

巨型梯级水电站对电网新能源极端波动的防御能力分析方法

张俊涛¹, 程春田¹, 曹 辉², 蔡华祥³

(1. 大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁省大连市 116024;

2. 三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 湖北省宜昌市 443002; 3. 昆明电力交易中心有限责任公司, 云南省昆明市 650011)

摘要: 由于汛枯期工况的差异,复杂的水力、电力联系,以及防洪、生态、通航等综合利用需求,如何评估千万千瓦级巨型梯级水电站对新能源持续多日极端波动的防御能力是亟待解决的难题。首先,提出了新能源极端波动解析表征方法,从电网多年历史数据中提取了极端波动样本,揭示了风光极端波动特性。基于此,建立了梯级水电站对新能源极端波动防御能力的扰动优化评估模型,并采用0-1混合整数线性化建模技术实现了模型高效求解。以中国西南某省电网某流域梯级水电站为应用实例,分析了梯级水电站对新能源极端波动的防御能力及其对新能源装机发展水平的敏感性,结果可为极端天气下电网电力电量平衡调度提供指导。

关键词: 梯级水电站; 新能源; 极端波动; 防御能力; 电力电量平衡

0 引言

中国电源结构加速向以新能源为主体转变。新能源出力在时间、空间维度上的随机性、波动性、间歇性特征进一步凸显^[1-3],尤其是气候变化下热浪、寒潮等极端天气突发、频发且影响区域广、持续时间长,导致新能源连续多日极端波动严重冲击电网电力电量平衡^[4-5]。例如,2022年某次寒潮期间,中国西南某省风电出力快速跌落至装机容量的1%,光伏出力跌落至装机容量的10%,全省新能源连续4天基本停摆。储能是应对新能源随机波动、保障电网电力电量平衡的关键技术支撑^[6]。截至2023年底,中国电力储能总装机容量为 8.65×10^7 kW,其中,抽水蓄能和锂离子电池储能分别占59.4%和38.8%^[7],但抽水蓄能主要用于日内削峰填谷,锂离子电池储能多用于调峰调频^[6]。而对于当前电网尤为稀缺和需求紧迫的大规模长周期储能技术则面临产业规模发展小的困境,能量效率、寿命、成本等关键指标离规模化发展仍有较大差距,系统整体可靠性仍需工程验证^[8-9]。

在上述背景下,如何应对新能源连续多日大规模极端波动是电网迫在眉睫的难题。不同于世界其他能源低碳转型国家,中国拥有全球最丰富的水电

资源并建成了澜沧江、金沙江、雅砻江等千万千瓦级水电基地梯级水电站群^[10]。这些巨型梯级水电站为中国电网电力供应、调峰调频提供了重要支撑^[11],同时还蕴藏着大规模长周期调节潜力,主要体现在:1)新能源发电能力呈现“旱季大、雨季小”的季节性特征,与水力发电能力天然互补;2)为调节径流汛枯季节变化,梯级水电站通常建有一座或多座具有年或多年调节能力的流域控制性龙头水电站,例如澜沧江小湾水电站、雅砻江两河口水电站,是整个流域梯级的超级调蓄池;3)龙头水电站与下游调节能力较差的水电站组成“一库多级”式梯级水电系统,具有“滴水多次发电”的杠杆效应。极端天气下,龙头水电站基于自身可用蓄能并联动下游梯级水电站,可向电网提供持续数日、数周的大规模电力支撑。

目前,利用水电调节能力消减新能源波动性的研究主要涉及两方面:一是流域水风光一体化,即水电平抑流域范围内打捆新能源的波动,包括流域新能源打捆容量^[12]、互补方式^[13]、风险效益^[14]、调度决策^[15-16]、机组组合^[17]、水电站调度规则^[18]、机组振动区规避^[19]等问题,目的是释放水电站调节能力^[20],提升流域水风光打捆送出消纳水平,同时减弱对水轮机安全的影响^[21];二是从电网电力电量平衡的角度,将电网新能源出力的季节性波动、短期反调峰和预测误差融入梯级水电调度建模之中,通过优化梯级水电站中长期水位或发电调度过程,使得电网大规模供需失衡风险最小化,进而缓解系统火电或储

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-08-03。

上网日期: 2024-11-04。

国家博士后创新人才支持计划资助项目(BX20230055); 国家自然科学基金资助项目(52239001)。

能的兜底保障压力和调节成本^[22-25],或者将梯级水电调度运行纳入电力系统规划电力电量平衡生产模拟中,探究水电灵活性对区域新能源渗透率的提升作用^[26-27]。

上述研究工作多聚焦于风光季节性波动、调峰、预测误差等常规灵活性需求驱动的水电灵活性挖掘利用问题,梯级水电站对电网新能源持续多日极端波动的防御能力仍需深入研究。本文以极具代表性的水电装机容量全国排名第二、新能源装机占比超30%的西南某省电网为工程背景,提出由持续时长、波动深度、电量调节需求构成的新能源持续极端波动多维表征方法,从电网大数据中识别提取极端波动样本,分析极端波动特性。基于此,构建梯级水电站对新能源极端波动防御能力的扰动优化评估模型,揭示了全年汛枯期不同阶段梯级水电极端波动防御能力及其对新能源装机发展水平的敏感性。

1 新能源持续极端波动特性

1.1 新能源持续极端波动描述

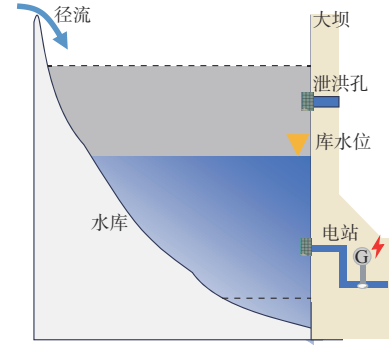
从电网长中短期调度业务来看,可将新能源持续多日极端波动导致的保供和消纳难题看作以月度均值为基本决策单元的长期调度框架内在极端均值风险;进一步,考虑新能源发电能力具有显著的季节性,本文选择以新能源月度平均出力为基准,定义新能源极端波动。为避免装机容量变化的影响,以装机容量为基准,对新能源出力样本进行归一化,即后文“出力”无单位,“电量”单位为h。

面向供电充裕性,将“新能源日均出力 P_t^R 相比月均出力 $P^{R,ave}$ 的降幅在 σ^{el} 以上且至少维持 t^{el} 时长”的波动场景定义为持续多日极端低出力波动事件,见式(1)。水电站在满足长期尺度水位运行控制、下泄流量、输电断面等边界条件下,可利用水库蓄能来增发电量,补偿新能源连续功率缺额(见图1)。面向系统消纳调节能力充裕性,将“新能源日均出力 P_t^R 相比月均出力 $P^{R,ave}$ 的增幅在 σ^{eh} 以上且至少维持 t^{eh} 时长”的波动情景定义为持续多日极端高出力波动事件,见式(2)。水电站在满足长期尺度水位运行控制、下泄流量等边界条件下,可利用自身库容蓄水调减发电量,为新能源避让消纳空间(见图1)。

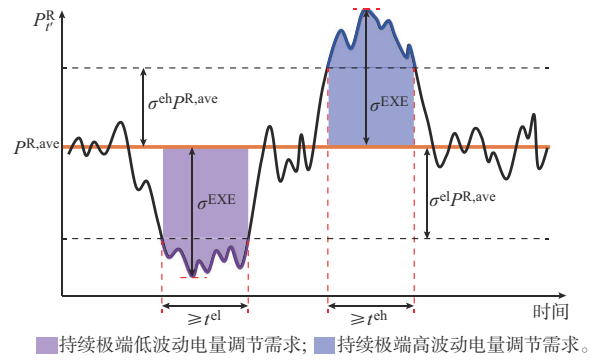
$$S^{ELF} = \{P^{R,ave} - P_t^R \geq \sigma^{el} P^{R,ave}, t' \in [t_0, t_1], t_0 - t_1 + 1 \geq t^{el}\} \quad (1)$$

$$S^{EHF} = \{P_t^R - P^{R,ave} \geq \sigma^{eh} P^{R,ave}, t' \in [t_0, t_1], t_0 - t_1 + 1 \geq t^{eh}\} \quad (2)$$

