

李彬,张俊涛,程春田.源荷匹配下梯级水电站对新能源极端波动的调节能力量化评估[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

源荷匹配下梯级水电站对新能源极端波动的调节能力量化评估

李彬,张俊涛,程春田

(大连理工大学水电与水信息研究所,辽宁 大连 116024)

摘要:极端天气下新能源出力持续极端波动与用电负荷攀升形成的剪刀差调节需求,已成为电网电力电量平衡面临的巨大挑战,量化大型流域梯级水电对新能源连续极端波动调节能力具有重要意义。利用中国西南某电网2016—2024历史实际逐日新能源出力和负荷数据,采用双阈值定义法识别出六种新能源极端波动并得到负荷波动规律,通过线性方程拟合和皮尔逊相关性分析揭示了两者间的潜在趋势和相关性。基于此考虑复杂水力电力联系,建立了梯级水电站对负荷与新能源关联极端波动的调节能力量化评估模型,通过gurobi求解器高效求解。基于不同负荷波动场景,分析了消落期和蓄水期工况下梯级水电调节能力。结果显示风电和光伏极端波动年均分别发生22次和20次,风光复合极端波动年均发生3次。所有极端事件中负荷波动方向与新能源极端波动方向相反的概率约48%,仅光伏极端低波动波动幅度与负荷波动幅度之间具有明显下降趋势和负相关性。梯级水电在该2种工况下对负荷与新能源关联极端高波动和低波动均有一定调节能力,且蓄水期的调节能力更强,对风光复合极端波动的调节能力整体比单一新能源极端波动要弱。故出现负荷与新能源关联极端波动时,梯级水电能为电网提供一定支撑能力,但对于更极端的负荷与新能源反向波动,需借助储能等手段来防御。

关键词:源荷匹配;梯级水电站;新能源极端波动;调节能力;量化评估

中图分类号:TV7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-21

中国正大力推进能源结构绿色转型,以实现“碳达峰”与“碳中和”目标^[1],近年来,以风电、光伏为代表的新能源发展迅速,装机容量从2020年的536 GW增至2024年的1 409 GW,在短短4 a内几乎翻了3倍^[2],然而新能源在时空尺度上具有极强的波动性^[3-4],在全球碳排放持续增加、气候变化不断加剧的背景下,极端天气事件的发生频率和持续时间显著上升^[5-6],极端天气不仅导致新能源出现持续数日的极端出力波动^[7-8],给电网的电力电量平衡带来严峻挑战,同时也伴随着用户更高的用电需求^[9],这种“供给减少”与“需求增加”的双重压力,极易造

成电网供需失衡,严重威胁系统的安全稳定运行。

鉴于此,准确解析新能源极端波动与负荷变化之间的关联,对于保障电网安全至关重要。值得关注的是,中国在应对这一挑战方面具备独特的资源优势。作为全球水电资源最为丰富的国家,中国已先后建成了金沙江、澜沧江等千万千瓦级水电基地^[10],这些巨型梯级水电站群具备强大的调节能力,为电网应对新能源极端波动提供了有力支撑。特别是在极端天气期间,通过流域内控制性龙头水库的调控,梯级水电系统能够与下游水库联动,实现“一水多用”和多次发电。这种调节机制能够有

基金项目:智能电网重大专项(2025ZD0804900);国家自然科学基金项目(52409010)

收稿日期:2026-02-05 修回日期:2026-03-20

作者简介:李彬(2002—),男,硕士,主要从事水风光多能互补、新能源极端分析。

通信作者:张俊涛(1993—),男,博士,副教授,主要从事风光水蓄储多能互补规划与运行、水电系统调度。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

效平抑持续数日乃至数周的新能源极端波动,从而显著提升电力系统的韧性。

在新能源大规模并网、能源结构向清洁低碳转型的背景下,水电凭借其启停灵活、调节性能优良的优势,成为平抑新能源出力波动、保障电网安全稳定运行的核心调节资源,因此水电对新能源调节能力的研究已成为当前水电调度领域的研究热点与核心方向之一。目前,国内外相关研究围绕水电调节能力的量化、多能互补特性及系统运行优化三大核心维度展开,具体研究进展如下:首先为多时间尺度下水电灵活性^[11]与调节能力的量化评估研究。现有研究聚焦不同时间尺度、不同影响因素下的调节能力量化;康雍熙等^[12]考虑水流滞时,建立清洁能源基地水电短期灵活性量化模型;王亚华等^[12]综合多维工况影响,构建水电多尺度调节能力量化体系;Li等^[14]从多周期耦合视角,提出水电多周期耦合调节能力量化方法;陈聪等^[15]提出了一种水电在极端干旱天气下应对新能源中期极端预测误差低出力的灵活性调节能力评估方法。其次为基于水电调节能力的水风光多能互补特性研究,相关研究聚焦水风光协同互补;李永培等^[16]论证水风光打捆并网可行性并量化水电调节能力阈值;Huang等^[17]利用水电调节能力提升混合可再生能源系统互补性;吴迪等^[18]提出基于水库调节能力的日内水光互补方法;Xu等^[19]提出了一种基于藤蔓结构和排名相关分析的新型水风光互补特性指标;武新宇等^[20]构建了水电单独出力系统与水风光多能互补系统的优化调度模型,提出资源互补效益系数与调度补偿效益指数2个核心指标来建立水风光互补能力评价体系。另外还包括基于水电调节能力的多能互补系统运行优化研究^[21],王仕龙等^[22]提出基于梯级水电调节的风-光-水联合优化三阶段调度方法;桂前进等^[23]建立梯级水-光-储联合优化调度模型,挖掘梯级水电调节潜力;李咸善等^[24]以梯级水电为调节电源构建了风光水联盟与区域电网联合运行的4阶段优化调度模型。尽管现有研究取得诸多成果,但仍存在明显缺口,梯级水电受多重复杂约束,其调节能力解析与量化难度较高,且现有

文献鲜有关注梯级水电对新能源极端波动的调节潜力,尤其当新能源极端波动与电网负荷变化并发形成超极端事件^[25-26]时,其调节能力量化及纳入电网决策体系仍是亟待解决的难题。基于此,本文重点聚焦梯级水电站对负荷与新能源关联极端波动的调节能力量化问题,填补现有研究空白。

本文分析了中国西南某省电网2016—2024年8a历史实际新能源出力数据,采用波动幅度和持续天数双重阈值定义识别出6种新能源极端波动样本,对其对应时期电网历史负荷数据进行分析得到其变化特性,并探究二者之间的相关性。基于得到的新能源极端波动样本以及负荷变化特性分析结果,针对不同负荷波动场景,首先构建了梯级水电蓄能评估基准模型,后根据得到的蓄能基准值建立梯级水电对负荷与新能源关联极端波动调节能力量化评估模型,揭示了其在水位适中的消落期和蓄水期工况,应对不同新能源极端波动的调节规律。为电网应对负荷与新能源关联极端波动的突发场景提供了科学的调度决策依据,提升了高比例新能源并网下电力系统的安全稳定运行水平。

1 研究数据及方法

1.1 研究数据

本研究采用的数据为中国西南某省2016—2024年逐日的风电和光伏逐日出力数据、逐日负荷数据以及逐月新能源装机水平,另外还包括该流域五座梯级水电站的相关基础数据,典型水位过程、来水数据,水流滞时以及其他电源出力等。

1.2 研究方法

本研究采用的方法主要包括双阈值定义法,线性拟合以及皮尔逊相关性分析。

双阈值定义法通过对新能源波动幅度及持续天数两个角度进行阈值约束来定义新能源极端波动,将日出力与月均出力的差值除以月均出力得到新能源波动幅度,正负符号代表波动的方向,新能源极端波动具体定义式如下:

$$EDF = \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_t - \bar{P}_{month}}{\bar{P}_{month}} \leq EDF_{80\%}, t \in [t_0, t_1], t_1 - t_0 \geq 1 \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$EUF = \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_t - \bar{P}_{month}}{\bar{P}_{month}} \geq EUF_{80\%}, t \in [t_0, t_1], t_1 - t_0 \geq 1 \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中: EDF 代表极端低波动事件; EUF 代表极端高波动事件; P_t 代表新能源日出力; \bar{P}_{month} 代表新能源月均出力; $EDF_{80\%}$ 和 $EUF_{80\%}$ 分别代表向下和向上波动幅度的 80% 分位点, 前者的意义为在所有日出力小于月均出力的时间里, 仅有 20% 天数的向下波动幅度小于该阈值; 后者为在所有日出力大于月均出力的时间里, 仅有 20% 天数的向上波动幅度大于该阈值; t_0 和 t_1 分别代表极端波动起止时间; 为了符合事件的定义, 新能源极端波动的持续天数需大于等于 2 d

2 新能源持续极端波动与电网负荷之间的相关性

2.1 新能源持续极端波动定义

新能源出力的间歇性, 不确定性和季节性一直是冲击电网电力电量平衡的一大难题, 在电网实际运行过程中, 我们认为新能源最理想的出力方式为按月度均值进行发电, 基于此我们利用双阈值定义识别了新能源持续极端波动, 故单一新能源持续极端波动发生时风电或光伏在超过 2 d 的时间内日波动幅度均大于或小于对应阈值, 但在新能源实际出力过程中, 会出现风电和光伏同时发生持续极端波动的情况, 这里我们重点关注风电和光伏同向的持续极端波动事件, 故我们定义风光复合持续极端波动为风电和光伏在超过两天的时间内日波动幅度均大于或小于对应阈值的事件。

2.2 新能源持续极端波动识别结果

本研究利用该省电网历史实际新能源出力样本, 得到风电极端向上和向下波动阈值分别为 0.6611 和 -0.6048, 光伏向上和向下波动阈值分别

为 0.2911 和 -0.3667, 进而识别出六种新能源持续极端波动事件。图 1 为该 6 种新能源持续极端波动事件不同持续天数对应的频次图, 从图中可知风电持续极端高波动和低波动事件分别共发生 89 和 87 次, 最大持续时间分别为 6 d 和 8 d; 光伏持续极端高波动和低波动事件分别共发生 95 和 64 次, 最大持续时间均为 7 天; 风光复合持续极端高波动和低波动事件分别共发生 11 和 13 次, 最大持续时间分别为 2 d 和 3 d。在得到的新能源持续极端波动事件样本中持续天数为 2 d 的事件占比最大, 持续天数为 2~4 d 的事件约占全部的 90%, 可见 4 d 及以下为新能源持续极端波动的常见持续时间, 可为电网实际运行中防御新能源持续极端波动事件提供方向。

