

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240880

基于替代效益的水电多维价值解耦建模与量化评估

潘捷¹, 向明旭¹, 杨知方¹, 文旭², 余娟¹, 周全²

(1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 国家电网有限公司西南分部, 四川 成都 610041)

摘要: 电力市场发挥资源配置作用的前提是其能够充分发现资源价值。然而, 现有价值评估方法难以反映清洁能源对系统产生的真实多维价值, 导致其市场收益与自身为系统产生的价值不匹配。对此, 以调节式水电为研究对象, 提出了基于替代效益的水电多维价值解耦建模与量化评估方法。首先, 剖析了水电在环保低碳、灵活调节、保供支撑等方面的价值及其与市场收益的匹配性。然后, 构建了基于替代效益的水电多维价值解耦量化评估框架, 以水电接入引起的系统相关成本变化情况表征其多维价值, 并设计了面向水电价值解耦量化的对比场景。随后, 通过时序生产模拟获取不同场景下市场主体的时变运行方式与系统运行成本, 实现水电多维价值的定量解耦表征。基于电网实际数据的算例分析表明, 水电机组的多维价值与机组运行工况及系统运行状态密切相关, 不同工况下水电机组的价值差异显著, 而当前市场机制未能有效体现该资源价值差异, 对性能良好的水电资源激励不足, 相关测算结果为市场机制的完善提供了支撑。

关键词: 水电; 电力市场; 价值解耦量化评估; 替代效益

Decoupling modeling and quantitative evaluation of multidimensional value of hydropower based on substitution benefits

PAN Jie¹, XIANG Mingxu¹, YANG Zhifang¹, WEN Xu², YU Juan¹, ZHOU Quan²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China;

2. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The premise for the electricity market to effectively allocate resources is its ability to fully recognize resource value. However, existing valuation methods struggle to reflect the real multidimensional value of clean energy within the power system, resulting in a mismatch between market revenues and the actual value it contributes. To address this issue, this paper focuses on regulated hydropower units and proposes a decoupling modeling and quantitative evaluation method for multidimensional value of hydropower based on substitution benefits. First, the value of hydropower units in low carbon emissions, flexible regulation, and power supply is analyzed, along with its alignment with market revenues. Then, a decoupling and quantitative evaluation framework is proposed based on substitution benefits, representing hydropower units' multidimensional value through system cost variations resulting from its integration. Comparative scenarios are designed to facilitate decoupling and quantification of hydropower units' value. Subsequently, a time-series production simulation is conducted to capture market participants' dynamic operational behavior and system cost changes under different scenarios, enabling the quantitative characterization of hydropower units' multidimensional value. Case studies based on real power grid data illustrate that the multidimensional value of hydropower units is closely related to their operating conditions and system operation status, with significant variations across different scenarios. However, current market mechanisms fail to effectively reflect these value differences, providing insufficient incentives for high-performing hydropower resources. The relevant analysis results provide support for the improvement of market mechanisms.

This work is supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 52307082).

Key words: hydropower; electricity market; decoupling and quantitative evaluation; substitution benefits

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(52307082)

0 引言

水电、风电、光伏等清洁能源大规模并网已成为电力系统发展的必然趋势^[1-2]。为适应高比例清洁能源的接入,我国积极推进电力市场的深化改革与发展,旨在通过电力市场的资源配置作用促进清洁能源的消纳与优化^[3]。

电力市场发挥资源优化配置作用的前提条件是市场能够充分发现不同清洁能源在电力供应、减污降碳、灵活调节、保供支撑等方面的多维价值。对此,当前电力市场开展了包括电能量市场、辅助服务市场、容量市场、绿证市场在内的多级市场^[4]。其中,在电力供应方面,不同清洁能源均可发出电力以满足用户用电需求,相应的电能量价值能够通过电能量市场得到有效体现。然而,在减污降碳、灵活调节、保供支撑方面,当前电力市场未能有效体现不同清洁能源主体在灵活调节能力、出力可靠程度等方面的特性差异,导致清洁能源的市场收益与其为系统带来的真实价值不匹配,难以激励市场成员以赚取更多收益为目的主动改善自身运行性能,本文第1节也将对此展开更为详细的分析。清洁能源多维价值的定量评估是设计体现清洁能源差异化价值的市场机制,进而改善上述问题的基础。为此,本文将针对清洁能源在环保、灵活性、保供支撑等方面的多维价值展开量化评估。

水电作为我国第二大常规能源,在国内(尤其是西南地区)电力系统格局中占有极其重要的地位,是推动我国能源清洁低碳转型的关键资源。2024年8月11日,中共中央、国务院印发《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》,明确提出“加快西南水电等清洁能源基地建设,统筹水电开发和生态保护,推进水风光一体化开发”^[5];此外,《四川省“十四五”能源发展规划》中还指出“优先建设季以上调节能力水库电站”^[6]。因此,本文以调节式水电为对象,展开清洁能源多维价值量化评估研究,所提方法也可扩展应用于风电、光伏等其他类型清洁能源的价值评估。

针对水电在环保、灵活性、保供支撑等方面的价值评估,国内外学者已展开了相关研究。在环保价值方面,文献[7-8]应用全生命周期碳排放评估方法对水电从建造到运行的全过程进行分析,以获得其全生命周期碳排放因子,并通过与火电碳排放因子的对比来评估水电环保价值。然而,上述研究仅考虑了水电机组自身的碳排放情况,未量化其为整个系统带来的环保价值。文献[9]提出了含水电的综合能源系统优化调度方法,通过能源互补降低电力

系统总体碳排放,但未量化单个清洁能源主体对系统总体碳减排的贡献。

在灵活性价值方面,文献[10]构建了水电灵活性评价框架,按“优良、中等、差”的等级定性分析了不同类型水电在提供快速启停、爬坡能力、备用容量等辅助服务时的灵活调节能力。文献[11-12]建立了灵活性需求指标,并在调度模型中添加灵活性供需匹配约束,进而量化水电提供的灵活调节能力并通过合理制定调度运行方式提升水电灵活性。然而,以上研究未分析不同水电机组在不同运行工况下对系统产生的差异化灵活性价值。

在保供价值方面,清洁能源发电能力高度依赖于气象条件,其出力不可靠性给新型电力系统的电力保供带来了严峻挑战。对此,文献[13-14]考虑保供与消纳两个目标,对高比例新能源电力系统的保供形势进行了初步分析。文献[15-16]剖析了引起2022年四川限电事件的关键因素,提出了提升新型电力系统保供能力的应对措施,并指出当前市场机制未能真实反映资源保供价值及电力供需关系。目前,关于清洁能源保供价值的研究尚处于起步阶段。部分学者针对新能源的可信容量展开研究^[17-18],通过评估给定置信水平下新能源能够达到的最低出力反映其保供价值^[19]。然而,水电保供价值评估的相关研究仍比较欠缺,现有研究通常将调节式水电装机容量视作其保供能力,未考虑极端缺水条件下水电发电能力不足所引起的电力保供问题,无法反映不同来水条件、机组参数、系统供需关系影响下水电机组的真实保供价值。

综上所述,现有研究主要从资源自身角度出发对其价值进行量化评估,未考虑资源运行特性与系统运行需求间的匹配性,难以体现不同工况下水电机组对整个系统产生的综合效益。此外,现有研究主要关注水电机组总体运行特性对系统某一方面运行效益的影响,未对水电机组不同特性所产生的价值进行解耦分析,无法为市场运营机构及水电机组自身提供更加精细的信息。同时,现有研究也未对水电机组的多维价值进行综合考量,而水电机组对系统产生的综合效益可能是不同价值耦合作用的结果,如何对不同价值进行解耦量化有待进一步研究。在价值评估方面,基于 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 理论的替代效益已在电力市场研究中获得较多应用,主要用于辨识火电、风电机组对系统创造的总价值或付出的总成本^[18-20],从而为形成激励相容的市场机制提供依据。然而,上述研究未细化区分系统的各类成本以及机组的各类特性,也无法解耦量化水电机组在碳排放、灵活性、电力供应等方面产

生的多维价值。针对上述问题, 本文结合系统时变运行需求与水电时变运行工况, 提出了基于替代效益的水电多维价值解耦建模与量化评估方法。本文主要贡献包括:

