

智能电网与可再生能源的融合发展

田 磊

华北电力大学（保定） 河北保定

【摘要】随着全球能源结构的转型，智能电网与可再生能源的融合已成为未来能源网络发展的蓝图。智能电网技术的引入，不仅能够提高电网的效率和可靠性，还能促进可再生能源的优化配置。例如，通过智能调度策略，可以实现风能和太阳能等间歇性能源的高效利用，减少能源浪费。此外，需求响应机制的应用，使得电网能够根据实时需求调整电力供应，进一步提升能源使用效率。政策与法规的支持，如欧盟的“能源联盟”战略，为智能电网与可再生能源的融合提供了必要的框架和激励措施。未来，随着技术创新的不断推进，智能电网与可再生能源的融合将对能源安全、环境保护和经济发展产生深远的影响。

【关键词】智能电网；可再生能源；资源整合

【收稿日期】2024 年 11 月 25 日 **【出刊日期】**2024 年 12 月 28 日 **【DOI】**10.12208/j.jeeaa.20240023

Integration of smart grid and renewable energy

Lei Tian

North China Electric Power University (Baoding), Baoding, Hebei

【Abstract】 With the transformation of global energy structure, the integration of smart grid and renewable energy has become the blueprint for the development of future energy network. The introduction of smart grid technology can not only improve the efficiency and reliability of the grid, but also promote the optimal allocation of renewable energy. For example, the efficient use of intermittent energy sources, such as wind and solar, can be realised through intelligent scheduling strategies, reducing energy waste. In addition, the application of demand response mechanisms enables the grid to adjust power supply according to real-time demand, further enhancing the efficiency of energy use. Policy and regulatory support, such as the EU's 'Energy Union' strategy, provides the necessary framework and incentives for the integration of smart grids and renewable energy. In the future, with the continuous advancement of technological innovation, the integration of smart grid and renewable energy will have a profound impact on energy security, environmental protection and economic development.

【Keywords】 Smart grid; Renewable energy; Resource integration

1 前言

在探讨智能电网与可再生能源融合的未来蓝图之前，我们必须认识到，随着全球气候变化的加剧和传统化石能源的日益枯竭，能源结构的转型已成为迫切需求。根据国际能源署（IEA）的数据，全球可再生能源发电量在 2020 年增长了 7%，占全球总发电量的 29%。这一增长趋势不仅体现了技术进步带来的成本下降，也反映了全球对可持续能源解决方案的强烈需求。因此，智能电网技术的出现，为实现可再生能源的高效利用和能源网络的智能化管理提供了可能。智能电网通过集成先进的信息技术、

自动化控制技术和可再生能源技术，能够实现能源的双向流动，提高电网的灵活性和可靠性，为未来能源网络的蓝图描绘了清晰的轮廓。

2 智能电网技术

2.1 智能电网的定义与核心特征

智能电网，作为未来能源网络的蓝图，其定义与核心特征是构建高效、可靠、可持续能源系统的基石。它不仅是一种技术革新，更是一种能源管理哲学的转变。智能电网的核心在于其双向通信能力，能够实现电网与用户之间的互动，从而提高能源使用效率，降低损耗，并增强系统的灵活性和可靠性。

美国能源部的数据显示,通过智能电网技术,可以将电网的运行效率提高10%以上。此外,智能电网的自愈能力是其另一大特征,它能够自动检测并隔离故障,减少停电时间,如在2011年,德国在引入智能电网技术后,其电网的故障恢复时间缩短了50%^[1]。智能电网还具备分布式能源资源的集成能力,这使得可再生能源如风能和太阳能得以高效接入和管理。智能电网正是这一理念的实践者,它通过整合各种能源形式,确保了能源供应的多样性和弹性,为实现能源转型和环境保护提供了坚实的技术支撑。

