

考虑送出限制的水-风-储系统优化调控研究

庞秀岚^{1,2}, 杜睿³, 马超¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 青海黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810008;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 随着我国西北地区风电的规模化开发,探索西北地区的水-风-储多能互补送出模式有利提高电力系统的灵活性、缓解并网消纳问题。通过构建兼顾电力送出通道利用率和互补系统收益的多目标模型,提出互补系统的容量配置及分时电价下的运行策略,并将该方法应用于黄河上游的多能互补基地。经过对两种大型互补系统的容量配置与调控策略进行对比分析,验证了互补系统对于提高电力送出通道利用率、消纳弃风及改善运行收益的重要作用。模拟结果表明,风电不确定性程度、分时电价和电力送出通道容量对系统互补效果影响较大。该方法可为未来新能源与水电互补系统的规划和运行提供技术支持和参考。

关键词: 水-风-储互补; 分时电价; 电力送出通道; 优化调控; 弃风率

中图分类号: TM61

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)04-0127-09

Optimal control of water – wind – storage system considering limitation of transmission

PANG Xiulan^{1,2}, DU Rui³, MA Chao¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810008, China; 3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: With the rapid expansion of the development and utilization of wind power, the volatility of power and limited power delivery problems have brought new challenges to the consumption and utilization of wind power. In view of the water – wind – storage complementary delivery mode in northwest China, a multi-objective model is built considering both the utilization rate of power transmission channel and the revenue of complementary system, based on which the energy storage operation strategy under the time-of-use price is proposed. Then, this method is applied to a multi-energy complementary base in the upper reaches of the Yellow River. By comparing and analyzing the control strategies of the two large complementary systems, it is proved that the complementary system play an important role in improving the utilization rate of the power delivery channel, absorbing the wind curtailment and improving the operating income. Finally, results show that the uncertainty degree of wind power, the time-of-use price and power transmission channel capacity have great influence on the system complementary effect. This method can provide technical support and reference for the planning and operation of the new energy and hydropower complementary system in the future.

Key words: water – wind – storage complementary mode; time-of-use price; power transmission channel; optimal control; wind curtailment rate

收稿日期:2022-11-07; 修回日期:2023-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51722906); 大庆市新能源领域“揭榜挂帅”科技攻关项目(HGS-KJ/KJGLB-[2021]第31号)

作者简介:庞秀岚(1966—),女,甘肃定西人,硕士,教授级高级工程师,研究方向为可再生能源互补。

通讯作者:杜睿(1996—),男,山东枣庄人,硕士,研究方向为可再生能源互补。

1 研究背景

规模化开发风电是支撑中国能源结构深度调整和促进 2030 年“碳达峰”及 2060 年“碳中和”发展目标的重要方式之一。国家能源局 2021 年发布信息表明:我国风电装机容量已经快速增长至 281.5 GW^[1]。中国西北地区风能资源丰富且得到了规模化开发,富裕的电能多采用外送方式消纳^[2]。然而在传统能源为主的电力结构下,其调节灵活性限制了风电并网容量的快速增长^[3]。水电技术成熟,其出力可迅速调节^[4],且与风电出力表现出强季节性互补特征^[5]。在现有电力送出通道容量制约下,利用水电站和大型储能电站提高电网调节灵活性成为发展趋势^[6-8],并且对大规模风电的并网消纳有着良好的支撑作用^[9-11]。

随着对大型水-风-储多能互补系统的关注日益增加,一些文献探讨了其技术及经济可行性。该系统优化调控的核心目标可以分为 3 类:经济收益^[12]、电能质量提升^[13]以及多目标优化^[14]。沈筱等^[15]针对雅砻江下游梯级水电站接入光伏电站、风电场后的系统运行调控进行了确定性优化模拟,但未考虑电力系统中的弃风惩罚和分时电价的影响。Castronuovo 等^[12]为水电提供了提前策略和运营策略,增加了与风电场互补运行后的收益。杨和稳等^[16]对风-光-抽水蓄能电站的互补调控进行了研究,表明系统互补调节下新能源的利用率和系统净收益得到了提高,但模型未考虑电力送出通道的容量限制对调控的影响。滕云等^[17]提出了基于协同理论的储能控制策略,对多能互补系统提升电网调节能力及经济性进行了研究。Liu 等^[18]采用数值模拟的方法利用水电站的灵活调节能力有效地削峰,并通过与新能源的互补调控实现了能源效率的提高。在大型多能互补系统中,多目标优化更加受到重视,Wang 等^[14]构建了一种水-风-光互补系统协调运行模型以平衡电量和出力波动,同时对于独立运行、单/双目标协调运行的结果进行了比较。杨三根^[19]提出了一个考虑能源、成本和环保的多目标水-风互补调控系统,提升了并网电能质量,减弱了温室气体的排放,但仅在固定径流条件下进行了运行调控分析。张倩文等^[20]提出最小化出力波动和运行成本的调控方式,在风、光、水、储互补系统验证了其对于新能源利用率的提高及并网波动影响的降低,但缺少水库调蓄性能对系统优化调控的影响分析。韩芳冰^[21]针对中长期互补运行下的水风互补

优化问题,基于统计特性提出了考虑风电出力水平的运行模型,降低了运行成本并优化了环保效果。

在解决预测风电不确定性对调控产生的作用时,可根据出力不确定性的表示方式提出 3 类划分方法:利用概率统计将历史风电实际出力或误差表示为概率分布;基于典型情景将历史出力数据提取出不同类别的出力过程;考虑风险指数评价模型误差并分析不确定性风险。在常见的优化方式中,随机规划模型^[22]、间隔优化^[23]均表现出较好的结果。丁明等^[24]、马瑞等^[25]假定风速样本数据服从威布尔分布,进而可以基于风电出力特性统计得到出力的概率分布。Su 等^[26]提出了一种新颖实用的综合传输模式,但是策略缺乏优化通用性和鲁棒性。罗彬^[27]采用模糊聚类算法将历史出力样本分成多个出力情景,推导出不同情景的概率分布并采用非参数核密度估计预测出力的误差分布。郑依心^[28]基于风电运行数据库研究了风电场群效应,提取了基于 EM(expectation maximization)方法的典型情景。

