

智能配电系统的运行特性与优化控制研究

黄茂林

(深圳晟能电力工程设计有限公司, 广东 深圳 518110)

摘要 目的: 为确保供电质量前提下实现智能配电系统资源动态优化配置, 平衡经济性与可靠性, 开展系统运行特性与优化控制研究是构建新型电力系统的必然选择。方法: 构建动态负荷预测模型、部署分布式电源协同控制方案等。结果: 提升系统应对负荷能力、供电可靠性、经济效益与清洁能源消纳率等。结论: 智能配电系统优化控制策略可有效提升系统性能, 推动能源可持续发展。

关键词 智能配电系统; 运行特性; 动态负荷预测模型; 分布式电源协同控制管理; 配电网络拓扑实时智能调控
中图分类号: TM76 **文献标志码**: A **DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.007

0 引言

智能配电系统的智能化发展是电力系统和信息通信技术的深度结合。多元异构设备协同运行导致系统状态高度不确定, 同时用户侧需求响应、电动汽车充电负荷以及其他新型用电模式崛起, 进一步增加配电网运行复杂性。如何在保证供电质量的同时动态地优化配置资源, 兼顾经济性、可靠性成为目前电力领域关注的焦点。因此, 对其运行特性及优化控制进行研究, 既是增强配电系统韧性的一项技术要求, 也是建设新型电力系统和推动能源可持续发展的必然选择。

1 智能配电系统概述

1.1 定义与核心特征

智能配电系统融合现代信息技术、通信技术、电力电子技术和先进的自动化控制手段, 构成一种新型的电力系统^[1]。它以建设“物联感知—信息交互—智能决策—精准控制”闭环体系为核心, 以全域状态感知, 数据驱动决策, 自动执行调控为手段, 使配电网由“被动应对”向“主动服务”转变。其特征是高度自动化, 信息化与互动化, 高度自动化表现为设备的自主运行与故障自愈; 信息化依靠实时数据流来支持全流程管理; 互动化注重电网对用户, 分布式能源的双向动态响应以保障电力供应的安全可靠、经济有效、环境友好。

1.2 系统架构组成

智能配电系统架构是分层式设计的, 各个层次之间分工协作、密切配合。作为“神经末梢”, 感知层部署大量的智能设备, 例如智能电表、电流/电压传感器等, 能够实时采集 30 多个关键参数。在通信层, 构建一个由“骨干光纤网+5G 切片网+电力载波”组

成的混合通信网络。骨干光纤网负责传输核心数据, 而 5G 切片技术则为实时控制业务提供端到端时延低于 10 ms 的专用通道, 电力载波则被用于实现末端设备的低成本接入。处理层依赖于边缘计算节点和云数据中心进行数据的分级处理, 其中边缘节点能够完成超过 90% 的实时数据快速分析, 并将复杂的计算任务上传到云端, 从而实现每秒百万级的数据处理能力。应用层面面向电网调度, 运维检修和用户服务场景, 研发智能调度决策系统和设备健康管理平台等几个专业化的应用模块。

1.3 技术支撑体系

技术支撑体系是智能配电系统运行的全方面保证。在通信技术的应用中, 光纤通信使用密集波分复用 (DWDM) 技术, 其单纤的传输速度能够达到 100 Gbps, 确保大量数据能够稳定地传输; 5G 网络是基于 MEC (移动边缘计算) 架构构建的, 它能够将控制指令的处理延迟减少到不超过 5 ms, 从而满足智能开关的快速响应需求^[2]。

信息技术层面, 大数据平台利用时序数据库的存储技术, 能够高效地管理超过 10 年的电网运行数据; 在负荷预测的应用场景中, 机器学习算法成功地将短期预测的准确度提高到 98% 或更高; 利用基于深度学习的图像识别方法, 能够自动地鉴别电力设备的外部缺陷, 其识别的准确性高达 95%。

电力电子技术方面, 柔性交流输电装置 (如静止同步补偿器 STATCOM) 能在 20 ms 内完成无功功率动态调节, 有效抑制电压波动; 高压直流输电 (HVDC) 的模块化多电平换流器 (MMC) 技术, 使电能转换效率提升至 98.5%, 显著降低传输损耗。

2 智能配电系统运行特性分析

2.1 动态运行特征

智能配电系统具备毫秒级动态响应能力，能够有效地处理复杂多变的电力负荷。在工业园区等典型场景中，在大型设备启动导致负荷突变时，系统通过快速调节储能装置（响应时间 $< 100\text{ ms}$ ）和分布式电源（光伏逆变器的功率调整速度可以达到额定功率/s的10%），结合柔性负荷控制技术可以使电压波动保持在 $\pm 0.05\text{ Hz}$ 范围内，频率偏差基本保持稳定。对比传统配电系统，智能配电系统在处理同等规模负荷扰动时，电压恢复时间从平均 3 s 缩短至 300 ms （见表1），有效规避电压暂降造成设备停运的危险，增强系统运行稳定性^[3]。

