

碳中和背景下全球能源互联网构建的 关键技术及展望

申洪^{1,2}, 周勤勇³, 刘耀^{1,2}, 孙蔚^{1,2}, 贺庆^{1,2}, 任大伟^{1,2}, 张彦涛³

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031; 2. 全球能源互联网集团有限公司, 北京市 西城区 100031; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Key Technologies and Prospects for the Construction of Global Energy Internet Under the Background of Carbon Neutral

SHEN Hong^{1,2}, ZHOU Qinyong³, LIU Yao^{1,2}, SUN Wei^{1,2}, HE Qing^{1,2}, REN Dawei^{1,2}, ZHANG Yantao³

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;
2. Global Energy Interconnection Co. Ltd., Xicheng District, Beijing 100031, China;
3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

摘要: 我国提出到 2030 年实现碳达峰, 2060 年实现碳中和的目标。结合 2050 年全球能源互联网场景及骨干网架, 从高比例清洁能源、联网格局与网络结构、运行控制措施等方面探讨了全球能源互联网构建的若干问题, 分析了清洁能源比例、实施路径及应对挑战措施, 提出多节点多回路广义骨干网架概念, 讨论了分层分区结构, 提出了智能调度、稳定控制、信息通信及大数据等运行控制措施建议, 并对大容量远距离输电、储能、清洁能源发电等构建全球能源互联网的关键技术进行了展望。

关键词: 全球能源互联网(GEI); 电网规划; 骨干网架; 电网结构; 特高压; 清洁能源; 储能; 碳中和

ABSTRACT: China has set a goal of reaching a carbon peak by 2030 and becoming carbon neutral by 2060. Based on the 2050 global energy interconnection (GEI) scenario and backbone grid plan, such issues in the construction of the GEI as high proportion of clean energy, connecting pattern and grid structure, operation control measures, etc. were studied. The proportions of clean energy, implementation path and responding measures to challenges were analysed, the concept of multi-node and multi-loop generalized backbone grid were proposed. The hierarchical and zoning structure was discussed, and intelligent dispatching, stability control, information communication and big data and other operational control measures

were proposed. Key technologies such as large-capacity long-distance power transmission, cross-sea power transmission, clean energy power generation, and energy storage were analysed and predicted.

KEY WORDS: global energy interconnection (GEI); grid planing; backbone grid; grid structure; ultra-high voltage; clean energy; energy storage; carbon neutral

0 引言

能源是人类社会发展的基础。长期以来, 化石能源大规模开发利用带来资源紧张、环境污染、气候变化等突出问题, 而全球还有约 10.6 亿无电人口^[1], 未来经济社会发展的能源需求仍将持续增长, 实现能源可持续发展面临诸多挑战。推动能源清洁化转型已经形成共识, 多个国家和国际组织相继提出未来中长期清洁能源发展目标, 我国也提出到 2030 年实现碳达峰, 2060 年实现碳中和的目标。

为加快落实减排目标, 相关研究机构开展了大量研究, 并取得了一定的研究成果, 如国际能源署(IEA)、国际可再生能源署(IRENA)等机构发布了实施路线图, 一些高校和研究机构也相继发布了研究报告。然而, 大多研究成果侧重于区域性清洁能源的开发与消纳研究, 对于如何实现全

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1766201)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U1766201).

球大范围清洁能源资源配置探讨较少。

文献[2-4]从电网侧提出了促进全球清洁能源资源优化配置的解决方案。据估算,全球能源互联网建设总投资可达 38 万亿美元,将拉动全球经济年均增长 0.2 个百分点,综合价值和效益十分显著。文献[5-11]开展了全球主要大洲和重点地区能源互联网骨干网架规划研究、应对气候变化方案研究、促进环境保护战略研究以及清洁能源发电、电网构建等关键技术研究。本文结合当前已有研究成果,梳理了未来全球能源互联网能源场景和网架规划,重点围绕清洁能源占比、网络结构与联网络局、运行控制措施等更深层次问题开展了进一步研究,并就构建全球能源互联网的相关核心技术进行分析和展望,旨在为推动全球能源互联网构建,促进清洁能源全球大规模开发、配置和高效利用,实现世界经济、社会、环境可持续发展提供解决方案。

1 全球能源互联网场景

1.1 能源场景预测

预计到 2050 年,全球一次能源总量将增至 260 亿 t 标准煤,年均增速 1%左右,增量主要来自于亚洲和非洲,如图 1 所示。

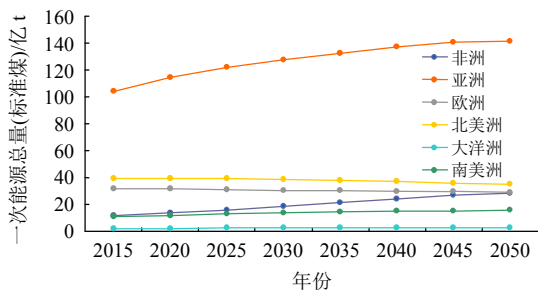


图 1 全球各洲一次能源总量

Fig. 1 Total primary energy amounts of continents

预计 2025 年左右,全球化石能源总量达到峰值。其中,煤炭消费量将在 2020 年前后达到峰值,到 2050 年降至 13.7 亿 t 标准煤,如图 2 所示。

预计到 2035 年,全球用电量将达到 42.4 万亿 kW·h,年均增速 3.5%。到 2050 年,全球用电量将达到 60.4 万亿 kW·h,年均增速 2.4%。全球电力需求预测如图 3 所示。