式中: S^{ELF} 为持续多日极端低出力事件; S^{EHF} 为持续多日极端高出力事件; t' 为日索引; t_0 和 t_1 分别为极



(a) 水库储能调节能力示意图



(b) 新能源持续极端波动示意图

图1 水电防御新能源持续极端波动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydropower defensing against persistent extreme fluctuations of renewable energy

端波动的起、止时间; σ^{el} 、 t^{el} 、 σ^{eh} 、 t^{eh} 为持续极端波动事件的关键特征参数,其中, t^{el} 和 t^{eh} 设置为2d,极端波动阈值 σ^{el} 和 σ^{eh} 通过历史实际数据的极端百分位确定。

如图1所示,将新能源持续极端波动期间的最大波动幅度定义为极端波动深度 σ^{EXE} (式(3)),相对月均出力的偏差电量定义为极端电量调节需求 E^{EXE} (式(4))。前者对应容量需求,后者对应电量需求。

$$\sigma^{EXE} = \max \left\{ \sigma \left| \sigma = \frac{\text{abs}(P^{R,ave} - P_t^R)}{P^{R,ave}}, t' \in [t_0, t_1] \right. \right\} \quad (3)$$

$$E^{EXE} = \sum_{t' \in [t_0, t_1]} \text{abs}(P^{R,ave} - P_t^R) \Delta H \quad (4)$$

式中: $\text{abs}(\cdot)$ 为绝对值函数; ΔH 为时段内小时数,取24h。

1.2 新能源持续极端波动特性分析

基于西南某省全网风电、光伏在2016年1月至2024年3月的日均出力序列,提取新能源持续极端波动样本。附录A图A1为新能源日出力相对月均出力的向上、向下波动比例频次分布图。选取80%分位点作为新能源极端波动阈值,风电和光伏向下

极端波动阈值分别为60.47%和37.59%,向上极端波动阈值分别为65.13%和29.14%。基于此,识别新能源持续多日极端波动事件。需说明的是,由于极端天气影响区域广泛且本文聚焦新能源极端波动对电网电力电量平衡的影响,分析数值对象为全网风电总出力 and 全网光伏总出力。图2为各季节、不同持续天数的新能源极端波动事件发生频次的统计结果。

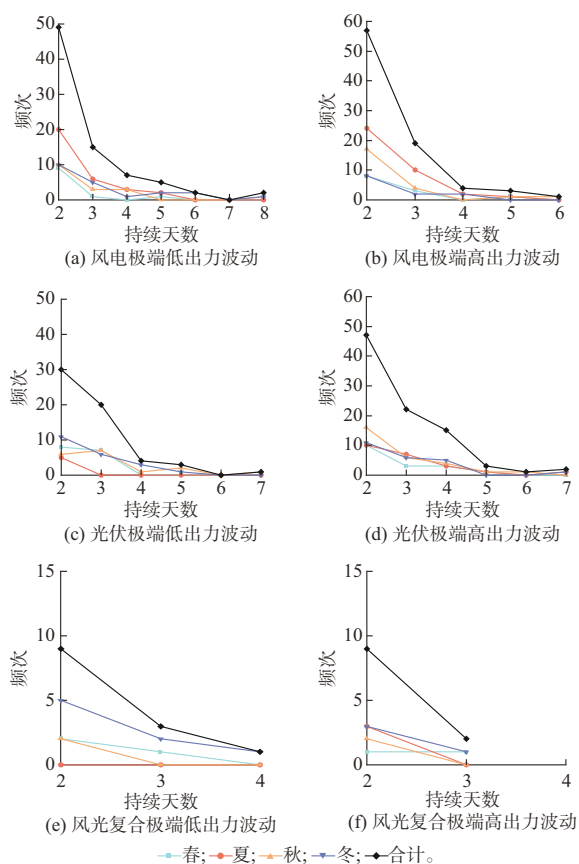


图2 新能源持续极端波动发生频次

Fig. 2 Frequency of persistent extreme fluctuations of renewable energy

1.2.1 新能源极端波动发生频次

图2(a)和(b)为各季节、不同持续天数的风电极端波动事件发生频次。2016年1月至2024年3月,风电持续多日极端低出力波动发生80次(春、夏、秋、冬季分别为11、31、17、21次),风电持续多日极端高出力波动事件发生84次(春、夏、秋、冬季分别为12、37、23、12次),风电极端波动事件年均发生20次左右。夏季6~8月更易发生风电极端波动事件(约占40%),而春季3~5月发生风电极端波动的频次相对较低(约占11%)。风电极端低出力最长持续8 d,共发生2次(秋冬季各1次)。风电极端高出力最长持续6 d,仅在秋季发生1次。在164次风

电极端波动事件中,有151次持续时间在2~4 d,占比达92%。

图2(c)和(d)为各季节、不同持续天数的光伏极端波动事件发生频次。光伏持续多日极端低出力波动发生58次(春、夏、秋、冬季分别为15、5、17、21次),光伏持续多日极端高出力波动发生90次(春、夏、秋、冬季分别为17、22、28、23次),光伏极端波动事件年均发生18次左右。虽然光伏极端波动事件的季节性特征没有风电那么突出,但秋、冬季光伏极端波动次数总体比春、夏季高30次。光伏极端低出力最长持续7 d,仅在秋季发生1次。光伏极端高出力最长持续7 d,共发生2次(夏、冬各1次)。在统计到的148次光伏极端波动事件中,有138次持续时间在2~4 d,占比为93%。

将风光出力同时同向极端波动定义为风光复合同向极端波动事件。如图2(e)和(f)所示,风光复合极端低出力事件共发生13次,其中有8次发生在冬季,最长持续4 d。风光复合极端高出力事件发生11次,冬季发生了4次,高于其他季节,最长持续3 d。历史数据表明,电网在冬季面临更大的持续多日“缺风少光”或“多风多光”的复合极端波动调节压力。将风光出力同时反向极端波动定义为风光复合反向极端波动事件。风光复合反向极端波动事件共发生8次,且均维持2 d,其中有5次发生在夏季。

1.2.2 新能源极端波动电量调节需求和波动深度

风光持续极端波动电量调节需求与波动深度如图3所示。图3(a)表明,风电极端电量调节需求与月均出力存在一定的正相关性,对于持续极端低波动尤为显著,其对应的Pearson、Spearman、Kendall相关性系数分别达到了0.632、0.802、0.621,高于持续极端高波动的0.395、0.558、0.393,表明在大风月,电网易面临更大的风电极端低波动调节需求。2016年1月至2024年3月持续极端低波动电量调节需求平均值为12.909 h,最大值为49.577 h(发生日期为2019年12月4日至2019年12月11日),以当前全网风电装机容量 1.53×10^7 kW进行折算,对应的极端电量调节需求均值和最大值分别为 1.975×10^8 kW·h和 7.585×10^8 kW·h;持续极端高波动电量调节需求均值为12.99 h,最大值为34.215 h(发生日期为2020年11月17日至2020年11月21日),以 1.53×10^7 kW的装机容量进行折算,对应的极端电量调节需求均值和最大值分别为 1.987×10^8 kW·h和 5.235×10^8 kW·h。

