



中国跨能源品种可调节资源潜力与开发利用情景

王林钰¹, 张富强¹, 龚一莼¹, 夏鹏¹, 史文博², 潘杭萍²

(1. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国网(苏州)城市能源研究院有限责任公司, 江苏 苏州 215103)

摘 要: 调节体系建设是构建新型电力系统的重要内容, 当前以电力系统自身建设调节能力的传统路径面临调节资源紧缺、调节成本增高、长周期调节手段缺乏等挑战。着眼于新型电力系统发展不同时期和阶段的调节需求, 首先界定了跨能源品种可调节资源的研究对象和范围, 然后分析了不同时期电力系统调节资源需求以及跨能源品种可调节资源潜力, 并通过情景分析对跨能源品种可调节资源利用进行了成本效益分析。研究表明: 跨能源品种可调节资源开发利用具有经济、社会、环境等多方面的价值, 在调节体系构建中可以发挥巨大作用, 成为调节体系建设的重要补充。该研究可为进一步丰富调节资源类型、降低调节成本、开展商业模式研究等提供参考依据。

关键词: 调节体系; 跨能源品种可调节资源; 调节需求; 调节潜力; 成本效益

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202302078

0 引言

新型电力系统构建过程伴随着电源结构调整和用电负荷变化, 这些变化导致电力系统波动性和不确定性增加, 对电力系统调节能力提出更高要求。与此同时, 受限于“富煤、缺油、少气”的资源禀赋特征, 中国一直面临灵活调节电源不足的局面^[1]。在此现实和发展趋势下, 构建灵活、可靠、经济、多元的调节体系成为必然选择。

国内外学者对电力系统调节资源开发利用以及调节体系的构建进行了大量的研究, 目前主要集中在灵活性资源利用方面。不少国家已经开展了诸多的工程实践应用并取得良好成效。文献[1-2]阐述了新型电力系统构建中的关键问题, 并明确指出灵活性平衡体系亟须构建。文献[3-12]分析了能源转型下调节体系建设的关键问题, 提出构建多时间尺度多品种的调节体系并涉及储热、储冷、储氢等调节手段。文献[5]从源网荷储4个方面对中国“十四五”期间的电力系统灵活性资源供需情况进行分析并提出了系统灵活性提升措施建议。文献[6]分析了中国不同区域不同时间尺

度的灵活性需求情况, 从源网荷储全环节分析了灵活性资源现状及未来发展情况并提出相关建议。文献[7]从新能源不同接入比例的角度分析了未来灵活性资源的平衡问题。文献[11]对相关的调节技术进行了整体分析。文献[12-13]主要对需求侧的灵活资源开发进行了分析。文献[8,14-15]对国外的研究和应用情况进行了分析。

当前关于调节资源的研究主要集中在电力系统内部的节资源建设和挖掘上, 以“电源调节+电网互济+需求响应+储能”的方式满足调节需求, 事实上, 通过利用电力与其他能源品种及其系统之间的互补性, 可以进一步挖掘大量具有经济性的调节潜力, 是未来构建更加丰富的调节体系的重要方向。国内外通过电力系统与其他能源系统耦合开发利用调节资源的研究也已经开展, 但主要集中在单一领域且目的主要是提升系统综合效益。文献[16-21]分析了电热协同在不同场合的应用情况, 文献[22-24]分析了电氢协同在新能源高占比情况下的利用前景。文献[8]概括分析了国内外在电力系统调节资源建设方面的整体情况。

综上所述, 目前关于调节体系的建设, 多数研究主要还是集中在电力系统自身源网荷储协同方面的研究, 少数学者开展了单一品种的跨能源品种调节资源的利用研究, 但将多类型的跨能源品种可调节资源作为一类整体资源系统性开展资

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-05-04。

基金项目: 国家电网有限公司管理咨询项目(SGZB0000 YJW2200487)。



源潜力和开发利用分析的情况较少。对电力系统调节能力的研究主要集中在当前已经大量出现的调频、调峰等短周期的调节需求,而对于不同时间尺度的整体情况还缺少定量研究。

本文以跨能源品种可调节资源为对象,首先明确跨能源品种可调节资源的研究对象和概念,其次对当前及未来中国电力系统的调节需求进行量化评估,对跨能源品种可调节资源的潜力进行分析,在此基础上,以案例方式对跨能源品种可调节资源参与电力系统调节的综合效益进行分析,最终给出相关结论。

1 跨能源品种可调节资源概念及对象

1.1 电力系统调节需求和调节资源

电力系统的调节需求可以区分为灵活性需求和充裕性需求并随着能源转型进程呈现不同需求特征。灵活性体现为在较短时间尺度上应对新能源叠加新型负荷带来的波动性和间歇性的能力;充裕性体现为在较长时间尺度上满足由于各类能源发电能力缺失、气候负荷异常带来的电量平衡能力。当前电力系统中新能源占比逐渐提高,但以煤电为主的传统电源仍旧是发电量主体,发挥着基础的电量保障作用,因此当前阶段调节资源的需求主要体现为灵活性需求,同时,在极端天气影响下,由于气候负荷异常波动,充裕性风险也不断增加。未来,随着新能源占比进一步提升,电力系统源荷两端的不确定性增加并叠加,周、月、季度等季节性的电量短缺将成为威胁电网安全的重要因素,对调节资源的需求将转变到兼顾短期和中长期的灵活性与充裕性兼具的需求。