2.3 新能源持续极端波动中的负荷变化特性

通过识别出的新能源持续极端波动事件样本, 本研究重点分析了其发生天数内对应电网负荷的变化情况, 为了保持数据的一致性, 将每日负荷波动幅度定义为该日负荷与月平均负荷差值除以月平均负荷得到的结果, 正负代表波动的方向, 图 2 显示了 6 种极端事件每件事件发生时平均负荷波动幅度的半箱线图, 不论是新能源极端高波动还是极端低波动, 电网负荷出现了既有多日高于月平均负荷也有低于月平均负荷的情况, 初从图中初步来看电网负荷数据点零点两侧分布较为均匀。

进一步统计相关指标得到的结果见表 1, 可知在 6 种极端事件中, 负荷向上波动频率和概率较大的为光伏极端高波动和风光复合极端高波动和低波动事件, 其中光伏极端高波动和风光复合极端低波动事件中负荷向下波动占比约 60%; 而负荷向下波动频率和概率较大的为风电极端高波动和低波动事件, 占比约 54%。从电网电力电量平衡的角度来看, 我们应该警惕新能源出力过大而负荷向下波动以及新能源出力过小而负荷向上波动这两种反向波动的情况, 前者可能出现弃电, 后者需要借助水火电以及储能来保供。综合来看, 6 种极端事件负荷出现反向波动的概率约 48%。

从负荷波动的最大幅度来看, 可知除了风电极端低波动事件, 其他 5 种极端事件的负荷反向波动

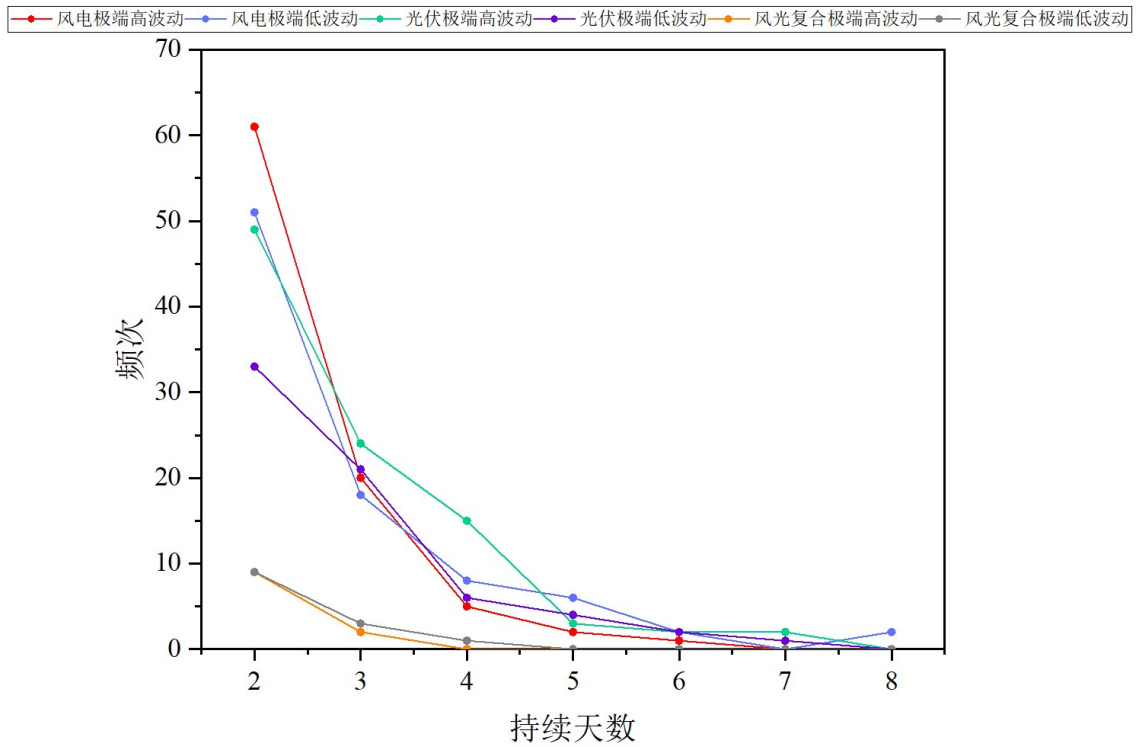


图1 新能源持续极端波动发生频次

Fig. 1 Occurrence Frequency of Persistent Extreme Fluctuations in Renewable Energy

最大幅度均大于同向波动最大幅度,这意味着在极端事件中,存在着极大威胁电网安全稳定运行的可

能性,故本研究应该综合利用水火电以及储能等能源去对出现新能源持续极端波动进行调节。

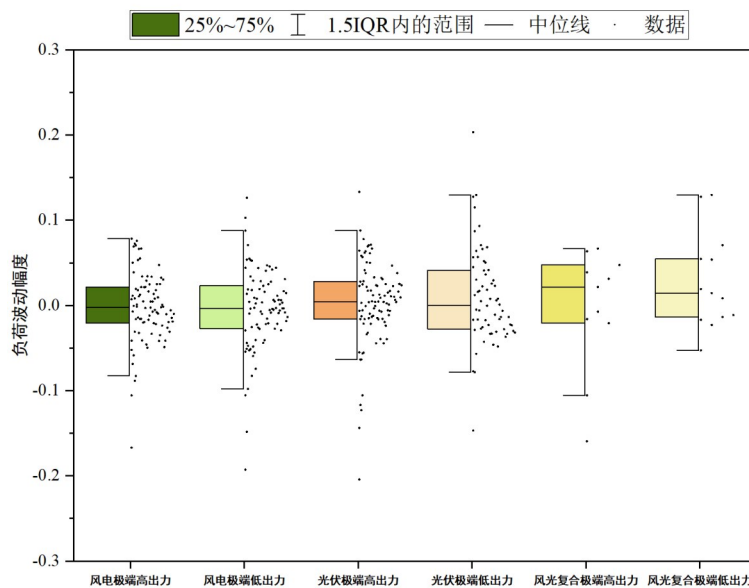


图2 新能源持续极端波动负荷波动幅度

Fig. 2 Load Fluctuation Amplitude of Persistent Extreme Fluctuations in Renewable Energy

表1 新能源持续极端波动负荷波动相关特性

Tab. 1 Load Fluctuation Correlation Characteristics of Persistent Extreme Fluctuations in Renewable Energy

	风电极端高波动	风电极端低波动	光伏极端高波动	光伏极端低波动	风光复合极端高波动	风光复合极端低波动
负荷向上波动频率	41	40	55	32	6	8
负荷向下波动频率	48	47	40	32	5	5
负荷向上波动概率	0.461	0.460	0.579	0.500	0.545	0.615
负荷向下波动概率	0.539	0.540	0.421	0.500	0.455	0.385
负荷向上最大波动幅度	0.078	0.126	0.133	0.203	0.067	0.130
负荷向下最大波动幅度	-0.167	-0.193	-0.204	-0.147	-0.159	-0.053
负荷平均波动幅度	-0.002	-0.005	0.003	0.009	-0.004	0.028

2.4 新能源持续极端波动与负荷变化的相关性

除了分析新能源持续极端波动发生时的负荷变化特性,本研究进一步探究二者之间是否存在相关性,从新能源持续极端波动事件出发,其主要特征为两方面,一是极端事件的持续天数,另一方面为新能源极端波动的平均波动幅度,下面重点分析二者与负荷波动幅度之间是否存在相关性。

2.4.1 新能源持续极端波动持续天数与负荷变化的相关性

图3为六种新能源持续极端波动不同持续天数事件的负荷平均波动幅度,从图中可知在单一新能源持续极端事件中,不同持续天数的负荷平均波动幅度的绝对值大部分在0.05以内,个别持续天数较长的极端事件该值能达到0.1以上。通过对样本进行趋势性拟合得到趋势线和趋势方程,随着持续天数的增加,负荷的平均波动幅度有略微向上波动增加或向下波动减少的趋势,虽然较短持续天数极端事件相较于较长持续天数极端事件更容易发生,但更长的持续天数可能会带来更剧烈的负荷波动,同时皮尔逊相关性分析结果并未显示出明显的相关性,说明在目前为止出现的极端波动的持续天数情况下,虽有一定趋势但无法表明负荷变化和极端波动持续天数之间有明显相关性。

总的来说,对于单一新能源持续极端事件并未发现新能源持续极端波动持续天数与负荷变化之间存在明显相关性;对于复合新能源持续极端事

件,由于无论是高出力波动还是低出力波动持续天数仅有两到三种,故相关性分析意义不大,但从图中可初步看出较长持续天数极端事件的负荷平均波动幅度明显大于较短持续时间。考虑到较长持续天数极端事件的负荷平均波动幅度会出现较大的情况,应提前应对并防御该类事件对电网安全稳定运行造成的影响。

2.4.2 新能源持续极端波动波动幅度与负荷变化的相关性

由于复合新能源持续极端事件定义为单一新能源持续极端事件同向同时发生,加上其发生频率远小于单一新能源持续极端事件,因此我们重点关注单一新能源持续极端波动中波动幅度与负荷变化的相关性。

图4为4种单一新能源持续极端波动的散点图,每个数据点代表一次极端事件,横坐标为负荷平均波动幅度,纵坐标为新能源波动幅度,同样对其进行趋势性拟合得到趋势线、趋势方程以及95%置信区间,在四种极端事件中,光伏极端低波动事件显示出较为明显的趋势性,随着负荷的增加,光伏向下波动不断加深,皮尔逊相关性分析也显示二者之间具有明显的负相关性,说明严重程度更高的光伏极端低波动事件同时容易造成全网用电需求的增加,严重冲击着电网的保供功能;相比较而言,风电极端低波动事件和光伏极端高波动事件的趋势性比较微弱,但风电极端低波动事件的趋势对电