1) 剖析了水电多维价值及其当前市场化收益的匹配性。结合电力系统安全经济低碳运行要求, 从环保价值、灵活性价值、保供价值 3 个方面剖析了不同条件下水电机组对系统的多维差异化价值; 结合当前市场机制下水电机组的收益模式, 分析了不同条件下水电机组差异化价值与当前机制下市场收益的匹配性, 论证了开展水电多维差异化价值量化评估的必要性。

2) 基于替代效益解耦量化评估水电多维价值。根据 VCG 理论, 提出了基于替代效益的水电多维价值解耦量化评估框架, 以不同条件下水电机组接入前后, 系统相关运行成本的变化情况表征该水电机组的价值, 并分析水电机组不同特性以及不同价值对系统运行效益的耦合影响, 基于此, 设计不同系统运行场景, 通过不同场景下系统运行效益的变化情况实现水电多维价值的解耦评估; 通过时序生产模拟获取不同场景下系统各类资源的时变运行方式, 并结合系统运行对低碳环保、灵活调节及电力保供的时变需求, 构建水电多维价值的定量解耦表征模型。

1 水电多维价值与其市场收益匹配性剖析

本节将从环保低碳、灵活调节、保供支撑等方面出发, 定性分析不同工况下水电机组以及新能源机组对电力系统产生的多维价值, 并对比不同资源在当前市场机制下的收益模式, 进而剖析水电多维价值与其市场收益的匹配性, 论证开展水电多维价值量化评估的必要性。

1.1 水电环保价值与其绿证市场收益的匹配性分析

水电与风、光新能源利用可再生自然资源发电, 具有发电清洁低碳的特点。然而, 新能源具有随机波动性, 需火电等常规可控资源配套提供调频、备用等辅助服务, 从而产生额外的间接碳排放^[21]。相较之下, 调节式水电具有良好的灵活调节能力, 无需火电等高碳排放资源配套提供辅助服务, 同时, 其灵活调节特性有利于提高系统新能源消纳水平, 进而降低系统总体运行碳排放, 产生额外环保价值。因此, 在降低系统总体碳排放方面, 水电在发电阶段的环保价值将高于新能源。此外, 也可推断由于所需辅助服务较少, 随机波动较小的新能源所产生的环保价值也将高于随机波动较大的新能源, 本文算例分析部分对此进行了论证。

目前, 为补偿清洁能源的环保价值, 我国建立了绿证市场, 使水电、风电、光伏等清洁能源能够凭借其低碳特性获得额外收益, 以促进清洁能源的开发利用^[22-23]。然而, 在当前绿证市场中, 不同清洁能源被同等看待(即清洁能源每发出 1 MWh 的电量便可获得一个绿证, 并在绿证市场上进行交易), 未能区分不同清洁能源对于整个系统而言的差异化环保价值。这导致水电具有更高的环保价值却未能获得更多环保收益, 同样地, 随机波动更小的新能源也无法获得相匹配的环保收益。资源环保价值与自身市场收益的不匹配将难以激励清洁能源改善自身性能, 从而降低系统总体碳排放。

1.2 水电灵活性价值与其辅助服务市场收益的匹配性分析

调节式水电具有良好的快速启停能力及灵活爬坡能力, 其灵活调节能力较强。

辅助服务市场是配置灵活性资源、提升系统灵活性水平的重要手段^[24-26], 主要包括调频、备用等。为使资源灵活性价值与其市场收益相匹配, 当前部分调频市场采用考虑资源调频性能的市场机制, 使调频性能更好的资源在市场竞争中更占优势, 并且, 在市场结算中其提供的单位调频容量或调频里程服务也能获得更多收益。然而, 当前辅助服务市场主要关注资源在实际运行环节中的调节性能, 未考虑高比例清洁能源电力系统背景下资源灵活性价值的稀缺性。例如, 当系统辅助服务需求较大时, 若没有某一资源的参与, 系统将无法满足辅助服务需求, 进而因灵活性不足而引起弃风弃光或切负荷。此时, 该资源将因其稀缺性而具有较高灵活性价值。当前市场未能考虑市场实际供需对资源灵活性价值的影响, 将影响稀缺灵活性资源参与市场的积极性, 诱发系统灵活性不足等问题。

1.3 水电保供价值与其容量补偿收益的匹配性分析

具有发电能力的资源均可作为系统提供保供价值, 但不同资源的保供价值具有显著差异。例如, 相比于常规火电机组, 风、光、水电等清洁能源受气象因素的影响, 面临在负荷高峰期无法以自身额定装机容量发电的风险, 对于系统而言的保供价值较弱。相比于风、光新能源, 调节式水电具有灵活可控的特点, 但在极端高温干旱条件下, 水电站的发电能力也将受到显著影响。因此, 在高比例清洁能源电力系统建设背景下, 发电资源的保供价值对于维持系统安全可靠运行至关重要。

为激励发电资源的投资建设, 保障电力系统可靠供电能力, 国内外正推行容量补偿机制及容量市场机制^[27-28]; 在容量补偿机制中, 补偿容量与容量

电价一般通过行政手段确定；在容量市场中，容量电价与交易容量通过行政和市场手段共同确定。其中，常规火电、调节式水电机组通常能够以自身额定容量持续可靠发电，故一般以申报的装机容量获得补偿。相比之下，风、光等新能源机组往往无法以申报容量持续可靠发电，其一般以可信容量获得补偿^[25]。

综上所述，当前容量补偿或容量市场机制通过机组容量或可信容量衡量发电资源的保供价值。然而，对于调节式水电而言，仅凭借装机容量无法反映不同来水场景下水电机组时变发电能力与系统时变负荷需求间的匹配性，难以衡量水电机组的真实保供价值。例如，假设两台水电机组(机组 A 与机组 B)具有相同的装机容量，机组 A 在负荷高峰时来水不足，仅能以较低水平发电，导致系统供电能力不足，而在负荷低谷时的出力水平较高；机组 B 在负荷高峰时能够提供较高出力水平，有效保障了电力供应，而在负荷低谷时来水不足，仅能以较低水平发电，但由于负荷需求较低，未导致系统总体供电能力不足。尽管两个机组具有相同的装机容量，但显然，相比于机组 A，机组 B 具有更高的保供价值。

2 基于替代效益的水电多维价值解耦量化评估方法

2.1 基于替代效益的水电多维价值解耦量化评估框架

VCG 理论定义市场参与者的价值为在移除该市场参与者后其他参与者的增量成本^[29-31]，即该市场成员对其他成员的替代效益^[32]。以该理论为基础，本文提出了基于替代效益的水电价值总体量化评估框架，如图 1 所示。

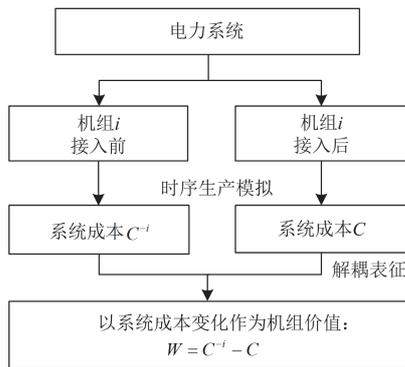


图 1 基于替代效益的水电价值总体量化评估框架
Fig. 1 Overall framework of assessment for value of hydropower based on substitution benefit

由图 1 可见，该框架将通过时序生产模拟获取某一水电机组接入前后系统运行成本的变化情况，

并以该成本变化表征水电机组为系统产生的价值。系统总体运行成本由各类成本组成，其中，碳排放成本、弃风弃光成本以及切负荷成本反映了系统总体清洁低碳特性、总体灵活调节能力充裕性以及总体保供能力充裕性。因此，本文将以上述成本的变化解耦表征水电的环保价值、灵活性稀缺价值以及保供稀缺价值，如图 2 所示。

