

基于智能技术的电气工程自动化控制系统

鹿 锋

山东钢铁股份有限公司 山东 济南 271104

摘 要: 电气工程自动化控制是电力系统安全稳定运行的核心保障。随着新能源大规模并网、电网结构日趋复杂,传统依赖精确数学模型的经典控制方法在应对系统非线性、不确定性和多变量耦合问题时逐渐显现局限性。本文系统梳理了智能技术在电气工程自动化控制中的应用基础,重点分析了模糊逻辑控制、神经网络控制、专家系统及智能优化算法的技术原理与适用边界,并围绕电力系统稳定性控制、智能变电站自动化、新能源并网控制、电能质量治理等典型应用场景深入剖析智能技术的实现路径,最后从多技术融合、AI 大模型和边缘智能三个维度展望了发展趋势。

关键词: 智能技术; 电气工程; 自动化控制

引言: 传统 PID 控制、线性最优控制等经典方法依赖精确数学模型,在系统结构固定、工况变化平缓时效果良好。然而,随着特高压交直流混联电网形成、新能源大规模接入以及电力电子设备广泛应用,电力系统的非线性、时变性和不确定性日益显著,精确建模极为困难,经典控制方法的适应性和鲁棒性面临严峻挑战。智能技术借鉴人类智能的信息处理机制,具备自学习、自适应和自组织能力,为解决复杂电力系统控制问题提供了新方法论。本文聚焦智能技术在电气工程自动化控制中的应用,探讨关键方法的技术原理与典型场景,为电力系统智能化控制提供参考。

1 电气工程自动化控制面临的技术挑战

1.1 系统复杂性与建模困难

现代电力系统已成为全球最复杂的人造系统之一。结构层面,特高压交直流混联、微电网与大电网协同、源网荷储互动等新特征使电网拓扑高度复杂。运行层面,风电光伏出力间歇波动、电动汽车充电负荷时空随机,使电力平衡面临空前压力。扰动层面,从传统大电源脱网到新型电力系统宽频带振荡,扰动形式日趋多样化。上述因素使精确建立系统机理模型几乎不可能,即便建立局部详细模型,阶次也常高达数百阶,给控制器设计和实时计算带来巨大困难。传统控制对精确模型的依赖与系统建模困难之间的矛盾日益尖锐,必须引入不依赖精确模型的新型控制方法,这是智能控制进入电气工程领域的根本动因。

1.2 多变量强耦合带来的协调难题

现代电力系统是典型的强非线性、多变量耦合系统。有功与频率、无功与电压、不同控制区域之间相互

影响,使控制问题呈现高度全局性。特高压直流输电的功率调制不仅影响送受端电网功角稳定性,还改变沿线交流通道潮流分布,进而影响多个区域电压水平,单一措施难以兼顾全局。传统“解耦+局部优化”策略将系统分解为若干单变量子系统分别设计控制器,忽略了耦合效应,在运行点大幅偏移时控制效果难以保证。紧急工况下,切机、切负荷、直流调制等多种措施的协调配合,更是对传统控制理论的严峻考验^[1]。

1.3 新能源接入对控制性能的挑战

新能源大规模接入深刻改变了电力系统运行特性。风电光伏的电力电子变换器几乎不提供转动惯量,系统惯量持续下降,频率响应能力显著削弱,同功率扰动将产生更大的频率偏差和更快的变化速率。新能源出力随机波动使调峰压力剧增,传统 AGC 策略难以应对快速功率变化,需更快的响应速度和更精准的预测。并网逆变器控制策略多样、不同厂家设备动态响应差异大,给稳定分析带来困难。同时,新能源设备通常运行在最大功率跟踪模式,不参与电压频率调节,进一步压缩了可控资源。上述挑战要求控制系统具备更强的适应能力和智能化水平,传统固定参数控制已难胜任。

2 智能控制的核心方法与技术原理

2.1 模糊逻辑控制

模糊逻辑控制是智能控制领域应用最为成熟的方法之一,其核心思想是将操作人员的控制经验转化为用“若……则……”形式表述的语言控制规则,通过模糊推理实现控制决策。模糊控制系统由模糊化接口、知识库(含数据库和规则库)、模糊推理机和清晰化接口四部分组成。模糊化将精确的输入量转化为模糊量;模糊

推理机依据规则库中的模糊蕴含关系进行近似推理；清晰化则将推理得到的模糊控制量转换为可用于实际被控对象的精确控制信号。模糊控制的突出优势在于不依赖被控对象的精确数学模型，对参数变化和外部扰动具有较强的鲁棒性，其控制规则可以融入专家的经验知识，具有良好的可解释性。在电气工程领域，模糊控制已被成功应用于电力系统稳定器（PSS）、自动电压调节器（AVR）和调速器控制等场景，显著改善了系统在故障工况和大扰动下的动态品质。

