

电力系统自动化探索与实践

金珈竹

大连大发能源分公司, 辽宁 大连 116000

DOI:10.61369/EPTSM.2026050027

摘 要： 现代社会发展对于供电的安全性、稳定性以及可靠性都有了更高的要求，在这样的情况下，为保障电网能够安全、稳定地开展运作就必须依靠电力系统自动化技术实现对电力系统的安全性以及稳定性。电力系统自动化技术属于一种综合性的技术措施，主要涵盖电气工程、自动控制、计算机技术以及通信工程等多项内容并且还可以依托上述技术展开有效监督，进而更好地推动电力系统发展。最后，笔者主要从体系、应用、创新、困难和发展五方面出发，阐述了电力系统自动化的发电侧、输电侧、变电侧、配电侧以及用电器侧所取得的技术进步与成果，并对推进构建新型电力系统具有一定指导意义。

关 键 词： 电力系统自动化；智能电网；协同控制；能源转型；技术融合

Exploration and Practice of Power System Automation

Jin Jiazhu

Dalian Dafa Energy Branch, Dalian , Liaoning 116000

Abstract： The development of modern society has placed higher demands on the safety, stability, and reliability of power supply. Under such circumstances, ensuring the safe and stable operation of the power grid must rely on power system automation technology to guarantee the security and stability of the power system. Power system automation technology is a comprehensive technical measure, primarily encompassing electrical engineering, automatic control, computer technology, and communication engineering, among other disciplines. It can also leverage the aforementioned technologies to implement effective supervision, thereby better promoting the development of power systems. Finally, from the five perspectives of system architecture, application, innovation, challenges, and development, the author elaborates on the technological progress and achievements achieved in power system automation across the generation side, transmission side, substation side, distribution side, and consumer side, which holds certain guiding significance for advancing the construction of new power systems.

Keywords： power system automation; smart grid; collaborative control; energy transition; technology convergence

引言

作为现代文明的血液泵，电力系统的安全可靠运行直接影响着国民经济发展和人民生活秩序的正常运作。传统的电力系统以人的经验和主观意识为主进行管理控制，已经不能满足风能、光能等可再生能源并网及电网峰谷差日益增大的要求。电力系统自动化应运而生，并利用先进的传感器件、通信技术、智能化技术和信息技术实现对电力系统的智能最优调控管理，从感知设备运行状态向全局优化决策转变；由单一支撑电网安全运行向灵活适应新型电力系统发展需求转变；从传统以满足发输变配电业务为主向促进可再生能源消纳、服务“双碳”目标达成转变。

一、技术架构：多层次协同的自动化体系

电力系统自动化以“感知—传输—决策—控制”为核心逻辑，构建了覆盖发电、输电、变电、配电、用电的全环节技术架构。

（一）感知层

作为电力系统自动化获取的信息源，感知层主要由各类传感装置对电力系统的运行状态进行采集。如 PMU 对电力系统中的电压、电流的相位和幅值进行快速精确的测量（通常每秒钟采样 12 次以上），用于动态稳定性分析；智能电表针对客户侧，对负荷

作者简介：金珈竹，辽宁抚顺人，朝鲜族，大学本科，共青团员；现就职于国家电投集团东北电力有限公司大连大发能源分公司，电控维管中心主检修工、助理工程师；研究方向：电力系统自动化（生产运行）。

及功率因数等信息进行计量。支持需求响应及负荷预测；环境传感器检测温度、湿度、风速等气象信息，辅助新能源发电功率预测和设备防灾预警。

该层设计注重“全方位”、“即时化”，利用遍布在发电侧、输电电路上、变电站内以及负荷端的各种传感装置，实现对电网时空范围内的全方位监测，减少信息空白点。如针对新能源电厂，根据光强计、风速测量仪等获取的信息进行分析，可以有效预估其光伏发电量和风能发电量，为调度主站提供决策参考信息；另外，感知层采样的频率及分辨率也影响着下游环节做出的判断，越高的分辨率能更清晰地体现当前电网的变化情况，有助于对电网进行准确的故障检测以及状态分析。^[1]

感知层的发展趋势是传感器微小化、低功耗、自取能，满足恶劣环境下长时间可靠运行的要求；同时发展多元信息集成技术，将电参量、非电量(如设备振动、声纹)、环境参数等多种数据融合起来，形成对电网更为全面的状态认知，提高感知层的信息密度。

（二）传输层

传输层作为信息从感知层到决策层的高速公路，主要负责海量数据的高可靠、低时延传输。其中，光纤通信具有大带宽、抗干扰等特点，在骨干网传输中占主导地位，可满足 PMU 数据、视频监控流等的大带宽需求；5G 具有低时延(毫秒级)高可靠性以及大连接特点，为配电自动化、用户侧交互等提供重要支撑，如 FA 快速故障隔离及复电等应用。

