



风光互补发电耦合氢储能系统研究综述

荆涛¹, 陈庚², 王子豪², 许朋江¹, 李高潮¹, 贾明晓¹, 王跃社²,
师进文², 李明涛²

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710045; 2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 基于风光互补发电、电解水制氢、储氢、氢燃料电池等技术的风光互补发电耦合氢储能系统, 以氢能为能源载体, 是实现可再生能源-氢能-电能规模化应用的重要途径。介绍了风光互补发电、电解水制氢、储氢和氢燃料电池等关键技术的发展现状, 对风光互补发电耦合氢储能系统中的离网型、并网型系统和容量配置优化等研究热点进行了分析, 为风光互补发电耦合氢储能系统的进一步技术研究和工程应用提供参考。

关键词: 风能; 太阳能; 电解水; 制氢; 储氢; 氢燃料电池

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202012060

0 引言

当前, 资源枯竭、生态环境恶化等问题正随着化石能源的大量使用而愈发突出, 已经成为经济繁荣和人民生活品质提升必须逾越的鸿沟。国际社会同时将可再生能源的开发利用作为解决问题的方案之一。20 世纪以来, 强化可再生能源的基础和应用研究、提高可再生能源占比已经成为世界上多数国家, 尤其是发达国家, 制定能源政策的基调。

风能、太阳能分布广泛和储量巨大的特色赋予了二者空间和时间上的无限开发利用潜力, 被认为是最具应用前景的可再生能源。虽然天气和气候的多变起伏给风能、太阳能带来不小影响, 使其出力难以摆脱日常波动和随机多变的自然缺陷, 但是二者在时间(昼和夜、夏秋和冬春)和空间上具有天然性的互补优势^[1]。基于此, 风能发电和太阳能发电可以组成功率输出在时间上互补、可调节范围大的高效电力系统。实际上, 由

于电能无法直接存储, 电网消纳能力不足带来的弃风、弃光问题是风能、太阳能开发利用中的痛点。因此, 储能系统是可再生能源开发中的关键技术, 其通过充电、放电的削峰填谷作用可以实现对电力系统功率和能量的转移存储, 从而有效缓解可再生能源开发中的弃电问题^[2]。目前, 光伏发电、风力发电主要采用效率较高的蓄电池储能, 但是能量密度低、储存时间短等劣势限制了蓄电池储能的进一步发展应用。氢能是一种质量能量密度高、储存期长的高效储能方式。因此, 利用氢储能来调节、储存转化能量, 缓解风光互补发电系统的弃风、弃光问题是当前风能、太阳能应用研究的发展趋势。

氢能具备质量能量密度高、绿色无污染等一系列优势, 在现代工业中氢气市场需求十分巨大, 已在许多领域表现出替代化石能源的发展趋势^[3]。利用可再生能源(风、光等)电解水制氢可以将无污染、零排放贯穿氢气制备到使用的全过程, 同时解决风能、太阳能开发利用中的弃风、弃光问题。利用清洁能源发电制氢是未来氢能发展的重要方向^[4]。在氢能的直接利用方面, 氢燃料电池是实现高效、清洁地将氢能稳定转化为电能的发电方式, 将从根本上改变目前以氢碳为基础的能源体系。氢燃料电池供电与其他传统

收稿日期: 2020-12-10; **修回日期:** 2021-04-02。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(可再生能源与火力发电耦合集成与灵活运行控制技术, 2019 YFB1505400)。

供电系统相比, 具有更高的能量密度和能量转化效率, 能够实现有害温室气体超低排放甚至零排放(如 CO_2 、 NO_x 、 SO_x 等)。目前, 航空航天和潜艇动力等领域已经广泛使用氢燃料电池, 在新能源电力汽车、电站和便携电源等民用领域也实现了一定规模的应用示范和商业使用。采用氢燃料电池作为能源转换装置是当前发展“氢经济”的主要用氢方式, 是实现绿色清洁的能源利用理想路径^[5]。

综上所述, 将风光互补发电、电解水制氢、储氢、氢燃料电池等技术集成于一体的风光互补发电耦合氢储能系统, 是具有重要开发利用价值和推广应用前景的可再生能源转化利用技术。通过对该系统的深入研究, 对探索可再生能源耦合开发利用, 平抑风光互补发电波动性以及氢能的高效绿色生产具有重要意义。

1 风光互补发电耦合氢储能系统关键技术

1.1 风光互补发电

风光互补发电系统在资源利用方面具有时空互补性, 同时在系统配置方面具有合理性。研究表明, 风光互补发电系统比风力或光伏发电独立系统的运行维护成本更低^[6]。早期人们对风光互补发电系统的利用和研究, 就是简单将风力发电和光伏发电结合。20世纪90年代初, 人们最早将风能和太阳能结合进行混合开发利用研究, 文献^[7]从气象条件的角度对该问题进行了关注和研究。文献^[8-10]通过概率统计的方法得到风能和太阳能潜力值, 科学地支撑论证了风光互补发电系统的研究前景。与此同时, 中国的研究者们也渐渐开始关注风光互补发电系统的研究, 从理论研究到电机转换设备设计等领域均有学者投入其中。

