

# 汛限水位动态控制对水电-新能源 互补能力的提升研究

张阳博<sup>1</sup>, 张 帅<sup>2</sup>, 朱燕梅<sup>1</sup>, 黄炜斌<sup>1</sup>, 邓靖微<sup>2</sup>, 曹敏琦<sup>2</sup>

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司经济技术  
研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**在水能富集地区, 丰水期来水量大, 水电发电量大, 调节能力不足, 水电-新能源消纳矛盾突出, 互补调度困难较大。为了缓解汛期水电-新能源消纳矛盾, 创新地将汛限水位与新能源消纳相结合, 探讨汛限水位动态控制对水电互补能力的提升效果。建立了一定弃电率条件下源荷匹配度最大的水风互补模型, 以旬为计算周期、小时为计算时段, 采用遗传算法对雅砻江下游“两库五级”梯级电站及周边风电场组成的互补系统开展模拟计算, 通过对比分析发现汛限水位动态控制方案相比静态控制方案可多消纳 2.55% 的风电。结果表明, 通过汛限水位的动态控制可以动态增加水电可利用的调节库容, 从而提升水电调节新能源的能力。

**关键词:**汛限水位; 互补能力; 水风消纳; 雅砻江

中图分类号: TV 76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)06-0015-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230603

## Research on Dynamic Control of Flood Limit Water Level to Improve Complementary Capacity of Hydropower and New Energy

ZHANG Yangbo<sup>1</sup>, ZHANG Shuai<sup>2</sup>, ZHU Yanmei<sup>1</sup>, HUANG Weibin<sup>1</sup>, DENG Jingwei<sup>2</sup>, CAO Minqi<sup>2</sup>

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;  
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** In water rich areas, the large amount of incoming water and hydropower generation during the abundant water period are not sufficiently regulated, resulting in prominent hydropower-new energy consumption contradictions and greater difficulties in complementary scheduling. In order to alleviate the contradiction between hydropower and new energy consumption during the flood season, the flood water level is innovatively combined with new energy consumption, and the effect of dynamic control of flood water level on the improvement of water-wind complementary capacity is discussed. A model with maximum source-load matching under a certain abandonment rate is established, and a genetic algorithm is used to simulate the complementary system consisting of "two reservoirs and five stages" downstream of Yalong river and the surrounding wind farms. This shows that the dynamic control of flood limit water level can dynamically increase the available regulating reservoir capacity of hydropower, thus enhancing the ability of hydropower to regulate the new energy.

**Key words:** flood limit water level; complementary capacity; water and wind accommodation; Yalong river

## 0 引 言

水库汛期的限制水位是水电站防洪调度中的关键参数<sup>[1]</sup>, 分静态和动态两种控制方式, 前者采用固定的汛限水位, 在防洪时期, 超过静态汛限水位的

水一律泄掉, 一方面大量水资源浪费<sup>[2]</sup>, 也存在后续水库无法蓄满的风险。汛限水位动态控制是在设计的水位范围内上下浮动, 有效地改善了静态控制的缺陷<sup>[3]</sup>。学者们针对汛期分期、汛限水位的分期控制、汛限水位的动态控制阈<sup>[4]</sup>等开展了有效的研究。文献<sup>[5]</sup>在考虑溪洛渡一向家坝梯级电站调蓄

影响的条件下,研究了三峡水库的分期汛限水位。文献[6]采用蒙特卡罗随机方法对动态汛限水位带来的风险进行了分析和量化。文献[7]以最小化出库流量的最大值为目标构建了碧流河水库汛限水位优化模型,通过遗传算法求解发现,汛限水位优化使得水库的蓄水发电效益提高。综上所述,现有文献就如何通过梯级水库群汛限水位动态控制进行汛期防洪调度,提高流域整体防洪效益和发电效益作了深入探索,并取得了较好的成果;然而,将水库汛限水位动态控制与新能源消纳相结合的研究尚未见报道。

