

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.07.003

英国新型电力系统建设经验以及对我国省级电网发展启示

Practices of the new power system in the UK and inspiration for the development of provincial power systems in China

王盛¹, 谈健², 史文博¹, 邹风华¹, 陈光¹, 王林钰¹, 惠红勋^{3*}, 郭磊¹
WANG Sheng¹, TAN Jian², SHI Wenbo¹, ZOU Fenghua¹, CHEN Guang¹, WANG Linyu¹,
HUI Hongxun^{3*}, GUO Lei¹

(1. 国网(苏州)城市能源研究院有限公司, 江苏 苏州 215000; 2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 南京 210000; 3. 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室, 澳门 999078)

(1. State Grid(Suzhou) City & Energy Research Institute Company Limited, Suzhou 215000, China; 2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Nanjin 210000, China; 3. State Key Laboratory in the Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China)

摘要: 构建以新能源为主体的新型电力系统是推动电力系统清洁低碳转型, 是落实国家“双碳”战略的重要举措。然而大规模可再生能源的接入可能带来调峰能力不足、局部阻塞加剧和系统惯量缺失等安全稳定运行的挑战。英国与我国部分典型省份自然资源禀赋与电力系统情况相近, 且在应对高比例可再生能源接入问题上做出了有效的先行探索, 因此对我国新型电力系统的建设具有参考价值。首先介绍了英国电力系统发用双侧的转型历程, 以及碳排放、消费侧和能源系统3方面的转型目标。其次, 从政策法规引导、资源基础建设、电力市场机制、输配系统信息化、技术装备应用和调控运行方式6方面梳理了英国在应对高比例可再生能源接入的先行探索。最后, 从因地制宜开发利用低碳资源禀赋、顺应技术发展调整政策法规支撑、优化灵活公平统一开放的市场机制、稳步推进新技术应用与数字化转型和积极探索系统升级与运行调控手段5方面归纳了英国新型电力系统建设的经验, 并以江苏为例, 提出了对我国省级电网的发展启示。

关键词: 新型电力系统; 可再生能源接入; 安全稳定运行; 英国电力系统; 省级电网; 发展启示

中图分类号: TK 01 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0706(2022)07-0017-14

Abstract: Construction of new energy-oriented power systems motivates the clean and low-carbon transformation of energy systems and the realization of the dual carbon target of China. However, the high-penetration renewable energy may bring the secure operation of power systems great challenges, including insufficient peak regulation capability, intense local congestions and the decline in power system inertia. The natural endowments and the power systems in the UK are similar to that in some typical provinces in China. The UK has been a pioneer in tackling the side effects of the high penetration of renewable energy. Therefore, the experience of the UK can provide valuable suggestions for the development of new power systems in China. Firstly, the transformation process of the power systems in the UK on both supply and demand sides and the transformation goals in terms of carbon emission, energy consumption and energy systems are introduced. The advanced practices of the UK in dealing with renewable energy penetration include the guidance of policies and laws, the construction of fundamental infrastructures, the reform of the electricity market mechanism, the digitalization of power transmission and distribution systems, the application of edging technologies and equipment and the operating adjustment for the power systems. The experience of the UK's new power system construction is summarized and divided into five aspects: developing the low-carbon resources according to local conditions, adjusting policies and regulations in line with cutting-edge technologies, making a flexible, fair, unified and open market mechanism, advancing the application of new technologies and digital transformation and facilitating system upgrades and operation adjustment. Taking the power grid of

Jiangsu Province as the example, the inspiration for the development of provincial power systems in China from the UK's experience is expounded.

Keywords: new power system; grid connection of renewable energy; secure and stable operation; power system of the UK; provincial power system; inspiration for the development

0 引言

2021年3月15日,中央财经委员会第九次会议明确提出“构建以新能源为主体的新型电力系统”,研究能源电力领域实现“双碳”目标的发展方向、发展目标和发展路径^[1]。各省发改委、国家电网公司等相关部门正积极落实该战略在典型省份的实施。以江苏为例,作为全国重要的负荷中心和典型电力受端省份,江苏近年来依托丰富的滩涂资源和海上风能资源,已构建了目前国内最大的海上风电基地,并持续有序推进陆上光伏和风电资源的开发。预计到“十四五”末,江苏包括海上风电在内的可再生能源总装机规模将达55 GW,占比达30%^[2]。该举措有力的支撑了全省的能源供应保障和能源结构调整,为构建新型电力系统奠定了良好基础。

构建“清洁低碳”的新型电力系统,必须做到安全先行。由于国内外能源形势的复杂变化与疫情影响,在2022年1月发布的《“十四五”现代能源体系规划》中,再次把“保障安全”作为首要基本原则,提出“坚持先立后破”^[3]。因此,在建设新型电力系统的过程中,必须直面大规模可再生能源接入对电力系统的运行带来的挑战。其主要包含以下几个方面。

首先,可再生能源具有波动性和一定程度的反调峰特性,且集中式可再生能源还具有一定程度的远离负荷中心的特性。例如,作为江苏未来可再生能源装机增长主力的海上风电主要集中在盐城、南通等地,远离用电负荷极大的苏南地区^[2]。这为电网供需双侧在时空上的匹配带来了困难,增加了对调节资源的需求,增大了局部可再生能源的消纳压力与省内关键断面的传输压力。其次,我国电力市场改革仍处于初期,全国各省份现货市场发展不均衡。作为第二批现货市场试点,江苏的政策法规与市场机制尚未完全匹配与落实,分区电价尚未完全接入,可再生能源仍以中长期电量交易为主^[4]。这导致可再生能源自主平抑波动动力不足,市场主体调节资源潜力未得到充分挖掘。此外,可再生能源机组多为电力电子化下的非同步机组,“双高”电力系统下系统惯量下降,短路电流水平不足,分区电压稳定问题突出,而由于数字化不充分导致电网可观可控能力不足,为电力系统的安全稳定运行埋下隐患。

英国的能源外部能源发展环境、可再生能源资

源禀赋与我国典型沿海省份具有一定相似性,同样面临外来能源资源增长空间受限、拥有丰富的海上风电资源等情况,且其可再生能源发展走在世界前列。近期英国发布了能源系统脱碳计划,并着重说明了可再生能源,尤其是海上风电与电网灵活调节资源的发展路径^[5]。因此,英国能源电力系统的发展模式与运行方式对我国典型省级电网有较大的借鉴意义。

在此背景下,本文首先梳理了英国能源电力系统的转型过程、关键时间节点与转型目标。其次,从政策法规引导、资源基础建设、电力市场机制、输配系统信息化、技术装备应用和调控运行方式等方面,阐述了英国对高比例可再生能源接入所带来的能源安全问题的应对方式。最后,以江苏作为典型省级电网,从英国与江苏的差异性出发,提出对江苏电网的发展经验启示。

1 英国电力系统转型历程与目标

1.1 转型历程

1.1.1 发电侧

自21世纪以来,英国电力系统转型呈现出几个关键特征^[6]。

(1)可再生能源装机容量与发电量占比大幅上升。截至2010年,英国化石燃料总发电容量基本稳定在80%左右。此后,可再生能源,尤其是风电和光伏装机容量不断增加,并在2019年达到47 GW,首次超过化石燃料^[7]。

(2)核电不断退出。最新一座Sizewell B核电站于1995年投运。随后几年内英国不断关闭了剩余8座Magnox反应堆,其余7座计划于2035年关闭。2019年的核电装机容量为9.2 GW,比2000年降低26%。

(3)天然气、生物质能对燃煤发电替代作用显著。2019和2020年英国关闭Cottam等4座燃煤电厂,且计划在未来3年内进一步关闭仅剩的4家燃煤电站,或转换为燃气或生物质能。作为英国最大的生物能源发电商,Drax公司自2013年以来已将其4个燃煤机组转化为生物质发电。全英生物质能发电总装机容量为7.8 GW^[8]。

2000—2020年英国发电量变化如图1所示。图中可再生能源的发电容量为折算后的容量。由于可再生能源发电的间歇性,英国政府统计的发电容量小于装机容量,通过比例因子来计算。对于风

电、光伏和小型水电(≤ 5 MW)其比例因子分别为0.430,0.170和0.365。

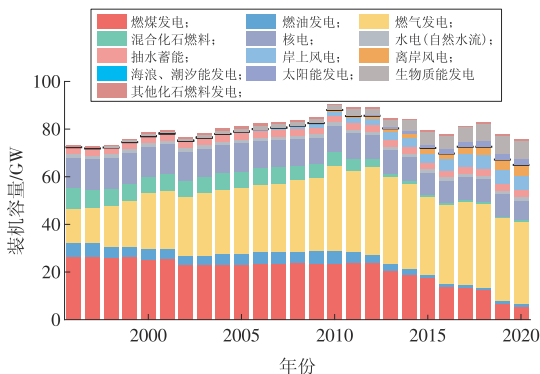


图1 2000—2020年英国发电量变化^[1]