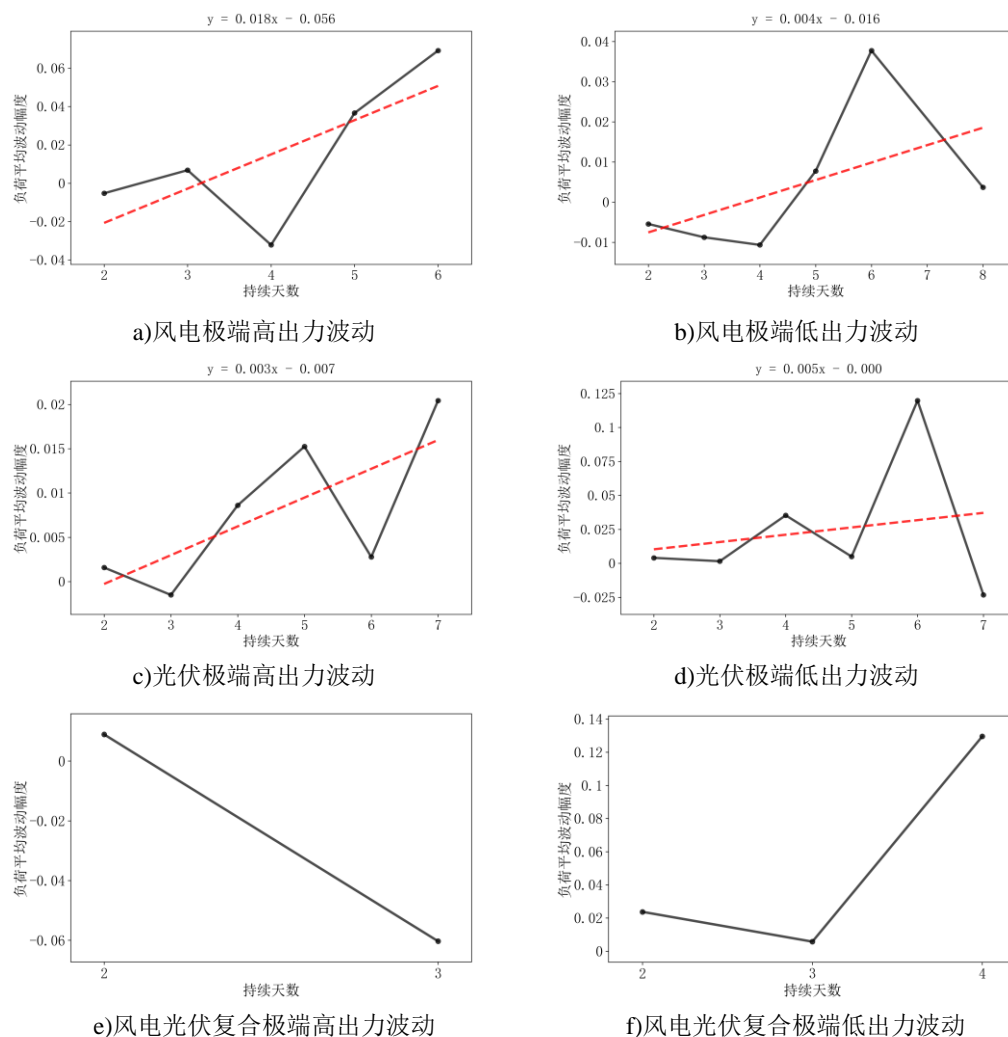


图3 新能源持续极端波动持续天数与负荷变化的相关性

Fig. 3 Correlation Between Duration Days of Persistent Extreme Fluctuations in Renewable Energy and Load Changes

网电力电量平衡是不利的,而光伏极端高波动事件中随着负荷,新能源极端向上波动也会加深,一定程度上有利于新能源的消纳,相关性分析结果并未发现这3种极端事件中二者具有明显相关性。

3 源荷匹配下梯级水电站对新能源极端波动调节能力量化评估模型

3.1 建模思路

水电站在实际运行过程中涉及多种变量,例如上下游水位,水库库容,流量以及机组出力等,其中还包含如上游水位与水库库容之间,下游水位和流量之间以及出力曲线等多种非线性函数,为了满足

水电站的多目标需求,保证综合利用效益,还需满足水位,出力,流量,水量以及水力上下游联系等多重约束,这导致量化梯级水电站对于新能源发生持续极端波动事件时的调节能力是难以量化的,特别是极端事件发生时还伴随着电网负荷的变化,为此构建了源荷匹配下多能互补运行模拟的梯级水电站对新能源极端波动的调节能力量化评估模型。

为了量化评估梯级水电站对新能源极端波动的调节能力,首先需以新能源正常出力时梯级水电站的运行情况为基准,进而量化对新能源极端波动发生时的调节能力。在电网实际运行中,新能源持续极端事件的持续时间大约为数日,时间尺度与梯

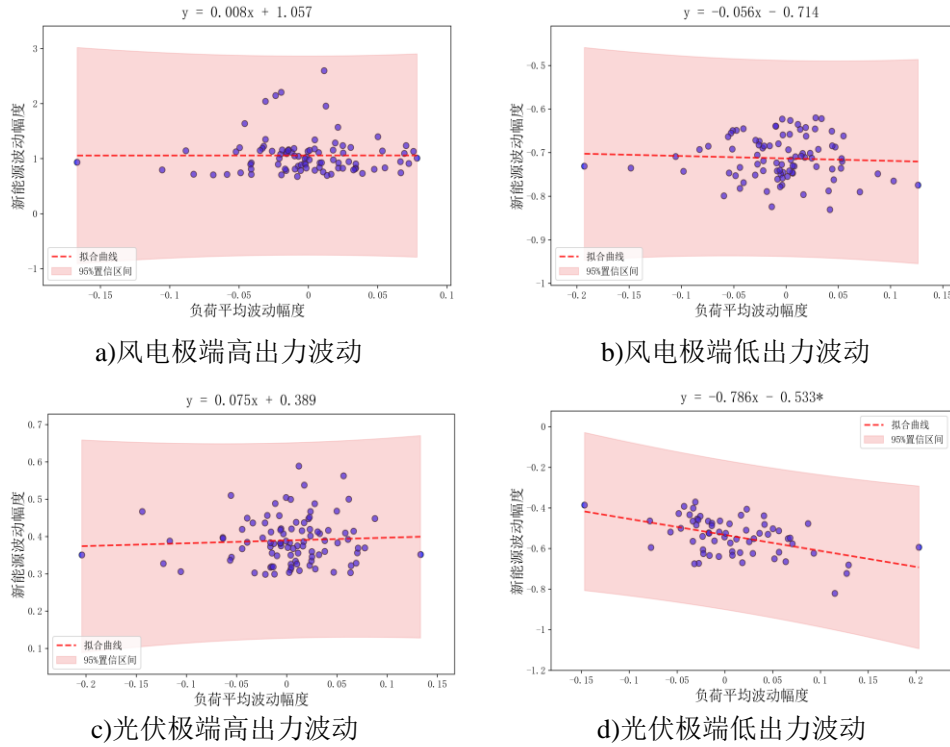


图4 新能源持续极端波动幅度与负荷变化的相关性

Fig. 4 Correlation Between Fluctuation Amplitude of Persistent Extreme Fluctuations in Renewable Energy and Load Changes

级水电站中期调度的周期和步长相匹配,故新能源理想正常出力一般被认为每日以月度均值平稳出力。针对不同种类的新能源极端波动,其负荷波动的概率分布也不一样,故按照极端事件的种类,以每次该种极端事件为一个样本,从样本集合中按照负荷波动方向分别排频,以0.2为步长,分别选取对应负荷波动分位点 $(-1, -0.8, \dots, 0.8, 1)$ 共11个值作为对应负荷波动样本,进而量化得到不同负荷波动情况下梯级水电站对新能源极端波动调节能力。基于上述分析思路,第一步根据不同种类极端事件的历史负荷波动样本生成负荷场景集,分别在该场景集下将新能源每日按月度均值出力且在满足电网电力电量平衡条件下梯级水电站的最大蓄能作为基准情况,从而进行优化求解,由于持续天数为2~4 d的事件约占全部的90%,故模型以7 d为调度周期,日为调度步长,最终得到的梯级水电站期末

蓄能作为基准蓄能值,输入到梯级水电调节新能源极端波动的模型中,通过设置蓄能偏差约束,再以新能源调节需求最大作为目标函数,最终得到多种负荷波动情况下梯级水电站的极端波动调节能力,其目标函数值代表了在一定工况下即满足当前的负荷需求,初始蓄能、径流以及期末蓄能,仅通过梯级水电不发生弃电缺电情况下对新能源持续极端波动的调节能力。模型框架见图5。

