

煤电退出与电力系统转型规划——智利案例研究

汪洋子^{1,2}, 梁才浩^{1,2*}, 孟婧^{1,2}, 潘乐昕³, 宋福龙^{1,2}, 王晓辉⁴

(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. 北京理工大学机电学院, 北京市 海淀区 100081;

4. 山东大学电气工程学院(电网智能化调度与控制教育部重点实验室), 山东省 济南市 250061)

Coal Phase-out and Power System Transition Planning: Chile Case Study

WANG Yangzi^{1,2}, LIANG Caihao^{1,2*}, MENG Jing^{1,2}, PAN Lexin³, SONG Fulong^{1,2}, WANG Xiaohui⁴

(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. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Haidian District, Beijing 100081, China;

4. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

Abstract: Accelerating low-carbon energy transition and actively addressing climate change has become a global consensus. After the UK, France, and Germany, in 2019, Chile promised to retire coal-fired generators by 2040 and achieve carbon neutrality by 2050. The development of renewable energy resources to replace coal power has become an important step in advancing Chile's energy transition process. As coal supplies a large proportion of power demand, coal phase-out and clean replacement will cause a major change in the power supply structure. It will challenge the present power system in various aspects, including power generation adequacy, renewable energy development and utilization, grid transmission and distribution capability, and operational flexibility. This paper first examines the inherent logic of coal phase-out and clean energy transition in Chile from the perspective of power supply development. Then, the challenges faced by the power system after the withdrawal of coal power are analyzed in detail, and thereafter, Chile's countermeasures are studied as well.

Keywords: coal phase-out; planning of power system transition; Chile; renewable energy resources; flexibility

摘要: 加快推动能源低碳转型、积极应对气候变化已成为全球共识。在英法德等国宣布退煤后, 智利在2019年正式加入退煤行列, 承诺在2040年退煤, 2050年实现碳中和。大力开发

风、光可再生能源资源, 退役煤电, 已成为智利实现清洁能源转型的重要一步。然而, 智利煤电在电力供应结构中占比大, 煤电的退出与清洁替代是电力供应结构的重大变革, 将导致整个能源电力系统面临包括电力电量充裕性、可再生能源开发利用、电网输配能力、灵活性等多方面的困难和挑战。从电力供应发展的角度研究探讨了智利退煤和清洁能源转型的内在逻辑, 详细分析了煤电退出后系统面临的挑战, 并在此基础上研究梳理了智利应对挑战的举措。

关键词: 退煤; 电力系统转型规划; 智利; 可再生能源; 灵活性

0 引言

2019年6月4日, 智利公开承诺在2040年前退役国内全部燃煤电站, 并在2050年实现国家碳中和。目前, 智利电力部门的温室气体排放占全国温室气体排放总量的约32%, 主要来自燃煤和燃气发电。其中, 燃煤发电供应了智利约40%的电力需求, 占电力部门温室气体排放总量的约80%^[1-4]。煤电退出是智利碳中和战略的六大支柱之一, 反映了智利政府、企业和社会各界对清洁能源转型与可持续发展的共同意愿和坚定信念。

2018年1月, 智利政府与智利电力企业联合会, 以及煤电运营商共同达成一份自愿协议, 承诺不再投资开发没有装设碳捕集和封存(carbon capture and storage, CCS)技术的燃煤发电项目, 并共同成立了

基金项目: 全球能源互联网集团公司科技项目(2700/2020-75002B)。

Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection Group Co., Ltd. (2700/2020-75002B).

一个由智利能源部负责协调的工作组,旨在统筹考虑技术、经济、环境、社会和安全等多方面因素,协商制定现役燃煤发电机组的退役时间表。工作组每隔5年召开一次圆桌会议,与各利益相关方共同商定下一阶段煤电退役时间。退煤计划共分五个阶段,每阶段预计退役装机约1000 MW^[5-6]。2019年6月,智利能源部公布了第一阶段煤电退役计划的具体细节。第一阶段计划关闭国内服役年限最长、能效最低的8座燃煤电站,装机共计1047 MW,平均服役年限40年,占全国煤电总装机的19%^[7]。随后,退煤战略得到了包括煤电运营商在内的社会各界积极响应和配合,现役燃煤机组的退出时间不断提前,越来越多的燃煤机组申请加入第一阶段退役计划。截至2021年1月,第一阶段预计退役总装机规模增至1731 MW,比原计划扩大65%,规模占全国煤电总装机的31%^[8]。

然而,智利煤电占比大,煤电退出和清洁能源转型是一项重大的电源结构变革,会导致整个系统面临方方面面的困难和艰巨的挑战。煤电供应了智利全国约40%的电力需求,在北部地区甚至高达80%,煤电退出会带来巨大的电力供应缺额。智利政府制定了一系列可再生能源发展战略,计划通过开发国内优质的风、光资源对退役的燃煤电站进行清洁替代,补足煤电供应缺口。然而,风、光电源由于自身的资源特性存在“日间无风”“夜晚无光”等出力难题,可再生能源发电项目在电力拍卖中竞争力不足,对投资开发商吸引力有限,发展动力不足。电力配置方面,由于智利地形狭长,历史上形成了区域电网各自平衡的较弱的互联格局。有限的通道容量难以适应经济社会发展与电源结构变革产生的资源配置需求,线路阻塞问题频发。此外,随着风、光可再生能源渗透率的提高,未来,智利电力系统将面临可再生能源并网消纳、灵活性资源供应、系统安全稳定等“双高”电力系统运行的种种难题^[9-10]。为保障煤电退出和清洁能源资源开发利用的稳步推进,智利政府在政策制度、电力拍卖、基础设施建设和规划研究等多方面做了大量创造性工作,成效显著。截至2021年1月,智利已完成第一阶段计划中4座燃煤电站的退役任务,退役规模占第一阶段退役计划的26%和全部退役计划的8%。智利国内清洁能源投资从2014年的10.1亿美元增长到2019年的42.9亿美元^[11],风、光发电量占比从2014年的3%增长到2019年的14%。