目前电力系统调节需求及资源方式如表1所示,对灵活性调节需求来说,主要是短时间尺度上功率的调节,可以满足的技术手段更加丰富,储能、抽水蓄能、电源调节以及负荷侧需求响应等技术设备均能在数小时内满足多种类型的调节需求。对充裕性调节需求来说,主要体现为电源性质的(容量性质的)调节需求,目前通过新建传统电源、增加煤、气、水的储备,增加网间调剂能力、有序调节负荷等方式,尚能满足需求,随着充裕性调节需求的快速增长以及双碳目标等

的约束,当前已经技术成熟的调节手段无法完全适应并支撑未来需求。因此,对于满足灵活性需求的资源来说,主要关注的是多种调节手段的经济性比较;而对于满足充裕性需求的资源来说,主要关注的是选择何种技术手段解决稀缺性的问题。

表 1 目前电力系统调节需求及资源方式

Table 1 Current power system regulation demand and resource modes

需求调节类型	目前资源方式	特点	关注的问题
灵活性调节	电源调节、电网调节、储能、需求响应	可提供的技术手段多,未来面临成本压力	如何获取具有经济性的资源
充裕性调节	新建传统电源、储煤、储气、储水等	可提供的技术手段少,未来面临来源压力	如何获取长期可保障的资源

调节资源在不同时间阶段需要解决的问题有所区别。结合中国当前新能源发展的进程,在新型电力系统建设期(当前至2035年),灵活性资源获取是更需要重点关注的问题,同时需要为充裕性资源利用提前做好技术储备。在新型电力系统成熟期(2035年之后),在新能源占比较高的地区,阶段的充裕性的需求将会凸显并逐渐成为常态,进而扩展到全国更大区域,成为调节资源的重点关注内容。

1.2 跨能源品种可调节资源概念

跨能源品种可调节资源是从满足电力系统的平衡和调节视角出发,基于与电力系统紧密耦合的其他能源品种及系统中潜在资源的技术可实现、经济可承受、时间可匹配、空间可调度的特征,如图1所示,在其自身原有价值应用的基础上,发挥其已经存在但尚未挖掘的或通过改造可

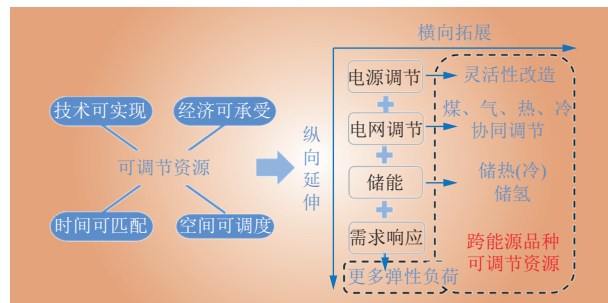


图 1 跨能源品种可调节资源概念示意

Fig. 1 Illustration of the concept of adjustable resources across energy varieties



利用的调节特性，用以满足电力系统不同时期调节需求的资源。

跨能源品种可调节资源在灵活性调节上，是经济性调节能力的重要补充；在充裕性调节上，是解决未来长周期能源缺失的路径之一。

1.3 跨能源品种可调节资源具体对象和作用方式原则

跨能源品种可调节资源主要由与电力系统物理关联的其他能源耦合设备、存储设备、其他能

源系统供应体系组成。如图 2 所示，包括通过电（蓄）热锅炉、热泵、工业电锅炉、电采暖等热电转换设备或技术连接的热系统中蕴含的可调节的热资源，通过空调、冰蓄冷等技术或设备连接的冷系统中蕴含的可调节的冷资源，通过需求管理可调节的电制氢负荷以及氢发电技术可实现的反向调节资源，通过气电装置改造可增加的快速调节的气资源，通过储运调度等电煤保障技术可调节的煤资源。

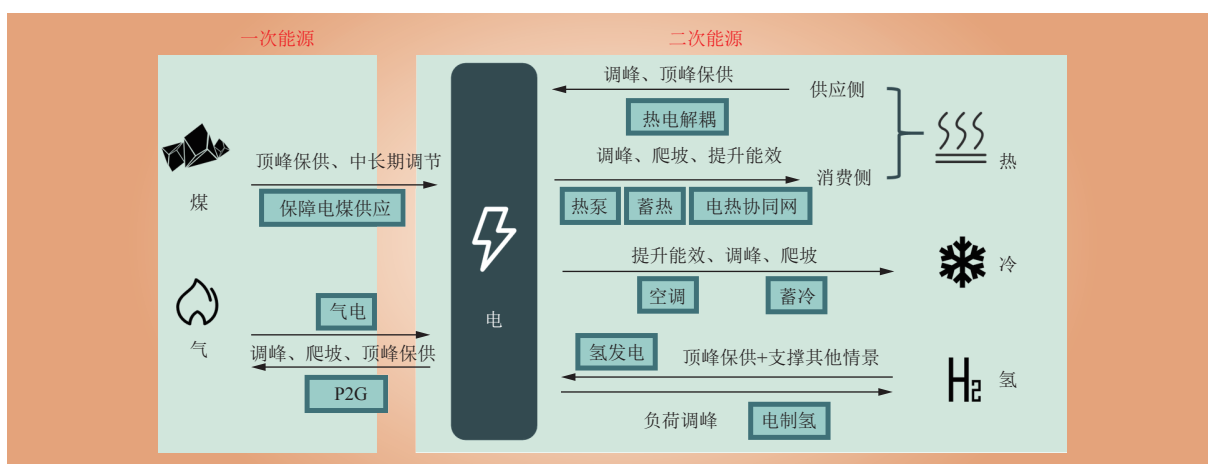


图 2 跨能源品种可调节资源具体对象及作用

Fig. 2 The specific objects and functions of adjustable resources across energy varieties

