

全球能源互联网框架下的清洁能源多能互补协同开发

陈正曦¹, 余轶², 梁才浩^{1*}, 倪煜¹, 宋福龙¹, 李鹏¹, 肖晋宇¹, 李佳勇³

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031;

2. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北省 武汉市 430077;

3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Coordinative Development of Multi Clean Energy Complementation Based on Global Energy Interconnection

CHEN Zhengxi¹, YU Yi², LIANG Caihao^{1*}, NI Yu¹, SONG Fulong¹, LI Peng¹, XIAO Jinyu¹, LI Jiayong³

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. State Grid Hubei Economic and Technological Research Institute, Wuhan 430077, Hubei Province, China;

3. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

Abstract: With the development direction of “two substitutions, one improvement, one return, and one transition”, the Global Energy Interconnection (GEI) promotes the large-scale development and utilization of clean energy globally. The strategic channel of time-space complementation and global configuration realizes the wide-area application of global multi-energy complementation. This paper first analyzes the connotation and relation of multi-energy complementation under the Global Energy Interconnection, and summarizes the typical application scenarios of multi-energy complementation in the GEI. Accordingly, a comprehensive planning method of multi-energy complementation collaborative development based on GREAN and production simulation is proposed. Finally, through typical cases, the analysis results and benefits of the multi-energy complementation of the GEI are shown.

Keywords: Global Energy Interconnection; clean energy; multi-energy complementation; time-space complementation; supply-side complementation; demand-side complementation

摘要: 全球能源互联网以“两个替代、一个提高、一个回归、一个转化”为发展方向, 推动全球清洁能源广泛大规模开发利用, 通过“九横九纵”骨干网架, 建设跨区域输送、跨时空互补、全球配置的战略通道, 实现全球清洁能源多能互补的广域广泛应用。首先分析全球能源互联网与多能互补的内涵和内在关系, 总结全球能源互联网多能互补的典型应用场景; 然后提出基于全球清洁能源资源评估平台 (GREAN) 和生产模拟的多能互补协同开发综合规划分析方

法; 最后通过典型案例, 展示全球能源互联网多能互补的分析结果和互补效益。

关键词: 全球能源互联网; 清洁能源; 多能互补; 时空互补; 源侧互补; 荷侧互补

0 引言

目前, 世界正加快转向寻求清洁、绿色、可持续的能源供给, 以资源丰富的太阳能、风能为代表的新能源快速发展, 充分利用多种能源之间的互补特性, 实现多能互补协同高效开发利用受到了广泛关注。多能互补主要有两种模式: 一种是能源消费侧的电、热、冷、气等多种能源的协同配置、相互转化和综合梯级利用^[1], 主要包含风电、光伏、太阳能热水器、微燃机、电转气设备、储能设备等单元^[2], 通常适用于楼宇、园区、城区等小范围、小规模的应用场景; 另一种是能源生产侧的风、光、水、火发电以及电制氢和储能等多种能源的互补开发、转化、存储和输配, 适用于大范围、大规模的应用场景。第一种多能互补模式的研究和应用方面, 瑞士于2003年提出了未来能源网是电、气、热、冷等能源形式的耦合并启动“未来能源网络愿景”项目^[3]; 2007年, 文献[4]提出了能量枢纽 (energy hub) 的概念, 并在欧盟EPIC-HUB项目中应用, 能量枢纽为多种能源供应和能源需求端提供能源转化和平台接口, 集中管理和综合优

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51907056)。

National Natural Science Foundation of China (51907056).

化不同能源及消费侧的转化调度; 2008年, 美国国家可再生能源实验室针对能源系统协调与优化问题展开研究; 2017年, 中国在《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》中提出了“互联网+”智慧能源战略构想, 强调了电、热、气等不同形式能源的耦合协调^[5]。第二种多能互补模式的研究和应用方面, 文献[6]依托北京延庆智能电网创新示范区建设工程, 分析阐述了延庆地区能源互联网高比例新能源多能互补就地消纳方法和管理模式; 文献[7]提出依托雄安新区地热资源开发实现区域多能互补利用; 国家电网张北风光热储输多能互补集成优化示范工程, 采用国际领先的柔性直流技术, 实现了规模化的风光储多能互补, 为2022年北京冬季奥运会提供了清洁可靠的绿色电力^[8-9]; 中国将西部、北部地区的新能源和传统能源一体化综合互补能源基地开发作为国家能源电力清洁转型、实现“双碳”目标的重要手段。

目前, 大范围清洁能源开发利用的研究主体主要集中在区域性组织, 服务区域重点清洁能源项目和送电工程。在欧洲, 2015年欧盟委员会资助完成《欧洲未来安全和可持续电力基础设施》研究, 即“e-Highway 2050”项目, 展望了欧洲大陆电力基础设施总体互联格局, 支撑清洁能源电力互补互济和大范围配置消纳^[10]; 2017年, 欧盟联合研究中心对中国—欧洲电力互联的潜力和效益等进行了评估, 基于中国西部地区和沿途中亚可再生能源开发潜力, 提出了三条潜在的中欧电力互联通道, 以期将亚洲清洁电力送至欧洲负荷中心消纳, 并实现亚欧清洁能源的互济^[11]; 2018年, 欧洲输电运营商联盟(ENTSO-E)发布了《十年电网规划2018》, 提出建设德国南北向输电通道, 实现欧洲北部风电与南部太阳能的互补互济, 促进清洁能源消纳^[12]; 欧非电力互联组织(EuroAfrica Interconnector)推动埃及—塞浦路斯—希腊直流输电工程, 实现北非太阳能等清洁能源电力跨地中海外送欧洲。在西亚, 沙漠太阳能行动计划(Dii)于2012年、2013年分别发布了《沙漠能源2050》以及《沙漠能源: 电源规划》, 提出在欧盟及中东北非地区建设以可再生能源基地为基础的可持续发展的能源大系统, 其《沙漠能源: 电网规划》进一步完善了前期工作, 给出了电网基础设施规划方案^[13]。在南美洲, 由Nivalde José de Castro等编著的《拉丁美洲能源电力一体化和安全性》^[14], 从电力市场一体化的角度探讨了拉丁美洲电力互联互通和水电等清洁能源资源开发利用。

总体来看, 已有的世界清洁能源开发和基于电力

互联互通实现多能互补大范围消纳研究的系统性不强, 具有区域局限性, 针对全球范围内广域的跨洲、跨区、跨国的基于多能互补特性的清洁能源大规模开发利用及综合配置方案的研究相对缺乏。全球能源互联网发展理念天然地包含了清洁能源多能互补开发、配置和利用的涵义, 属于上述第二种多能互补模式, 并着重强调大范围的清洁能源多能互补开发和利用。同时, 全球能源互联网发展合作组织(以下简称合作组织)基于全球清洁能源资源评估和全球能源互联网“九横九纵”骨干网架电力互联通道^[15], 首次提出世界范围内电力互联互通和清洁能源大范围多能互补的优化配置方案。

一直以来, 全球能源互联网理论体系中缺少对多能互补的针对性描述, 本文首次补充和完善全球能源互联网理论体系中对多能互补的定义和定位, 并基于全球能源互联网研究成果, 梳理其典型应用场景的分类, 总结全球能源互联网清洁能源资源评估和多能互补规划的总体方法, 并选取全球的典型案例开展分析。后续内容安排如下: 第1章分析基于全球能源互联网理念的多能互补内涵和应用场景; 第2章阐述清洁能源资源特性评估和多能互补综合规划方法; 第3章通过典型案例展示全球能源互联网多能互补的分析结果和互补效益; 第4章为结语。