预计到 2050 年,全球发电装机规模为 267

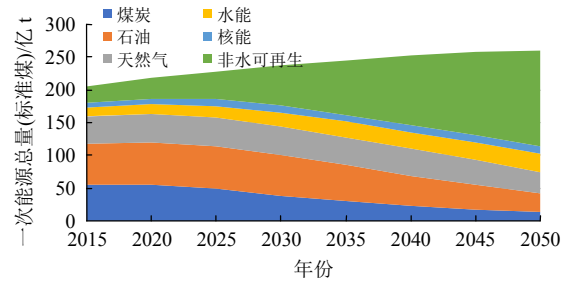


图 2 全球各品种一次能源消费

Fig. 2 Global primary energy consumption

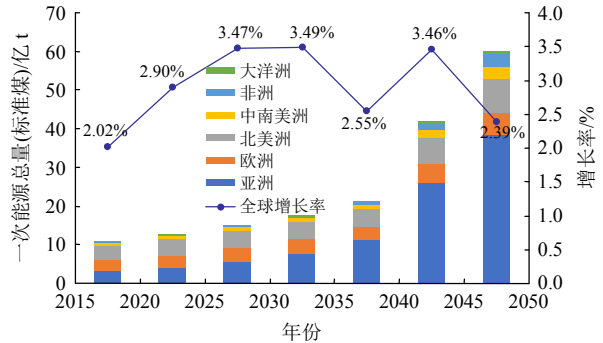


图 3 全球电力需求预测

Fig. 3 Global electric power demand forecast

亿 kW,清洁能源装机占比为 83%,其中风电 25%,太阳能发电 41%,水电 11%,核电 2%,生物质能、地热及其他 4%。全球发电量为 65 万亿 kW·h,清洁能源发电量占比 81%,其中风电 24%,太阳能发电 30%,水电 16%,核电 6%,生物质能、地热及其他 5%。全球发电装机结构预测如图 4 所示。

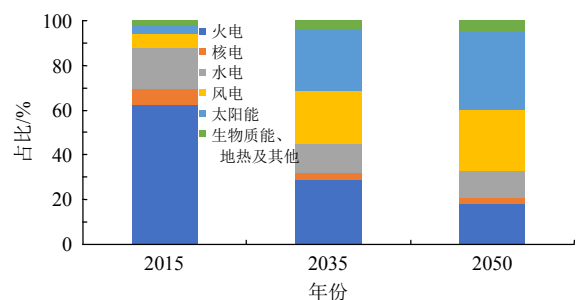


图 4 全球发电装机结构预测

Fig. 4 Global electric power installed capacity portfolio forecast

到 2050 年,全球跨洲跨区域电力流总规模达到 7.2 亿 kW,其中跨洲电力流将达到 1.3 亿 kW,如图 5 所示。到 2070 年,全球跨洲跨区电力流总规模达到 12.5 亿 kW,其中跨洲电力流总规模达到 4.3 亿 kW。

1.2 全球能源互联网骨干网架

基于资源禀赋、能源电力需求和气候环境治理需要，在各国骨干电网网架和跨国电力联网基础上，未来全球整体将形成包括亚欧非“四横六纵”互联通道、美洲“四横三纵”互联通道和北

极能源互联通道的“九横九纵”全球能源互联网骨干网架，如图 6 所示。全球能源互联网骨干网架将广泛互联大型清洁能源基地与负荷中心，实现清洁能源的全球配置，跨时区、跨季节大规模互济。