2.2 智能电网的关键技术组件

智能电网的关键技术组件是实现其高效、可靠和安全运行的基石。这些组件包括高级计量基础设施(AMI)、分布式能源资源(DER)集成、先进的控制技术、以及实时数据分析和通信系统。以AMI为例,它通过智能电表和传感器收集实时数据,使电网运营商能够精确监控和管理电力流动,从而优化能源分配。根据美国能源部的数据,智能电表的部署使得电网的能源效率提高了10%以上^[2]。此外,DER集成技术允许太阳能和风能等可再生能源源直接接入电网,这不仅减少了对化石燃料的依赖,还提高了能源的可持续性。控制技术的进步,如自动化开关和故障定位系统,进一步提高了电网的灵活性和抗干扰能力。实时数据分析和通信系统则确保了电网的动态响应能力,能够快速适应供需变化,例如,通过需求响应机制,用户可以在电力需求高峰时段减少用电,从而平衡电网负荷。这些技术组件的综合运用,为智能电网与可再生能源的深度融合提供了坚实的技术支撑,为构建未来能源网络的蓝图奠定了基础。

3 可再生能源的发展现状

3.1 全球可再生能源的使用趋势

随着全球对可持续发展和环境保护意识的增强,可再生能源的使用趋势呈现出显著增长。根据国际能源署(IEA)的数据,2020年全球可再生能源发电量增长了7%,占全球总发电量的29%。这一增长主要得益于太阳能和风能技术成本的大幅下降,以及各国政府对绿色能源政策的支持。中国作为世界上最大的可再生能源市场,其太阳能装机容量在2020年增长了24%,风能装机容量增长了34%。这种趋势不仅体现了技术进步带来的经济效益,也反映了

全球能源结构转型的迫切需求^[3]。智能电网技术的发展为可再生能源的高效利用提供了新的平台,通过优化配置和智能调度,可再生能源的波动性和间歇性问题得到了有效缓解,从而推动了全球能源网络向更加清洁、高效的方向发展。

3.2 主要可再生能源类型及其特点

在探讨智能电网与可再生能源融合的蓝图中,太阳能和风能作为主要的可再生能源类型,其特点和应用模式对整个能源网络的未来具有决定性影响。太阳能,以其清洁、无尽的特性,正成为全球能源转型的重要力量。根据数据,2020年全球太阳能发电量增长了23%,成为增长最快的可再生能源形式^[1]。太阳能的分布式发电特性,使得它能够与智能电网技术完美结合,通过智能调度策略和需求响应机制,实现能源的高效利用和优化配置。例如,德国的“能源转型”政策推动了太阳能的广泛应用,并通过智能电网技术实现了对太阳能发电波动性的有效管理。

风能,作为一种技术成熟且成本逐渐降低的可再生能源,同样在智能电网的融合中扮演着关键角色。全球风能理事会(GWEC)的数据显示,2020年全球风电新增装机容量达到93GW,其中陆上风电占了大部分。风能的间歇性和不可预测性要求智能电网具备高度的灵活性和适应性,以确保电网的稳定运行。例如,丹麦作为风能利用的先驱,其风力发电量占全国电力消费的比例高达47%,这得益于其先进的智能电网技术和储能系统,能够有效地平衡风能发电的波动性,确保电力供应的连续性和可靠性^[4]。

太阳能和风能的广泛应用,不仅需要智能电网技术的支持,还需要政策的引导和法规的保障。通过技术创新和政策推动,智能电网与可再生能源的融合将为未来能源网络的可持续发展提供坚实的基础。

4 智能电网与可再生能源的融合挑战

4.1 系统稳定性挑战: 可再生能源波动对电网的影响

随着全球能源转型的加速,可再生能源在智能电网中的比重日益增加,但其波动性对电网的稳定性构成了显著挑战。风能和太阳能发电量受天气条件影响极大,其输出功率的不稳定性可能导致电网频率和电压的波动,进而影响整个电力系统的稳定

运行。风力发电的波动性可导致电网频率偏离正常范围高达 $\pm 1\text{Hz}$ ，而太阳能发电的波动性则可能在几分钟内造成发电量的大幅波动。为应对这一挑战，智能电网必须采用先进的预测技术和灵活的调度策略，如引入需求响应机制和储能系统，以平衡供需关系，确保电网的稳定性和可靠性。智能电网的智能化正是对这一理念的现代诠释。

