

智能电网的发展趋势与关键技术探讨

何 龙 李东霖 宁怡雯 李汉君

国网新疆电力有限公司昌吉供电公司 新疆 昌吉 831100

【摘要】随着能源转型和数字革命的深入推进，智能电网作为现代能源体系的核心组成部分，正迎来前所未有的发展机遇。本文系统分析了智能电网的发展现状与未来趋势，重点探讨了信息物理融合、人工智能、电力电子技术、先进传感与通信等关键技术的应用前景。通过构建智能电网仿真实验平台，针对分布式能源并网控制和需求侧响应两个典型场景进行了实验验证。实验结果表明，提出的自适应并网控制策略可将系统电压波动降低 42.7%，基于深度强化学习的需求响应算法使用户参与度提升 35.6%。研究为智能电网的技术创新和工程实践提供了重要参考。

【关键词】智能电网；信息物理系统；分布式能源；需求响应；人工智能

DOI:10.12417/2811-0536.26.01.013

1 引言

在全球能源革命和数字化转型的双重驱动下，智能电网正从传统的电力输配网络演进为集能源、信息、业务深度融合的现代化基础设施。根据国际能源署的统计，2023 年全球智能电网市场规模已达千亿美元级别，年均增长率保持在 15% 以上。智能电网通过集成先进的信息通信技术、自动控制技术和电力电子技术，实现了电网的可观、可控、自适应，为高比例可再生能源接入、多元负荷灵活互动、电网智能化运维提供了坚实支撑^[1]。当前，智能电网发展呈现出三个显著特征：首先是数字化程度不断深化，电力设备智能化率在发达地区已超过 80%；其次是分布式能源渗透率持续提升，光伏、风电等新能源在配电网中的接入比例显著增加；第三是服务模式不断创新，综合能源服务、虚拟电厂等新业态蓬勃发展。然而，智能电网建设仍面临诸多挑战，包括新能源消纳压力、网络安全风险、投资效益平衡等问题^[2]。本文在分析智能电网发展趋势的基础上，重点研究关键技术突破方向，并通过实验验证相关技术的有效性，旨在为智能电网的规划建设与运行优化提供理论依据和技术支撑。

2 智能电网发展趋势分析

2.1 架构演进趋势

智能电网的架构正在经历一场由集中式向分布式、扁平化的深刻变革，这一转型使得传统的单向能量流动模式——“发-输-配-用”逐渐演变为“源-网-荷-储”四位一体的协同互动多元格局。这种转变主要体现在三个层面：首先，系统控制方式正从传统的层

级化控制模式转变为本地自治与集中协调相结合的新控制策略，增强了系统的灵活性和响应速度；其次，网络结构正在从固定的刚性架构向可重构、柔性化的方向发展，这种灵活性使得电网能够更好地适应不同的运行条件和需求变化；最后，业务模式也在从单一的供电服务拓展到综合能源服务，不仅提供电力，还涵盖了热能、气体等多种能源的供应和优化管理，从而提升了能源利用效率，推动了能源消费模式的革新^[3]。

2.2 技术融合趋势

数字技术与电力技术的深度融合正日益成为推动智能电网发展的核心动力。在这一过程中，信息物理系统的实施实现了电力系统与信息系统的全面耦合，大幅提升了电力系统的智能化水平。人工智能技术的广泛应用，特别是在设备诊断、负荷预测和运行优化等关键领域的深入应用，极大地提高了电力系统的运行效率和可靠性。同时，电力电子技术的快速发展正在推动电网从传统的“电磁时代”向更为先进的“电力电子时代”演进，这一转变不仅提高了电网的调控能力和电能质量，还促进了新能源的广泛接入和高效利用。此外，5G、物联网等现代通信技术的应用，为智能电网提供了实时、可靠的通信支持，保障了海量终端设备能够稳定接入，进一步强化了电网与用户之间的互动，为智能电网的全面发展奠定了坚实的基础^[4-5]。

2.3 市场变革趋势

电力市场机制正在经历一场深刻的变革，其特征表现在多个方面。首先，需求侧资源开始通过虚拟电厂、负荷聚合商等创新形式积极参与市场交易，这种

作者简介：何龙，男（1996.10--），汉族，四川省南充市人，本科，职称：初级职称，研究方向：基于 VR 系统的应急演练系统。现任国网昌吉供电公司变电站运行值班员，熟练变电设备运维、倒闸操作，擅长故障快速处置，参与多项变电站安全保障任务，实战经验丰富。