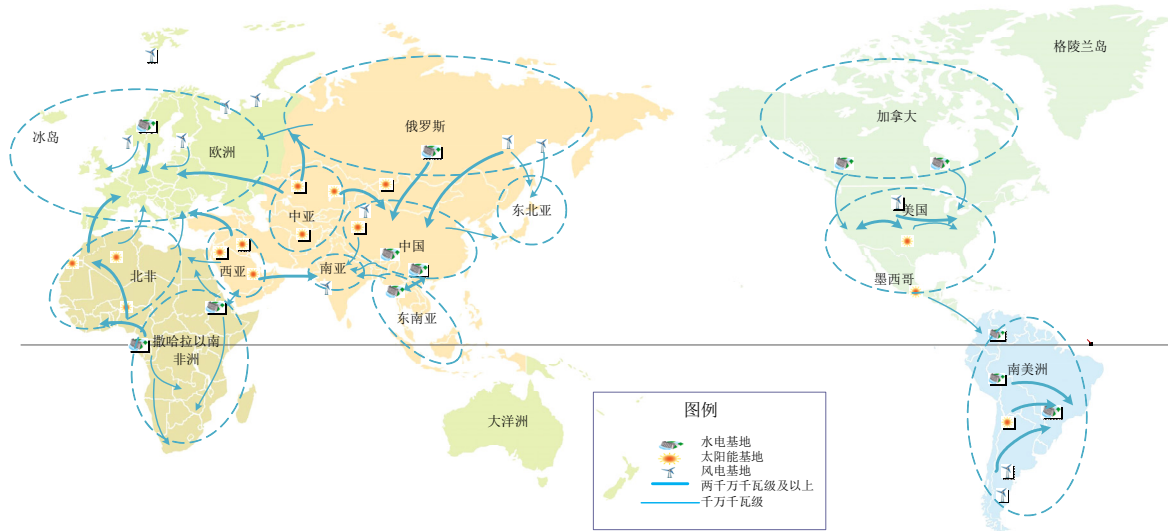


图 5 2050 全球电力流预测

Fig. 5 Global electric power flow forecast in 2050

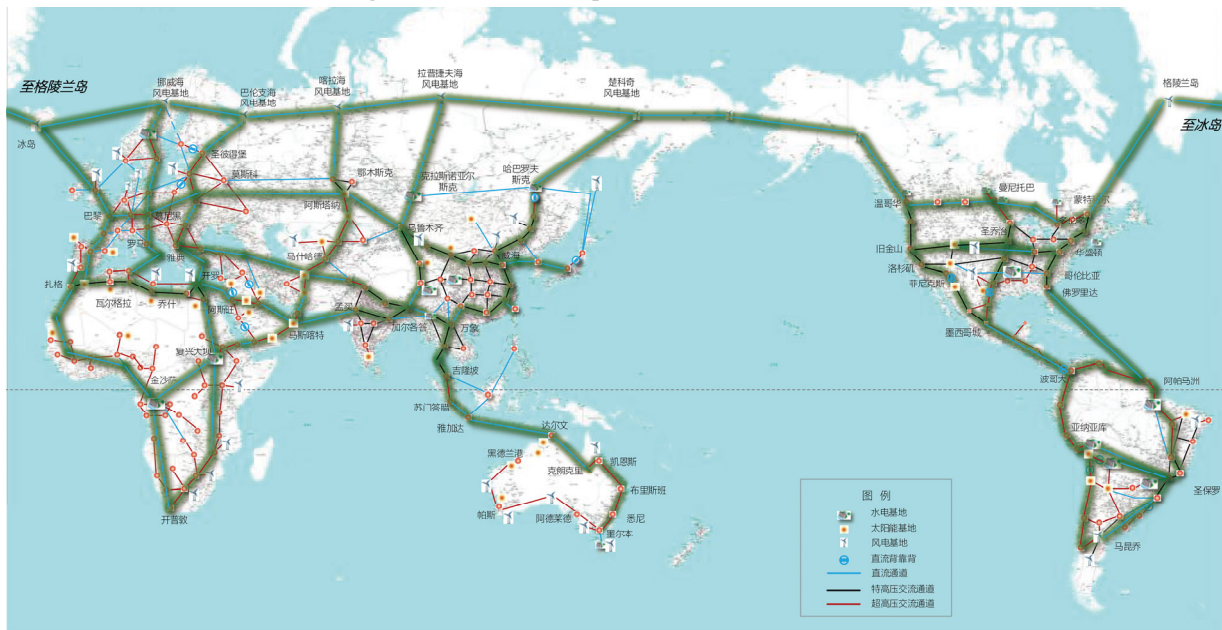


图 6 九横九纵骨干网架

Fig. 6 GEI backbone grid of 9 horizon and 9 verticals

2 构建全球能源互联网主要影响因素

2.1 高比例清洁能源

2.1.1 清洁能源比例

根据 2018 年 4 月 IRENA 发布的《全球能源转型：2050 路线图》报告，要实现《巴黎协定》

中“控制温度升高在 2℃ 之内”的要求，2050 年全球碳排放需控制在 97 亿 t/a。我国也制定了到 2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和的减排目标。发展高比例清洁能源系统是实现《巴黎协定》的重要途径，加快推进水电、风电、太阳能发电、

地热能发电、海洋能发电等清洁能源发展重要而紧迫。实现高比例清洁能源发展是生态文明建设的必然要求,同时也是构建现代能源体系的现实路径。

全球能源互联网场景下,电力逐渐成为终端能源消费的核心载体,呈现能源需求总量高、清洁能源程度高、电气化水平高的特点,2050年电能占终端能源消费比例增至50%左右,清洁能源发电装机占比达到83%(如图4所示),清洁能源发电量占总发电量比例超过80%。该场景能够以67%以上的概率实现《巴黎协定》2℃温控目标^[12-13]。

2.1.2 实施路径

实现高比例清洁能源系统主要分为3步^[14]。

第一步是实现纯清洁能源电力系统,即基于当前的电力系统,关停煤电机组,通过碳捕获和封存(carbon capture and store, CCS)技术改造部分气电机组,增加风、光等可再生能源发电比例,并增加核电等具有调节能力的机组,实现电力系统调峰。纯清洁能源电力系统中可以含有一定的碳排放量。全球能源互联网场景处于第一步阶段。

第二步是实现碳中和电力系统。该系统是由核电、可再生能源机组以及带有CCS的火电机组构成,该系统CO₂的净排放量为零甚至为负。实现碳中和系统,即关停所有天然气发电机组或对天然气发电机组全面配置CCS设备,使得系统自身的碳排放量降至零。

第三步是实现100%可再生能源电力系统,即在碳中和电力系统的基础上完全退出核电,并充分利用CCS和天然气合成技术来满足系统部分的储能及供电需求。

2.1.3 主要挑战及应对措施

高比例清洁能源电力系统面临的主要挑战是电力平衡问题。全球能源互联网场景下,清洁能源占比达到83%,为了解决功率平衡问题,可从以下2个方面考虑应对措施。

1) 在全球范围内挖掘可调节电源资源,并充分利用时区差、资源差,平衡功率缺额,发挥大范围资源优化配置优势。例如亚欧非联网可实现中非水电与北非太阳能互补调节,高效利用北非和欧洲国家的资源及负荷特性差异,实现非洲东

部和南部水电跨流域的季节性互济。此外,大力发展电动汽车等可充放负荷,推广负荷侧响应机制,使负荷波动跟踪清洁能源出力曲线,降低清洁能源波动性和间歇性对电力供应的影响。

2) 研发和利用物理、化学等多元化储能^[15-16]技术,构建云储能应用模式,在全球范围内共享储能资源,优化储能配置容量,提高效率。储能可为能源系统提供调节能力,确保能源生产与消费平衡,在保障用能安全的前提下,提升系统整体经济性水平,降低用能成本。随着共享储能规模逐渐增加,为了充分发挥共享储能的價值,构建云储能模式,将成为未来高比例清洁能源电力系统的新形态。云储能将综合利用集中式的储能装置或聚合分布式的储能资源,将储能资源集中到云端,统一调度、统一维护,用云端虚拟的储能容量以更低成本为系统提供调节服务。

2.2 联网络局和网络结构

2.2.1 广义骨干网架

从世界各国电网发展历程来看,都经历了单一送电线路、小规模区域电网、区域互联电网的过程,而跨区电网互联也体现出由单节点单回路互联向多节点多回路互联转变的过程^[17],而在这一过程中,跨区输电容量、电压等级、输电距离都得到全面提升。

在本文所述未来场景中,考虑全球范围内清洁能源大范围配置情况下,从总量上看,未来亚洲将是电力需求最大地区,北美洲、欧洲、非洲是电力需求较高地区。从清洁能源资源看,亚洲、非洲、北美洲资源丰富,未来亚洲和非洲是主要的能源电力输出地区,欧洲、北美洲将是受电地区。表1所示为全球能源互联网场景下2050年跨区电力流规模。