风光互补发电并不是简单地将风电与光伏连接组合, 而是经过合理的设计, 达到系统输出稳定、降低运行维护成本等一系列目的。在早期研究的基础上, 国内外学者开始关注系统的优化设计以及系统运行中的控制调节。文献^[9-10]对孤立的小规模风光互补发电系统进行研究, 发现根据负载和当地风光储量数据来设计和配置系统是实现发电成本和可靠性优化的有效途径, 且研究

表明在一些独立应用中单独使用风力系统或光伏组件是不经济的。文献^[11]基于风光互补发电储能系统设计优化研究, 利用CAD软件, 提出了一整套风光互补发电系统优化精确配置的方法。文献^[12]总结了3种常用的风能太阳能混合发电系统的选型方法, 根据负载需要选择和配置组件的最优规模, 实现早期投资成本最小, 同时保持系统可靠性。值得注意的是, 模拟仿真软件的开发一直是风光互补发电系统研究的重要方向, 美国的Hybrid2和HOMER是目前针对主流可再生能源部件和系统进行混合发电系统优化设计的代表性成果。其中, Hybrid2可以根据混合发电系统结构、安装地点气象数据和负载参数等实现对风光互补系统的精准模拟运行, HOMER可对可再生能源混合发电系统进行模拟分析和经济性评估^[13]。

1.2 电解水制氢

目前, 氢气的化学制备方法主要包括: 电解水制氢、光化学法制氢、热化学法和等离子体化学法等。其中, 电解水制氢是发展应用比较完善的传统制氢方法, 其工艺机制和生产流程相对简单, 各生产环节操作容易实现, 并且所得氢气纯度高达99%~99.9% (杂质主要是 H_2O 和 O_2), 可以直接在氢燃料电池和许多工业生产中使用, 是最有发展潜力的大规模制氢技术。

电解水制氢的常用方法包括: 碱性电解、固体聚合物电解和高温固体氧化物电解3种方法。其中, 碱性电解水制氢是当前工业生产中最成熟的技术, 其原理如图1所示。碱性电解水制氢技术工艺简单、成本低, 但存在电解效率相对较低、碱液具有一定腐蚀性等缺点^[14]。目前, 针对碱性电解水制氢技术的研究主要集中在碱性电解池设备的开发和性能提高方面。固体聚合物电解水制氢不存在碱性电解水制氢的碱液流失和腐蚀问题, 并且电解装置耗能相对较低, 电解所得氢气杂质较少, 具有较高的电解效率^[15]。近年来, 固体聚合物电解水制氢技术因环境友好、气体纯度和电解效率高等优势受到越来越多的学者关注, 已经成为各国电解水制氢研究的热点^[16]。目前, 美国掌握着固体聚合物电解水制氢的领先技术, 其应用主要集中在航天技术和水下装备供氧等军事相关领域。日本在WE-NET项目中针对固体聚合物电解水制氢进行了探索试验, 其电解水

制氢的电流效率可达 99.2%。高温固体氧化物电解水制氢的装置需要在 700~1000℃ 的反应环境下进行电解，其电极不再使用贵金属材料，成本较低、性能稳定。高温环境虽然可以降低电能消耗、提高系统制氢效率，但在设备选材、使用寿命和大规模工业部署等方面要求较高，导致高温固体氧化物电解水制氢应用较少^[17]。文献 [18] 对不同电解水技术的具体能源需求、碳足迹以及 2030 年生产预测成本等进行比较评估，结果表明碱性电解水依然是目前最具优势的技术。