图3(b)表明,风电持续极端高波动深度与月均出力有较为明显的负相关性,Pearson、Spearman、

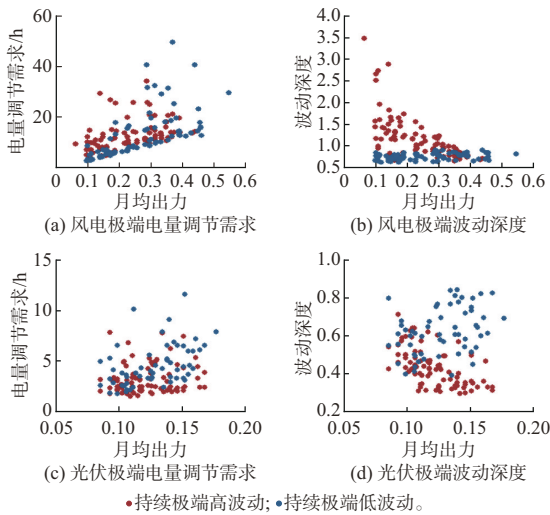


图3 风光持续极端波动电量调节需求与波动深度
Fig.3 Energy regulation demand and fluctuation depth of persistent extreme fluctuations in wind and solar power

Kendall相关性系数分别达到了 -0.647 、 -0.721 、 -0.548 ,但持续极端低波动深度与月均出力无明显相关性。2016年1月至2024年3月持续极端高波动深度的均值和最大值分别为1.216和3.476,持续极端低波动深度的均值和最大值分别为0.767和0.921。

从图3(c)可以看出,光伏极端波动电量调节需求与月均出力的相关性没有风电那么明显,但仍具有一定的正相关性,表明在光伏大发月,电网可能面临更大极端波动调节需求。2016年1月至2024年3月光伏持续极端低波动电量调节需求平均值为4.617 h,最大值为11.639 h(事件日期为2018年2月2日至2018年2月6日),以全网光伏装机容量为 1.959×10^7 kW进行折算,对应的电量调节需求均值和最大值分别为 0.904×10^8 kW·h和 2.280×10^8 kW·h;光伏持续极端高波动电量调节需求均值为3.196 h,最大值为7.870 h(事件日期为2018年10月16日至2018年10月21日),以 1.959×10^7 kW的装机容量进行折算,对应的光伏电量调节需求均值和最大值分别为 0.626×10^8 kW·h和 1.542×10^8 kW·h。

图3(d)显示,光伏持续极端低波动事件的波动深度与月均出力有一定的正相关性,Pearson、Spearman、Kendall相关性系数分别为0.355、0.329、0.225。光伏持续极端高波动事件的波动深度与月均出力呈负相关性,Pearson、Spearman、Kendall相关性系数分别为 -0.512 、 -0.530 、 -0.374 ,表明在光伏大发月,光伏向下极端波动深度变大,在光伏小发月,光伏向上极端波动深度变大。光伏持续极

端低波动深度的均值和最大值分别为0.623和0.841,持续极端高波动深度的均值和最大值分别为0.436和0.713。

1.2.3 极端波动阈值敏感性分析

新能源极端波动事件频次对极端波动阈值(60%~95%)的敏感性如附录A图A2所示。从图中可以看出,极端波动阈值对应的百分位水平越高,从2016年1月至2024年3月历史数据中提取到的新能源极端波动事件频次越少,极端阈值每提升5个百分位水平(5%),风电或光伏极端波动事件频次下降16.6~20.6次,年均2~2.5次;风光复合极端波动事件频次下降7次左右,年均约1次。

2 梯级水电站对新能源持续极端波动防御能力的扰动优化评估模型

2.1 建模思路

水电站运行涵盖水位、库容、出力、流量等多维时序变量,且涉及水位-库容、下游水位-流量、发电函数等非线性转换约束,以及梯级上下游水力联系、水库水量平衡等时空耦合约束,进一步考虑水库防洪、通航、供水、生态等综合利用需求,导致梯级水电站对新能源持续极端波动防御能力难以通过数学推导进行解析量化。为此,在新能源持续极端波动量化表征和特性分析结果的基础上,构建内嵌多源互补运行模拟的梯级水电站极端波动防御能力的扰动优化评估模型。

电网梯级水电站长期调度通常是以来年电网月度负荷需求、火电和新能源月度发电能力、径流为主要依据,以电网清洁能源利用效率最大化为准则,以梯级水电站月末水位为核心决策变量,对水电月度用水量和发电量进行全年优化调配,支撑电网电力电量平衡。长期调度结果将作为中短期调度运行的重要边界。新能源持续多日极端波动导致的电网保供和消纳调节压力,可看作是以月度均值为基本决策单元的长期调度框架内在极端均值风险。为此,对于长期调度结果边界下的中期(月、旬、周)电力电量平衡,风光理想供电状态就是每天以月度均值出力。

基于上述分析,首先构建基准模型,对全网电力电量平衡且新能源理想供电状态下的梯级水电最大期末蓄能值进行优化求解,来获得符合长期综合效益的蓄能控制目标。然后,将求解到的梯级水电期末蓄能作为蓄能控制基准值,输入梯级水电站防御能力的扰动优化评估模型中。考虑新能源极端波动特征约束和期末蓄能偏差控制约束,以新能源极端波动电量调节需求最大化为目标,优化求解当前工

况下(初始蓄能、径流、期末蓄能偏差百分比)梯级水电站对新能源极端波动的防御能力,即不弃电、不缺电条件下梯级水电能够支撑的最大的新能源极端波动电量调节需求。模型原理和框架分别见附录A图A3和图4。

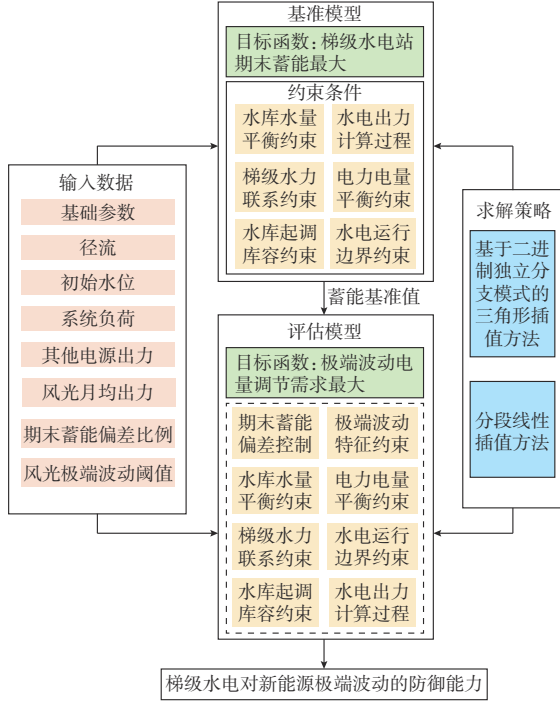


图4 评估模型框架
Fig. 4 Framework of evaluation model

2.2 数学模型

2.2.1 基准模型

1) 目标函数

梯级水电站期末最大化蓄能 E^{RS} 如下:

$$\max E^{RS} = \sum_{h \in H} E_h^{RS} \quad (5)$$

$$E_h^{RS} = \frac{1}{r_h} \left(W_h + \sum_{i \in \Omega_h} W_i \right) \quad (6)$$

式中: H 为梯级水电站索引集合; h 为自上而下第 h 个水电站编号; E_h^{RS} 为水电站 h 的梯级蓄能, 即本级水电站及其上游各水电站可调水量之和在本级电站可产生的电能; Ω_h 为水电站 h 的上游水电站编号集合; W_i 为水电站 i 的可调水量, 即调度期末水位至死水位之间的库容; r_h 为水电站 h 的平均耗水率。

2) 电力电量平衡约束

$$D_t = \sum_{h \in H} p_{h,t}^{HY} + P^{WD,ave} + P^{SR,ave} + P_t^{OT} \quad t \in T \quad (7)$$

式中: t 为时段索引; T 为时段索引集合; D_t 为系统负荷; $p_{h,t}^{HY}$ 为水电站 h 在 t 时段的出力; P_t^{OT} 为电网其他常规电源在 t 时段的出力。基准模型的风电、光伏