单节点单回路区域联网显然不能实现如此巨大的功率传输。只有综合考虑地理条件、输电距离、输电容量等因素,采用不同电压等级和容量的特高压交直流输电技术,以特高压交直流为主构建覆盖洲际、洲内的多节点、多回路骨干网架,叠加于现有各国区域电网之上,才能建立起远距离、大容量、功率灵活交换的新能源优化配置电网,实现跨洲广域能源互联互通。

表 1 全球能源互联网场景下 2050 年跨区电力流

Tab. 1 GEI scenario electric power flow across-area in 2050

序号	送端地区	受端地区	容量/GW
1	北海、北极、北欧	欧洲大陆	71
2	北非	欧洲	59
3	中非、东非	南非、北非	70
4	中亚	欧洲	20
5	中亚	中国、俄罗斯	69
6	西亚	南亚、欧洲	75
7	西亚	非洲	19
8	俄罗斯	东南亚	24
9	俄罗斯	中国	46
10	中国	东北亚	24
11	中国	东南亚	27
12	美国中部	美国东西部	110
13	北美洲	南美洲	10
14	秘鲁、玻利维亚、阿根廷、智利	巴西	50

然而，与常规电网不同的是，图 6 中的骨干网架并非由单个变电站节点和输电线路构成的传统意义的骨干网架，而是广义骨干网架。广义骨干网架是由广义线路和广义节点构成的，代表电力输送主通道和整体拓扑关系的网架。其中广义线路不同于当前电网中具体网架回路，而是指全球范围内大区域之间不同节点间存在的骨干输送通道，是进而形成更大规模网格化能量输送拓扑结构的线路集合。广义节点不同于当前电网中具体的变电站或者母线节点，而是区域性的、成规模、成网络级别的节点，是某一地区内单个节点或者具有电气联系的多节点构成的集合，描述的是广义线路落点区域。

2.2.2 分层分区网络结构

合理的电网结构是保障电网安全稳定运行的基础。《电力系统技术导则》中明确规定，电网结构应坚持科学分层分区、合理控制短路电流、各电压等级及交直流相互协调等基本原则^[18]。在这一原则指导下，近年来我国电网安全稳定水平大为提升，基本杜绝了大面积停电事故，验证了这一原则的正确性。

分层是指按网络电压等级和传输能力由上至下划分为若干结构层次，不同容量的负荷和电源分别接入适应层级电网中。分区是指送受端明确的电网分区结构，并非地理上的分区^[19]。

全球能源互联网场景下，分层分区仍是保证电网合理结构以及安全稳定的基本原则^[20-21]，图 7 为全球能源互联网分层结构示意图。

1) 全球能源互联网广义骨干网架为最高层级的电力汇集、输送网架，承担全球大规模清洁能源基地与主要负荷中心和枢纽中心的联网，实现全球时空互济，主要采用特高压交直流输电技术。

2) 区域交直流混联大电网主要负责接纳广义骨干网架输送的功率，并实现核心负荷区域电力分配，有效平滑负荷与可再生能源出力，提高输电效率。

3) 地区交直流配电网实现分布式清洁能源的接入和向各类负荷供电。

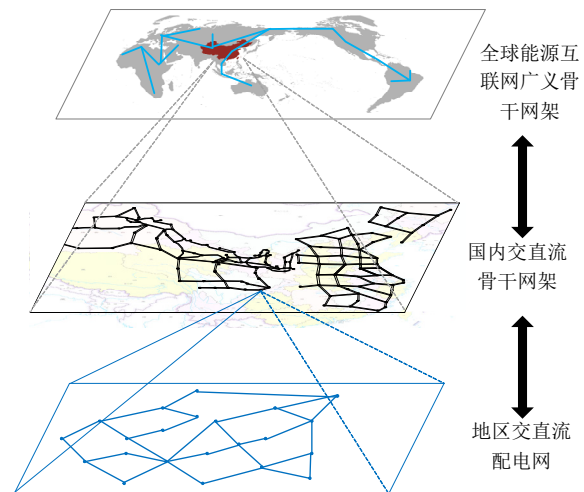


图 7 全球能源互联网分层结构示意图

Fig. 7 GEI laying structure

2.3 运行控制措施

全球能源互联网场景下，未来电网覆盖全球，清洁能源具有间歇性与波动性，需要电网具备跨时空互济、超大范围功率平衡调节等能力，同时，高比例清洁能源和高比例电力电子化对电力系统的稳定特性也产生巨大影响，这对电网调控能力提出挑战，需要利用智能调度、运行控制、信息通信等方面的新技术提升电网智能化运行控制水平，提高大电网运行与控制的驾驭能力，保障大电网安全可靠、经济环保运行。

1) 智能调度技术。全球能源互联网是电力规模化集中汇集、远距离跨洲传输、大范围灵活配置的基础平台，具有接入电源类型多元、设备类型多样、地域覆盖广泛等结构特征，输送容量大，

潮流波动频繁,扰动行为复杂,对电网运行全局态势感知能力、快速精确分析能力、新型电力设备的灵活控制能力、大规模可再生能源接纳能力提出了更高的要求和挑战。因此,需要研究包含电网运行多源数据智能采集、电网理想运行方式智能生成以及电网调度控制智能诊断与评估的智能调度技术。

2) 安全稳定控制技术。随着跨国跨洲互联的推进,电网动态行为时间尺度跨度大、动态特性交互影响显著,区域电网之间故障传导范围增大,高比例新能源对电网运行控制影响加剧,且外部环境多变,极端灾害天气频发,电网运行特性将更为复杂。因此,需要加强未来电网安全稳定防御体系的构建,包括安全稳定在线评估、智能电网裕度在线评估、广域自适应系统保护以及基于响应的系统稳定性判别等技术。