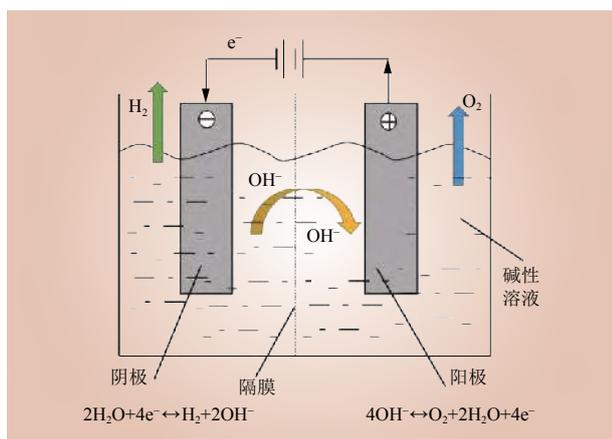


图 1 碱性电解水制氢原理

Fig. 1 Principle of hydrogen production by alkaline water electrolysis

在实际的工业应用中，制约电解水制氢发展的主要原因是电解过程消耗过多电力，电力成本在整个电解水制氢成本中约占到总成本的 80%。当前，采用电解水制氢生产的氢气产量约占世界氢气总产量 4%，电力主要来源于常规燃煤电厂供电。因此，利用可再生能源发电系统的溢网电力进行电解水制氢，能够以较低成本生产氢气，不仅生产过程绿色清洁，而且容易实现大规模建设，具有光明的发展前景^[19]。中国相关氢能产业发展意见中指出，部分含可再生能源电网的城市可发展谷段电力制氢，作为城市减少碳排放的重要措施。文献 [12] 依据不同电解水制氢技术的特点，研究指出风力发电更适宜与碱性电解水制氢技术进行耦合配置，光伏发电与固体聚合物电解水制氢技术搭配更能发挥其系统效率。

1.3 储氢

储氢技术主要有高压气态储氢、液态储氢和固态储氢^[20]。高压气态储氢是当前储氢技术中最

具经济性和实用性的储氢技术，目前氢燃料电池新能源汽车采用的就是高压气态储氢技术^[21]。以 70 MPa 标准的塑料内胆纤维缠绕（四型）储氢瓶为依托的高压气态储氢技术已经能够大规模商业应用。国内储氢罐研发已达到国际领先水平，实现了 77 MPa 和 98 MPa 储氢罐的制造，并且具有抗爆性能好、可实时监测运行状态等多种优势^[22]。液态储氢技术主要有液化储氢和液体有机氢化物储氢，液态储氢技术的优势是具有很高的体积密度，但是储氢过程需要较高的能耗，并且安全性相对较低。液体有机氢化物储氢和液氨低温储氢 2 种技术能够实现较大的储氢量，但需要复杂的反应装置，并且可能产生气体和蒸汽杂质。目前，中国制造生产的液态储氢罐和液态储氢装备在航天产业中应用较多。文献 [23] 设计了一种可以储存液氢和低温氢气的复合储氢装置。文献 [24] 对同样的复合储氢装置进行了研究，结果显示复合装置不仅可以提高储氢密度，而且能够减少储存过程中的氢气蒸发量。固态储氢以金属氢化物或化学氢化物作为储氢载体，通过化学吸附方式进行储氢，其储氢密度比其他 2 种储氢方式要高。因此，固态储氢是未来氢能应用于新能源汽车中最值得关注 and 研究的储氢技术，但需要进一步研究解决储氢效率低以及充放氢所需时间长和温度要求高等问题^[25]。

1.4 氢燃料电池发电

燃料电池主要有 6 种类型：质子交换膜燃料电池、碱性燃料电池、磷酸燃料电池、微生物燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池。其中，前 4 种工作在低温条件（50~200℃），后 2 种则在较高温度（650~1000℃）下运行。质子交换膜燃料电池的工作运行温度相对较低，启动快，已广泛使用于交通、预备电源和移动设备等领域，研究和应用最为成熟^[26]，典型的质子交换膜燃料电池结构示意图如图 2 所示。成本、稳定性和基础设施等问题是质子交换膜燃料电池技术实现商业化应用的主要障碍^[27]。目前，国内对质子交换膜燃料电池的研究主要集中在电极材料方面，重点探索低成本催化剂的研发^[28]。此外，质子交换膜、电池热管理以及电解液流动动力学等方面会对氢燃料电池整体能量转化效率产生重要影响，也是质子交换膜燃料电池的研究重点。现

在，中国制造生产氢燃料电池的技术和质量有待改进，在使用时间和成本投资方面还有很大追赶空间。

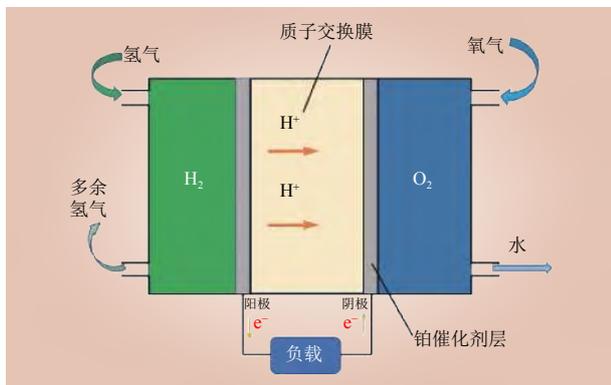


图 2 质子交换膜燃料电池

Fig. 2 Proton exchange membrane hydrogen fuel cell

值得注意的是，氢燃料电池汽车产业变革性发展给氢能产业带来了机遇。目前，氢燃料电池汽车进入了落地阶段，国内外车企研发制造的氢燃料电池汽车陆续进入市场^[29]。未来氢燃料电池汽车领域重点研发方向是小型化、集成化和低成本。虽然氢燃料电池汽车的较高成本限制了其主导市场的速度，但减少碳排放所带来的公共利益可以显著优化生活环境。

