

# “一带一路”电力互联互通浅析

刘哲<sup>1</sup>, 高艺<sup>1</sup>, 王玉生<sup>2</sup>, 李隽<sup>1</sup>, 黄维和<sup>3</sup>

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031; 2. 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083;  
3. 中国石油天然气股份有限公司, 北京 100007)

**摘要:** “一带一路”建设不断向纵深发展, 在基础设施、经贸投资和绿色金融等多领域取得丰硕成果。能源电力是“一带一路”国际合作的重要领域。为更好地认识开展沿线国家能源电力国际合作的重要性, 本文从环境和成本两个方面阐述了沿线国家清洁能源开发的资源优势, 诠释了各国间电力互联互通的潜力。从思维创新、模式变革、技术革新以及利益共享四个维度, 分析了技术革命对“一带一路”电力互联互通的支撑作用。研究表明沿线国家能源电力需求呈快速增长趋势, 清洁能源资源分布广泛、优势明显, 为电力互联互通提供了必要条件。在国际能源电力合作中, 应充分发挥各国的比较优势, 以新能源、电网、信息等关键技术的变革支撑“一带一路”电力互联互通。

**关键词:** “一带一路”; 能源互联网; 清洁能源; 电力互联互通; 能源转型

**中图分类号:** TM-9 **文献标识码:** A

## Preliminary Analysis of Power Connectivity along the Belt and Road

Liu Zhe<sup>1</sup>, Gao Yi<sup>1</sup>, Wang Yusheng<sup>2</sup>, Li Jun<sup>1</sup>, Huang Weihe<sup>3</sup>

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Beijing 100031, China;  
2. PetroChina Planning and Engineering Institute, Beijing 100083, China; 3. PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China)

**Abstract:** As the Belt and Road initiative develops in depth and breadth, substantial achievements have been scored in multiple fields, such as infrastructure, trade and investment, and green finance. Power and energy are important areas for the Belt and Road international cooperation. To better understand the importance of international energy and power cooperation, this study elaborates the resource superiority of the Belt and Road countries for clean energy development from the aspects of environment and cost, and analyzes the potential of power connectivity among these countries. This study also analyzes the supporting role of technological revolution in power connectivity, in terms of thinking innovation, mode reform, technological innovation, and benefit sharing. Research shows that the energy and power demand of the Belt and Road countries is increasing rapidly, and the widely-distributed and advantageous clean energy resources of these countries have made power connectively possible. In the international energy and power cooperation, comparative advantages of all countries should be given full play, and key technology innovation in fields, such as renewable energy, power grid, and information, should be adopted to support the power connectivity.

**Keywords:** the Belt and Road; energy internet; clean energy; power connectivity; energy transition

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-06-28

通讯作者: 刘哲, 全球能源互联网发展合作组织高级工程师, 主要研究方向为新能源与电网规划; E-mail: zhe-liu@geidco.org

资助项目: 中国工程院咨询项目“工程科技支撑‘一带一路’建设战略研究”(2017-ZD-15)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

## 一、“一带一路”国际合作

“一带一路”建设不断向纵深发展,在互联互通、经贸投资和绿色金融等多领域取得丰硕成果。能源电力合作作为“一带一路”建设重要的组成部分,步入崭新的发展阶段。

2013 年 9 月和 10 月中国国家主席习近平同志在中亚和东南亚分别发表题为《弘扬人民友谊 共创美好未来》和《携手建设中国—东盟命运共同体》的重要演讲,首次提出共建“丝绸之路经济带”和“海上丝绸之路”的倡议,拉开了“一带一路”建设的大幕。传承和弘扬丝路精神,坚持开放合作、和谐包容、市场运作和互利共赢基本原则,促进沿线各国政策沟通、设施联通、贸易畅通、资金融通和民心相通,逐渐成为引领沿线国家开展国际合作的重要参考 [1]。

在政策沟通方面,求同存异,加强友好对话与磋商,为地区发展提供保障。截至 2018 年年底,与我国签署的“一带一路”合作文件近 170 个。在设施联通方面,推动交通、口岸、能源和通信等领域的互联互通。中巴经济走廊、中老铁路、中泰铁路、匈塞铁路、雅万高铁、中俄跨境桥等一大批标志性项目稳步推进。在贸易畅通方面,消除贸易壁垒,实现互利共赢。截至 2018 年年底,通过确认考核的境外经贸合作区入区企业共计 933 家,累计投资 209.6 亿美元。在资金融通方面,降低资金流通成本,提高地区经济的国际竞争力。中资银行共参与“一带一路”建设项目 2600 多个,累计发放贷款超过 2000 亿美元。在民心相通方面,弘扬睦邻友好精神,促进文化交流,为深化合作提供内在动力。我国已与 188 个国家和地区建立教育合作与交流关系。