3.2 数学模型

3.2.1 基准模型

3.2.1.1 目标函数

梯级水电站期末蓄能最大化:

$$\max ES = \sum_{h \in H} ES_h \quad (3)$$

$$ES_h = \frac{W_h + \sum_{i \in \partial_h} W_i}{r_h} \quad (4)$$

式中: H 为梯级水电站的索引集合; h 为从上游到下

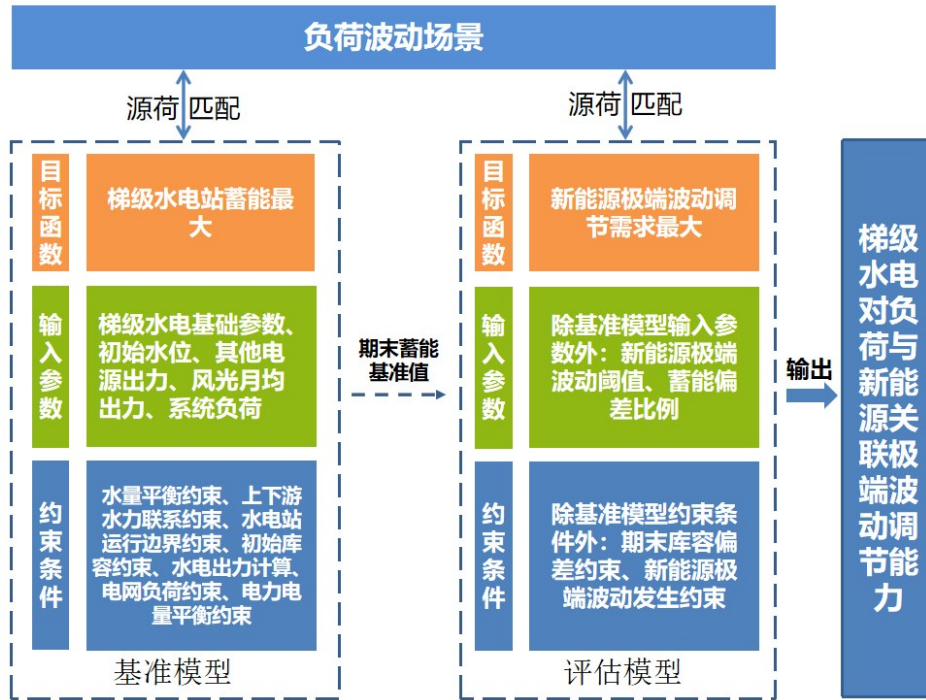


图5 评估模型框架

Fig. 5 Framework of the Evaluation Mode

游的水电站编号； ∂_h 为水电站 h 的上游水电站编号集合； ES_h 为水电站 h 的梯级蓄能，等于在该级水电站上其和上游电站的可调度的水量可产生的电能； W_i 为水电站 i 的可调水量，等于调度期末水位与死水位之间的库容； \bar{r}_h 为水电站 h 的平均耗水率。

3.2.1.2 水量平衡约束

$$V_{h,t} = V_{h,t-1} + \Delta t \times (qi_{h,t} - qp_{h,t} - qs_{h,t}) \quad t \in Th \in H \quad (5)$$

式中： $V_{h,t}$ 为水电站 h 在 t 时段末的库容； $qi_{h,t}$ 代表水电站 h 在 t 时段的入库流量； $qp_{h,t}$ 代表水电站 h 在 t 时段的发电流量； $qs_{h,t}$ 代表水电站 h 在 t 时段的弃水流量； Δt 为每一时段为多少秒； t 为时段索引； T 为时段索引集合。

3.2.1.3 上下游水力联系约束

$$qi_{h,t} = QN_{h,t} + qp_{h-1,t-d_{h-1,h}} + qs_{h-1,t-d_{h-1,h}} \quad t \in Th \in H \quad (6)$$

式中： $QN_{h,t}$ 为水电站 h 在 t 时段的天然入库径流； $d_{h-1,h}$ 为编号为 $h-1$ 的上游电站到编号为 h 水电站

的水流滞时。

3.2.1.4 水电站运行边界约束

$$V_{h,t}^{\min} \leq v_{h,t} \leq V_{h,t}^{\max} \quad t \in Th \in H \quad (7)$$

$$QP_{h,t}^{\min} \leq qp_{h,t} \leq QP_{h,t}^{\max} \quad t \in Th \in H \quad (8)$$

$$QO_{h,t}^{\min} \leq qp_{h,t} + qs_{h,t} \leq QO_{h,t}^{\max} \quad t \in Th \in H \quad (9)$$

$$PH_{h,t}^{\min} \leq ph_{h,t} \leq PH_{h,t}^{\max} \quad t \in Th \in H \quad (10)$$

式中： $V_{h,t}^{\max}$ 和 $V_{h,t}^{\min}$ 分别为水电站 h 在 t 时段的库容上限和下限，需综合考虑防洪安全，坝体安全及死水位限制等因素，将上游水位控制在安全范围中； $QP_{h,t}^{\max}$ 和 $QP_{h,t}^{\min}$ 分别为水电站 h 在 t 时段的发电流量上限和下限； $QO_{h,t}^{\max}$ 和 $QO_{h,t}^{\min}$ 分别为水电站 h 在 t 时段的出库流量上限和下限，需考虑涵盖下游供水，生态需求以及通航安全等目标设定； $PH_{h,t}^{\max}$ 和 $PH_{h,t}^{\min}$ 分别为水电站 h 在 t 时段的出力上限和下限，需考虑机组最大发电能力，最小技术出力以及检修计划等确定。

3.2.1.5 初始库容约束

$$v_{h,0} = V_h^b \quad h \in H \quad (11)$$

式中： V_h^b 为水电站 h 的初始库容，即在调度开始时的

起调库容。

3.2.1.6 水电出力计算约束

水电站 h 在 t 时段的水位计算方式如下:

计算水电站 h 在 t 时段的平均坝上水位 $Z_{h,t}^{u,a}$

$$V_{h,t}^a = (V_{h,t-1} + V_{h,t})/2 \quad t \in T \quad h \in H \quad (12)$$

$$Z_{h,t}^{u,a} = f_h^{u,v}(V_{h,t}^a) \quad t \in T \quad h \in H \quad (13)$$

计算水电站 h 在 t 时段的平均坝下水位 $Z_{h,t}^{d,a}$

$$Z_{h,t}^{d,a} = f_h^{d,q}(qp_{h,t} + qs_{h,t}) \quad t \in T \quad h \in H \quad (14)$$

计算水电站 h 在 t 时段的水头损失 $hl_{h,t}$

$$hl_{h,t} = f_h^{hl,q}(qp_{h,t}) \quad t \in T \quad h \in H \quad (15)$$

计算水电站 h 在 t 时段的净水头

$$h_{h,t}^n = Z_{h,t}^{u,a} - Z_{h,t}^{d,a} - hl_{h,t} \quad t \in T \quad h \in H \quad (16)$$

计算水电站 h 在 t 时段的出力 $ph_{h,t}$

$$ph_{h,t} = f_h^p(h_{h,t}^n, qp_{h,t}) \quad t \in T \quad h \in H \quad (17)$$

式中: $f_h^{u,v}(\cdot)$ 为水电站 h 的水位-库容关系函数;

$f_h^{d,q}(\cdot)$ 为水电站 h 的尾水位-下泄流量关系函数;

$f_h^p(\cdot)$ 为水电站 h 的发电特性曲线。

电网负荷约束:

$$D_{t,\alpha} = D_t \cdot (1 + \eta_\alpha) \quad (18)$$

式中: D_t 为系统负荷; η_α 为负荷波动分位点为 α 的波动幅度, $D_{t,\alpha}$ 为负荷波动分位点为 α 的电网负荷。

电力电量平衡约束:

$$D_{t,\alpha} = \sum_{h \in H} ph_{h,t} + PW^{m,a} + PS^{m,a} + P_t^o \quad t \in T \quad (19)$$

式中: $PW^{m,a}$ 和 $PS^{m,a}$ 分别为风电和光伏的理想出力状态, 即每日按月度均值出力, P_t^o 为电网其他能源在 t 时段的出力。

3.2.2 评估模型

通过 3.2.1 节基准模型优化求解得到梯级水电站期末蓄能 ES^{opt} , 将其作为期末蓄能控制的基准, 构建梯级水电站对新能源极端波动调节能力量化评估模型。下面以梯级水电站调节风电极端波动为例。

3.2.2.1 目标函数

新能源极端波动调节需求最大:

$$\max E^{EF} = \sum_{t \in T^{EF}} |pw_t - PW^{m,a}| \Delta H \quad (20)$$

式中: pw_t 为 t 时段风电出力; T^{EF} 为极端波动时段

集合。

3.2.2.2 新能源极端波动发生约束

$$\begin{cases} \text{if } EDF \left\{ \begin{array}{l} PW^{m,a} - pw_t \geq \sigma^{ed} PW^{m,a} \\ t \in T^{EF} \end{array} \right. \\ \text{if } EUF \left\{ \begin{array}{l} pw_t - PW^{monthave} \geq \sigma^{eu} PW^{m,a} \\ t \in T^{EF} \end{array} \right. \end{cases} \quad (21)$$

式中: EDF 代表发生风电极端低波动事件; EUF 代表发生风电极端高波动事件; σ^{ed} 和 σ^{eu} 分别代表对应极端波动阈值。

3.2.2.3 电力电量平衡约束

$$D_{t,\alpha} = \sum_{h \in H} ph_{h,t} + pw_t + PS^{m,a} + P_t^o \quad t \in T^{EF} \quad (22)$$

$$D_{t,\alpha} = \sum_{h \in H} ph_{h,t} + PW^{m,a} + PS^{m,a} + P_t^o \quad t \in T - T^{EXE} \quad (23)$$

式中: 表示无论极端波动是否发生都不允许发生弃电和缺电。

3.2.2.4 蓄能偏差约束

$$\left| ES^{opt} - \sum_{h \in H} ES_h \right| \leq \delta \times ES^{opt} \quad (24)$$

式中: ES^{opt} 为基准模型优化求解的梯级水电站期末蓄能, δ 为允许的蓄能偏差。

其余水电站水量平衡约束、上下游水力联系约束、水电站运行边界约束、初始库容约束、水电出力计算约束以及数据输入均和基准模型的一样, 最终计算的最优结果作为梯级水电的条件能力, 梯级水电对光伏极端波动和风光复合极端波动的调节能力计算模型类似。

3.3 求解方法

对于式(13)–(15)等二维非线性等式约束, 采用文献[27]中的线性插值方法对其 MILP 建模。对于式(17)中的三维非线性等式约束, 采用文献[28]中的二进制分支模式三角形插值方法进行 0~1 混合整数线性化 (MILP) 建模, 进而将模型可转换为标准的 MILP 优化问题, 通过 Gurobi 求解器求解。

4 实例分析

以中国西南某省的主要流域中的五座梯级水电站 (XW-MW-DCS-NZD-JH) 为分析对象, 量化评

估其对新能源持续极端波动的调节能力,梯级电站的总装机容量1482万kW,其中XW和NZD为具有多年调节能力的流域控制性龙头水电站,装机容量分别为420万kW和585万kW,在整个该省电网的保供和消纳调节起到了重要作用,MW、DCS、JH装机容量分别为167万、135万、175万kW。