本文剖析智利电力系统退煤战略和清洁能源转型面临的挑战,并对应对挑战的政策措施与规划研究进

行了分析和经验总结,旨在为中国未来煤电转型和清洁能源发展提供经验借鉴。

1 智利电力供应发展

2020年智利国家电网发电量约77.6 TWh,其中煤电占比最大,约35%,是南美洲最依赖煤电的国家。水电和气电发电量占比位列第二和第三,分别为27%和18%。图1为智利国家电网分电源发电量。电源装机方面,2020年智利电源总装机共计26.13 GW,水电装机占比第一,约占26%,煤电和气电装机并列第二,均约为19%^[12-13]。图2为智利电源装机结构。

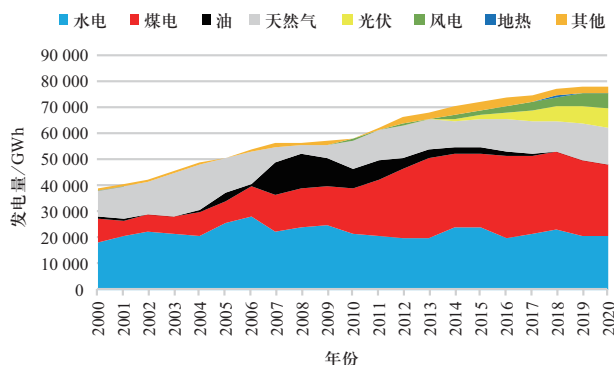


图1 智利国家电网分电源发电量

Fig. 1 Generation of Chile by type

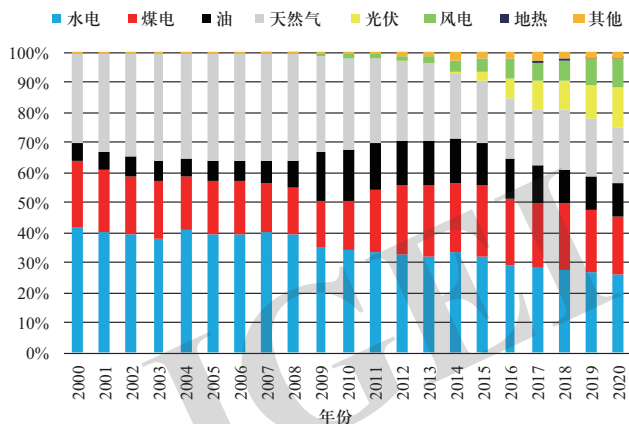


图2 智利电源装机结构

Fig. 2 Capacity mix of Chile

过去,智利的电力系统由“水火”共同主导。21世纪初,智利国内水电和煤油气发电量各占电力供应的半壁江山。近20年间,水文条件和化石能源供应变化深刻影响了智利的电力供应格局,为适应不断变化的一次能源供应形势,智利电力供应结构不断演进,2000—2020年智利主要电源利用小时数如图3所示。具体说来,可以分为以下三个阶段:

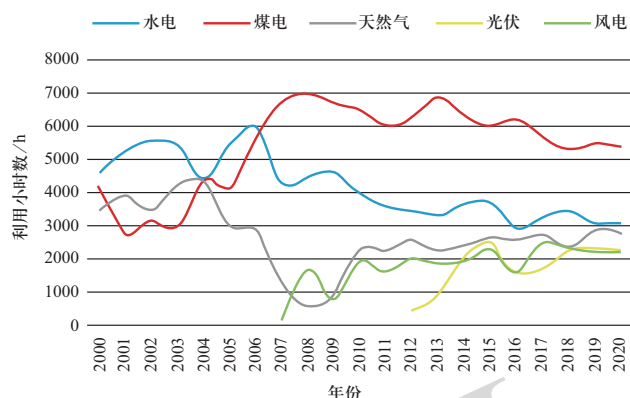


图3 2000—2020年智利主要电源利用小时数

Fig. 3 Full-loading hours of main power sources of Chile from 2000 to 2020

1) 2001—2005年, 水电和气电共同承担基荷, 发电量约占总发电量的80%。其中, 水电发电量占比在2002年达到峰值, 约53%, 随后开始波动下降。气电发电量在2004年达到峰值, 约39%。2004年后, 由于来自阿根廷的天然气进口下滑, 气电发电量和利用小时数随之不断走低^[14]。同时, 煤电发电量占比从20%左右开始不断上升, 主要用于保障智利北部工矿业用电和城市用电^[15], 利用小时数维持在3000~4000 h。

2) 2006—2013年, 煤电逐渐成为智利主导电源。2007年, 由于阿根廷单方面中断对智利的天然气出口^[16], 智利国内燃气发电量大幅降低, 占比从2004年的39%降至不到5%, 利用小时数从2004年的4400 h降至600 h。柴油机组在随后几年内暂时弥补了气电的发电量缺口。在这一时期, 煤电发电量不断提升, 不仅弥补了燃气和来水条件限制导致的气电和水电发电量缺口, 还承担了几乎全部的新增用电需求, 发电量占比达到40%, 利用小时数接近7000 h, 超越水电成为智利主导电源。直到2010年, 智利在北部和中部沿海开发的2座液化天然气站建成投产, 燃气发电量占比才逐步恢复到20%左右, 利用小时数稳定在2000~3000 h。