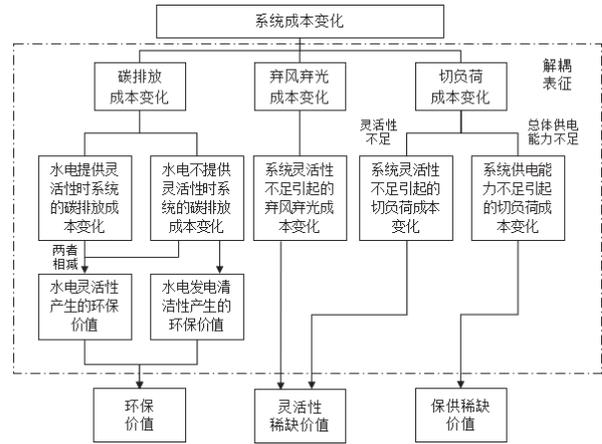


图 2 水电多维价值解耦表征方法

Fig. 2 Decoupling representation method of multi-dimensional value for hydropower

在环保价值评估方面，本文以系统移除某一水电机组后系统总体碳排放成本的增量表征该水电机组的环保价值。如 1.1 节所述，水电环保价值由其发电清洁性与灵活调节性共同形成。为实现水电环保价值的解耦表征，本文构建了水电无灵活调节能力的特殊场景，以水电机组无灵活调节能力时的环保价值作为其发电清洁性所产生的环保价值(此时水电环保价值将只由发电清洁性构成)；以总体环保价值与发电清洁性所产生环保价值之间的差异作为其灵活调节性产生的环保价值。水电环保价值的解耦评估可为市场运营机构及水电机组自身提供环保价值精细信息，进而指导市场机制的设计以及水电机组自身的性能改善。

在灵活性价值评估方面，系统总体灵活爬坡能力不足将导致系统弃风弃光及切负荷。因此，本文以系统移除某一水电机组后系统总体弃风弃光及切负荷成本的增量表征该水电机组的灵活性价值。

在保供价值评估方面，系统总体发电能力不足将引起系统切负荷。因此，本文以系统移除某一水电机组后系统总体切负荷成本的增量表征该水电机组的保供价值。

如前文所述，系统灵活爬坡能力的不足以及发电能力的不足均将引起系统切负荷。为实现水电灵

活性价值与保供价值的准确评估, 本文将对系统切负荷成本进行解耦。以系统总体供电能力不足导致的切负荷成本增量表征保供价值, 以其余切负荷成本增量表征灵活性价值(其余切负荷成本是由于系统灵活爬坡能力无法满足负荷需求变化导致的)。

本文以系统弃风弃光与切负荷成本增量表征水电灵活性价值和保供价值, 但当系统自身灵活调节能力与可靠供电能力较为充裕时, 移除水电机组并不会引起弃风弃光与切负荷成本的增加。此时, 机组的灵活性价值可直接表征为其能提供的灵活调节能力, 保供价值可直接表征为其装机容量, 与当前市场机制一致。本文主要关注高比例清洁能源接入条件下系统灵活调节能力与可靠供电能力不足时资源的稀缺性价值, 对上述情况不作深入探讨。

基于上述框架可实现水电多维价值的定量解耦评估, 本文时序生产模拟环节所采用的调度决策模型见 2.2 节; 基于系统调度运行结果的水电多维价值定量解耦表征模型见 2.3 节。

2.2 含水-火-新能源的电力系统时序生产模拟模型

时序生产模拟可在考虑负荷需求与新能源时序出力变化的条件下, 对电力系统进行长周期、精细时间尺度的调度决策, 从而模拟电力系统的逐日、逐时段电力平衡过程^[33], 获取不同机组接入场景下各发电资源的运行情况 & 系统运行成本, 为水电多维价值的量化评估奠定基础。本文在时序生产模拟环节所采用的逐日调度决策模型详述如下(调度颗粒度为 1 h)。

1) 目标函数

$$\min \left\{ \sum_{t \in T} \left[\sum_{i_g \in I_g} \left(b_{\text{coal}} P_{i_g,t} + b_{\text{res},i_g}^{\text{up}} R_{i_g,t}^{\text{up}} + b_{\text{res},i_g}^{\text{down}} R_{i_g,t}^{\text{down}} + C_{i_g,t}^{\text{up}} + C_{i_g,t}^{\text{down}} \right) + \sum_{i_h \in I_h} (b_{\text{hy}} P_{i_h,t} + b_{\text{res},i_h}^{\text{up}} R_{i_h,t}^{\text{up}} + b_{\text{res},i_h}^{\text{down}} R_{i_h,t}^{\text{down}}) + \sum_{i_r \in I_r} (b_{\text{cur}} P_{\text{cur},i_r,t}) + \sum_{d \in D} (b_{\text{loss}} P_{\text{loss},d,t}) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: T 为调度时段的集合(即 24 h); t 为调度时段的编号; I_g 、 I_h 、 I_r 分别为火电机组、水电机组、新能源机组的集合; i_g 、 i_h 、 i_r 分别表示火电机组、水电机组、新能源机组的编号; D 为负荷的集合; d 表示负荷的编号; b_{coal} 为火电机组发电成本; $b_{\text{res},i_g}^{\text{up}}$ 、 $b_{\text{res},i_g}^{\text{down}}$ 分别为火电机组的上、下备用成本; $C_{i_g,t}^{\text{up}}$ 与 $C_{i_g,t}^{\text{down}}$ 为火电机组的启停成本; b_{hy} 为水电运行成本; $b_{\text{res},i_h}^{\text{up}}$ 、 $b_{\text{res},i_h}^{\text{down}}$ 分别为水电机组的上、下备用成本; b_{cur}

为弃风弃光成本; b_{loss} 为切负荷惩罚成本; $P_{i_g,t}$ 为火电机组出力; $P_{i_h,t}$ 为水电机组出力; $R_{i_g,t}^{\text{up}}$ 、 $R_{i_h,t}^{\text{up}}$ 分别为火电和水电机组预留的上备用容量; $R_{i_g,t}^{\text{down}}$ 、 $R_{i_h,t}^{\text{down}}$ 分别为火电和水电机组预留的下备用容量; $P_{\text{cur},i_r,t}$ 为新能源弃风弃光量; $P_{\text{loss},d,t}$ 为切负荷量。

2) 系统运行约束

功率平衡约束

$$\sum_{d \in D} P_{d,t} = \sum_{i_g \in I_g} P_{i_g,t} + \sum_{i_h \in I_h} P_{i_h,t} + \sum_{i_r \in I_r} P_{i_r,t} \quad (2)$$

式中: $P_{d,t}$ 为实际满足的负荷需求; $P_{i_r,t}$ 为新能源机组的实际出力。

系统备用约束

$$\begin{cases} R_{\text{sys},t}^{\text{up}} = \sum_{d \in D} k_d^{\text{up}} P_{\text{pre},d,t} + \sum_{i_r \in I_r} k_r^{\text{up}} P_{\text{pre},i_r,t} \\ R_{\text{sys},t}^{\text{down}} = \sum_{d \in D} k_d^{\text{down}} P_{\text{pre},d,t} + \sum_{i_r \in I_r} k_r^{\text{down}} P_{\text{pre},i_r,t} \\ R_{\text{sys},t}^{\text{up}} \leq \sum_{i_g \in I_g} R_{i_g,t}^{\text{up}} + \sum_{i_h \in I_h} R_{i_h,t}^{\text{up}} \\ R_{\text{sys},t}^{\text{down}} \leq \sum_{i_g \in I_g} R_{i_g,t}^{\text{down}} + \sum_{i_h \in I_h} R_{i_h,t}^{\text{down}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $R_{\text{sys},t}^{\text{up}}$ 、 $R_{\text{sys},t}^{\text{down}}$ 分别为系统上、下备用需求; k_d^{up} 、 k_d^{down} 分别为单位负荷需求引起的上、下备用需求系数; k_r^{up} 、 k_r^{down} 分别为单位新能源出力引起的上、下备用需求系数; $P_{\text{pre},d,t}$ 为预测负荷需求; $P_{\text{pre},i_r,t}$ 为新能源预测出力。通过调整 k_r^{up} 、 k_r^{down} 的大小可以区分新能源随机波动的强弱, 进而分析新能源随机波动对系统运行成本的影响, 以解耦量化新能源因发电清洁所产生的环保价值以及因随机波动所损失的环保价值。为便于量化分析, 本文假设系统备用需求为负荷需求及新能源出力与其备用系数的乘积之和, 但所提方法并不局限于备用需求的具体量化方法, 采用其他备用需求量化方法也能够实现清洁能源多维价值的定量解耦评估。