传输层离不开标准协议才能高效地运行。比如 IEC 61850、DL/T 860 协议定义了设备间如何交换数据信息，实现了不同厂商间的互操作；MQTT、CoAP 等协议应用于轻量级物联网设备上，降低通信成本等等。此外在传输过程中还需要考虑到信息安全以及用户的隐私等。采取加密传输、访问控制等方式防范数据泄露和恶意攻击，保证电网运行的安全性。

（三）决策层

决策层相当于整个电力系统自动化的大脑，它根据感知层获取的信息，进行动态计算和预测来制定最优调度方案。传统的 EMS 就属于决策层，包含有经济调度、安全约束调度等内容，在获得信息后会使用一系列的优化手段来进行处理，以达到在保证可靠供电的同时降低发电费用的目的；DCS 属于决策层中的一部分，例如电厂锅炉—汽轮机的协调控制，提高单机运行效率。此外，在决策层，人工智能算法的应用也给调度提供新思路。例如利用深度学习算法对海量的历史数据进行训练提取潜在信息以获得准确的新能源出力预测结果；运用强化学习算法根据电网状态实时更新控制策略应对负荷及新能源出力波动带来的不确定性影响；应用图神经网络对电网拓扑数据进行分析等。提高故障传播路径预测准确度。

决策层设计既要考虑“实时性”，又要考虑“鲁棒性”。所谓实时性是指算法能够在秒级的时间尺度内给出计算结果及控制策略，以适应电力系统的快速变化特点；而鲁棒性则是指算法能够容忍一定量的数据测量误差以及模型参数不确定性，从而避免因部分信息不准确而导致最终结论出现偏差。同时，决策层应

具备人机交互的功能，即能将计算结果直观地呈现给值班调度人员，并为其提供决策参考意见，同时预留了人工干预渠道来应对特殊场景。

（四）控制层

执行层相当于电力系统自动化的“手脚”，负责将决策层的指令转化为设备的动作，完成电网的实时调节及故障自愈。其中 AGC 调节发电机出力以保证系统的频率和联络线功率在允许范围之内；FA 在配网线路发生故障时自动隔离故障区段，并配合联络开关对非故障区进行送电，将用户停电时间由小时级降低到分钟级；可编程控制器(PLC)广泛用于变电站的控制中，例如对断路器进行分合闸以及对变压器的档位进行调整等，提高控制的准确性和及时性。

控制层注重“精细化”和“灵活性”，精细化指控制应精确针对机组特点进行控制，防止过调节和欠调节造成二次扰动；灵活性指控制应能根据当前电网情况自动进行调节，比如当新能源渗透率高时 AGC 需提高阻尼系数。第三，“集中式—分布式”控制功能：上位机可以实现集中控制，部分设备也可实现独立运行下的自动控制功能，在通讯故障情况下，也可以按事先设定的方式进行控制。^[2]

控制层技术主要包括冗余控制、控制算法以及控制装置等方面。冗余控制主要指的是在控制系统中增加冗余度，比如双机热备份、双路供电等等。控制算法则是将一些新的智能控制算法应用到实际当中来，如基于 MPC 的控制算法、自适应控制算法、模糊控制算法及滑模变结构控制算法等，可以更好地应对不确定因素造成的干扰。最后是控制装置，其发展的目标就是高效化、智能化。若使用碳化硅功率器件的变频器可以更快地响应控制信号。

二、应用场景

电力系统自动化技术已深度渗透至电力生产与消费的各个环节，形成差异化应用模式。

（一）发电侧

发电侧自动化关注新能源与传统能源互补运行。新能源电站利用功率预测技术，通过气象数据和以往发电规律来预测光伏、风电的出力曲线，给电网调度一个参考；协调控制技术可根据电网的负荷情况，调整新能源机组出力，使其能平滑地衔接火电、水电。降低弃风弃光。火电厂进行深度调峰改造，提高机组负荷调节能力，当风、光电量较大时，降低火电机组负荷，腾出容量消纳风光电，并结合智能巡检系统对机组进行在线状态评估及故障诊断，及时发现潜在故障隐患，安排检修工作，减少不必要的非计划停运损失电量。这样就能增加风光电消纳量，其次提高了传统机组的运行灵活性，在稳定供电方面形成双保险机制。

（二）输电与变电侧

输电及变电侧自动化侧重于对设备状态感知以及风险预警。例如，在智能变电站中布设大量传感器来获取变电站中变压器、开关等设备的温度、压力、局部放电等信息，并利用这些信息配