1.5 氢燃料燃气轮机发电

氢气是一种能量密度很高的清洁燃料，其标准热值为 143 kJ/g，远高于天然气（标准热值为 38.97 kJ/g）。20 世纪 90 年代开始，多个国家和研究机构开始关注并制定了氢燃气轮机的相关研究计划^[3]。

2005 年，美国能源部启动了“先进 IGCC/H₂ 燃气轮机研究”项目，该项目主要开展了氢燃料和富氢燃料的燃烧研究、氢燃料燃气轮机的材料研究、冷却研究与整体系统的优化设计研究等工作。2008 年，欧盟将氢燃料燃气轮机的相关研究列为欧盟第七框架中一项重要的研究项目。日本也将“高效富氢燃料 IGCC 系统研究”列入“新日光计划”之中，其目的是研制出低污染且效率大于 60% 的煤基 IGCC 系统^[30]。2019 年 2 月，西门子能源团队完成了对氢燃料燃气轮机改进，并且在德国开展了以 100% 氢气作为燃料的燃气轮机原型机试验；2020 年 3 月，日本三菱

日立公司改进了氢燃料燃气轮机系统，将燃料从 30% 氢气和 70% 天然气混合燃料过渡到 100% 纯氢气燃料，并从美国犹他州的山间电力局获得了 2 台该型号燃气轮机订单^[31]。

虽然关于氢燃料燃气轮机的研究已较为全面，相应成品也实现商业化，但是氢燃料燃气轮机依然面临一些稳定性与安全性问题：氢气燃烧易回火、非纯氧燃烧易生成氮氧化物以及氢燃烧温度较高需要新材料等；同时，由于富氢燃料组分较为复杂，需要进一步研究，以便在燃料预混阶段找到最佳的空气燃料比。

2 风光互补发电耦合氢储能系统优化策略

典型的风光互补发电制氢、储氢、用氢一体化应用系统主要包括光伏发电、风力发电装置、逆变器和系统控制器，以及由蓄电池、电解槽、氢气储罐和氢燃料电池组成的氢储能单元，风光互补发电耦合氢储能系统主要装置布局如图 3 所示。光伏发电、风力发电装置分别利用太阳能、风能发电，是该系统的能量输入单元。逆变器可以完成系统交流、直流电力转换，保证系统内部各装置单元之间的能量传输平衡。电解槽用于电解水制氢，将非稳态电能转化为氢能，所得氢气通过储氢罐集中存储。随后，氢能可直接通过氢燃料电池输出稳定电能。控制系统负责系统各单元工作状态的监控以及系统能量转化的综合调控。蓄电池存储少量电能，用于系统开机、短时电力输出补充和紧急情况等，保障系统正常运行。

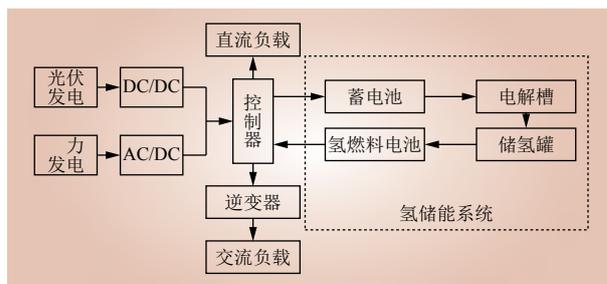


图 3 风光互补发电耦合氢储能系统主要装置布局
Fig. 3 Main device layout for the integrated system of wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage

按照是否并网，风光互补发电耦合氢储能系

统可以分为离网与并网 2 种类型。在离网型系统中，风、光发电模块不接入电网，系统较为简单，投资及运行维护成本较低。在并网型系统中，风、光发电首先满足电网需要，当电网消纳能力不足时，通过电解水制氢生产制备氢气进行存储，实现电力转储。并网型设计主要用于解决弃风、弃电问题，在实现电能转储的同时，减少对电网的冲击，系统较为复杂。

2.1 离网型风光互补发电耦合氢储能系统

当前对离网型系统的研究和应用较并网型更为广泛，学者们针对离网型系统进行了大量的建模和仿真研究。文献 [32] 基于 Matlab/Simulink 建立了风光互补制氢系统模型，使用冀中南地区的气候参数和正交模拟实验研究了各种因素对系统制氢速率的影响，研究结果表明系统的产氢速率对太阳辐射量最为敏感，其次是大气温度、电解水温度和风速。文献 [33] 较早提出了独立运行使用的风光氢发电系统，以西藏地区村落条件和相关数据为例，对系统的响应特性等进行了模拟分析，证明了所提发电系统适合风资源和太阳能储量较为丰富且变化较快的地区。此外，研究还指出在系统中使用超级电容堆有利于克服氢燃料电池存在的最大负荷响应慢的问题。