随着互补调控要求的不断提高,需要根据电力送出实际情况构建合适消纳运行方案的多目标优化调控模型。考虑电力送出通道容量限制及水库、储能特性,本文通过建立水-风-储多目标优化调控模型,提出分时电价下储能运行控制策略,将该方法应用于青海省的多能互补基地,得到了两种大型多能互补系统的优化调控策略,探究了互补调控效果与水库调蓄能力、电力送出通道容量、径流条件的紧密关系。仿真结果验证了互补系统对于提高电力送出通道利用率、消纳弃风及改善运行收益具有重要作用。

2 水-风-储互补系统优化调控方法

2.1 模型构建

在分时电价条件下,建立水-风-储互补系统的多目标优化模型需考虑发电收益与弃风惩罚,同时系统需承担提高电力送出通道利用率的责任,并受到水电、储能运行约束。

2.1.1 多目标函数 目标函数 F_1 为最大化电力送出通道的利用率,通过下式计算:

$$F_1 = \max \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} \frac{\min(C_{line}, P_{net})}{365 \cdot 24 \cdot C_{line}} \quad (1)$$

$$P_{net} = P_{wind} + P_{hydro} + P_{sto} \quad (2)$$

式中: C_{line} 为电力送出通道的容量,设定其等于互补水电站装机容量, MW; P_{wind} 、 P_{hydro} 、 P_{sto} 和 P_{net} 分别为风电出力、水电出力、储能出力和互补系统出力总和, MW。

目标函数 F_2 为最大化水-风-储互补系统售电收益与弃风惩罚之差。通过下式计算:

$$F_2 = \max(F_y - F_p) \quad (3)$$

$$F_y = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (10^3 q_t \cdot P_{act} \cdot \Delta t) \quad (4)$$

$$F_p = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (q_t \cdot \Phi_w \cdot \max(P_{net} - C_{line}, 0)) \quad (5)$$

$$q_t = \begin{cases} q_{val} & (1 \leq t \leq 7 \cup 22 \leq t \leq 24) \\ q_{peak} & (8 \leq t \leq 12 \cup 19 \leq t \leq 21) \\ q_{av} & (13 \leq t \leq 18) \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_y 为水风储系统的售电收益,元; q_t 为分时电价机制下 t 时刻电价^[26],元/(kW·h); P_{act} 为水风储互补系统实际并网出力,MW; Δt 为时间间隔,h; F_p 为弃风惩罚成本,元; Φ_w 为弃风惩罚成本系数。

2.1.2 约束条件 水-风-储互补系统优化模型的约束条件包括系统并网出力、水库运行、储能运行三部分约束,具体包括:互补系统的送出通道约束以及出力波动约束;水库运行的水位、泄水流量以及出力约束;储能运行的充放电功率以及荷电状态约束,数学表达如式(7)~(11)及(13)~(15)。水库蓄水量以及储能荷电状态分别通过式(12)和(16)进行迭代计算。

$$0 < P_{act} \leq C_{line} \quad (7)$$

$$|P_{act}^{t+\Delta t} - P_{act}^t| \leq \Delta P \quad (8)$$

$$Z_{min} \leq Z_t \leq Z_{max} \quad (9)$$

$$Q_{min} \leq Q_t \leq Q_{max} \quad (10)$$

$$P_{min}^{hydro} \leq P_t^{hydro} \leq P_{max}^{hydro} \quad (11)$$

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_t) \Delta t \times 60 \quad (12)$$

$$P_{c,min}^{sto} < P_{c,t}^{sto} < P_{c,max}^{sto} \quad (13)$$

$$P_{d,min}^{sto} < P_{d,t}^{sto} < P_{d,max}^{sto} \quad (14)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (15)$$

$$SOC_t = \begin{cases} SOC_{t-1} + \eta_c P_{c,t}^{sto} \Delta t / S_{wh} \\ SOC_{t-1} - P_{d,t}^{sto} \Delta t / (S_{wh} \eta_d) \end{cases} \quad (16)$$

式中: max、min 分别表示变量的上、下限; ΔP 为运行规范中互补系统允许的单位时间最大出力变化,MW; Z_t 为 t 时段末水库的水位,m; V_t 为 t 时段末水库的库容,m³; I_t 、 Q_t 分别为 t 时段的水库来流量、泄流量,m³/h; $P_{c,t}^{sto}$ 和 $P_{d,t}^{sto}$ 分别为 t 时段储能充、放电功率,MW; S_{wh} 为储能的额定容量,MW·h; SOC 为储能的荷电状态; η_c 和 η_d 分别为储能的充、放电效率。

2.1.3 决策变量 相对于风电自身不可调节的特性,水库、储能具有出力灵活性。因此,决策变量设置为日内各小时水电出力 P_t^{hydro} 及储能出力 P_t^{sto} ($t = 1,$

$2, \dots, 24$), kW。

2.2 储能运行控制策略

在实际分时电价模式下,具有适用性的储能优化控制策略可被用于提高系统稳定性和经济性。在运行策略的情景分析中,发生超过送出线路额定容量的弃风情况时,储能系统将存储弃风直到达到最大储能荷电状态,之后发生的弃风将被弃掉;当风电与水电的出力之和低于电力送出通道的额定容量时,在送电收益最大的时段将对储能进行放电以增加互补系统净收益。具体控制策略流程如图 1 所示。

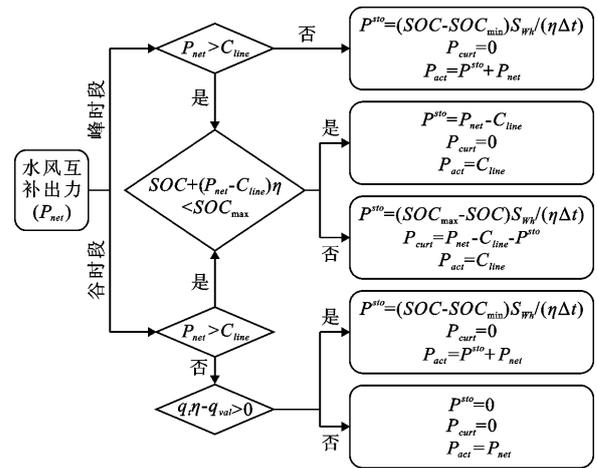


图 1 储能运行控制策略流程

2.3 模型求解

构建水-风-储互补系统时,由于电力送出通道存在容量约束,配置的风电容量过大会加剧弃风的风险。针对以上问题,从简化求解和优化效率的角度出发,本文提出模型两阶段优化求解策略。