分析情景设置:①某省新能源装机取2024年初累计值,风电为1530万kW,光伏为1959万kW;②极端波动阈值设置为80%分位点,调度周期设置为7d,新能源持续极端波动事件共六种,持续时间设置为2~7d;③确定新能源持续极端波动事件种类后,电网负荷波动情景设置为-1,-80%,...,80%,1共11个分位点(负荷代表波动方向,负号代表向下波动,正好代表向上波动);④设置3种梯级水电进行极端波动调节后的期末蓄能相比基准蓄能偏差分别为5%,10%和15%;⑤根据该流域龙头水电站的水位过程,重点考虑梯级水电站对新能源波动存在一定上下调节能力,设置两种梯级水电运行工况(初始蓄能,径流,风光出力强度)为消落期(3月下旬)和蓄水期(8月上旬)。

4.1 风电极端波动调节能力量化分析

图6a至6d为设置5%期末蓄能控制偏差约束后,梯级水电在不同负荷波动分位点下对不同持续天数的风电极端波动的调节能力量化结果,图7a至7d的期末蓄能控制偏差为10%,图8a至8d的为15%。值得注意的是,在某些负荷波动分位点下基准模型无法求解,若负荷过小,甚至小于风电光伏的出力之和,这样无法满足电力电量平衡约束;若负荷过大,为了满足电力电量平衡约束梯级水电站需要增大出力,可能会突破例如出力限制或水位限制等刚性约束。

对于风电极端高波动事件来说,随着蓄能偏差约束的放宽,梯级水电对不同持续天数的极端事件的调节能力大部分表现为提升,具体体现在一定负荷下能调节更长持续天数的极端事件或对于一定负荷和持续天数能满足的风电极端波动调节需求更大;但在一定负荷下其调节能力也存在上限,例如在消落期负荷波动为0的场景下,不同蓄能偏差

对于持续时间为2d的风电极端高波动事件的调节能力相同,说明此时为了满足不弃电的需求,已经将水电的出力降到最低。

针对不同负荷波动场景,在一定持续天数的风电极端高波动中,当负荷波动分位点由1逐渐减少到-1时,会出现梯级水电的调节能力减少为0的情况,说明此时负荷的减小若再出现风电极端高波动则无法满足新能源消纳,会出现弃电的情况,故调节能力变成0;同时随着负荷的增加能够消纳掉更多风电极端高波动产生的出力,从而满足极端波动调节需求,表现为调节能力上限的提高,故调节能力上限的最大值应出现在负荷波动分位点为1的场景中,但由于蓄能偏差约束的限制,当蓄能偏差较小时,水电此时无法将出力降到最低,表现为负荷大的场景下梯级水电对极端波动的调节能力并不一定大,例如当期末蓄能为5%时,梯级水电蓄水期对持续天数为七天的调节能力在其负荷波动分位点为0.2时最大,而当期末蓄能为15%时,梯级水电蓄水期对持续天数为七天的调节能力随着负荷增加调节能力越大。

对于风电极端低波动事件来说,随着蓄能偏差约束的放宽,梯级水电对不同持续天数的极端事件的调节能力也表现为提升同时存在上限,说明此时风电出力达到极值即完全不出力,例如在蓄水期负荷波动为0的场景下,3种蓄能偏差对于持续时间为2d的风电极端低波动事件的调节能力均为0.85亿kWh,说明5%的蓄能偏差即可调节全部程度持续时长为2d的风电极端低波动;当负荷波动分位点逐渐增大时,会出现梯级水电的调节能力降低为0的情况,说明此时负荷的增加若再出现风电极端低波动则无法满足电网保供目标,会出现缺电的情况;当负荷波动分位点逐渐减少时,梯级水电的调节能力增大同时也会达到上限,说明负荷的减少虽然能降低保供压力,提升新能源极端波动调节需求,但风电出力达到极值时也会达到上限。故梯级水电对风电极端低波动的调节能力达到上限即可由于蓄能偏差控制的放宽,也可因为负荷降低梯级水电蓄能增大导致相同蓄能偏差可调节蓄能增加,

进而提升调节能力。

对于消落期和蓄水期两种工况,梯级水电同时具有一定调节风电极端低波动事件和极端低波动事件的能力,在应对更高持续天数的极端事件以及更剧烈的负荷波动场景时,后者的调节能力更强,主要有以下原因:①选取的蓄水期的实际工况期末

蓄能相对较大,当蓄能偏差一定时,导致可供调节的蓄能空间更大;②蓄水期实际工况的发电水头较高,导致梯级水电调节新能源极端波动时的电量更大;③由于风电出力具有明显的季节性,导致蓄水期相比消落期的风电整体发电出力要弱,故能满足更多极端波动的调节需求。

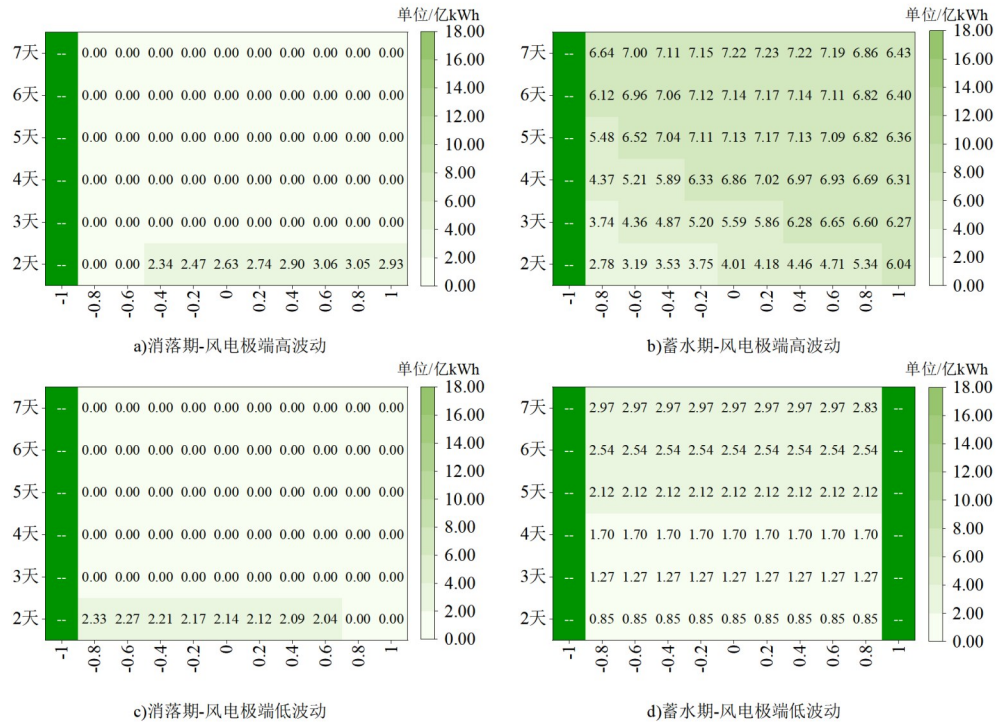


图6 梯级水电站对风电极端波动防御能力评估结果(5%蓄能偏差控制下)

Fig. 6 Evaluation Results of Cascade Hydropower Stations' Defense Capacity Against Extreme Wind Power Fluctuations (Under 5% Energy Storage Deviation Control)

4.2 光伏极端波动调节能力量化分析

图9~11分别为梯级水电在不同负荷波动分位点下对不同持续天数的光伏极端波动的调节能力量化结果。当负荷波动为0时,梯级水电在3种蓄能偏差下对2~7 d的光伏极端波动均具有一定调节能力,其调节能力相比风电来说明显更强,且存在上限;当负荷发生波动时,仅在负荷波动分位点为0.8且发生光伏极端低波动时才会丧失梯级水电调节能力,进一步反映出梯级水电对同时出现光伏极端波动和负荷变化具有较强的调节能力,主要原因可能为光伏整体出力较风电来说较弱,而且光伏极

端波动阈值的绝对值也比风电要小,故光伏发生极端波动时的调节需求也相应要小。

4.3 风电光伏复合极端波动调节能力量化分析

图12~14分别为梯级水电在不同负荷波动分位点下对不同持续天数的风光复合极端波动的调节能力量化结果。与单一新能源极端波动相比,其整体调节能力有所降低,说明虽然风光复合极端波动事件出现的频率相对于单一极端波动来说大大降低,但在其出现时对电网供需平衡的冲击是巨大的,多数时候我们需要提前应对并借助储能或跨区域输电等手段来缓解新能源消纳或电网保供的

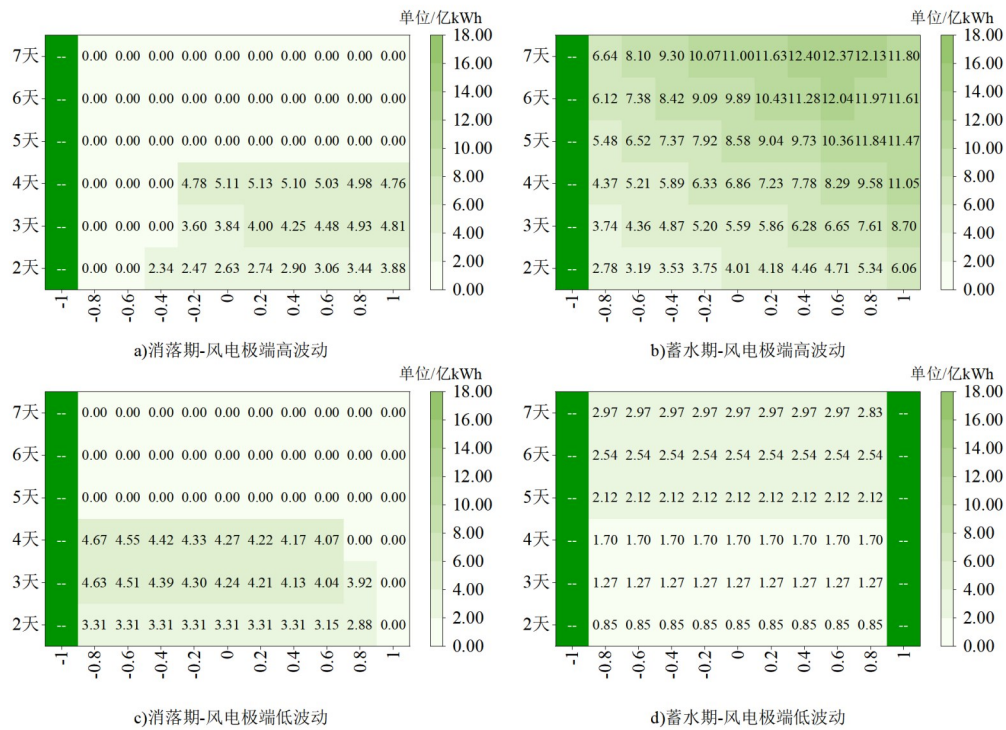


图7 梯级水电站对风电极端波动防御能力评估结果(10%蓄能偏差控制下)