部分离网型风光互补发电耦合氢储能系统采取了直接制氢模式。在该系统中，氢气作为最终产物，不再通过氢燃料电池发电。文献 [34] 对风光混合发电直接制氢系统进行了设计，并进行了优化计算。文献 [35] 对独立风光直接制氢系统进行了模拟实验研究，评估了系统的制氢能力。文献 [36] 对比研究了氢能的多种利用途径，发现氢气多样利用系统实现收益存在较为严格的风速（4.66 m/s）和氢气价格（10 美元/kg）限制条件。将氢气以多种方式加以利用，虽然一定程度上可以拓宽风光互补发电耦合氢储能系统的市场空间，但需要对具体地区风、光资源及发电规模和氢气利用方式等多种因素进行经济性评估。

2.2 并网型风光互补发电耦合氢储能系统

并网型风光互补发电耦合氢储能系统虽然利用风、光资源的时空互补性，对本身固有波动性进行了一定程度平抑，但其不确定性仍然较大，接入电网后的安全性和稳定性仍存在较大问题。因此，目前并网型风光互补发电耦合氢储能系统

仍处于研究验证阶段，实际建设案例较少。文献 [37] 采用净能量分析法验证了将超出电网消纳能力部分的电能用于电解水制氢在技术上的可行性。文献 [38] 对并网型风光互补发电耦合氢储能系统进行了全面的经济性分析，研究结果表明，太阳辐照、风力条件和组件成本是影响氢气售价的主要因素，并且氢气销售价格系统在建成后的 10 年内须维持较高水平。

2.3 系统容量配置与控制优化

投资建设和运维成本是阻碍风光互补发电耦合氢储能系统发展的主要问题。因此，通过容量配置设计和系统控制优化可以有效降低系统运维成本、提高整体能量转化效率。

近年来，风光互补发电耦合氢储能系统容量配置与控制优化研究总结如表 1 所示。合理的容量配置不仅能保证各装置单元高效协同运行，而且最大限度地降低成本。文献 [39] 将基于模糊逻辑算法的人工神经网络算法应用于系统的容量优化配置，获得了较好的系统性能预测准确性。文献 [40] 运用迭代最优化的方法确定系统的最优技术经济配置和总成本，证明了风光互补发电混合系统与化石燃料相比在成本和效率方面有一定优势。文献 [41] 通过实验仿真和数据分析指出，基于当地的天气数据及环境特征进行风力、太阳能发电和储能等模块的容量配置设计，才能更好地挖掘风能和太阳能的开发利用潜力，并结合河北省的太阳能和风能资源，分析了风光互补发电耦

表 1 系统容量配置与控制优化研究总结
Table 1 Research summary of system capacity configuration and control optimization

研究内容	优化目标	优化/控制模型	求解算法
系统配置	制氢量	基于组件建模	帝国竞争算法 ^[34]
	系统性能预测	人工神经网络	模糊逻辑算法 ^[39]
	最优技术经济配置，总成本	天气分类优化模型	最优化迭代法 ^[40]
	能量转化效率	Simulink系统建模	正交模拟实验 ^[32]
控制策略	制氢效率	非线性和摄动观察方法 MPPT控制 ^[42]	
	能量转化效率	模型预测控制 ^[43]	
	系统供电稳定性	模糊MPPT控制，模糊PWM扰动MPPT控制 ^[44]	

合氢储能系统在河北省不同地区的适用性。

太阳辐照量、风速等也是影响风光互补发电耦合氢储能系统制氢效率的重要因素。优化风电、光电机组的控制策略有利于提高系统的产氢量和能量传输效率。文献[42]提出了一种风力发电最优控制方法,并重新设计了基于最大功率跟踪的光伏发电控制模式,提高了系统的制氢效率。文献[43]对比了基于模型预测控制和基于状态控制的系统调度方法,发现基于模型预测控制的调度方法具有更高的能量转化效率。文献[44]将模糊法与最大功率点跟踪相结合应用于风力和光伏发电控制,并在风力发电控制中加入脉冲宽度调制技术,实现了对风光互补系统的最大功率点跟踪控制。实验仿真运行结果表明这一控制方法能够实现系统供电的稳定和可靠输出,明显改善系统运行中的动态特性。

2.4 其他相关研究

通过分析系统中影响系统能量转换效率和制氢效率的主要因素,可以进一步为系统优化设计指明方向。文献[45]利用仿真模拟对可能影响系统制氢效率的主要因素进行了研究,发现光照辐射量、风速和电解温度是主要影响条件,为提高系统效率指明了一定方向。文献[46]以邯郸地区的气象参数为基础,发现邯郸地区风能发电能力较弱,采用风光互补发电的互补性不大,联合发电系统的运行特性与独立光伏发电相当;研究还指出在风能资源丰富的地区可以加大风力机配置。另外,部分学者分析了风光互补发电耦合氢储能系统的经济性,为当前的投资及建设提供了参考。文献[47]分析了在上海东海风电场建设并网型风光互补发电制氢系统的经济性,分析表明该项目仅需4年便可实现收支平衡并开始盈利,项目经济收益较好。