跨能源品种可调节资源发挥作用的方式包括：1）利用资源主体功能之外的待挖掘可调节特征参与电网互动；2）资源可以在供给侧和消费侧参与电网互动，区分为可调节供给资源和可调节负荷资源；3）可调节负荷资源基于输入功率可在能源需求约束下灵活调节，可调节供给资源基于输出功率可在能源供应约束下灵活调节；4）资源分属不同能源品种，拥有方一般独立于电力系统，互动涉及两个能源系统之间的互动；5）大部分调节资源分属不同系统，响应时间较长，跨能源品种可调节资源主要作为时间尺度较长的调节资源使用；6）资源互动不一定转化为电力，也可直接以最终形态满足用户用能需求。

跨能源品种可调节资源本身所处的系统有其自身存在的价值和目标，因此其利用原则包括：1）资源使用不应应对原有系统发挥价值造成负面影响，但可能需要对系统的运行方式等作出调整；2）对终端用户透明，即不改变用户行为习惯。

2 电力系统调节需求量化评估

电力系统调节需求的变化表现为调节需求规模持续扩大、调节需求类型更加多元、调节需求重点因空间场景不同而各有差异。按照电力系统调节起始和终止点所跨时间尺度以及作用持续时长不同，调节需求可分为短时间尺度、中时间尺度和长时间尺度调节需求 3 类^[8-10,25]。基于跨能源品种可调节资源的调节特性，跨能源品种可调节资源主要参与电力系统分钟级、小时级、跨日、跨周/月/季的调节过程，本文重点关注快速爬坡、日内调峰、顶峰保供和跨周/月/季电量平衡 4 类不同时间尺度调节需求。

根据中国工程院相关课题的研究预测^[26]，在系统中长期调节能力规划方面，目前考虑了常规火电机组、水电厂、燃气电厂、储能以及需求侧响应等多类型调节资源对可再生能源随机波动的互补性。基于经济性的考量，电化学储能和抽水



蓄能有序发展, 预计 2030 年达到电化学储能 0.6 亿 kW、抽蓄 1.0 亿 kW, 2035 年电化学储能 1.0 亿 kW、抽蓄 1.2 亿 kW 的规模。以此为边界, 以全国为例, 采用国网能源研究院有限公司的电力系统全景运行模拟分析软件 (NEOS), 分别开展 2025、2030、2035 年新能源出力曲线及负荷曲线的预测分析, 并分别测算未来各水平年全国范围内对快速爬坡、日内调峰、顶峰保供和跨周/季电力电量平衡的调节需求。未来水平年的最大用电量和负荷可参考文献 [27], 即 2025、2030、2035 年中国全社会用电量分别为 9.5 万亿、11.3 万亿、12.6 万亿 kW·h, 最大负荷分别为 16.3 亿、20.1 亿、22.6 亿 kW。调节需求测算方式及其数据来源如表 2 所示。

表 2 各类调节需求的测算方式和数据来源
Table 2 Calculation methods and data sources for different adjustable resources

需求调节类型	测算方式	数据来源
快速爬坡	年度新能源曲线中每小时间隔功率差值的最大值	当前归一化的年度预测处理曲线 (8760 h), 参考未来负荷和用电量推算未来年的曲线
日内调峰	年度新能源曲线中典型日净负荷的最大峰谷差值	同上
顶峰保供	根据最大负荷需求和备用率, 计算最大有效装机需求, 根据装机容量和有效容量系数计算电源有效装机容量, 两者差值	中电联数据及各发电公司统计数据整理

未来新型电力系统灵活爬坡调节需求快速提升, 且在光伏高占比电网中更加突出。风电、光伏发电小时级发电功率波动最大可达到装机容量的 40% 以上。随着新能源装机占比快速提升, 电力系统日内灵活爬坡调节需求将大幅增加, 随着电力系统中光伏发电装机占比逐渐提高, 系统净负荷“鸭形曲线”特性越发明显, 日内灵活爬坡调节需求更加显著, 如图 3 所示。届时电力系统日内负荷小时级灵活爬坡需求最大可达 3 亿、4 亿、5 亿 kW 左右, 2035 年灵活爬坡需求将增至目前的 4 倍左右。

未来新型电力系统日内调峰需求稳步、大幅提升, 且季节性特征更加显著。随着新能源发电装机规模及占比逐步提升, 新能源与负荷叠加后的净负荷日峰谷差进一步增大, 2025、2030、

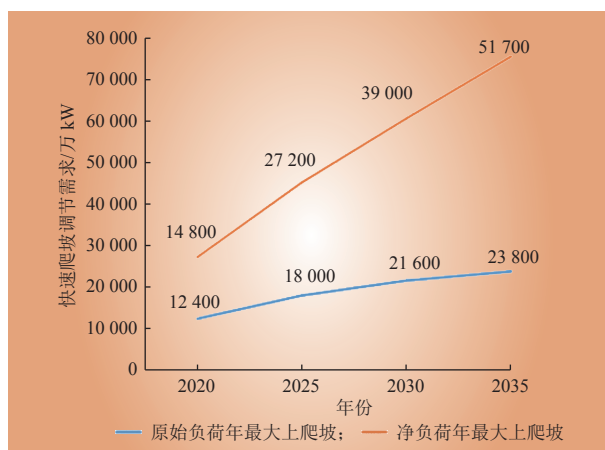


图 3 电力系统快速爬坡需求预测

Fig. 3 Power system rapid ramping demand forecasting

2035 年电力系统日负荷最大峰谷差分别约为 7.1 亿、10.7 亿、14.5 亿 kW, 占日最大负荷的比例 (日最大峰谷差率) 分别为 43.6%、53.2%、64.2%。系统负荷调峰需求的季节性分布规律将有所改变, 部分地区调节压力向春秋季节转移。相比于光伏发电, 风电装机规模提升对电力系统灵活调峰需求的增长效应更加显著。