3) 2014年至今, 风、光电源蓬勃发展, 承担了绝大部分新增用电量。这段时期, 煤电发电量占比和利用小时数稳步下降。气电与风、光发电量占比大体相当, 气电利用小时数略高。受近十年来气候问题导致的降水量减少影响^[17], 水电发电量占比下降至25%左右, 利用小时数降至3000 h, 略高于气电。

智利本国的煤油气产量非常有限, 国内化石能源消费几乎全部依赖进口, 煤油气进口依赖度长期高达80%以上^[18]。智利历史上由化石能源主导的、高度依赖化石能源进口的能源电力结构不仅导致国家用能成

本常年高居南美洲各国前列, 也使得国家能源安全无从保障。智利可再生能源资源丰富且优质, 开发潜力巨大, 但限于技术等多方面因素, 开发利用水平一直较低, 直到近几年才逐步有所起色。近20年来, 燃煤发电在智利的发展壮大, 是智利在清洁能源开发利用技术不发达的特定历史时期为支撑国内经济社会发展提供经济可负担的电力供应的暂时选择。目前, 全球进入绿色可持续发展的新时期, 煤电退出和清洁能源转型于智利既有参与全球共同气候环境治理的外在动力, 也有获取经济可靠能源电力供应的内在需求, 既是实现碳中和目标的重要战略举措, 也是走可持续发展道路的必然选择。

2 智利退煤面临的挑战

智利退煤战略涵盖国内全部28座燃煤电站, 总装机共计5529 MW, 分别由AES Gener, Colbún, Enel和Engie等4家运营商运营, 电源装机份额如图4所示。智利国家电网自北向南由4个区域电网组成, 分别是SING (Sistema Interconectado del Norte Grande)、SIC (Sistema Interconectado Central)、SEA (Sistema Eléctrico de Aysén) 和SEM (Sistema Eléctrico de Magallanes)。如图5所示, 现役煤电机组全部分布在北部的SING和中部的SIC。

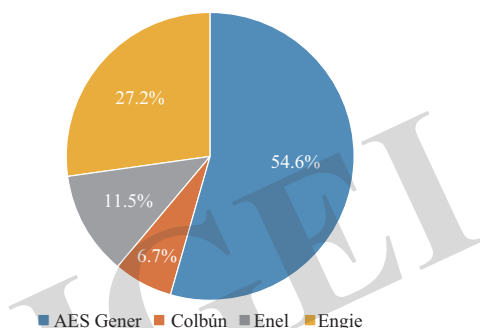


图4 智利各发电企业煤电资产份额

Fig. 4 Market share of coal-fired capacity of each power company in Chile

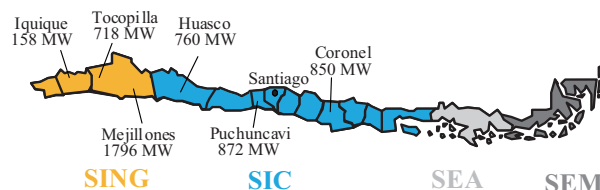


图5 智利燃煤电站分布

Fig. 5 Distribution of coal-fired power plant in Chile

智利可再生能源资源丰富,尤其是太阳能资源,主要集中分布在北部阿塔卡玛沙漠地区,技术可开发量超过17 TW。风能资源主要分布在北部和南部沿海地区,技术可开发量37 GW。智利充裕的风、光资源为煤电退出和清洁能源转型提供了优越的自然条件^[19-20]。然而,摆脱化石能源依赖,实现清洁能源转型是一项复杂的系统工程,面临诸多方面的困难和挑战。

2.1 电力供应充裕性挑战

智利煤电装机的45%位于SIC,占SIC电源装机的14%和发电量的28%;55%位于SING,占SING电源装机的48%和发电量的78%。若退出全部煤电站,SING区域将产生3 GW的电力缺口和12 TWh的电量缺口。对此,智利计划通过加速国内可再生能源资源开发利用填补煤电退出产生的电力电量缺额。然而,智利目前的可再生能源资源开发程度还在起步阶段,装机规模仅为全国可再生能源技术可开发量的不到1.4%^[21],且开发不均衡,北部地区虽拥有世界顶级的太阳能资源,但开发程度远低于中部地区,装机仅占全国太阳能总装机的16%。

采矿业是智利的支柱产业,2015年贡献全国GDP的11%和出口总额的54%,用电量占智利总用电量的约30%。采矿业发展是智利经济和电力增长的主要驱动因素,根据预测,2029年仅铜矿业的电力需求就将达到3.19 GW^[22]。智利80%的采矿企业位于北部SING^[15],生产用电占SING总用电量的90%^[18]。未来,若智利可再生能源资源开发不及预期,煤电退出产生的电力电量缺口可能无法得到有效补足,将严重影响智利的经济社会发展。

2.2 电网互联挑战

智利国家电网呈南北向鱼骨形分布,北部风、光资源富集区域与中部电力负荷中心距离遥远,北部区域电网SING和中部区域电网SIC之间电网互联薄弱。有限的通道容量无法满足清洁电力的配置需求,产生了严重的阻塞问题,极大阻碍了北部清洁能源资源的开发。如图6所示,2017年,智利的弃风弃光率一度高达14%,SING和SIC电力市场现货电价间出现大幅度偏离。随着图7中所示SING和SIC间的2条联络线TEN和Cardones—Polpaico依次投运,这些问题才有所缓解。由于互联线路延期投运,北部发电企业共计弃电680 GWh,损失超过1亿美元^[23]。