能源电力是经济社会发展的基石,是“一带一路”国际合作的重要领域。2017 年 5 月,国家发展和改革委员会、国家能源局共同发布了《推动丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路能源合作愿景与行动》,旨在让古丝绸之路在能源合作领域焕发新的活力,促进各国的能源务实合作迈上新台阶。

目前,“一带一路”能源电力合作处于起步阶段,能源资源开发、油气管网互联互通、第三代核电和特高压等技术的全球化布局,成为国际合作的新名片。中俄亚马尔液态天然气项目的实施成功打

造了“冰上丝绸之路”的重要支点,是“一带一路”倡议下实施的首个特大能源项目。中哈、中缅、中俄油气管道相继建成并投入使用,有效缓解了我国石油、天然气需求增长所带来的压力,为我国带来了更加多样的能源进口和消费途径。巴基斯坦卡拉奇核电项目,是继福建福清 5 号机组之后全球第二个开建的“华龙一号”核电项目,标志着“华龙一号”首次走出国门。巴西美丽山水电特高压直流送出项目,实现了我国特高压输电技术、设备和经验迈出国门的第一步。

电力互联互通是“一带一路”设施联通的重要组成部分,是国际能源电力合作的重要抓手。近年来,我国“西电东送”“北电南送”等重大工程,显著提升了能源电力配置能力。随着各国对清洁能源发展的重视与认知的不断进步,清洁能源资源综合利用和电力高效传输的组合成为各国能源转型的重要方向之一。然而,从“一带一路”全局来看,清洁能源开发优势显著的资源分布不均,跨国电网联通水平有待提高。需要系统规划清洁能源开发布局,进一步加强沿线国家电力互联互通,补强能源电力基础设施短板,实现绿色、低碳、可持续的高质量发展。

## 二、“一带一路”沿线清洁能源资源优势

“一带一路”沿线清洁能源资源丰富,通过电力互联互通,充分发挥沿线国家清洁能源资源比较优势,可实现更大范围能源资源优化配置。

### (一) 清洁能源环境优势

清洁能源的“绿色基因”是环境优势的重要根源。化石能源使用造成空气污染和气候变化等一系列问题,已经使政府、企业、投资者和公众认识到未来全球经济实现低碳发展的必要性。与化石能源相比,清洁能源具有较强的可持续性,而传统化石能源的稀缺性越来越明显。清洁能源有助于降低温室气体排放,实现全球高质量发展。据预测,到 2050 年若实现 100% 清洁能源系统,将新增 2400 万个就业岗位,每年避免 350 万人因空气污染而死亡,节省空气污染和气候变化治理费用约 500 亿美元 [2]。

在形成清洁发展共识的基础上,国际领域制定

了可行的清洁能源利用政策与措施。2015年巴黎气候变化大会通过了《巴黎协定》，为2020年后全球应对气候变化行动做出安排，为此各缔约国针对自身情况制定各国发展路线图，能源电力低碳化、清洁化发展成为应对气候变化的重要举措。中国政府提出到2020年和2030年非化石能源占一次能源的比重将达到15%和20%。欧盟成员国和地区以及美国、日本、英国等国家都把发展可再生能源作为温室气体减排的重要措施。近年来，欧美等国家和地区每年60%以上的新增发电装机来自可再生能源。2015年，全球清洁能源发电新增装机容量首次超过常规能源发电装机容量[3]。2015年9月，习近平主席出席联合国发展峰会并发表重要讲话，提出中国倡议探讨构建全球能源互联网，推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求。在“一带一路”倡议的框架下，全球能源互联网发展理念不断深化和传播，为新时代能源电力发展与国际合作提供新思路。

### （二）清洁能源成本优势

随着技术不断进步、批量化和产业化生产的不断扩大，清洁能源发电成本优势已逐渐显现。近年来全球清洁能源发电成本显著下降，2017年全球光伏和陆上风电平准化度电成本分别为10美分/(kW·h)和6美分/(kW·h)，与2010年相比，分别下降约73%和25%[4]。根据相关机构预测，未来清洁能源发电成本将低于化石能源发电成本，能够逐步实现清洁能源发电的平价上网。