3 结语

本文展示了风光互补发电耦合氢储能系统的基础和应用研究现状。针对风光互补发电耦合氢储能系统,重点介绍了风光互补发电、电解水制氢、储氢和氢燃料电池等关键技术的发展状况,并对系统应用类型、容量配置以及控制优化等方面的研究进行了分析。

风光互补发电耦合氢储能系统可依据电力与电网有无连接关系分为离网型与并网型。离网型因系统简单灵活,应用较多。而并网型尚处于研究验证阶段,应用相对较少。在实际应用中,可以根据风光资源、系统规模和负载参数等合理选择相应类型。当前,风光互补发电耦合氢储能系统的各个关键组件在技术上已相对成熟,投资建设和运维成本是阻碍风光互补发电耦合氢储能系统的主要问题。通过容量配置设计和系统控制优化来降低系统成本、提高能量转化效率备受关注。

参考文献:

- [1] FANT C, ADAM SCHLOSSER C, STRZEPEK K. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa[J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 556-564.
- [2] DING Z Y, HOU H J, YU G, *et al.* Performance analysis of a wind-solar hybrid power generation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 181(2): 223-234.
- [3] 蒋东方, 贾跃龙, 鲁强, 等. 氢能在综合能源系统中的应用前景 [J]. *中国电力*, 2020, 53(5): 135-142.
JIANG Dongfang, JIA Yuelong, LU Qiang, *et al.* Application prospect of hydrogen energy in integrated energy systems[J]. *Electric Power*, 2020, 53(5): 135-142.
- [4] 张运洲, 张宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较 [J]. *中国电力*, 2021, 54(3): 1-11.
ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, *et al.* Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system[J]. *Electric Power*, 2021, 54(3): 1-11.
- [5] REN J Z, GAO S Z, TAN S Y, *et al.* Hydrogen economy in China: strengths—weaknesses—opportunities—threats analysis and strategies prioritization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1230-1243.
- [6] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14): 11-20.
LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, *et al.* Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(14): 11-20.
- [7] CHEN H H, KANG H Y, LEE A H I. Strategic selection of suitable projects for hybrid solar-wind power generation systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 413-421.



- [8] MILLIGAN M, FREW B, KIRBY B, *et al.* Alternatives no more: wind and solar power are mainstays of a clean, reliable, affordable grid[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2015, 13(6): 78–87.
- [9] HOSSEINALIZADEH R, SHAKOURI G H, AMALNICK M S, *et al.* Economic sizing of a hybrid (PV–WT–FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: case study of Iran[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 139–150.
- [10] BHATTACHARJEE S, ACHARYA S. PV–wind hybrid power option for a low wind topography[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89: 942–954.
- [11] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 165–172.
- XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 165–172.
- [12] AL BUSAIDI A S, KAZEM H A, AL-BADI A H, *et al.* A review of optimum sizing of hybrid PV–wind renewable energy systems in Oman[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 185–193.
- [13] HONG Y Y, LIAN R C. Optimal sizing of hybrid wind/PV/diesel generation in a stand-alone power system using Markov-based genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(2): 640–647.
- [14] SANTOS D M F, SEQUEIRA C A C, FIGUEIREDO J L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis[J]. *Química Nova*, 2013, 36(8): 1176–1193.
- [15] WANG X Y, ZHANG L S, LI G F, *et al.* The influence of Ferric ion contamination on the solid polymer electrolyte water electrolysis performance[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 158: 253–257.
- [16] WEI G Q, XU L, HUANG C D, *et al.* SPE water electrolysis with SPEEK/PES blend membrane[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(15): 7778–7783.
- [17] 卢一菲, 陈冲, 梁立中. 基于电—氢混合储能的风氢耦合系统建模与控制 [J]. *智慧电力*, 2020, 48(3): 7–14.
- LU Yifei, CHEN Chong, LIANG Lizhong. Modeling and control of wind-hydrogen coupling system based on electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 7–14.
- [18] TENHUMBERG N, BÜCKER K. Ecological and economic evaluation of hydrogen production by different water electrolysis technologies[J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2020, 92(10): 1586–1595.
- [19] KATO T. Possibility of hydrogen production from renewable energy[J]. *Journal of the Japan Institute of Energy*, 2015, 94: 7–18.
- [20] PAKHIRA S, MENDOZA-CORTES J L. The Quantum nature in the interaction of molecular hydrogen with porous materials: implications for practical hydrogen storage[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020, 124(11): 6454–6460.
- [21] 郑津洋, 李静媛, 黄强华, 等. 车用高压燃料气瓶技术发展趋势和我国面临的挑战 [J]. *压力容器*, 2014, 31(2): 43–51.
- ZHENG Jinyang, LI Jingyuan, HUANG Qianghua, *et al.* Technology trends of high pressure vehicle fuel tanks and challenges for China[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2014, 31(2): 43–51.
- [22] ZHENG J Y, LIU X X, XU P, *et al.* Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(1): 1048–1057.
- [23] 赵永志, 花争立, 欧可升, 等. 车载低温高压复合储氢技术研究现状与挑战 [J]. *太阳能学报*, 2013, 34(7): 1300–1306.
- ZHAO Yongzhi, HUA Zhengli, OU Kesheng, *et al.* Development and challenges of cryo-compressed hydrogen storage technologies for automotive applications[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2013, 34(7): 1300–1306.
- [24] AHLUWALIA R K, HUA T Q, PENG J K, *et al.* Technical assessment of cryo-compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(9): 4171–4184.
- [25] 郭浩, 杨洪海. 固体储氢材料的研究现状及发展趋势 [J]. *化工新型材料*, 2016, 44(9): 19–21.
- GUO Hao, YANG Honghai. Current status and future prospect of research on solid-state hydrogen storage material[J]. *New Chemical Materials*, 2016, 44(9): 19–21.
- [26] DODDS P E, STAFFELL I, HAWKES A D, *et al.* Hydrogen and fuel cell technologies for heating: a review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(5): 2065–2083.
- [27] 王吉华, 居钰生, 易正根, 等. 燃料电池技术发展及应用现状综述 (下)[J]. *现代车用动力*, 2018, 3(3): 1–5.
- WANG Jihua, JU Yusheng, YI Zhenggen, *et al.* Review on development and application of fuel cell technology (2)[J]. *Modern Vehicle Power*, 2018, 3(3): 1–5.
- [28] ZHANG F Z, COOKE P. Hydrogen and fuel cell development in China: a review[J]. *European Planning Studies*, 2010, 18(7): 1153–1168.
- [29] HAO H, MU Z X, LIU Z W, *et al.* Abating transport GHG emissions by hydrogen fuel cell vehicles: chances for the developing world[J]. *Frontiers in Energy*, 2018, 12(3): 466–480.