在水能富集地区,丰水期来水量大,水电发电量大,调节能力不足,水风光等多能互补系统在来水量较大的汛期常常存在弃水、总出力波动较大的现象,水电、新能源消纳矛盾更为突出,互补调度困难较大。新型电力系统建设背景下,出力不可控的新能源发展迅猛,如何利用梯级水库群汛限水位动态控制思想尽可能多地增加新能源消纳量是解决其汛期消纳问题的重要手段,这对推动水能富集地区新型电力系统建设具有战略意义。因此,下面立足于汛期水电-新能源消纳矛盾点,将水库汛限水位动态控制与风电调节相结合,重点探讨汛限水位动态控制对于水电承载风电能力的提升效果。

## 1 互补模型

### 1.1 目标函数

梯级水电-新能源汛期互补调度面临着流域防洪、新能源消纳及水能利用等问题。由于新能源出力具有不可调节性,需要通过梯级水电调节自身出力来平抑新能源出力波动,会出现水电出力上调或者下调两种情况。汛期入库径流较大,水量充沛,一般不会出现水电出力上调无法满足的情形;但汛期调度还受限于防洪任务及其他流域水资源综合利用约束,可能会出现水电出力下调无法满足的情形。

1) 水电-新能源总出力大于电网分配的负荷需求,且梯级水电出力已达到最小出力,无法继续下调,为满足电量供需平衡,需要弃掉部分新能源电量。

2) 水电-新能源总出力可以满足电网分配的负

荷需求,但水库水位达到汛期上限要求,梯级水电出力无法继续下调,产生了一定弃水,考虑到防洪风险,需要弃掉部分新能源电量。

为在防洪安全范围内既充分消纳新能源电量,又合理利用水能资源,所提模型利用动态汛限水位,设定目标函数为一定弃电率条件下源荷匹配度最大,目标函数表达式为

$$\begin{cases} \text{Max } \rho = \text{Max} \left( 1 - \frac{E_q + E_{\text{que}}}{E_{\text{load}}} \right) \\ E_q = \sum_{t \in T} [(N_t - N_{\text{load},t}) \times \Delta t], N_t \geq N_{\text{load},t} \\ E_{\text{que}} = \sum_{t \in T} [(N_{\text{load},t} - N_t) \times \Delta t], N_t < N_{\text{load},t} \\ N_t = \sum_{i \in I} N_{h,i,t} + N_{w,t} + N_{pv,t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_q$ 为互补系统总弃电量; $E_{\text{que}}$ 为互补系统缺电量; $E_{\text{load}}$ 为系统需求电量; $\rho$ 为源荷匹配度; $N_t$ 和 $N_{\text{load},t}$ 分别为 $t$ 时段光伏发电总出力和负荷需求; $\Delta t$ 为第 $t$ 时段持续时间; $I$ 为所有水电站的集合; $N_{h,i,t}$ 为第 $i$ 个水电站第 $t$ 时段的发电出力; $N_{w,t}$ 和 $N_{pv,t}$ 分别为第 $t$ 时段风电出力和光伏发电出力。

### 1.2 约束条件

模型考虑的约束条件分为电网类约束、电站类约束、水力类约束。

1) 电网类约束:输电通道约束和系统弃电率约束

$$\sum_{t \in T} N_{h,i,t} + N_{w,t} + N_{pv,t} \leq c_t^d \quad (2)$$

$$A_R = \frac{E_q}{E_q + E} = \vartheta \quad (3)$$

式中: $N_{w,t}^d$ 为断面 $d$ 内的风电第 $t$ 时段的发电出力; $N_{pv,t}^d$ 为断面 $d$ 内的光伏发电第 $t$ 时段的发电出力; $c_t^d$ 为断面 $d$ 的输电容量; $A_R$ 为弃电率; $\vartheta$ 为假定的弃电率水平; $E$ 为互补系统实际发电量。