驱动清洁能源发电成本下降的因素主要包含技术、市场以及融资三个方面。技术不断进步是清洁能源发电成本不断下降的重要基础。随着材料效率、单机容量的不断改进，发电容量因子不断提高，集约化的清洁能源开发带来了更大规模效益和更低的运维成本。2017年，全球光伏发电和陆上风电平均容量因子已达到18%和30%，光热发电和海上风电平均容量因子甚至达到了34%和39%，已接近水电平均容量因子的48%。市场的不断完善是清洁能源发电成本不断下降的重要保障。拍卖机制逐渐取代固定电价、清洁能源国家补贴退坡等政策，大大提升了清洁能源发电市场的竞争力，促进开发商利用新技术，实现收益与成本间的最大化。2016年采用固定电价和拍卖机制的国家数量分别达到了

83个和73个。融资的不断便利是清洁能源发电成本不断下降的重要原因。清洁能源市场融资更加便利。欧洲国家较低的贷款利率和政府债券收益，使得开发商融资成本不断降低，竞争力不断增强。竞争性拍卖机制给股权预期收益率带来较大的压力，德国陆上风电工程的股权收益率已降至4.5%。

### 三、“一带一路”电力互联互通潜力

“一带一路”沿线国家基础设施发展潜力和市场空间很大，能源电力作为基础设施的重要组成部分，具有保民生、促发展的关键作用。沿线国家互联互通潜力主要体现在能源电力需求大、价格差异性强、源荷分布不均等方面。

2016年，“一带一路”沿线64个核心国家（不含中国）的总人口约为32亿，约占全球总人口的44%；国内生产总值约为12.2万亿美元，约占全球国内生产总值的16%；一次能源消费为 $5.7 \times 10^9$  tce，约占全球一次能源消费的29%；用电量为 $5.3 \times 10^{12}$  kW·h，约占全球用电量的24%。中国“十二五”期间用电量年均增速约为5.7%，2016年达到 $5.9 \times 10^{12}$  kW·h，较2005年增长约1.4倍。与2005年相比，“一带一路”沿线国家用电量增长约61%，重点地区用电量增长情况如图1所示。其中东南亚、南亚和西亚北非地区用电量增长迅速，2005—2016年用电量年均增长率分别为5.7%、6.7%和5%。据预测，未来25年中“一带一路”沿线国家电力需求年均增长约为3.2%，是全球增速最快的地区之一[5]。

“一带一路”沿线各国电力需求具有季节互补性，且各国能源电力价格差异性明显，为电力互联互通提供一定潜力。例如，受纬度和气候的影响，俄罗斯、蒙古国的电力负荷峰值主要出现在冬季，而日本、韩国和朝鲜负荷峰值出现在夏季。韩国和日本平均电价是俄罗斯和蒙古的2~3倍[6]。

“一带一路”沿线国家清洁能源资源主要分布在呈“人”字形的两条能源带上。一条从西亚、中亚到中国西部、中国北部、蒙古国、俄罗斯远东地区；另一条从南亚北部、中国西南、缅甸到老挝。沿线64个核心国家水电技术可开发量约为 $4.9 \times 10^{12}$  kW·h，约占世界水电资源技术可开发量的13%[7]。从分布上看，俄罗斯和青藏高原周边

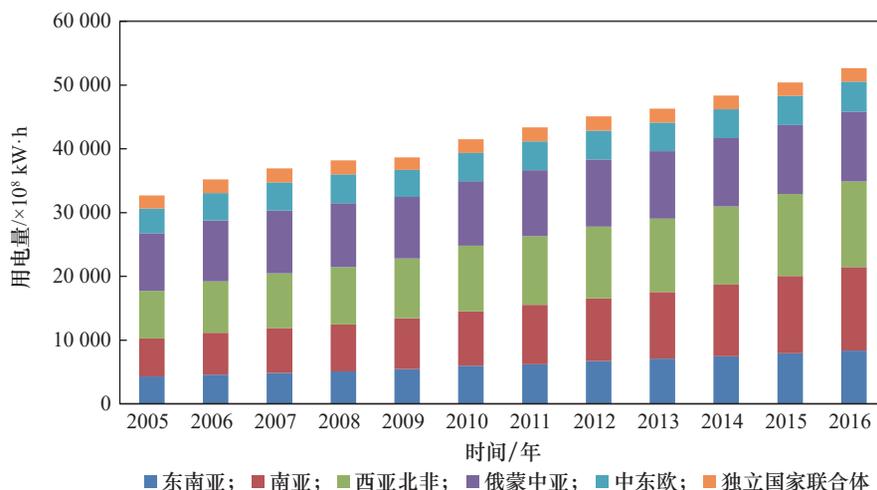


图1 “一带一路”沿线重点地区用电量变化趋势

是水电资源最为富集的地区。沿线风电主要分布在中国、俄蒙中亚、西亚和南亚地区。太阳能主要分布在中国、蒙古、中亚、南亚和西亚地区。而沿线国家人口和能源电力需求主要分布在东亚、南亚和东南亚等沿海地区，与清洁能源资源呈现逆向分布。电力是清洁能源资源高效利用的载体，进一步加强沿线各国能源电力互联互通，能够更大范围、更加高效地发挥区域优势，为互通有无、协同发展提供巨大机遇。