Fig. 1 Electricity generation trend in the UK from 2000 to 2020^[1]

1.1.2 用电侧

自21世纪以来,英国全社会用电量出现先上升后下降的态势,并在2005年左右达到顶峰^[9]。受疫情影响,用电量在2020年达到新低330 TW·h。家庭用户占总电力需求的近1/3,相较2019年增加了2.7%,工业和商业分别占25%和19%,分别下降了1.3%和1.7%。2020年英国用电结构如图2所示。

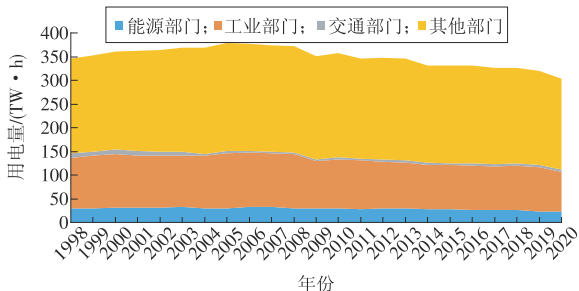


图2 2020年英国用电结构

Fig. 2 Electricity consumption mix in the UK in 2020

1.2 转型目标

1.2.1 能源系统碳排放目标

根据2008年发布,2019年修订的《气候变化法案》规定,英国政府必须分阶段提前制定未来相应5年的碳排放预算(Carbon Budgets)^[10]。根据碳排放要求,英国国家电网(National Grid,NG)在2021年发布的未来能源场景(Future Energy Scenarios,FES)报告中对能源系统如何应对碳排放目标进行了响应^[11]。NG设置了基准场景、消费转型场景、系统转型场景和率先场景4个场景。其中,后3个场景皆可实现2050年碳中和目标。在率先场景中,可在2047年实现碳中和,在2050年前达到年平均碳排放-28 Mt CO₂e。基准场景无法实现碳中和,且在2025年左右背离碳排放预算。

1.2.1 能源消费转型目标

英国在消费侧转型的基本思路是通过投资智

能化、数字化技术优化能源需求模式,并通过商业模式发展,提升需求侧灵活性^[11]。

(1)在需求侧资源方面,目前英国工商业用户能提供约1 GW的需求响应容量,居民与小型非居民用户仍处于起步阶段,但其相应的智能仪表安装规模已达2 420万个。英国预计2025年左右使所有规模的消费者具有通过智能化设备与服务为系统提供调节资源的能力与机制,并在2050年率先场景中将需求响应容量扩大至13 GW。

(2)在建筑供热方面,英国政府在2028年前计划热泵安装量达到每年60万个^[12]。此举虽会导致电力负荷大幅提升,但同时提升了建筑的需求响应能力。预计2050年可降低发电和网架容量投资年均50亿英镑,并反向作用于消费者降低其能源成本。

(3)在电气化交通方面,英国将在2030—2035年间逐步禁售汽油、柴油和混动私家车与轻型货车,并提供28亿英镑支持业界和消费者向清洁汽车转型^[13]。预计英国2030年电动汽车保有量将超过1 500万辆,在2030年增加电力负荷约30 TW·h,在2050年增加65~100 TW·h,分别占系统总耗电量的7.50%~10.00%和7.22%~16.67%^[14]。同时,促进电动汽车参与电力系统运行,在率先场景中电动汽车对电网(Vehicle to Grid,V2G)容量达到1 GW,2050年参与率达83%以上,容量最高可达39 GW。

1.3.1 能源系统转型目标

(1)在发电侧,英国政府承诺在2025年前关闭所有煤电,并在2030年前大幅减少天然气的使用量^[14]。预计到2050年,清洁氢能、长续航储能设备等低碳供能方式将以较低成本满足负荷峰值,缓解发电侧对天然气的依赖。

(2)在储能侧,英国政府将储能分为短期储能与长期季节性储能。锂电池等短期储能通常运行时长为30 min~4 h,为电力系统提供瞬时响应,其成本从2010年至今下降了90%以上。长期储能可运行数天、数星期至数月,通常用于例如无风和低温等季节性调峰,例如抽蓄、压缩空气、液化空气、液流电池、电制氢贮存等。部署长期储能的重大挑战是商业投资回收问题。目前英国共拥有4 GW储能,包括3 GW抽蓄和1 GW锂电池储能。还有10 GW,包括8 GW电化学储能和2 GW抽蓄正在建设中。

(3)在系统联络方面,目前英国建成6.0 GW联络线,仍有3.8 GW正在建设中,6.1 GW在电力天然气市场管理办公室(Office of Gas and Electricity Markets,Ofgem)的审查中。英国政府基于欧盟与英

国交易合作协议(EU-UK Trade and Cooperation Agreement)与欧洲其他国家合作,在2030年前实现至少18.0 GW的联络线容量,以便在2050年前减少199 Mt的碳排放。

2 英国新型电力系统建设举措

2.1 明确政策法规引导

英国政府注重政策规划的系统性引领作用。自1997年签署《联合国气候变化框架公约的京都议定书》起,英国政府已出台一系列能源转型政策。近年来随着国际舆论环境的变化,能源低碳转型相关政策出台更为频繁,如图3所示。除政策文件外,英国政府同时会进行定期咨询,发布一系列竞争性资金等,例如发布2021年氢能生产成本与低碳氢能商业模型设计等,为民众、社会资本提供参考^[15-17]。

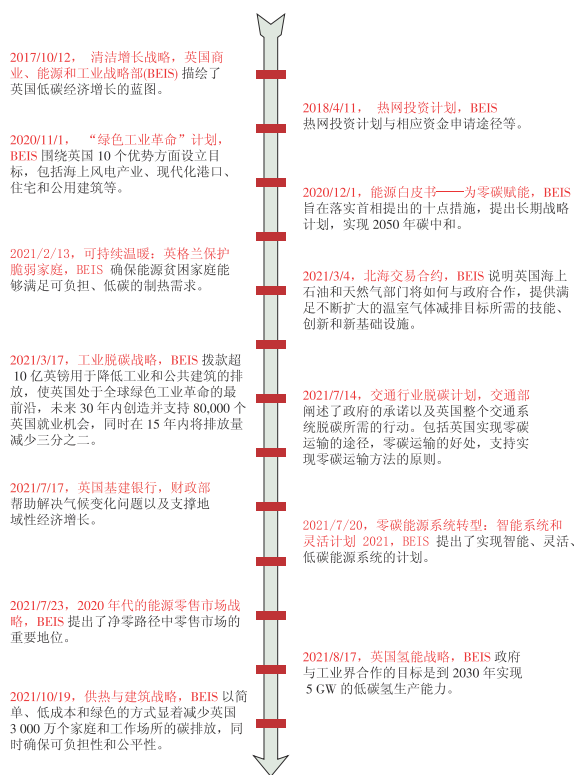


图3 近年英国政府新型电力系统相关政策

Fig. 3 Recent policies of the UK government for the new power system

在促进可再生能源建设与消纳方面,英国政府经历了从可再生能源义务消纳制度(Renewable Obligation, RO)^[18]到上网电价补贴机制(Feed-In Tariffs, FIT)^[19],再到差价合约机制(Contract for Difference, CfD)^[20]的变化。3个政策具有各自适用范围。在2017年前,RO是英国政府支持大型可再生能源项目的主要政策。对于小型可再生能源与低碳发电技术则更多采用FIT,要求电力供应商对符合要求的可再生能源电源的发电量和上网电量

进行固定补贴,这与我国的分布式光伏发电补贴政策较为类似^[21]。

CfD为英国促进可再生能源建设运行市场化较为成功的尝试之一。由于其招标机制引入了竞争,所以合同价格能比固定补贴的配额制更好地体现真实发电成本,有助于降低可再生能源补贴和消费侧费用。但是,CfD带来的收益的确定性也可能会增加其发电商在市场上报价的随意性。尤其是随着未来可再生能源发电装机容量的大幅上升,该行为可能会扭曲市场价格信号,增加系统运行成本。因此,英国政府也一直考虑完善CfD的短期机制,权衡开放的范围、数量、金额等,使其能更好地在提升关键发电容量和系统高效运行中取得平衡。例如,英国之前的CfD仅包含海上风电等新兴技术,而把陆上风电和光伏归类为成熟技术并排除在外。但是近年来,为了助力“净零排放”目标的实现,英国2021年CfD招标重新向陆上风电和光伏发电开放,从而在下一轮2021年晚期的竞拍中翻倍装机容量至12 GW。英国计划通过差价合约来支持60%的2030年英国海上风电项目交付^[5]。