2.2 可靠性特性

多重冗余设计及智能自愈机制，使智能配电系统供电可靠性处于国际领先水平。系统在关键节点部署双电源切换装置，切换时间 $< 50\text{ ms}$ ；基于行波测距和拓扑结构分析的故障定位算法能够实现不超过 50 m 的定位精度。某城市示范区的实际运行数据表明，智能配电系统的年平均停电时长已经减少到 0.8 h ，而用户的平均停电频率也降低到每年 0.5 次；相比之下，传统配电系统年均停电时间为 6.2 h ，停电次数达 3.2 次/年（见表2）。同时，系统支持不停电作业模式，通过带电作业机器人和旁路供电技术，使 90% 以上的计划检修实现“零停电”。

2.3 经济性特性

智能配电系统经过全生命周期的成本优化后，经济效益显著提高。在发电侧，采用预测模型进行发电计划的优化，可以使火电机组的启停次数减少超过 30% ，同时，还能降低 $5\% \sim 8\%$ 的燃料使用量；输电侧采用无功优化控制后，线损率下降 $1.5\% \sim 2\%$ 。在需求侧的管理策略中，采用分时电价、负荷聚合的技术手段，以指导用户在高峰时段进行负荷转移。例如：某商业

园区的实施使得高峰负荷减少 15% ，从而降低电网扩容所需的投资 $2\,000$ 万元。在运维成本方面，预测性维护技术能够将设备的故障率降低 40% ，单次故障抢修的成本减少 60% ，综合计算结果显示，智能配电系统的全生命周期成本比传统系统降低 $25\% \sim 30\%$ 。

2.4 环保性特性

智能配电系统是一个高效的清洁能源消纳平台。借助功率预测和多能协同控制技术，分布式光伏和风电的消纳率成功提升到 98% 以上，与传统系统相比有 15 个百分点的显著提升。在风光储一体化的项目中，智能配电系统每年能够减少 12 万吨的二氧化碳排放，相当于种植 660 万棵树木。同时该系统采用谐波治理装置，使电流谐波畸变率保持在允许范围内，减少对通信系统及精密设备产生电磁干扰；通过使用低能耗的变压器和节能配电设备，系统的整体能效得到 $8\% \sim 10\%$ 的提升，从而进一步减少能源的消耗和碳的排放。

3 智能配电系统优化控制策略

3.1 构建动态负荷预测模型优化资源配置

现代配电系统下电力用户的行为模式表现出多样化的特点，外部环境因素变得越来越复杂和多变，常规的静态负荷预测方法已经不能有效地满足用户的实际需要。为构建动态负荷预测模型，实现资源的优化配置，需要建立多源异构的数据获取和融合体系^[4]。具体而言，可以通过智能电表、气象监测站、交通流量传感器和社交媒体数据平台的辅助，获取电力负荷、气象状况、人口流动和商业活动的实时多类信息的能力。随后，利用数据挖掘技术的特征工程手段，提取出与负荷变化密切相关的特征参数，这些参数覆盖气温、湿度、节假日类别和大型活动的组织等。

在模型构建方面，运用集成学习的方法，并将卷积神经网络（CNN）与Transformer模型进行整合。其中CNN用来抽取数据局部空间特征；Transformer模型负责抓取数据长序列依赖关系并在此基础上构造混合

表1 传统配电系统与智能配电系统动态运行参数对比

系统类型	负荷变化响应时间 (ms)	电压波动范围 (%)	频率波动范围 (Hz)	电压恢复时间 (ms)
传统配电系统	2 000 ~ 10 000	± 10	± 0.5	3 000
智能配电系统	200 ~ 500	± 3	± 0.1	300

表2 传统配电系统与智能配电系统平均停电时间对比

地区	传统配电系统年均停电时间 (h)	传统配电系统年均停电次数 (次)	智能配电系统年均停电时间 (h)	智能配电系统年均停电次数 (次)
城市	6.2	3.2	0.8	0.5
农村	12.5	4.8	3.2	1.2

深度学习预测模型。同时,引入迁移学习技术根据不同地区、不同类别用户负荷特性,对预训练模型进行精细调整,以增强其泛化能力。

为保证模型的性能,需要一种预测误差的实时反馈机制,即采用卡尔曼滤波算法动态修正预测误差,结合自适应学习率的调节策略不断优化模型参数。另外定期对模型进行性能评估,在预测精度降低到预设阈值后,启动模型重构流程再次进行数据清洗,特征提取和模型训练,保证动态负荷预测模型时刻保持高精度的运行,为发电计划制定、储能设备分配、配变容量分配等资源优化配置提供准确数据支撑。