出力分别取其理想状态, 即 t 时段对应的风电和光伏月均出力 $P^{WD,ave}$ 和 $P^{SR,ave}$, 由新能源月均出力率和装机容量计算; 负荷和其他电源出力参考同期实际值。

3) 水电站水量平衡约束

$$v_{h,t} = v_{h,t-1} + \Delta S (q_{h,t}^I - q_{h,t}^P - q_{h,t}^S) \quad t \in T, h \in H \quad (8)$$

式中: $v_{h,t}$ 为水电站 h 在 t 时段末的库容; $q_{h,t}^I$ 、 $q_{h,t}^P$ 、 $q_{h,t}^S$ 分别为水电站 h 在 t 时段的入库流量、发电流量、弃水流量; ΔS 为每个时段的秒数。

4) 梯级水力联系约束

$$q_{h,t}^I = Q_{h,t}^N + q_{h-1,t-d_{h-1,h}}^P + q_{h-1,t-d_{h-1,h}}^S \quad t \in T, h \in H \quad (9)$$

式中: $Q_{h,t}^N$ 为水电站 h 在 t 时段的天然入库径流; $d_{h-1,h}$ 为梯级上游水电站 $h-1$ 到水电站 h 的水流滞时。

5) 水电站运行边界约束

$$V_{h,t}^{\min} \leq v_{h,t} \leq V_{h,t}^{\max} \quad h \in H, t \in T \quad (10)$$

$$Q_{h,t}^{P,\min} \leq q_{h,t}^P \leq Q_{h,t}^{P,\max} \quad h \in H, t \in T \quad (11)$$

$$Q_{h,t}^{O,\min} \leq q_{h,t}^P + q_{h,t}^S \leq Q_{h,t}^{O,\max} \quad h \in H, t \in T \quad (12)$$

$$P_{h,t}^{HY,\min} \leq p_{h,t}^{HY} \leq P_{h,t}^{HY,\max} \quad h \in H, t \in T \quad (13)$$

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、下限, 综合考虑防洪、大坝安全、死水位以限制水电站水位在安全合理范围之内; $Q_{h,t}^{P,\max}$ 和 $Q_{h,t}^{P,\min}$ 分别为水电站 h 在 t 时段的发电流量上、下限; $Q_{h,t}^{O,\max}$ 和 $Q_{h,t}^{O,\min}$ 分别为水电站 h 在 t 时段的出库流量上、下限, 综合考虑供水、生态、通航等综合利用需求来设定; $P_{h,t}^{HY,\max}$ 和 $P_{h,t}^{HY,\min}$ 分别为水电站 h 在 t 时段的出力上、下限, 由机组发电能力、检修计划以及最小技术出力确定。

6) 起调库容约束

$$v_{h,0} = V_h^B \quad h \in H \quad (14)$$

式中: V_h^B 为水电站 h 的起调库容。

7) 水电出力计算约束

按照如下流程计算水电站 h 在 t 时段出力 $p_{h,t}^{HY}$ 。

(1) 计算 t 时段水电站平均坝上水位 $z_{h,t}^{U,avg}$

$$z_{h,t}^{U,avg} = f_h^{uz,v}(v_{h,t}^{avg}) \quad h \in H, t \in T \quad (15)$$

$$v_{h,t}^{avg} = \frac{v_{h,t-1} + v_{h,t}}{2} \quad h \in H, t \in T \quad (16)$$

(2) 计算 t 时段水电站坝下平均水位 $z_{h,t}^{D,avg}$

$$z_{h,t}^{D,avg} = f_h^{dz,q}(q_{h,t}^P + q_{h,t}^S) \quad h \in H, t \in T \quad (17)$$

(3) 计算 t 时段水电站水头损失 $h_{h,t}^L$

$$h_{h,t}^L = f_h^{hl,q}(q_{h,t}^P) \quad h \in H, t \in T \quad (18)$$

(4) 计算 t 时段水电站净水头 $h_{h,t}^N$

$$h_{h,t}^N = z_{h,t}^{U,avg} - z_{h,t}^{D,avg} - h_{h,t}^L \quad h \in H, t \in T \quad (19)$$

(5)由水电站发电函数计算出力 $p_{h,t}^{\text{HY}}$

$$p_{h,t}^{\text{HY}} = f_h^p(h_{h,t}^{\text{N}}, q_{h,t}^{\text{P}}) \quad h \in H, t \in T \quad (20)$$

式中: $f_h^{\text{uz},v}(\cdot)$ 为水电站 h 水位-库容关系函数; $f_h^{\text{dz},q}(\cdot)$ 为水电站 h 尾水位-下泄流关系函数; $f_h^{\text{hl},q}(\cdot)$ 为水电站 h 水头损失关系函数; $f_h^p(\cdot)$ 为水电站 h 发电特性函数。

8)断面限制约束

$$L_l^{\min} \leq \sum_{h \in H} \omega_{h,l} p_{h,t}^{\text{HY}} \leq L_l^{\max} \quad t \in T, l \in L \quad (21)$$

式中: L_l^{\max} 和 L_l^{\min} 分别为第 l 条水电传输线路的有功功率上、下限; $\omega_{h,l}$ 为水电站 h 对线路 l 的有功功率转移分布因子; L 为水电站传输线路集合。

2.2.2 梯级水电站对新能源极端波动防御能力的扰动优化评估模型

以2.2.1节模型优化的梯级水电站期末蓄能 $E^{\text{RS,opt}}$ 作为期末蓄能控制基准,构建梯级水电站对新能源极端波动防御能力的扰动优化评估模型。以防御风电极端波动为例进行分析。

1)目标函数

以风电极端电量调节需求最大为优化目标:

$$\max E^{\text{EXE}} = \sum_{t \in T^{\text{EXE}}} |p_t^{\text{WD}} - P^{\text{WD,ave}}| \Delta H \quad (22)$$

式中: p_t^{WD} 为 t 时段风电出力; T^{EXE} 为极端波动时段集合, $T^{\text{EXE}} \subset T$ 。

2)新能源极端波动特征约束

(1)持续极端低波动事件

$$\begin{cases} P^{\text{WD,ave}} - p_t^{\text{WD}} \geq \sigma^{\text{el}} P^{\text{WD,ave}} \\ t \in T^{\text{EXE}} \end{cases} \quad (23)$$

(2)持续极端高波动事件

$$\begin{cases} p_t^{\text{WD}} - P^{\text{WD,ave}} \geq \sigma^{\text{eh}} P^{\text{WD,ave}} \\ t \in T^{\text{EXE}} \end{cases} \quad (24)$$

极端低波动事件发生时,模型引入式(23);极端高波动事件发生时,模型引入式(24); σ^{el} 和 σ^{eh} 分别为极端波动阈值(见1.2节)。

3)电力电量平衡约束

该约束不允许发生弃电和缺电。

$$D_t = \begin{cases} \sum_{h \in H} p_{h,t}^{\text{HY}} + p_t^{\text{WD}} + P^{\text{SR,ave}} + P_t^{\text{OT}} & t \in T^{\text{EXE}} \\ \sum_{h \in H} p_{h,t}^{\text{HY}} + P^{\text{WD,ave}} + P^{\text{SR,ave}} + P_t^{\text{OT}} & t \in T \setminus T^{\text{EXE}} \end{cases} \quad (25)$$

4)期末蓄能偏差控制约束

$$\left| E^{\text{RS,opt}} - \sum_{h \in H} E_h^{\text{RS}} \right| \leq \delta E^{\text{RS,opt}} \quad (26)$$

式中: δ 为允许的梯级水电站蓄能偏差; $E^{\text{RS,opt}}$ 为基

准模型优化求解的蓄能值。

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、起调水位约束、水电出力计算约束、断面限制约束以及数据输入均同基准模型。