第 1 阶段优化为确定互补系统的风电及储能配置。将已有的风电出力过程与随机生成的不同流量下水电出力过程进行互补,计算得到互补出力超出线路容量发生弃风的概率。综合考虑来流历时保证率 α 和弃风率 β 的变化以确定风电容量配置。其中,来流条件的历时保证率 α 依据水电站上游水文站实测日径流量的历时曲线确定,如图 2 所示。

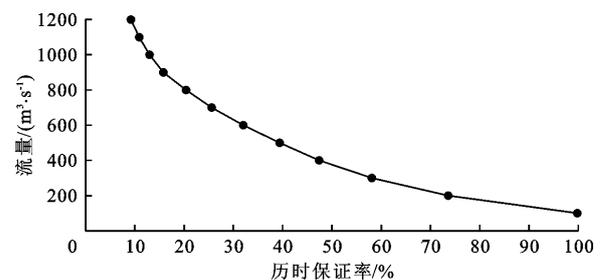


图 2 水电站上游水文站日径流量-历时保证率曲线

弃风率 β 为互补系统的弃风量占风力发电总量的百分比,计算方式如下:

$$\beta = \sum_{t=1}^T \frac{\max(P_{wind} + P_{hydro} - C_{line}, 0)}{P_{wind} \cdot T} \times 100\% \quad (17)$$

在合理的来流保证率 α 下,随着风电容量配置增至一定程度后弃风率 β 将加速增长,结合此拐点确定风电容量配置。此外,根据一些省份对按可再生能源的额定装机容量的比例进行储能配置的要求,设定储能的额定容量配置为风电装机容量的20%、标准充放电倍率为0.5C。

第2阶段,优化从第1阶段获得的给定风电、储能容量配置的互补调控方案,采用基于帕累托的多目标遗传算法对模型进行求解,例如图3所示,得到多目标优化的帕累托前沿并高效实现优化过程,对比水-风互补和水-风-储互补下的运行过程及指标差异,最终提出合适的优化调控策略。

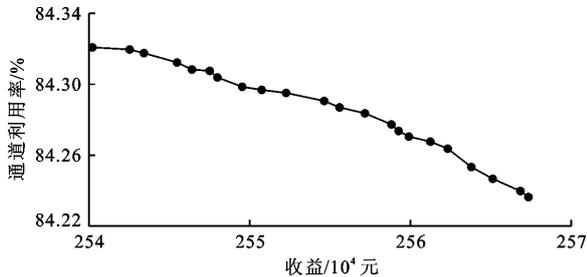


图3 多目标优化帕累托前沿示例

3 实例研究

3.1 研究区域

青海省位于中国西北部,风能资源丰富,70 m高度的年平均风能密度为230 W/m²,且大量的半干旱草地使得开发利用成本相对较低。因此,该地区

适合建设大型风电场。管理人员提供了某已建风电场的高质量运行记录数据用于仿真计算,包括不同的时间出力、温度和风向。水电站工程有班多水电站(径流式)、羊曲水电站(日调节),且羊曲水电站的调节库容比班多水电站大得多,羊曲水电站的互补性能不受班多水电站运行的影响。两个水电站的主要参数见表1。为进一步增强系统电力互补外送能力,针对班多、羊曲多能互补系统的电力送出限制和水库特性制定水-风-储优化调控策略是一个迫切需要解决的问题。

表1 研究区班多、羊曲水电站主要参数

参数	班多	羊曲
装机容量/MW	360	1200
最大流量/(m ³ ·s ⁻¹)	1119.5	1186.2
死水位/m	2757.0	2710.0
正常蓄水位/m	2760.0	2715.0
初始水位/m	2758.5	2712.5
调蓄库容/10 ⁸ m ³	0.0196	2.39

3.2 实例模拟与结果分析

3.2.1 风电容量配置 根据2.3节中的阶段求解方法,统计不同风电装机容量、不同日均来流的条件下,班多、羊曲水电站互补系统对弃风率的影响分别如图4、5所示。

由图4、5可以看出,配置风电容量过大时系统会明显受到电力送出通道容量的约束,且来流量增大会加剧系统的弃风率风险。经综合考虑后选择来流保证率 $\alpha = 75\%$,弃风率 $\beta = 20\%$,得到班多、羊曲水电站互补系统配置的风电容量分别为240和980 MW,作为模型的输入进行不同工况的计算。

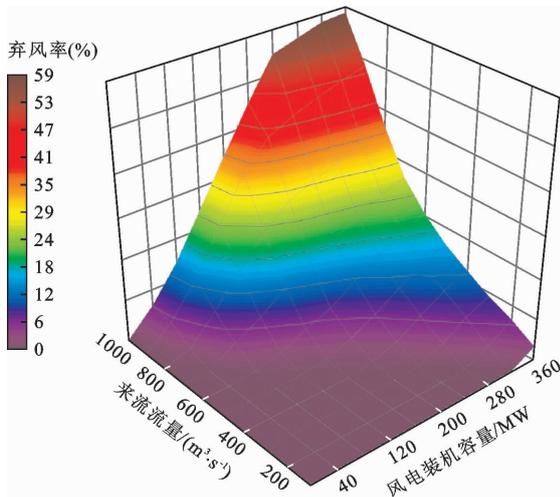


图4 班多水电站的风电配置容量对弃风率的影响

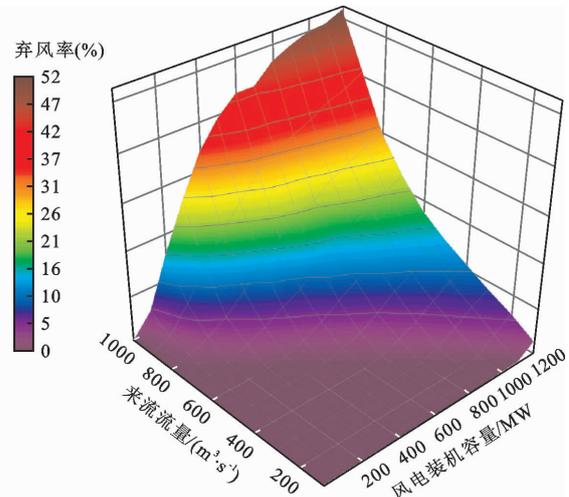


图5 羊曲水电站风电的配置容量对弃风率的影响

3.2.2 班多水电站水-风-储互补系统优化调控

图 6 展示了班多水电站在 500、700 m³/s 两种典型流量下水-风互补系统的调控过程。图 6 表明,班多水电站能够在一定程度上互补风电出力波动,同时在电力送出限制下优化发电效益。在 500 m³/s 流量下,班多水电站水-风互补系统实现零弃风,而在 700 m³/s 流量下则发生弃风。在调控策略中,为实现系统最大化收益,电价高峰时段保持满电力送出通道容量出力或将水库由蓄满至放空;为最大程度减少弃风量,在弃风发生前将水库放空,弃风期间逐渐将水库由放空至蓄满。