1 全球能源互联网多能互补

1.1 全球能源互联网理念与多能互补

全球能源互联网以生态文明、创新发展、能源永续、合作共赢为发展理念, 以“两个替代、一个提高、一个回归、一个转化”为发展方向^[16], 是以特高压电网为骨干网架, 以输送清洁能源为主导, 全球泛在互联的坚强智能电网, 是覆盖全球、清洁低碳、智能友好的现代能源网络, 由清洁主导的能源生产系统、互联互通的能源配置系统、电为中心的能源使用系统、全球统一的电碳贸易体系构成^[17], 全球能源互联网思想体系总体框架如图1所示。加快清洁发展是世界能源转型的根本方向, 关键是要形成能源生产清洁化、配置广域化、消费电气化的现代能源体系。生产清洁化就是形成“清洁主导”的能源供应格局, 让水能、风能、太阳能等清洁能源成为主导能源, 让化石能源回归工业原材料属性, 创造更大价值。配置广域化就是形成大范围互联、远距离输送的能源优化配置格局, 发挥大电网“时空储能”的关键作用, 统

筹全球时区差、季节差、资源差、电价差,加快水、风、光等各类集中式和分布式清洁能源规模开发和高效利用。消费电气化就是形成“电为中心”的能源消费格局,在工业、商业、交通、居民等领域广泛使用清洁电能,提高全社会电气化水平,并通过电制燃料和原材料,满足人类永续发展需求。

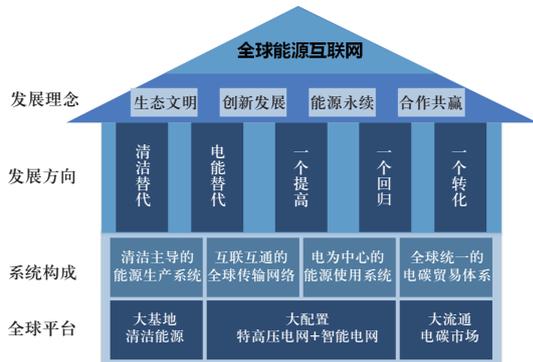


图1 全球能源互联网思想体系总体框架

Fig. 1 The conceptual system structure of Global Energy Interconnection

一方面,清洁能源发电具有波动性、随机性和间歇性,只有发挥电网的灵活调节能力才能充分利用。由于风能、太阳能往往依赖于多变的天气情况,如风速、光照强度等,其功率输出不可避免地具有波动性和间歇性^[18-20]。这意味着,风电、光伏发电出力难以保持一个稳定的水平,呈现出较强的波动性,并且这种波动因为难以准确预测而具有很强的不确定性,例如美国加利福尼亚Techachapi风电场出力的不确定性如图2所示^[7]。在一天内,风电出力波动很大,极端情况下,可在0~100%范围内变化;光伏出力主要受阳光强度、角度影响,光照强的时候出力大,光照弱的时候出力小甚至为零。

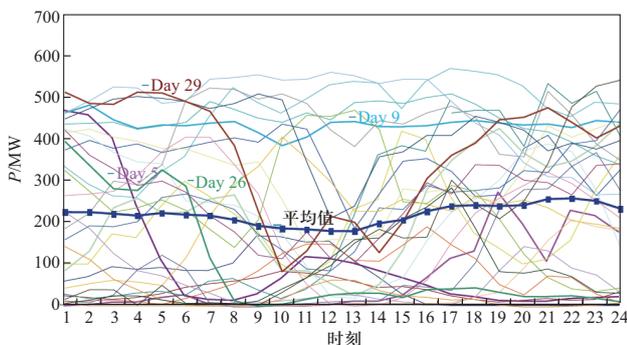


图2 美国加利福尼亚Techachapi风电场2005年4月中29天的每小时风电出力

Fig. 2 Power output per hour of the Techachapi wind plant in California of 29 days during April, 2005

另一方面,清洁能源资源及供需侧分布不均。亚欧非大陆85%的清洁能源资源主要集中在从北非经中亚到俄罗斯远东、与赤道成约45°角的能源带上,与欧洲、北美、东北亚、东南亚、南部非洲等地区负荷中心相距数百到数千km。清洁能源资源具有很强的地理位置依赖性,如果没有配套的电力外送通道将其与规模相匹配的消纳市场互联,不仅会限制优质清洁能源的规模化开发,抬高清洁电力的开发利用成本,也可能因为清洁电力无法消纳而造成弃风弃光,白白浪费优质的清洁能源资源。

因此,多能互补是未来能源系统演化发展的必然趋势,是实现全球清洁能源开发和清洁替代的必然需求,而全球能源互联网将是多能互补网络演化发展的一种关键形态^[21]。全球能源互联网立足全球范围,坚持系统思维,提出世界能源结构性调整的总体规划,通过全局优化,利用清洁能源的多能互补特性,降低清洁能源并网的调节要求,实现灵活性资源的广域共享,并为清洁能源规模化开发利用提供更广阔的消纳市场,大幅提高清洁能源开发利用效率和经济性,降低各国各方自行推动能源转型的总成本。

1.2 全球能源互联网多能互补的内涵

全球能源互联网理念下的多能互补主要包含以下3个方面的内涵。

1) 全球能源互联网多能互补是基于能源生产的高度清洁化。在全球碳中和能源情景下,清洁能源将快速成为主导能源,煤、油相继达峰并快速下降。据合作组织测算,全球清洁能源占一次能源比重将由2017年的19%,提升至2060年的87%。全球能源互联网多能互补利用清洁能源资源禀赋,平抑清洁能源(尤其是以风、光为代表的新能源)的波动性、随机性、间歇性。

2) 全球能源互联网多能互补是基于能源配置的持续广域化。全球范围内能源供应和能源消费中心分布不均衡,随着清洁低碳可持续发展不断深化,实时高效和安全稳定的清洁能源供应,需要形成更大范围内的能源互联互通,通过广域的网络经济规律,扩大网络规模,增强配置能力,发挥网络经济的边际效益递增效益,以支撑清洁能源跨时空多能互补互济和经济高效配置。

3) 全球能源互联网多能互补是基于能源消费的深度电气化。在全球碳中和能源情景下,电能将成为全球终端能源消费的核心载体,能源消费由煤、油、气

等向电为中心转变, 加速推动工业、建筑、交通等主要领域电能替代, 终端电气化水平提升, 能源使用效率提高, 终端各领域化石能源排放大幅降低^[22]。据合作组织测算, 2017年全球电气化水平约19%, 预计2060年电能占终端能源的比重(电气化率)将达到约70%。工业部门电气化和清洁化将成为未来碳减排最大驱动因素^[23], 2018年全球工业部门碳排放约53.3亿t, 预计2025年达峰, 2030年降至53亿t, 2060年降至2亿t。

1.3 全球能源互联网多能互补的典型场景

全球能源互联网多能互补的应用涉及“源-网-荷-储”全环节, 从不同角度, 可主要分为时空互补、源侧互补、荷侧互补等3种典型场景, 实际情况可以是其中一种或多种场景的综合应用。

1) 时空互补: 多个同种或不同种类清洁能源资源分布在经度或纬度不同的区域, 利用气象、地理、时区条件等差异产生的互补特性。通过中远距离电网互联, 发挥互补效益, 主要起季调节作用, 也可做日调节。例如中部非洲刚果河水能与北非摩洛哥太阳能呈季节性互补。

2) 源侧互补: 多个同种或不同种类清洁能源资源集中在同样或相近的经度及纬度的区域, 且本身即存在相互之间的互补特性。通过区域电网互联, 在源侧实现多种清洁能源之间或多种清洁能源配套水电、气电和储能等的一体化协同开发和互补运行, 可起到季调节和日调节作用。例如风光、水风光、风光储氢一体化协同开发等。