4.2 信息处理挑战：大数据分析在融合中的应用难题

在智能电网与可再生能源融合的过程中，大数据分析的应用是解决信息处理挑战的关键。随着可再生能源如风能、太阳能的接入，电网产生了前所未有的数据量。这些数据不仅包括发电量、用电量，还包括天气条件、设备状态、市场交易等多维度信息。为了有效管理这些数据，需要先进的分析模型和算法，如机器学习和人工智能技术，来预测能源需求、优化发电调度，并确保电网的稳定运行。

例如，通过大数据分析，可以对风力发电的波动性进行预测，从而提前调整其他发电资源的输出，以平衡电网负荷。在太阳能发电方面，通过分析历史天气数据和实时云层覆盖情况，可以更准确地预测发电量，进而优化储能系统的充放电策略。在智能电网与可再生能源融合的长期进程中，大数据分析将不断推动技术进步，解决信息处理的难题。

然而，大数据分析在实际应用中也面临挑战。数据的收集、存储、处理和分析需要强大的计算能力和先进的技术平台。此外，数据隐私和安全问题也不容忽视。因此，建立一个安全、高效的数据处理框架是实现智能电网与可再生能源融合的必要条件。通过不断优化算法和提升计算能力，大数据分析将能够更好地服务于智能电网的稳定运行和可再生能源的高效利用。

4.3 设备升级挑战：现有电网基础设施的改造需求

随着智能电网与可再生能源融合的不断深入，现有电网基础设施的改造需求日益凸显。根据国际能源署（IEA）的报告，全球电力系统的转型需要在2030年前投资约1.5万亿美元，以适应可再生能源的接入和智能电网技术的应用^[1]。这一巨额投资不仅包括对传统电网的升级，还包括对智能计量、自动化控制和高级数据分析系统的部署。例如，美国

加利福尼亚州的PG&E公司已经开始实施一项大规模的智能电网升级计划，旨在通过安装智能电表和先进的通信网络，提高电网的效率和可靠性，同时更好地整合太阳能和风能等可再生能源^[5]。

在技术层面，电网基础设施的改造需要采用先进的电力电子设备，如灵活交流输电系统（FACTS）和高压直流输电（HVDC）技术，以增强电网的灵活性和控制能力。这些技术能够有效应对可再生能源的间歇性和波动性，确保电力供应的稳定。同时，为了实现电网的智能化，需要对现有的配电网进行数字化改造，引入分布式能源资源管理系统（DERMS），以实现分布式发电、储能和负载的实时监控和优化控制。

此外，电网基础设施的改造还涉及到对老旧输电线路和变电站的升级或重建，以适应新的技术标准和环境要求。例如，中国国家电网公司正在推进的“坚强智能电网”项目，就包括了对老旧电网的改造和升级，以提高电网的输电能力和智能化水平。通过这些改造，电网能够更好地适应未来能源网络的需求，实现与可再生能源的无缝融合。

4.4 资源整合挑战：跨区域资源调配与优化

在智能电网与可再生能源融合的背景下，跨区域资源调配与优化成为一项关键挑战。随着可再生能源如风能、太阳能的分布式特性，其产出具有显著的地域性和间歇性，这要求电网必须具备高度的灵活性和适应性。风能和太阳能的发电量在某些地区可能在一天之内波动高达50%。因此，智能电网必须能够实时响应这些波动，通过先进的预测模型和调度算法，实现资源的最优配置。例如，美国加利福尼亚州通过实施需求响应计划，成功地在高峰时段减少了电力需求，从而降低了对传统发电厂的依赖，并提高了可再生能源的利用率^[5]。此外，跨区域的电网互联，如欧洲的超级电网计划，通过连接不同国家的电网，可以实现资源的共享和互补，从而提高整个系统的稳定性和效率。在这一过程中，政策和法规的支持至关重要，它们需要为跨区域合作提供法律框架和激励机制，以促进资源的高效整合和优化。