3.2 部署分布式电源协同控制管理方案

在可再生能源大范围使用的背景下,分布式电源在智能配电系统中所占比例不断攀升。但其出力所具有的随机性和间歇性等特点给系统的稳定运行带来明显的挑战。所以,分布式电源协同控制管理体系的建设就成了解决这一问题的重点途径。从技术实现方面来看,需要先建立标准化的通信平台,利用 IEC61850 国际通用协议对分布式电源、储能装置、负荷,进行实时数据互通以排除信息壁垒。通信架构设计要注重保证数据传递的可靠性和时效性,从而为协同控制打下基础。

该控制策略采用分层分布式的架构,分为本地控制、区域协调、全局优化三个层次体系。本地控制层根据装置的实时状态进行快速响应;区域控制层采用功率平衡调节,以减小对主网影响;全局控制层从整体系统的角度出发,对资源进行优化分配,以确保系统的稳定运行。三级控制以信息交互的方式形成闭环反馈机制。

为提升控制效能,通过采纳多智能体系统(MAS)的方法,将各个分布式单元视为独立的智能体,并利用分布式协商策略来达到全局的最佳决策。同时,搭建基于气象数据和设备状态下出力预测模型对控制策略进行前瞻性支持。此外,还需要建立故障快速处理机制,以故障定位,区域隔离和负荷转移来保证供电的连续性。协同控制方案实施后,能够有效地促进可再生能源的消纳,提高配电系统灵活调节能力和抗干扰韧性,对构建新型电力系统具有技术支撑。

3.3 实施配电网拓扑实时智能调整

对配电网拓扑结构进行动态优化,是提高系统灵活度和供电可靠度的关键措施。实现配电网拓扑实时智能调控,需要构建“感知—决定—实施”三位一体智能调控系统^[5]。

在感知环节,需要配置高精度同步相量测量单元(PMU)、分布式电源监测终端、智能配电变压器监测终端等设备,在毫秒级的频率下对全网的电压、电流、

相位和频率等电气参数进行采集,同步得到智能开关的状态、线路的温度和设备的运行参数。同时,利用边缘计算技术,对数据采集现场的一些数据进行预处理和特征提取,减轻数据传输的负担和通信时延。

在决策环节,需要开发一个结合图论和模型预测控制的拓扑优化方法,其主要目标是最小化网络的损失和电压的偏移,同时确保供电的最大可靠性,构建数学优化模型,该模型考虑节点电压限制、线路容量限制以及开关动作次数限制等多个条件。在系统发生故障或者运行状态发生变化的情况下,算法根据实时收集到的网络状态数据快速寻找最优拓扑调整方案。

在执行环节,使用软件定义网络(SDN)技术,并选择配电自动化主站作为核心控制器,同时选用智能开关作为转发工具。通过标准化的南向接口协议,实现对智能开关的集中管理和灵活配置。为确保拓扑调整过程的安全性和可靠性,需要设计故障预演和风险评估模块。在开始实施调整计划之前,使用电磁暂态仿真软件来模拟调整过程,以评估可能出现的电压短暂下降、潮流过度转移等风险,并据此制定相应的紧急应对措施。同时,建立拓扑调整效果的后评价机制,通过比较系统运行指标在调整前和调整后的变化,总结经验教训反馈到决策算法中,不断完善拓扑调整策略,以实现配电网拓扑结构动态自适应最优。

4 结束语

智能配电系统是新型电力系统中的重点组成部分,其智能化发展对于电力系统的发展具有重大意义。通过信息技术和电力技术的深度融合,运行特性方面表现优异,优化控制策略更是达到高效配置资源的目的。这就在增强电力供应稳定性和经济性的同时,也为清洁能源消纳和能源可持续发展筑牢基础,引导电力系统向更高智能化、绿色化发展。

参考文献:

- [1] 王梦梦.智能配电系统的构架探讨[J].智能建筑电气技术,2025,19(03):39-42.
- [2] 谢世康.大数据技术在智能配电系统能效优化中的应用[J].电子技术,2025,54(05):314-315.
- [3] 孙静,赵亮亮.智能配电系统的工程应用及智慧化展望[J].电气时代,2025(05):107-110.
- [4] 王笑颜,张广仁,华亮,等.智能配电系统在建筑智慧运维中的应用探索[J].智能建筑电气技术,2025,19(02):69-73.
- [5] 张衡,刘杰,李金方.信息化技术在配电系统中的应用研究[J].现代工业经济和信息化,2025,15(01):61-62,67.