Cardones—Polpaico联络线的规划本意是从中部的

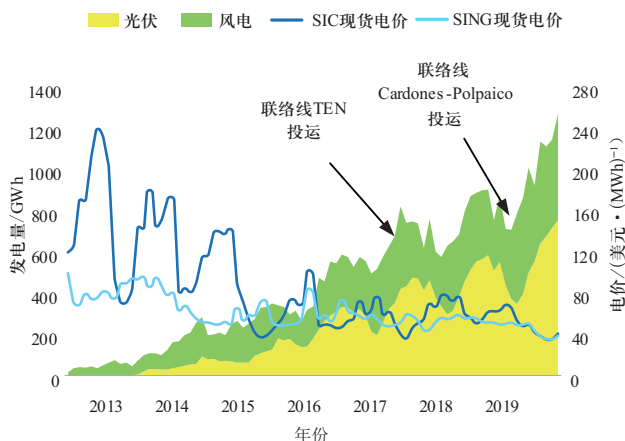


图6 2013—2019年智利风、光发电量与区域电网现货电价
Fig. 6 Wind and solar power generation and spot price in SIC & SING from 2013 to 2019

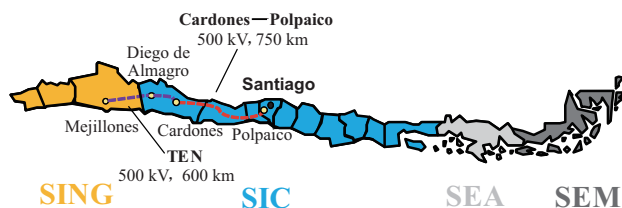


图7 SING和SIC联络线示意图

Fig. 7 Interconnection channel between SING and SIC

SIC北送水、火电力,满足北部工矿企业的生产用电。然而,随着北部的风、光发电项目开发,线路投运后产生了自北向南的电力流,并在之后不久达到通道送电容量上限^[21]。未来,智利北部风、光资源开发将不断提速,弥补全国煤电退出产生的电力电量缺口的同时,支撑中部首都经济带经济社会发展的需要的新增用电需求。由此,智利北电南送的电力流格局将会进一步凸显,送电规模不断扩大,必将在不久的将来再一次挑战尚不充裕的互联通道容量。

2.3 灵活性资源挑战

根据智利能源部的中远期能源电力规划^[21],风、光电源的渗透率会在2030—2035年达到50%以上,成为智利电力系统的主力电源。系统灵活性资源的充裕性将在较大程度上影响风、光电源电力电量支撑作用的发挥。如表1所示,系统的灵活性资源不仅应能在长时间尺度上兼容风能资源季节特性造成的风电季节性出力波动,太阳能资源日内特性造成的光伏日内出力波动,还应能够在更短的时间尺度上容纳新能源出力 and 新型负荷的不确定性,保证电力的可靠供应和系统的安全稳定运行。

表 1 电力系统灵活性分类^[24]
Table 1 Power system flexibility by type

类型	超短期 (稳定性)	短期	中期	长期
时间 尺度	秒级	分级	小时/天级	月/ 季度级
应用 情景	保障高比例 新能源电力 系统稳定性 (电压/频率 稳定)	应对波动 性电源产 生的频率 问题	提前一小时和一 天, 安排电源生 产计划/解决因特 定天气导致的新 能源供应过剩或 不足	平衡新能 源季节性 可用性与 电力需求
规划 运行 领域	动态稳定性 (惯性响应)	一次和二 次频率 响应	自动发电控制、 经济调度、 机组组合	水火电 协调、 充裕度

在灵活性需求激增, 而煤电机组逐步退出导致存量灵活性资源锐减的大趋势下, 智利国内的灵活性供需平衡必将日益偏紧。如果灵活性资源短缺, 将直接限制风、光电源并网消纳, 不仅会产生大规模的弃风弃光电量, 降低电力供应的经济性, 还会影响风、光电源有效参与实时电力电量平衡, 提供电力电量支撑, 而主力电源出力受限将直接威胁系统运行安全, 严重时将导致系统崩溃。

3 智利实现退煤的政策措施和规划研究

为保证煤电退出和清洁能源转型进程的顺利推进, 智利政府在政策制定、拍卖设计、基础设施建设和规划研究等多方面做了大量工作, 取得了显著成果。

3.1 持续推进可再生能源发展的能源政策

近十年来, 智利政府出台了一系列政策法案, 为可再生能源的开发利用设置了不同阶段的战略目标, 为国内可再生能源发展指明了方向。2013年, 智利政府出台了非常规可再生能源法案 (Ley 20257), 规定到2025年电力供应商提供的电力供应结构中非常规可再生能源必须超过20%^[25]。2016年, 政府在发布的能源政策《Energy 2050》中承诺清洁能源发电量占比在2035年和2050年分别达到60%和70%的目标^[26]。2019年, 智利总统在第25届联合国气候大会上承诺在2030年实现可再生能源装机占比达到70%的目标^[27]。