- [30] 李海波, 潘志明, 黄耀文. 浅析氢燃料燃气轮机发电的应用前景 [J]. 电力设备管理, 2020(8): 94–96.
LI Haibo, PAN Zhiming, HUANG Yaowen. Analysis on the application prospect of hydrogen fuel gas turbine power generation[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(8): 94–96.
- [31] 黄乃成, 吴庆礼, 苏来进, 等. 燃气轮机与新能源混合发电的互补性研究 [J]. 中外能源, 2020, 25(12): 10–15.
HUANG Naicheng, WU Qingli, SU Laijin, *et al.* Research on complementarity of hybrid power generation of gas turbine and new energy[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(12): 10–15.
- [32] 蒋康乐. 风光互补联合制氢系统研究及环境效益评价 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
JIANG Kangle. Research and environmental benefit evaluation of wind-solar hybrid hydrogen production system[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [33] 白树华. 风光氢联合式独立发电系统应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
BAI Shuhua. Application research of the wind solar hydrogen consociation type independent generates system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [34] KHALILNEJAD A, RIAHY G H. A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 80: 398–406.
- [35] DURSUN E, ACARKAN B, KILIC O. Modeling of hydrogen production with a stand-alone renewable hybrid power system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(4): 3098–3107.
- [36] DUFO-LÓPEZ R, BERNAL-AGUSTÍN J L, MENDOZA F. Design and economical analysis of hybrid PV-wind systems connected to the grid for the intermittent production of hydrogen[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(8): 3082–3095.
- [37] PELLOW M A, EMMOTT C J M, BARNHART C J, *et al.* Hydrogen or batteries for grid storage? a net energy analysis[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(7): 1938–1952.
- [38] BERNAL-AGUSTÍN J L, DUFO-LÓPEZ R. Techno-economical optimization of the production of hydrogen from PV-wind systems connected to the electrical grid[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(4): 747–758.
- [39] CHÁVEZ-RAMÍREZ A U, VALLEJO-BECERRA V, CRUZ J C, *et al.* A hybrid power plant (solar-wind-hydrogen) model based in artificial intelligence for a remote-housing application in Mexico[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(6): 2641–2655.
- [40] FELLAH B, BENYOUCEF B, BELARBI M, *et al.* Optimal sizing of a hybrid photovoltaic/wind system supplying a desalination unit[J]. *Journal of Engineering Science & Technology*, 2018, 13(6): 1816–1833.
- [41] 杨卫华, 蒋康乐, 孙文叶. 不同应用规模下风光互补发电储能系统优化与设计 [J]. 节能, 2017, 36(10): 40–43,3.
YANG Weihua, JIANG Kangle, SUN Wenyue. Optimization and design under different application scale on wind/photovoltaic hybrid generation system[J]. *Energy Conservation*, 2017, 36(10): 40–43,3.
- [42] TAFTICHT T, AGBOSSOU K, DOUMBIA M L, *et al.* An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(7): 1508–1516.
- [43] TORREGLOSA J P, GARCÍA P, FERNÁNDEZ L M, *et al.* Energy dispatching based on predictive controller of an off-grid wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system[J]. *Renewable Energy*, 2015, 74: 326–336.
- [44] 陈皓勇, 陈思敏, 陈锦彬, 等. 面向综合能源系统建模与分析的能量网络理论 [J]. 南方电网技术, 2020, 14(2): 62–74.
CHEN Haoyong, CHEN Simin, CHEN Jinbin, *et al.* Energy network theory for modeling and analysis of integrated energy systems[J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(2): 62–74.
- [45] 李文磊. 风光互补发电储能制氢系统研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
LI Wenlei. Research on hydrogen production system of wind-solar complementary power generation[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [46] 聂聪颖, 沈小军, 吕洪, 等. 并网型风电场氢超混合储能容量配置及控制策略研究 [J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 1–8.
NIE Congying, SHEN Xiaojun, LYU Hong, *et al.* Capacity configuration and control strategy of hydrogen super hybrid energy storage in grid connected wind farm[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 1–8.
- [47] 吕振华, 李强, 韩华春, 等. 计及源荷不确定性和多类储能响应的园区 IES 多目标优化调度模型 [J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 40–50.
LV Zhenhua, LI Qiang, HAN Huachun, *et al.* Multi-objective optimal scheduling model for IES in parks considering source and load uncertainties and multiple type of energy storage responses[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(2): 40–50.