3) 电网通信与大数据技术。多节点多回路交直流混联电网的运行控制以实时通信为基础,信息通信的保密性对电网安全运行具有重要意义。由于量子通信的不可破译性,其可以作为未来全球能源互联网的通信加密手段。在电网洲际互联的趋势下,电网将呈现出更加复杂的随机特性、多源大数据特性及多时间尺度动态特性,大电网扰动冲击范围及协调控制难度极大。因此要实现全球能源互联电网的智能分析和控制,需要全面依托大数据处理技术,建立信息驱动的全球能源互联电网态势感知与智能控制模式,实现主动式全景安全防御。

2.4 国别政治等影响因素

能源问题是人类共同面对的问题,构建全球能源互联网需要全球各国的共同努力,不是依靠单一技术、单一国家、单一机制就能够解决的,在很多时候,非技术经济性因素往往成为影响进程和结果的决定性因素。过去几十年,在国际组织、各国政府和国际社会的不懈努力下,全球已经形成以《联合国气候变化公约》《巴黎协定》等为核心的全球气候环境治理体系,国际能源电力相关标准和互联工程项目也有了一定的发展。但构建全球能源互联网仍然面临发展思路、发展模式、实施方案、合作机制、技术推广等一系列难

题和制约,不同国家的政治体制、意识形态、法律规范等都是影响全球能源互联网建设的不确定因素,亟待全球共同应对和系统解决。为此,需要全球各国形成共识,秉持人类命运共同体理念,支持全球能源互联网建设。

3 关键技术及展望

3.1 大容量远距离输电技术

特高压及柔性输电等大容量远距离输电技术是构建全球能源互联网广义骨干网架的关键技术,具有输电距离远、容量大、损耗低、效率高、灵活稳定的特点。

3.1.1 特高压交流输电技术

特高压交流输电工程已经在中国成功运行,该技术在大规模能源基地远距离输电场景及跨大区骨干电网构建方面具有巨大优势。为满足超大规模电网互联及输电需求,特高压交流输电技术将向低损耗、环境友好、智能化等趋势发展。重点需要在输电系统优化设计、高可靠性、灵活性提升、经济性提升、适应全球各种极端气候条件等方面开展研究,如特高压交流紧凑型同杆并架技术和可控串补技术,适用于极端天气的特高压变压器、空气绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)和互感器等应用技术等。

3.1.2 特高压直流输电技术

为满足全球能源互联网超大容量和超远距离输电需求,特高压直流输电技术在输电距离、容量、拓扑及关键设备等方面需进一步提升和改进,以适应全球大规模清洁能源配送,适应全球极寒、极热和高海拔等各种极端气候条件,包括开发新型基础器件、更灵活可靠的拓扑结构及相应控制保护系统等。未来特高压直流将进一步向更高电压($\pm 1500\text{kV}$)、更大容量(20GW)、特高压混合直流、特高压柔性直流等方向发展,并需具备在全球极寒、极热和高海拔等各种极端气候下运行的技术和设备条件,重点突破更高电压等级、更大容量的换流阀、换流变、套管等核心装备,发展特高压交直流协调控制技术、混合直流协调控制技术、广域直流电网控制技术,在充分发挥特高压直流输电技术优势的同时降低直流系统故障概

率，保障大电网运行安全。

3.1.3 特高压海底电缆

预计未来 30 年，亚洲、欧洲、北美洲和非洲跨海工程总输送距离将分别达到 5 800、6 600、1 090、1 526 km，总容量分别达到 94、67、24、24 GW，其中大部分工程输送容量需达到 4 000~8 000 MW，部分输送距离可达 2 000~3 000 km，当前超高压直流海缆在技术上已经很难满足未来需求，因此亟需发展±800 kV 及以上特高压直流海缆技术。经济性方面，目前±(200~600)kV 超高压直流海缆双极造价大约为 100~260 万美元/km，是同等级架空线造价的 5~10 倍，仍处于较高价位。但同时，随着电压等级和导体截面的提升，直流海缆单位容量造价呈下降趋势，因此未来特高压大容量海缆将比超高压海缆更具经济性，将具有较好的发展前景。为实现特高压级海缆，未来需要在绝缘材料、导体形式、生产工艺、施工技术和运维技术等方面进一步提升，确保海缆电气性能和运行可靠性。表 2 所示为全球能源互联网骨干网架重点工程。

3.1.4 管道输电

管道输电系统是采用气体绝缘、金属外壳与导体同轴布置的电力传输系统，具有高安全性、可靠性和环境兼容性，适用于复杂多变的地理环境，可保持环境原貌、减小土地占用，例如高海拔山地，河谷、江河等大跨越。未来全球能源互联网建设将遇到各种复杂应用场合，对于管道输电技术的需求也会越来越多。基于管道输电技术应用场合的特殊性，其进一步发展主要技术难点包括特高压管道、断路器等气体绝缘输电线路(gas insulated line, GIL)核心设备可靠性的进一步提高，更环保的绝缘气体的研发，以及相关施工技术的完善。

3.2 储能技术

当前储能方式主要分为机械储能、电化学储能、电磁储能、储热和化学储能(如氢储能)等。储能技术未来整体上朝着大容量、高安全、长寿命、低成本的方向发展^[22-23]。

