

# 西非可再生能源发展现状及并网技术分析

罗魁

(新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

## Renewable Energy Development Status and Grid Integration Technology Analysis in West Africa

LUO Kui

(State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The power shortage in West Africa has restricted its economic development; accelerated renewable energy development and grid interconnections are the only ways to meet its future regional power demand. However, the lack of relevant grid planning and operation knowledge and experience have limited the further development and utilization of renewable energy in West Africa. To this end, an overview of the current status of power supply and power grid development in West Africa is provided, and the potential and distribution of renewable energy resources and related planning schemes are analyzed and summarized. With this contribution, the power context of West Africa and the technical barriers for the further integration of renewable energy into the grid are clearly identified. Furthermore, based on the current status of renewable energy development in West Africa and China's renewable energy grid integration experiences, tailored technical solutions and suggestions are described for renewable energy grid integration in West Africa, which provides a reference for the future power and renewable energy cooperation between China and Africa.

**Keywords:** West Africa; renewable energy; cross border interconnection; grid integration; experience sharing

**摘要:** 西非地区电力短缺, 制约了经济发展, 加快可再生能源发展及电网互联是满足未来区域电力需求的必经之路, 而相关并网规划和运行经验的缺乏, 限制了西非可再生能源的进一步开发与利用。为此, 详细梳理了西非电力供应及电网发展现状, 分析总结了西非的可再生能源资源潜力、分布以及相关的规划目标和方案, 从而明确了西非当前电力背景及西非可再生能源进一步并网发展的技术障碍。基于当前西非可再生能源发展的阶段及中国的可再生能源并网经验, 对比给出了适合西非可再生能源并网发展的技术方案和建议, 为未来中-非电力及可再生能源合作提供借鉴和参考。

**关键词:** 西非; 可再生能源; 跨国互联; 并网技术; 经验共享

## 0 引言

近年来, 非洲国家经济高速增长, 但电力基础设施不足、电网建设薄弱、电力供应难以保障等问题正逐渐成为制约发展的瓶颈。西非地区(包括贝宁、布基纳法索、科特迪瓦、几内亚、尼日利亚、加纳、冈比亚、多哥、塞拉利昂、塞内加尔、马里、几内亚比绍、尼日尔、利比里亚14个国家, 不包含佛得角)的通电率位列世界末尾, 2017年可用电人口仅占总人口的约52.3%, 农村居民仅有8%可获得电力供应<sup>[1]</sup>。该地区能源安全程度低、燃料价格不稳定、电力系统不可靠, 到2030年, 西非地区面临的主要挑战仍然是电力短缺及伴随的经济和社会发展问题<sup>[2]</sup>。

为解决能源普及问题, 不同国际组织和机构发起了众多倡议。2015年联合国大会通过可持续发展目标7(SDG7), 提出到2030年确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源。其推动的人人享有可持续能源倡议(SEforALL)致力于在全球普及现代能源服务, 提高可再生能源的获取和利用率<sup>[3]</sup>。同年非盟授权成立非洲可再生能源倡议(AREI)组织, 旨在推进非洲电力化和可再生能源在非洲的普及化, 提高能源的可及性和普惠性, 计划到2020年至少新增10 GW可再生能源装机, 到2030年新增300 GW<sup>[4]</sup>。国际可再生能源署(IRENA)在2016年提出西非清洁能源走廊倡议<sup>[5]</sup>, 旨在通过加速发展和优化利用区域内富足的可再生能源来满足西非快速增长的电力需求, 并推动其跨国交易。这一系列倡议为可再生能源在非洲大陆的发展夯实了基础。此外, 世界银行作为非洲地区重要的投资机构, 也为西非地区多个跨国互联电网项目

及可再生能源开发项目提供了资金和技术援助，有力支撑了可再生能源在西非地区的发展。全球能源互联网发展合作组织（GEIDCO）立足非洲可持续发展全局，提出构建非洲能源互联网，实现“电-矿-冶-工-贸”联动发展，为非洲经济社会协调可持续发展提供了新方案<sup>[6-7]</sup>。西非地区作为非洲能源互联网的重要组成部分，矿产资源和清洁能源资源丰富，加快该地区可再生能源大规模开发利用和电网互联互通，将有效缓解能源短缺问题，并带动矿产资源开发和深加工产业发展，从而促进西非地区清洁化、工业化、电气化和区域一体化发展。

在各项倡议之外，相关国际机构和高校也对西非地区未来可再生能源和电网发展规划进行了分析和研究。IRENA利用SPLAT-W中长期规划工具对西非各国制定的发展目标场景进行分析，指出非水可再生能源将成为西非新增装机的主要驱动力，到2030年其发电量占比将达到23%，其中光伏装机将超过20 GW<sup>[8]</sup>。布鲁塞尔大学和鲁汶大学的学者指出西非地区可再生能源的发展可满足未来60%的电力负荷，其中风/光和水电各占50%，而不需要新建储能电站<sup>[9]</sup>。芬兰拉彭兰塔工业大学（LUT）研究表明，在2050年前，通过“最佳政策情景”的逐步落地，光伏发电可满足西非经济共同体能源总需求的81%~85%，而电网互联互通有助于电力成本的进一步下降<sup>[10]</sup>。世界银行通过区域层面的电力规划研究表明，到2030年通过跨国互联交易共享低成本的太阳能发电，西非地区可以降低11%的发电费用，并避免5 GW的新增电源装机（相当于2030年6.5%的装机容量），体现了跨国互联电网对于推动可再生能源发展的重要性<sup>[11]</sup>。

由于西非数据可靠性不足、区域规划与国家规划不协同等问题，不同机构的研究和规划结论也不尽相同，但不同研究均表明可再生能源未来在西非有巨大的发展空间。在西非当前电力背景下，由于缺乏相关知识和经验，可再生能源的发展和接入将会给现有电力系统带来一系列技术问题。这些技术问题在中国可再生能源发展的不同阶段也曾面临，具有相似之处，通过相关经验的共享，可以为西非可再生能源并网规划和运行提供借鉴。

为此，本文首先详细梳理了西非电力供应和电网发展现状和背景，随后基于可再生能源资源分布和规划情况分析未来可再生能源及跨国电网的发展趋势，总结了当前西非地区可再生能源发电并网技术挑战，最后对比中国经验，基于西非电力背景，针对性