未来新型电力系统顶峰保供需求随时间变化呈现不同特征, 如图 4 所示。近中期, 在中国新能源装机快速提升、全社会用电负荷持续增长的双重压力下, 电力负荷顶峰保供的调节需求将快速增长。13% 系统备用率约束下, 仅依靠常规电源, 2025、2030、2035 年电力顶峰保供需求分别约为 1.0 亿、2.4 亿、3.4 亿 kW。顶峰保供需求 2050 年前后达峰并开始缓慢回落。随着全社会用

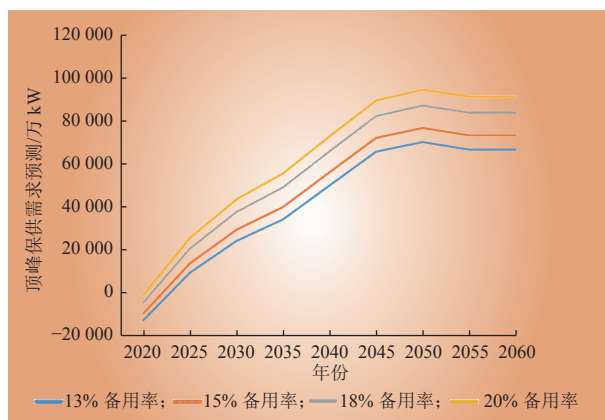


图 4 电力系统顶峰保供需求预测

Fig. 4 Power system peak supply guarantee demand forecasting



电需求逐渐趋于饱和，电源装机增速放缓，2040—2050 年电力负荷顶峰保供需求达到高峰，规模约为 7 亿 kW，之后逐渐缓慢下降。随着中国社会经济结构转型、能效水平大幅提升，2040 年以后中国全社会用电需求年均增速低于 1%，进入饱和阶段，由此中国电源装机也进入清洁能源发电对化石能源发电存量替代的阶段，新能源装机增速放缓，考虑到剩余煤电灵活性改造基本完成、大容量储能技术大规模推广应用等因素，电力负荷顶峰保供需求达到高峰并逐渐缓慢下降。

未来新型电力系统跨日、跨周、跨月/季电量平衡需求分类型、分阶段出现并增加。近中期，新能源消纳目标将导致跨日灵活调节需求逐渐提升；中远期，电量供应保障将成为跨日灵活调节需求增长的重要因素。2030 年以前，常规电源在电力电量结构上仍占据主导，仍发挥着电力电量平衡的基荷作用，面对连续多日新能源大发情形，受到常规电源下调峰能力约束，容易产生弃风弃光，新能源消纳目标将成为跨日灵活调节需求增长主导因素；远期来看，新能源将在电量供应上发挥举足轻重的作用，连续多日静稳天气、极热无风以及连续阴雨降雪天气造成的新能源低出力将给电量供应保障提出严峻挑战，也成为跨日灵活调节需求增长的重要因素。

综上，电力系统对不同时间尺度的调节需求都呈现倍增趋势，仅凭借电力系统内部现有调节资源和调节手段，电力系统安全经济稳定运行难度较大。以调峰为例，随着新能源占比的逐渐提高，电力系统调峰需求持续攀升，但调节资源有限，受技术经济性制约，电力系统内部调峰能力增速低于需求增速，预计 2025—2030 年，电力系统调节需求将超过电力系统内部调峰能力。未来电力系统调节面临的挑战包括调节资源紧缺、电力系统投资成本加高、长周期调节手段缺乏等。电力系统调节体系亟须寻找新的来源，挖掘新的潜力，预计未来在高比例新能源渗透率的场景下，需要源自新技术的跨能源品种调节手段以及更多主体的参与。

3 跨能源品种可调节资源开发潜力

跨能源品种可调节资源主要分析热冷氢气

4 类资源的调节潜力，调节潜力主要是在当前已开发利用潜力的基础上，不影响原有功能情况下的潜力挖掘。跨能源品种可调节资源的总体开发潜力可表示为

$$Q_a = \sum_{i=1}^n p_i P_i A_i \quad (1)$$

式中： Q_a 为所有可开发的跨能源品种可调节资源潜力； n 为跨能源品种可调节资源的种类， p_i 为分析年份时第 i 种资源的改造概率或者响应概率， P_i 为分析年份时第 i 种资源的存量总量， A_i 为分析年份时第 i 种资源的调节提升空间。

3.1 潜在资源开发基础和现状

电热协同资源方面，目前中国形成了以热电联产为主要热源（近 50% 供热量）、以区域锅炉为辅助热源的大型集中供热为主体、燃气分户壁挂炉等分散式供热为补充的格局。考虑当前主体热源和未来发展趋势，重点分析热电联产和热泵 2 类电-热协同潜力较大的技术。电冷协同资源方面，空调用电负荷具有规模巨大、日内存在间歇特点，而其他工业制冷设备、冷冻冷藏设备、电冰箱用电负荷规模小且较为平稳。冷系统资源重点聚焦空调负荷。电氢协同资源方面，电制氢设施可调范围大大，近期可作为良好的电力需求侧调峰资源，实现电-氢“单向耦合”。未来，部分氢能通过储氢、燃氢或氨发电，实现电-氢-电“双向耦合”，在新能源出力不足、电力供应紧张时“反哺”电力系统。电气协同资源方面，中国相当长时期内电力制天然气（P2G）技术大规模商业化应用的可能性较低，因此仅考虑未来天然气发电改造所提供的额外调节潜力。