2.2 激励调节能力建设

2.2.1 发电侧资源

在发电侧,英国计划通过碳捕获、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS),从而在有限的碳排放预算中保留一定体量的燃气发电,以提高高比例可再生能源下的发电侧调节能力^[14]。英国将支持部署至少在2030年前部署一个燃气发电的CCUS工程,同时构建必要的市场激励商业框架,为未来的电力CCUS工程提供途径,例如着手推进生物能碳捕获及储存(Bio-Energy with Carbon Capture and Storage, BECCS)等,实现生物质能发电的负排放。同时,英国政府正咨询更新天然气法案,通过征收碳排放税的方式通过价格向消费侧传导,从而促使天然气公司通过管道掺氢等方式,促使天然气源头脱碳。英国计划在天然气管道中加入20%左右的氢气,以及建设用于100%输送氢气的管道。目前英国已部署大量绿氢项目,同时与工业界合作,计划于2030年前计划实现5 GW低碳氢能生产能力,从而扩大氢能发电中的占比。

2.2.2 智能楼宇

智能楼宇的调节容量的物理来源包括智能设备(热泵、空调及其控制系统、电动汽车等)与储能(包括设备储能、管网储能与建筑空间储能)等,其基础是较高精度的智能量测与控制系统。基于数据、算法等要素,英国政府在实现脱碳路径的同时也考虑了楼宇的灵活性提升措施,包括如下几项

内容^[14,22]。

(1)加速接入实时价格。目前大多数用户采用的仍是固定价格。英国计划在居民侧加速推进半小时结算制,以驱动用户削峰填谷。同时,扩大终端电力的能源消费占比,依托智能仪表、智能获利(Smart Tariffs),即用户通过安装智能仪表获取变动的能源价格,从而调整其自身用能,提供高精度控制与量测方式,在减少碳排放的同时提供节约能源账单的机会。预计该措施2045年前能给能源消费者带来16亿~46亿英镑的收益。英国已开展部分基于实时电价机制,通过输出(例如光伏余电上网)、负荷控制(电动汽车充电控制)等手段参与售电与平衡服务获取利益的试点。例如,通过智能比对(Smarter Comparison)工具,能为消费者寻找最合适的能源消费方式;通过Octopus Energy公司的Agile Octopus Tariff(Octopus Energy公司推出的一项能源价格计划,能源价格30 min变动一次并与批发市场联动),基于分时电价机制管理不同时段的能耗,可以节约120英镑/a的能源成本;通过GEO公司的Core4Grid,基于优化算法响应电力系统信号,控制用能与储能运行方式,自2020年3月投入运行起,示范区家庭向电网输送电能约30 MW·h。

(2)加强智能楼宇灵活性评估。英国政府加强与业界合作,将智能控制与灵活性评估纳入标准评估流程(Standard Assessment Procedure)和简化建筑节能模型(Simplified Building Energy Model)中,并应用于建筑的管控、能源效率证书(Energy Performance Certificates)的发放中。同时,提出“智能化预备程度指标(Smart Readiness Indicator)”来评估建筑实现灵活性的能力。

(3)加强建筑灵活性的硬件支撑。在制定未来家庭与建筑标准(Future Homes and Future Buildings Standards)中,考虑储能、灵活供热系统、电动汽车终端重点设施等标准的制定,使其具备需求响应所要求的量测和控制能力。

(4)加强对建筑供热负荷灵活性的挖掘。对于建筑供热,英国政府正在考虑其向清洁能源替代(将天然气替换为电热泵、氢能、甲烷等方式)以及集中供热方向转型。在2025年,英国可能停止新建家庭天然气管道的接入,天然气的碳排放成本也可能从生产侧传导至用户侧。因此,建筑供热有基础也有意愿通过灵活运行降低成本与获利。英国政府计划在2025年前投入1.22亿英镑用于热网转型计划(Heat Network Transformation Programme)来推出新的供热系统^[23]。同时投资3.2亿英镑热网投资计划(Heat Networks Investment Project, HNIP),利用

基金和贷款加速市场孵化^[24]。发展低碳热源,例如废热回收、大型热泵、太阳能热水器以及可能的氢能锅炉。加快电热泵的投资安装,计划在2028年前达到每年600 000个。

2.2.3 电动汽车

在系统与区域级别,英国政府计划基于电价和系统容量信号管理电动汽车的充放电行为,提升系统的灵活水平。具体措施包括如下几项^[5,14]。

(1)推动电动汽车充电桩及其支撑配网的建设。对于私人充电桩(包括家庭、工作场合等),咨询是否立法确保其必须拥有提供智能充放电容量的能力。同时,英国首相宣布13亿英镑加速包括公共设施的充电桩建设,并加快相关电力系统配套设施建设。充电桩的安装与运行信息必须对相关主体(例如系统运营者)透明。

(2)发展电动汽车-X(Vehicle to X)技术,包括对电网(V2G)、家庭(V2H)和商业(V2B)等。同时,基于实时电价机制,确保电动汽车参与运行获利的机会。确保电动汽车用户参与电网运行的盈利机会等信息顺畅和透明,同时确保信息安全和物理安全。例如,英国通过Ovo Energy公司的Sciurus项目,建立了大规模的V2G示范,通过Kaluza平台控制充放电策略支撑来电网运行。

(3)降低换车成本,增加调节容量,支持电动汽车供应链发展。英国首相宣布启用5.82亿英镑用于减少零碳排和极低碳排汽车购买者的换车成本,近5亿英镑用于未来4年的大型电动汽车生产线以及其他重大技术的发展。

2.2.3 新型储能

英国在储能方面的措施包括如下几项^[14]。

(1)规范储能定义。目前,出于管理需要,英国仍然把储能定义为发电系统的一部分。规范储能的定义,有助于设置市场准入规则,确立成本分摊标准。2017年英国政府与Ofgem发布了第一部智能电网灵活性计划(Smart Systems and Flexibility Plan),计划2022年前全部落实来移除储能的准入成本。

(2)降低储能进入市场、参与运行的门槛,降低政策性费用。尤其是分布式储能,同时推动其参与区域市场,通过一定形式免征储能相应主体的气候变化税(Climate Change Levy)。

(3)鼓励光储互动。政府启动智能上网保障(Smart Export Guarantee)来激励光储协同选址,同时Ofgem提供选址指导,来满足可再生能源义务和上网电价补贴计划。

(4)投资促进新型储能技术的研发。投资1亿

英镑用于除锂电池,抽蓄等已知技术外的新型储能。分别投资 2 000 万、900 万和 3.17 亿英镑用于支持大规模储能的部署、储能成本降低和法拉第储能挑战(Faraday Battery Challenge)^[25]。通过英国基建银行(UK Infrastructure Bank)与业界合作来投资储能项目。

(5)增强价格信号对大规模、长期储能的引导作用,促进其投资与回收。增强对储能在电网运行中的作用和价值评估,针对该类储能技术较新、商业化不足等特点,政府提供 6 800 万英镑竞争性资金,通过零碳排投资计划(Net Zero Innovation Portfolio),加速首台首套长时间储能商业化^[26]。研究关于容量市场制度对长建设周期储能(例如抽蓄)的支撑作用以及与脱碳计划的契合度。

(6)建立基于储能的新型平衡服务和调频服务框架。在 2023 年 3 月前,电力系统调度机构(Electricity System Operator, ESO)将推出常态化、可依靠、可盈利的市场机制。

(7)考虑免征收小型储能以及电动汽车用于电网调节部分的电能的终端消费税,并考虑其他商业税的改革。

2.3 推动市场机制改进

随着低边际成本、高不确定性的可再生能源大规模接入,电网产生了大量的平衡服务需求。因此,市场的价格信号逐渐由发电侧的燃料的成本导向转化为各类灵活资源服务的价值导向。英国目前灵活性提供的主要来源为批发市场。近些年,各类新兴市场形式的重要性逐渐增长,包括平衡市场、辅助服务市场和区域能源市场(Local Energy Market),来确保网络容量管理、系统实时平衡与稳定性等需求。在 2020 年,这部分新兴市场价值超 15 亿英镑,约为批发市场的 15%^[14]。