2) 电站类约束:新能源接入装机约束、各类电站出力约束

$$\begin{cases} N_{w,s} \leq N_{w,m} \\ N_{pv,s} \leq N_{pv,m} \\ N_{h,j,t}^{\min} \leq N_{h,i,t} \leq N_{h,i,t}^{\max} \\ N_{w,t}^{\min} \leq N_{w,t} \leq N_{w,t}^{\max} \\ N_{pv,t}^{\min} \leq N_{pv,t} \leq N_{pv,t}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $N_{w,s}$  为风电接入装机;  $N_{w,m}$  为风电理论装机;  $N_{pv,s}$  为光伏接入装机;  $N_{pv,m}$  为光伏理论装机;  $N_{h,i,t}^{\min}$ 、 $N_{h,i,t}^{\max}$  分别为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段内的最小出力和最大出力;  $N_{w,t}^{\min}$ 、 $N_{w,t}^{\max}$  分别为风电场在第  $t$  时段内的最小出力和最大出力;  $N_{pv,t}^{\min}$ 、 $N_{pv,t}^{\max}$  分别为光伏电站在第  $t$  时段内的最小出力和最大出力。

3) 水力类约束: 水量平衡约束、流量平衡约束、水库蓄水量约束、水库水位约束、发电流量约束、下泄流量约束

$$\begin{cases} V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{r,i,t} - Q_{i,t} - Q_{q,i,t}) \Delta t \\ Q_{r,i,t} = Q_{i-1,t-1} = Q_{q,i-1,t-1} + q_{i,t} \\ V_{i,t}^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t}^{\max} \\ Z_{i,t}^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\max} \\ Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \\ Q_{s,i,t}^{\min} \leq (Q_{i,t} + Q_{q,i,t}) \leq Q_{s,i,t}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Q_{r,i,t}$  为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段内的平均入库流量;  $Q_{i,t}$  为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段内的发电流量;  $Q_{q,i,t}$  为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段内的弃水流量;  $q_{i,t}$  为第  $i$  个水电站与第  $i-1$  个水电站在第  $t$  时段内的区间流量;  $V_{i,t}$  为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段初的水库蓄水量;  $Z_{i,t}$  为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段初的水库水位;  $V_{i,t}^{\min}$ 、 $V_{i,t}^{\max}$  分别为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段内允许的最小蓄水量和最大蓄水量;  $Z_{i,t}^{\min}$ 、 $Z_{i,t}^{\max}$  分别为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段内允许的最小水位和最大水位, 在动态汛限水位和静态汛限水位模型中, 该水位约束条件有所不同;  $Q_{i,t}^{\min}$ 、 $Q_{i,t}^{\max}$  分别为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段内允许的最小发电流量和最大发电流量;  $Q_{s,i,t}^{\min}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\max}$  分别为第  $i$  个水电站在第  $t$  时段内允许的最小泄流量和最大泄流量。

### 1.3 模型求解算法

考虑到遗传算法作为一种快捷、简便、容错性强的算法, 与传统的搜索方法相比, 具有广泛的适应性、并行性、鲁棒性、全局优化性等优点, 对求解问题的目标函数无连续、可微等要求, 特别适合于求解类似水库群优化调度等含有多参数多变量的优化问题。因此采用遗传算法求解水风互补模型。