2.2 神经网络控制

人工神经网络通过模拟生物神经系统信息处理机制，由大量处理单元（神经元）广泛互连构成复杂非线性动力系统，具备强大的非线性映射能力、并行信息处理能力和自学习能力，能以任意精度逼近任意复杂非线性函数，成为处理电力系统非线性控制问题的有力工具。在电气控制中，神经网络可用于系统辨识（建立被控对象非线性模型）、直接控制（神经控制器直接输出控制信号）和与传统控制器参数自整定（在线优化 PID 或模糊控制器参数）。BP 神经网络和 RBF 神经网络是应用最广泛的两种结构，前者适用于离线训练和模式识别，后者因其局部逼近特性在实时控制中更具优势^[2]。然而，神经网络控制也面临训练数据获取困难、收敛速度慢以及缺乏在线学习机制等实际挑战，限制了其在实时性要求极高场景中的应用。

2.3 专家系统与智能优化算法

专家系统通过模拟领域专家推理过程解决复杂问题。在电气控制中主要用于故障诊断与恢复控制、运行方式分析与辅助决策、操作票自动生成等场景，优势在于能将长期积累的运行规程和事故处理预案系统化编码复用，对已知故障处理快速准确，但对未定义新情况缺乏处理能力，知识获取仍是主要瓶颈。智能优化算法为求解复杂控制优化问题提供有效工具。遗传算法（GA）通过选择、交叉、变异等操作在全局解空间中进行高效搜索，适用于电力系统无功优化、经济调度等非线性组合优化问题。粒子群优化（PSO）模拟鸟群觅食的群体智能行为，具有参数少、收敛快的优点。这类算法对目标函数数学性质要求低、全局搜索能力强，但计算量较大，目前主要应用于离线设计场景，在实时控制中的应用仍受限于计算效率。

3 智能控制在电气工程中的典型应用场景

3.1 电力系统稳定性智能控制

电力系统稳定性是电气工程控制的核心关切。在功

角稳定控制方面，传统的电力系统稳定器（PSS）采用固定结构的相位补偿方案，在系统运行方式大幅变化时性能下降。模糊自适应 PSS 根据系统运行状态在线调整增益和相位补偿参数，可在大范围内保持良好阻尼特性。在电压稳定控制方面，模糊逻辑和神经网络被用于设计静止无功补偿器（SVC）和静止同步补偿器（STATCOM）的电压调节器，使动态无功补偿设备能够更快速、更平滑地响应电压变化，有效抑制电压崩溃风险。在频率稳定方面，基于模糊逻辑的负荷频率控制（LFC）考虑了系统调频资源的非线性特性，较传统积分控制器具有更小的超调量和更短的调节时间，能够有效应对新能源功率波动带来的频率扰动，在孤立电网和微电网中表现尤为优异。

3.2 智能变电站自动化控制

智能变电站是智能电网建设的关键环节。基于 IEC 61850 标准的智能化二次设备实现了信息采集、传输和处理的数字化，为智能控制的应用奠定了基础。在变压器控制方面，基于模糊推理的变压器冷却系统智能控制根据负荷电流、油温和环境温度等多源信息综合决策风机投切策略，在保证散热效果的同时有效降低了能耗。在电压控制方面，神经网络被用于预测负荷变化趋势，结合模糊逻辑判断有载调压的时机和档位选择，改善了传统调压方式中“调压滞后”和“频繁动作”的矛盾。在变电站运维方面，基于专家系统的智能告警处理将海量告警信息进行分类、过滤和因果关联，将数以千计的原始告警压缩提炼为数十条关键事件，有效解决了信息过载问题，大幅缩短了故障判断和处置时间^[3]。

3.3 新能源并网智能控制

新能源并网控制是智能技术发挥重要作用的新兴领域。在风电控制方面，模糊逻辑被用于设计变速恒频风电机组的转矩控制器和桨距角控制器，在低于额定风速时通过模糊推理优化转速-转矩曲线，实现最大风能捕获；在高于额定风速时根据风速波动程度动态调整桨距角变化速率，抑制功率振荡的同时减少变桨机构频繁动作，延长设备寿命。在光伏发电控制方面，模糊逻辑和神经网络被用于改进最大功率点跟踪（MPPT）算法，能够更准确地地区分全局最大功率点和局部最大功率点，避免传统扰动观测法在局部阴影条件下的误判。在新能源场站级控制方面，基于多智能体的分布式协调控制架构将每台发电单元视为具有自主决策能力的智能体，通过智能体间的信息交互和协商实现场站内部的有功/无功分配和电压调节，兼顾了全局优化目标和各单元运行约束。