图 7 为 500、700 m³/s 两种典型流量下班多水电站水-风互补系统运行调控中库水位变化过程。

分析图 7 可知,在调控过程中班多水电站已达到水位上、下限值,说明水库已使用全部可调节库容,发挥了最大的互补调节能力。在较大流量下,由于库容限制导致无法再降低水电出力从而发生弃风。出现弃风现象和限制互补优化效果进一步提高的主要原因是班多水库有限的调蓄能力。

综合考虑青海省可再生能源项目储能配置要求以及储能减少弃风、套利的效益,按照风电装机容量的 20% 配置倍率为 0.5C 的锂电池(24 MW·2 h)。500、700 m³/s 两种典型流量下储能的出力以及储能配置前后互补系统的功率变化如图 8 所示。

在风电容量配置确定的基础上,开展了不同流量情景下的系统调控过程的仿真模拟。

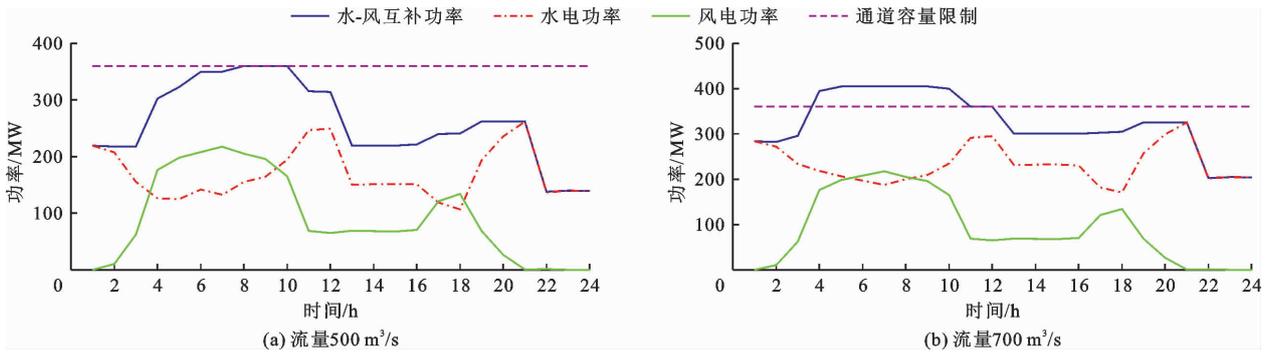


图 6 不同流量下班多水电站水-风互补系统运行调控过程

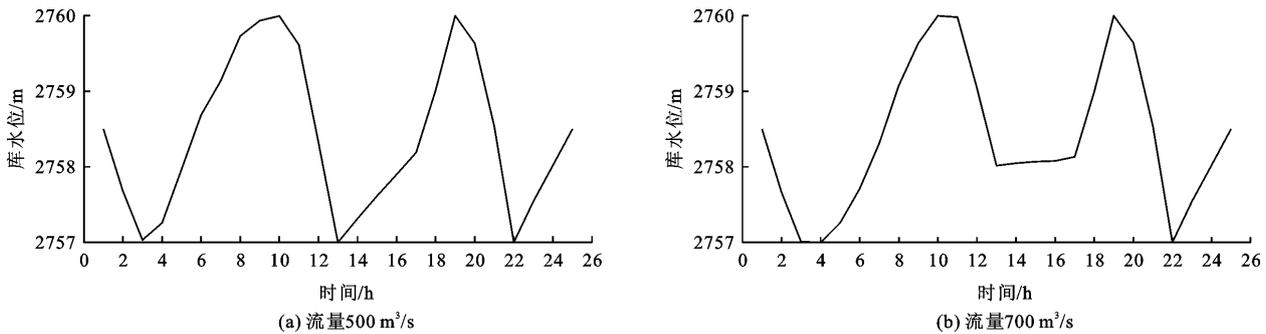


图 7 不同流量下班多水电站水-风互补系统运行调控中库水位变化过程

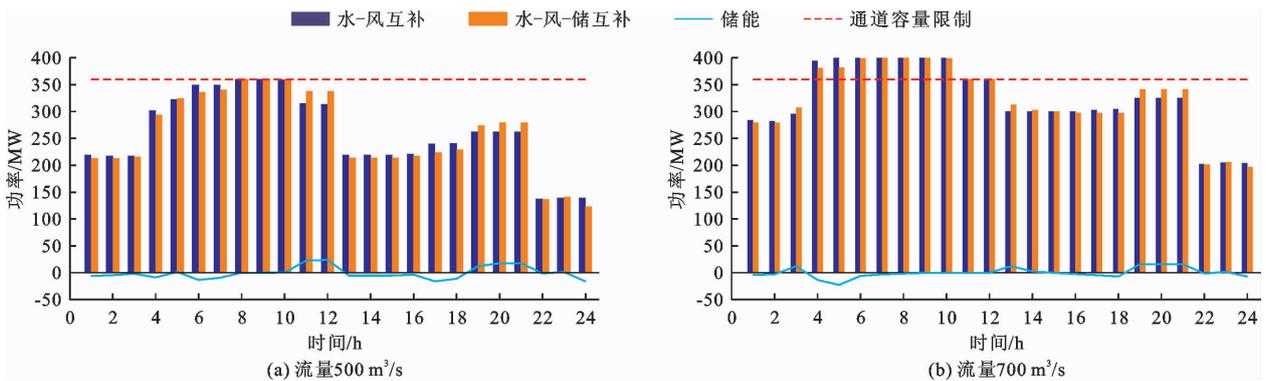


图 8 不同流量下班多水电站水-风互补系统与水-风-储互补系统出力

分析图8可知,配置储能后的班多水电站水-风-储互补系统比水-风互补系统在消纳弃风以减小弃风惩罚、提高运行系统收益和送出通道利用率等方面具有更明显的效果。在 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下,水-风互补系统已经实现了不弃风,水-风-储系统将低价时段的出力转移到高价时段,使得互补系统的经济收益提高了 1.12% 。在 $700\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下,水-风-储系统吸收了 2.18% 原有水-风系统的弃风量,同时使互补系统提高了 1.67% 的经济收益,增加了 0.52% 的送出通道利用率。