3.2 跨能源品种资源参与电网调节潜力分析

供应侧资源可满足的调节需求：供应侧资源包括燃煤热电联产、天然气发电、氢发电，均可以提供电力日内调峰、顶峰服务，天然气发电、氢发电（天然气掺氢发电、氢直燃发电）调节速率较高（可达 10% 额定容量/min 以上），还可以提供爬坡/滑坡快速调节服务，配合储氢装置，氢发电还可提供长周期调节服务。

需求侧资源可满足的调节需求：需求侧资源包括电热泵、集中控制空调、家用空调、电制氢、P2G 等，这些资源在技术上都能够较为快速、方便地调低电负荷，所起到的作用与电源快速增加



出力、顶峰发电类似，因此可认为能够提供爬坡、顶峰服务。通过氢发电配置储氢设施、P2G 向天然气管网注气，两者还可提供长周期储能调节服务。

结合以上对各类跨能源品种可调节资源利用现状的分析可知，目前各类调节资源利用在技术上都是可行的。其中，煤电热电联产解耦、集中控制空调负荷调整、天然气发电热电解耦技术都已较为成熟；电热泵负荷调整、家用空调负荷调整、电制氢负荷调整、氢能发电、P2G 由于目前需求并不迫切或经济性较差等原因，这些技术并未得到较大规模的应用。

值得注意的是，冷热两种可调节资源具有季节性和周期性特征，现实中难以同时发挥灵活调节作用。因此至少需要分冬季（供暖季）和夏季两个季节分析冷热资源调节潜力。

在冬季供暖期，热电联产等热资源具备较大调节潜力；冷资源应用较少，基本不考虑其调节潜力。在夏季，北方地区热电联产机组大多转为纯凝状态运行，热资源不具备调节潜力，南方用于工业供热的热资源具备调节潜力；冷资源具备较大潜力。本研究中以国家电网公司经营区为例，热电联产机组中“三北”地区占比约 60%；华东、华中、西南等南方地区占比为 40%，且主要为工业供热。

按照国家发改委、国家能源局《全国煤电机组改造升级实施方案》（发改运行〔2021〕1519 号文）要求，“十四五”期间实现存量煤电机组灵活性改造 2 亿 kW，综合考虑中国热电联产机组规模现状、灵活性改造规划、以及未来中国煤电装机规模发展展望，预计 2035 年左右中国热电联产机组将全部完成灵活性改造。改造供热机组调峰能力按照提升 25 个百分点测算。热泵功率参考国际能源署和中国节能协会热泵专业委员会预测^[28]，按照 20% 容量可参与系统削峰填谷测算。集中控制空调负荷以 5%~10% 参与调节测算，居民空调以 2030 年及以后有 5% 参与调节测算。氢负荷和氢发电参考国内外相关预测^[23-24]。参考中国工程院研究成果^[26]，气电按照 2025、2030、2035 年对应 0.7 亿、1.5 亿、2.5 亿 kW 改造规模和平均 30% 提升能力测算调节能力。结合各类资源的总量现状和预测、技术发展趋势等因素，分析不同品种资源满足不同需求的潜力情况如表 3 和表 4 所示。

表 3 未来供暖季跨能源品种可调节资源潜力
Table 3 Adjustable resource potential across energy varieties in the future heating season

资源	调节种类	满足调节需求	技术成熟度	可调节资源潜力/万kW		
				2025年	2030年	2035年
热	煤电热电解耦	日内调峰；顶峰保供	非常成熟	6000	9000	10000
	电热泵负荷	日内调峰；快速爬坡	基本成熟	2000	4000	6000
	集中控制空调	快速爬坡；日内调峰	成熟	200	800	2000
	家用空调	快速爬坡；日内调峰	不成熟	—	—	—
冷	电制氢负荷	日内调峰；快速爬坡；长周期调节	不成熟	—	5000 2000 2500	10000 3300 5000
	氢发电	快速爬坡；日内调峰、顶峰、长周期调节	很不成熟	—	—	500
气	天然气发电改造	快速爬坡；日内调峰；顶峰保供	非常成熟	2100 700	4500 1500	7500 2500
	P2G	爬坡、顶峰、长周期调节	很不成熟	—	—	—
合计	日内调峰			10100	22500	34000
	顶峰保供			2700	4500	6300
	快速爬坡			2300	7300	13300
	中长周期调节			0	2500	5500

跨能源品种可调节资源分为供应侧和需求侧资源两类。这两类资源有着完全不同的开发利用成本组成及特性。供应侧资源通常需要增加重要耦合设备、进行较大投资才能充分发挥跨能源品种资源潜力，包括燃煤热电联产解耦、燃气热电联产解耦、氢发电等。需求侧资源通常仅需要增加少量控制设备、进行较少投资就能发挥跨能用品种资源潜力，包括电热泵、空调、电制氢等设备的负荷调整。总体来看，跨能源品种可调节资源的调节成本约为新建各类电力调节设备成本的 5%~20%。并能满足 10%~30% 的各类调节需求，成为调节体系建设的重要补充。

4 跨能源品种可调节资源案例分析

不用跨能源品种可调节资源利用的时序、场景会因为资源特性、需求种类有所区分，仅以未来新能源高比例接入下电氢协同服务中长周期电



表 4 未来夏季跨能源品种可调节资源潜力
Table 4 Adjustable resource potential across energy varieties in the future summer season