除了制定发展目标, 智利政府还出台了一系列政策组合, 持续推进可再生能源对化石能源的清洁替代。2014年, 智利政府创造性地设计并实施了一套技

术中立却有利于发挥可再生能源竞争力的电力拍卖机制, 极大地促进了国内可再生能源项目的投资开发^[28]。同年出台净计量法, 允许分布式电源在保障本地用电需求之余向电网售电, 并在2018年11月将规模限制从100 kW提高到300 kW。同样在2014年, 政府出台了碳税法案 (Ley 20780), 规定装机规模超过50 MW的火力发电站 (不包括生物质) 必须为温室气体排放支付5美元/t的碳税, 通过改革税制削弱煤电等化石能源电站的竞争力^[29]。

智利政府推进清洁能源转型政策的密集出台极大地促进了智利可再生能源的发展, 风、光电源装机从2014年的957 MW增长到2020年的5.9 GW, 年均增长率35%。

3.2 促进可再生能源项目投资开发的电力拍卖制度

3.2.1 有利于可再生能源竞标的拍卖结构

自2006年起, 智利几乎每年都会进行电力拍卖。虽然智利的电力拍卖是技术中立的, 但其独特的拍卖机制设计使得可再生能源项目能够充分发挥其竞争优势。

智利电力拍卖结构由日内和季度2类标的时间块组成。如图8所示, 日内24 h被分成3个时间块, 全年12个月被分成4个季度块。发电企业可以选择一个或多个时间块进行投标。在这种拍卖机制下, 可再生能源企业可以在投标时充分考虑可再生能源项目的资源特性。历史拍卖结果显示, 太阳能发电企业更倾向于竞标阳光充裕的日中时间块, 水电发电企业更倾向于竞标水能资源最充沛的冬季季度块, 而风电发电企业更倾向于竞标巴塔哥尼亚高原风能最充裕的夏季季度块。

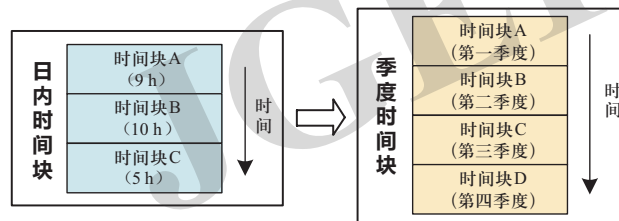


图 8 智利电力拍卖结构

Fig. 8 Structure of energy auction in Chile

3.2.2 吸引开发商参与的拍卖流程

长期供电协议以美元计价。对海外投资者来说, 拍卖合同以本地货币计价意味着必须承担本币汇率波动风险。尤其是在不具备项目相关设备制造能力的国家, 投资者必须先行以美元进口项目相关设备并在本

地进行组装。若后续收益因本国汇率波动无法保证,企业会因先行投资成本无法回收而面临亏损。例如,阿根廷比索在2017—2018年间贬值了58%,极大地影响了阿根廷可再生能源项目的投资开发^[30]。

宽松的资格审查制度。未在智利注册的开发商只需要缴纳投标保证金,即有资格参与拍卖。这项规定有助于最大限度地降低开发商的参与门槛,增强拍卖的竞争,提高电力拍卖的效果。

较长的交付时间和严格的逾期惩罚。长达5年的交付时间,既降低了开发商项目规划的难度,提高了项目的交付率,也允许开发商能够投机风、光伏发电技术的快速进步,基于度电成本下降预期,以更低的竞标价格参与拍卖。为保证项目按时完工,智利能源部会收取项目完工保证金,并实时监测项目进展,对逾期项目收取大额罚金。

智利的电力拍卖制度成功推动了智利国内可再生能源的开发投资,2013—2017年5年间平均电价降低了75%,如图9所示。其中,在2015和2017年的2次电力拍卖中,可再生能源项目占比达到100%。

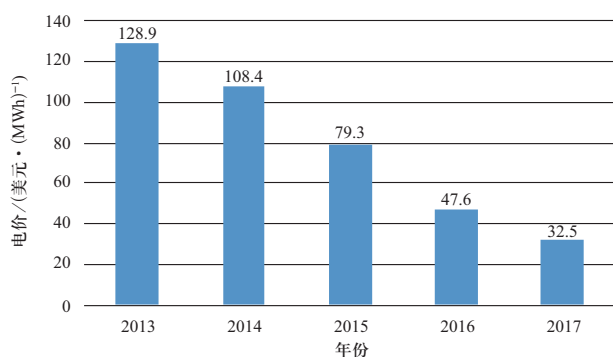


图9 智利电力拍卖平均电价

Fig. 9 Average electricity price in energy auctions in Chile

3.3 电网建设和煤电机组改造

根据中长期能源电力规划,智利计划通过加强电网互联建设解决线路阻塞问题,提高清洁电力广域配置能力,同时加速各类储能设施建设^[31-32],尤其是煤电机组的卡诺电池改造,为未来智利高比例可再生能源系统运行提前布局灵活性资源。

国内方面,新建Kimal—Lo Aguirre高压直流工程,规划电压等级在±600 kV以上,输电容量在2000 MW以上,预计于2029年底建成投产,与Mejillones—Cardones—Polpaico 500 kV纵向交流通道并行,扩大北部与中部电网间的通道容量,打通北部和中部消纳

市场,实现清洁电力的高效配置。跨国方面,智利计划在2035年前实现与SINEA国家(秘鲁、哥伦比亚、智利、厄瓜多尔和玻利维亚)建设贯穿南美洲西海岸的跨国电力走廊^[33]。此外,2019年底,智利与巴西、阿根廷、巴拉圭和乌拉圭签署协议,计划共同开展南锥体国家电力互联研究。通过跨国电网互联实现各国清洁能源资源禀赋、电力需求特性的多元互补,提高区域各国电力供应的安全性和经济性^[34]。

