

浅述智能控制及其在光伏发电领域的应用

林 兵 管彦诏 马晓霆

中车青岛四方车辆研究所有限公司 山东 青岛 266000

摘 要：智能控制凭借自适应、自学习特性，成为提升光伏发电系统性能的关键技术。在最大功率点跟踪、能量管理、故障诊断及电网接入等环节，智能控制通过优化算法与模型，有效提高发电效率、增强系统稳定性、降低运维成本。然而，其应用面临计算资源需求大、模型泛化能力弱及系统可靠性不足等挑战。通过算法优化、模型改进与可靠性提升策略，为智能控制在光伏发电领域的深度应用奠定基础，助力可再生能源产业发展。

关键词：智能控制；光伏发电领域；应用

引言

随着全球能源结构向清洁化转型，光伏发电作为重要的可再生能源技术，其效率与稳定性备受关注。传统控制方法在复杂多变的光照、温度环境下，难以满足系统高效运行需求。智能控制融合人工智能、自动控制等技术，为光伏发电系统性能提升提供新路径。本文从最大功率点跟踪、能量管理等多方面，深入探讨智能控制在光伏发电领域的应用，分析现存问题并提出应对策略，以为行业发展提供参考。

1 智能控制概述

智能控制作为自动控制领域的前沿分支，融合人工智能、运筹学、系统科学等多学科理论，旨在处理传统控制方法难以解决的复杂系统控制问题。这类系统通常具有高度非线性、不确定性及强耦合特性，传统基于精确数学模型的控制策略在此类场景下往往失效，而智能控制通过模拟人类思维与决策过程，突破了模型依赖的限制，实现对复杂系统的有效调控。在技术实现层面，智能控制主要依托专家系统、模糊逻辑、神经网络及遗传算法等核心技术。专家系统将领域专家的经验与知识转化为规则库，通过推理机制实现对复杂过程的决策与控制；模糊逻辑则引入隶属度概念，将人类语言描述的模糊信息转化为可处理的控制规则，有效应对系统中的不确定性；神经网络凭借强大的自学习与自适应能力，能够通过大量数据训练捕捉系统复杂的输入输出映射关系；遗传算法基于生物进化原理，通过模拟自然选择与遗传操作，在解空间中高效搜索全局最优控制策略。智能控制的应用已广泛渗透到多个领域。在工业生产中，其可优化复杂化工流程的参数调控，提升生产效率与产品质量；在交通运输领域，智能控制系统能动态调整交通信号，实现车流的高效疏导；在航空航天方面，智能控制助力飞行器在复杂环境下稳定飞行与精确导航；智

能家居场景中，各类设备通过智能控制实现自动化运行，提升用户生活的便捷性与舒适度。随着人工智能技术的不断发展，智能控制正朝着集成化、自主化与智能化深度演进，通过多技术融合构建更强大的智能控制系统，为解决复杂系统控制问题提供更优方案，推动各领域技术革新与产业升级。

2 智能控制在光伏发电领域的具体应用

2.1 最大功率点跟踪（MPPT）控制

（1）光伏发电系统输出功率受光照强度、温度等环境因素影响呈现非线性变化特性，智能控制算法通过构建动态模型实时捕捉光伏电池的I-V和P-V特性曲线。以粒子群优化算法（PSO）为例，通过模拟鸟群觅食行为，在多维搜索空间中快速定位最大功率点，相比传统扰动观察法，可有效避免局部最优问题，在复杂环境下仍能保持较高的跟踪精度和响应速度。（2）模糊逻辑控制技术基于专家经验建立模糊规则库，将光伏电池的电压、电流变化率等作为输入变量，通过模糊化、规则推理和解模糊化过程，实现对最大功率点的自适应跟踪。该方法无需精确的数学模型，对光照突变和温度波动具有良好的鲁棒性，在部分遮挡工况下能够有效提升系统发电效率。（3）神经网络控制利用其强大的非线性映射能力，通过对大量历史数据的学习训练，深入挖掘数据内在规律，建立环境参数与最大功率点之间的复杂关系模型。深度学习算法进一步优化网络结构，能够实时精准预测最大功率点位置，使光伏系统在动态变化环境中始终保持高效运行状态，显著提升整体发电效能^[1]。

2.2 光伏系统的能量管理

（1）在多能源协同的光伏发电系统中，智能控制通过分析光伏电池实时输出功率、储能设备荷电状态以及负载需求，实现能量的合理分配与优化调度。模型预测控制（MPC）技术基于系统未来状态的预测，制定最