地提出了西非可再生能源并网规划和运行相关技术问题的建议。

## 1 西非电力概览

### 1.1 西非电源结构

截至2019年底，西非地区的装机容量为23 GW，可用装机容量为13.4 GW，2019年地区用电量达到69.7 GWh，最大负荷为10.9 GW<sup>[12]</sup>。其中采矿负荷占负荷需求的1/4左右，主要分布在几内亚等国，尼日利亚和加纳两国是区域电力需求中心，占总负荷的75%以上，在区域经济发展中处于重要地位。

西非的能源结构目前以化石能源为主，包括油、气、煤等，主要分布在尼日利亚等少数几个国家。水电是主要的可再生能源形式，目前只有少数国家建有光伏电站，未来非水可再生能源比例将会逐步提高。以2019年西非区域观察报告统计数据<sup>[1]</sup>及IRENA相关数据为例<sup>[8]</sup>，如表1所示，截至2017年底，西非地区总装机容量为22.9 GW，可再生能源装机（包括生物质能、水电、风、光）占比为23.8%（5.44 GW），其中水电占可再生能源装机容量的97%（5.28 GW），剩余的主要为光伏（160 MW）。

表 1 西非各国装机情况  
Table 1 Generation mix in West Africa

| 国家    | MW     |        |      |      |        |
|-------|--------|--------|------|------|--------|
|       | 装机容量   | 可用容量   | 水电   | 风光容量 | 最大负荷   |
| 贝宁    | 230    | 220    | 0    | 0    | 266.2  |
| 布基纳法索 | 331    | 278    | 30   | 33   | 296    |
| 科特迪瓦  | 2199   | 2199   | 879  | 0    | 1350   |
| 冈比亚   | 100    | 54     | 0    | 0.6  | 70     |
| 加纳    | 4337   | 4337   | 1561 | 22.5 | 2198   |
| 几内亚   | 731    | 731    | 504  | 0    | 334    |
| 几内亚比绍 | 21     | 5.5    | 0    | 0    | 0      |
| 利比里亚  | 53     | 32     | 0    | 0    | 230    |
| 马里    | 337    | 337    | 54   | 0    | 338    |
| 尼日尔   | 221.6  | 221.6  | 0    | 0    | 215    |
| 尼日利亚  | 13 300 | 5900   | 2128 | 0    | 9801   |
| 塞内加尔  | 732    | 732    | 0    | 104  | 610    |
| 塞拉利昂  | 110    | 110    | 48.4 | 0    | 110    |
| 多哥    | 221.3  | 185.5  | 77.3 | 0    | 224.3  |
| 总计    | 22 924 | 15 342 | 5281 | 160  | 16 042 |

在国家层面,由表1可以看出,尼日利亚的电源装机占有所有国家总装机的一半以上。不考虑尼日利亚、加纳和科特迪瓦3国,其他西非国家的平均装机容量为250 MW,有3个国家的可用装机容量甚至不足100 MW,在这样的装机容量背景下,接入波动性可再生能源(variable renewable energy, VRE)对本国电力系统冲击巨大。此外西非国家可用装机容量远低于总装机容量,主要原因在于常规机组发电能力受一次能源限制,燃料不足,缺口较大;同时电站设备运维能力较差,老化及故障比较严重,导致发电设备经常不可用。例如尼日利亚的并网装机容量约为13 GW,但可用装机容量只有6 GW左右。电力装机不足以及电力基础设施落后导致西非供电可靠性较差,经常性切负荷,很多国家电力公司的平均供电小时数只能达到80 h/月。同时供电可靠性不足导致越来越多的用户使用备用燃油、燃气发电机组,进而也提高了发电成本。

## 1.2 西非电网发展情况

西非各国除了加纳和尼日利亚具有较强的输配电网外,其他国家的电网基础设施较弱,电网主要分布在首都等大城市周围,偏远农村地区几乎没有联网。城市和农村的输电网建设差别很大,导致首都以外的地区供电可及性和可靠性较差。例如,尼日尔和塞拉利昂的农村供电率不足1%<sup>[13]</sup>。

电网覆盖不足之外,西非电网另外一个问题是输配电损耗较大。据统计,2017年西非输配电总体损耗达到39.5%,其中技术损耗在26.6%左右,另外12.9%为严重的偷电及电费收缴不足等导致的电力公司非技术损耗<sup>[1]</sup>。电力损耗大、依赖燃油燃煤发电等原因导致西非电力价格普遍偏高,平均达到0.25美元/kWh,是全

球平均电价的2倍以上,高于发达国家如美国的0.12美元/kWh,也远高于一些发展中国家,如印度的0.08美元/kWh<sup>[14]</sup>。特别是缺乏油气资源的国家电力价格更是达到世界前列,如利比里亚2016年平均电价达到0.49美元/kWh。电力价格过高阻碍了西非电力的普及。

此外,西非地区跨国电网和各国国内电网运行技术水平较低,缺乏调度自动化系统,手动调度较为普遍,输电容量限制比较严重,导致互联电网的频率控制、低频振荡问题突出。

西非跨国联网处于起步阶段,初步形成东部单回330 kV,西部单回225 kV的跨国输电通道。截至2018年底,共有9个国家互联,出于稳定性考虑,分为3个同步电网运行,分别为东部同步电网、中部同步电网和西部同步电网。其中东部同步电网包括尼日利亚、尼日尔和多哥/贝宁部分区域,中部同步电网包括加纳、科特迪瓦、布基纳法索、马里及多哥/贝宁部分区域,西部同步电网包括塞内加尔及马里部分区域。未联网的国家目前有5个,包括:利比里亚、塞拉利昂、几内亚、几内亚比绍、冈比亚。按照西非电力联营体(West Africa Power Pool, WAPP)的规划,未来所有国家都将会同步互联,输电线路长度达到6000 km,其近期规划的跨国互联情况如图1所示<sup>[15]</sup>。

如图2所示,西非在建比较重要的跨国输电线路包括:冈比亚河流域开发组织(The Gambia River Basin Development Organization, OMVG)输电线路,塞内加尔河流域开发组织(Senegal River Basin Development Organization, OMVS)输电线路,互联输电线路(Interconnection Coted'Ivoire-Liberia-Sierra Leone-Guinea, CLSG),海岸骨干输电线路(Coastal Backbone),北部核心输电线路(North-core),中部区域枢纽输电线路(Inter Zonal hub)。