遗传算法主要包含优化解的编码设计、种群规

模及计算参数的设定、约束处理与适应度函数、进化算子操作等方面, 计算流程如图 1 所示。

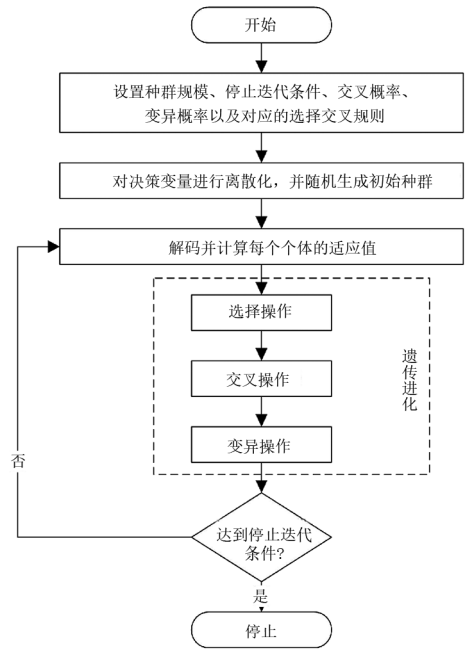


图 1 遗传算法计算流程

### 1.4 动态汛限水位的确定方法

采用预泄能力约束法确定水库的动态汛限水位。预泄能力约束法是根据预报信息和水库自身条件来预判泄流能力, 从而确定汛限水位可以上调的空间。降雨及洪水预报精度、预报信息的预见期及有效预见期、有效预泄期内水库的出入水量、有效预见期内预蓄水量、有效预见期内水库泄流能力、有效预见期内预泄水量以及其他人为操作、地质等因素是预泄能力约束法的主要影响因素。预泄能力约束法具体求解步骤如下:

#### 1) 计算有效预见期

预见期指从预报信息发布时刻与预报事件发生时刻之间的间隔时长。有效预见期指将预报信息获得分析、决策指令传达、现场指令执行等时间从预见期中扣除后的剩余有效时间, 具体计算公式为

$$\begin{cases} T_v = T_x + T_y - T_z \\ T_z = T_r + T_p + T_q \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_v$  为有效预见期;  $T_x$  为预报精度达到可利用程度的预见期;  $T_y$  为预泄水库极限预泄时间;  $T_z$  为预报信息获得分析时间、决策指令传达时间、现场指令执行时间之和;  $T_r$  为获得、分析预报信息时间;  $T_p$

为传达决策指令时间;  $T_q$  为现场执行指令时间。

2) 计算有效预见期内预泄水库的平均出入库流量

出于安全考虑, 根据洪水预报信息, 有效预见期间预泄水库的平均入库流量取该时段内多年最大平均入库流量, 平均出库流量取下游河道的最低安全允许泄流量, 具体公式为

$$\begin{cases} Q_{in} = \max Q_{H,n}, (n = 1, \dots, N) \\ Q_{out} = \min Q_{N,l}, (l = 1, \dots, L) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $Q_{in}$  为有效预见期内预泄水库的平均入库流量;  $Q_{H,n}$  为第  $n$  次发布洪水预报时的洪水流量,  $N$  为发布洪水预报总次数;  $Q_{out}$  为有效预见期内预泄水库的平均出库流量;  $Q_{N,l}$  为下游河道第  $l$  级安全允许泄流量,  $L$  为下游河道防洪安全允许泄流量级数。

3) 计算有效预见期内预泄水库的泄流能力

根据有效预见期内预泄水库平均出入库流量  $Q_{in}$ 、 $Q_{out}$ , 按式(8)计算预泄水库最大允许泄水量, 即泄流能力。

$$W_x = (Q_{out} - Q_{in}) \times T_v \quad (8)$$

4) 计算汛限水位动态控制域的上限水位

将水库在有效预见期内的最大安全泄流能力作为汛期水位上浮的增效库容, 通过库容-水位关系即可得到增效库容所对应的动态汛限水位上限值, 计算公式为

$$Z_{D_y}^+ = \begin{cases} f[V(Z_D^0) + W_x], Z_{D_y}^+ < Z_x \\ Z_x, Z_{D_y}^+ \geq Z_x \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $Z_{D_y}^+$  为库容扩展后动态汛限水位上限值;  $Z_x$  为水库正常蓄水位;  $f(*)$  为水库水位-库容关系。