卡诺电池也被称为“抽热蓄能(pumped thermal energy storage)”,可以将太阳能转化为热能储存在储热介质中,待需要时转化为电能注入电网。卡诺电池的储热介质可以是水或熔融盐等。从自然资源禀赋看,智利阿塔卡玛沙漠拥有世界顶级的太阳能资源和大量的熔融盐资源。将原有燃煤电站改造成卡诺电池不仅能在光伏出力为零的时段提供稳定的电力电量支撑,减少夜间天然气调度带来的经济和环境成本,还能减少煤电资产提前退役造成的经济成本,以及大规模就业岗位分流造成的社会成本,助力煤电退出和清洁能源变革进程的平稳推进^[35-37]。

3.4 考虑多时间尺度灵活性需求的灵活性资源规划

在智利能源部委托国家电力协调中心(Coordinador Eléctrico Nacional)开展的一系列煤电退出规划研究中,围绕智利电力系统从短到长各个时间尺度的灵活性需求(例如从以惯量、调频、爬坡为代表的秒、分、小时级短时间尺度灵活性需求,一直到日级、月级甚至年级的长时间尺度灵活性需求)均有所考虑,并通过生产模拟仿真对各个时间尺度的灵活性资源供应进行了规划安排^[38-41]。

3.4.1 考虑长时间尺度灵活性需求的规划情景

周、月、季、甚至年级长时间尺度灵活性资源供应往往只能由具备稳定一次能源供应的电源提供,如火电、水电等。在过去智利水、火主导的传统电力系统中,新能源渗透率不高,得益于煤油气等化石能源的可贮存性和较为丰富的水能资源,智利电力系统几乎不存在长时间尺度的灵活性需求。未来,随着煤电退出和风、光主力电源化的推进,长时间尺度的灵活性需求将呈不断扩大的趋势。在如梅雨、季节性风电出力低谷等情况发生时,若可用一次能源不足以支撑相应电源满足系统长时间尺度的灵活性需求,不仅一定会发生缺电,甚至会限制相应电源的短时间尺度灵活性资源供应。由此,研究围绕智利主力电源的一次能源供应情况划分了规划情景。

1) 按水文条件设置情景: 得益于南美洲丰富的水能资源, 智利同大部分南美洲国家一样, 都形成了高水电占比的电力供应结构。水能不仅会影响国家电力供应的充裕性和经济性, 也将影响风、光电源的并网消纳和电力系统的安全可靠运行。由此, 研究围绕规划年限的来水条件设置了正常和枯水2种情景。

2) 按油气供应设置情景: 智利化石能源高度依赖进口, 虽然历史上数次由于化石能源供应问题导致电力供应短缺和电力供应结构大规模调整, 但化石能源装机占比高, 调节性能好, 未来仍将发挥重要调节作用。为将化石能源供应情况纳入考量, 研究围绕规划年限内智利的油气供应情况设置了油气充足和短缺2种情景。

3.4.2 考虑短时间尺度灵活性需求的规划模型

秒、分和小时级短时间尺度灵活性需求的产生往往与新能源出力和负荷的波动性、不确定性有关。在如天气、云层变化导致光伏出力骤变等情况发生时, 若可用灵活性资源无法快速响应短时间尺度灵活性需求, 不仅会恶化系统实时平衡, 造成电压、频率波动, 严重时还可能威胁系统的安全稳定运行。为保证系统在各个情景下短时间尺度灵活性需求得到满足, 研究围绕以下4个方面的灵活性需求对系统灵活性资源供应进行规划安排。

1) 惯量。惯量响应通过释放或吸收发电机旋转质块的动能, 从而瞬时分担系统扰动功率, 抑制系统频率变化^[42]。随着煤电机组被近乎零惯量的新能源机组取代, 系统等效惯量大幅减少, 为保证规划年限系统在各个情景下均具备足够的惯量支撑, 研究在规划模型中对系统惯量进行约束限制。

2) 一次调频备用。一次调频控制是通过调用调速器改变原动机出力, 实现对系统扰动功率的快速应对。研究通过在模型中设置一次调频容量约束, 并对提供一次调频备用的机组进行规划安排, 以实现在各个情景下系统发生一定规模的电源损失时, 等效惯量和可用一次调频备用容量能够保证系统频率波动在二次调频生效前维持在一定范围内。

3) 爬坡备用。爬坡能力反映了灵活调节电源改变工作位置追随系统不平衡功率的速度。研究通过在规划模型中对爬坡备用进行约束限制, 并对承担爬坡功能的机组进行规划安排, 以保证系统在各个情景中均具备追随净负荷小时级波动的爬坡能力。

4) 二次调频备用。二次调频控制是通过调用调频器改变发电机出力, 实现新的供需平衡和系统频率恢

复。研究通过在模型中设置二次调频备用容量约束, 并对提供二次调频备用的机组进行规划安排, 以保证在各情景下的灵活调节容量足够应对新能源出力预测和负荷预测小时内误差导致的净负荷波动。

研究结果显示, 在系统运行中, 惯量、一次调频、二次调频和爬坡备用容量首先由调节性能良好, 成本最低的水电、次低的天然气机组承担, 若来水条件或天然气供应受限, 灵活性资源供应缺额将由成本最昂贵的柴油机组提供。系统灵活性资源供应成本会以系统运行成本的形式传导给用户, 从而影响终端电价。在同等化石能源供应条件下, 枯水情景平均节点电价为正常情景的2倍; 在同等水文条件下, 化石能源短缺情景的节点电价是充裕情景的2~3倍。