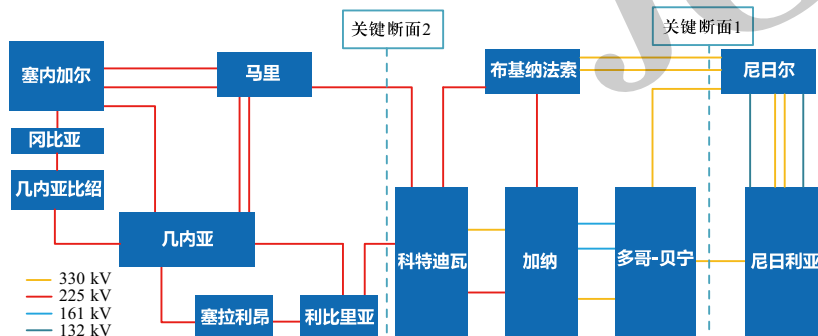


图1 西非近期规划跨国互联网络

Fig. 1 Short-term planning of cross border networks in West Africa



图2 西非在建跨国输电网络

Fig. 2 Cross border transmission line under construction in West Africa

海岸骨干输电线路是西非较为重要的一条输电线路，连接尼日利亚、贝宁、多哥、加纳及科特迪瓦，输电容量达到650 MW，电压330 kV，将为送出尼日利亚的水电、气电以及其他可再生能源服务。中部区域枢纽输电线路（布基纳法索、马里、科特迪瓦、加纳）和北部核心输电线路（尼日利亚、布基纳法索、尼日尔、贝宁）连接西非南部和北部地区，输电容量分别为320 MW和650 MW，将有助于北部国家非水可再生能源的送出，以及南部巨大的灵活电源调节能力和低成本电力的利用。CLSG（科特迪瓦、利比里亚、塞拉利昂及几内亚）电压为225 kV，输电容量为406 MW，建成后将成为4国之间的第一条互联线路，从而改变塞拉利昂、利比里亚和几内亚3国电网独立运行的状态，通过几内亚和科特迪瓦水电的外送，有助于降低塞拉利昂和利比里亚火电发电量及用电成本。同时CLSG将连接东部的海岸骨干输电线路及西部的OMVG-OMVS输电线路，进而形成从塞内加尔到尼日利亚的西非沿海输电走廊，是构建西非统一区域电力市场重要的一环<sup>[16]</sup>。

### 1.3 西非离网供电

城市和偏远地区电力的普及是西非经济社会发展的重要选项，目前西非偏远地区供电主要通过电网延伸和离网供电<sup>[17]</sup>两种方式，其中离网供电包括分布式可再生能源供电和微电网供电。

1) 通过电网建设来满足偏远地区电力需求，对大多数国家来说是一个长期的过程，同时电网公司比较担心末端电网的稳定问题，当前各国主要集中在保

证城市人口的供电问题上，偏远地区投资巨大的输电线路建设不是一个优先的选项。

2) 利用小型分布式可再生能源技术满足分散式住户用电需求，例如屋顶光伏、小型水电，这种供电方式在很多情况下比偏远地区常规发电方式便宜，是低收入家庭相对较容易获得的一种供电方式，也可为社区提供即时、经济的供电解决方案。

3) 利用柴油、可再生能源或者多种能源来发电的微电网可为家庭和企业提供电力，同时利用良好的商业模式解决投资成本、长期运维及能力建设等问题，这种为村庄和社区供电的离网方式在西非广泛存在。

可再生能源和混合能源小型电网为降低整个西非地区柴油发电成本提供了一种理想的解决方案。在现有的柴油供电微电网中加入可再生能源电力可以大大降低当地社区的燃料费用以及需要大量柴油补贴国家的柴油费用，同时延缓重要的基础设施投资（如电网建设和改造）。

在离网供电电源类型上，除光伏之外，小水电也是广泛应用的一种供电方式，特别是在水资源丰富的地区。与其他技术相比，小水电通常初始投资较高，但发电成本较低。小容量风电的发展前景在西非依然未知，不过可以作为小型电网发电的一种形式，与其他电源形成互补。例如在冈比亚，1台1.5 kW的风机安装在分布式光伏系统附近，形成一个混合风光抽水系统。

在技术层面之外，离网供电的灵活性能适应当地的社会、经济和地理条件，并在多方面使当地社区受益，例如健康、环境、性别平等以及经济增长等。虽然离网供电技术很成熟，但目前的问题是难以吸引



私人投资者参与，这是离网供电能否发挥作用的核心问题。

2 西非可再生能源发展

2.1 西非可再生能源资源分布与潜力

西非的化石能源分布较为集中，主要分布在东部地区，其中煤炭资源主要分布在尼日利亚和尼日尔，其他国家无煤炭资源，油气资源主要分布在尼日利亚。尼日利亚、贝宁、多哥、加纳沿海地区建有输气管道，可将尼日利亚天然气输送到其他国家。

西非地区拥有丰富的可再生能源，与化石燃料相比，可再生能源资源的分布要均匀得多，西非所有国家都有机会开发利用。据西非可再生能源及能效中心（ECOWAS Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency, ECREEE）估算，该地区大/中型水电资源开发潜力约为23.5 GW<sup>[18]</sup>，主要分布在沿海的5个国家，包括科特迪瓦、几内亚、利比里亚、尼日利亚和塞拉利昂。目前已开发约16%，还有约57%（13.4 GW）具有技术和经济可行性的水电已经列入相关规划，计划加以建设和利用<sup>[8]</sup>。相对于大/中型水电，西非地区的小水电也具备一定的开发潜力，不同机构的测算表明其开发潜力在3.1~8.7 GW之间<sup>[19-20]</sup>。除此之外，还有资源相对较差的水电约12 GW，未来可用于多种途径的开发。

在国家层面，如表2所示，尼日利亚的水电开发潜力占地区的将近一半。其他国家中，塞拉利昂和几内亚地理位置相邻，具有相同的水电潜力，但塞拉利昂主要为大/中型水电，而几内亚在所有水电规模上均具有较好的潜力，随着水电的逐步开发，其将成为一个水电大国。

表2 西非各国可再生能源开发潜力  
Table 2 Renewable energy potential in West Africa

| 国家    | MW             |                   |                   |      |        |
|-------|----------------|-------------------|-------------------|------|--------|
|       | 微型水电<br>(<1MW) | 小型水电<br>(1~30 MW) | 大/中型水电<br>(>30MW) | 风电   | 光伏     |
| 贝宁    | 5              | 90                | 239               | 322  | 3532   |
| 布基纳法索 | 1              | 16                | 10                | 9881 | 82 556 |
| 科特迪瓦  | 14             | 197               | 1580              | 2548 | 28 919 |
| 冈比亚   | 0              | 0                 | 0                 | 44   | 428    |
| 加纳    | 15             | 97                | 1041              | 2014 | 20 295 |
| 几内亚   | 524            | 1670              | 1980              | 2114 | 37 569 |