## 2 案例分析

已有研究表明相比光伏发电, 风电的不确定性对水电调节能力影响更大<sup>[8]</sup>。因此以水风互补系统为研究对象, 选取雅砻江流域下游 5 座梯级水电站及其周边风电场作为研究案例, 梯级水电总装机为 14 700 MW, 根据最新研究成果, 雅砻江流域规划风电 5377 MW, 下面将以此作为边界条件。各水电站的特征参数如表 1 所示。

表 1 雅砻江流域下游控制性水库设计特征参数

特征参数	锦屏一级	锦东	官地	二滩	若水
多年平均流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	1190	1190	1360	1650	1890
正常蓄水位/m	1880	1646	1330	1200	1015
死水位/m	1646	1330	1220	1035	995
总库容/( $10^8 m^3$ )	77.6	0.11	6.26	57.9	0.72
调节库容/( $10^8 m^3$ )	49.10	0.05	1.72	33.70	0.23
调节性能	年	日	日	季	日

选取具有汛限水位要求的 7 月中旬(7 月 11 日至 7 月 20 日)为计算周期, 以小时为计算时段, 共计 240 个时段。在固定负荷需求曲线下, 优化得到满足一定弃电率要求和源荷匹配度最大化目标的风电接入规模和消纳电量。为了分析动态汛限水位对于汛期互补调度运行的影响, 设定一个对照方案, 即按原静态汛限水位要求运行, 其中锦屏一级水库、二滩水库的静态汛限水位分别为 1 859.00 m、1 190.00 m, 根据预泄能力约束法得到锦屏一级、二滩两水库的动态汛限水位范围分别为 [1 859.00, 1 862.71] m、[1 190.00, 1 195.00] m。两个方案中水位约束条件不同: 静态汛限水位方案中, 除水库初末水位保持与实际运行时水位一致以外, 中间时段的运行水位应不超过原静态汛限水位; 动态汛限水位方案中, 中间时段水位可在动态汛限水位范围内变动。两方案风电出力特性相同, 5 座梯级电站初末水位为实际运行数据, 如表 2 所示。

表 2 梯级水电站初末运行水位 单位:m

水位	锦屏一级	锦东	官地	二滩	若水
初始水位	1 849.50	1 645.00	1 329.80	1 187.00	1 012.00
末水位	1 859.00	1 645.00	1 329.80	1 190.00	1 012.00

表 3 统计了两种汛限水位方案下消纳的风电、水电等各类电源的数据。由表 3 可知, 通过汛限水位动态控制, 按照 5% 的弃电率水平, 梯级水电可多接入 122 MW 风电。在相同负荷需求下, 可多消纳风电电量 9 528.9 MW, 相比静态汛限水位方案可多消纳 2.55% 的风电, 源荷匹配度可提高 0.29 个百分点。

两种方案下梯级水电与风电出力互补过程分别如图 2 和图 3 所示。总体来看, 两种方案下水风互补总出力较好地跟踪负荷, 与负荷需求曲线趋势一致, 其中汛限水位静态控制时源荷匹配度为 94.37%, 汛限水位动态控制时源荷匹配度为 94.66%, 相比静态控制方案提高 0.29%。两种方案的水风电

量构成差异不大,其中动态汛限水位控制方案下风、水电量分别占 13.72%、86.28%,静态汛限水位控制方案下风、水电量分别占 13.42%、86.58%。

表 3 不同汛限水位方案容量配置成果

配置参数	静态汛限水位方案	动态汛限水位方案
接入风电装机容量/MW	4782	4904
消纳风电电量/MWh	373 104.4	382 633.3
弃风电量/MWh	10.4	0
水电装机容量/MW	14 700	14 700
水电实发电量/MWh	2 407 926	2 407 234
弃水电量/MWh	146 644.4	147 346.9
送出电量/MWh	2 781 031	2 789 868
缺失电量/MWh	104 97.8	1 661.2
需求电量/MWh	2 791 529	2 791 529
总弃电量/MWh	146 654.8	147 346.9
总弃电率/%	5.01	5.02
源荷匹配度/%	94.37	94.66

