%以上，并试点应用了分布式光伏群控群调技术，同时规划建设大型共享储能项目作为省级重要的灵活性调节资源；在需求侧精细化管理方面，打造了省级需求响应管理平台，实施了针对工业用户空调和可中断负荷的自动响应项目，并配套建立了分时电价与激励相容的市场政策机制。项目实施后取得的成效在该省典型年份运行数据中得到显著体现：在运行效率提升方面，通过优化运行与精细化管理，输电环节的网络损耗降低了约1.5个百分点，折合数亿千瓦时电量，用户平均停电时间缩短了30%以上（降至2小时以下），且电能质量指标持续向好；在安全可靠增强方面，复杂故障情况下系统的恢复时间缩短了55%，基于设备状态监测数据的预测性维护成功预警并处理了多起设备隐患，有效避免了故障范

围的扩大和设备的重大损坏，同时系统应对由新能源出力波动引发的频率扰动调节能力也得到显著增强；在新能源消纳方面，在可再生能源装机容量快速增长的背景下，弃风弃光率由项目开展前的8.2%大幅下降至3%以下，可再生能源电量的渗透率稳步提升；在需求响应效果方面，年度通过自动需求响应项目削减的高峰负荷峰值超过1.8GW，有效缓解了区域性的供电能力瓶颈问题。该省实践验证了智能化技术是应对高比例新能源接入环境下电力系统运行优化与安全可靠挑战的核心路径。其在显著降低网损、增强系统韧性、促进能源结构绿色转型以及充分激活用户侧资源潜力等方面所取得的综合效益，为中国乃至全球面临相似能源转型问题的地区提供了宝贵的实践经验与借鉴。

#### 结束语

研究表明，智能电网通过融合先进技术构建信息能源融合网络，显著提升了电力系统效率（降损增配）、安全性（快速自愈、稳定控制）与可再生能源消纳能力（高精度预测、源网荷储协调）。某省网实践验证了其在降本增效、保障供电及促进转型中的核心作用，是构建新型电力系统的必然选择。未来融入AI、物联网等新技术，将驱动其向更安全、高效、绿色、智能的能源互联网演进。

#### 参考文献

- [1] 陈志远. 智能电网技术在电力系统优化中的应用研究[C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集（一）. 沈阳工学院；2025：85–86. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.005307.
- [2] 刘譞, 尹宏. 智能电网技术在现代电力系统中的应用与挑战[J]. 通讯世界, 2025, 32(03): 91–93.
- [3] 旦增巴桑, 王磊. 智能电网技术在电力系统优化中的应用研究[J]. 中国战略新兴产业, 2025, (05): 26–28.
- [4] 华志坚. 智能电网技术在电力系统中的应用与发展趋势[J]. 农机使用与维修, 2024, (10): 41–44. DOI: 10.14031/j.cnki.njwx.2024.10.010.
- [5] 张莉. 智能电网技术在电力系统中的应用与前景[J]. 江西电力, 2023, 47(06): 36–39.