续表

| 国家    | 微型水电<br>(<1MW) | 小型水电<br>(1~30 MW) | 大/中型水电<br>(>30MW) | 风电      | 光伏        |
|-------|----------------|-------------------|-------------------|---------|-----------|
| 几内亚比绍 | 0              | 1                 | 97                | 101     | 1043      |
| 利比里亚  | 47             | 592               | 3164              | 192     | 2871      |
| 马里    | 6              | 50                | 1086              | 7962    | 298 812   |
| 尼日尔   | 0              | 3                 | 312               | 54 156  | 442 931   |
| 尼日利亚  | 678            | 3856              | 10 691            | 44 024  | 492 471   |
| 塞内加尔  | 1              | 4                 | 60                | 4531    | 37 233    |
| 塞拉利昂  | 140            | 499               | 3148              | 131     | 1885      |
| 多哥    | 27             | 186               | 73                | 73      | 2686      |
| 总计    | 1458           | 7261              | 23 481            | 128 093 | 1 453 231 |

在马里、尼日尔的西非北部沙漠地区以及尼日利亚的东北部地区，太阳能资源特别丰富，年峰值发电小时数可达1700 h<sup>[21]</sup>，但这些地区远离电网及负荷中心，需要输电线路配套建设才能送出。西非风电资源主要集中在北部及沿海的一些地区，包括塞内加尔、尼日尔、马里和尼日利亚在内的国家均有发展潜力，但受限于风电较高的技术要求，目前风电还未在西非地区大规模开发。根据IRENA的测算，当前西非可并网风电开发潜力为128 GW，可并网光伏发电开发潜力为1453 GW<sup>[22]</sup>。

西非已经开始利用其丰富的可再生能源潜力，根据ECREEE的规划，如图3所示，蓝色沿海地区为水电重点开发区域，北部塞内加尔、马里、布基纳法索、尼日尔将开发大型光伏电站，东部尼日利亚具有丰富的化石能源资源，火电依然是其能源结构中的重要部分。根据WAPP的电网规划，通过跨国输电线路建设，未来三大发电区域将共同满足西非的电力需求，北部光伏出力的波动性将通过整个西非区域进行互补互济。

西非可再生能源的分布将会改变西非地区未来的电力流向，随着水电的开发，一些当前电力受入国家将逐渐转变为电力外送国家，例如几内亚、塞拉利昂、利比里亚等。

2.2 西非可再生能源规划

西非地区拥有巨大的可再生能源潜力，开发可再生能源可以满足未来的电力需求，实现普遍的电力供应，同时支持该地区向低碳发展过渡。为推动可再生能源发展，2013年7月西非经共体（ECOWAS）制定了区域可再生能源发展政策<sup>[23]</sup>，该政策旨在将该地区



图3 西非可再生能源重点开发区域（来源：ECREEE）

Fig. 3 Key areas of RE development in West Africa (ECREEE)

电力结构中可再生能源的装机比例提高到2020年的35%和2030年的48%（如不包括大/中型水电，则分别为10%和19%），可再生能源发电量比例提高到2020年的23%和2030年的31%（如不包括大/中型水电，则分别为5%和12%），具体区域规划目标如表3所示。在制定区域发展目标之外，西非各国也制定了本国的相关政策，设定最低的可再生能源发展目标<sup>[24-25]</sup>。

表3 西非经共体可再生能源发展目标  
Table 3 Renewable energy targets in ECOWAS

|                           | 2020年   | 2030年   |
|---------------------------|---------|---------|
| 可再生能源发电装机/MW              | 2425    | 7606    |
| 峰值负荷/MW                   | 25 128  | 39 131  |
| 渗透率（不包括大/中型水电）            | 10%     | 19%     |
| 大中型水电/MW                  | 6370    | 11 177  |
| 渗透率（包括大/中型水电）             | 35%     | 48%     |
| 可再生能源发电量/GWh              | 8350    | 29 229  |
| 用电量/GWh                   | 155 841 | 243 901 |
| 可再生能源发电量占比<br>（不包括大/中型水电） | 5%      | 12%     |
| 大中型水电发电量/GWh              | 27 493  | 46 380  |
| 可再生能源发电量占比<br>（包括大/中型水电）  | 23%     | 31%     |

由于近年来可再生能源发电成本的急剧下降<sup>[26]</sup>和可再生能源发电装机的大幅增长，各国的可再生能源发展目标已远超当初规划，西非总体规划仍然在不同利益相关者的支持下进行修订，以达到更高的

可再生能源发展目标。2018年修订的西非地区总体规划中，规划装机容量在2033年达到95 GW，包括37.5 GW风电和光伏，12.7 GW水电。规划中可再生能源电量占36%，另外62%为燃气，2%为其他能源，并指出区域内跨国联网及输电线路建设是利用这些能源的前提<sup>[27]</sup>。

规划中同样指出电网的发展目标，在近期，保证西非14个国家区域内电力互联后系统的同步与稳定；在中期，提高VRE接入比例；在长期，保证互联系统满足N-1安全判据。此外还探讨了与佛得角、北非摩洛哥、中非电力联营体互联的可行性，其中与中非互联取决于大英加水电站的开发<sup>[28]</sup>。

世界银行估计通过低成本可再生能源的开发及电网互联电力交易，未来西非国家的电力价格将降低50%<sup>[14]</sup>。

IRENA的规划研究表明，到2030年，西非地区可以通过刚果（金）和喀麦隆受入超过30 TWh的水电来满足电力需求。一些国家目前是电力外送，但到2030年将成为电力受入国，包括尼日利亚和塞内加尔。对不同情景的分析表明，刚果（金）的大英加项目是西非未来电力前景的关键变量，如果没有它，将需要进一步开发太阳能和生物质能技术以满足电力需求<sup>[29]</sup>。

不同的规划均表明电力供应依然是西非经济发展的限制条件，加大电源建设和从其他地区受入电力是未来西非满足电力需求的两种形式。可再生能源，特别是光伏发电的比重在未来将会显著增大，而如何应对VRE的大规模接入对于西非电力系统是巨大的挑战。