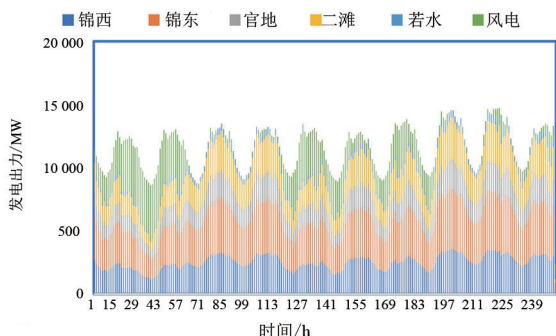


图 2 静态汛限水位方案下水风互补出力过程

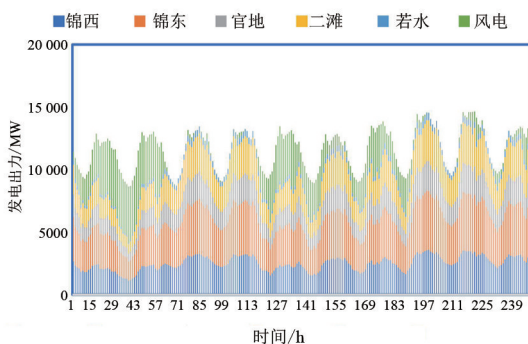


图 3 动态汛限水位方案下水风互补出力过程

两种方案下锦屏一级水库和二滩水库水位变化过程分别如图 4 和图 5 所示。在水位升到汛限水位之前,锦屏一级电站和二滩电站在静态汛限水位方案和动态汛限水位方案下蓄水过程基本一致。当蓄至原静态汛限水位后,在动态汛限水位方案下,两个电站继续蓄水至动态汛限水位上限,将此部分水存于

水库中,给风电让出发电空间,存蓄起来的水量用于后期风电发电较少时段放水发电以满足用电量需求,这是动态汛限水位方案能多接纳风电的本质原因。

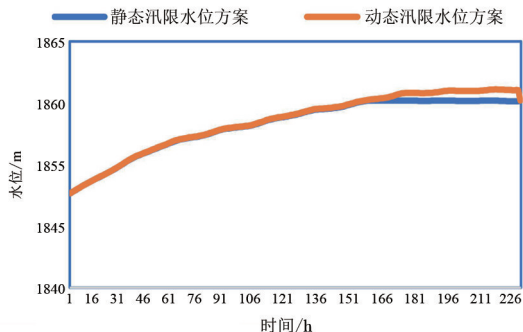


图 4 两种方案下锦屏一级电站水位过程

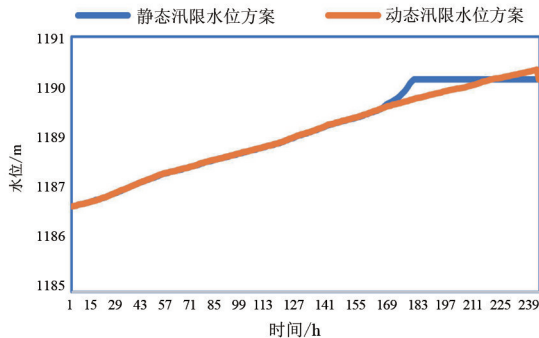


图 5 两种方案下二滩电站水位过程

综上所述,丰水期来水量大,水电发电量大,调节能力不足,因此在不新增弃水的情况下,丰水期水电可以调节消纳的新能源电量十分有限。通过汛限水位的动态控制可以动态增加水电可利用的调节库容,从而提升水电调节新能源的能力。在实际调度运行中,可结合洪水预报情况,在洪水来临之前采取提前预泄手段以腾出一定的调节库容,促进水电-新能源的消纳。