3) 荷侧互补: 在需求侧利用灵活性资源主动协同形成的互补特性。通过需求侧多种灵活性资源参与响应机制的优化调节, 主动匹配源侧、网侧供电特性, 缓解调峰压力, 提升系统运行效率, 可起到季调节和日调节作用。例如电制氢、电化学储能、抽水蓄能等。

2 全球能源互联网多能互补协同开发综合规划分析方法

2.1 清洁能源资源及其特性评估

全球能源互联网多能互补规划分析离不开清洁能源资源及其特性评估。目前, 关于清洁能源资源评估并没有统一的计算方法。全球清洁能源资源评估平台(Global Renewable-energy Exploitation Analysis Platform, GREAN)提出了一套明确的定义、计算方

法、测算模型和推荐参数, 旨在基于统一标准和数据源完成对全球范围水能、风能、太阳能资源总量的测算和对比分析, 有效提升全球清洁能源资源评估的准确度与时效性, 为相关国家和地区清洁能源的大规模开发利用提供支撑。GREAN通过地理信息处理和数据提取, 计算形成清洁能源资源的原始数据, 如水能的径流量、太阳能的辐照强度、风能的风速等, 进一步计算得到理论蕴藏量、可开发装机等资源评价指标。清洁能源的资源特性是能源资源在时序上的动态表征, 由资源原始数据按时序连接形成, 包括日内特性、季节特性等, 数学形式上是基于采样的时间序列集合:

$$\Phi = \{\forall t \in T | \phi(t)\} \quad (1)$$

式中: t 为时刻; T 为研究范围的时刻集合; $\phi(t)$ 为 t 时刻的资源评估数据; Φ 为资源评估数据的时间序列集合。全球能源互联网资源评估模型及相关研究中, 主要采用以1 h为精度的年内8760 h数据, 即

$$\Phi = \{\forall t \in T = [1, 2, \dots, 8760] | \phi(t)\} \quad (2)$$

年内8760 h数据也可写做 365×24 h的日特性矩阵, 根据研究需要可进一步处理, 例如最大值日、最小值日、全年的平均日特性等:

$$\Phi_{8760}^{365 \times 24} = \phi(T), T = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 24 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 8737 & \dots & 8760 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于每月时长不同, 年内8760 h数据可改写为由共12个月的日特性矩阵构成的集合, 根据研究需要可进一步处理, 例如每月最大值日、每月最小值日、每月的平均日特性、年特性等:

$$\Phi = \{\forall t \in T = \{T_1, \dots, T_{12}\} | \phi(t)\},$$

$$\begin{cases} T_1^{31 \times 24} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 24 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 721 & \dots & 744 \end{bmatrix}, \\ T_2^{28 \times 24} = \begin{bmatrix} 745 & \dots & 768 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1393 & \dots & 1416 \end{bmatrix}, \\ \dots, \\ T_{12}^{31 \times 24} = \begin{bmatrix} 8017 & \dots & 8040 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 8737 & \dots & 8760 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

例如, 南美洲智利玛丽亚埃伦娜光伏基地出力的 365×24 h的日特性矩阵可绘制8760 h出力系数热力分布, 如图3所示, 通过进一步数据处理, 可得到日特性和月特性曲线, 如图4和图5所示。

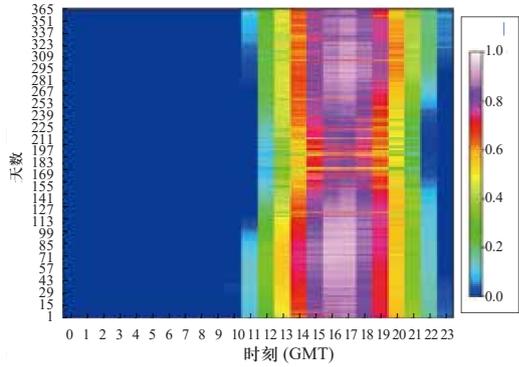


图3 玛丽亚埃伦娜光伏基地8760逐小时出力系数的 365×24 h 的日特性矩阵热力分布

Fig. 3 The heat-map of the 8760 hours output in form of 365×24 h daily output matrix of Maria Elena PV generation base

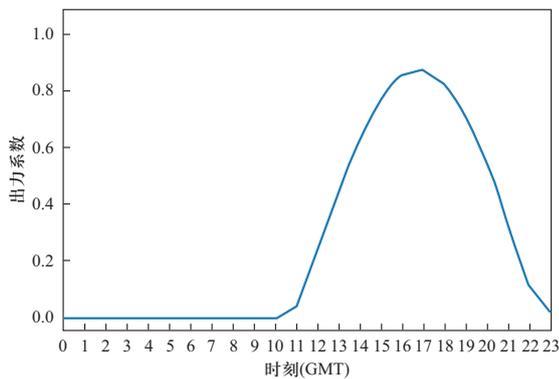


图4 玛丽亚埃伦娜光伏基地典型日出力曲线

Fig. 4 The typical daily output of Maria Elena PV generation base

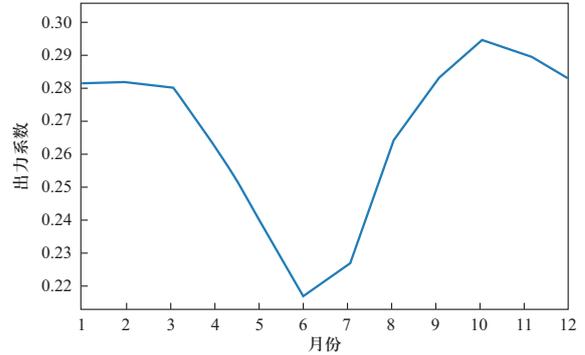


图5 玛丽亚埃伦娜光伏基地年出力曲线

Fig. 5 The annual output of Maria Elena PV generation base

总体来说，全球清洁能源资源评估平台资源评估模块的流程框架如下。

1) 水电资源评估方法。河网和河流水文数据是水能资源评估的关键，利用全球数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM），采用数字化方法生成数字化河网。水能资源评估具体可分为准备地形和水文资料、生成河网、测算理论蕴藏量、研究梯级开发方案、测算技术指标、估算经济性6个主要步骤。全球清洁能源资源评估平台水能资源评估技术路线如图6所示。