对班多水电站两个互补系统在不同流量下的全年运行结果进行指标统计,得出运行指标随入库流量的变化曲线,如图9所示。

从图9可以看出,随着入库流量的增加,送出通道利用率以及平均弃风率均增加,而系统的平均净收益先增加、后受弃风惩罚影响而减小。水-风-储互补系统的额外调节能力发挥了较大的作用,储能

在互补系统中起到消纳部分弃风的作用,使得平均弃风率在入库流量大于 $600\text{ m}^3/\text{s}$ 后才有明显增长,且平均弃风率比水-风互补系统减小了 2.13% ;水-风-储互补系统的平均净收益比水-风互补系统增加了 4.65% ,说明提高峰时电价时段出力和消纳弃风的储能运行控制策略得到了有效的验证;水-风-储互补系统的送出通道利用率与水-风互补情况下的变化趋势相似且略有提高。另外,通过全寿命周期财务分析计算,配置锂电池储能年均成本为 $2\,200 \times 10^4$ 元,班多水电站水-风-储互补系统年收益相比水-风互补系统增加了 $2\,600 \times 10^4$ 元。因此,水-风-储互补系统能够进一步提高系统净收益,提高系统的送出通道利用率并减少弃风量。

3.2.3 羊曲水电站水-风互补系统优化调控 羊曲水电站在 700 、 $850\text{ m}^3/\text{s}$ 两种流量下水-风互补系统运行调控过程和水库水位变化过程分别如图10、11所示。

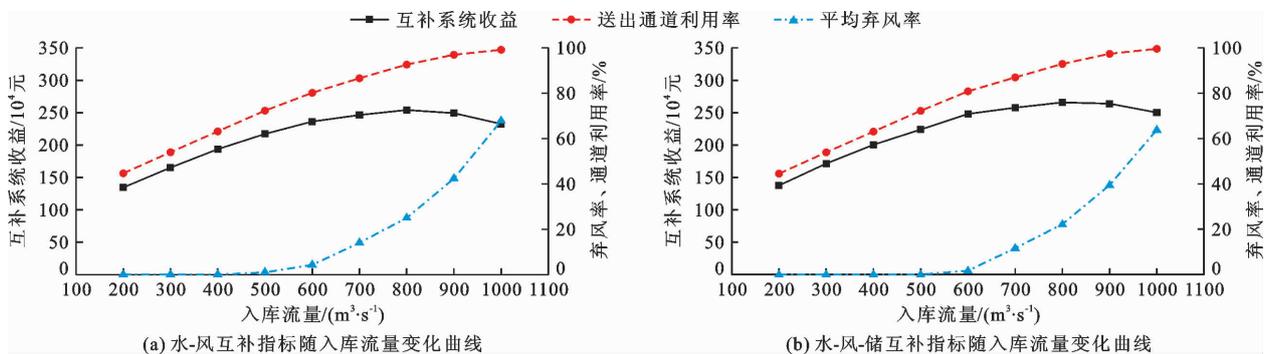


图9 班多水电站两个互补系统指标随入库流量变化曲线

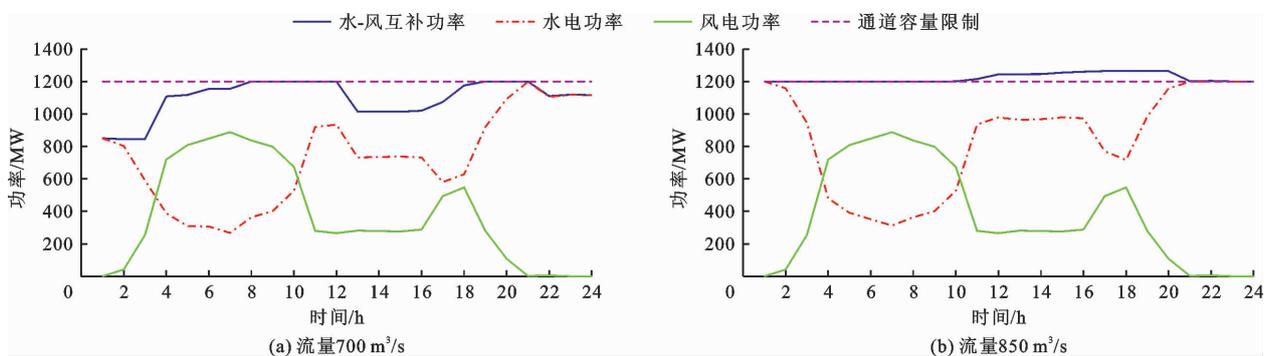


图10 不同流量下羊曲水电站水-风互补系统运行调控过程

由图10的仿真结果可以看出,羊曲水电站能够很好地互补风电出力波动,同时充分利用电力送出通道获得最大的发电效益。在 $700\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下,羊曲水-风互补系统实现零弃风,而在 $850\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下则发生弃风。在调控运行策略中,为充分利用羊曲水电站在互补系统中的调蓄能力,在非高来流量

条件下出力受分时电价的引导,达到最大化收益的同时发挥调节能力实现不弃风;在高来流量条件下实现电力送出通道满负荷出力,之后受通道容量限制弃风量急剧增大。

由图11库水位变化情况可知,互补调控对于羊曲水电站的运行状态影响较小,羊曲水电站在调控

过程中使用少部分调节库容即可大幅改善互补系统

对风电的高效消纳。

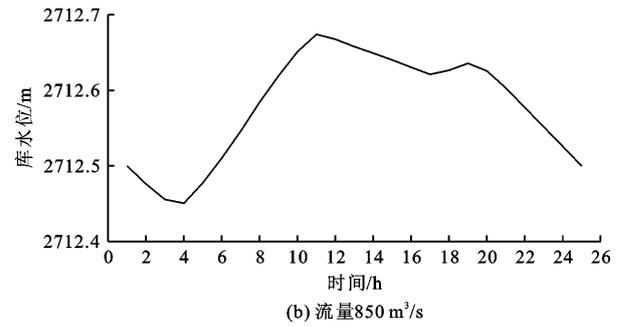
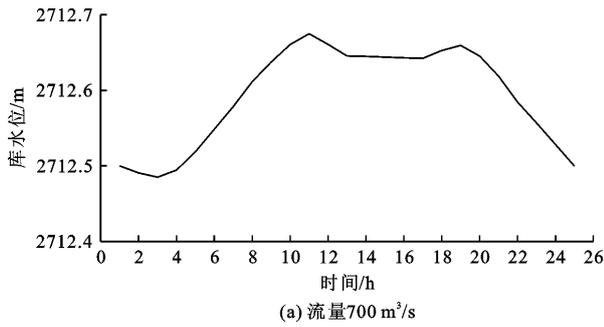