### 3 结 论

在水能富集地区,丰水期来水量大,水电发电量大,调节能力不足,水电-新能源消纳矛盾突出,互补调度困难较大。为了缓解汛期水电-新能源消纳矛盾,所做研究以雅砻江下游“两库五级”梯级电站为例,以旬为计算周期,以小时为计算时段,计算汛限水位动态控制方案和静态控制方案下可调节的风电电量,发现汛限水位动态控制方案可多消纳风电

电量 9 528.9 MWh, 相比静态汛限水位方案可多消纳 2.55% 的风电; 源荷匹配度可提高 0.29%。结果表明, 通过汛限水位的动态控制可以动态增加水电可利用的调节库容, 从而提升水电调节新能源的能力。

#### 参考文献

- [1] 郭生练, 刘攀, 王俊, 等. 再论水库汛期水位动态控制的必要性和可行性[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 1-12.
- [2] 陈浩. 某水库汛限水位动态控制研究[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(6): 87-89.
- [3] 宋伟华, 贺顺德, 徐晓英, 等. 龙羊峡水库汛限水位动态控制方案研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 18-21.
- [4] 冯佳宁, 李晓英, 张琰, 等. 基于系统协调度模型的汛限水位分期控制研究[J/OL]. 长江科学院院报: 1-10 [2023-05-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20230210.1508.008.html>.

(上接第 9 页)

#### 参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [2] 高志远, 张晶, 庄卫金, 等. 关于新型电力系统部分特点的思考[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(26): 137-151.
- [3] 林卫斌, 宁佳钧, 张凡. 分“三步走”构建新型电力系统的战略构想[J]. 价格理论与实践, 2022(10): 71-74.
- [4] 章建华, 林山青, 余兵, 等. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [5] 国家能源局. 国家能源局组织发布《新型电力系统发展蓝皮书》[EB/OL]. [2023-06-02]. [http://www.nea.gov.cn/2023-06/02/c\\_1310724249.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-06/02/c_1310724249.htm).
- [6] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- [7] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1855.
- [8] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1742-1750.
- [9] 国务院办公厅. 国务院办公厅转发国家发展改革委国家能源局关于促进新时代新能源高质量发展实施方案的通知; 国办函[2022]39号 [EB/OL]. (2022-05-

- [5] 李英海, 夏青青, 王永强, 等. 考虑溪-向梯级调蓄影响的三峡水库分期汛限水位研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(7): 1514-1522.
- [6] 建剑波, 曾智珍, 卢金阁, 等. 基于蒙特卡洛法的水库汛限水位动态控制风险分析[J]. 河南水利与南水北调, 2020, 49(2): 18-20.
- [7] 王祥伟. 基于遗传算法的碧流河水库汛限水位优化研究[J]. 水科学与工程学报, 2019, 216(4): 48-51.
- [8] LIAO Shengli, LIU Huan, LIU Benxi, et al. An information gap decision theory-based decision-making model for complementary operation of hydro-wind-solar system considering wind and solar output uncertainties [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 348: 131382.

#### 作者简介:

张阳博(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源、水利电力经济管理。

(收稿日期: 2023-05-25)

30) [2023-06-02]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content\\_5693013.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.htm).

- [10] 钟海旺, 张广伦, 程通, 等. 美国得州 2021 年极寒天气停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 1-9.
- [11] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
- [12] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [13] WANG Yongping, XU Weiting, LIU Chang, et al. Evaluation methods for the development of new power systems based on cloud model [C]. 2022 the 12th International Conference on Power and Energy Systems, 2022.
- [14] XU Ke, XU Weiting, LIU Chang, et al. Research on the development path of new power system based on SWOT-PEST analysis [C] // 2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy, 2022.

#### 作者简介:

王永平(1963), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统规划与建设;

刘畅(1991), 女, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统运行分析。

(收稿日期: 2023-07-12)