2) 风能与太阳能资源评估方法。风能与太阳能资源评估研究重点关注理论蕴藏量、技术可开发量和

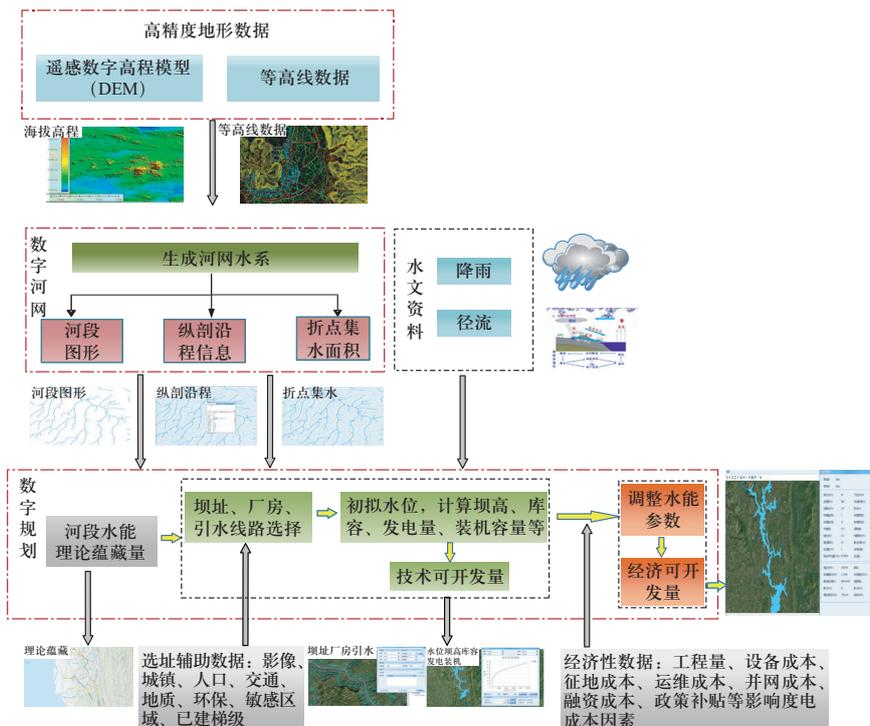


图6 水能资源评估技术路线图

Fig. 6 The technical route of hydro resource assessment

经济可开发量3个指标的测算。通过收集整理风、光资源数据,全球地形、数字高程、岩层地质等地理信息,地面覆盖物分布等高分遥感辨识信息,自然保护区、交通基础设施分布等人类活动信息,形成支撑资源评估的多元数据库。然后,基于地理信息数字计算,采用多分辨率融合及多类型混合计算等技术,将各类数据同化为可以进行量化评估的标准数据源。最后,构建多层次量化分析体系,实现从技术特性(理论蕴藏量与技术可开发量)到经济性水平(经济可开发量)的全面评估。全球清洁能源资源评估平台风能与太阳能资源评估技术路线图如图7所示。

2.2 综合规划分析方法

总体上,全球能源互联网电源规划模型采取“自上而下”和“自下而上”相辅相成的思路,采用“模拟”与“优化”相结合方法,基于电力系统现状、电力需求预测、负荷特性、新能源互补特性等边界条件,考虑能源资源、能源政策、电力电量平衡、环境

约束等约束条件,优化全社会电力系统的综合供电成本等经济性目标,求解得到规划水平年装机规模、各类装机构成、开发时序、碳排放等^[24],建立适应场景的多能互补规划结果,全球能源互联网电源规划模型如图8所示^[25]。其中: C_j 是区域 j 在规划期 T 内电源装机总费用的现值; \bar{I}_{ji} 是初始投资费用; \bar{S}_{ji} 是投资折余;

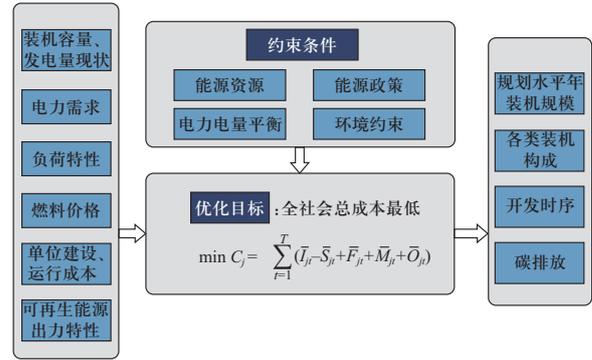


图8 全球能源互联网电源规划模型

Fig. 8 The Global Energy Interconnection generation planning model

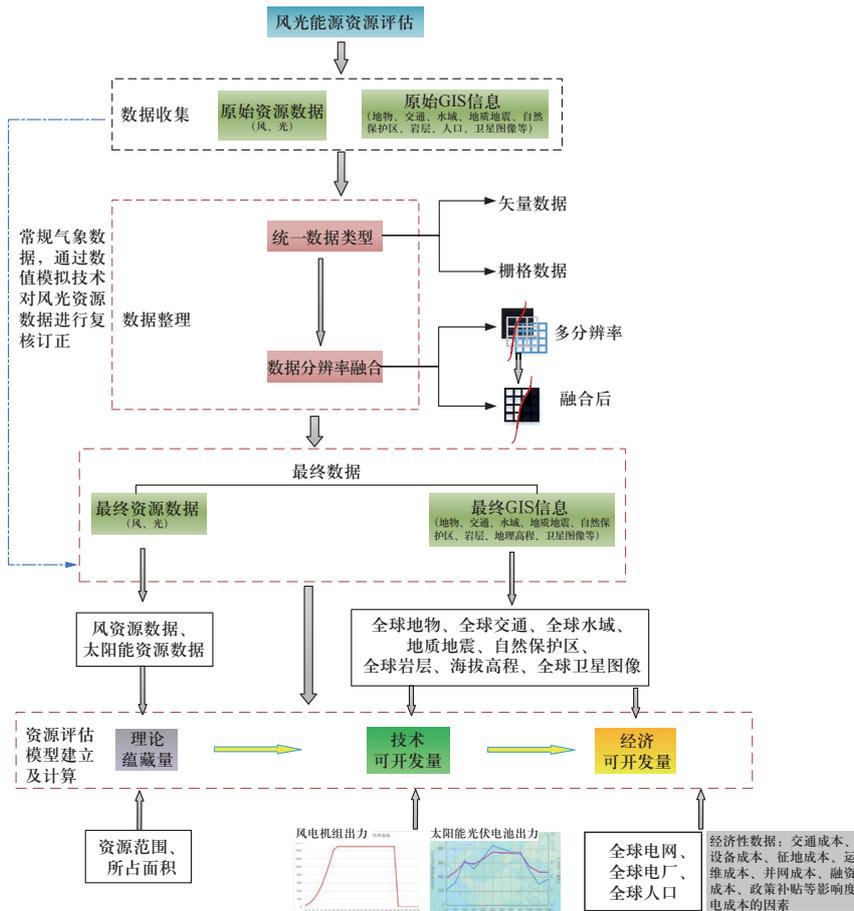


图7 风能与太阳能资源评估技术路线图

Fig. 7 The technical route of wind and solar resource assessment

\bar{F}_{jt} 是燃料费； \bar{M}_{jt} 是运维费； \bar{O}_{jt} 是停电损失费； t 为计算时刻。

全球能源互联网多能互补协同开发综合规划是全球能源互联网电源规划模型的应用场景之一，如图9所示，主要服务清洁能源开发的源-网-荷-储协同运行，利用GREAN平台仿真形成目标区域的能源资源特性，通过生产模拟优化计算，求解基于多能互补的方案优化，主要应用于指导互联互通和相关重点工程方案深化。一般地，全球能源互联网多能互补综合规划可形式化表述为带约束的最优化问题，如式(5)所示，常见约束见式(6) — (11)。研究中，由于全球各区域能源电力基础条件不同，约束和求解可按需松弛处理，不同场景的规划目标也可针对性调整。

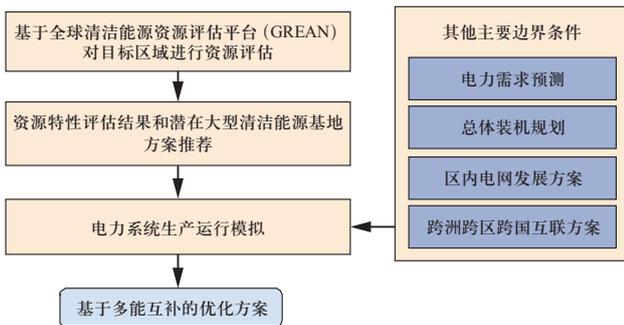


图9 全球能源互联网多能互补协同开发综合规划示意图
Fig. 9 The process of Global Energy Interconnection multi-energy coordinative exploitation and comprehensive planning

$$\begin{aligned} & \min(J_1(\mathbf{P}_s), \dots, J_k(\mathbf{P}_s)) \quad (5) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} v(\mathbf{P}_s) = 0 \\ w(\mathbf{P}_s) \leq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