2.3.1 容量市场

英国目前容量市场坚持“技术中立”原则,同时允许发电侧(包括可再生能源发电)和需求侧符合市场申请资格的容量入场。同时,电力系统运营商通过制度修订,确保需求响应资源参与容量市场获利更加便利,包括更加简便的量测要求、签订长期托管协议、更低的容量准入门槛(1 MW)等。截至目前,容量市场支撑了 13 GW 的发电和联络线,以及 900 MW 的电力储能的新建。在最近的第 4 轮的容量市场拍卖中,超过 1 GW 的需求响应容量中标^[14]。

但在目前,英国的容量市场还是由高碳排放的化石燃料机组主导,这可能扰乱政府脱碳政策,扭曲市场信号。2020 年,化石燃料机组在平衡市场和容量市场的中标容量比例分别达到了 80% 和 60%,

老旧的小规模煤电企业比天然气发电企业更有成本优势,因此容量市场政策对高污染的企业反而有可能带来激励作用^[14]。因此,英国计划将碳排放约束纳入容量市场中,并进一步计划在 2023 年前将要求竞标者充分提供其资产和服务的碳排放强度等信息,并提供预测和滚动修正。同时,英国也定期对灵活资源容量的投建进行定期回顾审议,确保建设的正当性。

2.3.2 现货市场

目前,在全国或跨国批发电能市场的范围内,英国可再生能源发电通常通过场外中长期双边交易、日前集中交易、日内的集中和撮合交易等多轮次的市场衔接时序,使得市场参与者能够在实时电力平衡前最大限度地调整可再生能源出力的预测误差^[27]。

英国的可再生能源机组能够在欧盟范围内的日前市场进行交易与统一出清^[28]。日前市场提供丰富的交易品类。例如在英国市场提供小时、半小时以及能量块等交易品种,在北欧电力市场 Nordpool 还提供灵活能量块等,并可以设置各个报价之间的耦合关系并上报价格限制、最小接受比例等限制。通过算法自动出清,不仅可以决定价格,也可以决定成交份额,甚至对于部分灵活块能够决定成交时段。这为可再生能源机组以及需求侧资源等具有不同物理特性的设备在报价时更加灵活,更能贴近其边际成本,且提高成交率。

日内交易只能在英国范围内开展,交易品类包含 4 h、2 h、1 h 和 0.5 h,截至实际调度执行前 1 h 可以进行发、用电双边连续不间断交易^[29]。交易采用订单簿机制,基于申报价格、成交条件、联络线容量等因素进行快速匹配交易。通过连续撮合的方式能够让市场参与主体经历多次的报价与交易结果闭环反馈,使得交易产品的市场价格尽量接近边际成本,减少投机现象。另一方面,多轮次交易可以减少可再生能源因其不确定性导致的不匹配的现象,提升成交份额。

英国将计划进一步发展更为接近实时的市场,促进多元交易主体接入,鼓励参与设备资源的自动化控制。ESO 将平衡服务的提供主体准入扩展至各类灵活资源,同时将所有灵活服务集中至统一平台,在 2023 年计划建立为灵活资源响应和备用建立的一个独立的日前市场。

2.3.3 区域能量市场

灵活资源的调节能力除了广泛从全国市场进行响应外,对于分布式可再生能源的消纳多呈现出区域特性,且需要储能等分布式资源、热网、氢能、

交通、建筑等多要素共同发力。因此,英国将部分灵活性解决方案由区域能源市场实现,旨在区域范围内在贴近实时的层面平抑发用电。由于区域层面物理资源的多样性,英国并无统一的区域能源管理方式与制度,而是在符合业界和政府的基本准则的前提下,通过分布式交易,或聚合参与批发市场等方式创造价值从而获利^[30]。

英国通过工业战略挑战资金(Industrial Strategy Challenge Fund)^[31]和能源革命繁荣计划(Prospering from the Energy Revolution Programme)^[32]投资了超过 1 亿英镑用于发展区域智慧能源系统。例如,截至 2020 年 11 月,Cornwall 区域能源市场达成了 310 MW·h 总计 1 670 万英镑的交易,减少温室气体排放近万吨^[33]。2020 年全英国配网运营商(Distribution Network Operator,DNO)总计通过聚合分布式储能签订了 1.2 GW 的灵活性调节服务^[14]。下一阶段英国对于区域能源市场的改进主要体现在以下几个方面。

(1)通过能源数字化战略(Energy Digitalisation Strategy),有序开放系统数据。英国商业、能源与工业战略部门(Department for Business, Energy & Industrial Strategy,BEIS)通过能源创新计划(Energy Innovation Programme)将提供 400 万英镑资金支持数字化市场交易平台的开发。

(2)截至 2023 年 3 月前,建立示范区域能源商业模式和工具系统。通过区域灵活资源交易和过网费改革,改进区域价格信号。标准化交易品类与交易合约,简化交易流程。

(3)改进平衡机制、辅助服务,进一步扩大小型资源的参与范围。同时,建立 ESO,DNO 和市场主体共同参与的全国和区域市场的协调运行机制,推动区域市场和批发市场的直接交易和结算。

2.4 落实系统数字化转型

英国电力系统包含 ESO、输电系统所有者(Electricity Transmission Network Owners)和配电系统所有者(Electricity Distribution Owners)。其中,NG 拥有大部分的输电资产,并承担 ESO 的职责。以下主要从运营商、输电商和配电商 3 个层面,分别说明他们的数字化战略。

2.4.1 电力系统运营商

在 2019 年 12 月 ESO 提交的数字化战略之后,在提交 RIIO-2 (Revenue=Incentives+Innovation+Outputs)业务计划的同时,Ofgem 于 2020 年 6 月进行了反馈。RIIO-2 业务计划为 Ofgem 对电力、天然气系统网架运营商的网架投资收益的控制规定。RIIO-2 代表基于 RIIO 模型,即核准收益包含激励、

创新和贡献的收益核准模式,目前已更新至第 2 轮。ESO 于 8 月与 Ofgem 举行了双边会谈回应了改进建议,并发布了 2020 年的数字化战略。英国 ESO 发布的数字化战略包括“4 大主题”与“3 大支柱”。政府能源数据工作组(Energy Data Taskforce,EDTF)建议的开展范围如图 4 所示^[34]。

	主题 1: 可靠、安全、及时的系统运行	主题 2: 智能、可持续的市场	主题 3: 通过竞争释放消费者价值	主题 4: 可持续的未来综合能源系统
支柱 1: 数据开放、数字化市场	EDTF 建议 2: 最大化数据价值			
	EDTF 建议 3: 数据可视化			
	EDTF 建议 4: 资产注册的协调			
	控制决策的透明性	统一市场平台,数字化系统运行准则		能源枢纽,规划与超限数据交换
支柱 2: 通过数字化技术建设核心竞争力	运行和市场数据接口			
	EDTF 建议 1: 能源系统数字化			
	EDTF 建议 5: 基建和资产的可视化			
	能源预测,供需平衡控制,数字孪生	市场数据,市场仿真分析	网架建模	全系统运行特性建模与分析,能源系统数据和分析
支柱 3: 组织文化与工作数字化转型	新能力			
	技能培训			
	合作创新的文化氛围			

图 4 英国电力系统运营商的数字化战略

Fig. 4 Digitalization strategy of National Grid ESO

2.4.2 电力传输线路网架所有者

英国共有 3 家电力传输公司,包括英国国家电网公司(National Grid Electricity Transmission, NGET)、苏格兰水电传输公司(Scottish Hydro Electric Transmission, SHET)和苏格兰电力传输公司(Scottish Power Transmission, SPT)。其中规模最大的 NGET 的数字化战略主要在以下几方面开展^[35]。

(1)数据库与数字平台。NGET 正在通过已建立的数据工作组(与 BEIS,Ofgem 和 Innovate UK 合作,Innovate UK 为英国研究与创新机构 United Kingdom Research and Innovation Organisation 的一部分,并非政府部门,其职责是为创新的产品和服务提供资金与支持)与能源网架机构(Energy Networks Association,ENA)合作,进行基建与资产的可视化,并提供行业标准格式的可下载数据集,免费开放使用,为社会资本的投资提供决策支撑。

(2)消费侧并网。建立 ConnectNow 项目提供面向电力连接客户的并网申请系统。利用 NGET 核心系统的数据,客户可以看到系统实时状态信息。该系统支撑的项目中 90% 为清洁能源。