机组爬坡相关约束

$$\begin{cases} -\Delta r_{i_g}^{\text{down}} \leq P_{i_g,t} - P_{i_g,t-1} \leq \Delta r_{i_g}^{\text{up}} \\ -\Delta r_{i_h}^{\text{down}} \leq P_{i_h,t} - P_{i_h,t-1} \leq \Delta r_{i_h}^{\text{up}} \\ 0 \leq R_{i_g,t}^{\text{up}} \leq U_{i_g,t} \Delta r_{i_g}^{\text{up}} \\ 0 \leq R_{i_g,t}^{\text{down}} \leq U_{i_g,t} \Delta r_{i_g}^{\text{down}} \\ 0 \leq R_{i_h,t}^{\text{up}} \leq \Delta r_{i_h}^{\text{up}} \\ 0 \leq R_{i_h,t}^{\text{down}} \leq \Delta r_{i_h}^{\text{down}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta r_{i_g}^{\text{up}}$ 、 $\Delta r_{i_g}^{\text{down}}$ 分别为火电机组的上、下爬坡能力; $\Delta r_{i_h}^{\text{up}}$ 、 $\Delta r_{i_h}^{\text{down}}$ 分别为水电机组上、下爬坡能

力; $U_{i_g,t}$ 为 0-1 变量, 表示火电机组的启停状态。

通过构造水电机组是否具有爬坡能力的场景, 可分析水电灵活调节能力对系统运行成本的影响, 进而解耦量化水电因自身发电清洁所产生的环保价值以及因灵活调节能力所产生的环保价值。

切负荷约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{d,t} \leq P_{pre,d,t} \\ P_{loss,d,t} = P_{pre,d,t} - P_{d,t} \end{cases} \quad (5)$$

新能源出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i_r,t} \leq P_{pre,i_r,t} \\ P_{cur,i_r,t} = P_{pre,i_r,t} - P_{i_r,t} \end{cases} \quad (6)$$

3) 其他运行约束

除上述约束外, 调度决策模型还需满足如下常见运行约束, 此处不再赘述: 系统需满足线路潮流约束; 火电机组需满足出力上下限约束、启停约束; 水电机组需满足出力上下限约束、库容流量约束、水电转换约束等^[4]; 逐日调度需满足跨日相邻调度时段的衔接约束(例如, 当日火电机组的初始启停状态应与前一日最后一个调度时段的启停状态相一致)。

2.3 清洁能源多维价值表征方法

如图 2 所示, 本文以 VCG 为理论基础, 通过分析清洁能源机组接入前后系统在碳排放、弃风弃光以及切负荷等方面的成本变化, 从而实现清洁能源多维价值的解耦量化表征, 具体阐述如下。

2.3.1 环保价值

环保价值的评估需要计算不同机组接入场景下系统总体碳排放的变化情况, 其中, 总体碳排放包括建造碳排放和运行碳排放。机组建造阶段的碳排放可根据机组装机容量和同类典型机组的容量及其建造碳排放数据计算得到。系统在模拟周期 S 内(即 1 年)产生的总体建造碳排放可通过式(7)计算得到。

$$E_{cons} = \sum_{i_g \in I_g} \left(\frac{A_{i_g} \times E_{gcons}}{A_g \times N_g} \right) + \sum_{i_h \in I_h} \left(\frac{A_{i_h} \times E_{hcons}}{A_h \times N_h} \right) + \sum_{i_r \in I_r} \left(\frac{A_{i_r} \times E_{rcons}}{A_r \times N_r} \right) \quad (7)$$

式中: A_{i_g} 、 A_{i_h} 、 A_{i_r} 分别表示火电、水电及新能源机组的装机容量; A_g 、 A_h 、 A_r 分别表示火电、水电、新能源的典型机组装机容量; E_{gcons} 、 E_{hcons} 、 E_{rcons} 分别表示火电、水电、新能源的典型机组建造碳排放量; N_g 、 N_h 、 N_r 分别表示火电、水电、新能源的设计使用寿命(年)。

基于 2.2 节所述调度决策模型的计算结果, 可以获得每个机组的出力情况。模拟周期 S 内系统总体运行碳排放是每个机组的运行碳排放量之和。

$$E_{ope} = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \left(\sum_{i_g \in I_g} \alpha_g P_{i_g,t,s} + \sum_{i_h \in I_h} \alpha_h P_{i_h,t,s} + \sum_{i_r \in I_r} \alpha_r P_{i_r,t,s} \right) \quad (8)$$

式中: s 为模拟日的编号; α_g 、 α_h 、 α_r 分别表示火电、水电、新能源的典型运行碳排放因子; $P_{i_g,t,s}$ 、 $P_{i_h,t,s}$ 、 $P_{i_r,t,s}$ 分别表示第 s 天 t 时刻火电机组、水电机组、新能源机组的出力。

则模拟周期内系统总体的碳排放成本为

$$C_c = b_c (E_{cons} + E_{ope}) \quad (9)$$

式中, b_c 为单位碳排放成本。值得一提的是, 系统碳排放量计算方法并非本文研究重点, 其他碳排放量计算方法也同样适用于本文所提水电环保价值量化评估方法。

根据系统总体碳排放结果, 可对水电机组和新能源机组的环保价值进行定量解耦表征, 分别阐述如下。

1) 水电机组环保价值解耦表征

模拟周期内水电机组 i_h 对系统产生的总体环保价值可表示为

$$W_{i_h,c} = C_c^{-i_h} - C_c \quad (10)$$

式中, $C_c^{-i_h}$ 表示将水电机组 i_h 从系统移除后, 系统的总体碳排放成本。

假设水电机组 i_h 无灵活爬坡能力(即其在时序生产模拟中的 $\Delta r_{i_h}^{up}$ 和 $\Delta r_{i_h}^{down}$ 为 0), 此时水电机组 i_h 的环保价值(由发电清洁所产生的环保价值)可记为 $W'_{i_h,c}$ (计算方法同上)。通过比较水电具有灵活调节能力前后其对系统产生的环保价值, 可解耦其分别因自身发电清洁性以及因灵活性产生的环保价值。水电机组 i_h 因灵活性产生的环保价值可表示为

$$W_{i_h,c}^{flex} = W_{i_h,c} - W'_{i_h,c} \quad (11)$$

2) 新能源机组环保价值解耦表征

模拟周期内新能源机组 i_r 对系统产生的总体环保价值可表示为

$$W_{i_r,c} = C_c^{-i_r} - C_c \quad (12)$$

式中, $C_c^{-i_r}$ 表示将新能源机组 i_r 从系统移除后, 系统的总体碳排放成本。

假设新能源机组 i_r 无随机波动特性, 则其无需灵活调节资源提供备用服务(即在时序生产模拟中的 k_r^{up} 、 k_r^{down} 为 0), 此时新能源机组 i_r 的环保价值(由

发电清洁所产生的环保价值), 记为 $W'_{i_h,c}$ (计算方法同上)。

则新能源机组因自身随机波动特性所引起的环保价值损失可表示为

$$C_{i_h,c}^{\text{fluc}} = W'_{i_h,c} - W_{i_h,c} \quad (13)$$

此外, 与风光新能源类似, 径流式水电的发电能力与实际来水条件密切相关, 新能源随机波动特性所引起的环保价值损失表征方法也同样适用于径流式水电。

2.3.2 灵活性价值

机组灵活性价值可由系统切负荷成本与弃风弃光成本表征, 但如 2.1 节所述, 系统总体供电能力不足也将引起切负荷成本。因此, 为准确衡量机组灵活性价值, 需首先剔除因系统总体供电能力不足所导致的切负荷成本。

第 s 天 t 时刻因系统总体供电能力不足所导致的电力缺口可表示为

$$P_{\text{sgap},t,s} = \max \left\{ \begin{array}{l} \sum_{d \in D} P_{\text{pre},d,t,s} - \sum_{i_g \in I_g} P_{i_g}^{\text{max}} - \\ \sum_{i_h \in I_h} P_{i_h,t,s} - \sum_{i_e \in I_e} P_{\text{pre},i_e,t,s}, 0 \end{array} \right\} \quad (14)$$