式中： \mathbf{P}_s 是电力系统单元（包括发电、输电、负荷、储能等）功率变量向量； J 为目标函数，常采用总投资、度电成本等经济性指标和弃电率、出力波动等技术指标； $v(\mathbf{P}_s) = 0$ 和 $w(\mathbf{P}_s) \leq 0$ 分别表示等式和不等式约束。

最基本的等式约束为电力电量平衡约束，表达电力系统实时电力供需平衡：

$$\sum_{i \in S} P_i = 0 \Leftrightarrow \sum P_{\text{supply}} = \sum P_{\text{demand}} \quad (6)$$

常见的不等式约束有发电设备的出力约束和爬坡约束：

$$P_{\text{Gemin}} \leq P_{\text{Ge}} \leq P_{\text{Gemax}} \quad (7)$$

$$\frac{dP_{\text{Gemin}}}{dt} \leq \frac{dP_{\text{Ge}}}{dt} \leq \frac{dP_{\text{Gemax}}}{dt} \quad (8)$$

储能设备的功率和电量约束^[26]按式(9) — (11)考虑，其中： \mathbf{P}_B 是所有储能单元的功率向量； \mathbf{Q}_B 是所

有储能单元的电量向量；式(11)为充放电模型的等式约束， η_{dis} 为放电效率， η_{ch} 为充电效率， ε_{dr} 为对应时间间隔 dt 的自放电率。

$$P_{\text{Bmin}} \leq P_B \leq P_{\text{Bmax}} \quad (9)$$

$$Q_{\text{Bmin}} \leq Q_B \leq Q_{\text{Bmax}} \quad (10)$$

$$\frac{dQ_{b_i}}{dt} = \begin{cases} -\varepsilon_{\text{dr}} Q_{b_i} - \frac{P_{b_i}}{\eta_{\text{dis}}}, P_{b_i} \geq 0 \\ -\varepsilon_{\text{dr}} Q_{b_i} - P_{b_i} \eta_{\text{ch}}, P_{b_i} < 0 \end{cases}, \forall b_i \in B \quad (11)$$

结合全球能源互联网电力互联互通通道总体规划格局，生产模拟优化的清洁能源多能互补结果进一步将转化成具体的工程实现，大区域、远距离的外送消纳一般采用特高压直流方案，区域性清洁能源基地群的动态协同一般依靠区域或本地同步电网构建等方式实现。基于工程方案拟定，可以开展工程角度的运行和经济性评价，实现宏观多能互补方案的微观转化和评估，如大英加水电梯级开发^[27]、外送方案规划^[28]和技术路线优化^[29]。

3 全球能源互联网多能互补典型案例

全球能源互联网多能互补指导和优化了重点清洁能源基地开发利用和跨洲、跨区或跨国送电通道的方案设计，本章选取南非—埃塞俄比亚—埃及联网、中国金沙江流域水风光一体化基地开发与外送和智利北部风-光-储-氢联合开发作为典型案例（如表1所示），开展全球能源互联网时空互补、源侧互补和荷侧互补应用分析，分析目标区域的清洁能源资源特性，提出送电工程优化方案，并分析其潜在效益。

3.1 时空互补：南非—埃塞俄比亚—埃及联网

非洲尼罗河和赞比西河纵向跨越赤道，其纬度分布使得水能资源具有极强的季节互补特性，是典型的清洁能源资源时空互补。因此，非洲能源互联网研究中，为了利用南部非洲赞比西河水电与东部非洲尼罗河上游水电的时空互补特性，通过南非—埃塞俄比亚、埃塞俄比亚—埃及远距离跨区电力互联^[30]，可有效提高送电通道的利用率。

3.1.1 资源特性

尼罗河和赞比西河水能资源的季节性强，尼罗河7—12月为丰水期，1—6月为枯水期，表现为“夏丰冬枯”；赞比西河1—5月为丰水期，6—12月为枯水期，表现为“冬丰夏枯”^[31]。如图10所示，尼罗河与赞比西河流量特性基本相反，具有很强的跨流域季节互补性。

表 1 全球能源互联网多能互补典型案例

Table 1 Typical Global Energy Interconnection multi-energy complementation examples

场景类别	典型案例	多能互补特性及开发思路	方案优化效果
时空互补	南非—埃塞俄比亚—埃及联网方案	利用南部非洲赞比西河水电与东部非洲尼罗河上游水电的季节互补特性, 优化南非—埃塞俄比亚、埃塞俄比亚—埃及远距离跨区电力互联通道方案	将埃塞俄比亚—莫桑比克±800 kV直流利用小时数由2900 h提升至3900 h, 将埃塞俄比亚—埃及±800 kV直流利用小时数由1800 h提升至3700 h
源侧互补	中国金沙江流域水风光一体化基地开发与外送方案	金沙江流域水能资源丰富, 调节性能强, 利用流域内水风光源侧互补, 可实现水风光一体化协同开发	通过水风光一体化协同开发和跨域直流外送, 到网电价为0.337~0.367元/kWh, 相比于华东本地电源上网电价, 具有较强电价竞争力
荷侧互补	智利北部风—光—储—氢联合开发	智利北部安托法加斯塔风电基地、卡拉玛风电基地和玛利亚埃伦娜光伏基地具有季节互补特性, 日内特性趋同, 利用风—光—储—氢联合开发, 可显著降低清洁能源弃电率	通过风—光—储—氢联合开发及协同运行, 清洁能源弃电率由42.23%降低至4.26%, 年产氢7.1万t

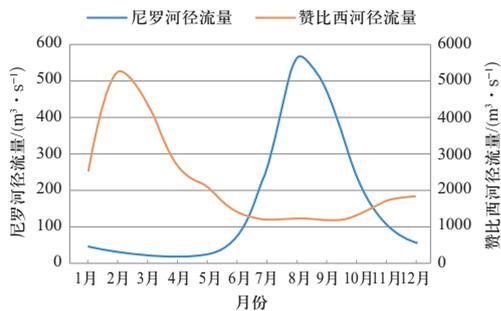


图 10 尼罗河与赞比西河径流量季节特性示意图

Fig. 10 Schematic diagram of seasonal characteristics of the Nile and Zambezi River runoff

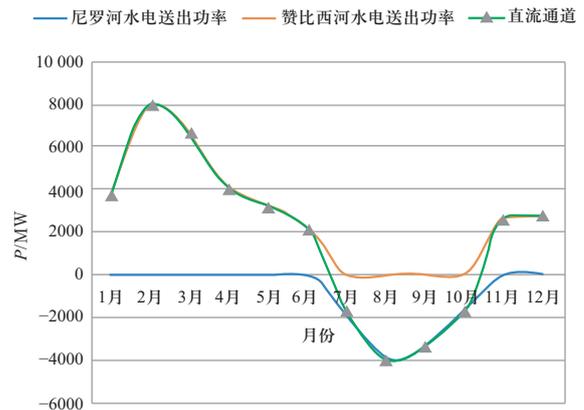


图 11 埃塞俄比亚—莫桑比克±800 kV直流运行方案示意图

Fig. 11 The operation plan of Ethiopia-Mozambique ±800 kV UHVDC interconnection project

3.1.2 开发方案

建设埃塞俄比亚—莫桑比克±800 kV直流互联工程, 连接埃塞俄比亚吉贝水电群与莫桑比克赞比西河水电基地, 充分利用尼罗河上游与赞比西河季节互补特性, 实现丰枯互补互济, 尼罗河丰水期, 向莫桑比克送电, 尼罗河枯水期, 向埃塞俄比亚送电, 缓解两国枯水期供电压力。建设埃塞俄比亚—埃及±800 kV直流互联工程, 将前述工程受入的部分赞比西河水电与尼罗河水电季节性互补, 并向北输送至埃及。