4 结语

中国与智利虽远隔重洋, 电力发展却有许多相似之处, 如煤电主导的电力供应结构、资源与负荷的逆向分布格局、突出的电力广域配置需求, 以及巨大的低碳减排压力等。长远来看, 中国煤电也面临逐步改变定位, 并最终退出历史舞台的能源变革趋势。由此, 深入剖析智利退煤和能源转型经验对中国电力系统未来发展具有较大参考价值, 具体总结如下。

1) 结合国家清洁能源转型进展与转型需求, 根据形势变化不断丰富完善政策内涵和政策组合, 与时俱进持续加强对煤电退出与可再生能源发展的政策支持力度。

2) 设计充分考虑可再生能源资源特性的电力市场结构, 引导可再生能源项目竞争力的有效发挥, 推动综合用能成本的降低; 建设能够有效吸引市场主体参与的市场机制, 加强市场的竞争性和流动性, 促进市场发现价格功能的实现。

3) 统筹考虑未来可再生能源开发利用、经济社会发展需求, 广域清洁电力配置需求、高比例新能源系统安全运行需求、化石能源资产平稳过渡需求, 加强对电网、储能等电力基础设施的规划建设, 并对系统灵活性资源进行提前规划布局。

4) 电力规划中, 在传统电力电量平衡的基础上, 对不同时间尺度下系统的灵活性资源供应予以充分关注, 细化主力电源一次能源可用性和高比例新能源系统运行的动态需求, 将长期和短期灵活性约束纳入电力规划模型中, 保证未来高比例可再生能源电力系统中电力供应的充裕性和系统运行的安全性。

参考文献

- [1] PALMA BEHNKE R, BARRÍA C, BASOA K, et al. Chilean NDC mitigation proposal: methodological approach and supporting ambition[R]. Santiago: COP25 Scientific Committee, 2019.
- [2] Ministerio de Energía. Carbono neutralidad en el sector energía[R]. Chile: Ministerio de Energía, 2019.
- [3] Ministerio de Energía. Gobierno anuncia la salida ocho centrales a carbón en 5 años y la meta de retiro total al 2040[EB/OL]. (2019-06-04)[2021-03-15]. <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/gobierno-anuncia-la-salida-ocho-centrales-carbon-en-5-anos-y-la-meta-de-retiro-total-al-2040-0>.
- [4] Ministerio de Energía. NDC and carbon neutrality plan[R]. Chile: Ministerio de Energía, 2020.
- [5] Ministerio de Energía. Mesa de trabajo descarbonización[R/OL]. (2019-06-04)[2021-03-15]. <https://energia.gob.cl/panel/mesa-de-trabajo-descarbonizacion>.
- [6] Ministerio de Energía. Decreto exento numero 50[EB/OL]. (2020-03-13)[2021-03-15]. <https://energia.gob.cl/panel/mesa-de-trabajo-descarbonizacion>.
- [7] Ministerio de Energía. Plan de retiro y/o reconversión de unidades a carbón[R]. Chile: Ministerio de Energía, 2020.
- [8] GÓMEZ C. Chile's coal phase-out update and next steps [EB/OL]. (2020-06-01)[2021-03-15]. https://acuerdochilecanada.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/06/4.-Chiles-coal-phase-out-update-and-next-steps_.pdf.
- [9] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986(in Chinese).
- [10] 鲁宗相, 李昊, 乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 12-18.
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18(in Chinese).
- [11] CLIMATESCOPE 2020. Emerging market cross-border clean energy investment[EB/OL]. (2021) [2021-03-15]. <https://global-climatescope.org/clean-energy-investments>.
- [12] 全球能源互联网发展合作组织. 中南美洲能源互联网研究与展望[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [13] BNEF. Country profile: Chile[EB/OL]. (2021)[2021-03-15]. <https://www.bnef.com/core/country-profiles/chl>.
- [14] BBC. Argentina: crisis energética[EB/OL]. (2004-03-26) [2021-03-15]. http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/business/newsid_3573000/3573451.stm.
- [15] EMIS. Chile mining sector 2016/2017-An EMIS insights industry report[R/OL]. (2018-04-27) [2019-01-10]. <http://48inter.com/wp-content/uploads/2017/04/Le-secteur-minier-du-Chili-2016-2017.pdf>.
- [16] New York Times. Energy crunch threatens South American nations [EB/OL]. (2007-10-13)[2021-03-15]. <https://www.nytimes.com/2007/10/13/world/americas/13chile.html>.
- [17] Diálogo Chino. Chile's mega-drought rolls on[EB/OL]. (2019-10-11)[2021-03-15]. <https://dialogochino.net/en/climate-energy/30820-chiles-mega-drought-rolls-on/>.
- [18] IEA. Energy policies beyond IEA countries: Chile 2018[R/OL]. (2019-03-18)[2021-03-15]. <https://webstore.iea.org/download/direct/265>.
- [19] 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.
- [20] Ministerio de Energía. Recursos y potenciales de energías[EB/OL]. (2020-01)[2021-03-15]. <http://potenciales.minenergia.cl/potencialesv2/>.
- [21] Coclenco. Forecast for electricity consumption in the copper mining industry 2017-2028 [EB/OL]. (2018)[2021-03-15]. [https://www.cochilco.cl/Research/Forecast%20of%20electricity%20consumption%20in%20copper%20mining%202017-2028%20\(Abtract\).pdf](https://www.cochilco.cl/Research/Forecast%20of%20electricity%20consumption%20in%20copper%20mining%202017-2028%20(Abtract).pdf).
- [22] Energía Estratégica. La demora de Cardones-Polpaico significó más de 100 millones de dólares de pérdidas para los proyectos de energías renovables[EB/OL]. (2019-06-04)[2021-03-15]. <https://energia.gob.cl/panel/mesa-de-trabajo-descarbonizacion>.
- [23] BNEF. Grid merger: Chile curbs curtailment, stabilizes prices [R/OL]. (2020-04-10) [2021-03-15]. <https://www.bnef.com/insights/22769>.
- [24] IEA. China power system transformation[R/OL]. (2019-06-04) [2021-03-15]. <https://webstore.iea.org/china-power-system-transformation-in-chinese>.
- [25] Ministerio de Economía. Ley 20257[EB/OL]. (2013-11-22) [2021-03-15]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=270212&f=2013-10-22&p=>.
- [26] Ministerio de Energía. Energy 2050[EB/OL]. (2016-08) [2021-03-15]. <http://www.energia2050.cl/wp-content/uploads/2016/08/Energy-2050-Chile-s-Energy-Policy.pdf>.
- [27] Ministerio de Energía. COP25 Ministerio de Energía[EB/OL]. (2019)[2021-03-15]. <https://energia.gob.cl/mini-sitio/cop25-ministerio-de-energia>.
- [28] Ministerio de Economía. Ley 20805[EB/OL]. (2015-01-22)[2021-05-10]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1074277>.
- [29] Ministerio de Economía. Ley 20780[EB/OL]. (2014-09-29)[2021-03-15]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1067194>.
- [30] IDB. Clean energy auctions in Latin America [R/OL]. (2020-01) [2021-03-15]. <https://publications.iadb.org/en/clean-energy-auctions-latin-america>.