需求的聚合不仅增加了市场的灵活性，也提升了需求响应的效率。其次，分布式能源的兴起使得“隔墙售电”和点对点交易成为可能，这种去中心化的交易模式打破了传统的电力供应链结构，促进了能源的本地化生产和消费。最后，随着环境保护意识的加强和政策的引导，碳交易、绿色证书等环境权益市场与电力市场开始协同发展，这不仅为低碳和可再生能源的发电提供了经济激励，还推动了电力市场向更加绿色、可持续的方向发展。

3 智能电网关键技术研究

3.1 信息物理融合技术

智能电网信息物理系统通过构建一个统一建模框架，成功地实现了物理系统与信息系统的深度融合，这一进展依赖于几个关键技术的突破。首先，研究人员建立了电力 CPS 的统一建模语言，这种语言能够精确描述电力设备、通信网络以及控制逻辑之间的交互关系，为不同系统组件的集成提供了一个共同的基础。其次，开发了协同仿真平台，该平台能够实现电力系统的动态过程与信息传输过程的联合仿真，从而在模拟环境下全面评估系统的性能和稳定性。最后，设计了跨层协同控制机制，这一机制能够在系统发生故障时，确保快速恢复能力，保障电网的稳定运行和可靠性。

3.2 人工智能技术应用

基于深度学习的设备状态评估：这种技术通常利用卷积神经网络或其他深度学习架构来分析电网中各种设备的监测数据。通过训练模型识别设备图像或时间序列数据中的异常模式，AI 能够实现对设备状态的实时评估和故障的早期预警，从而减少停电风险，延长设备寿命，并降低维护成本。

3.3 先进电力电子技术

电力电子技术为智能电网提供了灵活的调控手段：(1) 固态变压器实现电压等级变换、电能质量和功率控制的统一管理；(2) 智能软开关实现配电网潮流的灵活控制；(3) 多功能并网变流器支持分布式能源的即插即用和友好并网。

4 实验设计与分析

4.1 实验平台构建

为验证关键技术的有效性，搭建了智能电网综合实验平台。平台硬件包括：RT-LAB 实时仿真器、dSPACE 控制器、光伏模拟器、电池储能系统、智能负荷等。软件平台包括：MATLAB/Simulink、OPAL-

RT、Python 机器学习库等。

4.2 实验一：分布式能源自适应并网控制

(1) 实验设计：针对高比例分布式能源接入引起的电压越限问题，设计自适应并网控制实验。在仿真系统中接入容量为 200kW 的光伏系统和 100kW/200kWh 的储能系统，模拟典型日光照变化和负荷波动。对比传统控制策略与本文提出的自适应控制策略的效果。

(2) 实验结果分析：实验结果显示，在午间光照最强时段，传统控制下节点电压最高达到 1.085pu，超过限值 1.07pu。采用自适应控制后，电压波动范围控制在 1.03-1.065pu 之间，电压合格率从 76.3% 提升至 98.5%。具体数据见表 1。

表 1 并网控制效果对比

指标	传统控制	自适应控制	改善幅度
电压合格率	76.3%	98.5%	+22.2%
电压波动范围(pu)	0.91-1.085	1.03-1.065	-42.7%
光伏利用率	92.5%	96.8%	+4.3%
控制响应时间(s)	5.2	1.8	-65.4%

4.3 实验二：基于深度强化学习的需求响应

(1) 实验设计：设计基于深度强化学习 (DRL) 的需求响应实验，招募 200 户居民用户参与。构建 DRL 智能体，以电网负荷特性、用户舒适度和电价信号为状态空间，以负荷调节指令为动作空间，以系统效益最大化为奖励函数。

(2) 实验结果分析：经过 30 天的训练，DRL 算法显著提升了需求响应效果。与传统价格型需求响应相比，用户参与度从 58.3% 提升至 93.9%，负荷调节精度提高 28.7%。具体效果对比如表 2 所示。

表 2 需求响应效果对比

性能指标	价格型 DR	DRL 算法	提升幅度
用户参与度	58.3%	93.9%	+35.6%
负荷调节精度	71.2%	99.9%	+28.7%
峰值负荷削减率	18.5%	32.7%	+14.2%
用户满意度	82.6%	95.3%	+12.7%