式中, $P_{i_g}^{\text{max}}$ 为火电机组的出力上限。其中, 水电发电能力与其来水状况密切相关, 当系统总体供电能力不足时, 为减少系统切负荷量, 水电将以其最大可发电力(可能低于装机容量)进行出力, 故此处以水电实际出力计算系统供电能力。

则因灵活性不足导致的切负荷成本可表示为

$$C_{\text{fgap},t,s} = \sum_{d \in D} (b_{\text{loss}} P_{\text{loss},d,t,s}) - b_{\text{loss}} P_{\text{sgap},t,s} \quad (15)$$

因灵活性不足导致的弃风弃光成本可表示为

$$C_{\text{cur},t,s} = \sum_{i_h \in I_h} (b_{\text{cur}} P_{\text{cur},i_h,t,s}) \quad (16)$$

则模拟周期内系统因灵活调节能力不足所产生的弃风弃光与切负荷成本可表示为

$$C_{\text{fgap}} = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} (C_{\text{fgap},t,s} + C_{\text{cur},t,s}) \quad (17)$$

模拟周期内水电机组 i_h 的灵活性价值可表示为

$$W_{i_h,\text{fgap}} = C_{\text{fgap}}^{-i_h} - C_{\text{fgap}} \quad (18)$$

式中, $C_{\text{fgap}}^{-i_h}$ 表示将水电机组 i_h 从系统移除后, 系统的总体灵活性缺额成本。

2.3.3 保供价值

由式(14)可得, 因系统总体供电能力不足导致的切负荷成本可表示为

$$C_{\text{sgap}} = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} (b_{\text{loss}} P_{\text{sgap},t,s}) \quad (19)$$

则模拟周期内水电机组 i_h 的保供价值可表示为

$$W_{i_h,\text{sgap}} = C_{\text{sgap}}^{-i_h} - C_{\text{sgap}} \quad (20)$$

式中, $C_{\text{sgap}}^{-i_h}$ 表示将水电机组 i_h 从系统移除后, 系统的总体供电能力缺额成本。

3 算例分析

3.1 算例设置

本研究通过构建不同场景并对比不同场景下系统成本的变化, 计算分析不同机组的多维价值, 从而说明当前市场机制设计与资源多维差异化价值未能有效匹配的现象。

本文基于改进的 IEEE 30 节点系统开展算例仿真。在原有的 6 台火电机组基础上, 本文在节点 3、6、9 上增加了 3 台水电机组, 在节点 12 上增加了 1 台风电机组。仿真所用负荷及风电出力数据收集自我国某省网实际数据。仿真中, 对所收集的实际负荷与风电出力数据进行了缩放, 使得用于仿真的数据与算例系统的参数相匹配。算例仿真中火电与水电机组的参数如表 1 所示。

表 1 火电与水电机组参数

Table 1 Parameters of thermal power and hydropower units			
机组	装机容量/MW	最小出力/MW	爬坡速率/(MW/h)
G1	63	20	30
G2	40	10	22
G3	32	8	15
G4	24	6	12
G5	16	4	12
G6	16	4	10
H1	80	0	80
H2	40	0	40
H3	40	0	40

其中, G 表示火电机组, H 表示水电机组。H1 与 H2 的水库库容为 H3 的 2 倍, H2 与 H3 的其他参数相同。此外, 水电爬坡速度较快, 其每小时爬坡速率主要取决于自身装机容量。系统碳排放成本为 50 元/吨, 切负荷成本为 3000 元/MWh, 弃风弃光成本为 500 元/MWh。

算例中, 时序生产模拟的总时长为 8760 个时段, 时序模拟的时间间隔为 1 h。本文采用 CPLEX 商业求解器求解 2.2 节所述时序生成模拟模型。

3.2 水电环保价值量化分析

3.2.1 场景构建

为解耦分析水电的环保价值, 本文构建了如表 2 和表 3 所示的场景。

由表 2、表 3 可见, 除水电环保价值外, 本文也对风电机组的环保价值进行了量化评估。一方面, 旨在探究风电随机波动特性对其环保价值的影响, 以验证 1.1 节与 2.3.1 节所述内容; 另一方面, 也论

证了所提价值评估方法同样适用于风电等其他清洁能源机组。

表 2 面向环保价值评估的场景设置

Table 2 Scenarios setting for environmental value assessment

场景	场景设置
场景 1	所有机组接入系统, 且水电来水充足
场景 2	在场景 1 的基础上, 水电 H1 无灵活性
场景 3	在场景 1 的基础上, H1 8 月来水减少至 40%
场景 4	在场景 1 的基础上, 风电 W1 引起的备用需求翻倍
场景 5	在场景 1 的基础上移除 W1
场景 6	在场景 1 的基础上移除 H1
场景 7	在场景 1 的基础上移除 H2
场景 8	在场景 1 的基础上移除 H3

表 3 面向环保价值评估的场景对比及目的

Table 3 Scenarios comparison and purpose for environmental value assessment

场景对比	场景对比目的
场景 1, 场景 2	评估 H1 因灵活性产生的环保价值
场景 1, 场景 5	评估 W1 对系统产生的总环保价值
场景 4, 场景 5	评估 W1 随机波动较大时对系统产生的总环保价值
场景 1, 场景 6	评估 H1 对系统产生的总环保价值
场景 1, 场景 7	评估 H2 对系统产生的总环保价值
场景 1, 场景 8	评估 H3 对系统产生的总环保价值
场景 3, 场景 6	评估 H1 8 月较为缺水时对系统产生的总环保价值

3.2.2 算例分析

不同场景下系统的总体碳排放成本模拟结果如图 3 所示。不同条件下清洁能源的总体环保价值、年发电量及单位发电量所产生的环保价值如表 4 所示。

对比风电机组与水电机组的单位发电量环保价值可知, 在本文所构建的算例中, 水电机组较风电机组的环保价值更高。其原因在于, 水电机组除自身发电具有清洁低碳特性外, 还具有良好的灵活调节能力, 能够促进风电消纳, 进一步降低系统总体碳排放。相比之下, 风电具有随机波动特性, 其

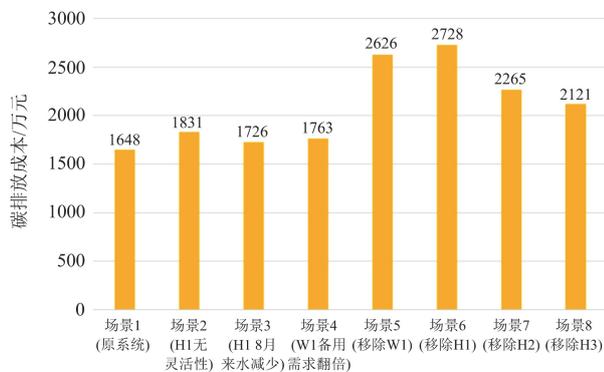


图 3 不同场景下系统的碳排放成本

Fig. 3 Carbon emission costs of systems in different scenarios

表 4 各清洁能源机组单位发电量所产生的环保价值

Table 4 Environmental value of each clean energy

unit per 1 MWh generation

机组	环保价值/元	年发电量/MWh	单位发电量环保价值/(元/MWh)
W1	9.78×10^6	2.45×10^5	39.92
W1(备用需求翻倍)	8.63×10^6	2.45×10^5	35.22
H1(有灵活性)	1.08×10^7	2.12×10^5	50.94
H1(无灵活性)	7.95×10^6	1.93×10^5	41.19
H1(8 月来水减少)	1.02×10^7	2.02×10^5	50.50
H2	6.16×10^6	1.20×10^5	51.33
H3	4.73×10^6	1.09×10^5	43.39

接入将引起系统备用需求的增长, 需火电机组配套提供辅助服务, 进而产生额外碳排放。此外, 对比场景 1、4、5 的系统碳排放可以发现: 风电机组 W1 的随机波动增大时(本算例中其引起的备用需求翻倍), 系统的总碳排放成本将随之增加。因此, 在评估新能源环保价值时, 需考虑其随机波动对系统运行的影响。