资源	调节种类	满足调节需求	技术成熟度	可调节资源潜力/万kW		
				2025年	2030年	2035年
热	煤电热	日内调峰；	非常成熟	2400	3600	4000
	电解耦	顶峰保供		800	1200	1320
	电热泵	日内调峰；	基本成熟	800	1600	1900
	负荷	快速爬坡		80	320	630
冷	集中控制	快速爬坡、	成熟	600	1600	1900
	空调	日内调峰		60	320	630
	家用空调	快速爬坡、	不成熟	—	1900	2200
		日内调峰		—	380	730
氢	电制氢负荷	日内调峰；	不成熟	—	5000	10000
		快速爬坡；		—	2000	3300
		长周期调节		—	2500	5000
	氢发电	快速爬坡、	很不成熟	—	—	500
日内调峰、						
气	天然气发电改造	快速爬坡、	非常成熟	2100	4500	7500
		日内调峰；		700	1500	2500
	P2G	顶峰保供				
		爬坡、顶峰、长周期调节	很不成熟	—	—	—
合计	日内调峰			5900	18200	28500
	顶峰保供			1500	2700	4320
	快速爬坡			2240	7520	13460
	中长周期调节			0	2500	5500

量平衡为例，分析跨能源品种可调节资源的利用价值。

4.1 案例设置

以某清洁能源大省为例，2035 年，按照规划预测，该省全社会最大负荷 2 700 万 kW，用电量 1 800 亿 kW·h，直流外送功率 800 万 kW，采用定曲线模式外送电量 400 亿 kW·h。省内太阳能发电装机规模 5 100 万 kW，其中光热发电 600 万 kW 左右，风电 3 000 万 kW，常规水电装机规模 2 200 万 kW，气电 400 万 kW，煤电 600 万 kW，生物质及其他火电 77 万 kW。由于高比例的波动电源接入，需要提供大量的灵活可调节资源。按照规划，建设抽蓄 280 万 kW，电化学储能 720 万 kW。

如图 5 所示，2035 年 11 月至次年 1 月，风电、光伏处于季节性发电低谷时段，省内河流处于枯水期，叠加冬季取暖需求，考虑光热发电能够平抑日内部分时段的调节需求，但储热规模和天气

变化等原因，尚不能满足数日内的调节需求，因此在现有储能、需求响应等调节方式基础上，全省出现 2 次连续 4 天以上的电量缺口，2 个月内 5 次出现电量缺口，缺口电量累计超过 4 亿 kW·h，占全省全社会用电比重约为 0.3%。而在夏季风光大发期间，由于本地负荷及外送需求有限，有较长时间存在弃风弃光情况，弃电量累计预计超过 224 亿 kW·h，约占全年用电量的 12.4%。通过生产模拟，在原有规划方案基础上，短时间存在 200 万 kW 功率缺口，和电量缺口统筹考虑，为满足长期电量平衡需求，设定 4 种电力供应保障方案，比较不同方案的年化成本和度电成本，以及额外的其他价值。

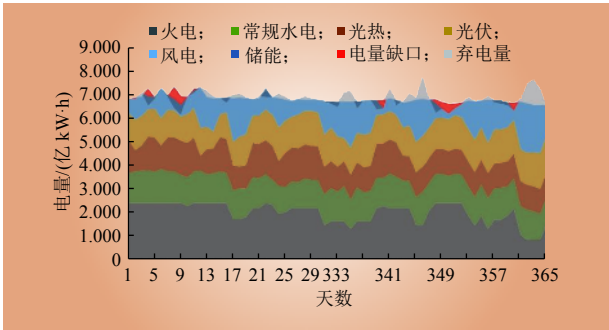


图 5 冬春之交区间季节性缺口情况
Fig. 5 Seasonal electricity gap between winter and spring

方案 1：新建火电+碳收费：新建火电 2×100 万 kW+购置二氧化碳排放费用。新建火电主要是考虑可提供长周期保障的能源供应方式，且新增火电仅为满足较短时间功率和电量缺口，因此不采用成本较高的碳捕获、利用与封存技术（CCUS），而采用购置 CO₂ 排放的方式，降低成本。

方案 2：新建储能：新建储能（含抽蓄）600 万 kW/4 800 万 kW·h。储能规模需满足电力电量需求和储能 8 h 需求。

方案 3：热电解耦+氢负荷调节+储能：煤电灵活性改造提供 50 万 kW 顶峰保供资源，绿电制氢设施可调节资源 50 万 kW，新建储能（含抽蓄）300 万 kW/2 400 万 kW·h。绿电制氢设施可调节资源潜力是综合全国预测氢负荷及该省总负荷比例预估。

方案 4：热电解耦+氢负荷调节+掺氢发电：煤电灵活性改造提供 50 万 kW 顶峰保供资源，绿



电制氢设施可调节资源 50 万 kW（同上），天然气掺氢发电 100 万 kW（20% 掺氢）。

年化成本的计算公式表示为

$$C_y = \frac{\sum [(C_{c,t} + C_{O\&M,t} + F_t + C_t + D_t)(1+r)^{-t}]}{N} \quad (2)$$

度电成本的计算公式表示为

$$C_p = \frac{\sum [(C_{c,t} + C_{O\&M,t} + F_t + C_t + D_t)(1+r)^{-t}]}{\sum e_a(1+r)^{-t}} \quad (3)$$

式中： C_y 为年化成本； C_p 为度电成本； $C_{c,t}$ 为第 t 年初始资金投入； $C_{O\&M,t}$ 为第 t 年运行和维护资金投入； F_t 为第 t 年燃料费用； C_t 为第 t 年碳排放处理费用； D_t 为第 t 年废物回收处理费用； r 为折旧率； N 为运行总年限； e_a 为年发电量。

4.2 结果分析

上述电力供应保障方案以冬季 5 次共 15 天电量缺口（其中两次分别出现缺口达到 4 天、甚至 5 天的情况），单日最大电量缺口 0.47 亿 kW·h 为例设定。具体方案参数设置和成本效益及价值分析如表 5 所示。