考虑建设赞比西河水电8000 MW, 外送埃塞俄比亚, 本地消纳1000~2000 MW, 剩余电力与尼罗河水电互补后外送埃及; 建设尼罗河水电8000 MW, 其中4000 MW南送莫桑比克, 在赞比西河枯水期供电, 另外4000 MW北送埃及。

初步测算, 在赞比西河枯水期, 通过尼罗河水电反向供电莫桑比克, 可缓解当地枯水期电力需求, 同时提高埃塞俄比亚—莫桑比克±800 kV直流利用率, 利用小时数由2900 h (不考虑尼罗河水电) 提升至3900 h, 运行方案如图11所示。

通过赞比西河水电季节性互补, 埃塞俄比亚—埃及±800 kV直流利用小时数由1800 h (不考虑赞比西河水电) 提升至3700 h, 运行方案如图12所示。

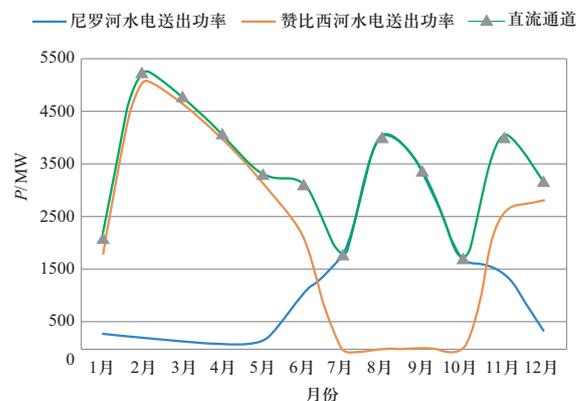


图 12 埃塞俄比亚—埃及±800 kV直流运行方案示意图

Fig. 12 The operation plan of Ethiopia-Egypt ±800 kV UHVDC interconnection project

3.2 源侧互补：中国金沙江流域水风光一体化基地开发与外送

金沙江流域水能资源丰富，位居中国十三大水电基地之首，已建和待建水电站均具有较大库容，调节性能强，同时，流域内太阳能、风能资源丰富，且在集中分布的区域内就已具有较强的季节互补特性，是典型的清洁能源资源源侧互补。因此，通过建设水风光一体化协同开发的清洁能源基地，可更好发挥水电的调节能力，平抑风光出力的波动性、随机性、间歇性，充分利用水风光源侧互补特性，有效提高枯期的供电能力和外送通道输电经济效益。

3.2.1 资源特性

金沙江上游水风光出力季节互补性强，风电和光伏日内出力具有一定的互补性。水电丰枯特性显著，5—10月为丰水期，丰枯电量比超过2；岗托电站具有年调节性能，叶巴滩、拉哇电站具有不完全年调节性能。风电年特性呈“春冬大、夏秋小”特点，5—10月发电量仅占全年的32%，全年出力系数超过0.8的时间占比仅为6%，日内出力下午和前半夜较高、后半夜和上午较低。太阳能年特性呈“春冬大、夏秋小”特点，日内出力主要受昼夜影响，全年一半的时间光伏出力为零。金沙江上游水风光年出力特性如图13所示，风光日内平均出力特性如图14所示。

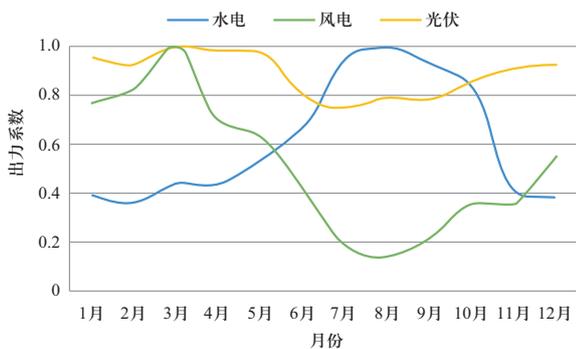


图 13 金沙江上游水风光年出力特性示意图

Fig. 13 The annual characteristics of hydro, wind, and solar resources of the upper Jinsha River

金沙江中游水电、风电年出力具有较强互补性，风电和光伏日内出力互补性较强。水电丰枯特性显著，8—10月发电量占全年近40%；规划中的龙盘水电站具有多年调节性能，梨园、金安桥、观音岩等已投产的六级水电站均具有季调节性能。风电年特性呈“春冬大、夏秋小”特点，8—10月发电量不到全年的10%，全年一半的时间出力系数超过0.2，日内出力倍

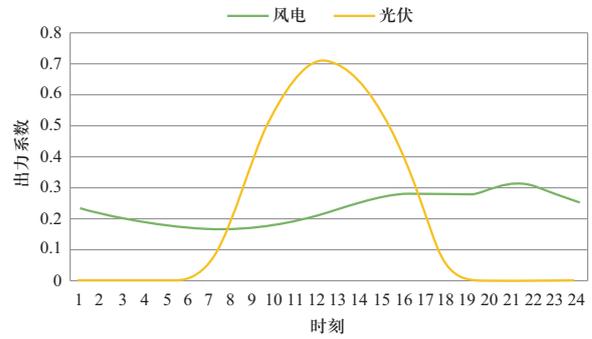


图 14 金沙江上游风光日内平均出力特性示意图

Fig. 14 The daily characteristics of wind and PV generation of the upper Jinsha River

晚较高、清晨较低。太阳能春季相对出力较大，3月是全年高峰，全年一半时间光伏出力为零，出力系数超过0.8的概率接近零。金沙江中游水风光年出力特性如图15所示，风光日内平均出力特性如图16所示。

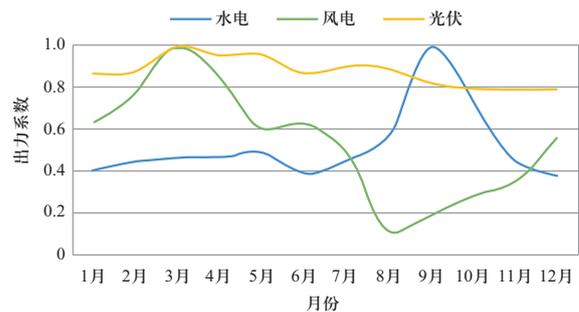


图 15 金沙江中游水风光年出力特性示意图

Fig. 15 The annual characteristics of hydro, wind, and solar resources of the middle Jinsha River

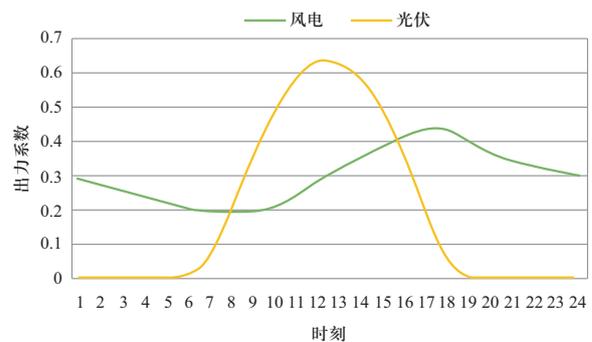


图 16 金沙江中游风光日内平均出力特性示意图

Fig. 16 The daily characteristics of wind and PV generation of the middle Jinsha River

金沙江下游水电、风电年出力具有较强互补性，风电和光伏日内出力具有一定的互补性。水电丰枯特性较显著，5—10月为丰期，丰枯电量比1.7；乌东德、白鹤滩、溪洛渡水电站具有季调节性能。风电年特性呈“春冬大、夏秋小”特点，5—10月发电量仅占全年

的33%, 全年一半的时间出力系数超过0.2, 日内出力夜晚较高、白天较低。太阳能与金沙江中游情况类似, 春季出力较大, 全年一半时间光伏出力为零, 出力系数大于0.6的概率不足10%。金沙江下游水风光年出力特性如图17所示, 风光日内平均出力特性如图18所示。