3 西非可再生能源并网发展面临的技术挑战

到目前为止，VRE在西非装机比例中仍然很低，该地区的光伏发电装机容量约为160 MW，占可用总装机容量的1%左右。少数几个国家，如布基纳法索、加纳、冈比亚和塞内加尔具有光伏并网经验，同时也存在问题。

加纳和冈比亚两国光伏装机只有1%，并且接入配电网，对电网运行影响不大。布基纳法索33 MW的光伏电站接入输电网，通过与科特迪瓦的跨国互联电网平抑光伏出力波动性，在本国电网独立运行时，将限制光伏的出力来保证系统稳定。塞内加尔缺乏光伏出力预测系统，导致火电调峰时爬坡速率不足，未来将通过互联电网来解决这个问题。此外尼日利亚目前正在建的光伏电站都靠近水电站，通过多能协同互补运行来应对光伏出力的波动性。

通过调研发现，可再生能源并网规划和调度运行能力不足限制了西非可再生能源的进一步开发和利用，主要包括以下几个方面。

1) 电力系统规模较小。大部分国家的电源装机容量较小，跨国电网互联较弱，系统备用发电容量和无功功率不足。50 MW的光伏接入装机容量不足250 MW的系统和接入10 GW的系统中面临的并网运行技术挑战是完全不同的。不过当前西非国家接入的最大光伏电站容量仅在30 MW左右，但光伏电站装机容量过小，其开发利用的经济性则显不足。

2) 电网调度运行技术落后。西非大部分电网公司缺少现代化的电网调度自动化系统及适当的电网运行标准，例如欠缺AGC功能。因此在VRE渗透率为5%~10%的早期阶段，VRE接入对于具备调度自动化系统的电网来说不会存在问题，但对于西非电网落后的手动调度能力来说，其并网调度运行存在诸多困难。随着越来越多的西非国家发展光伏发电，电网公司意识到大量VRE并网所面临的技术挑战，并担心如果不对调度和运行控制系统进行投资和改造，可再生能源并网将会增加失负荷和系统故障的风险。

3) 设备及电站运维能力不足。西非地区电网运行人员对于可再生能源设备的知识和经验匮乏，运维能力不足，具有可再生能源设备和电站运维能力的本地利益相关者较少，导致后期可再生能源项目难以维护，效率降低或者损坏，降低发电能力。

4) 并网规划能力薄弱。最低成本发电规划是长期电源规划中很重要的一步，但西非地区本地大多数

公用事业部门（电力公司等）缺乏规划能力与工具，相关规划需要借助外部资源。到目前为止，该地区的光伏电站均是单方提议，其选址依据是接入变电站的容量及电网的接纳能力，保证光伏接入对系统的影响最小，缺乏系统级的整体规划。

4 西非可再生能源并网规划运行技术

VRE的波动性、部分不可预测性及电力电子设备的弱支撑性和低抗扰性增加了并网运行的难度。系统面临的挑战不仅取决于VRE的接入规模，更取决于系统的场景，如系统容量大小、电网建设情况、灵活性资源的获取以及并网运行实践经验等<sup>[30]</sup>。

表4列出了VRE并网的不同阶段特性<sup>[31]</sup>，结合西非VRE接入比例及各国电力背景，可认为西非地区整体可再生能源处于并网运行的早期阶段，即阶段1。但不同国家具体情况不同，分析并提出适合该阶段的可再生能源并网技术，可以降低可再生能源发电并网对系统的影响，提升系统运行的稳定性和可靠性。同时可以预见，西非未来VRE比例将大幅提升，并实现跨越式发展，为此，对比中国的经验，按照阶段需求程度并兼顾长远发展提出适合西非地区发展状况的可再生能源发电并网技术方案及建议，为西非可再生能源并网发展提供参考。

| 表4 VRE并网各发展阶段特性                                                |                 |                         |                              |                         |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Table 4 Attributes of VRE grid integration at different stages |                 |                         |                              |                         |
| 各发展阶段的特性（VRE比例不断增大）                                            |                 |                         |                              |                         |
|                                                                | 阶段1             | 阶段2                     | 阶段3                          | 阶段4                     |
| 系统层面特性                                                         | 对于电网不可见，作为“负”负荷 | 对于电网调度员可见               | 功率不平衡度加大，灵活性变得重要             | VRE在一定时间里出力占比很高，稳定性变得重要 |
| 对现有机组的影响                                                       | 负荷和净负荷之间差别不大    | 净负荷的波动性增加不大，常规机组运行模式有变化 | 净负荷的波动性显著增大，机组运行模式有较大改变，启停较多 | 所有常规机组都参与系统调节，以接纳VRE    |
| 对电网的影响                                                         | 并网点附近存在影响       | 潮流变化可能导致输电堵塞            | 潮流运行模式显著变化                   | 系统惯性减弱，故障恢复能力降低         |
| 面临的主要挑战                                                        | 本地电网运行状况        | VRE和负荷之间的平衡，运行监控        | 灵活性资源的获取                     | 系统承受扰动的能力               |

## 4.1 实时监控

VRE的实时监控对于电力系统的安全运行具有重要作用，特别是当VRE比例增加时，电网运行人员必须能够实时感知可再生能源出力并进行有效的控制。IEEE的1547系列标准对分布式电源并网提出了详细的技术要求，其中1547.3为对分布式电源并网监控的规定。IEC 61400-25系列标准也对风机并网监控的通信提出了要求。在中国，要求所有风电场和光伏电站都装有监测和控制系统，可以实时与调度中心进行通信，这些有助于提高其可控性，并为电网公司提供运行信息，保证系统运行安全。

由于VRE在渗透率较低时对系统的影响不大，因此VRE场站的可见性和可控性要求并未成为许多西非国家的优先事项，特别是VRE连接到配电网并且接入容量较小时。如加纳和冈比亚，VRE装机容量不到国家总装机容量的1%，并且光伏电站与配电网相连，从输电运营商的角度来看，VRE对系统运行的影响非常小，基本被忽略。而布基纳法索和塞内加尔的光伏装机容量占本国装机容量较大比例，其出力的可见性和可控性对于电力系统运行非常重要，例如限制低负荷期间的VRE出力以保证系统的频率稳定。

因此为达到出力可见可控，VRE电站需要装备实时监控系統，如SCADA系统，具备通信和控制能力，能够响应控制信号自动调整出力，进而可提供频率电压调节服务，同时电力公司也需要具备对应的VRE监控系统。此外在并网监控方面相关的国际标准已经成熟，可以与各国电力背景相结合指导本地并网导则的制定。