图 11 不同流量下羊曲水电站水-风互补系统运行调控中库水位变化过程

图 12 展示了羊曲水电站水-风互补全年运行指标随流量的变化过程。

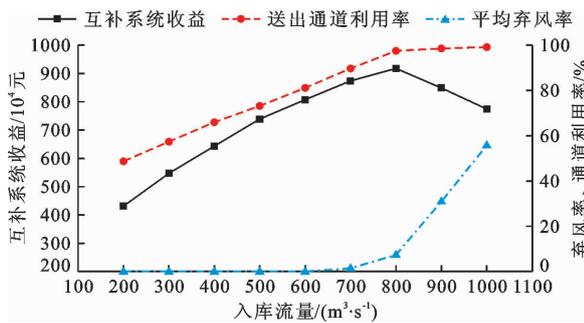


图 12 羊曲水电站水-风互补系统指标随入库流量变化曲线

分析图 12 可知,羊曲水电站水-风互补系统的平均弃风率在流量小于 700 m³/s 时,保持为零,在流量大于 800 m³/s 之后随流量的增加平均弃风率急剧增大,出现弃风情况的同时羊曲水电站水-风互补系统已实现满送出通道容量出力。羊曲水电站水-风互补系统的净收益先随着流量的增加而增加,在流量达 800 m³/s 后受弃风惩罚影响呈急剧下降趋势;送出通道利用率随流量的增加而增加,在达到较高水平后增速变缓。分析表明,羊曲水电站调蓄能力较强,在 700 m³/s 流量以下时基本可以实现不弃风,而在来流较大时可保持满通道负荷出力,实现收益和送出通道利用率的最大化。羊曲水电站水-风互补系统的弃风量源于电力送出通道容量的限制,故配置储能消纳弃风的作用在羊曲水电站互补系统中将不存在。因此,羊曲水电站互补系统应以水-风互补的形式运行。

3.3 讨论

本文深入探讨了电力系统中若干关键因素如风电不确定性、分时电价和电力送出通道容量等对电力系统整体性能产生的影响,基于此提出了一系列优化措施和调控策略的新思路,这些研究成果为未

来电力系统的研究和应用提供了新的思考方向。

3.3.1 风电不确定性对优化调控的影响 Gong 等^[29]研究发现,随着风电出力不确定性的增加,系统运行的可靠性会随之降低,运行区间的裕度也会随之减小。为对调控效果产生影响的风险源进行随机模拟,采用随机模拟策略生成多种不同确定性程度的风电情景。根据文献[30]对风电波动特性的统计,得出风电出力的波动为:

$$P^n = (p_0^n, p_1^n, \dots, p_i^n, \dots, p_T^n) \quad (18)$$

$$(n = 1, 2, \dots, N)$$

$$\Delta P_t^n = p_{t+1}^n - p_t^n \quad (19)$$

样本在风电出力 t 时刻的波动可表示为:

$$\Delta P_t = (\Delta P_t^1, \Delta P_t^2, \dots, \Delta P_t^n, \dots, \Delta P_t^N) \quad (20)$$

式中: N 为历史样本天数, d 。

假定风电出力预测误差服从正态概率分布,并以 $(p_{\max} - p_{\min})/6$ 的百分比值 $a\%$ 模拟高、中、低不同预测误差范围,根据预测精确程度的不同将百分比范围等分为高、中、低 3 个等级,其中,高等级百分比范围为 $(67\%, 100\%]$,中等级百分比范围为 $(33\%, 67\%]$,低等级百分比范围为 $[0, 33\%]$ 。如式(21)所示。

$$f(P - P^f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

$$\sigma = a\% \cdot \frac{P_{\max} - P_{\min}}{6} \quad (22)$$

结合上文研究中对班多水电站水-风-储互补系统中产生弃风的条件进行分析,当来水流量大于 600 m³/s 时发生大量弃风,因此选择对丰水条件进行风电不确定性分析。结合不确定性因素的随机模拟分类,本文共设定了 3 种典型的不确定性评价工况,如表 2 所示,各工况随机模拟次数为 1 000 次。风电不确定性条件下各工况弃风率的模拟统计结果

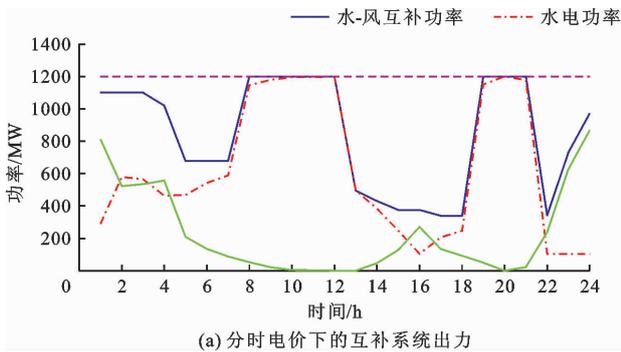
见图 13。

表 2 班多水电站水-风-储互补系统不确定性调度工况

工况编号	入库来水量	风电预测误差等级
1	丰水	低
2		中
3		高

由图 13 可见,在相同的来流水平下,随风电不确定性程度增高,随机模拟中弃风率分布情况会越分散,且平均弃风率值呈增大趋势。对比 3 种工况条件,工况 1 和工况 3 分别为最有利和最不利情景。因此,改善风电出力的预测精度可以很大程度缩小弃风率区间,增强系统的调控效果。