Fig. 7 Evaluation Results of Cascade Hydropower Stations' Defense Capacity Against Extreme Wind Power Fluctuations (Under 10% Energy Storage Deviation Control)

压力;同时蓄水期在应对更高持续天数的极端事件以及更剧烈的负荷波动场景上的调节能力整体表现仍强于消落期,尤其是对于风光复合极端高波动,能够调节持续天数为2~7 d且负荷波动分位点为-0.6的情景。

5 结语

本文对中国西南某省2016—2024共8 a的新能源持续极端波动进行了识别,分析了其负荷波动特性,并进一步分析两者之间的关系,基于上述结果构建了梯级水电站对负荷与新能源关联极端波动的调节能力量化评估模型,并得到相关结果如下。

a)风电和光伏持续极端波动事件分别发生了176次和159次,风光复合持续极端波动事件共发生24次,持续天数为2~4 d的事件约占全部的90%。负荷与新能源出力发生反向波动的概率约48%。除了风电极端低波动事件,其它五种极端事件的负荷反向波动最大幅度均大于同向波动最大幅度。

b)随着持续天数的增加,负荷的平均波动幅度有略微向上波动增加或向下波动减少的趋势,但未显示出明显的相关性,在光伏极端低波动事件中,随着光伏向下波动幅度的加深,负荷向下波动逐渐减轻到0后再不断加深向上波动,且二者之间具有明显的负相关性,说明严重程度更高的光伏极端低波动事件容易造成全网用电需求的增加。

c)当梯级水电运行工况为水位适中的消落期或蓄水期时,对极端高波动和低波动均具有一定调节能力,且蓄水期的调节能力更强,其对于风光复合极端波动的调节能力整体比单一新能源极端波动要弱;一定负荷条件下,随着蓄能偏差控制的放宽,梯级水电对极端波动的调节能力会出现一直为0(即仍然不具备调节能力)或持续提升并达到上限的情况;新能源极端低出力发生时,负荷的同向波动会提升梯级水电调节能力同时也存在上限,负荷的反向波动会降低梯级水电调节能力直到0;新能源极端高出力发生时,负荷的反向波动仍会减少梯

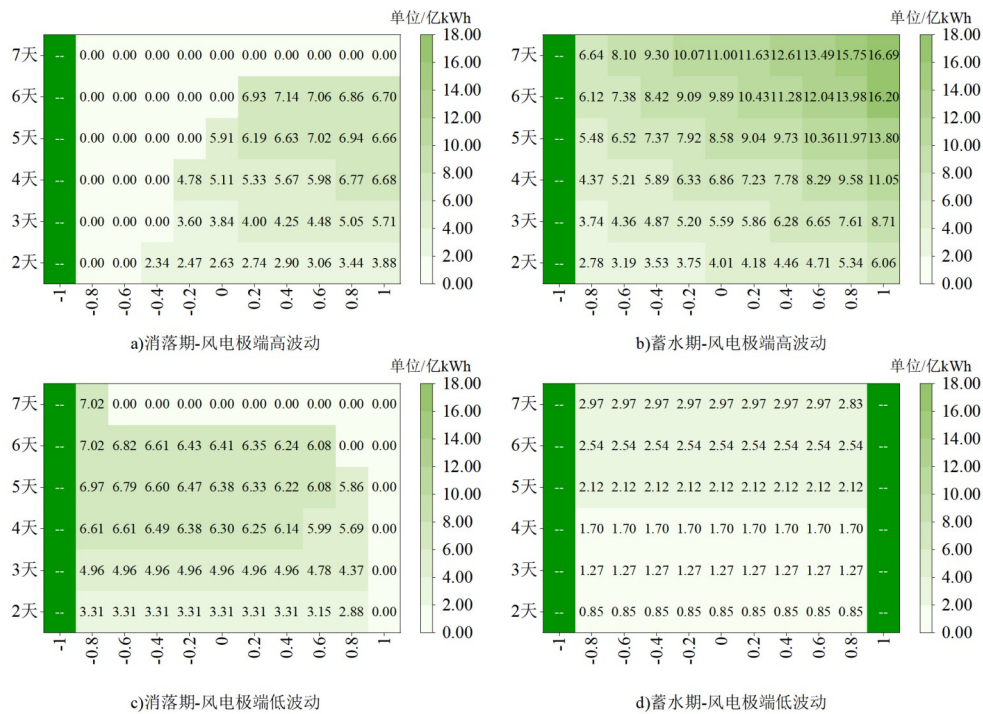


图8 梯级水电站对风电极端波动防御能力评估结果(15%蓄能偏差控制下)

Fig. 8 Evaluation Results of Cascade Hydropower Stations' Defense Capacity Against Extreme Wind Power Fluctuations (Under 15% Energy Storage Deviation Control)

级水电调节能力直到0,但当负荷发生同向波动时,梯级水电调节能力的上限随着负荷向上波动的越多而越高。

适用条件与研究局限性:本文仅基于中国单一省级电网及该省代表梯级水电站开展研究,所得调节力量化结论为该省应对新能源持续极端波动提供了决策依据,但其地域适用范围与场景适配性存在一定局限性,故在研究其他省份的梯级水电对负荷波动下新能源持续极端波动的调节能力时,可参考本文的研究思路,但仍需根据实际新能源出力及负荷变化规律,以及特定梯级水电的相关特性来开展。

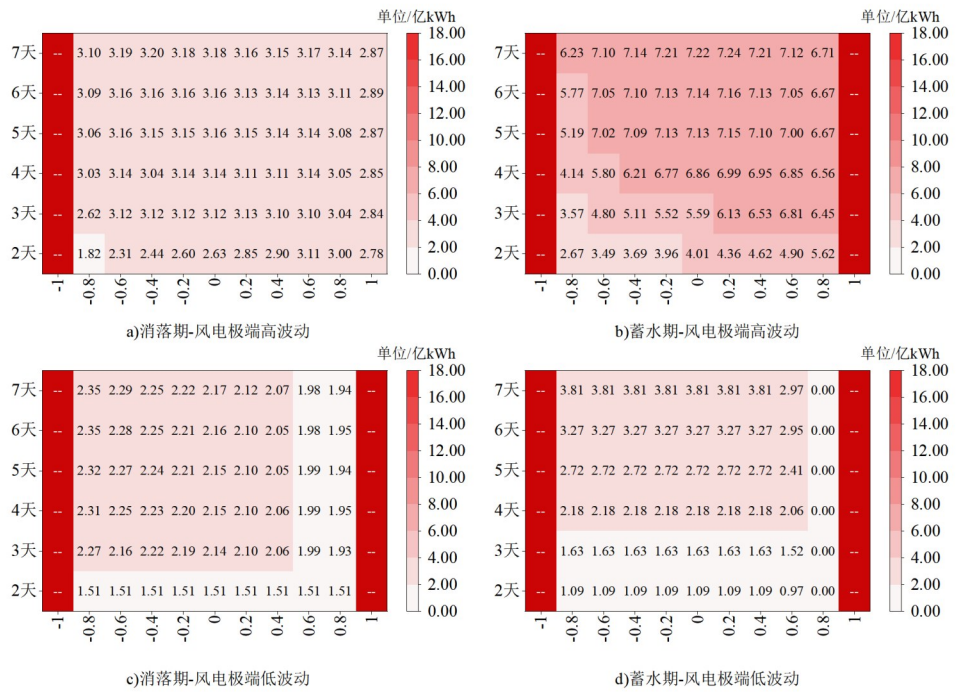


图9 梯级水电站对光伏极端波动防御能力评估结果(5%蓄能偏差控制下)

Fig. 9 Evaluation Results of Cascade Hydropower Stations' Defense Capacity Against Extreme Photovoltaic Fluctuations (Under 5% Energy Storage Deviation Control)

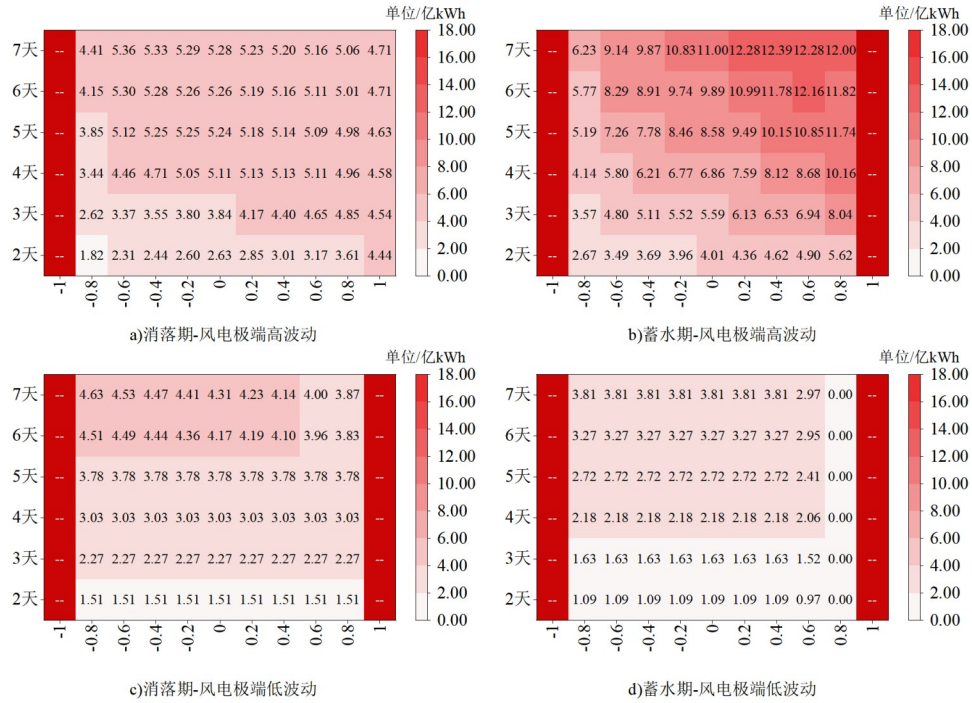


图 10 梯级水电站对光伏极端波动防御能力评估结果 (10% 蓄能偏差控制下)