合数字孪生技术搭建出对应的虚拟模型，进而对设备在特定情况下(比如短路、过载)的表现进行仿真分析，及时发现可能存在的隐患；而输电线路则采用张力传感器测量导线弧垂，图像识别装置监测覆冰、舞动，达到一定风险后启动融冰装置或更改线路运行方式以防止发生断线、倒塔等事故。该类主动防护模式是把传统的“事后检修”转变成了“事前预防”，大大减少了输电变环节的故障率，其次降低了人工巡检工作量，提高了运维工作效率。

（三）配电与用电侧

配电与用电侧自动化强调故障快速处理与用户资源聚合。

配电网（Distribution Network）自动化系统(DAS)通过馈线终端(FTU)实时监测线路电流、电压，在故障发生后实现秒级定位故障区间并通过联络开关自动隔离故障、恢复非故障区域用电，将用户停电时间由传统模式下的几小时缩短到几分钟；需求侧响应平台则聚合用户侧可控负荷（空调、储能装置）。在电力系统高峰时间自动减少负荷功率，在低谷时间鼓励用户增大用电量，从而达到“削峰填谷”的效果。

（四）调度侧

多能互补调度是调度侧自动化的核心。省级电网 EMS 聚合水电机组、火电机组、风机组以及光机组的实时出力，并结合负荷预测，在 EMS 中运行优化程序来计算发电计划，优先消纳新能源电量，在新能源电量不够的时候，自动调用火电、水电予以补足，从而达到供需的动态平衡；^[3]此外，对各时段进行机组组合及出力分配以减少发电成本及碳排放量，降低弃风弃光情况发生，其属于全局最优模式，不再局限于一种能源的调度，可以实现多种能源联合运行，提高电网的经济性和环境友好性，在能源转型背景下，对于电力供给具有重要意义。

三、创新实践：技术融合驱动的效能跃升

近年来，电力系统自动化领域涌现出一系列创新实践，推动技术向更高水平演进。

（一）数字孪生与 AI 调度：虚实融合的智能决策

数字孪生是建立物理电网的数字化映射，在虚实数据同步及交互基础上，可以模拟极端天气、设备故障等场景下电网的反应

情况，并在实际运行前验证运行策略是否可行，降低真实场景下运行的风险；AI 调度则是将强化学习以及图神经网络相结合，强化学习通过不断与电网环境进行互动，改进多目标调度模型的目标权重，提高对新能源消纳及供电可靠性协调的能力；图神经网络基于电网的拓扑关系信息，准确地判断故障传播方向，为值班调度人员提供隔离和恢复策略建议。

（二）边缘—云端协同计算：分级处理的效率革命

边缘—云端协同计算采用“边缘层+云中心”的模式，解决了大数据量信息交互带来的延迟高、运算时间长的问题。在变电站侧安装边缘服务器能够实现对冗余数据进行剔除、关键参数的统计以及部分低阶保护动作的实施，减轻主站通信负担；而云中心负责对多个变电站及不同时刻的数据进行集中分析，通过分析大数据挖掘出设备的劣化趋势，并建立预防性维修模型，从“定期检修”向“状态检修”过渡，在增加设备寿命周期的同时降低了运维成本。这种策略是在不降低实时控制的基础上腾出了云平台的计算资源，达到了提效降资的目标。^[4]

（三）工控安全防护体系：纵深防御的可靠保障

工控安全采用“边界隔离+入侵检测+可信计算”的模式。边界隔离设备从应用层协议角度拦截不合规请求，阻断非授权访问及恶意网络攻击，实现边界隔离；入侵检测系统监测到可疑事件后，向用户发出警报信息，提醒用户注意可能发生的危险；可信计算确保下发给调度端的命令以及上送给调度中心的数据是经过可信认证并加密的，保证数据源可信、内容不可更改。三层防护贯穿“网络—主机—数据”，实现纵深防御，防止黑客入侵、数据外泄等安全隐患，保障电力系统自动化安全运行。

四、结论

综上所述，电力系统自动化是能源转型及电网变革的重要抓手，在多层级体系架构、全场景应用覆盖、新方法新技术等方面取得较大进展，并实现从单体智能化到系统级智慧化的大跨越；后续，随着数字化仿真、智能调度等新兴技术的应用普及，电力系统自动化将进一步助力新形态电力系统的构建。

参考文献

- [1]任怡萌. 电力系统自动化设备的故障诊断技术与生产运行可靠性提升[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (S2): 505-507.
- [2]张文馨. 面向电力系统自动化的智能故障诊断技术应用[J]. 电力设备管理, 2025, (06): 53-55.
- [3]刘海成. 智能电网中的电力系统自动化技术研究[J]. 光源与照明, 2024, (12): 210-212.
- [4]张永进. 电力系统电气工程自动化的智能化应用[J]. 产品可靠性报告, 2024, (12): 89-90.