#### 四、技术革命支撑“一带一路”电力互联互通

科学技术是推动能源变革和重塑世界能源格局的重要动力，有力地推动清洁能源开发与电力互联互通。

##### (一) 能源电力发展思维创新

互联网思维带来新的经济形态，依托互联网信息技术，实现互联网与传统产业的联合，以优化生产要素、更新业务体系、重构商业模式等途径来完成经济转型和升级。作为重要的应用场景，“互联网+”智慧能源，旨在通过互联网推进能源生产与消费模式革命，提高可再生能源占比和能源利用效率，促进能源利用结构优化，推动节能减排，加快电力基础设施智能化改造与互联互通。

电力互联互通是传统能源生产、运输与消费模式的重要补充，是低碳发展的新思路，为能源供给与消费提供更多选择。利用“大云物移智”（即大

数据、云计算、物联网、移动互联网、人工智能）等先进信息通信技术，促进能源多元化、低碳清洁化、综合化发展，提升能效降低成本，更好满足用户对多种形式能源的需求。“大云物移智”等先进信息通信技术的发展将带来电力生产、传输与配用全流程的变革。在生产环节，大数据和云分析的应用显著提高了可再生能源利用率。在传输环节，先进的感知技术能够更加快速和更大范围地为电网提供安全保障；在配用环节，物联网和移动互联网等智慧技术可提高终端服务多样性，满足不同需求，驱动新生态圈，衍生增值服务，提高能源系统运转效率。互联网思维是基于先进信息通信技术的新业态，是实现“一带一路”电力互联互通与高效多样化利用的创新性思维。

##### (二) 清洁能源技术与产业模式的变革

全球清洁能源消费不断增加。2015年“一带一路”国家清洁能源装机占总装机的比例约为27%。在清洁能源利用水平不断提升的同时，清洁能源技术也发生了巨大的变革。光伏组件和风电单机设备的性能稳步增加，12 MW海上风电机组正在研制。新能源发电预测水平不断优化，基于实时观测数据，我国风电和光伏短期发电功率的预测精度可分别达到92%和91%。实现可再生能源友好并网，张北国家风光储输示范工程，集风电、光伏发电、储能、智能输电于一体，实现风储联合等7种发电方式自动组态，新能源利用效率达到98%。

随着清洁能源电力技术的不断进步，进一步提高供给侧清洁能源占比和消费侧电气化水平成为可

能，同时也为多数国家实现能源系统低碳可持续发展提供新的选择与路径。能源供给与消费方式的转变，将导致能源产业模式向着循环产业链的方式进一步转变，在能源开发、消费以及工业生产间形成高效的闭环反馈体系。我国在能源与矿产开发领域已有先例，在鄂尔多斯已形成“煤—洗选—发电—氧化铝—建材”的循环产业链，带来了可观的经济效益和环境效益。“一带一路”沿线各国能源与矿产资源各具特色，有利于在更大范围内发挥比较优势，形成更加宽泛的循环产业模式，实现多产业融合发展，引导多领域“组团出海”。依托“一带一路”沿线各国资源禀赋，大力开发区域清洁能源，加强能源电力互联互通，保障矿冶基地和工业园区等充足、可靠的能源电力供应，带动全产业链绿色低碳发展，形成能源电力、采矿冶炼、深加工等产业的一体化布局，实现电力、矿业、冶金、加工、贸易的联动发展。清洁能源技术与产业模式变革是促进电力互联互通的催化剂，为能源电力基础设施建设提供新动力。

### （三）以电力新技术为核心的坚强智能电网

坚强智能电网以坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，以智能控制为手段，是实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合的现代电网。超/特高压、柔性输电、储能、海底电缆、智能控制、信息通信等新技术是构建坚强智能电网的重要基础。

截至2018年年底，我国已建成“八交十三直”21项特高压输电工程。同时特高压技术在巴西和印度也被采用，巴西美丽山项目一期工程于2017年年底投入运行，印度已建和在建设的特高压工程有3条。在特高压工程科技领域，我国已实现“基础研究—工程设计—设备研制—试验验证—系统集成—工程示范”全流程创新与应用。我国已突破特高压输电核心技术，制订国际标准18项和中国标准137项，引领世界特高压技术发展。近年来电力电子技术取得了长足进步，在交通运输、航空航天、能源电力等领域得到广泛应用。柔性输电成为了新能源并网的重要手段。我国已建成南澳±160 kV三端、舟山±200 kV五端和厦门±320 kV柔性直流输电工程，大幅增强海岛供电能力和新能源消纳能力。拓展了柔