Fig. 10 Evaluation Results of Cascade Hydropower Stations' Defense Capacity Against Extreme Photovoltaic Fluctuations (Under 10% Energy Storage Deviation Control)

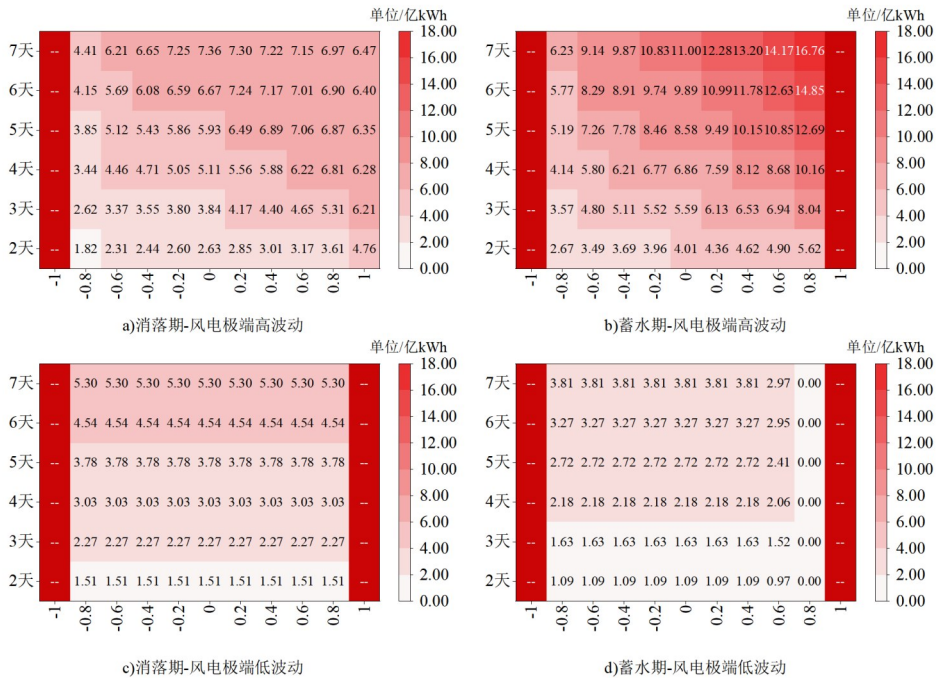


图 11 梯级水电站对光伏极端波动防御能力评估结果 (15% 蓄能偏差控制下)

Fig. 11 Evaluation Results of Cascade Hydropower Stations' Defense Capacity Against Extreme Photovoltaic Fluctuations (Under 15% Energy Storage Deviation Control)

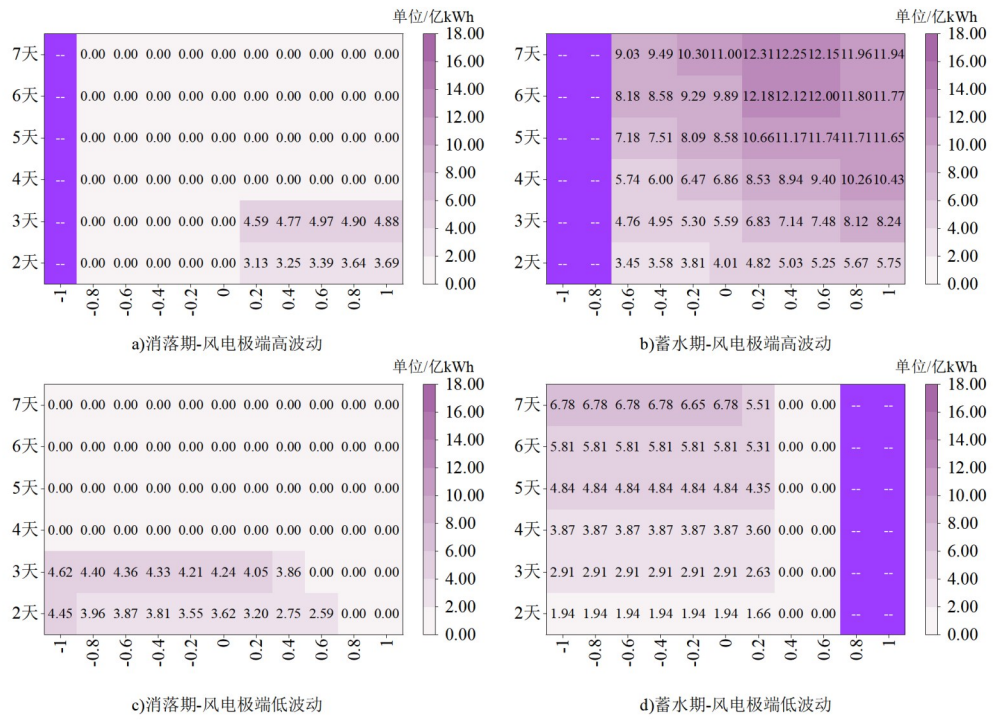


图 13 梯级水电站对风光复合极端波动防御能力评估结果(10% 蓄能偏差控制下)

Fig. 13 Evaluation Results of Cascade Hydropower Stations' Defense Capacity Against Combined Wind-Photovoltaic Extreme Fluctuations (Under 10% Energy Storage Deviation Control)

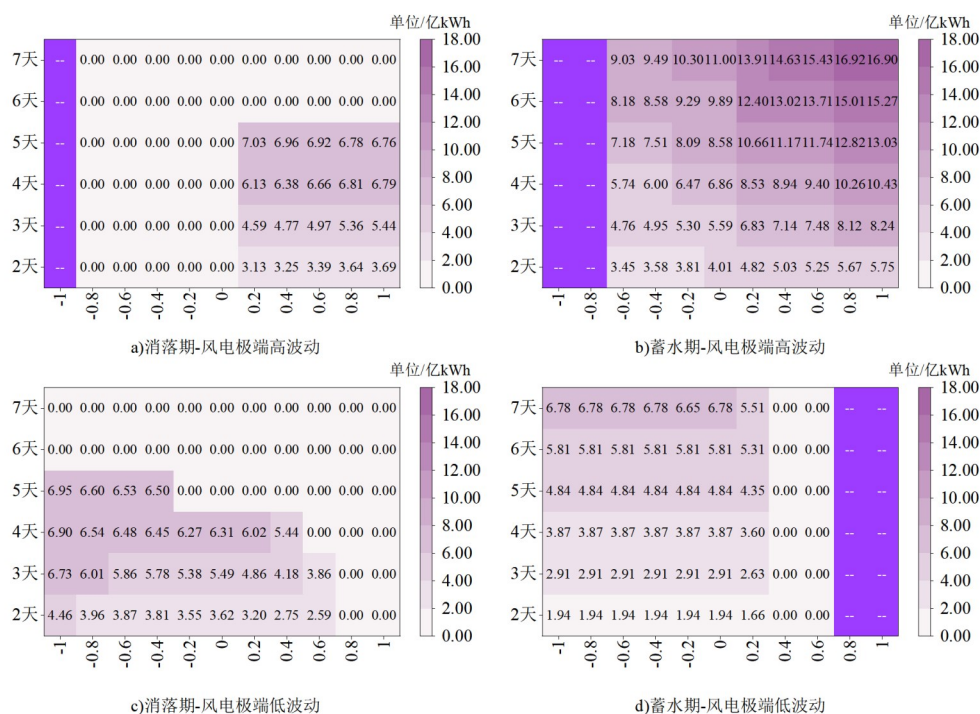


图 14 梯级水电站对风光复合光伏极端波动防御能力评估结果(15%蓄能偏差控制下)

Fig. 14 Evaluation Results of Cascade Hydropower Stations' Defense Capacity Against Combined Wind-Photovoltaic Extreme Fluctuations (Under 15% Energy Storage Deviation Control)

参考文献:

- [1] PENG L, MAUZERALL D L, ZHONG Y D, et al. Heterogeneous effects of battery storage deployment strategies on decarbonization of provincial power systems in China [J]. Nature Communications, 2023, 14: 4858.
- [2] SHEN J, WANG Y, LIN M, et al. Quantifying the impact of extreme weather on China's hydropower - wind - solar renewable energy system [J]. Nature Water, 2025, 3: 415-429.
- [3] ZHENG D, YAN X, TONG D, et al. Strategies for climate-resilient global wind and solar power systems [J]. Nature, 2025, 643: 1263-1267.
- [4] 冉洪伟,任琰琰,吴星焯,等. 考虑风光不确定性的水库多目标优化调度[J]. 水电能源科学, 2025, 43 (7): 1-6.
- [5] RAN H W, REN Y Y, WU X Y, et al. Multi-objective Optimal Dispatch of Reservoir Considering Uncertainty of Wind and Solar Energy [J]. Water Resources and Power, 2025, 43 (7): 1-6. (in Chinese)
- [6] 叶林,裴铭,杨建宾,等. 极端天气下的新能源电力系统电力电量平衡体系 [J]. 电力系统自动化, 2025, 49 (4): 2-18.
- [7] YE L, PEI M, YANG J B, et al. Power and Energy Balance System of New Energy Power System Under Extreme Weather [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49 (4): 2-18. (in Chinese)
- [8] HE X G, PAN M, WEI Z W, et al. A global drought and flood catalogue from 1950 to 2016 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2020, 101(5):508-533.
- [9] GAO Y, SHAO L L, MENG Y Y, et al. The Temporal and Spatial Distribution of Persistent Low Wind Power Events and Their Relationship with Weather Regimes in Mainland China [J]. Renewable Energy, 2025 (4): 123523. DOI: 10.1016/j. renene. 2025. 123523
- [10] HUANG X, PAN G S, GU W, et al. Risk analysis and responses of PV output extreme in China's whole county PV program [J]. Renewable Energy, 2025: 125079. DOI: 10.1016/j. renene. 2025. 125079
- [11] 钟燕,王军,宋戈,等. 基于二次重构分解去噪及双向长短期记忆网络的极端天气下超短期电力负荷预测 [J]. 电网技术, 2025, 49 (11): 4791-4800.
- [12] ZHONG Y, WANG J, SONG G, et al. Ultra-Short-Term Power Load Forecasting Under Extreme Weather Based on Secondary Reconstruction Decomposition Denoising and Bidirectional Long Short-Term Memory Network [J]. Power System Technology,