(3)传输侧数字化。NGET 与 Copperleaf 公司合作建立资产投资规划和线路优化的统一平台,能够通过算法优化检修与设备投资计划,减少停电损

失,提高项目交付效率。NGET的设备状态检测与物联网技术,能够通过传感器监控关键资产变化,例如温度和压力等。基于人工智能来寻找短期和长期趋势中的异常模式,以提供故障前识别。

2.4.3 配电运营商

英国主要有6家配电系统的产权商,下面以苏格兰配电(Scottish Power Distribution,SPD)为例进行说明。SPD提出了涵盖九大要素的电网数字化转型的策略分析框架^[36]。

在此框架下,SPD开展了3个代表性的数字化工程,包括FITNESS工程,通过集中式双向总线通信系统链接高压设备、保护系统和数据采集与监视控制系统(Supervisory Control And Data Acquisition,SCADA),对传统变电站进行数字化改造,缩短了设备维护和故障恢复的时间^[37]。在EV-Up项目中,借助Ofgem的电网创新基金(Network Innovation

Allowance,NIA)资助,通过电动汽车出行的用户画像,提高用户用电需求预测的准确性,推动相关配套低压基础设施的升级换代^[38]。

在FUSION项目中,基于通用智慧能源框架(Universal Smart Energy Framework,USEF),建立需求侧灵活性资源可以灵活交易的本地市场,将推动SPD公司由电网运营商向电力系统运营商转变^[39]。

2.5 部署先进技术装备

英国新型电力系统建设下可以满足系统需求的现有技术和新技术总结见表1。目前英国电力系统每年花费大约300亿英镑。到2050年,这可能会增加到400亿~600亿英镑^[40]。无论未来最佳的技术组合是什么,相较于发电组合优化的成本,该部分成本可能不足1%,但能起到关键的作用。过去这些系统服务多是在双边基础上采购的,然而,最近ESO已转向通过竞争性招标或市场采购服务。

表1 新型电力系统关键技术装备及其功能^[40]

Table 1 Key technologies and their functions in constructing the new power system^[40]

技术/系统需求		惯量	短路电流	无功和电压控制	系统恢复
现有技术	同步机	能	能	能	可能
	飞轮	能	可能	能	不能
	静态补偿器	不能	可能	能	
	抽蓄	能	能	能	能
	虚拟同步机	可能	可能	可能	可能
新技术	带储能的电力电子设备	可能	可能	可能	可能
	氢气机组	能	能	能	能
	带CCUS的生物质能	能	能	能	能
	带CCUS的燃气机组	能	能	能	能
	其他电力电子设备	不能	可能	可能	可能

2.5.1 柔性高压直流输电

英国与周边国家多通过联络线进行弱联系。由于高压直流输电(HVDC)在异步运行、长距离、功率控制和稳定性控制等方面的优势,因而被广泛采用。从2017—2019年,英国对外HVDC的容量翻了一番。到2027年,计划进一步部署21个连接到英国电网的HVDC链接。

其中,英国北部Shetland岛是中国在英国建设的典型柔性直流输电工程之一。与传统基于换相换流器(Line-Commutated Converter,LCC)的HVDC相比,柔性直流输电方式输出电压电流谐波含量低,不存在换相失败风险,有功无功可实现快速解耦控制^[41]。这使得其在可再生能源并网、多端直流网络构建、弱系统联网、孤岛供电等场合具有显著的优势^[42]。

2.5.1 虚拟同步机

随着非同步的可再生能源发电机组接入,维持

系统稳定变得愈发困难。英国传统的非同步机组多采用锁相环(Phase-Locked Loop,PLL)技术,该控制技术依赖对系统网架的量测具有较高要求,且在系统收到干扰时跟踪电压和频率的能力有限^[43]。虚拟同步机作为PLL的替代手段,能够提供一些传统同步机组的特性,包括提供惯量,维持系统频率稳定,改善短路电流水平,限制矢量偏移和频率变化率(Rate of Change of Frequency,RoCoF)等^[44]。

英国国家电网对不同时间常数的虚拟同步机部署对系统的影响进行了测算(更大的时间常数意味着更高惯量,意味着需要更多储能及其成本)。在2020年,如果无部署,则50%的时间内系统惯量低于165 GVA;如果在所有新装机的非同步电源处都部署2 s时间常数的虚拟同步机,则惯量可提升至185 GVA;若时间常数改为5 s,则惯量可提升至245 GVA,最终的部署策略将取决于后续的成本效益评估结果。

自 2018 年以来,英国国家电网正在更改电网运行准则来适应虚拟同步机等相关技术,并在 2018—2019 年开展了 Virtual Synchronous Machine Demonstrator (45.6 万英镑)^[45] 和 Hybrid Grid Forming Converter (29.2 万英镑)^[46] 2 项实验室控制级别的虚拟同步机控制技术以及示范。同时,探索了虚拟同步机和 Power Park 基建的配合模式,并计划开展电网级别的基于储能的虚拟同步机的性能测试与示范。在 2025 年前,英国国家电网公司将通过 Stability Pathfinder 计划,通过长期合约等方式,在商业模式上与网架拥有者一同探索虚拟同步机的服务提供模式,并探索进一步参与更加接近实时市场的方式^[47]。

2.6 优化调控运行手段

优化系统调控运行手段是应对可再生能源接入下“双高”电力系统的另一手段。以下主要从英国对低惯量系统的运行方式、频率管理以及通过联络线进行动态控制等 3 个方面说明英国 ESO 的运行调控改进手段。

2.6.1 改进低惯量系统运行方式

随着新能源接入,英国的电力系统惯量也持续下降,预计在接下来 10 年内最大下降 46.67% 左右^[48]。目前对于低惯量系统,英国的管理思路为限制大系统的频率损失和增加系统惯量两方面。未来,在 Accelerated Loss of Mains Change Program 中,NG 和地方配网公司计划共同将 RoCoF 的阈值从 0.125 Hz 提升至 1.000 Hz,时间延迟设置为 500 ms^[49],这将提升 RoCoF 和所能承受的发电损失的数值。

在低惯量系统中,需要更加快速的频率响应。因此,需要从其他灵活资源处进一步挖掘频率响应能力,包括风光储和可再生能源等。在未来平衡服务(Future of Balancing Services)中,英国提出了新的动态响应产品框架^[50]。在英国 2019 年完成的加强频率控制能力项目(Enhanced Frequency Control Capability Project)中,通过促进控制系统的发展,提升快速响应服务能力来减少同步机容量^[51]。

相对于高惯量系统,低惯量系统可能会增加触发低频减载场景的风险,并且在过程中造成过冲现象(即频率过高)。在 2017 年,英国 NG 在其系统运行性框架(System Operability Framework, SOF)报告中罗列出了原本低频减载所面临的挑战。在预设的多场景衔接间隔等方面进行改进。同时,在系统解列场景中,区域性的惯量将作为区域性低频减载的考虑之一。此外,当系统惯量下降时,其他支持系统稳定性的参数,例如短路电流水平也会下降。因此,英国 NG 通过稳定性探索(Stability Pathfinder)项目来确立所需的产品和服务^[52]。

2.6.2 优化频率管理机制

英国国家电网的频率管理义务包含以下 2 种场景:(1)故障前或稳态;(2)故障后或暂态频率偏差。其中,供给安全和质量标准(Security and Quality of Supply Standard, SQSS)^[53]文件中详细描述了英国国家电网在频率控制方面的法律责任。系统惯量的下降导致频率波动加剧且难以预测,因此英国国家电网公司需要更新其响应(Response)和备用(Reserve)服务。英国 2025 年的频率服务分类与需求见表 2,并假设惯量低至 96 GVA·s。

表 2 频率服务分类与需求^[54]
Table 2 Category of demand and the frequency response service^[54]

频率服务	系统需求	容量要求
动态调节	在±0.5 Hz 的法定限值内调节稳态频率	最高 300 MW
动态控制	将标准事件下的频率控制在频率风险和控制报告(FRCR)给定的标准范围内	最高 1 400 MW
快速备用	60 s 内将频率恢复到法定范围(±0.5 Hz)	最高 1 400 MW
慢速备用	在 15 min 内将频率恢复到工作范围(±0.2 Hz)	最高 1 400 MW

在动态管理方面,NG 预计在 2022 年启动动态管理与调节(Dynamic Regulation and Dynamic Moderation)服务,预计购买 300 MW 作为稳态下的频率调节资源^[55]。在动态控制(Dynamic Containment)方面,购买量由系统的惯量和最大损失的体量决定,因此取决于 FRCR 的评估结果^[56],预计可能最高购买 1 400 MW^[57]。在频率恢复(Recover)方面,新的快速恢复服务(Quick Reserve)将在 2023 年启动,预计在 2025 年前购买 1 400 MW