此外, 在本算例中, 所选取的水电典型碳排放因子为 $14.1 \text{ g CO}_2\text{e/kWh}^{[7]}$, 风电典型碳排放因子为 $12.4 \text{ g CO}_2\text{e/kWh}^{[34]}$, 而水电实际产生的环保价值却高于风电, 可见仅通过碳排放因子无法准确反映资源对系统产生的真实环保价值。

对比 H1—H3 的环保价值评估结果可见, 具有更大库容的 H1、H2 能够减少自身弃水并促进新能源消纳, 因而相比 H3 具有更高的总体环保价值与单位发电量环保价值。此外, 相比 H1、H2, 具有更大装机容量的 H1 具有更高的总体环保价值。然而, 对比分析 H1 与 H2 机组的单位发电量环保价值可以发现, 随着水电机组装机容量的增大, 系统整体灵活性的充裕度将随之增加, 导致单位灵活性产生的额外环保价值有所下降, 故最终 H1 的单位发电量环保价值略低于 H2。

对比水电机组 H1 有无灵活性的场景可以发现, 在没有灵活性后, 水电机组 H1 的总体环保价值下降 26.4%, 单位发电量环保价值下降 19.2%。由此可以推断, 水电机组 H1 自身发电清洁性产生的环保价值占总环保价值的 73.6%, 灵活性产生的环保价值占总环保价值的 26.4%。可见, 水电灵活性产生了较高的环保价值, 有必要在市场机制中予以考虑, 以激励水电机组进一步提高自身灵活性。

对比场景 3、6 的仿真结果, H1 在 8 月较为缺水时, 年总发电量有所下降, 其可替代火电发电或提供辅助服务的能力下降, 最终使得其对系统产生的总环保价值以及单位发电量所产生的环保价值有

所下降。由此可见, 调节式水电的环保价值也会受到长时间缺水的影响。

综合上述算例仿真结果可以发现, 不同类型清洁能源以及不同条件下同类清洁能源机组之间的单位发电量环保价值存在显著差异, 以固定碳排放因子衡量清洁能源环保价值的方法难以有效计及机组工况与系统时变运行状态对其环保价值的影响。

3.3 水电灵活性价值量化分析

3.3.1 场景构建

为分析水电的灵活性价值, 本文在场景 1—6 的基础上, 新增了如表 5 和表 6 所示的对比场景。

表 5 面向灵活性价值评估的新增场景设置

场景	场景设置
场景 9	在场景 1 的基础上, 所有水电机组在 8 月的来水量削减至原先的 40%
场景 10—12	分别在场景 9 的基础上移除 H1、H2、H3
场景 13	在场景 1 的基础上, 所有水电机组在 8 月的来水量削减至原先的 20%
场景 14—16	分别在场景 13 的基础上移除 H1、H2、H3

表 6 面向灵活性价值评估的场景对比及目的

场景对比	场景对比目的
场景 1, 场景 6—8	评估全年来水充足条件下, 各水电机组的灵活性价值
场景 9, 场景 10—12	评估 8 月来水削减为 40% 条件下, 各水电机组的灵活性价值
场景 13, 场景 14—16	评估 8 月来水削减为 20% 条件下, 各水电机组的灵活性价值

3.3.2 算例分析

根据场景 1、6—16 中的系统运行状况可计算得到不同条件下系统的灵活性缺额成本, 如图 4 所示。随后, 根据替代效益可得到 3 台水电机组在不同来水条件下的灵活性价值, 如图 5 所示。

由图 4 可见, 在不同水电接入条件下系统均存在灵活性缺额成本, 其原因在于本算例中新能源装机占比较高, 即使系统具有充足的灵活调节能力, 在某些运行时段系统也仍存在弃风成本。

由图 5 可知, 在相同来水条件下, 不同水电机组的灵活性稀缺价值存在不同。装机容量、水库库容越大的机组将具有更高的灵活性稀缺价值。

对比不同来水条件下各水电机组的灵活性稀缺价值评估结果可以发现, 对于 H1 和 H2 而言, 随着水电来水量的减少, 水电机组灵活调节能力将随之下降, 系统移除水电机组后所引起的灵活性缺额成

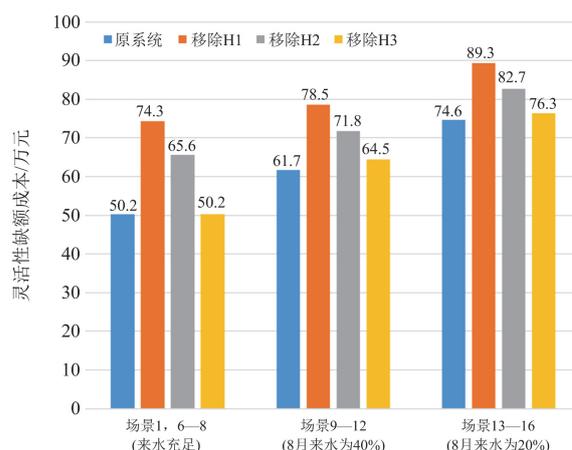


图 4 不同场景下系统的灵活性缺额成本

Fig. 4 Costs of system flexibility deficiency in different scenarios

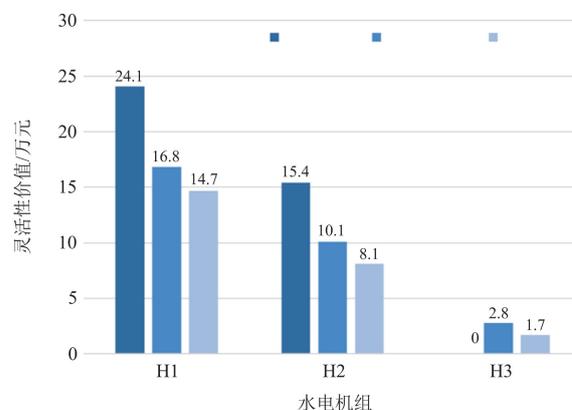


图 5 不同场景下各水电机组的灵活性价值

Fig. 5 Flexibility value of each hydropower unit in different scenarios

本增量将有所下降, 最终使得水电灵活性稀缺价值有所下降。而对于 H3 而言, 上述现象并不成立, 在来水充足的条件下(H3 灵活调节能力相对较强), H3 的灵活性稀缺价值反而为 0, 不如来水不足的场景。其原因在于, 在来水充足的场景中, 水电机组 H1 和 H2 的灵活调节能力足够充裕, 即使移除 H3 也不会引起系统灵活性缺额成本的增长, 故此时 H3 不具备灵活性稀缺价值。而在来水不足的场景中, 水电机组 H1 和 H2 的灵活调节能力不足以完全满足系统灵活性需求, 此时若移除 H3 将导致系统总体灵活调节能力降低, 使得灵活性缺额成本有所增长, 故此时水电机组 H3 具有灵活性稀缺价值。由此可见, 机组灵活性稀缺价值除与自身灵活调节能力有关外, 还取决于系统总体灵活性的充裕程度。

此外, 调节式水电的灵活爬坡能力较强, 在数分钟内即可实现从 0 至满装机容量的出力调节。本文时序生产模拟的仿真时间颗粒度为 1 h, 在该时间

内, 水电爬坡速度超过了其装机容量, 因而仅能体现调节幅度对灵活性价值的影响, 难以体现爬坡速度对水电灵活性价值的影响。为探究水电机组调节速度对其灵活性价值的影响, 本文仿真分析了 H1 爬坡速度分别为装机容量的 25%/h、50%/h、75%/h、100%/h 时, 其对系统产生的灵活性价值的变化情况, 结果如图 6 所示。