3.3.2 分时电价对优化调控的影响 分时电价是



(a) 分时电价下的互补系统出力

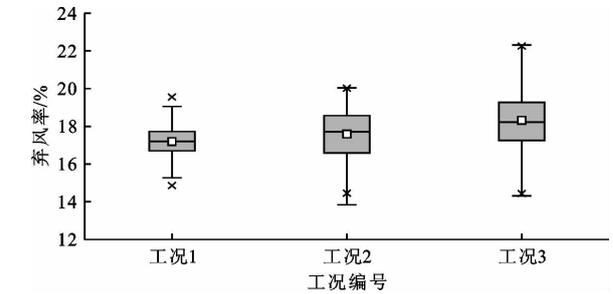
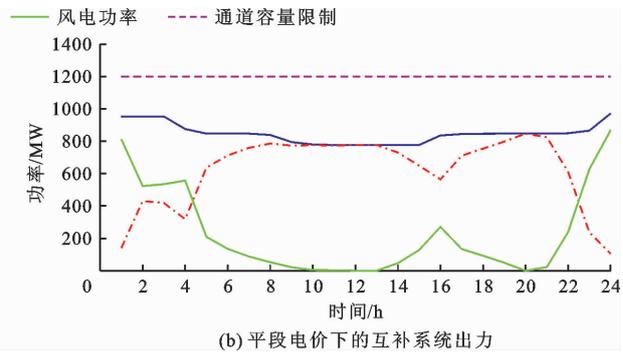


图 13 风电不确定性对不同工况弃风率的影响



(b) 平段电价下的互补系统出力

图 14 羊曲水电站水-风互补系统在分时电价与平段电价下运行调控对比

由图 14 可以看出,分时电价引导下的运行调控使得互补系统在高峰电价时段优先出力,而平段电价下互补系统的出力过程更加平稳,且出力变化幅度及变化次数会减少。

3.3.3 电力送出通道容量的影响 电力送出通道容量反映了互补系统外送电的能力,电力送出容量约束会导致机组出力受限^[32]。随着未来通道投资的增加,通道容量将会得到进一步扩大。设置羊曲水电站水-风互补系统电力送出容量分别为 1 200、1 400 MW,仿真得到了该两种不同送出通道容量下的互补系统运行效果,如图 15 所示。

由图 15 可知,入库流量为 600 ~ 700 m³/s 时出现的少量弃风随着电力送出通道容量的增加实现了完全消纳,且流量大于 700 m³/s 时的弃风率显著降低。随着流量的增加,互补系统净收益的增幅逐渐增加,在较高来流时由于弃风率降幅明显,净收益得到了极显著的提升。验证了增加电力送出通道容量对于互补系统消纳风电、提高系统运行收益具有显著作用。

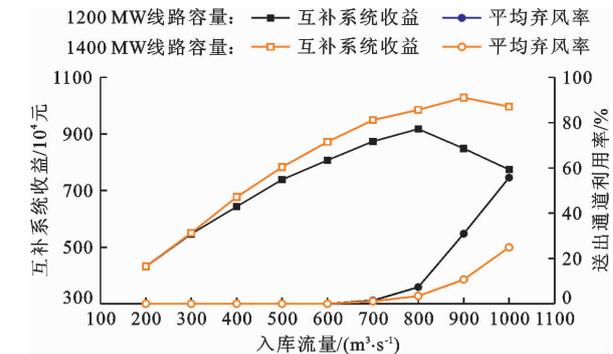


图 15 羊曲水电站水-风互补系统不同电力送出通道容量下互补结果对比

4 结论

本文考虑电力送出通道影响风电消纳的背景条件,提出了水-风-储互补系统优化调控方法,结合储能运行的优化控制策略,建立了班多、羊曲水电站水-风-储互补系统优化调控模型,分析了风电不确定性、分时电价和电力送出通道容量对系统互补效果的影响。主要结论如下:

(1)以班多、羊曲水电站互补系统为例设置多种系统工况并进行了对比分析,结果显示,水-风-储互补系统可最大程度减少弃风,增加电力系统的收益,并增强对电力送出通道的利用,有效地降低了风电并网给电网带来的接入和消纳压力。

(2)对不确定性风电出力、峰谷电价和电力送出通道容量等重要的模型输入进行了敏感性分析,结果表明,提高风电预测精度可以增强互补系统整体的调控效果,分时电价对互补系统出力优化有很大的引导作用,增加电力送出通道容量对于减少弃风、提高系统运行收益具有显著效果。

(3)水-风-储互补系统优化调控为风电与水电资源丰富的地区解决电力送出通道容量不足时大规模风电并网消纳,以及降低弃风风险提供了技术途径,为推动清洁能源大基地建设和实现清洁能源高质量发展,提供了一种可行的技术实现方式。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2020 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2021-01-20) [2023-04-15]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm
- [2] 高澈,牛东晓,马明,等. 大规模新能源区域互联消纳能力分析及其综合评价方法研究[J]. 中国电力,2017,50(7):56-63.
- [3] 苏承国,申建建,王沛霖,等. 基于电源灵活性裕度的含风电电力系统多源协调调度方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(17):111-119.
- [4] 支悦,艾学山,董祚,等. 水库发电优化调度模型的快速求解算法及应用[J]. 水力发电学报,2020,39(6):49-61.
- [5] XU Jiuping, WANG Fengjuan, LV Chengwei, et al. Carbon emission reduction and reliable power supply equilibrium based daily scheduling towards hydro-thermal-wind generation system: a perspective from China[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 1-14.
- [6] 肖欣,周渝慧,何时有,等. 含流域梯级水电的水火风互补发电系统联合运行优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):100-108.
- [7] 庞秀岚,张伟. 水光互补技术研究及应用[J]. 水力发电学报,2017,36(7):1-13.
- [8] DU Rui, ZOU Penghui, MA Chao. Multi-objective optimal sizing of hybrid energy storage systems for grid-connected wind farms using fuzzy control[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2021, 13(1): 014103.
- [9] GEBRETSADIK Y, FANT C, STRZEPEK K, et al. Optimized reservoir operation model of regional wind and hydro power integration case study: Zambezi Basin and South Africa[J]. Applied Energy, 2016, 161: 574-582.
- [10] 李铁,李正文,杨俊友,等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术,2020,44(10):3622-3630.
- [11] 纪昌明,赵亚威,张验科. 促进清洁能源消纳的多网联合优化与决策模型[J]. 水力发电学报,2021,40(2):64-76.
- [12] CASTRONUOVO E D, USAOLA J, BESSA R, et al. An integrated approach for optimal coordination of wind power and hydro pumping storage[J]. Wind Energy, 2014, 17(6): 829-852.
- [13] WANG Xianxun, VIRGUEZ E, XIAO Weihua, et al. Clustering and dispatching hydro, wind, and photovoltaic power resources with multiobjective optimization of power generation fluctuations: a case study in southwestern China[J]. Energy, 2019, 189: 116250.
- [14] WANG Xianxun, MEI Yadong, KONG Yanjun, et al. Improved multi-objective model and analysis of the coordinated operation of a hydro-wind-photovoltaic system[J]. Energy, 2017, 134: 813-839.
- [15] 沈筱,方国华,谭乔凤,等. 风光水发电系统联合调度规则提取[J]. 水力发电,2020,46(5):114-117+126.
- [16] 杨和稳,任增. 风光互补发电系统中抽水蓄能电站的优化配置[J]. 计算机仿真,2015,32(4):111-115+143.
- [17] 滕云,王泽镒,金红洋,等. 用于电网调节能力提升的电热氢多源协调储能系统模型[J]. 中国电机工程学报,2019,39(24):7209-7217+7494.
- [18] LIU Benxi, LUND J R, LIAO Shengli, et al. Optimal power peak shaving using hydropower to complement wind and solar power uncertainty[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 209: 112628.
- [19] 杨三根. 风电与水电联合调度问题研究[D]. 成都:电子科技大学,2015.
- [20] 张倩文,王秀丽,李言. 含风-光-水-储互补电力系统的优化调度研究[J]. 电力与能源,2017,38(5):581-586.
- [21] 韩芳冰. 基于风电水电联合运行的中长期机组组合研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [22] XU Bin, ZHU Feilin, ZHONG Ping-an, et al. Identifying long-term effects of using hydropower to complement wind power uncertainty through stochastic programming[J]. Applied Energy, 2019, 253: 113535.
- [23] LIU Yangang, JIANG Chuanwen, SHEN Jingshuang, et al. Coordination of hydro units with wind power generation using interval optimization[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 443-453.
- [24] 丁明,吴义纯,张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):107-110.
- [25] 马瑞,张强,吴瑕,等. 日风速随机模糊不确定模型[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6351-6358.