4.5 社会接受度挑战：公众认知与参与度提升的必要性

在智能电网与可再生能源融合的宏伟蓝图中，

公众认知与参与度的提升是实现这一目标的关键挑战之一。随着全球气候变化的加剧，可再生能源的使用已成为减少温室气体排放、实现可持续发展的必由之路。然而公众对智能电网技术及其与可再生能源融合的了解有限，这在很大程度上阻碍了相关技术的推广和应用。例如，一项针对欧洲国家的调查显示，尽管有超过 60% 的受访者表示支持可再生能源，但对智能电网技术的认知度不足 30%^[6]。这种认知差距导致了对新技术的抵触情绪和缺乏参与意愿，从而影响了智能电网项目的顺利实施。

为了克服这一挑战，必须采取多管齐下的策略来提升公众的认知水平和参与度。首先，政府和相关机构应通过教育和宣传活动，普及智能电网和可再生能源的知识，提高公众的理解和兴趣。例如，可以利用社交媒体、公共讲座和互动展览等形式，让公众直观地了解智能电网如何帮助提高能源效率、降低电费以及促进环境可持续性。其次，通过引入激励措施，如税收减免、补贴或奖励计划，鼓励家庭和企业安装太阳能板、风力发电机等可再生能源设备，并与智能电网系统相连。此外，案例研究和成功故事的分享能够有效展示智能电网与可再生能源融合带来的实际效益，从而增强公众的信心和参与意愿。

在提升公众参与度的过程中，还应重视社会接受度的动态变化和影响因素。社会心理学家认为，公众对新技术的接受程度受到多种因素的影响，包括个人价值观、社会规范、风险感知和利益相关性等。因此，政策制定者和能源企业需要深入了解这些因素，并据此设计更为精准的推广策略。例如，通过构建社区微电网项目，让居民直接参与到能源生产与管理中来，可以有效提高他们对智能电网技术的认同感和归属感。只有当公众充分认识到智能电网与可再生能源融合的长远利益时，他们才会成为推动这一变革的积极力量。

5 智能电网促进可再生能源的优化配置

5.1 可再生能源的智能调度策略

在智能电网与可再生能源融合的蓝图中，智能调度策略扮演着至关重要的角色。随着风能和太阳能等可再生能源的日益普及，电网需要应对这些能源的间歇性和不可预测性。例如，太阳能发电在晴天时产量高，而在阴天或夜间则几乎为零。智能调

度策略通过先进的预测模型和实时数据分析，能够优化这些可变能源的整合，确保电网的稳定运行。智能调度可以提高可再生能源的利用率，减少对化石燃料的依赖，从而降低温室气体排放。例如，德国的“Energiewende”（能源转型）计划中，通过智能调度策略，成功地将可再生能源在电力消费中的比例提高到了 40% 以上^[7]。此外，智能调度策略还涉及需求响应机制，通过激励措施鼓励用户在能源需求高峰时段减少用电，或在可再生能源供应充足时增加用电，从而实现供需平衡。这种策略不仅提升了电网的灵活性，还促进了能源效率的提高。

5.2 需求响应机制在优化配置中的应用

需求响应机制（Demand Response, DR）是智能电网与可再生能源融合中不可或缺的一环，它通过激励措施促使用户在电力需求高峰时段减少用电，或在电力供应过剩时增加用电，从而优化电力资源的配置。例如，根据美国能源部的数据，需求响应可以减少高达 10% 的峰值需求，显著降低电网的负荷压力^[8]。在可再生能源方面，需求响应机制能够帮助平衡风能和太阳能发电的间歇性，通过智能调度策略，确保在可再生能源发电量低时，用户减少用电，而在发电量高时，用户增加用电，从而提高整体能源效率。此外，需求响应机制的实施需要依赖先进的信息通信技术，如智能电表和数据分析工具，以实时监控电网状态并快速响应市场变化。需求响应机制正是实现这一愿景的关键技术之一。