表 5 4 种不同方案对比分析

Table 5 Comparative analysis of four different solutions

方案	参数设置	年化成本及单位成本	额外影响
1	煤电建设费用 4 000 元/kW，燃料成本 660 元/t，度电煤耗 300 g 折算为 0.2 元/(kW·h)，每年发电量 4.8 亿 kW·h，CO ₂ 排放 180 元/t，运维成本 3%，寿命 30 年，折现率 7%	年化成本 8.45 亿元，单位成本 4.26 元/(kW·h)	全省煤电机组平均利用小时由 3 950 h 下降到 3 450 h 左右。影响煤电收益水平
2	储能建设费用 6 500 元/kW，转换效率 0.8，原始电价为 0.3 元/(kW·h)，发电量 4.8 亿 kW·h，运维成本 3%，寿命 30 年，折现率 7%	年化成本 19.3 亿元，单位成本 9.71 元/(kW·h)	额外消纳新能源 6 亿 kW·h，减少碳排放 52.8 万 t
3	储能建设费用同方案 2；火电改造费用 500 元/kW，制氢设施改造费用 200 元/kW，补贴参考 2022 年天津、河北、浙江等地非实时补贴标准，为 2 元/(kW·h)	年化成本 4.95 亿元，单位成本 5.31 元/(kW·h)	额外消纳新能源 3 亿 kW·h，减少碳排放 26.4 万 t
4	火电改造费用 500 元/kW，制氢设施改造费用 200 元/kW，补贴 2 元/(kW·h)；掺氢发电建设费用 4 000 元/kW，燃料成本以 30% 电-氢-电转换效率，初始电价 0.3 元/(kW·h) 折算为 1 元/(kW·h)	年化成本 2.19 亿元，单位成本 2.52 元/(kW·h)	额外消纳新能源 8 亿 kW·h，减少碳排放 70.4 万 t

从假设的 4 类解决方案看，以火电灵活性改造（热电解耦）+制氢负荷调节+掺氢发电等组合的方式，对于平衡季节性电量短缺有很好的响应能力，这些资源提供仅需在已有的火电厂、制氢设施上进行部分改造，因此从成本上具有相对优势，根据计算结果可知，利用跨能源品种可调节资源，相比新建电源和新建储能，成本大幅降低的同时，还能更好的消纳新能源，且能带来碳排放降低的额外收益，是更好满足不同量级的长周期调节需求的首选资源。同时，改造后的火电以及电制氢负荷提供额外的调节能力，可以通过市场竞争，获得相应的调节收益，收益水平根据市场紧缺程度波动，但应高于度电的发电成本。

为考察跨能源品种可调节资源对更长调节时间长度的适用性，设计了 2 种不同的调节时间进行比较，图 6 的蓝色图标表示一年中有 10 天时间需要调节，橙色图标表示有 20 天时间需要调节，通过分析结果可知，当跨周/月/季的调节电量缺口持续时间延长，以上述方式来满足调节需求仍旧是经济合理的，随着缺口持续时间的延长，其经济性仍具有比较优势。

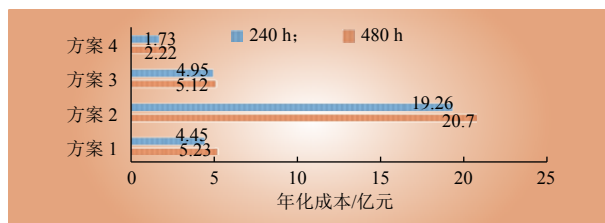


图 6 不同方案在不同缺口时间下的年化成本对比

Fig. 6 Annualized cost comparison of different solutions under different gap times

5 结论

随着新能源占比不断提升以及新型负荷的快速增长，电力系统的调节需求呈现倍增态势，传统的调节能力建设手段面临不能覆盖所有调节需求且成本不断上升的挑战。跨能源品种可调节资源广泛存在于与电力系统紧密耦合的其他能源系统内且尚未得到有效的开发利用。在未来调节需求的种类和总量不断增加的现实情况下，通过挖掘跨能源品种可调节资源的潜力，能够提供经济的调节能力，保障新型电力系统建设。跨能源品