3.2.1 机械储能

机械储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、

表 2 全球能源互联网骨干网架重点工程

Tab. 2 Important projects of GEI backbone grid

序号	通道	重点工程
1	亚欧互 联通道	中国—韩国—日本、中国—缅甸—孟加拉、 俄罗斯—中国等直流工程
		哈萨克斯坦—中国、沙特—印度、哈萨克斯坦—德 国、沙特—土耳其等±800 kV、±1 100 kV 直流工程
2	亚欧非 通道	北欧—欧洲大陆、挪威—英国—法国等 ±800 kV 柔性直流工程
		摩洛哥—西班牙、法国，突尼斯—意大利，埃及— 塞浦路斯—希腊，刚果金—尼日利亚、加纳，埃塞 俄比亚—埃及、莫桑比克等多回±800 kV 直流工程
3	美洲互 联通道	沙特—埃及、沙特—埃塞俄比亚±800 kV 直流工程
		摩洛哥—阿尔及利亚—利比亚—埃及 1 000 kV 交流工程
4	北极能 源通道	北美—中美—南美±1 100 kV 特高压直流工程
		犹他州—堪萨斯州—芝加哥、 圣路易斯等多回±800 kV 直流工程
4	源通道	围绕北美东部、西部负荷中心建设 1 000 kV 交流同步电网
		智利、阿根廷—巴西，秘鲁、 玻利维亚—巴西等多回±800 kV 直流工程
4	源通道	格陵兰岛—冰岛—英国、鄂霍茨克海—中国、 萨哈林岛—日本等特高压直流工程

飞轮储能等。

抽水蓄能关键技术主要包括抽水蓄能电站主要参数的选择、工程地质技术以及抽水蓄能机组技术等。主要目标是实现单机容量 400~500 MW 机组和高水头大容量机组的规模化。

压缩空气关键技术主要集中在压缩机、膨胀机、储气设备、储热装置研发。主要目标是系统效率提升至 70%~80%，实现百兆瓦级超临界压缩空气储能系统的工程示范与产业化。

飞轮储能关键技术在于高速、高储能密度飞轮，高可靠性、长寿命、低损耗轴承，高速电机及其控制系统等。主要目标是大幅降低成本，实现兆瓦级飞轮系统的商业化应用。

3.2.2 电化学储能

电化学储能主要包括锂离子电池、铅碳电池、液流电池等。

锂离子电池的关键技术主要包括电池组可靠性与一致性技术、高能量密度与高功率密度锂电池规模生产技术和高性能正负极材料及安全电解液制备技术等^[24-25]。锂离子电池的主要目标是能

量密度提升至 350~400 W·h/kg, 循环次数达到 8 000~10 000 次, 实现吉瓦级锂离子电池储能系统的商业化应用。

铅碳电池关键技术主要包括正负极与栅板材料技术、活性材料的利用率技术、电池单体间一致性技术等。主要目标是循环次数提升至 4 000~5 000 次, 实现百兆瓦级高性能铅碳电池在分布式微网、可再生能源并网领域商业化应用。

液流电池关键技术主要包括高稳定性电解液制备技术、高选择性低成本离子交换膜制备技术、高反应活性电极制备技术等。主要目标是能量密度提升至 20~25 W·h/kg, 系统效率提升至 85%, 实现吉瓦级全钒液流电池储能系统商业化应用。

3.2.3 电磁储能

电磁储能主要包括超级电容器和超导储能。

超级电容器关键技术主要包括电极材料及电解质溶液关键材料技术、电压均衡技术等。主要目标是突破长循环寿命超级电容器单体技术以及大容量超级电容器串并联成组技术, 开展兆瓦级超级电容器的工程示范及推广应用。

超导储能关键技术主要包括用于产生超导态低温条件的冷却装置、研究超导磁体的失超保护等, 开发大型高温超导储能装置及挂网示范运行。

3.2.4 储热

储热关键技术主要集中在大容量高温储热材料、分布式储热系统及高温储热大规模应用、热电综合管理平台等方面^[26]。主要目标是进一步开发低成本、高寿命、高性能的混凝土、陶瓷、熔盐、复合储热材料, 优化换热器、聚光镜、吸热器等关键部件设计, 突破大容量高温显热储能的动态热管理技术瓶颈, 提高发电和输电系统的可靠性。

3.2.5 氢储能

氢储能关键技术主要包括太阳能光解制氢、热分解制氢及高温电化学制氢技术, 基于高温固体氧化物膜的高温氢储能技术、碳纤维复合材料与储氢罐设备, 燃料电池为主的氢发电技术^[27-28]等, 未来需要重点在可再生能源大规模制氢、存储、运输一体化方面开展研究, 实现加氢站现场储氢、制氢模式标准化和推广应用。

3.3 清洁能源发电及并网技术

3.3.1 清洁能源发电技术

当前清洁能源发电技术主要包括水力发电、风力发电和太阳能发电等方面, 各技术均取得了较大发展, 成为清洁能源发电的主流技术, 但是随着全球能源互联网的构建, 复杂应用场景对技术提出了更高要求, 未来技术发展趋势如下^[29-40]。

1) 水力发电技术。大型混流式水轮机、用于高水头水电资源开发的冲击式水轮机和用于电力系统调峰的变频调速抽蓄机组的设计、研发和制造技术是未来发展重点。

2) 风力发电技术。叶片结构设计、叶尖速设计、叶片材料和分段式叶片技术, 海上风机基础结构选择和结构模态分析、桩基设计、载荷计算和疲劳分析等技术是未来发展重点。

3) 光伏发电技术。降低光损失、载流子复合损失和串并联电阻损失, 研究制造新型多 PN 结层叠电池, 提升极低温/强辐射等恶劣环境下光伏组件的性能和寿命是未来发展重点。

4) 光热发电技术。改进和创新集热场的反射镜和跟踪方式, 研发和选取高性能传热介质, 提高系统运行温度是未来发展重点。

3.3.2 清洁能源调峰措施及电网友好型技术

1) 调峰措施。一是可以通过优化具有调节能力的发电机组占比, 提高系统的调峰能力, 例如抽水蓄能、光热、地热、核电、带 CCS 的燃气机组等; 二是提高新能源机组的预测精度, 并根据预测结果进行优化调度, 安排开机方式; 三是增加分布式可再生发电比例, 推动分布式能源参与配电网层面的电力交易, 调动用户侧灵活性, 以减弱分布式发电的不确定性影响。