上述模型的最优目标函数值即为梯级水电站对风电极端波动的防御能力。利用上述框架亦可分析评估梯级水电站对光伏极端波动、风光复合极端波动的防御能力。

2.2.3 模型求解

式(16)至式(18)为单变量非线性等式约束,式(20)为二变量非线性等式约束,导致模型难以求解。采用文献[23]提出的二进制独立分支模式三角形插值方法对式(20)进行0-1混合整数线性规划(MILP)建模;采用文献[28]提出的分段线性插值方法对式(16)至式(18)约束进行MILP建模,最终将模型转换为标准的MILP优化问题,通过Gurobi求解器求解。详细建模过程见附录B。

3 实例分析

分析某省流域XW、MW、DCS、NZD、JH 5座梯级水电站对某电网风电、光伏持续多日极端波动防御能力,梯级水电总装机容量为 1.482×10^7 kW。其中,XW和NZD为两座具有多年调节能力的流域控制性水电站,装机容量分别为 4.2×10^6 kW和 5.85×10^6 kW,是整个电网保供和消纳调节的压舱石,MW、DCS和JH的装机容量分别为 1.67×10^6 kW、 1.35×10^6 kW和 1.75×10^6 kW。

分析情景设置:1)某电网风电和光伏装机分别取2024年初累计值 1.53×10^7 kW和 1.959×10^7 kW;2)调度周期为7 d,风电、光伏极端波动持续天数设置为2~7 d,极端波动阈值百分位设置为80%,共6种情景;3)梯级水电进行极端波动防御后的期末蓄能与控制基准的偏差 δ 设置为1%,2%,...,15%,共15种情景;4)根据某龙头水电站典型水位过程(附录A图A4),将梯级水电初始蓄能、径流、负荷、风光月均出力率设置为4种运行工况,分别为消落期(3月下旬)、汛前枯期(5月下旬)、蓄水期(8月上旬)和汛后期(11月上旬)。

3.1 风电极端波动防御能力分析

图5(a)至(h)为梯级水电站对风电持续极端波动防御能力的量化结果,即不同期末蓄能控制偏差下,梯级水电对不同持续天数的风电极端波动的防御能力。对于不同持续天数的风电极端低出力波动事件,随着蓄能偏差的增加,梯级水电站防御能力存在上限。这表明此时风电已达到最大程度的极端低

波动(完全不出力)。例如,对于消落期-风电极端低出力情景(如图5(a)所示),当蓄能偏差在8%以上时,2天极端低出力波动防御能力稳定在 3.31×10^8

$\text{kW} \cdot \text{h}$,表明蓄能偏差在8%及以上时,梯级水电站可应对所有程度的2天极端低出力波动。

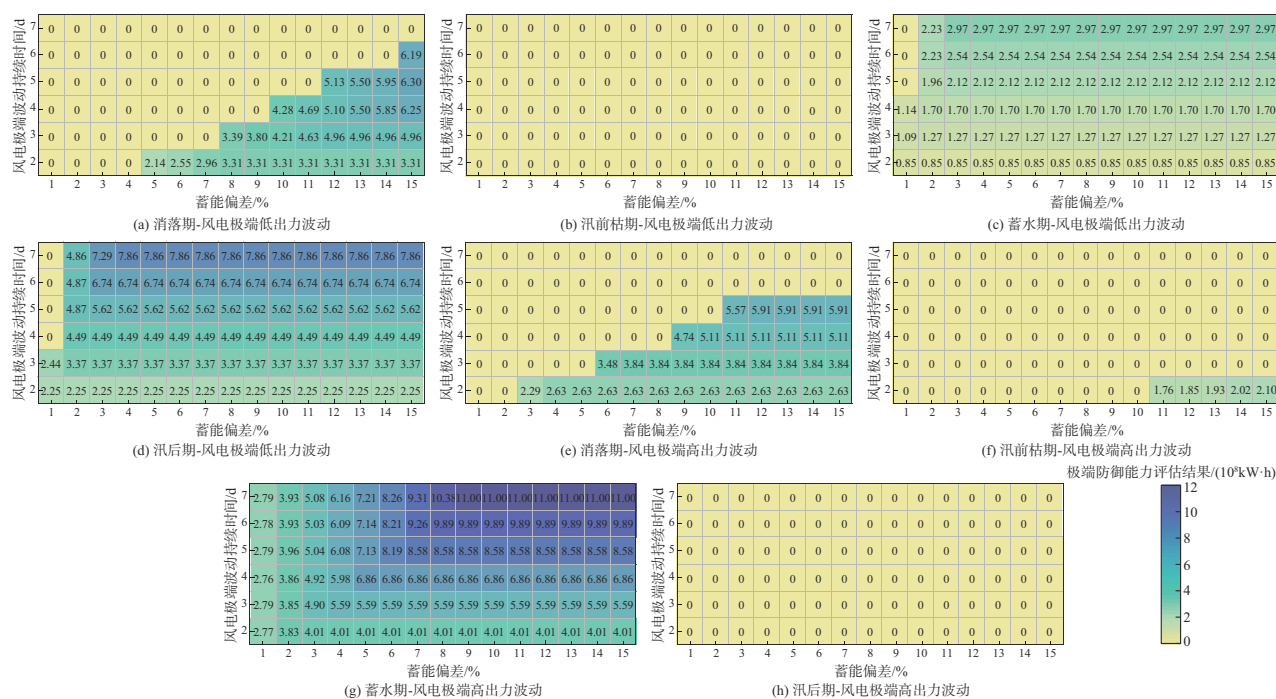


图5 梯级水电站对风电极端波动防御能力评估

Fig. 5 Defense capability assessment of cascade hydropower stations against extreme fluctuations of wind power

对于不同持续天数的风电持续极端高出力波动事件,随着蓄能偏差的增加,梯级水电站防御能力也存在上限,说明此时电网为避免弃电,已将梯级水电出力压到最低。例如,对于消落期-风电极端高出力波动情景(如图5(e)所示),当蓄能偏差在4%以上时,2天极端高出力波动防御能力稳定在 $2.63 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,说明此时水电向下调节能力已耗尽,需借助储能等其他手段消纳多余电能。

在汛前枯期,水电站水位消落至低位,梯级水电的蓄能为全年最低且其发电能力不足,难以补偿风电持续极端低出力波动(如图5(b)所示)。相反,新能源持续极端高出力在一定程度上可认为是有益波动,但图5(f)显示蓄能偏差达到10%以上,梯级水电站仅仅具有对持续2天风电极端高出力波动的防御能力,说明在汛前枯期,梯级水电站可为新能源极端高出力波动避让消纳空间,但会导致较大的蓄能偏差(抬高枯汛交替期的消落水位),间接增加了汛期的弃水风险。这种情况下,如何平衡当前阶段的新能源弃电风险和汛期的弃水风险将是新的问题。

在汛后期(如图5(h)所示),水电站水位蓄至高位(蓄水空间受限),梯级水电站难以为风电持续极

端高出力波动避让消纳空间,但此时梯级水电站有充裕的蓄能可以防御新能源持续极端低出力波动,允许蓄能偏差在4%以上,即可防御2~7d的所有程度的风电极端低出力波动事件(如图5(d)所示)。

在消落期和蓄水期(图5(a)、(e)、(c)、(g)),梯级水电此时“既有水可用,也有库容可蓄”,具备同时防御风电持续极端低出力波动和极端高出力波动的能力,且蓄水期防御能力更强,主要原因是:1)蓄水期风电整体发电能力较弱,调节需求相对较低;2)选择的蓄水期典型工况期末蓄能更大(附录A图A3),同样的蓄能偏差比例下,可动用的调节蓄能空间更大;3)所选择的蓄水期工况发电水头更高,同样的蓄能偏差下,梯级水电调节电量更大。