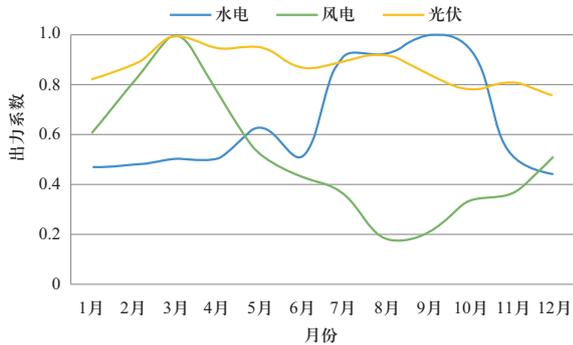


图 17 金沙江下游水风光年出力特性示意图

Fig. 17 The annual characteristics of hydro, wind, and solar resources of the down-stream Jinsha River

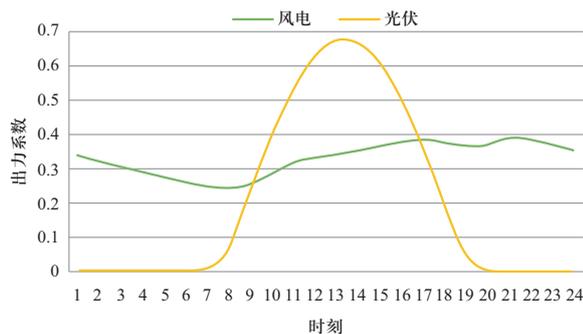


图 18 金沙江下游风光日内平均出力特性示意图

Fig. 18 The daily characteristics of wind and PV generation of the down-stream Jinsha River

3.2.2 开发方案

充分利用金沙江流域水风光季节互补特性和日内水电库容调节能力, 不同水光比例下年等效出力曲线如图19所示, 在不增加弃水、满足一定的新能源弃电率条件下, 尽可能多开发风电和光伏, 提高枯期供电能力, 提高已有外送通道利用效率或增加新的输电通道, 有效降低电源综合上网电价和工程输电成本。

外送工程采用 ± 800 kV、8000 MW特高压直流技术, 落点安徽肥西, 途径云南、四川、重庆、湖北、安徽五省市, 输电距离约1800 km, 工程静态总投资约165亿元。考虑弃风弃光成本后, 送端综合上网成本约为0.278~0.308元/kWh, 低于向家坝、溪洛渡电站上网电价0.289~0.326元/kWh^①; 通道利用小时数为5060 h,

① 来源于2019年向家坝、溪洛渡左岸电站与国网公司, 溪洛渡右岸电站与南网公司签订的购售电合同。

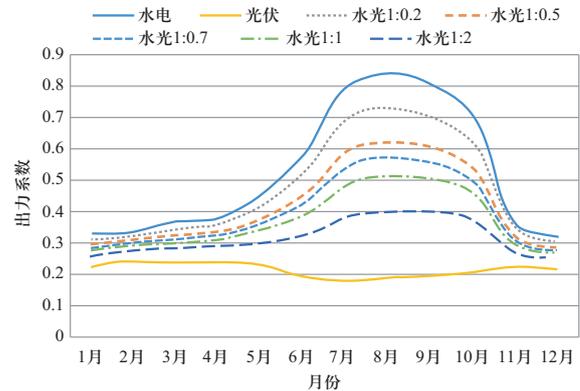


图 19 不同水光比例下年等效出力曲线示意图

Fig. 19 The equivalent output curves under different hydro-solar combination proportions

输电价0.059元/kWh; 到网电价0.337~0.367元/kWh, 相比于华东本地电源上网电价, 具有较强电价竞争力。

3.3 荷侧互补: 智利北部风-光-储-氢联合开发

智利北部安托法加斯塔风电基地、卡拉玛风电基地和玛利亚埃伦娜光伏基地时空差别小, 具有一定的风光季节互补特性, 日内特性趋同, 会增加本地供电的调峰压力, 需要灵活性资源的支撑调节, 属于典型的荷侧互补情景, 可考虑本地荷侧制氢提供一定调节响应, 通过智利北部风-光-储-氢联合开发就地供电。

3.3.1 资源特性

安托法加斯塔风电基地7月一次年2月大发, 3月—6月出力较小; 卡拉玛风电基地6月—12月大发, 1月—5月出力较小; 玛利亚埃伦娜光伏基地年特性整体平稳, 4月—8月相对小^[32]。智利北部风光基地具有一定的季节互补特性, 如图20所示, 日内特性趋同, 如图21所示。

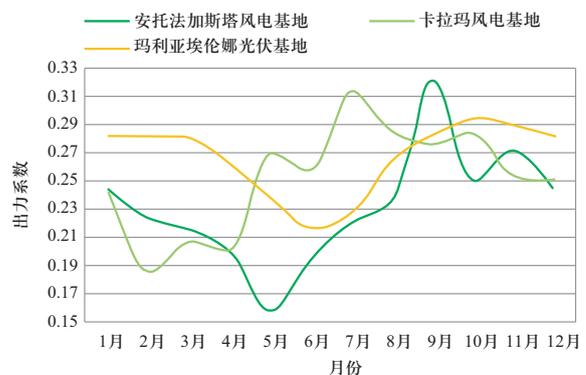


图 20 智利北部风光基地季节特性示意图

Fig. 20 Seasonal characteristics of wind and solar bases in Northern Chile

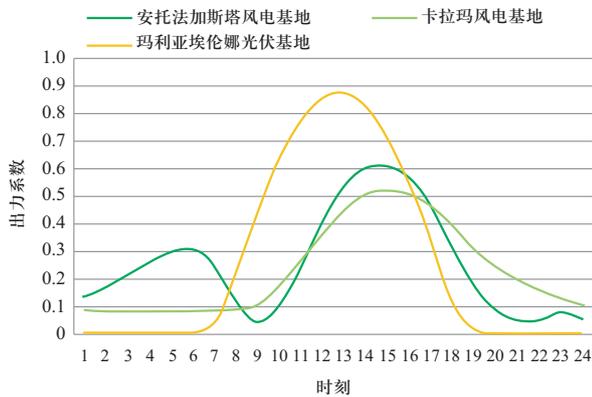


图 21 智利北部风光基地日内特性示意图

Fig. 21 Daily characteristics of wind and solar bases in Northern Chile

3.3.2 开发方案

考虑玛利亚埃伦娜光伏基地6000 MW、安托法加斯塔风电基地1000 MW、卡拉玛风电基地1000 MW装机，配套储能装机2000 MW，电制氢装机1000 MW。通过风-光-储-氢联合开发及协同运行（如图22所示），对应4000 MW电源送出通道的利用小时数达到4570 h，电制氢设备利用小时数3540 h，清洁能源弃电率4.26%，若不配置储能和电制氢，弃电率将高达42.23%。

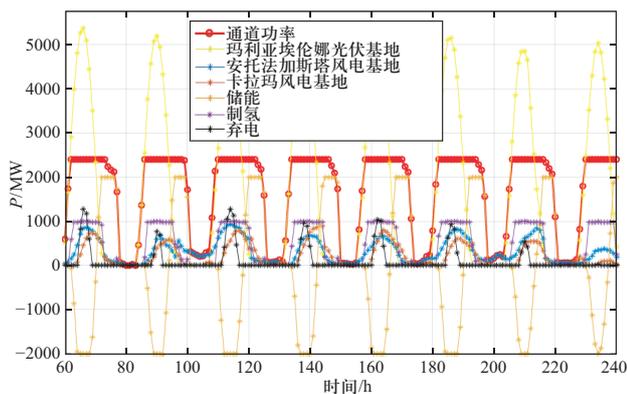


图 22 智利北部风-光-储-氢联合运行示意图

Fig. 22 Joint operation of wind-solar-storage-hydrogen in Northern Chile

智利北部清洁能源基地日内特性趋同，波动较大，通过储能调节，可大幅降低清洁能源弃电率，保障清洁能源基地的经济运行，综合度电成本约3.68美分/kWh。电制氢直接消耗弃电量，并适时得到储能系统支持，设备年利用小时数在3500 h以上，基本可兼顾制氢成本与新能源消纳，年消耗电量35.4亿kWh，可制氢7.1万t。