作者简介:

荆涛 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事汽轮



机及热力系统节能研究, E-mail: jingtao@tpri.com.cn;

mingtao@xjtu.edu.cn。

李明涛 (1981—), 男, 通信作者, 博士, 副教授,
从事综合能源系统建模、仿真与优化研究, E-mail:

(责任编辑 蒋东方)

Research Overview on the Integrated System of Wind-Solar Hybrid Power Generation Coupled with Hydrogen-Based Energy Storage

JING Tao¹, CHEN Geng², WANG Zihao², XU Pengjiang¹, LI Gaochao¹, JIA Mingxiao¹, WANG Yueshe²,
SHI Jinwen², LI Mingtao²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the technologies of wind-solar hybrid power generation, hydrogen generation from electrolysis of water, hydrogen storage, and hydrogen fuel cell, and by taking hydrogen as the core energy carrier, the integrated system of hybrid wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage is expected to be the key routine to the large-scale application of renewable energy-hydrogen energy-electricity energy. In this paper, the current development status about the key technologies were reviewed first including wind-solar hybrid power generation, hydrogen generation from electrolysis of water, hydrogen storage, hydrogen fuel cell and so on. Then the hot topics such as off-grid system, grid system, and capacity configuration optimization for the as-discussed integrated system were analyzed in details. The following progress analysis provided valuable reference for further technical research and engineering application with regard to the integrated system of hybrid wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage.

This work is supported by National Key R&D Program of China (Coupling Integration and Flexible Operation Control Technology of Renewable Energy and Thermal Power Generation, No.2019 YFB1505400).

Keywords: wind energy; solar energy; electrolysis of water; hydrogen generation; hydrogen storage; hydrogen fuel cell

~~~~~  
(上接第 12 页)

## Review on Large-Scale Centralized Energy Storage Planning under Centralized Grid Integration of Renewable Energy

GU Chenjia, WANG Jianxue, LI Qingtao, ZHANG Yao

(Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** With the large-scale centralized grid integration of renewable energy, the problem of renewable energy consumption is becoming more and more prominent. As an important part and key supporting technology of the high-proportion renewable energy power system, the large-scale application of energy storage is conducive to improving the flexibility, economy, and security of the system. However, most of the current reviews focus on the summary of energy storage technologies, and few make a comprehensive review of energy storage planning methods, especially the configuration methods for large-scale energy storage on the source-grid side. Therefore, this paper analyzed the overall impact of including large-scale energy storage into power system planning, summarized the application scenes of energy storage in the power system, and then analyzed the impact of the introduction of energy storage on the modeling of planning problems. Next, the source-grid-side planning of large-scale energy storage and the planning of source-grid coordination considering large-scale energy storage were expounded. Finally, the key issues of the current large-scale energy storage planning and its prospects were discussed.

This paper is supported by National Key Research and Development Program of China (No.2017YFB0902200).

**Keywords:** energy storage planning; large-scale energy storage; source-grid coordination; renewable energy consumption