5.3 智能电网对分布式发电资源的整合

随着智能电网技术的不断进步，对分布式发电资源的整合已成为推动能源转型和提高能源效率的关键。分布式发电资源，如太阳能光伏、风能、小型水电和生物质能等，因其环境友好和可再生特性，正逐渐成为能源供应的重要组成部分。智能电网通过先进的通信和控制技术，能够实现对这些分布式资源的高效管理和优化配置。例如，根据美国能源部的数据，分布式发电资源在 2020 年为美国提供了约 11% 的电力，预计这一比例在未来十年内将显著增长^[9]。智能电网通过实时监控和预测分析，能够平衡供需，减少能源浪费，并提高电网的可靠性。此外，智能电网的灵活性允许分布式发电资源在需要时快速响应，从而支持电网的稳定运行。智能电网正是这种新思维的体现，它通过整合分布式发电资

源，为未来能源网络的蓝图描绘出一幅可持续发展的图景。

5.4 微电网的智能管理与优化

微电网作为智能电网中一个重要的组成部分，其智能管理与优化对于实现可再生能源的高效利用和电网的稳定运行至关重要。以某地的微电网项目为例，通过安装先进的传感器和控制系统，实现了对分布式能源资源的实时监控和管理。这些系统能够根据电网负荷和可再生能源的产出情况，自动调整发电和储能设备的运行状态，从而优化能源的分配和使用效率。例如，在风能和太阳能发电量充足时，系统会优先使用这些清洁能源，并将多余的电能储存起来，以备无风或阴天时使用。这种智能调度策略不仅提高了可再生能源的利用率，还减少了对传统化石燃料的依赖，有助于降低碳排放。

在微电网的智能管理与优化过程中，需求响应机制扮演了关键角色。通过需求侧管理，用户可以根据电价信号或电网运行状况调整自己的用电行为，从而在高峰时段减少用电量，或在低谷时段增加用电量。这种机制能够有效缓解电网的负荷压力，提高电网的运行稳定性。例如，一项研究显示，在美国加利福尼亚州，通过需求响应机制，用户在高峰时段的用电量减少了约 15%，这不仅减轻了电网的负担，还降低了用户的电费支出^[10]。微电网的智能管理与优化，结合需求响应机制，能够实现能源的高效利用和成本的降低。

储能系统在微电网的智能管理与优化中也发挥着不可替代的作用。储能技术，如锂离子电池和液流电池，能够有效地存储过剩的可再生能源，并在需要时释放能量，平衡供需。例如，一个典型的微电网项目可能配备有数兆瓦时的储能容量，能够在太阳能发电量高的白天储存能量，并在夜间或阴天时释放这些能量，保证电网的连续供电。这种储能系统的应用，不仅提高了微电网的自给自足能力，还增强了电网对可再生能源波动的适应性。智能电网与可再生能源的融合，通过储能系统的优化配置，为未来能源网络的蓝图提供了坚实的技术支撑^[11]。

5.5 储能系统在智能电网中的作用与优化配置

储能系统在智能电网中扮演着至关重要的角色，它不仅能够平衡供需，还能提高电网的稳定性和效率。随着可再生能源如风能和太阳能的间歇性特点，

储能技术成为解决这些能源波动的关键。例如，全球储能市场预计将从 2020 年的 4 吉瓦时增长到 2030 年的 150 吉瓦时，这表明储能技术的部署正在迅速扩大^[12]。储能系统通过吸收过剩的可再生能源电力，并在需求高峰时释放电力，从而优化了能源的配置。此外，储能系统还可以作为电网的缓冲，减少对传统峰值发电厂的依赖，降低碳排放。例如，特斯拉的 Powerwall 家用电池储能系统，已经在全球范围内被广泛采用，它不仅为家庭提供了备用电源，还能够将家庭太阳能板产生的电力储存起来，实现能源的自给自足。在智能电网的优化配置中，储能系统通过高级算法和预测模型，如机器学习和人工智能，能够预测电网负荷和可再生能源的产出，从而实现更加精确的能源调度^[13]。储能系统正是智能电网中实现这一目标的关键技术。