4 结语

全球能源互联网发展理念天然包含了清洁能源多能互补利用的涵义，全球能源互联网是多能互补网络演化发展的一种关键形态，基于能源发展的深度电气化、能源使用的高度清洁化、全球电网的广泛互联化，以电能为载体，以电力系统为配置平台，通过时空互补、源侧互补、荷侧互补3种典型场景的综合应用，广泛实现全球范围内清洁能源的大规模开发利用和广域多能互补，以清洁低碳的方式保障未来能源电力供应。采用本文提出的基于清洁能源资源评估、特性分析和生产模拟的全球能源互联网多能互补协同开发综合规划分析方法，可以有效实现全球分布的多种清洁能源和氢电、气电、储能等资源的一体化协同开发方案优化设计和效益分析。

参考文献

- [1] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306 (in Chinese).
- [2] 王一帆, 李娜, 潘崇超, 等. 基于焓分析的多能互补能源系统模型优化及调度策略研究[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 249-263.
WANG Yifan, LI Na, PAN Chongchao, et al. Research on model optimization and dispatching strategy of multi-energy complementary energy system based on exergy analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 249-263 (in Chinese).
- [3] FAVRE-PERROD P. A vision of future energy networks [C]//2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa. July 11-15, 2005, Durban, South Africa. IEEE, 2006: 13-17.
- [4] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [5] 国务院. 国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见[EB/OL]. (2015-07-04)[2022-02-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-07/04/content_10002.htm.
- [6] 黄仁乐, 蒲天骄, 刘克文, 等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 26-33.
HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, et al. Design of hierarchy and functions of regional energy Internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2015, 39(9): 26-33 (in Chinese).
- [7] 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224-1230. PANG Zhonghe, KONG Yanlong, PANG Jumei, et al. Geothermal resources and development in Xiongan New Area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(11): 1224-1230 (in Chinese).
- [8] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173. DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei Demonstration Project of MMC-HVDC Grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173 (in Chinese).
- [9] 郭贤珊, 王晖, 卜广全, 等. 大规模新能源经张北柔直孤岛送出的虚拟频率研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 2-7. GUO Xianshan, WANG Hui, BU Guangquan, et al. Virtual frequency control of islanded large-scale renewable energy power system delivered by Zhangbei VSC-HVDC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 2-7 (in Chinese).
- [10] European Union's Seventh Framework Programme. Europe's future secure and sustainable electricity infrastructure[R]. France: RTE, 2015.
- [11] ARDELEAN M, MINNEBO P. A China-EU electricity transmission link: assessment of potential connecting countries and routes[R/OL]. (2017)[2022-01-14]. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC110333>.
- [12] ENTSO-E. TYNDP 2018[R/OL]. (2018)[2020-07-14]. <https://tyndp.entsoe.eu/tyndp2018/>.
- [13] Dii. Starting the debate for the grid infrastructure for a sustainable power supply in EUMENA[R]. Germany: Dii GmbH, 2014.
- [14] CASTRO N J D, ROSENAL R. Integration and electric energy security in Latin America[M]. Rio de Janeiro: Oficina de Livros, 2017.
- [15] 李隽, 宋福龙, 余潇潇. 全球能源互联网骨干网架规划研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 527-536. LI Jun, SONG Fulong, YU Xiaoxiao. Research on global energy interconnection backbone grid planning[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 527-536 (in Chinese).
- [16] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015. LIU Zhenya. Global Energy Interconnection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015(in Chinese).
- [17] 全球能源互联网发展合作组织. 全球碳中和之路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021: 46-52.
- [18] 董凌, 李延和, 刘锋, 等. 区域全清洁能源供电的发展路径与实践: 以青海省为例[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 385-392. DONG Ling, LI Yanhe, LIU Feng, et al. Development path and practice of regional fully clean power supply: a case study of Qinghai Province[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 385-392 (in Chinese).
- [19] 闫群民, 刘语忱, 董新洲, 等. 基于CEEMDAN-HT的平滑光伏出力混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 43-53. YAN Qunmin, LIU Yuchen, DONG Xinzhou, et al. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53 (in Chinese).
- [20] 李建涛, 李永光, 朱泊旭, 等. 间歇式新能源消纳评估常用方法分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 85-93. LI Jiantao, LI Yongguang, ZHU Boxu, et al. Analysis of common methods for intermittent renewable energy consumption assessment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 85-93 (in Chinese).
- [21] 梅生伟, 李瑞, 黄少伟, 等. 多能互补网络建模及动态演化机理初探[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 10-22. MEI Shengwei, LI Rui, HUANG Shaowei, et al. Preliminary investigation on the modeling and evolutionary analytics of multi-carrier energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 10-22 (in Chinese).
- [22] 侯方心, 张士宁, 赵子健, 等. 实现《巴黎协定》目标下的全球能源互联网情景展望分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 34-43. HOU Fangxin, ZHANG Shining, ZHAO Zijian, et al. Global energy interconnection scenario outlook and analysis in the context of achieving the Paris Agreement goals[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 34-43 (in Chinese).
- [23] ZHANG S N, YANG F, LIU C Y, et al. Study on global industrialization and industry emission to achieve the 2 °C goal based on MESSAGE model and LMDI approach[J]. Energies, 2020, 13(4): 825.
- [24] SONG F L, MEHEDI H, LIANG C H, et al. Review of transition paths for coal-fired power plants[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 354-370.
- [25] 赵腾, 邬炜, 李隽, 等. “两个替代”趋势下的欧洲跨国电力互联互通研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 632-642. ZHAO Teng, WU Wei, LI Jun, et al. Research on cross-border power interconnection channels in Europe under trend of two replacements[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 632-642 (in Chinese).
- [26] 朱晔, 兰贞波, 隗震, 等. 考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 127-133. ZHU Ye, LAN Zhenbo, WEI Zhen, et al. Research on optimal operation of wind-PV-ES complementary system considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 127-133 (in Chinese).
- [27] DENG C Y, SONG F L, CHEN Z X. Preliminary study on the

exploitation plan of the mega hydropower base in the lower reaches of Congo River[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 12-22.

- [28] SONG F L, YU X X, LI J, et al. Research and comprehensive evaluation on delivery schemes of the Grand Inga hydropower station[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 521-531.
- [29] CHEN Z X, WANG C, LI J, et al. Conductor selection and economic analysis of D.R. Congo-Guinea ± 800 kV UHVDC transmission project[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 385-397.
- [30] 全球能源互联网发展合作组织. 非洲能源互联网研究与展望[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 80-81.
- [31] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网研究与展望[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 64-65.
- [32] 全球能源互联网发展合作组织. 中南美洲清洁能源开发与投资研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020: 163-164.

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-06-15。



陈正曦

作者简介:

陈正曦(1990), 男, 研究方向为电力系统规划、新能源开发、电力系统经济性、全球能源互联网等, E-mail: chenzhengxi@geidco.org。

梁才浩(1978), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统优化潮流、电网规划、新能源接入、全球能源互联网等。通信作者, E-mail: caihao-liang@geidco.org。

(责任编辑 李锡)