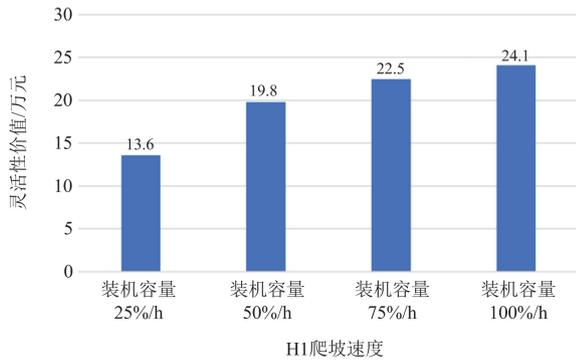


图 6 H1 爬坡速度不同时的灵活性价值

Fig. 6 Flexibility value of H1 with different ramping rates

由图 6 可见, 调节速度越快, 机组产生的灵活性价值也越高。

综合上述算例仿真结果可以发现, 水电机组灵活性稀缺价值与机组自身条件(来水条件、机组装机容量、水库库容、调节速度等)以及系统总体灵活性的充裕程度等密切相关。现有方法主要定性或定量地评估水电所能提供的灵活性调节能力, 但未能反映机组不同运行工况及系统不同运行状态下, 水电机组对系统而言的灵活性稀缺价值。当前市场机制仅针对资源提供的单位灵活调节能力(如备用、调频容量等)给予补偿, 未考虑资源灵活调节能力的稀缺性价值, 无法充分激励对系统灵活性充裕程度有着关键影响的资源参与市场调节, 也难以进一步激励资源改善自身灵活调节性能。

3.4 水电保供价值量化分析

3.4.1 场景构建

基于 3.2 节与 3.3 节的场景设置与仿真结果, 通过对比不同场景下系统因供电能力不足所导致的切负荷成本, 可分析得到 3 种来水条件下各水电机组的保供稀缺价值。场景对比设置与对比目的同 3.3 节, 此处不再赘述。

在此基础上, 为进一步说明具有相同容量的水电机组间也可能具有差异化的保供稀缺价值, 本小节增加了以下对比场景, 如表 7 所示。

本算例中, 8 月份的负荷需求较 7 月份更高, 在削减 8 月份来水状况后, 7 月份的来水情况较 8

表 7 面向保供稀缺价值评估的新增场景设置

Table 7 Additional scenarios setting of simulation cases for power supply scarcity value assessment

场景	场景设置
场景 17	在场景 13(8 月来水削减为 20%)的基础上, 将水电机组 H1 替换为水电机组 H1', H1' 的机组参数与 H1 相同, 仅调换了其在 7 月与 8 月的来水情况(使来水总量不变)
场景 18	在场景 17 的基础上移除水电机组 H1'

月份更加充足。因此, 在调换 7 月与 8 月的来水后, 尽管水电机组 H1' 与水电机组 H1 额定装机容量相同, 但 H1' 的来水状况(供电能力)与系统负荷需求的匹配度更高。对比场景 17 和场景 18 可评估 H1' 的保供稀缺价值; 对比相同来水总量条件下 H1 和 H1' 的保供稀缺价值, 可分析总体装机容量相同但时变供电能力不同的水电机组在保供稀缺价值方面的差异。

3.4.2 算例分析

根据场景 1、6—16 中的系统运行状况可计算得到不同条件下系统的电力供应缺额成本, 如图 7 所示。随后, 根据替代效益可得到 3 台水电机组(H1—H3)在不同来水条件下的保供稀缺价值, 如图 8 所示。

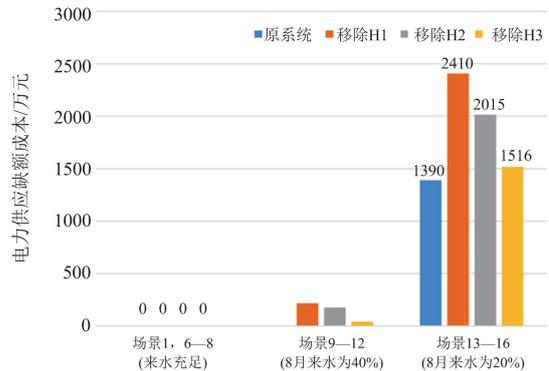


图 7 不同场景下系统的电力供应缺额成本

Fig. 7 Costs of power supply shortage in different scenarios

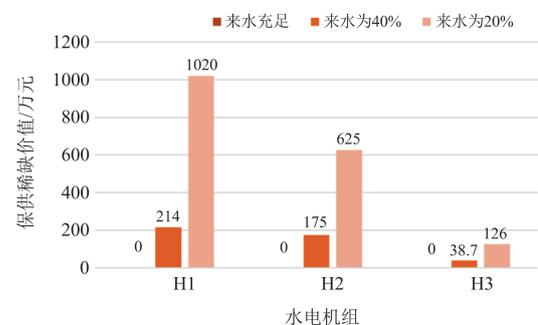


图 8 不同场景下各水电机组的保供稀缺价值

Fig. 8 Power supply scarcity value of each hydropower unit in different scenarios

由图7和图8可见,在来水充足的场景下,系统总体供电能力十分充裕,因此移除任意一台水电机组都不会导致系统总体供电能力的不足,因而来水充足场景下3台水电机组的保供稀缺价值均为0。在遭遇极端干旱天气时(即来水不足的场景),水电发电能力不足导致系统总体供电能力的充裕度降低,此时移除某一水电机组将导致系统电力供应缺额成本的增加,进而反映了水电机组的保供稀缺价值。

对比来水条件相同场景下的水电机组保供稀缺价值可知,机组容量与水库库容更大的调节式水电机组将具有更高的保供稀缺价值。

此外,基于场景17、18可计算得到H1'的保供稀缺价值,其与相同来水总量条件下H1的保供稀缺价值对比如图9所示。

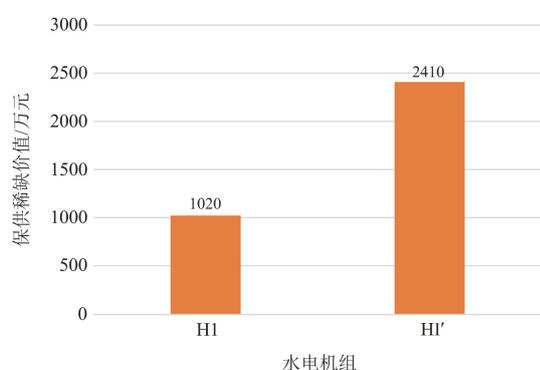


图9 缺水场景下水电机组H1与H1'的保供稀缺价值对比
Fig. 9 Comparison of the power supply scarcity value of units H1 and H1' in water shortage scenarios

由图9可见,尽管水电机组H1'与H1的全年来水总量相同,两者具有相同的容量,但H1'的缺水月份(7月份)并未出现在负荷最高峰时段(8月份),其可提供的发电能力与负荷需求的匹配程度相较于H1更高,因而具有更高的保供稀缺价值。由此可见,机组保供稀缺价值除与自身发电能力有关之外,还取决于其发电能力与系统时变负荷需求的匹配程度,仅通过水电机组容量无法准确反映其真实的保供稀缺价值。

综合上述算例仿真结果可以发现,水电机组的保供稀缺价值不仅取决于机组的装机容量,同时与机组的水库库容、来水条件及其发电能力与系统时变负荷需求间的匹配程度密切相关。当前仅考虑装机容量的容量补偿/市场机制无法准确反映水电机组的真实保供稀缺价值,难以激励机组提高自身发电能力与系统负荷需求间的匹配度,进而提高系统总体供电能力。

由3.2节—3.4节的算例仿真分析可见,不同类型清洁能源以及不同工况、系统运行状态下同类清洁能源机组之间的多维价值差异显著,而现有价值评估方法及市场机制未能有效评估并体现机组的差异化价值,难以激励机组主动改善自身运行性能。对此,亟需完善当前市场机制以合理发现不同清洁能源的多维差异化价值,本文所提机组多维价值量化评估方法则可为此提供支撑。

4 结论

本文分析了水电在清洁低碳、灵活调节、保供支撑等方面的多维价值,并定性剖析了水电多维价值与其当前市场收益间的匹配性,指出了当前市场机制未能有效体现不同资源多维差异化价值的问题。针对该问题,本文提出了基于替代效益的水电多维价值解耦建模与量化评估方法,可量化不同运行条件下水电机组的多维差异化价值,为后续设计体现不同清洁能源主体差异化价值的市场机制奠定基础。基于电网实际数据的算例仿真结果表明,水电机组对系统而言的多维价值不仅与机组自身运行条件有关,还取决于系统总体运行状况,当前主要考虑机组自身运行条件的市场机制未能充分反映机组对系统产生的真实价值,难以激励机组主动改善自身运行性能。由此,论证了对当前市场机制进行改进以准确体现资源多维差异化价值的必要性。