3.2 光伏极端波动防御能力分析

图6为梯级水电站对光伏持续极端波动防御能力的量化结果。在当前光伏装机水平($1.96 \times 10^7 \text{ kW}$)下,梯级水电站在消落期、蓄水期、汛后期具备应对2~7d光伏极端低出力波动和极端高出力波动的能力。在汛前枯期,梯级水电站具有对光伏2~7d极端高出力波动的防御能力(如图6(f)所示),但由于水电站蓄能处于全年低位,梯级水电站防御2~4d的光伏极端低出力波动需要期末蓄能偏

差在8%以上(如图6(b)所示)。可见,相比风电,梯级水电站对光伏持续极端波动的防御能力更强,主要原因是光伏日均发电能力小于风电,在同样的极

端百分位水平下,光伏极端波动阈值远低于风电(附录A图A1),对应的极端波动电量调节需求也较小。

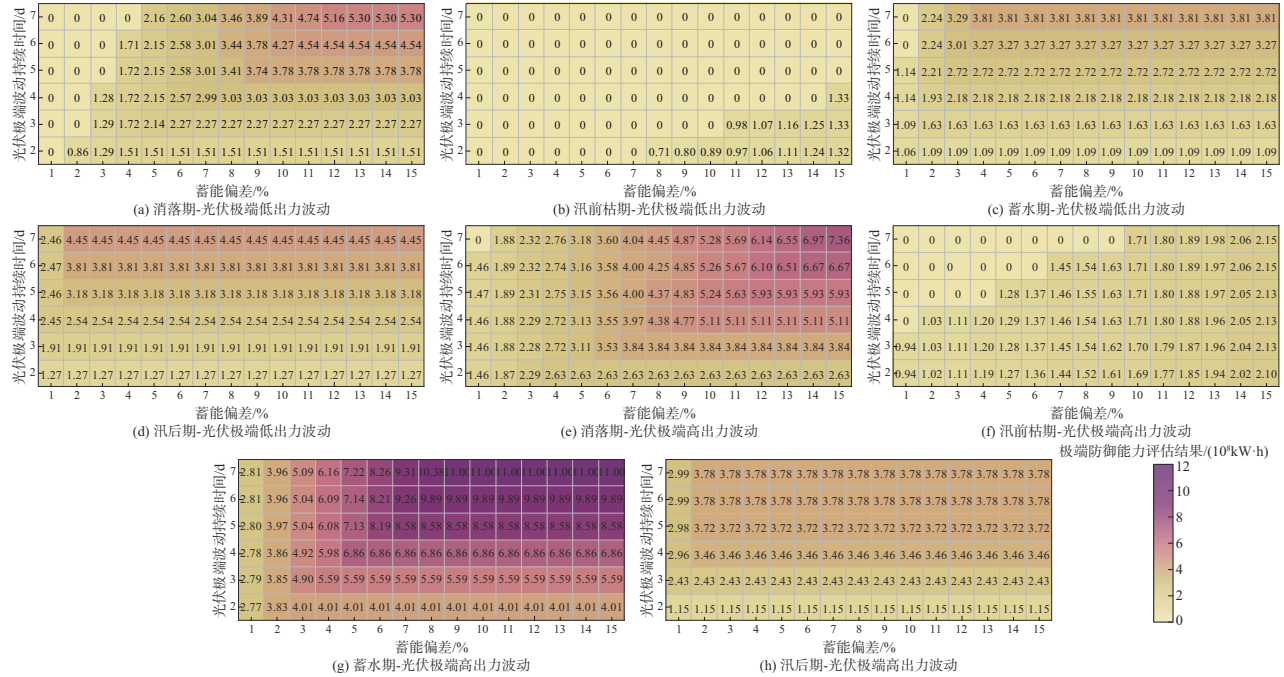


图6 梯级水电站对光伏极端波动防御能力评估

Fig. 6 Defense capability assessment of cascade hydropower stations against extreme fluctuations of photovoltaic power

3.3 风光复合极端波动防御能力分析

图7为梯级水电站对风光复合极端波动防御能力的量化结果。在汛前枯期工况下,梯级水电站丧失了对风光复合极端低出力波动和极端高出力波动事件的防御能力(如图7(b)和(f)所示),尤其是极端高出力波动防御能力的丧失表明,随着新能源渗透率的持续快速增加,汛前枯期可能发生由传统缺电风险向缺电弃电风险并存的转变,需要依靠储能、跨省跨区外送等调节手段来转移或吸纳新能源的盈余电量。在汛后期(如图7(h)所示),水电站水位蓄至高位后(蓄水空间受限),梯级水电站无法为风光复合极端高出力波动避让消纳空间。在水电发电能力较强、新能源发电能力较低的蓄水期,梯级水电仍具有对风光复合极端波动的防御能力。

相比应对风光单一极端波动,梯级水电对风光复合极端波动的整体防御水平有所降低,但1.2.1节极端波动特性分析结果显示,风光发生复合同向极端波动的可能性较小,2016年1月至2024年4月共发生13次,远低于风电的164次和光伏的148次,并且风光复合极端低出力波动更容易发生在水电防御能力较强的冬季(如图7(d)所示),这在一定程度上缓解了极端保供压力。

3.4 新能源装机容量敏感性分析

为分析梯级水电极端波动防御能力对新能源装机容量的敏感性,假设风电、光伏装机容量从目前的 1.53×10^7 kW、 1.959×10^7 kW均以 5×10^6 kW为步长增加到 10^8 kW以上,得到324个风光装机组合场景。针对每个风光装机场景,将消落期、汛前枯期、蓄水期、蓄满期4种运行工况的极端波动防御能力之和作为统计指标,结果如图8所示。其中,新能源极端波动持续天数设置为4 d,梯级水电期末蓄能相比控制基准偏差设置为10%。

从图8(a)、(c)、(e)可以看出,当风电和光伏装机总容量超过 9.5×10^7 kW时,梯级水电站丧失了对新能源持续极端低波动的防御能力,即难以在不发生弃电、缺电的条件下,仅通过梯级水电站调节,保障电网电力电量平衡。梯级水电站对风电极端低波动防御能力峰值为 2.37×10^9 kW·h,相应的风光装机容量为 2.03×10^7 kW和 2.959×10^7 kW;对光伏极端低波动防御能力峰值为 2.23×10^9 kW·h,相应的风光装机容量分别为 1.53×10^7 kW和 3.959×10^7 kW;对风光复合极端低波动防御能力峰值为 3.24×10^9 kW,相应的风光装机容量分别为 2.03×10^7 kW和 2.959×10^7 kW。随着新能源装机容量的