该服务^[58]。在频率回归(Restore)方面,其目前主要的服务为短期运行备用(Short-Term Operating Reserve, STOR)^[59]。在此基础上,2022 年计划启动转型为新的慢备用服务(Slow Reserve Service)。与恢复服务类似,在 2025 年前预计购买 1 400 MW,也可作为故障前频率管理和主动型平衡管理的辅助资源。在资源替换方面,则主要由市场参与主体自发引导。

2.6.3 挖掘基于联络线的动态控制资源

在 2020 年英国动态控制项目启动后,NG 就曾和联络线的拥有者和运营商讨论过其参与方式。政府要求 ESO 在 2023 年年底前识别并减轻联络线参与动态控制市场,以及其他辅助服务和平衡市场的阻力。联络线及其相关方参与频率控制主要存在以下阻碍^[60]。

(1) 与其他动态控制的参与方不同,联络线无法保证其一定能够提供其在市场竞标获得的辅助服务能力。因此,ESO 需要改变对其提供服务的采购方式,包括:a. 将采购时间向实时推进,确保提供服务的确定性和可用性;b. 细化竞标颗粒度,而不是采用能量块报价的方式;c. 允许联络线通过非物理约束(non-firm)来竞标,并在可用容量确定后转化为物理约束(例如运行 1 h 前);d. 通过改进支付和结算方式,反映出物理合约和金融合约之间的差异。同时,也可让联络线在日前交换过程中保留容量。但是 ESO 和利益相关者需要证明,与能量交换相比,当为平衡服务(如动态遏制)保留容量可提供更好的净社会福利^[61]。

(2) 死区问题。动态控制的交付曲线包括 1 个 0.200 Hz 偏差的“拐点”,因此在 ± 0.015 Hz 的频率控制死区之外,具备 2 个交付阶段:0.015~0.200 Hz 之间的第 1 阶段,以及 0.200~0.500 Hz 之间的第 2 阶段。由于频率控制的复杂性,在第 1 阶段进行响应对联络线而言过于频繁、难以监控、成本较高、可行性较低。因此,需要进行调查以了解是否可以放宽(或取消)在 0.015 Hz 和 0.200 Hz 偏差之间的交付要求。

(3) 结算问题。动态控制的提供者应当依据可用性(容量)而不是能量进行结算。这种方法与英国国内资产的成本回收机制相契合。但通过联络线的跨区服务的现有结算方式可能会导致传输系统运营商(Transmission System Operator, TSO)免费获得该能源服务,且提供者没有得到适当的补偿。因此,需要跨境的 TSO 和联络线之间商定规则和流程。ENTSO-E 工作组(Inter-Synchronous Area SG)正在研究 TSO 的补偿方式。

(4) 制度和标准化的问题。以上提到的问题,必须对现有的动态控制条款进行修改。现有的条款在采购和响应能力执行上的确定性、与现有其他服务的冲突、死区的执行和基于能量的结算等制度上还有所欠缺。为缓解以上问题,英国国家电网计划研究创建仅适用于联络线的规则子集。然而,这可能会偏离 ESO 的“标准化”战略。

3 英国新型电力系统建设启示

3.1 英国新型电力系统建设经验总结

3.1.1 因地制宜开发与利用低碳资源禀赋

资源禀赋是新型电力系统建设的物质基础。首先,英国具有优异的风光资源禀赋。英国的自然资源优势主要集中于海洋风力、波浪和潮汐资源,具有商业开发价值的风电总量高达 48 GW,约是整个欧洲海上风电总量的 1/3,约为英国当前电力消耗量的 3 倍^[62]。

其次,英国具有大量天然气进口与较低的天然气价格。2020 年,英国从挪威、卡塔尔等国进口天然气和液化天然气(LNG)约 47.95 亿 m^3 ,国内天然气发电占总化石能源发电的 35.72%^[63]。此外,英国邻国较多,通过积极建设对外联络线,可充分利用邻国的低碳调节资源。例如 2021 年新投运连接挪威的海底电缆以充分利用其水电的调节能力。英国截至 2021 年投运联络线容量 6 GW,占全部供电容量约 5.6%^[64],以上的调节资源促成了英国电力系统较高的灵活资源占比,使其在调节可再生能源波动时具有更多手段。

3.1.2 顺应技术发展调整政策法规支撑

政策法规是促进可再生能源消纳与调节资源发展的外部土壤。首先,英国建立了与发展现阶段相适应的灵活竞争性补贴机制。无论是对于可再生能源或储能等新型调节资源而言,需依据其技术发展阶段与需求水平调整政策支持与补贴方式。例如英国对于可再生能源的补贴政策经历了从义务消纳制到上网电价补贴到差价合约的转变。一方面该制度能够正常反映可再生能源对于市场的影响,同时维护了市场的统一性,避免了购售电价格的双轨制;另一方面在保障可再生能源长期期望收益的同时,使得合约价格低于原补贴价格,能够在有限的资金池下扩大补贴范围,使得补贴也由计划向市场转变。英国在对待陆上风电与光伏的变化体现了差价合约能够根据客观需求灵活调整。

其次,英国通过发布一系列竞争性资金,促进调节资源规范发展。英国注重需求侧,尤其是非工业用户的灵活资源,并发布数百亿资金支持需求侧能效评估、灵活性改造、电能替代、热网升级、能源公平、电动汽车替代及相关基建和产业链发展等,同时加速实时电价接入家庭用户。同时,对于储能重视其立法与规范化工作,目前将其作为发电资源进行管理。且通过免气候变化税、光储协同上网电价补贴、资金补贴等手段,支持大规模、长续航、新型储能等部署。

3.1.3 优化灵活公平、统一开放的市场机制

市场机制是促进资源时空优化配置的内生动力。首先,作为第一批电力市场改革的国家,英国形成衔接有序的市场机制,并不断根据可再生能源特性优化现货市场交易品类。时间上,从容量市场、中长期双边交易到日前,再到日内,通过金融约束方式,形成了一系列平抑风险的模式,颗粒度精细且灵活多样,与政策激励一同为可再生能源提供了收益保障^[65]。

其次,在市场范围上因地制宜,形成了从跨欧洲到国家,到市场区域、平衡区域再到区域能源市场的多层级的统一市场模式。一方面,通过被提名的电力市场运营商(Nominated Electricity Market Operator, NEMO),有效组织了各个现货市场平台,促进了不同国家优势资源在欧洲范围内日前市场上的价格耦合与统一出清,同时一定程度上促进了日内市场相邻国家通过联络线的撮合交易;另一方面,英国通过区域能源市场,在试点范围内有效整合需求侧资源分布式交易,或统一组织参与批发市场,将DNO职能向DSO转变,能有效促进可再生能源就地平抑,延缓输电侧网架投资,优化电压分布等。

3.1.4 稳步推进新技术应用与数字化转型

新技术应用与数字化转型是新型电力系统建设的关键支撑。在装备技术上,英国推动柔性直流输电在跨区、跨国、海上风电连接等场景的应用,有效促进资源交换。另一方面,通过虚拟同步机技术,通过电力电子设备模拟传统同步机惯量特性,相较于目前常用的PLL技术能有效提升抗暂态扰动能力。在数字化转型上,英国从ESO到输网、配网、用户侧等,以及电力市场平台广泛应用数字化技术,以实现信息开放、服务优化、效率提升、系统安全等目的。

3.1.5 积极探索系统升级与运行调控手段

运行调控是新型电力系统运行的支撑骨架。在可再生能源接入过程中,英国同样面临系统惯量下降,稳定性受到挑战等问题。首先,英国对英国电力系统惯量水平及相应风险进行了评估预测,并通过虚拟同步机增加系统惯量“治本”,改善频率控制方式优化扰动下的频率特性“治标”来双管齐下。其次,对不同惯量下的虚拟同步机进行成本效益分析,并与低频减载等其他可能措施进行技术经济效果比对。同时,英国整合其过去零散的频率调节产品,构建统一动态调节市场,对其规范化为动态调节、动态控制以及快慢备用,并考虑在市场中引入惯量服务,充分挖掘基于联络线的跨境调节能力。