## 4.2 功率预测

可再生能源发电功率预测是电力系统规划和运行的重要基础，也是协助制定调度和运行计划的前提。在电力市场中，精确的功率预测有助于建立可靠的VRE场站发电计划，提高VRE并网经济性，而良好的系统级功率预测则有助于验证发电计划是否可行以及是否拥有足够的备用容量。在非电力市场环境中，准确的系统级预测可以大大降低VRE不确定性和波动性对系统的影响。

系统级的功率预测通常比区域内单个电站预测的总和更为准确。因此，在中国，电网公司及省级调度中心拥有自己的功率预测系统，以更为精确地掌握区域内可再生能源波动情况，同时为不同时间尺度的发

电和调度计划生成功率预测信息。中国正在主导制定首个VRE功率预测国际标准IEC TR 63043，提出对相关数值天气预报、功率预测功能的要求，将有助于实现对VRE发电的调度管理。

在塞内加尔，电网公司SENELEC遵循日前模式。根据该模式，光伏电站运营商有义务提供第二天逐小时的发电预测信息，但不提供日内功率波动预测信息，导致经常发生火电爬坡能力不足而切负荷的情况。因此SENELEC需要配备自己的功率预测系统，并开展日内功率预测，更好地平衡光伏出力的波动。

在西非，由于光伏发电将成为系统中不可忽视的一部分，电网公司需要通过功率预测来感知爬坡事件，安排旋转备用容量，来有计划地平衡功率差额。先进的功率预测工具及系统可以帮助降低火电机组的调度出力，同时减少弃光，提高系统运行经济性；在光伏发电比例较高时，也有助于提升系统可靠性。

## 4.3 发电调度

随着可再生能源发电比例不断提高，以及提供系统服务能力的提升，电网运营商和市场运营商通过先进的功率预测技术积极利用可再生能源发电。许多调度系统已将VRE纳入调度计划，以确保更好地利用VRE发电，这有助于提高早期阶段VRE并网的经济性。通常VRE会优先调度，在电力市场环境中，调度顺序由市场决定，在非电力市场环境中，调度顺序由电网运营商确定。

在中国，系统正常运行条件下可再生能源发电保证优先调度。为满足这一要求，电网公司在中长期、日前和日内调度运行过程中考虑可再生能源预测信息，充分利用常规机组的灵活性，以及电网输电能力，最大化接纳可再生能源发电，同时保持系统运行的安全稳定性。

西非大部分国家缺乏预测和调度相关的工具与系统，VRE难以有效纳入调度计划。在当前非电力市场环境下，VRE接入后，电力公司需要按照优先调度的原则在满足系统安全约束的条件下制定充分的前日发电计划，体现VRE并网的经济性；同时根据VRE的日内出力，不断更新调整机组的调度顺序，优化机组出力。对于实时调度层面，目前还较难实现，系统运行需要足够的旋转备用进行支撑。

## 4.4 友好并网

在可再生能源发展初级阶段，VRE发电技术更侧



重于最大功率输出,忽略了电力电子设备对系统可靠性和稳定性的影响和贡献,以及相关并网标准的制定。当VRE比例较低时,并网运行不存在问题,并且可以被电网公司接受,但随着VRE比例的增大,特别是随着VRE电站的容量越来越大,将对系统运行产生严重影响。例如,2011年,由于风电机组缺乏故障穿越能力,中国发生了若干起严重的风机脱网事故<sup>[32]</sup>,之后按照并网标准的要求,所有电力电子接口的VRE发电都具备低电压穿越功能,由于电压跌落造成的大规模风机脱网事故未再发生。

因此,在较高比例VRE背景下,VRE发电友好并网技术在维持系统稳定运行方面变得十分重要,需要在机组、场站和集群层面不断改进并网技术,使VRE发电提供更多的电网频率、电压支撑等服务。中国已经实施了一些示范项目来验证VRE发电友好并网技术,如国家风光储输示范工程。

由于相关的VRE电站项目较少,西非各国电力公司当前对电力电子设备性能以及与传统同步机的区别认识有限。随着VRE比例的不断提高,需要注意VRE发电的并网支撑功能及并网标准制定,对新建VRE发电设备及场站的并网提出要求,以提高系统运行的安全稳定性。此外,相关的国际标准在IEC SC 8A技术委员会的牵头下正在制定,包括快速频率响应、故障穿越等。可再生能源开发较早的国家均制定了与友好并网相关的并网导则,相关内容可以作为制定西非并网标准的参考与依据。

#### 4.5 机组灵活性

机组灵活调节能力是应对VRE并网运行挑战的重要灵活性资源,其他的灵活性资源还包括电网互联、储能及负荷侧响应等。机组灵活性可从最小技术出力、爬坡速率、响应时间3个维度进行刻画。因此水电机组和燃气轮机灵活性较高,光热发电由于具备储热装置也具有较好的灵活性,而常规火电机组调节能力较差,频繁启停及部分出力时经济性较差,通常需要进行灵活性改造来增加调节能力。

中国以燃煤发电为主,煤电装机占比达到57.3%,灵活电源占比仅有7.7%。系统中VRE的增加必然需要煤电机组的灵活调节能力来应对波动性及不确定性,因此在新建抽水蓄电站、电网储能、燃气机组增加灵活性资源之外,大量燃煤火电机组需开展灵活性改造,以增大调节空间,即VRE消纳空间。中国力争“十三五”末完成400 GW火电机组深度调峰改造,增

加系统46 GW调峰能力。

随着西非未来VRE接入比例增加,当进入第3阶段后,南部大量的水电及尼日利亚的燃气发电可以作为良好的灵活性资源,同时北部缺水但具备丰富太阳能资源的地区,可以发展一定的光热发电作为灵活性资源支撑当地VRE的并网消纳。在这些选项之外,西非大量燃油燃煤机组的灵活调节能力也是不可或缺的。

#### 4.6 区域互联与多能互补

大规模可再生能源并网与消纳需要不同区域电网的互联,以充分利用多样化电力系统之间的多能协同作用。得益于大范围平衡及能源资源的多样性,通过不同区域之间的协调调度可以有效平抑负荷和VRE的波动性。利用发电和备用容量共享,互联系统往往也比独立系统更可靠。在中国,青海省通过多能互补优化调度及跨省电力外送,2019年全省连续15天实现以水、光、风等全清洁能源供电<sup>[33]</sup>。