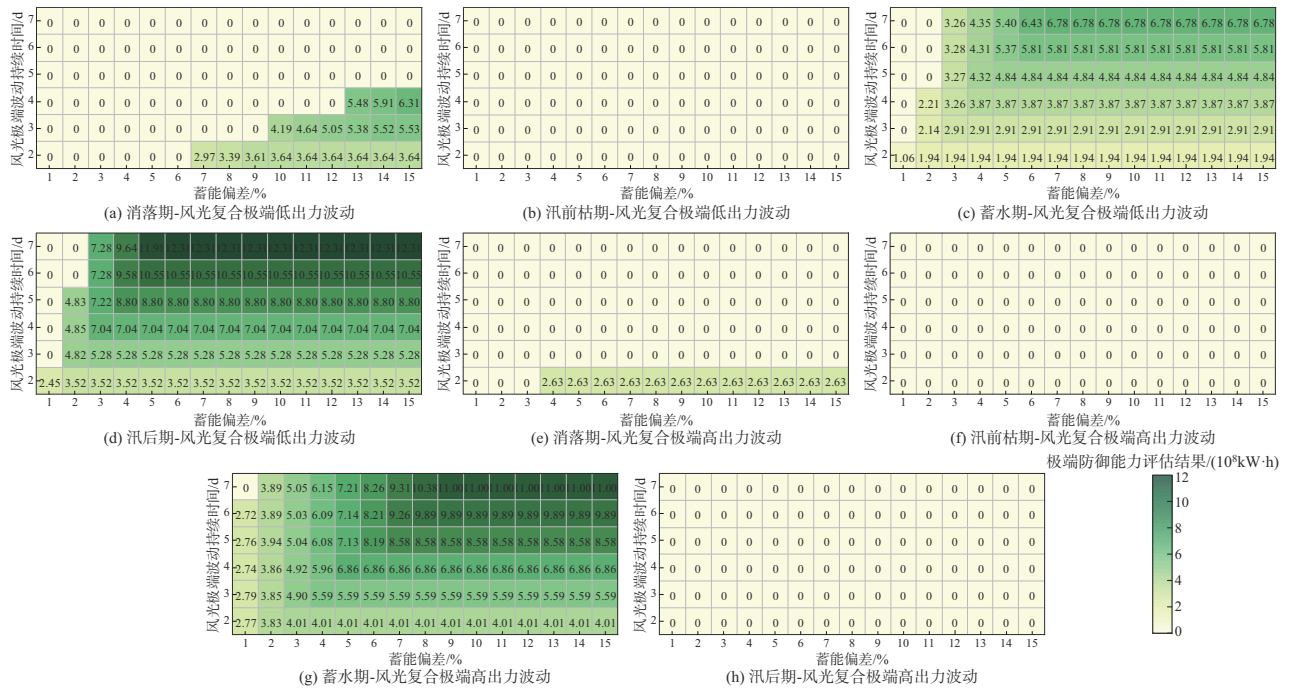


图 7 梯级水电站对风光复合同向极端波动防御能力评估
 Fig. 7 Defense capability assessment of cascade hydropower against wind power-photovoltaic compound extreme fluctuations

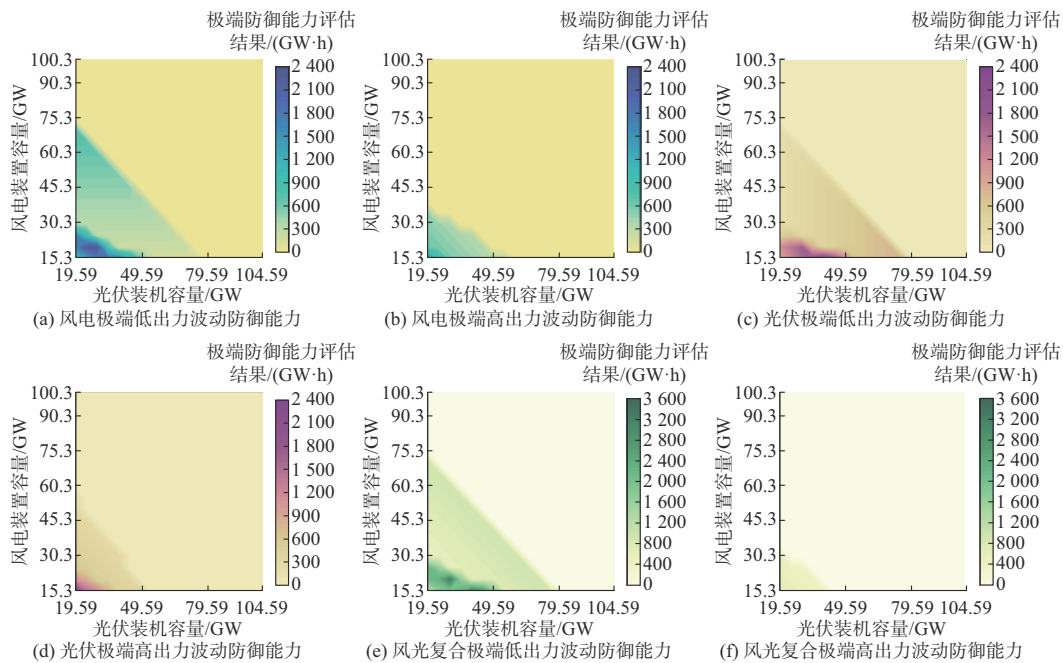


图 8 不同风光装机水平下梯级水电站极端波动防御能力
 Fig. 8 Defense capability of cascade hydropower stations against extreme fluctuations with different wind power-photovoltaic installed levels

增加,梯级水电站对新能源持续极端低波动的防御能力呈现先增加后减小的趋势,主要原因是新能源装机容量较小时,梯级水电站能够补偿新能源完全不出力的极端低波动情景,而当新能源装机容量超过一定水平时,梯级水电站开始依次丧失在汛前枯

期、消落期、汛后期、蓄水期的极端波动防御能力。

从图 8(b)、(d)、(f)可以看出,随着新能源装机容量的增加,梯级水电站极端高出力波动防御能力逐渐降低。相比新能源极端低出力波动,梯级水电站更早丧失了对新能源极端高出力波动的防御能

力,这主要是因为新能源装机容量的增加已经压缩了水电出力空间,向上的极端波动将进一步要求梯级水电站出力下调,最终导致对新能源极端高出力波动防御能力的快速降低。随着新能源装机容量的增加,电网电量供应能力增加,但将面临更大的消纳调节压力。

3.5 线性化结果精度分析

基于消落期-风电极端低出力波动(情景1)、汛前枯期-光伏极端高出力波动(情景2)、蓄水期-风光复合极端高出力波动(情景3)、汛后期-风电极端低出力波动(情景4)4种情景的计算结果,对本文所采用的水电站出力计算线性化建模方法进行精度分析。以平均绝对值准确率 α_{MAPA} 作为评价指标, α_{MAPA} 计算公式见式(27)。分析结果见附录B表B1,4种情景下水电站出力线性化近似结果的 α_{MAPA} 平均值为95.6%,且各个评估模型求解时间低于10 s,可以认为满足应用要求。

$$\alpha_{\text{MAPA}} = \left(1 - \frac{1}{N} \frac{|p_n^{\text{HY}} - p_n^{\text{HY},\tau}|}{p_n^{\text{HY},\tau}} \right) \times 100\% \quad (27)$$

式中: p_n^{HY} 为模型优化计算得到水电站出力; n 为水电站出力样本编号; $p_n^{\text{HY},\tau}$ 为水电站理论出力,以模型优化计算得到的水电站发电流量、库容等结果作为输入,通过文中式(15)至式(20)计算得到; N 为水电站非0出力个数。

4 结语

某省年均发生风电极端波动事件约20次,光伏极端波动事件约18次,风光发生复合极端波动的可能性较小。风电极端波动集中在夏季,光伏极端波动主要发生在秋冬季。超过90%的新能源极端波动事件持续天数为2~4 d。

在消落期和蓄水期,水电站水位适中,即有水可用,也有库容可蓄,梯级水电具有较强的极端波动防御能力。在汛前枯期,梯级水电站丧失对新能源极端低出力波动的支撑能力,而为新能源极端高出力波动避让消纳空间会导致枯汛交替期水电站水位大幅抬升,增加汛期弃水风险。在汛后期(蓄满期),梯级水电站有充裕的蓄能来补偿新能源极端低出力波动,但由于水电站蓄水空间受限,难以应对风电或风光复合极端高出力波动。