优控制策略,平衡光伏发电的间歇性与负载用电的稳定性,确保储能系统在充放电过程中始终处于最佳工作状态,提高系统整体运行效率。(2)分布式智能控制架构将能量管理任务分散至各个子系统,通过通信网络实现信息交互与协同控制。各节点根据本地能源生产和消耗情况自主决策,同时与相邻节点进行数据共享,有效避免集中式控制带来的单点故障风险,增强系统的可靠性和灵活性,适应大规模光伏电站复杂多变的运行场景。

(3)基于强化学习的能量管理策略通过智能体与环境的不断交互学习,优化能量调度决策。智能体在不同运行状态下执行动作并获得相应奖励反馈,逐步学习到最优的能量管理策略,能够动态适应光照、负载等因素变化,在保障系统稳定供电的同时,最大化利用光伏能源,降低储能设备的充放电损耗。

2.3 光伏电池故障诊断与维护

(1)智能控制利用数据驱动的方法实现光伏电池的故障诊断,通过采集光伏阵列的电流、电压、温度等多源数据,运用机器学习算法建立正常运行状态下的特征模型。当实际运行数据偏离正常模型范围时,可快速检测出异常状态,并通过模式识别技术判断故障类型,如电池板开路、短路、热斑等,为精准维护提供依据。

(2)深度学习中的卷积神经网络(CNN)能够自动提取光伏电池运行数据的深度特征,相比传统人工提取特征的方法,具有更高的准确性和效率。通过对大量故障样本数据的训练,CNN模型可以识别出微小的故障特征,实现早期故障预警,避免故障扩大化,降低维护成本和停机损失。(3)基于贝叶斯网络的故障诊断方法通过建立节点间的概率依赖关系,综合考虑多个因素对故障发生的影响。在复杂故障场景下,该方法能够通过概率推理准确评估故障发生的可能性,同时提供故障发生的可能原因及解决方案,为光伏电池的预防性维护和优化运行提供科学指导,保障光伏系统的长期稳定运行^[2]。

2.4 电网接入与功率调节

(1)智能控制技术在光伏系统电网接入过程中,通过实时监测电网电压、频率和相位等参数,结合光伏电站输出功率变化,采用锁相环(PLL)技术实现光伏逆变器输出电能与电网的同步。利用自适应控制算法调节逆变器的输出电流,确保并网电能质量符合电网要求,减少对电网的谐波污染和电压波动影响。(2)在功率调节方面,下垂控制策略使多个光伏逆变器在并联运行时,能够根据自身容量和电网需求自动分配输出功率,实现系统的稳定运行。该控制方法通过模拟传统同步发电机的下垂特性,使光伏逆变器具备类似的功率调节能力,

增强系统的动态响应性能和稳定性,提高电网对分布式光伏发电的接纳能力。(3)虚拟同步机(VSG)技术赋予光伏逆变器类似同步发电机的惯性和阻尼特性,通过智能控制算法模拟同步发电机的运行机理,在电网频率波动时提供惯量支撑,增强电网的稳定性和抗干扰能力。VSG能够根据电网调度指令快速调整输出功率,实现对电网的主动支撑,提升光伏发电在电力系统中的可靠性和灵活性。

3 智能控制在光伏发电领域应用中存在的问题与应对策略

3.1 存在的问题

3.1.1 计算资源需求大

智能控制算法在光伏发电系统中的运行依赖复杂的数据处理与运算过程,对计算资源形成极高要求。光伏发电系统运行过程中,需实时采集光伏板温度、光照强度、电网电压等多维度数据,基于神经网络、模糊控制等智能算法进行复杂建模与动态优化。以深度学习算法为例,其多层神经元结构和大量参数训练需消耗巨量计算资源,单次模型训练可能涉及数百万次浮点运算,普通计算设备难以满足需求。随着光伏电站规模扩大,数据采集节点增多,数据量呈指数级增长,进一步加剧计算资源紧张状况。这种对计算资源的高需求不仅增加硬件购置与维护成本,还可能导致系统响应延迟,影响发电效率与电网稳定性,限制智能控制技术在光伏发电领域的大规模推广应用。

3.1.2 模型泛化能力不足

当前智能控制模型在光伏发电领域应用中,泛化能力不足成为关键问题。由于不同地域气候条件、光照环境及设备特性差异显著,光伏发电系统运行工况复杂多变。多数智能控制模型在特定环境下训练后,面对新环境或工况变化时,难以保持良好性能表现。例如,在某地区光照稳定环境下训练的最大功率点跟踪模型,应用于光照强度频繁波动地区时,因模型未充分学习光照突变特征,无法准确快速追踪最大功率点,导致发电效率大幅下降。光伏设备老化、灰尘积累等因素也会改变系统运行特性,而现有模型缺乏对这些动态变化的自适应学习能力,难以实现跨环境、跨工况的稳定高效控制,限制了智能控制技术在光伏发电领域的广泛适用性与长期可靠性^[3]。