6 政策与法规在推动融合中的作用

6.1 国际上智能电网与可再生能源融合的政策案例

在探讨智能电网与可再生能源融合的政策案例时，德国的能源转型政策（Energiewende）提供了一个引人注目的范例。该政策旨在通过大规模整合风能和太阳能等可再生能源，实现能源供应的可持续性和去碳化。根据国际能源署（IEA）的数据，德国在 2019 年可再生能源占总电力消费的比例达到了 40%，其中风能和太阳能贡献了约 20%。这一成就部分得益于政府对智能电网技术的大力投资和政策支持，例如通过立法确保电网对分布式发电的接入，并为家庭和企业安装太阳能光伏板提供补贴^[14]。此外，德国政府还推动了需求响应机制的实施，鼓励消费者在电力需求高峰时段减少用电，以平衡电网负荷。这些政策不仅促进了可再生能源的优化配置，还提高了电网的灵活性和稳定性，为其他国家提供了宝贵的经验。

6.2 法规框架对融合进程的影响分析

在智能电网与可再生能源融合的进程中，法规框架扮演着至关重要的角色。法规不仅为技术创新提供了必要的指导和约束，而且为市场参与者的行为设定了明确的规则。例如，根据国际能源署（IEA）的数据，欧洲联盟通过实施《可再生能源指令》和《能源效率指令》，成功地推动了可再生能源在能源结构中的比重提升。这些法规框架通过设定具体

的可再生能源目标和时间表，激励了电网运营商和能源供应商投资于智能电网技术，以更好地整合风能、太阳能等波动性较大的可再生能源。

法规框架还通过确保公平竞争和透明度，促进了智能电网技术的创新和应用。例如，美国联邦能源监管委员会（FERC）颁布的 Order 888 和 Order 889，旨在促进电力市场的开放和竞争，同时推动了智能电网技术的发展。这些法规要求电网公司开放其传输网络，允许第三方接入，从而促进了分布式发电资源的整合和微电网的智能管理。通过这样的法规，智能电网得以实现更高效的能源分配和更灵活的供需响应。

此外，法规框架在推动储能系统优化配置方面也发挥了关键作用。储能技术是智能电网与可再生能源融合的关键，它能够缓解可再生能源的间歇性问题，提高电网的稳定性。以德国为例，其《能源转型法》为储能系统提供了法律基础，并通过补贴和税收优惠等措施，鼓励储能技术的研发和应用。这种政策支持不仅促进了储能技术的商业化，也为智能电网的稳定运行提供了保障^[15]。

综上所述，法规框架通过设定明确的目标、促进公平竞争、提供政策支持等手段，对智能电网与可再生能源融合的进程产生了深远的影响。在能源转型的道路上，合理的法规框架是确保智能电网与可再生能源融合成功的关键。

7 智能电网与可再生能源融合的未来展望

7.1 技术创新对融合进程的推动作用

随着智能电网技术的不断进步，其与可再生能源的融合进程得到了显著的推动。技术创新不仅提高了电网的智能化水平，还增强了可再生能源的接入能力和电网的稳定性。例如，高级计量基础设施（AMI）的部署使得电网能够实时监控和管理电力流动，从而更有效地整合风能和太阳能等间歇性能源。根据国际能源署（IEA）的数据，到 2025 年，全球智能电表的安装量预计将超过 10 亿台，这将极大地促进智能电网与可再生能源的融合^[16]。

技术创新还体现在储能技术的突破上，如锂离子电池和液流电池等储能系统的成本下降和性能提升，为电网提供了更灵活的调节手段，以应对可再生能源的波动性。例如，特斯拉的 Powerwall 储能系统已经在全球范围内得到应用，它能够存储太阳能

发电，为家庭提供稳定的电力供应，甚至在电网故障时作为备用电源^[17]。

此外，大数据和人工智能技术的应用为智能电网提供了强大的信息处理能力，使得电网运营商能够更准确地预测电力需求和可再生能源的产出，从而优化电网的运行。例如，通过机器学习算法，电网可以预测天气变化对太阳能发电量的影响，提前调整电网负荷，确保电力供应的连续性和稳定性^[18]。