种可调节资源具备较高的经济性，并能提高现有资源的利用效率，通过合理的开发，能够满足10%~30%的各类调节需求，是新型电力系统调节体系的重要组成部分。

参考文献：

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2806–2819.
- ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2806–2819.
- [2] 郭剑波. 新型电力系统面临的挑战以及有关机制思考[J]. *中国电力企业管理*, 2021(25): 8–11.
- [3] 周原冰, 杨方, 余潇潇, 等. 中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题[J]. *中国电力*, 2022, 55(5): 1–11.
- ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, *et al.* Realization pathways and key problems of carbon neutrality in China's energy and power system[J]. *Electric Power*, 2022, 55(5): 1–11.
- [4] 单葆国, 冀星沛, 姚力, 等. 能源高质量发展下中国电力供需格局演变趋势[J]. *中国电力*, 2021, 54(11): 1–9, 18.
- SHAN Baoguo, JI Xingpei, YAO Li, *et al.* Evolving tendency of electric supply and demand pattern under the circumstances of high-quality energy development[J]. *Electric Power*, 2021, 54(11): 1–9, 18.
- [5] 张晋芳, 元博. “十四五”电力系统灵活性资源供需平衡分析[J]. *中国电力企业管理*, 2020(19): 36–38.
- [6] 张宁, 卢静, 代红才. 源网荷储协调发展下我国电力系统灵活性资源展望[J]. *中国电力企业管理*, 2020(16): 44–47.
- [7] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(16): 3–16.
- LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, *et al.* Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(16): 3–16.
- [8] 中国电力圆桌项目课题组. 电力系统灵活性提升：技术路径、经济性与政策建议[R]. 2022.
- [9] 北京大学能源研究院. 新能源为主体的新型电力系统的内涵与展望[R]. 2022.
- [10] 卢彬. 电力系统灵活性提升路径多[N]. *中国能源报*, 2020-12-21(11).
- [11] 闫华光. 能源互联网背景下可调节负荷技术应用与展望[J]. *电力设备管理*, 2020(5): 25, 32.
- YAN Huaguang. Application and prospect of adjustable load technology in the context of energy Internet[J]. *Electric Power Equipment Management*, 2020(5): 25, 32.
- [12] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(16): 37–48.
- WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, *et al.* Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(16): 37–48.
- [13] 党东升, 韩松, 周珏, 等. 需求响应参与系统调峰研究综述[J]. *电力需求侧管理*, 2017, 19(5): 13–17.
- DANG Dongsheng, HAN Song, ZHOU Jue, *et al.* Review of demand response participating in power system peak shifting[J]. *Power Demand Side Management*, 2017, 19(5): 13–17.
- [14] 德国能源署. 德国电力系统中的灵活性技术和措施[R]. 2021.
- [15] 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.
- [16] 张书华, 付林. 优先利用分布式能源及工业余热的多能互补供热模式[J]. *分布式能源*, 2018, 3(1): 64–68.
- ZHANG Shuhua, FU Lin. Multi energy complementary heating mode with priority use of distributed energy and industrial waste heat[J]. *Distributed Energy*, 2018, 3(1): 64–68.
- [17] 李伟阳. 碳达峰碳中和, 热网电网协同一定是方向[N]. *中国能源报*, 2021-6-29(1).
- [18] 曾爽, 梁安琪, 王立永, 等. 考虑光储型电热协同系统灵活性的多代理削峰填谷策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(2): 133–142.
- ZENG Shuang, LIANG Anqi, WANG Liyong, *et al.* Multi-agent peak shaving and valley filling strategy considering the flexibility of electric-thermal system with optical storage[J]. *Electric Power*, 2023, 56(2): 133–142.
- [19] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14): 11–20.
- LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, *et al.* Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(14): 11–20.
- [20] RAD F M, FUNG A S, ROSEN M A. An integrated model for



- designing a solar community heating system with borehole thermal storage[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2017, 36: 6–15.
- [21] LANG Y F, XU D, LIU S Y, *et al.* A scheduling model for wind power consumption considering source-charge coordination of combined heat and power system in low-carbon environment[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 752(1): 012004.
- [22] WOGRIN S, GALBALLY D, RENESES J. Optimizing storage operations in medium- and long-term power system models[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(4): 3129–3138.
- [23] 丁剑, 方晓松, 宋云亭, 等. 碳中和背景下西部新能源传输的电氢综合能源网构想 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 1–9.
DING Jian, FANG Xiaosong, SONG Yunting, *et al.* Conception of electricity and hydrogen integrated energy network for renewable energy transmission in Western China under background of carbon neutralization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(24): 1–9.
- [24] 荆涛, 陈庚, 王子豪, 等. 风光互补发电耦合氢储能系统研究综述 [J]. 中国电力, 2022, 55(1): 75–83.
JING Tao, CHEN Geng, WANG Zihao, *et al.* Research overview on the integrated system of wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage[J]. *Electric Power*, 2022, 55(1): 75–83.
- [25] 陈岩, 靳伟, 王文宾, 等. 兼顾区域自律和消纳品质的配电网新能源消纳能力分析方法 [J]. 中国电力, 2021, 54(9): 143–155.
CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, *et al.* Analyzing method of the absorption capability of new energy in distribution network with consideration of regional self-discipline and absorption quality[J]. *Electric Power*, 2021, 54(9): 143–155.
- [26] 中国工程院, 国网能源研究院. 我国碳达峰、碳中和战略及路径研究 [R]. 2021.
- [27] 中国电力企业联合会. 电力行业碳达峰碳中和发展路径研究 [R]. 2021.
- [28] 中国节能协会热泵专业委员会. 热泵助力碳中和白皮书 [R]. 2021.
- 作者简介:**
王林钰 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事城市能源战略研究, E-mail: wangliny_0@sina.com;
张富强 (1982—), 男, 博士, 高级工程师 (教授级), 从事能源战略、能源电力规划研究, E-mail: zhangfuqiang@sgeri.sgcc.com.cn.
- (责任编辑 张重实)

Potential and Utilization Scenarios for Regulation Resources Across Energy Varieties in China

WANG Linyu¹, ZHANG Fuqiang¹, GONG Yichun¹, XIA Peng¹, SHI Wenbo², PAN Hangping²

(1. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. State Grid (Suzhou) City Energy Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215103, China)

Abstract: The construction of the regulation system is of importance for the construction of a new power system, the traditional path faces challenges such as shortage of resources, high costs, and lack of long-term means. this paper firstly defines the research object and scope of adjustable resources across energy varieties, and then analyzes the demand for regulation resources in different periods and the potential of adjustable resources across energy varieties, and conducts a cost-benefit analysis by scenario analysis. The results show that the development and utilization of adjustable resources across energy varieties has economic, social and environmental values, and can play a key role and become an important supplement in the construction of the regulation system. This study can provide a reference for further enriching the sources of regulation resources, reducing regulation costs, and carrying out business model research.

This work is supported by Management Consulting Project of SGCC (No.SGZB0000YJWT2200487).

Keywords: regulation system; adjustable resources across energy varieties; regulation demand; regulation potential; cost and benefit