随着新能源装机容量的增加,梯级水电站会更早丧失对新能源极端高出力波动的防御能力,系统面临更大的消纳调节压力。

未来,将进一步探究极端天气下新能源波动与多元用电需求的耦合关系,以及防御新能源极端波动的梯级水电站前瞻调度方法。

本文研究受到中国长江电力股份有限公司科研项目(2422020008)支持,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 中国电力企业联合会. 2023—2024年度全国电力供需形势分析预测报告[EB/OL]. (2024-01-30) [2024-05-21]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-330280>.
China Electricity Council. Analysis and forecast of national electricity supply and demand situation in 2023—2024[EB/OL]. (2024-01-30) [2024-05-21]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-330280>.
- [2] 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.
- [3] LIU L B, HE G, WU M X, et al. Climate change impacts on planned supply-demand match in global wind and solar energy systems[J]. Nature Energy, 2023, 8: 870-880.
- [4] 吴文传,许书伟,杨越,等. 风险量化的高比例新能源电力系统概率调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 3-11.
WU Wenchuan, XU Shuwei, YANG Yue, et al. Risk-quantified probabilistic dispatch for power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 3-11.
- [5] SUNDAR S, CRAIG M T, PAYNE A E, et al. Meteorological drivers of resource adequacy failures in current and high renewable Western U. S. power systems [J]. Nature Communications, 2023, 14: 6379.
- [6] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-169.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169.
- [7] 陈海生,俞振华,刘为,等. 储能产业研究白皮书2024[R]. 北京: 中国能源研究会储能专委会, 2024.
CHEN Haisheng, YU Zhenhua, LIU Wei, et al. Energy storage industry research whitepaper 2024 [R]. Beijing: China Energy Storage Alliance, 2024.
- [8] ALBERTUS P, MANSER J S, LITZELMAN S. Long-duration electricity storage applications, economics, and

- technologies[J]. *Joule*, 2020, 4(1): 21-32.
- [9] JENKINS J D, SEPULVEDA N A. Long-duration energy storage: a blueprint for research and innovation[J]. *Joule*, 2021, 5(9): 2241-2246.
- [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 Chuntian. Function remolding of hydropower systems for carbon neutral and its key problems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(16): 29-36.
- [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): 3862-3885.
ZHANG Juntao, CHENG Chuntian, YU Shen, et al. Progress, challenges and prospects of research on hydropower supporting the flexibility of new power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3862-3885.
- [12] ZHANG Y S, LIAN J J, MA C, et al. Optimal sizing of the grid-connected hybrid system integrating hydropower, photovoltaic, and wind considering cascade reservoir connection and photovoltaic-wind complementarity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 123100.
- [13] 朱燕梅,黄炜斌,陈仕军,等. 水光互补日内优化运行策略[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(3): 142-149.
ZHU Yanmei, HUANG Weibin, CHEN Shijun, et al. Intra-day optimal operation strategy of hydro-PV hybrid system [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 142-149.
- [14] 赖春羊,马光文,谢航,等. 基于综合效益指标体系的风水互补系统经济调度[J]. *电网技术*, 2021, 45(11): 4319-4328.
LAI Chunyang, MA Guangwen, XIE Hang, et al. Economic dispatching of wind and hydropower complementary system based on comprehensive benefit index system [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4319-4328.
- [15] ZHANG J T, CHENG C T, YU S, et al. Chance-constrained co-optimization for day-ahead generation and reserve scheduling of cascade hydropower-variable renewable energy hybrid systems [J]. *Applied Energy*, 2022, 324: 119732.
- [16] DING Z Y, WEN X, TAN Q F, et al. A forecast-driven decision-making model for long-term operation of a hydro-wind-photovoltaic hybrid system [J]. *Applied Energy*, 2021, 291: 116820.
- [17] MING B, LIU P, GUO S L, et al. Robust hydroelectric unit commitment considering integration of large-scale photovoltaic power: a case study in China [J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1341-1352.
- [18] GONG Y, LIU P, MING B, et al. Deriving pack rules for hydro-photovoltaic hybrid power systems considering diminishing marginal benefit of energy [J]. *Applied Energy*, 2021, 304: 117858.
- [19] JIA R, HE M J, ZHANG X Y, et al. Optimal operation of cascade hydro-wind-photovoltaic complementary generation system with vibration avoidance strategy [J]. *Applied Energy*, 2022, 324: 119735.
- [20] HAN S, HE M J, ZHAO Z W, et al. Overcoming the uncertainty and volatility of wind power: day-ahead scheduling of hydro-wind hybrid power generation system by coordinating power regulation and frequency response flexibility [J]. *Applied Energy*, 2023, 333: 120555.
- [21] LI X D, YANG W J, LIAO Y W, et al. Short-term risk-management for hydro-wind-solar hybrid energy system considering hydropower part-load operating characteristics [J]. *Applied Energy*, 2024, 360: 122818.
- [22] 张俊涛,程春田,申建建,等. 考虑风光不确定性的高比例可再生能源电网短期联合优化调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(18): 5921-5932.
ZHANG Juntao, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Short-term joint optimal operation method for high proportion renewable energy grid considering wind-solar uncertainty [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(18): 5921-5932.
- [23] 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.
- [24] TIAN Y Y, CHANG J X, WANG Y M, et al. A method of short-term risk and economic dispatch of the hydro-thermal-wind-PV hybrid system considering spinning reserve requirements [J]. *Applied Energy*, 2022, 328: 120161.
- [25] GE X L, JIN Y, FU Y, et al. Multiple-cut benders decomposition for wind-hydro-thermal optimal scheduling with quantifying various types of reserves [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1358-1369.
- [26] STERL S, VANDERKELEN I, CHAWANDA C J, et al. Smart renewable electricity portfolios in West Africa [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 710-719.
- [27] AUBIN V, BLAIS M, ANJOS M F. How Québec can support the energy transition of northeastern North America [J]. *The Electricity Journal*, 2021, 34(6): 106972.
- [28] ZHANG Yi, CHENG Chuntian, CAO Rui, 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.

张俊涛(1993—),男,通信作者,博士,助理研究员,主要研究方向:风光水蓄储多能互补规划与运行、水电系统调度。E-mail: zjt2019@foxmail.com

程春田(1965—),男,博士,博士生导师,长江学者特聘教授,国家杰出青年基金获得者,主要研究方向:水电系统调度、清洁能源电力市场、水风光储多电源互补调度、云计算和大数据。E-mail: ctcheng@dlut.edu.cn

曹辉(1983—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:水库调度、洪水预报、流域性水风光多能互补。E-mail: cao_hui@ctg.com.cn

(编辑 孔丽蓓)

Analytical Method for Defense Capability of Large-scale Cascade Hydropower Stations Against Extreme Fluctuations of Renewable Energy in Power Grid

ZHANG Juntao¹, CHENG Chuntian¹, CAO Hui², CAI Huaxiang³

(1. Institute of Hydropower and Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Three Gorges Cascade Dispatch and Communication Center, Yichang 443002, China;

3. Kunming Power Exchange Center Co., Ltd., Kunming 650011, China)

Abstract: Due to the differences in operation conditions during dry and wet seasons, complex relations between water power and electric power, and comprehensive utilization demands such as flood control, ecology, navigation and so on, it is difficult to solve how to evaluate the defense capability of 10 GW-level large-scale cascade hydropower stations against long-period extreme fluctuations of renewable energy. First, the analytical characterization method of extreme fluctuations of renewable energy is proposed, and the extreme fluctuation events are mined from the historical data so that the characteristics of wind power-photovoltaic extreme fluctuations can be revealed. On this basis, a perturbation optimization evaluation model of defense capability of cascade hydropower plants against extreme fluctuations of renewable energy is established. The 0-1 mixed-integer linearization modeling technique is adopted to efficiently solve the mathematical model. Taking a river basin cascade hydropower stations station of a Southwest provincial power grid in China as an application case, the defense capability of cascade hydropower stations against extreme fluctuations of renewable energy and its sensitivity to the renewable energy installed capacity are analyzed, and the results can provide guidance for electric power and energy balance scheduling under extreme weather in power grid.

This work is supported by China National Postdoctoral Program for Innovative Talents (No. BX20230055) and National Natural Science Foundation of China (No. 52239001).

Key words: cascade hydropower station; renewable energy; extreme fluctuation; defense capability; electric power and energy balance