本文量化了不同清洁能源的多维价值,可为设计体现清洁能源差异化价值的市场机制提供参考依据,但具体如何在市场机制中反映清洁能源多维价值量化评估结果还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [2] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N].人民日报,2020-09-23(002).
- [3] 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.
- [4] 张翔,陈政,马子明,等.适应可再生能源配额制的电力

- 市场交易体系研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2682-2690.
ZHANG Xiang, CHEN Zheng, MA Ziming, et al. Study on electricity market trading system adapting to renewable portfolio standard[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2682-2690.
- [5] 新华社. 中共中央_国务院_关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见[EB/OL]. [2024-08-11]. https://www.gov.cn/zhengce/202408/content_6967663.htm.
- [6] 四川省人民政府. 关于印发《四川省“十四五”能源发展规划》的通知[EB/OL]. [2022-03-03]. <https://www.sc.gov.cn/zfgbdb/detail/b5a6139abbf74030a5ea8b48469b879c.shtml>.
- [7] 张社荣, 庞博慧. 基于碳足迹理论的大型水电枢纽工程环境排放分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 170-176.
ZHANG Sherong, PANG Bohui. Analysis on environmental discharge of large-scale hydropower project using carbon footprint theory[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(4): 170-176.
- [8] GEMECHU E, KUMAR A. A review of how life cycle assessment has been used to assess the environmental impacts of hydropower energy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167.
- [9] 严中华, 王建功, 朱英刚, 等. 考虑碳排放流理论的风-碳捕集-电转气联合新型中长期调度方式[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 14-21.
YAN Zhonghua, WANG Jiangong, ZHU Yinggang, et al. New medium-long term dispatching mode of wind-carbon capture-P2G combined system considering carbon emission flow theory[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 14-21.
- [10] 罗小林, 黄莉, 吴赛男, 等. “双碳”目标存量水电灵活性提升路径与评估框架[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(1): 1-8.
LUO Xiaolin, HUANG Li, WU Sainan, et al. Approaches to expanding flexibility of hydropower to achieve the carbon peaking and carbon neutrality target and their assessment framework[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9(1): 1-8.
- [11] 张俊涛, 甘霖, 程春田, 等. 大规模风光并网条件下水电灵活性量化及提升方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3227-3239.
ZHANG Juntao, GAN Lin, CHENG Chuntian, et al. Quantification and promotion of hydropower flexibility with large-scale wind and solar power incorporated into grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3227-3239.
- [12] HUANG M, CHANG J, GUO A, et al. Cascade hydropower stations optimal dispatch considering flexible margin in renewable energy power system[J]. Energy, 2023, 285.
- [13] 杜维柱, 白恺, 李海波, 等. 兼顾保供电/消纳的源荷储灵活性资源优化规划[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 13-23.
DU Weizhu, BAI Kai, LI Haibo, et al. Source-load-storage flexible resource optimization planning that takes into account power supply and accommodation[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 13-23.
- [14] 单葆国, 冀星沛, 许传龙, 等. 近期全球能源供需形势分析及中国能源电力保供策略[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 1-13.
SHAN Baoguo, JI Xingpei, XU Chuanlong, et al. Recent situation of global energy supply-demand and guarantee strategy of china's energy and power supply[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 1-13.
- [15] 高红均, 郭明浩, 刘俊勇, 等. 从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4517-4538.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Junyong, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4517-4538.
- [16] 郭红霞, 陈凌轩, 张启, 等. 电力电量平衡视角下新型电力系统极端场景研究及应对综述[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 3975-3991.
GUO Hongxia, CHEN Lingxuan, ZHANG Qi, et al. Research and response to extreme scenarios in new power system: a review from perspective of electricity and power balance[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 3975-3991.
- [17] 魏聪, 白帆, 方开俊, 等. 基于风电容量可信度的电力电量平衡优化模型[J]. 智慧电力, 2018, 46(8): 25-31.
WEI Cong, BAI Fan, FANG Kaijun, et al. An electric power and energy balance optimization model based on wind power capacity credit[J]. Smart Power, 2018, 46(8): 25-31.
- [18] 孙骁强, 张小奇, 张光儒, 等. 考虑跨区直流调峰的新能源参与电力平衡可信容量提升方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 878-886.
SUN Xiaoqiang, ZHANG Xiaoqi, ZHANG Guangru, et al. Credible capacity improvement with new energy participating in power balance considering cross-regional DC peak shaving[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 878-886.
- [19] 孙骁强, 马晓伟, 张小奇, 等. 基于相依关系的新能源功率预测场景生成及调度应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 10-17, 44.
SUN Xiaoqiang, MA Xiaowei, ZHANG Xiaoqi, et al. Dependence relationship based scenario generation of power prediction for renewable energy and its application in dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2019, 43(15): 10-17, 44.
- [20] 安麒, 王剑晓, 武昭原, 等. 高比例可再生能源渗透下的电力市场价值分配机制设计[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 13-22.
AN Qi, WANG Jianxiao, WU Zhaoyuan, et al. Benefit allocation mechanism design of electricity markets with penetration of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 13-22.
- [21] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.
- [22] 刘雨梦, 陈皓勇, 黄龙, 等. 基于多群体协同进化的电力市场均衡模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 38-45.
LIU Yumeng, CHEN Haoyong, HUANG Long, et al. Equilibrium model of electricity market based on multi-swarm co-evolution[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 38-45.
- [23] 朱英. 关于加强绿色电力证书与节能降碳政策衔接大力促进非化石能源消费的通知[EB/OL]. [2024-02-21]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6929877.htm.
- [24] 阳婷婷, 李晓刚, 邹斌, 等. 促进灵活性资源的辅助服务市场分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 73-83.
YANG Tingting, LI Xiaogang, ZOU Bin, et al. Market analysis of an ancillary service to promote flexible resources[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 73-83.
- [25] 胡晓静, 李慧, 崔晖, 等. 考虑灵活爬坡辅助服务和弃风惩罚的现货电能市场出清模型[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 133-143.
HU Xiaojing, LI Hui, CUI Hui, et al. Cleaning model of a spot electric energy market considering flexible ramping auxiliary services and wind curtailment penalty[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 133-143.
- [26] WU S, WANG Q, CHEN Q, et al. Cyber-physical integrated planning of distribution networks considering spatial-temporal flexible resources[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(3): 142-156.
- [27] 国雪健, 李思远, 朱秋萍, 等. 基于均衡模型的寡头电力市场容量机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 121-131.
GUO Xuejian, LI Siyuan, ZHU Qiuping, et al. Capacity mechanisms of the oligopoly electricity market based on an equilibrium model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 121-131.
- [28] 郝瑀然. 国家发展改革委 国家能源局关于建立煤电容量电价机制的通知[EB/OL]. [2024-01-14]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6914744.htm.
- [29] VICKREY W. Counter speculation, auctions, and competitive sealed tenders[J]. The Journal of Finance, 1961, 16(1): 8-37.
- [30] CLARKE E H. Multipart pricing of public goods[J]. Public Choice, 1971, 11(1): 17-33.
- [31] GROVES T. Incentives in teams[J]. Econometrica, 1973, 41(4): 617-631.
- [32] 王剑晓, 钟海旺, 夏清, 等. 基于价值公平分配的电力市场竞争机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 7-17.
WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Competitive mechanism design in electricity market based on fair benefit allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 7-17.
- [33] 魏利岫, 艾小猛, 方家琨, 等. 面向新型电力系统的时序生产模拟应用与求解技术综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 170-184.
WEI Lishen, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Review on applications and solving techniques of time-series production simulation for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 170-184.
- [34] Europe UNEC for Carbon Neutrality in the UNECE Region. Integrated life-cycle assessment of electricity sources[M]. United Nations, 2022.

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-10-12

作者简介:

潘捷(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: 101267667811@qq.com

向明旭(1994—), 男, 通信作者, 助理研究员, 研究方向为电力系统运行优化、电力市场; E-mail: mxxiang@cqu.edu.cn

杨知方(1992—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化、电力市场。E-mail: zfyang@cqu.edu.cn

(编辑 石晋美)