(下转第145页)

- [4] CHEN Gang, LI Ben, GU Shixiang, et al. Discharge assessment in straight open channels with partial ice cover [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2019, 33(2): 04019002.
- [5] CHEN Gang, GU Shixiang, LI Ben, et al. Physically based coefficient for streamflow estimation in ice-covered channels [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 470–479.
- [6] BAI Yu, DUAN Yonggang. The vertical distribution of suspended sediment and phosphorus in a channel with ice cover [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 37953–37962.
- [7] PETERS M, CLARK S P, DOW K, et al. Flow characteristics beneath a simulated partial ice cover: effects of ice and bed roughness [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2018, 32(1): 04017017.
- [8] NYANTEKYI – KWAKYE B, ESSEL E E, DOW K, et al. Hydraulic and turbulent flow characteristics beneath a simulated partial ice-cover [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2021, 59(3): 392–403.
- [9] TURCOTTE B, MORSE B. A global river ice classification model [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 507: 134–148.
- [10] 王军. 河冰形成和演变分析[M]. 合肥:合肥工业大学出版社, 2004.
- [11] ESSEL E E, CLARK S P, DOW K, et al. Experimental and numerical investigation of three-dimensional open channel with simulated partial ice-covers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2021, 59(6): 977–988.
- [12] XIAO Yang, WANG Nairu, LIANG Dongfang, et al. Flow structures in trapezoidal compound channels with different side slopes of main channel [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2017, 16: 823–835.
- [13] NAMAEE M R, SUI Jueyi, WU Yongsheng, et al. Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular side-by-side bridge piers with ice cover [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2020, 48(10): 1335–1353.
- [14] LAU Y L, KRISHNAPPAN B G. Ice-cover effects on stream flow and mixing [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1981, 107(HY10): 1225–1242.
- [15] 茅泽育, 罗昇, 赵升伟, 等. 冰盖下水流垂线流速分布规律研究 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(2): 209–215.
- [16] 王军. 冰冻河道下流速分布和阻力问题探讨 [J]. *水科学进展*, 2005, 16(1): 28–31.
- [17] 王志兴, 李成振, 陈刚. 冰盖下水流流速垂向分布规律研究 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2009, 40(4): 465–470.
- [18] 苏磊, 蒯建铭, 张宝森, 等. 封冻河道冰下流速分布规律研究 [J]. *人民黄河*, 2022, 44(9): 97–99.
- [19] NEZU I, RODI W. Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1986, 1112(5): 335–355.
- [20] ZARE S G A, MOORE S A, RENNIE C D, et al. Estimation of composite hydraulic resistance in ice-covered alluvial streams [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(2): 1306–1327.
- [21] BARENBLATT G I, PROSTOKISHIN V M. Scaling laws for fully developed turbulent shear flows. Part 1. Basic hypothesis and analysis [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 248: 513–520.
- [22] CHEN Gang, GU Shixiang, HUAI Wenxin, et al. Boundary shear stress in rectangular ice-covered channels [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(6): 06015005.
- [23] 陈刚, 董增川, 王海军, 等. 冰盖下水流紊动特性试验研究 [J]. *水科学进展*, 2023, 34(2): 299–309.
- [24] LI Qian, ZENG Yuhong, BAI Yu. Mean flow and turbulence structure of open channel flow with suspended vegetation [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32: 314–325.

(上接第 135 页)

- [26] SU Chengguo, CHENG Chuntian, WANG Peilin, et al. Optimization model for long-distance integrated transmission of wind farms and pumped-storage hydropower plants [J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 285–293.
- [27] 罗彬. 水电富集电网清洁能源一体化建模及运行方式交互研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2017.
- [28] 郑依心. 考虑不确定性的多情景风水联合短期优化调度研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- [29] GONG Yu, LIU Pan, LIU Yini, et al. Robust operation interval of a large-scale hydro-photovoltaic power system to cope with emergencies [J]. *Applied Energy*, 2021, 290: 116612.
- [30] YANG Yuqi, ZHOU Jianzhong, LIU Guanbiao, et al. Multi-plan formulation of hydropower generation considering uncertainty of wind power [J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114239.
- [31] 龚正朋. 光储系统两阶段优化调度策略及分时电价优化研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2021.
- [32] 张水平, 付聪, 左剑, 等. 计及输电通道容量约束的中长期发电计划 [J]. *南方电网技术*, 2022, 16(12): 60–67.