技术创新还推动了政策和法规的制定，为智能电网与可再生能源的融合提供了法律框架和激励机制。例如，欧盟的“清洁能源包”政策鼓励成员国采用智能电网技术，以促进可再生能源的利用。技术创新与政策的结合，为智能电网与可再生能源的融合提供了坚实的基础，预示着未来能源网络将更加高效、可靠和可持续^[19]。

7.2 智能电网与可再生能源融合的长期影响预测

随着智能电网技术的不断进步和可再生能源的广泛应用，预计未来能源网络将实现更加高效和可持续的运行模式。根据预测，到 2050 年，全球可再生能源发电量将占总发电量的 80% 以上，而智能电网技术将在此过程中扮演至关重要的角色^[20]。智能电网通过实时数据分析和先进的通信技术，能够有效管理可再生能源的波动性，确保电网的稳定性和可靠性。例如，智能电网能够通过需求响应机制，动态调整电力供应和需求，从而减少能源浪费并提高能源利用效率。此外，智能电网的分布式发电资源整合能力，将使得太阳能和风能等可再生能源得到更广泛的利用，从而减少对化石燃料的依赖，降低温室气体排放。智能电网与可再生能源的融合正是对这一理念的践行，它预示着能源产业的一场革命，将引领我们走向一个更加清洁、高效和可持续的未来。

参考文献

- [1] Kataray T, Nitesh B, Yarram B, et al. Integration of smart grid with renewable energy sources: Opportunities and challenges—A comprehensive review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 58: 103363.
- [2] Tan K M, Babu T S, Ramachandaramurthy V K, et al.

- Empowering smart grid: A comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 39: 102591.
- [3] Rehman A U, Wadud Z, Elavarasan R M, et al. An optimal power usage scheduling in smart grid integrated with renewable energy sources for energy management[J]. *IEEE access*, 2021, 9: 84619-84638.
- [4] Khalil M I, Jhanjhi N Z, Humayun M, et al. Hybrid smart grid with sustainable energy efficient resources for smart cities[J]. *sustainable energy technologies and assessments*, 2021, 46: 101211.
- [5] Akhtar I, Kirmani S, Jameel M. Reliability assessment of power system considering the impact of renewable energy sources integration into grid with advanced intelligent strategies[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 32485-32497.
- [6] Hoang A T, Nguyen X P. Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process[J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 305: 127161.
- [7] Ali A O, Elmarghany M R, Abdelsalam M M, et al. Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104609.
- [8] 李萌,沈力,陆佳鑫,等.基于隐马尔可夫模型的智能电网可再生能源整合优化[J].*环境技术*, 2024, 42(8):162-168.
- [9] 刘志坚,王旭辉,郑超铭.计及可再生能源发电成本的智能电网分布式经济调度[J].*电子测量技术*, 2020, 43(2):7.
- [10] 曹发强.电气自动化系统中的智能化技术应用[J]. 2024.
- [11] 王超.基于智能电网技术的电力调度自动化研究[C]//2024 新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(三).2024.
- [12] 唐重建.智能电网中的储能技术应用分析[J].*中国科技期刊数据库 工业 A*, 2023.
- [13] 李志军,刘京京,陈爱琴,等.可再生能源转化为氨氢能源体系技术和经济性分析[J].*上海节能*, 2022(9):1125-1131.
- [14] 樊一鸣.智能电网建设中的政府职能优化研究[D].西南政法大学,2021.
- [15] 张书维.输配电网智能化调控与可再生能源融合研究[J].*电气技术与经济*, 2024(1):249-251.
- [16] 吴岩,王光政.基于 CiteSpace 的配电网韧性评估与提升研究综述与展望[J].*中国电力*, 2023, 56(12):100-112.
- [17] 金晶.智能电网技术在电力系统运行中的应用[J].*中国科技投资*, 2024(12):16-18.
- [18] 欧阳芳.基于区块链的智能电网可信能源交易研究[D].浙江师范大学,2023.
- [19] 付先勇.电气自动化技术在智能电网中的应用[J].*中国宽带*, 2023, 19(3):151-153.
- [20] 王博宇,张喻,郭昱成.可再生能源与电力系统的可持续发展[J].*建材发展导向*, 2024, 22(5):120-122.
- 版权声明:** ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