3.2 我国省级新型电力系统建设启示

以电力系统体量与能源独立性而言,英国与我国部分典型省份具有相似性。以江苏为例,其总装机容量与英国相近,如图5所示。但英国的风光可再生能源装机占比比江苏高约15%。从英国与江苏“十四五”末期的化石燃料发电与可再生能源发电的整体比例而言,两者较为接近。但英国的支撑性电源以气电为主,江苏则以煤电为主。从用电侧而言,江苏和英国的全社会最高用电负荷分别是平均用电负荷的1.63,1.41倍,即英国的峰谷差更小。江苏用电结构中二产占比更高,英国则三产和居民用电更高。从系统结构来看,江苏与英国的可再生能源与负荷重心皆呈现不同程度的南北逆向分布,且都计划开发大规模海上风电。

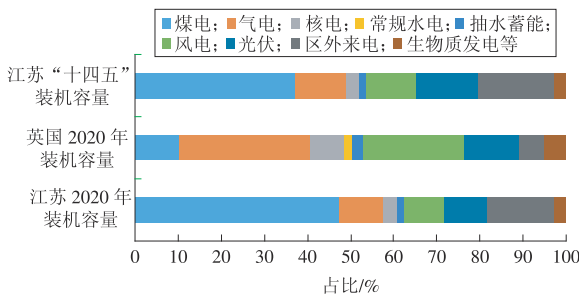


图5 英国与江苏装机容量对比

Fig. 5 Comparison of the generation capacities of the UK and Jiangsu Province

总体来看,英国与江苏情况相似度较高,因而面临的大规模可再生能源消纳问题较为类似,但差异部分则会导致英国与江苏在“双碳”目标下可再生能源消纳的灵活性资源基础、能源网架发展思路和市场支撑机制等方面具有各自的特征。结合英国新型电力系统建设举措,基于江苏省具体情况,本文从电力市场建设、灵活资源挖掘、关键技术突破3个层面提出经验启示。

3.2.1 电力市场建设

(1)加强现货市场设计与衔接时序,推动可再生能源相关交易向精细化、实时化转型。可在目前国内较为广泛的日前-实时市场框架下,开展日内市场的多轮次交易撮合。参考欧洲现货市场交易品类设计,针对可再生能源及储能等调节资源,推动由中长期电量交易向带曲线的电力交易转变,在此基础上落实可再生能源的偏差考核机制。设置能够贴合各类资源技术经济特性的灵活报价方式。

(2)积极响应两级市场建设,探索区域能源市场交易。向上,丰富省间交易品类,推动通过省间联络线的电力服务交易,使得全国范围内灵活资源能够在不同时间尺度上进行优化配置。省内,结合

江苏部分潮流断面受限的情况,落实分区电价形成,并注重区域内发用电平衡分析,及时发布消纳预警信息。向下,探索区域能源市场交易试点。借助苏州金鸡湖等地分布式交易试点引领作用,发挥地区特色资源的多元互补特性,鼓励服务价值驱动的商业模式,或通过负荷聚合商、虚拟电厂等形式参与批发市场,以降低对外电量或服务需求,优化局部潮流。

(3)完善电力市场信息披露机制,培育资源主体参与市场活力。一方面,参考英国实现电力资产脱敏数字化,依据相关规定加快落实完善的电力市场运行信息披露。另一方面,优化市场主体参与模式,降低参与技术门槛。通过托管预测等方式,推动可再生能源发电曲线预测,尤其是分布式发电的流程标准化与结果准确性,同时提高超短期预测与实时数据与调度、交易中心传输的实时性。简化分布式资源的交易手续,形成标准化合约与产品和自动结算机制,推动电碳市场协同。

3.2.2 灵活资源挖掘

(1)推动发电资源灵活性提升与清洁改造。通过基于价值的电力市场转型、辅助服务市场的固定补偿与获利机会和调峰容量市场竞标等,丰富引入第3方主体、差价合约等良好的商业金融模式,在过渡期设置差异化补偿或辅助服务分摊系数等,激励灵活性改造的自发性。依据地区天然气供需情况,推动燃气机组有序规划。发挥江苏省作为农林、城市垃圾、沼气等生物质能大省的规模优势和产业优势,因地制宜规划生物质能等新能源发电。

(2)多能协同、广泛互联,提升网架灵活性。挖掘天然气管网时空灵活性潜力,推动以电为核心的电气互联。安全探索天然气管道掺氢与相对独立地区储氢站建设,开发海上风电-氢能的弃风制氢与电-氢网架协同运行模式。参考英国立法明确储能地位与输配电价核算机制,完善储能成本疏导,因地制宜发展屋顶光伏、建筑光伏一体化等技术,通过多元投资主体、差价合约拍卖等模式疏导新型长周期储能成本。在两级市场背景下积极挖掘省外联络线提供电力服务的机制。

(3)挖掘需求侧灵活调节能力。江苏的建筑负荷占比显著低于英国。因此,在灵活资源盘点中以工业可中断负荷等优质需求响应资源为主,并重商业、家庭等建筑负荷与电动汽车能效评估与资源盘点,形成源网荷储合力。推动终端电能替代与电热协同,利用热网的管存特性与分布式冷热储能,挖掘需求侧管网灵活性。推动电动汽车充电桩自动控制与充放电功能标准制定,加强电动汽车行为预

测、Vehicle to X 优化等关键技术、设备研究。加强电动汽车统一信息发布、管理平台形成。另一方面,提升需求侧资源参与系统运行与市场交易的友好便利性。出台规定明确其参与不同市场的容量、持续时间、爬坡等准入门槛,量测和控制要求等。参考国外基线测定标准,制定完善需求响应考核依据,降低表后市场(behind-the-meter)的资源量测需求。推动落实需求侧分区电价和实时电价接入,通过市场、补贴、邀约、积分等多种形式,激发需求侧资源参与电网运行的内生动力。

3.2.3 关键技术突破

(1)通过数字化智能化提升可观可控能力。推进面向需求的统一系统平台开发,例如源网荷储等灵活资源统一交易平台,参考英国开发新型电力系统建设下的调频备用服务产品序列等。结合5G、光纤等场景通信技术,梳理推进配网的数字化,注重信息通信基建的建设与维护。

(2)完善运行调控中的风险预警与管理机制。首先,常态化可再生能源、负荷预测工作与消纳预警机制,完善无风或台风、高温或极寒、日食等极端场景预警与预备,提升电力系统韧性。

(3)加快数据、算法、装备等多方面软硬技术实力构建。部署一批具有一定计算能力的采集设备,通过云边端协同提升需求响应效率。基于物联网、数字孪生技术和地理信息系统实时感知系统状态,分析可能新建的屋顶光伏等灵活性提升潜力。研究基于物理模型与数据挖掘与聚类的灵活负荷用户画像分析与可再生能源出力预测,基于区块链与信任机制的分布式交易技术,基于云边端协同控制的海量可调节资源优化运行分布式算法等。

4 结论

构建以新能源为主体的新型电力系统将可能面临调峰能力不足、局部阻塞加剧和系统惯量缺失等安全稳定运行的挑战。英国与我国部分典型省份自然资源禀赋与电力系统情况相近,且在应对高比例可再生能源接入问题上做出了有效的先行探索,因此对我国新型电力系统的建设具有参考价值。本文首先介绍了英国电力系统发用双侧的转型历程,以及碳排放、消费侧和能源系统3方面的转型目标。其次,从政策法规引导、资源基础设施建设、电力市场机制、输配系统信息化、技术装备应用和调控运行方式6方面树立了英国在应对高比例可再生能源接入的先行探索。最后,从因地制宜开发利用低碳资源禀赋、顺应技术发展调整政策法规支撑、优化灵活公平统一开放的市场机制、稳步推进新技

术应用与数字化转型和积极探索系统升级与运行调控手段5方面归纳了英国新型电力系统建设的经验,并以江苏为例,提出了对我国省级电网的发展启示。本文有助于帮助电网企业与政府能源部门规划政策制定者理顺发达国家新型电力系统建设的经验启示,从而因地制宜地制定我国电力系统的发展路径。

参考文献:

- [1]新华社.习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. 2021. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm. 2021-3-15
- [2]江苏省能源局.江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划[Z]. 2020.
- [3]国家发展改革委,国家能源局.“十四五”现代能源体系规划[Z]. 2022.
- [4]江苏省发展改革委.江苏电力现货市场建设方案(送审稿)[R]. 2020.
- [5]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Energy white paper: Powering our net zero future [R]. 2020.
- [6]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Energy trends: Special feature article—Capacity of UK electricity generation assets in the 21st century, 2000 to 2019[R]. 2021.
- [7]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Digest of UK energy statistics annual data for UK, 2020 [R]. 2021.
- [8]NORA B. UK power firm Drax to focus on biomass after selling gas assets[EB/OL]. 2020. <https://www.reuters.com/business/energy/uk-power-firm-drax-focus-biomass-after-selling-gas-assets-2020-12-15/>. 2020-12-15
- [9]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Energy consumption in the UK 2021 [R]. 2021.
- [10]UK Public General Acts. Climate change act 2008 [R]. 2008.
- [11]National Grid ESO. Future Energy Scenarios (FES) 2021 [R]. 2021.
- [12]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Green heat network fund: Proposals for the scheme design government response[R]. 2020.
- [13]Department for Transport. Transport decarbonisation plan [R]. 2021.
- [14]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Ofgem transitioning to a net zero energy system: Smart systems and flexibility plan 2021 [R]. 2021.
- [15]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Hydrogen production costs 2021 [R]. 2021.
- [16]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Business models for low carbon hydrogen production [R]. 2020.
- [17]景锐,周越,吴建中.赋能零碳未来——英国电力系统转型历程与发展趋势[J].电力系统自动化,2021,45(16):87-98.
- Jing Rui, ZHOU Yue, WU Jianzhong. Empowering zero-carbon future—Experience and development trends of electric power system transition in the UK [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16):87-98.
- [18]UK Public General Acts. Utilities act 2000[R]. 2000.
- [19]Change Department of Energy & Climate. Feed-in tariffs and grants [R]. 2012.
- [20]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Contracts for difference [R]. 2022.
- [21]张洪,张粒子.英国电力市场可再生能源补贴政策是什么样的?[EB/OL].2017. <https://news.solarbe.com/201712/13/121806.html>. 2017-12-13
- [22]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Heat and buildings strategy [R]. 2021.
- [23]KWASI K, BORIS J. Plan to drive down the cost of clean heat[EB/OL].2021. <https://www.gov.uk/government/news/plan-to-drive-down-the-cost-of-clean-heat>. 2021-10-18
- [24]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Heat Networks Investment Project (HNIP): Overview and how to apply [R]. 2018.
- [25]Research and Innovation UK. Faraday battery challenge [EB/OL]. 2017. <https://www.faraday.ac.uk/the-faraday-battery-challenge/>. 2017-8-13
- [26]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Net zero innovation portfolio[R]. 2021.
- [27]马莉,范孟华,郭磊,等.国外电力市场最新发展动向及其启示[J].电力系统自动化,2014(13):1-9.
- MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(13):1-9.
- [28]NEMO. EUPHEMIA public description—Single price coupling algorithm[R].2020.
- [29]NordPool. Rules and regulations [EB/OL]. 2022. <https://www.nordpoolgroup.com/trading/Rules-and-regulations/>. 2020-1-1
- [30]吴建中.欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J].电力系统自动化,2016,40(5):1-7.
- WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5):1-7.
- [31]Research and Innovation UK. Industrial strategy challenge fund [EB/OL]. 2022. [https://www.ukri.org/our-work/our-main-funds/industrial-strategy-challenge-fund/#:~:text=The%20Industrial%20Strategy%20Challenge%20Fund%20%28ISCF%29%20addresses%20the,industrial%](https://www.ukri.org/our-work/our-main-funds/industrial-strategy-challenge-fund/#:~:text=The%20Industrial%20Strategy%20Challenge%20Fund%20%28ISCF%29%20addresses%20the,industrial%20)

- 20strategy% 3A% 20artificial% 20intelligence% 20and% 20data%20economy.%20. 2019-8-19
- [32]Research and Innovation UK. Prospering from the energy revolution: Full programme details [EB/OL]. 2018. <https://www.gov.uk/government/news/prospering-from-the-energy-revolution-full-programme-details>.
- [33]Centrica. Cornwall local energy market [EB/OL]. 2018. <https://www.centrica.com/innovation/cornwall-local-energy-market>. 2018-5-14
- [34]National Grid ESO. Digitalisation Strategy [R]. 2020.
- [35]National Grid ESO. NGET and NGGT digitalisation strategy [R]. 2020.
- [36]Energy Networks SP. SP Energy Networks digitalisation strategy [R]. 2019.
- [37]PowerScottish. SP Energy Networks successful in ofgem innovation competition [EB/OL]. 2015. https://www.scottishpower.com/news/pages/sp_energy_networks_successful_in_Ofgem_innovation_competition.aspx. 2015-12-1
- [38]Energy Networks SP. EV-Up NIA project closedown report [EB/OL]. 2020. https://www.spenergynetworks.co.uk/userfiles/file/EV-Up_NIA_project_closedown_report.pdf. 2021-8-1
- [39]Energy Networks SP. USEF consultation report - full [R]. 2022.
- [40]National Infrastructure Commission. Operability of highly renewable electricity systems [R]. 2021.
- [41]贺之渊, 涂莉, 阳岳希, 等. 英国 Shetland 柔性直流输电工程系统设计 [J]. 全球能源互联网, 2018, 1 (z1): 296-302.
HE Zhiyuan, TU Li, YANG Yuexi, et al. System design of shetland VSC-HVDC transmission project [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1 (z1): 296-302.
- [42]李兴源, 曾琦, 王渝红, 等. 柔性直流输电系统控制研究综述 [J]. 高电压技术, 2016, 42 (10): 3025-3037.
LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42 (10): 3025-3037.
- [43]Grid National. Performance of phase - locked loop based converters [R]. 2017.
- [44]National Grid ESO. The potential operability benefits of virtual synchronous machines and related technologies [R]. 2020.
- [45]Energy Networks Association. Virtual Synchronous Machine (VSM) demonstrator [R]. 2019.
- [46]Energy Networks Association. Hybrid grid forming converter [R]. 2019.
- [47]Grid National. NOA stability pathfinder [R]. 2022.
- [48]Grid National. Operating a low inertia system [R]. 2020.
- [49]National Grid ESO. Accelerated Loss of Mains Change Programme (ALoMCP) [R]. 2022.
- [50]National Grid ESO. Future of balancing services [R]. 2022.
- [51]National Grid ESO. The Enhanced Frequency Control Capability (EFCC) project [R]. 2019.
- [52]National Grid ESO. RIIO-2 final business plan [R]. 2020.
- [53]National Grid ESO. Security and quality of supply standard [R]. 2022.
- [54]National Grid ESO. Operability strategy report 2022 [R]. 2022.
- [55]National Grid ESO. Dynamic moderation [EB/OL]. 2022. <https://www.nationalgrideso.com/industry-information/balancing-services/Frequency-Response-Services/Dynamic-Moderation>. 2022-3-8
- [56]National Grid ESO. Frequency risk and control report [R]. 2022.
- [57]National Grid ESO. Dynamic containment [EB/OL]. 2022. <https://www.nationalgrideso.com/balancing-services/frequency-response-services/dynamic-containment>. 2022-7-5
- [58]National Grid ESO. Fast reserve [EB/OL]. 2022. <https://www.nationalgrideso.com/industry-information/balancing-services/reserve-services/fast-reserve?overview>. 2022-7-5
- [59]National Grid ESO. Short term operating reserve [EB/OL]. 2022. <https://www.nationalgrideso.com/industry-information/balancing-services/reserve-services/short-term-operating-reserve>. 2022-7-5
- [60]Interconnector participation in dynamic containment [R]. 2021.
- [61]European Commission. The EU-UK trade and cooperation agreement [R]. 2021.
- [62]国家能源局. 国际风能技术路线图解析 (三) [EB/OL]. 2012. http://www.nea.gov.cn/2012-09/20/c_131861845.htm. 2012-9-20
- [63]Department for Business Energy & Industrial Strategy. Gas statistics [EB/OL]. 2022. <https://www.gov.uk/government/collections/gas-statistics>. 2013-9-26
- [64]ROSE M K. National Grid: Live status [EB/OL]. 2022. <https://grid.iamkate.com/>. 2022-4-1
- [65]秦炎. 市场机制, 欧洲可再生能源大发展的关键 [EB/OL]. 2021. <https://new.qq.com/rain/a/20210220A0AKHT00>. 2021-2-20

(本文责编: 张帆)

作者简介:

王盛(1994), 男, 工程师, 博士, 从事综合能源系统运行与评估、城市能源低碳发展策略研究工作, wangsheng_zju@zju.edu.cn;

惠红勋*(1992), 男, 研究助理教授, 博士, 从事电力系统需求侧资源的调控与优化方法等研究工作, hongxunhui@um.edu.mo。

*为通信作者。