西非各国装机容量普遍较低,通过电网跨国互联共享该地区的发电和备用容量,对于各国接入大量VRE至关重要<sup>[34]</sup>。几内亚未来将建设更多的水电站,通过跨国互联,作为灵活性资源的水电可以平衡布基纳法索和塞内加尔的光伏出力波动,甚至在建立区域市场时平衡整个区域系统的功率波动。布基纳法索33 MW的Zagtouli光伏电站通过225 kV的输电线路与科特迪瓦相连,对本国影响较大的光伏出力波动通过科特迪瓦的“大电网”(相对布基纳法索)得到有效平抑。塞内加尔的光伏发电比例将会增加到较高水平,长期解决方案之一就是与相邻系统互联以增加系统的惯性并共享旋转备用。西非已认识到区域内不同国家的水电、火电及VRE发电良好的多能互补作用,以及跨国互联对于实现多能互补效应的巨大推动作用,正按照规划推进相关的跨国电网互联项目。

#### 4.7 电源和电网协调规划

中国三北地区太阳能和风能资源丰富,负荷相对不足,由于电源和电网缺乏协调规划,三北地区可再生能源快速发展,而输电线路的规划和建设进展缓慢。因此在可再生能源发展早期,由于输电堵塞电力无法送出,这些地区普遍存在弃风弃光<sup>[35]</sup>。为此,中国一方面加快特高压长距离输电线路建设,加强区域互联,扩大风光消纳范围;另一方面将可再生能源开发向中东部负荷中心靠近,实现分布式就地消纳,虽

然这些地区的资源禀赋不如西部和北部,但避免了长距离输电线路建设。

中国的水电主要分布在西南地区,远离负荷中心,为此规划建设了多条特高压直流输电线路实现水电的跨省区消纳,逐步缓解了弃水问题。中国的经验表明,大规模可再生能源开发,特别是大型水电开发,也将促进电网升级和区域互联。

在西非,大部分可再生能源资源位于偏远地区,电力需求较低,基础设施如公路和输电线路的限制,使这些具有良好资源的地区难以开发,考虑各种约束的电源和电网协调规划可以避免未来弃风弃光现象的发生。目前西非大部分电力部门为垂直一体化结构,这有助于电源和电网的协调规划,避免VRE的盲目开发。

## 5 结论

西非地区电力缺乏,电网网架结构薄弱,电网覆盖率低,设备老旧,输配电损失大,可用发电与负荷需求不匹配,阻碍了经济发展,特别是矿产资源开发。在资源方面,化石能源分布不均,油气资源主要分布在西非东部及沿海地区,可再生能源资源分布较为广泛,北部地区太阳能资源较好,水电资源则分布在沿海地区的几内亚等国。

为获得可靠、廉价、清洁的电力供应,未来将以燃气电站为支撑,大力发展水电和太阳能发电,通过跨国互联电网建设实现不同地区、不同类型电源互补互济,共享发电和备用容量,保证系统运行的稳定性和经济性。同时离网供电(独立系统或者微电网)在西非未来的电力获取中也扮演着重要角色。

不同机构为西非地区进行的规划分析均表明,跨国电网建设对于西非可再生能源发展、满足电力需求具有重要促进作用,而跨区互联受电这一选项目前还不明朗,将取决于中非大英加水电站的建设情况。

西非国家对当地可再生能源发电及电网设备、系统、技术、能力不足的担心影响了大规模利用可再生能源的信心,技术和经验共享对西非各国理解本国的可再生能源并网规划与运行问题,以及如何在本国电力系统中应用相关的技术具有重要作用。中国的可再生能源发展经验表明,大规模开发可再生能源并接入电力系统是可以实现的,这为具有大规模水电及太阳能开发潜力的部分西非国家开辟了光明的道路。中国和西非在可再生能源领域发挥互补优势,深度合作,对于推动西非可持续发展将发挥重要作用。

## 参考文献

- [1] ECOWAS Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency. Regional progress report on renewable energy, energy efficiency and energy access in ECOWAS region monitoring year:2017[R/OL]. (2019-07)[2020-04]. [http://www.ecreee.org/sites/default/files/regional\\_progress\\_report\\_2017.pdf](http://www.ecreee.org/sites/default/files/regional_progress_report_2017.pdf).
- [2] REISS K. Developing renewable energy sectors and technologies in West Africa[EB/OL]. (2015)[2020-04]. <https://www.un.org/en/chronicle/article/developing-renewable-energy-sectors-and-technologies-west-africa>.
- [3] SEforALL. Sustainable energy for all annual report 2019[R/OL]. (2020-06-05)[2020-04]. [https://www.seforall.org/system/files/2020-06/SEforALL\\_2019-Annual-Report.pdf](https://www.seforall.org/system/files/2020-06/SEforALL_2019-Annual-Report.pdf).
- [4] Africa Renewable Energy Initiative. Summary of the AREI framework document and action plan[R/OL]. (2016-08)[2020-04]. [http://www.arei.org/wp-content/uploads/2016/09/AREI-Summary-english\\_web.pdf](http://www.arei.org/wp-content/uploads/2016/09/AREI-Summary-english_web.pdf).
- [5] International Renewable Energy Agency. Scaling up renewable energy deployment in Africa[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2019.
- [6] 全球能源互联网发展合作组织. 非洲能源互联网规划研究[R/OL]. (2018-09-04)[2020-04]. <https://www.geidco.org/research/plan/2019/1780.shtml>.
- [7] 全球能源互联网发展合作组织. 非洲“电-矿-冶-工-贸”联动发展新模式[R/OL]. (2019-11-07)[2020-04]. <https://www.geidco.org/research/subject/2019/1783.shtml>.
- [8] International Renewable Energy Agency. Planning and prospects for renewable power: West Africa[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2018.
- [9] STERL S, VANDERKELEN I, CHAWANDA C J, et al. Smart renewable electricity portfolios in West Africa[J]. Nature Sustainability, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0539-0>.
- [10] OYEWO A S, AGHAHOSSEINI A, RAM M, et al. Transition towards decarbonised power systems and its socio-economic impacts in West Africa[J]. Renewable Energy, 2020, 154: 1092-1112.
- [11] World Bank. International development association project appraisal document for the solar development in Sub-saharan Africa project - phase 1[R/OL]. (2018-05-31)[2020-04]. <http://documents1.worldbank.org/curated/en/889851529345476097/pdf/WAPP-Solar-PAD2810-06142018.pdf>.
- [12] West African Power Pool. WAPP annual report 2019[R/OL]. (2019) [2020-04]. <http://www.ecowapp.org/en/documentation>.
- [13] United Nations Industrial Development Organization. World small hydropower development report 2019[R/OL]. (2020-05)[2020-05] <https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-05/Africa%20Book.pdf>.
- [14] World Bank. ECOWAS-Battery energy storage systems and synchronization (BE3S) project (P167569) [R/OL]. (2019-06-10) [2020-04]. <http://documents1.worldbank.org/curated/en/105141563916707396/pdf/Concept-Project-Information-Documents-PID-ECOWAS-Battery-Energy-Storage-Systems-and-Synchronization-BE3S-Project-P167569.pdf>.