- 2025, 49 (11): 4791-4800. (in Chinese)
- [10] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (16): 29-36.
CHENG C T. Reshaping the Role of Hydropower and Its Key Issues Under Carbon Neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (16): 29-36. (in Chinese)
- [11] 张俊涛, 程春田, 于申, 等. 水电支撑新型电力系统灵活性研究进展、挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (10): 3862-3884.
ZHANG J T, CHENG C T, YU S, et al. Research Progress, Challenges and Prospects of Hydropower Supporting Flexibility of New Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44 (10): 3862-3884. (in Chinese)
- [12] 康雍喜, 赵志鹏, 程春田. 考虑水流滞时的清洁能源基地水电短期灵活性量化方法 [J]. 水利学报, 2024, 55 (12): 1496-1507.
KANG Y X, ZHAO Z P, CHENG C T. Quantitative Method for Short-Term Flexibility of Hydropower in Clean Energy Bases Considering Flow Lag [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (12): 1496-1507. (in Chinese)
- [13] 王亚华, 郑壹飞, 李雨通, 等. 多维工况影响下水电多尺度调节能力量化表征方法 [J/OL]. 人民长江, 2025, 1-11 [2026-02-02].
WANG Y H, ZHENG Y F, LI Y T, et al. Quantitative Characterization Method of Hydropower Multi-scale Regulation Capacity Under the Influence of Multi-dimensional Operating Conditions [J/OL]. Yangtze River, 2025, 1-11 [2026-02-02]. (in Chinese)
- [14] LI M, WU G, MA R G, et al. Evaluation of multi-period coupling regulation capability of hydropower based on an explicit quantification method [J]. Energy, 2025: 136737.
- [15] 陈聪, 刘本希, 王海东, 等. 应对极端干旱和新能源极端预测误差的水风光中期优化调度研究 [J]. 人民珠江, 2025, 46(5): 63-76.
CHEN C, LIU B X, WANG H D, et al. Mid-term optimal dispatch of hydro-wind-solar system considering extreme drought and extreme forecast errors of new energy [J]. Pearl River, 2025, 46(5): 63-76. (in Chinese)
- [16] 李永培, 廖思阳, 徐箭, 等. 水电调节能力约束下水风光互补系统的新能源打捆容量评估 [J/OL]. 电网技术, 2025, 1-18 [2026-02-02].
LI Y P, LIAO S Y, XU J, et al. Evaluation of New Energy Bundling Capacity of Hydro-Wind-Solar Complementary System Under Hydropower Regulation Capacity Constraints [J/OL]. Power System Technology, 2025, 1-18 [2026-02-02]. (in Chinese)
- [17] HUANG K D, LUO P, LIU P, et al. Improving complementarity of a hybrid renewable energy system to meet load demand by using hydropower regulation ability [J]. Energy, 2022, 248: 123535.
- [18] 吴迪, 马黎, 蒲小芳, 等. 基于水库调节能力的日内水光互补研究 [J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9 (S1): 50-57.
WU D, MA L, PU X F, et al. Research on Intraday Hydro-PV Complementation Based on Reservoir Regulation Capacity [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9 (S1): 50-57. (in Chinese)
- [19] XU H, ZHANG J T, CHENG C T, CAO H, LU J, ZHANG Z. A novel metric for evaluating hydro-wind-solar energy complementarity [J]. Applied Energy, 2024, 373: 123926.
- [20] 武新宇, 宋宇航, 曾博宇, 等. 水风光资源互补与调度互补评价方法研究 [J]. 人民珠江, 2025, 46(10): 45-53.
WU X Y, SONG Y H, ZENG B Y, et al. Evaluation method for resource complementarity and dispatch complementarity of hydro-wind-solar system [J]. Pearl River, 2025, 46(10): 45-53. (in Chinese)
- [21] 徐连琛, 金晓辉, 练金城, 等. 基于水电调节的多能互补发电系统研究综述 [J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(5): 25-38.
XU L C, JIN X H, LIAN J C, et al. Research Review on Multi-Energy Complementary Power Generation System Based on Hydropower Regulation [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(5): 25-38. (in Chinese)
- [22] 王仕龙, 张汉雄, 卢嘉琛, 等. 基于梯级水电调节的风-光-水联合跨区消纳优化调度 [J]. 智慧电力, 2025, 53 (7): 28-35.
WANG S L, ZHANG H X, LU J C, et al. Optimal Dispatch of Cross-Regional Consumption of Wind-Solar-Hydro Joint Power Based on Cascade Hydropower Regulation [J]. Smart Power, 2025, 53 (7): 28-35. (in Chinese)
- [23] 桂前进, 王洋, 张二龙, 等. 基于梯级水电调节的水-光-储多能互补系统优化调度研究 [J]. 动力工程学报, 2025, 45 (10): 1637-1647.
GUI Q J, WANG Y, ZHANG E L, et al. Optimal Dispatch of Hydro-PV-Storage Multi-Energy Complementary System Based on Cascade Hydropower Regulation [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45 (10): 1637-1647. (in Chinese)
- [24] 李咸善, 杨拯, 李飞, 等. 基于梯级水电调节的风光水联盟与区域电网联合运行优化调度策略 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2234-2248.
LI X S, YANG Z, LI F, et al. Optimal Operation Dispatch

- Strategy of Wind-Solar-Hydro Alliance and Regional Power Grid Based on Cascade Hydropower Regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2234-2248. (in Chinese)
- [25] 苗谊凡, 石庆鑫, 霍成芳, 等. 极端天气事件下的高比例新能源电力系统供需风险评估 [J/OL]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2025, 1-18 [2026-02-02].
- MIAO Y F, SHI Q X, HUO C F, et al. Supply and Demand Risk Assessment of High-Proportion New Energy Power System Under Extreme Weather Events [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025, 1-18 [2026-02-02]. (in Chinese)
- [26] 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 Z X, LIN Y S, QIAO Y, et al. Flexibility Supply-Demand Balance of Power System with Extremely High Proportion of Renewable Energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (16): 3-16. (in Chinese)
- [27] ZHANG Y, CHENG C T, CAO R, et al. Multivariate probabilistic forecasting and its performance's impacts on long-term dispatch of hydro-wind hybrid systems [J]. Applied Energy, 2021, 283: 116243.
- [28] ZHANG J T, CHENG C T, YU S, et al. Sharing hydropower flexibility in interconnected power systems: a case study for the China Southern power grid [J]. Applied Energy, 2021, 288: 116645.

Quantitative Evaluation of Regulation Capacity of Cascade Hydropower Stations for Extreme Fluctuations of New Energy Under Source-Load Matching

LI Bin, ZHANG Juntao, CHENG Chuntian

(Institute of Hydropower and Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The scissors difference regulation demand formed by the persistent extreme fluctuations of new energy output and the surge of power load under extreme weather has become a huge challenge for the power and energy balance of the power grid. It is of great significance to quantify the regulation capacity of large watershed cascade hydropower stations for the continuous extreme fluctuations of new energy. Using the historical actual daily output data of new energy in a power grid in Southwest China from 2016 to 2024, six types of extreme fluctuations of new energy were identified by the double-threshold definition method, and the load fluctuation law during the occurrence of extreme events was obtained. The potential trends and correlations between extreme fluctuations of new energy and changes in load demand were revealed through linear equation fitting and Pearson correlation analysis. On this basis, considering the complex hydraulic and electrical connections, a quantitative evaluation model for the regulation capacity of cascade hydropower stations for the associated extreme fluctuations of load and new energy was established, which was efficiently solved by the Gurobi solver. Based on different load fluctuation scenarios, the regulation capacity of cascade hydropower under the working conditions of drawdown period and impoundment period was analyzed. The results show that extreme wind power fluctuations and extreme photovoltaic fluctuations occur 22 times and 20 times per year on average, respectively, and combined wind-solar extreme fluctuations occur 3 times per year on average. Among all extreme events, the probability that the direction of load fluctuation is opposite to that of extreme new energy fluctuation is about 48%, and only the extreme low photovoltaic fluctuation amplitude has an obvious downward trend and negative correlation with the load fluctuation amplitude. When cascade hydropower stations are in the drawdown period or impoundment period with moderate water levels, they have a certain regulation capacity for both associated extreme high and low fluctuations of load and new energy, and the regulation capacity in the impoundment period is stronger. The overall regulation capacity for combined wind-solar extreme fluctuations is weaker than that for single new energy extreme fluctuations. Therefore, when associated extreme fluctuations of load and new energy occur, cascade hydropower stations can provide certain support capacity for the power grid. However, for more extreme reverse fluctuations of load and new energy, it is necessary to resort to energy storage and other means, which provides a decision-making basis for the power grid to defend against such extreme events.

Keywords: Source-load matching; Cascade hydropower stations; Extreme fluctuations of new energy; Regulation capacity; Quantitative evaluation

(责任编辑:高天扬)