3.4 电能质量智能治理

电能质量治理是智能技术应用效果突出的领域。在有源电力滤波器 (APF) 控制中, 基于神经网络的谐波电流检测方法能够在电网频率波动条件下准确提取各次谐波的幅值和相位信息, 较传统 FFT 方法具有更好的动态响应特性, 配合模糊滞环电流控制策略, 使补偿电流对指令信号的跟踪误差显著减小。在动态电压恢复器 (DVR) 控制中, 模糊逻辑用于设计电压跌落检测环节, 通过判断电压幅值和相位跳变的综合指标快速触发补偿, 检测时间可控制在毫秒级。在配电网电能质量综合治理方面, 基于粒子群优化的多目标协调控制算法综合考虑电压偏差、谐波畸变率和功率因数等多个指标, 优化分配各补偿设备的无功出力 and 滤波参数, 实现了治理效果与运行经济性的协同优化, 显著提升了电能质量治理的综合效益。

4 智能控制技术的发展趋势与展望

4.1 多技术融合与协同控制

单一智能控制方法各有优劣, 多技术融合是重要趋势。模糊神经网络将模糊逻辑处理不确定信息的能力与神经网络自学习能力相结合, 在负荷预测和故障诊断中展现出优于单一方法的性能。模糊 PID 和神经 PID 在保留传统 PID 结构简单、可靠性高优势的同时, 赋予控制器参数在线自整定能力, 已在电机调速、励磁控制等场景取得良好效果。多智能体协同控制将复杂系统分解为多个自主智能体的分布式决策问题, 为大规模电力系统分散协调控制提供新思路。数字孪生与智能控制的结合, 通过在虚拟空间中镜像物理系统, 实现对控制策略的离线验证和在线优化, 提高控制方案的可靠性和适应性。

4.2 数据驱动与 AI 大模型的影响

AI 技术正深刻影响电气工程控制领域。以强化学习为代表的驱动控制方法, 通过智能体与环境持续交互学习最优策略, 在处理不确定性和适应性方面优势独特, 在紧急电压控制、微电网能量管理等领域已有成功应用。迁移学习可将已有控制经验迁移至新建电站或拓扑变化后的系统, 大幅缩短训练时间。以 Transformer 为代表的大模型技术正展开初步探索, 其在海量数据中提

取复杂模式的能力, 为态势感知、暂态稳定评估和智能调度提供了新可能^[4]。然而, 大模型在实时控制中的可靠性、可解释性和计算效率仍是主要障碍, 中短期内将以“人机协同”的辅助决策模式为主。

4.3 边缘智能与实时控制的融合

随着 5G、边缘计算和轻量化 AI 模型的发展, 智能控制正从集中式向云-边-端协同架构演进。边缘智能将计算决策下放到靠近数据源的边缘侧, 可显著降低通信延迟, 提高控制实时性和可靠性, 尤其适用于分布式光伏逆变器集群控制、馈线自动化等场景。模型轻量化技术 (剪枝、量化、知识蒸馏) 使复杂神经网络能在嵌入式平台高效运行, 摆脱对云端算力的依赖, 使“端侧智能”成为现实。5G 低时延高可靠特性为分布式智能控制提供通信保障, 使广域智能终端实现毫秒级信息交互和协同控制。云-边-端协同将推动控制从“集中计算、集中决策”向“分布式感知、边缘决策、云端优化”演进。

结束语

电气工程自动化控制正在经历从经典控制向智能控制的重要转型。本文系统梳理了模糊逻辑控制、神经网络控制、专家系统与智能优化算法等核心智能方法的技术原理, 分析了各自的技术优势和适用边界, 并围绕电力系统稳定性控制、智能变电站自动化、新能源并网控制及电能质量治理四个典型场景深入剖析了智能技术的应用路径与实践价值。当前智能控制已在电气工程的多个领域取得显著应用成效, 但距离实现完全自主、自愈的智能电网控制体系仍有较大距离, 未来需在多技术融合、数据驱动方法和边缘智能等方面持续推进。

参考文献

- [1] 童画. 基于智能技术的电气工程自动化控制系统[J]. 电气技术与经济, 2025(2): 231-234.
- [2] 韦学艺. 基于智能技术的电气工程自动化控制系统分析[J]. 科技视界, 2025, 15(16):1-3.
- [3] 牛卿懿. 基于智能化技术的煤矿电气工程自动化控制系统研究[J]. 电气技术与经济, 2024(8):216-218.
- [4] 杜锡彬. 智能化技术在电气工程及其自动化中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2025, 10(5):219-221.