- [15] West African Power Pool. ECOWAS master plan for the development of regional power generation and transmission infrastructure 2019-2033[R/OL].(2018-12)[2020-04].[https://www.ecowapp.org/sites/default/files/volume\\_0.pdf](https://www.ecowapp.org/sites/default/files/volume_0.pdf).
- [16] Global Infrastructure Hub. Showcase Project: Côte d'Ivoire-Liberia-Sierra Leone-Guinea (CLSG) interconnector project[R/OL].(2019-05)[2020-04].<https://cdn.gihub.org/umbraco/media/2519/gih-showcase-projects-2019-cslg-interconnector-project-art-web.pdf>.
- [17] International Renewable Energy Agency. Off-grid renewable energy solutions[R/OL].(2018-07)[2020-04].<https://irena.org/publications/2018/Jul/Off-grid-Renewable-Energy-Solutions>.
- [18] ECOWAS Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency. GIS hydropower resource mapping and climate change scenarios for the ECOWAS Region-technical report on methodology and lessons learnt for ECOWAS countries[R/OL].(2017-03)[2020-04] [http://www.ecowrex.org/sites/default/files/final\\_technical\\_report\\_on\\_methodology\\_and\\_lessons\\_learnt\\_for\\_ecowas\\_countries.pdf](http://www.ecowrex.org/sites/default/files/final_technical_report_on_methodology_and_lessons_learnt_for_ecowas_countries.pdf).
- [19] KLING H. Hydropower resource mapping for West Africa[J]. International Water Power and Dam Construction. 2017, 69(10): 14-16.
- [20] United Nations Industrial Development Organization. World small hydropower development report 2016[R/OL]. (2016)[2020-04] [https://www.smallhydropower.org/fileadmin/user\\_upload/pdf/2016/WSHPDR\\_2016\\_full\\_report.pdf](https://www.smallhydropower.org/fileadmin/user_upload/pdf/2016/WSHPDR_2016_full_report.pdf).
- [21] VILAR D. Renewable energy in Western Africa: situations, experiences and tendencies[M]. ECOWAS Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency (ECREEE), 2012.
- [22] International Renewable Energy Agency. Investment opportunities in West Africa: suitability maps for grid-connected and off-grid solar and wind projects[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2016.
- [23] ECOWAS Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency. ECOWAS renewable energy policy[R/OL]. (2015)[2020-04]. [http://www.ecreee.org/sites/default/files/documents/ecowas\\_renewable\\_energy\\_policy.pdf](http://www.ecreee.org/sites/default/files/documents/ecowas_renewable_energy_policy.pdf).
- [24] Ghana Ministry of Power. National renewable energy action plan (NREAP) of Ghana [R/OL]. (2015-11)[2020-04]. [http://www.se4all.ecreee.org/sites/default/files/ll.ghana\\_nreap\\_vs\\_final.pdf](http://www.se4all.ecreee.org/sites/default/files/ll.ghana_nreap_vs_final.pdf).
- [25] Liberia Ministry of Lands. National renewable energy action plan (NREAP) of the Republic of Liberia 2015[R/OL]. (2015-06)[2020-04]. [http://www.se4all.ecreee.org/sites/default/files/national\\_renewable\\_energy\\_action\\_plans\\_nreap\\_-\\_liberia.pdf](http://www.se4all.ecreee.org/sites/default/files/national_renewable_energy_action_plans_nreap_-_liberia.pdf).
- [26] International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2019[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2019.
- [27] West African Power Pool. Update of the ECOWAS revised master plan for the development of power generation and transmission of electrical energy Volume 1[R/OL]. (2018-12)[2020-04]. [http://www.ecowapp.org/sites/default/files/volume\\_1.pdf](http://www.ecowapp.org/sites/default/files/volume_1.pdf).
- [28] 倪煜, 宋福龙, 邬炜. 英加水电消纳市场和外送方案研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(增刊1): 222-227.
- NI Yu, SONG Fulong, WU Wei. Study on consumption market and delivery scheme of Inga hydropower[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(supplement 1): 222-227(in Chinese).
- [29] International Renewable Energy Agency. Africa power sector: planning and prospects for renewable energy (synthesis report) [R/OL].(2015-03)[2020-04].<https://www.irena.org/publications/2015/Mar/Africa-Power-Sector-Planning-and-Prospect-for-Renewable-Energy-synthesis-report>.
- [30] International Energy Agency. Status of power system transformation 2017[R/OL].(2017-06-02)[2020-04]. <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2017>.
- [31] World Bank. Grid integration requirements for variable renewable energy[R/OL].(2019-07)[2020-04].<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/32075/Grid-Integration-Requirements-for-Variable-Renewable-Energy.pdf?sequence=5&isAllowed=y>.
- [32] 孙华东, 张振宇, 林伟芳, 等. 2011年西北电网风机脱网事故分析及启示[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 76-80.
- SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis on serious wind turbine generators tripping accident in Northwest China power grid in 2011 and its lessons[J]. Power System Technology, 2012, 36(10):76-80(in Chinese).
- [33] 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).
- [34] ADEOYE O, SPATARU C. Quantifying the integration of renewable energy sources in West Africa's interconnected electricity network[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 120:109647.
- [35] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):1-9 (in Chinese).

收稿日期: 2020-07-03; 修回日期: 2020-07-27。

作者简介:



罗魁

罗魁(1989), 男, 工程师, 研究方向为新能源发电及并网, 2018年作为国网公司专家借调国际可再生能源署(IRENA)工作, 参与西非清洁能源走廊倡议项目, E-mail: luokui21@163.com。

(责任编辑 李锡)