3.1.3 系统可靠性有待提高

智能控制在光伏发电系统中的应用面临系统可靠性方面的挑战。光伏发电系统由光伏阵列、逆变器、储能装置等多设备组成,智能控制需协同各设备稳定运行。

复杂的算法逻辑与多设备交互增加了系统故障风险,算法运行过程中的异常波动、设备间通信延迟或数据传输错误,都可能引发系统故障。例如,逆变器控制算法出现逻辑错误,可能导致输出电压不稳,甚至损坏设备;通信中断会使控制指令无法及时传达,造成系统运行混乱。智能控制系统对外部环境干扰较为敏感,电磁干扰、温度变化等因素可能影响传感器精度与设备运行状态,降低系统可靠性。这些问题若未有效解决,将直接威胁光伏发电系统安全稳定运行,增加运维成本与能源损失。

3.2 应对策略

3.2.1 优化算法与硬件

为缓解智能控制在光伏发电领域对计算资源的高需求,需从算法优化与硬件升级两方面协同推进。在算法层面,采用模型轻量化技术,对复杂神经网络结构进行裁剪与压缩,减少冗余参数与计算量,如通过知识蒸馏将大型教师模型的知识迁移至小型学生模型,在保持性能前提下降低计算复杂度。开发高效并行计算算法,利用分布式计算架构,将大规模数据处理任务分解至多个计算节点,提升运算效率。硬件方面,引入高性能计算芯片,如专用人工智能芯片(ASIC)或图形处理器(GPU),利用其强大并行计算能力加速算法运行;部署边缘计算设备,在数据采集端完成部分数据处理与分析,减少数据传输量与云端计算压力,实现计算资源的高效利用,保障智能控制算法快速稳定运行。

3.2.2 增强模型适应性

针对智能控制模型泛化能力不足问题,需构建具备强适应性的模型体系。采用迁移学习技术,将在某一环境或工况下训练的模型参数,通过微调适配到新环境,利用已有知识快速适应新场景。例如,将在光照充足地区训练的模型迁移至光照多变地区时,仅需少量新数据对关键参数进行优化,即可实现性能提升。结合强化学习,使模型在与环境交互过程中不断学习最优控制策略,通过奖励机制引导模型适应不同工况变化。建立多源数据融合模型,整合气象数据、设备运行数据等多维

度信息,丰富模型输入特征,提升对复杂环境与工况的理解能力,增强模型在不同条件下的泛化性能,确保智能控制在多样化场景中稳定高效运行。

3.2.3 提高系统可靠性

提升光伏发电系统中智能控制的可靠性需从多维度着手。在算法设计上,引入容错控制策略,为智能控制算法增添故障检测与自修复功能。当算法运行出现异常,像数据波动异常、逻辑执行卡顿等状况时,系统能自动切换至备用控制逻辑,或按预设规则对参数进行灵活调整,维持系统基本运行。优化设备间通信协议,采用冗余通信链路,主链路故障时数据可快速切换至备用链路。搭配数据校验机制,严格核对传输数据,降低通信错误概率,保障控制指令准确及时传输。硬件防护方面,对关键设备与传感器进行电磁屏蔽、温度防护等处理,增强抗干扰与环境适应能力。建立健康监测模型,利用大数据与机器学习技术实时监测设备状态,预测故障并提前维护,确保光伏发电系统智能控制稳定可靠运行^[4]。

结语

综上所述,智能控制在光伏发电领域的应用显著提升了系统发电效率、优化了能量管理、增强了故障诊断能力。计算资源消耗、模型适应性及系统可靠性等问题,限制了其进一步发展。未来需持续优化算法,降低硬件资源需求;改进模型结构,提升泛化能力;完善系统设计,保障运行可靠性。通过技术创新与实践探索,智能控制将在光伏发电领域发挥更大价值,推动能源行业绿色转型。

参考文献

- [1]吴琼,马月,李茂林,等.浅述智能控制及其在光伏发电领域的应用[J].科技与创新,2023(15):161-163.
- [2]姜午阳.新能源光伏发电机组智能控制系统[J].机械制造,2025,63(3):4-6,29.
- [3]任超.新能源船光伏发电系统的智能控制研究[J].舰船科学技术,2021,43(14):100-102.
- [4]梁冰,赵双锋.太阳能光伏电源在智能控制系统中的应用探究[J].建筑工程技术与设计,2020(19):4759.