2) 清洁能源电网友好型技术。主要有故障穿越技术(低电压/零电压穿越、高电压穿越)、自动发电和电压控制技术、惯量支撑技术、电磁振荡抑制技术等。目前研究的重点是惯量支撑技术和宽频振荡抑制技术。惯量支撑技术中的虚拟同步技术具有一定的发展基础, 容量达到兆瓦级别, 并且已应用于工程实践, 未来需要进一步提升控制系统性能和容量水平, 尤其是储能技术的需求会越来越高。

4 结论

1) 在清洁能源发电占比超过 80%情况下, 通过构建全球能源互联网可实现大范围资源配置, 但仍需要保留一定容量水电、核电、天然气发电、太阳能光热发电等可调节电源, 以满足电力平衡需求, 通过研发和利用储能技术, 大力发展电动汽车等可充放电负荷, 推广需求侧响应机制等措施, 提高系统灵活性。

2) 全球能源互联网骨干网架是广义骨干网架, 描述的是电力输送的主要通道, 而非常规意义的电网网架。该广义骨干网架满足分层分区原则, 清洁能源基地接入骨干网架方式可保证系统安全稳定运行。

3) 全球能源互联网场景下, 电网调控能力面临挑战, 需要智能调度、运行控制、信息通信等方面的新技术, 提升电网智能化运行控制水平, 提高大电网运行与控制的驾驭能力。同时, 全球各国政治体制和法律规范等非技术因素也是影响全球能源互联网构建的关键因素, 需要引起足够重视。

4) 构建全球能源互联网, 将进一步带动技术创新, 未来需要在特高压输电、储能、清洁能源发电及电网友好型等关键技术方面进一步突破, 进而实现大规模清洁能源的高效开发、输送和利用, 最终实现人类社会可持续发展。

参考文献

- [1] World Bank . State of electricity access report [R]. Washington, DC: World Bank, 2017.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网研究与展望[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 152-159.
LIU Z Y. Research and prospect of global energy internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 152-159.
- [3] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 126-135.
LIU Z Y. Global energy Internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 126-135.
- [4] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 5103-5110.
LIU Z Y. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 5103-5110.
- [5] 杨英仪. 面向能源互联网的数据一致性框架[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 22-28.
YANG Y Y. A data consensus framework for energy internet[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 22-28.
- [6] 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 J, SONG F L, YU X X. Research on global energy interconnection backbone grid planning[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 527-536.
- [7] 张士宁, 杨方, 陆宇航, 等. 全球能源互联网发展指数研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 537-548.
ZHANG S N, YANG F, LU Y H, et al. Research on global energy interconnection development index [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 537-548.
- [8] 杨青润, 丁涛, 文亚, 等. 计及碳排约束的跨国电力互联网新能源消纳分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 1-6.
YANG Q R, DING T, WEN Y, et al. Analysis on renewable energy integration in transnational power interconnection considering carbon emission constraints[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 1-6.
- [9] 丁军策, 许喆, 陈玮, 等. 南方区域与东南亚国家的跨国电力交易模式设计[J]. 广东电力, 2020, 33(6): 20-27.
DING J C, XU Z, CHEN W, et al. Design of cross-border power trading mode between southern region and Southeast Asia[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(6): 20-27.
- [10] 焦瑞浩, 丁剑, 任建文, 等. 适应大规模清洁能源并网和传输的未来新型直流电网研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 9-18.
JIAO R H, DING J, REN J W, et al. Future new DC power grids for large-scale clean energy integration and transmission[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 9-18.
- [11] 吴明哲, 陈武晖. VSC-HVDC 稳定控制研究[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 28-39.
WU M Z, CHEN W H. Overview of research on stability and control of VSC-HVDC[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 28-39.
- [12] 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 F X, ZHANG S N, ZHAO Z J, 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.
- [13] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 115-119. Global Energy Internet Development Cooperation Organization. *Global energy internet research* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 115-119.
- [14] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建100%可再生能源电力系统综述与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(6): 1843-1855. WEN Y F, YANG W F, WANG R H, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1843-1855.
- [15] 全球能源互联网发展合作组织. 大规模储能技术发展路线图[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2020. Global Energy Internet Development Cooperation Organization. *Development roadmap for large-scale energy storage technology*[R]. Beijing: Global Energy Internet Development Cooperation Organization, 2020.
- [16] 国网能源研究院. 2019 中国储能产业现状分析与展望蓝皮书[R]. 北京: 国网能源研究院, 2019. State Grid Energy Research Institute. *2019 China energy storage industry current situation analysis and prospect blue book*[R]. Beijing: State Grid Energy Research Institute, 2019.
- [17] 方金涛, 龚庆武. 考虑需求响应并计及液流电池动态特性的主动配电网系统储能优化配置[J]. *智慧电力*, 2019, 47(11): 1-8. FANG J T, GONG Q W. Optimal allocation of energy storage system in active distribution network considering demand response and dynamic characteristics of VRB[J]. *Smart Power*, 2019, 47(11): 1-8.
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统技术导则: GB/T 38969—2020 [S]. 中国电力企业联合会, 2020. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. *Technical guidelines for power systems: GB/T 38969—2020*[S]. China Electricity Council, 2020.
- [19] 宋云亭, 郑超, 秦晓辉. 大电网结构规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 78-85. SONG Y T, ZHENG C, QIN X H. *Large power grid structure planning*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 78-85.
- [20] 能源革命中电网技术发展预测和对策研究项目组. 能源革命中电网及技术发展预测和对策[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 128-131. Power Grid Technology Development Forecast and Countermeasures Research Project Team in Energy Revolution. *Forecast and countermeasure of power grid and technology development in energy revolution* [M]. Beijing: Science Press, 2015: 128-131.
- [21] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5000-5008. ZHOU X X, LU Z X, LIU Y M, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5000-5008.
- [22] 黄旭祥, 韩学山, 李家维, 等. 大电网储能与各类电源协同规划[J]. *分布式能源*, 2019, 4(5): 67-74. HUANG X X, HAN X S, LI J W, et al. Coordinated planning of energy storage and various power sources in large power grid[J]. *Distributed Energy*, 2019, 4(5): 67-74.
- [23] 罗庆, 张新燕, 罗晨, 等. 新能源发电中储能综合利用的优化评估[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 51-55. LUO Q, ZHANG X Y, LUO C, et al. Optimal evaluation of energy storage comprehensive utilization in new energy generation[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 51-55.
- [24] 张明霞, 闫涛, 来小康, 等. 电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径[J]. *电网技术*, 2018, 4(11): 1370-1377. ZHANG M X, YAN T, LAI X K, et al. Technology vision and route of energy storage under new power grid function configuration[J]. *Power System Technology*, 2018, 4(11): 1370-1377.
- [25] 刘洋, 陶风波, 孙磊, 等. 磷酸铁锂储能电池热失控及其内部演变机制研究[J/OL]. *高电压技术*: 1-9[2021-01-26]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200355>. LIU Y, TAO F B, SUN L, et al. Research of thermal runaway and internal evolution mechanism of lithium iron phosphate energy storage battery[J/OL]. *High Voltage Engineering*: 1-9[2021-01-26]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200355>.