进一步分析发现，DRL 算法能够有效学习用户用电习惯，在保证舒适度的前提下实现精准负荷控制。在晚高峰时段，系统平均削减负荷 125kW，约占区域

总负荷的 26.3%。

5 智能电网发展建议

5.1 技术发展路径

近期（2024-2026 年）：在这一阶段，重点在于突破基础技术，如智能传感、边缘计算和网络安全。智能传感技术可以实现对电网状态的高精度监测，边缘计算则可以在数据产生的源头进行处理，减少对中心处理资源的依赖，同时提高响应速度。网络安全是保障电网信息物理系统安全运行的关键。此外，完成主要城市配电网的自动化改造，提升配电网的智能化水平和管理效率。

中期（2027-2030 年）：在中期阶段，将实现人工智能技术在电网运维、市场交易等场景的规模化应用。人工智能可以提高电网的运维效率，减少人为错误，同时能够对市场交易行为进行预测和分析，优化电力市场运作。此外，建设数字孪生电网示范工程，通过创建电网的虚拟副本，可以在不影响实际电网运行的情况下进行模拟和优化。

5.2 政策支持建议

为了推动智能电网的快速发展，必须采取一系列综合性措施。首先，完善标准体系至关重要，这意味着我们要加快制定涵盖智能电网设备互联互通、数据共享、网络安全等方面的标准，以保障各环节的协同运作和信息安全。其次，创新市场机制是促进分布式能源发展的关键，我们需要建立一套适应新形势的市场交易和价格机制，从而激发市场活力和创造力。最后，加大研发投入是推动技术进步的基石，设立智能电网专项基金，可以集中力量支持关键技术的攻关和示范工程建设，为智能电网的全面铺开提供强有力的技术支撑和示范引领。

5.3 产业生态培育

为了加速智能电网技术的发展与应用，必须实施一系列战略举措，形成全方位的推进态势。首先，推

动产学研用协同创新，构建开放共享的技术创新平台，可以促进学术界、产业界、研究机构以及用户之间的紧密合作，通过资源共享、信息交流和技术转移，加快技术创新和成果转化的步伐。这样的平台能够激发创新活力，提高研发效率，为智能电网技术的发展提供源源不断的动力。

加强国际合作，积极参与国际标准制定，推动中国智能电网技术“走出去”，是中国智能电网技术走向世界的重要途径。通过国际合作，我们可以学习借鉴国际先进经验，同时将中国技术和标准推向国际市场，提升中国在国际能源领域的影响力和竞争力。这不仅有助于中国智能电网技术的国际化，还能促进全球能源互联网的构建，推动世界能源转型和可持续发展。

6 结论

文章指出智能电网的架构正在向分布式、数字化、智能化快速演变。信息物理融合、人工智能、电力电子等前沿技术的深度融合和应用，将引发电网形态的深刻变革，从而实现更加灵活、高效和可靠的电力供应。实验成果表明，采用自适应并网控制策略能够有效减少电压波动，显著提高电压合格率至 98.5%。同时，基于深度强化学习的需求响应算法显著增加了用户的参与度，并提升了控制的精度，这对于电网的稳定运行和优化管理具有重要意义。文章预测未来智能电网将展现出“四化”特征，即电源清洁化、电网智能化、负荷柔性化和服务数字化。这些特征将有助于构建一个安全、高效、绿色、智能的现代能源体系，满足社会可持续发展的需求。

展望未来，随着数字孪生、量子通信、6G 等新兴技术的不断发展，智能电网将迈入一个全新的发展阶段。文章建议电力企业应把握住技术变革的机遇，积极推动数字化转型，以支持新型电力系统的构建，并助力实现“双碳”目标（即碳达峰和碳中和），为促进全球能源转型和环境改善作出贡献。

参考文献：

- [1] 国家电网公司.新型电力系统发展蓝皮书[R].北京:国家电网有限公司,2023.
- [2] 李立涅,张勇军,陈皓勇.智能电网与能源互联网[J].中国电机工程学报,2023,43(1):1-15.
- [3] Farhangi H. The path of the smart grid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2022, 8(1):18-28.
- [4] 王成山,李鹏,董博.智能电网信息系统关键技术研究综述[J].电力系统自动化,2023,47(9):2-15.
- [5] Gungor VC, et al. Smartgrid technologies: Communication technologies and standards[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 7(4):529-539.