性输电应用新领域，在建的张北±500 kV四端柔性直流电网示范工程，汇集和输送大规模风电、光伏、储能和抽蓄等多种形态能源，支撑2022年低碳绿色冬季奥林匹克运动会。坚强智能电网是先进电力技术孕育的产物，是构建全球能源电力治理新模式，实现电力互联互通的重要手段。

### （四）多方参与利益共享的能源综合利用

经济全球化和区域一体化进程不断深化，使得能源市场化进程不断加快。在公平、公开、公正的市场环境下，实现多方参与、利益共享是市场运行的基本准则。能源综合利用离不开开放的能源市场，需破除壁垒，实现能源领域的融合发展。

能源综合利用的载体是综合能源系统，是对各类能源产生、传输、分配及消费等环节实施有机协调与优化进而形成的能源产供销一体化系统[8]。综合能源系统涉及终端能源网、区域能源网、国家能源网乃至洲际和全球能源网。能源综合利用的核心是智能电网，以电为核心，在充分利用智能电网建设成果的基础上，实现多能互补，提高全环节能源利用效率，实现低碳可持续发展。重点挖掘和利用不同能源间的互补替代性，发挥各类能源自身优势，实现能源由源到荷的全环节、全过程协同优化。构建多方参与、利益共享的国际能源合作新模式，积极开展能源综合利用技术研究，服务能源在更大范围内和更广阔平台上的综合利用，实现能源电力交融式互联互通。

## 五、结语

本文梳理了“一带一路”沿线国家清洁能源资源优势与电力互联互通潜力。从思维创新、清洁能源技术、产业模式变革、特高压、智能电网、综合能源利用等方面，阐述了技术革命对电力互联互通的支撑作用。建议从基础研究、技术攻关、工程示范三大领域出发，开展能源电力技术创新与合作，紧抓能源变革机遇，引领世界能源转型，在反哺国内市场的同时，实现能源电力行业全产业链“出海”。

### 参考文献

[1] 中华人民共和国发展和改革委员会, 外交部, 商务部. 推动共建

- 丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动 [EB/OL]. (2015-03-31)[2019-05-22]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/ae/ai/201503/20150300928878.shtml>.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Commerce of the PRC. Vision and proposed actions outlined on jointly building Silk Road Economic Belt and 21st-Century Maritime Silk Road [EB/OL]. (2015-03-31)[2019-05-22]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/ae/ai/201503/20150300928878.shtml>.
- [2] Jacobson M Z, Delucchi M A, Bauer Z A F, et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world [J]. *Joule*, 2017, 1(1): 1–14.
- [3] 中华人民共和国发展和改革委员会. 可再生能源发展“十三五”规划 [EB/OL]. (2017-06-14)[2019-05-22]. [http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/t20170614\\_850910.html](http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/t20170614_850910.html).
- National Development and Reform Commission of the PRC. The 13th Five-Year plan for renewable energy development [EB/OL]. (2017-06-14)[2019-05-22]. [http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/t20170614\\_850910.html](http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/t20170614_850910.html).
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable power generation costs in 2017 [R]. Bonn: International Renewable Energy Agency, 2018.
- [5] 梁才, 高国伟, 杨树, 等. “一带一路”跨国电网互联发展趋势、挑战及推进策略研究 [J]. *全球能源互联网*, 2018, 1(S1): 228–233.
- Liang C, Gao G W, Yang S, et al. “The Belt and Road” area power grid interconnection trend analysis and promotion strategy [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2018, 1(S1): 228–233.
- [6] Asia Pacific Energy Research Centre. Electric power grid interconnections in Northeast Asia [R]. Tokyo: Asia Pacific Energy Research Centre, 2015.
- [7] 自然资源保护协会, 世界自然基金会. “一带一路”电力综合资源规划研究 [R]. 北京: 自然资源保护协会, 世界自然基金会, 2018.
- Natural Resources Defense Council, World Wide Fund for Nature or World Wildlife Fund. Comprehensive power resources planning on the Belt and Road [R]. Beijing: Natural Resources Defense Council, World Wide Fund for Nature or World Wildlife Fund, 2018.
- [8] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(1): 1–13.
- Yu X D, Xu X D, Chen S Y, et al. A brief review to integrated energy system and energy Internet [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(1): 1–13.