- [26] 梁立晓, 陈梦东, 段立强, 等. 储热技术在太阳能热发电及热电联产领域研究进展[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 8-15.
LIANG L X, CHEN M D, DUAN L Q, et al. Research progress of thermal energy storage technology in solar thermal power generation and combined heat and power generation[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 8-15.
- [27] 刘金朋, 侯焘. 氢储能技术及其电力行业应用研究综述及展望[J]. 电力与能源, 2020, 41(2): 230-233.
LIU J P, HOU T. Review and prospect of hydrogen energy storage technology and its application in power industry[J]. Power & Energy, 2020, 41(2): 230-233.
- [28] 黄格省, 阎捷, 师晓玉, 等. 新能源制氢技术发展现状及前景分析[J]. 石化技术与应用, 2019, 37(5): 289-296.
HUANG G S, YAN J, SHI X Y, et al. Development status and prospect analysis of hydrogen production with new energy technology[J]. Petrochemical Technology & Application, 2019, 37(5): 289-296.
- [29] 潘熙和, 聂伟, 程玉婷, 等. 特大型多喷嘴冲击式水轮机调速系统研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(6): 146-152.
PAN X H, NIE W, CHENG Y T, et al. A speed regulation system of extra-large multi-nozzle impulse turbine[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(6): 146-152.
- [30] 任尚洁, 刘思靓. 大型轴流转桨式水轮机桨叶操作机构有限元联合分析[J]. 华电技术, 2019, 41(1): 17-20.
REN S J, LIU S L. Finite element conjoint analysis of the blade operating mechanism for large Kaplan turbine [J]. Huadian Technology, 2019, 41(1): 17-20.
- [31] 刘文进. 大型变转速抽水蓄能发电电动机核心技术综述[J]. 上海电气技术, 2012, 5(3): 40-47.
LIU W J. Summary of key technologies for large-scale variable speed pumped storage power motor-generation [J]. Shanghai Dianqi Jishu, 2012, 5(3): 40-47.
- [32] 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 Y F, CHEN C, LIANG L Z. Modeling and control of wind-hydrogen coupling system based on electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 7-14.
- [33] 秦志文, 杨科, 王继辉, 等. 分段式风电叶片研究进展和发展趋势[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(1): 101-105.
QIAN Z W, YANG K, WANG J H, et al. Research progress and development trend of sectional wind turbine blades[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(1): 101-105.
- [34] 王伟, 杨敏. 海上风电机组基础结构设计关键技术问题与讨论[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 242-248.
WANG W, YANG M. Review and discussion on key technologies in foundation design of offshore wind power[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 242-248.
- [35] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3006.
WANG B, YANG D Y, CAI G W. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006.
- [36] 孙旻, 张大, 余愿, 等. 计及投资方收益与主动配电网管理的分布式光伏电源规划[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 56-62.
SUN M, ZHANG D, YU Y, et al. Planning of distributed photovoltaic generations considering investor benefits and active distribution network management [J]. Smart Power, 2020, 48(9): 56-62.
- [37] 姜齐荣, 王玉枝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7200.
JIANG Q R, WANG Y Z. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7200.
- [38] 黄慧, 冯相赛, 钱伟峰, 等. 光伏组件耐极端气候环境性能的研究综述[J]. 太阳能, 2020, 314(6): 1-5.
HUANG H, FENG X S, QIAN W F, et al. Review of performance research of PV modules in extreme climate[J]. Solar Energy, 2020, 314(6): 1-5.
- [39] 朱建坤. 太阳能高温熔盐传热蓄热系统设计及实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
ZHU J K. Design and experimental study of heat transfer and storage system of solar high-temperature molten salt[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [40] 顾煜炯, 耿直, 张晨, 等. 聚光光热发电系统关键技术研究综述[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 6-13.
GU Y J, GENG Z, ZHANG C, et al. Review on key

technologies of concentrating solar thermal power generation systems[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 6-13.

收稿日期: 2020-10-28。

作者简介:



申洪

申洪(1971), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电网新技术应用和新能源并网, hong-shen@geidco.org;



周勤勇

周勤勇(1977), 男, 博士, 教授级高级工程师。主要研究方向为电网规划技术、电力系统安全稳定控制, qyzhou@epri.sgcc.com.cn;



刘耀

刘耀(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析、高压直流输电、柔性输电及新型输电技术应用, yao-liu@geidco.org;



孙蔚

孙蔚(1982), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为风电接入电力系统稳定性分析、风电机组建模与控制、直流电网运行与控制技术、清洁能源资源评估与宏观选址、清洁能源发电技术经济性, wei-sun@geidco.org;



贺庆

贺庆(1980), 男, 博士, 研究方向为电力运行控制、大停电事故防御, qing-he@geidco.org;



任大伟

任大伟(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析、规划和控制、电力系统储能等, dawei-ren@geidco.org;

(责任编辑 辛培裕)