- [31] Energy Storage News. Highview power in Chile, Latin America JV for 'giga-scale' liquid air energy storage projects[EB/OL]. (2020-10-28) [2021-03-15]. <https://www.energy-storage.news/news/highview-power-inks-chile-latin-america-agreement-to-co-develop-liquid-air>.
- [32] Energy Storage News. AES begins work on 560MWh 'largest battery system in Latin America' for solar and wind in Chile [EB/OL]. (2020-10-19)[2021-03-15].<https://www.energy-storage.news/news/aes-begins-work-on-560mwh-largest-battery-system-in-latin-america-for-solar>.
- [33] IDB. Integración eléctrica regional—Oportunidades y Retos que enfrentan los países de América Latina[R/OL]. (2020-01)[2021-03-15]. <https://publications.iadb.org/es/integracion-electrica-regional-oportunidades-y-retos-que-enfrentan-los-paises-de-america-latina-y>.
- [34] OLADE. Estudios SIESUR [EB/OL]. (2020)[2021-03-15]. <http://www.olade.org/estudios-siesur-etapa-1/>.
- [35] GIZ. Batería Carnot, una alternativa posible[R/OL]. (2020-09-16)[2021-03-15]. <https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2020/11/12182946/201112-MG-Chile-Carnot-Batteries-Webinar.pdf>.
- [36] CEN. Analysis of potential conversion of coal-fired plants in Chile [R/OL]. (2021-02-24) [2021-03-15]. <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2021/02/Coal-power-plant-reconversion-ATA-Feb-2021.pdf>.
- [37] GIZ. Reconversión de centrales a carbón en plantas de almacenamiento térmico con energía renovable en Chile[R/OL]. (2020-08-25)[2021-05-10]. https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2020/09/09132125/Resumen-Ejecutivo-Bater%C3%ADas-Carnot-GIZ_DLR.pdf.
- [38] CEN. Estudio de operación y desarrollo del SEN sin centrales a carbón: informe principal [R/OL]. (2018-12) [2021-03-15]. https://www.coordinador.cl/wp-content/old-docs/2019/01/20190102-Estudio_OPyDES-Sin-carb%C3%B3n_Informe_Principal.pdf.
- [39] CEN. Estudio de operación y desarrollo del SEN sin centrales a carbón: parte 1[R/OL]. (2018-12)[2021-03-15]. <https://www.coordinador.cl/wp-content/old-docs/2019/01/20181230-Estudio-OPyDES-sin-carb%C3%B3n-Parte1.pdf>.
- [40] CEN. Estudio de operación y desarrollo del SEN sin centrales a carbón: parte 2[R/OL]. (2018-12)[2021-03-15]. <https://www.coordinador.cl/wp-content/old-docs/2019/01/20181230-Estudio-OPyDES-sin-carb%C3%B3n-Parte2.pdf>.
- [41] CEN. Análisis de la operación y abastecimiento del Sistema Eléctrico Nacional de Chile en un escenario de retiro total de centrales a carbón al año 2025[R/OL]. (2020-09-16) [2021-03-15]. https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2020/09/Informe_An%C3%A1lisis_de_Escenarios_Descarbonizaci%C3%B3n_ver_20200917.pdf.
- [42] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192(in Chinese).

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-05-28。

作者简介:



汪洋子

汪洋子(1989), 男, 博士, 研究方向为能源互联网最优能源管理、电力系统规划等, E-mail: yangzi-wang@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、新能源接入等。通信作者, E-mail: caihao-liang@geidco.org。

孟婧(1983), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、清洁能源综合利用等, E-mail: meng-jing@geidco.org。

宋福龙(1979), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电力系统经济性等, E-mail: songfulong@geidco.org。

王晓辉(1979), 男, 博士, 副教授, 研究方向为交直流混联电力系统稳定与控制等, E-mail: wangxiaohui@sdu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)