

# 基于风光出力累积概率分布的新能源消纳规划方法

闫林林, 李良县, 郁永静

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:**风光电出力过程的随机性、间歇性、波动性等特点导致风光电难以被电网消纳,利用水力发电迅速且可调节的优点,可弥补风光电出力的缺陷。笔者提出水电平衡风电和光伏的原理,以电力电量平衡、不弃水调峰和能源基地总发电过程平稳为原则,结合风光出力累积概率分布,推导风光弃电计算公式,得到不同风光装机规模和比例下的弃电率。通过与 PSO 结果比较,表明两种方法下的风光弃电量误差在 5% 以内,从而验证该方法的有效性和实用性。以上述理论为基础,分析雅砻江下游电源规划,其研究为大规模新能源消纳提供一种可行的方法。

**关键词:**非时序生产模拟;电力电量平衡;累积概率分布;多能互补

**中图分类号:**G322.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-2184(2024)02-0152-07

## New Energy Consumption Planning Method Based on Cumulative Probability Distribution of Wind and PV Output

YAN Linlin, LI Liangxian, YU Yongjing

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

**Abstract:** The randomness, intermittent and fluctuating characteristics of wind-PV power output process make wind-PV power difficult to be absorbed by the power grid. The advantages of rapid and adjustable hydropower power generation can make up for the shortcomings of wind-PV power output. This paper puts forward the principle of balancing wind power and PV power with hydropower. Based on the principle of power and electricity balance, peak balancing without abandoning water and stable total power generation process of energy base, combined with the cumulative probability distribution of PV power output, the calculation formula of PV power abandonment is derived to obtain the power abandonment rate under different PV installed scale and proportion. Compared with the PSO results, it is shown that the wind and PV power abandonment error of the two methods is less than 5%, which verifies the effectiveness and practicability of the method. Based on the above theory, this paper analyzes the power supply planning of the lower Yalong River, and provides a feasible method for large-scale new energy consumption.

**Keywords:** Non-time production simulation; Power and electricity balance; Cumulative probability distribution; Multi-power complementation

### 1 概述

近年来,风电、光伏在国家政策支持下快速发展,装机容量逐年递增,随着我国提出 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的双碳目标,风光装机容量将进一步加大。截至 2022 年底,我国可再生能源累计装机容量突破 12 亿 kW,其中风电装机 3.65 亿 kW,光伏装机 3.93 亿 kW,均居世界首位。众所周知,风光出力过程具有随机性、间歇性、波动性等特点,从而出现了大量的弃风弃光现象,2021 年前三季度,我国弃风弃光 198 亿 kW·h。因此,研究风电光伏的合理装机容量对比对减少

弃风弃光具有重要的理论意义和应用价值。

目前,国内外众多学者开展了大量相关研究。例如,综合考虑水电站群径流特征、电力送出需求、水库调蓄特性和梯级水力水量联系等,构建了流域梯级水—光互补系统光伏容量配置数学模型<sup>[1]</sup>;将风机和光伏电池的个数作为变量,以新能源接入规模最大和输入主网波动性指标最小为目标函数,综合考虑各类约束条件,并采用多目标粒子群优化算法进行求解<sup>[2]</sup>。

以上研究主要通过智能优化算法对水风光互补发电系统模型进行求解,然而,大多数智能算法在问题求解时,存在收敛速度、局部最优、结果不

收稿日期:2023-07-14

稳定等弊端。鉴于此,笔者提出水电平衡风电和光伏的原理及方法,以此为基础,进行非时序生产模拟,即在不考虑风光出力时间顺序的前提下,以电力电量平衡、不弃水调峰和能源基地总发电过程平稳为原则,结合风光出力累积概率分布,推导风光弃电计算公式,从而求解出在不同风光装机规模和比例场景下的弃电率,并结合雅砻江下游流域进行实例分析。

## 2 水电平衡风光电原理及可调电力电量

### 2.1 水电平衡风光电的原则

因为风电和光伏出力过程的随机性,使之既无法担负电网的调峰任务,又无法给电网带来相对平稳的出力过程,而且一旦大规模地纳入电网,还会对电网的平稳运行造成不良影响<sup>[3-5]</sup>。因此风光在并网过程中,为确保整个系统可以安全可靠地消纳风电和光伏发电,还需要其他电源对其出力过程协调。当风电和光伏的出力增大时,就需减少平衡电源的出力;当风电和光伏出力降低时,就需提高平衡电源的出力,这就需要平衡电源具备强大的灵活性。由于调节特性好的水电站启停快速、负荷调节灵活,故其可用作风电和光伏的平衡电源<sup>[6-8]</sup>。根据电力电量平衡条件,水电出力加上风光电出力与水电电量加上风光发电量应趋于一个稳定的值,研究重点考虑水电与新能源之间互补性,未考虑负荷需求变化对能源基地发电过程的影响。

### 2.2 水电可调电力电量

水电站的工作规律表明,在枯水期,由于降水较少,来水量也较小,使水电站的平衡出力比较小,而此时水电站调蓄潜力很大<sup>[9-11]</sup>。雨季至蓄水期末,来水较多,使水电站的平均出力接近预出力,此时水电站的调蓄能力较小<sup>[12-14]</sup>。水电为风光提供的可调电力电量为:

$$N_q = K \times Q_{st} \times H \quad (1)$$

$$N_{kt} = N_{zj} - N_q \quad (2)$$

式中: $N_{kt}$ 为水电可调出力,万kW; $N_{zj}$ 为水电装机容量,万kW; $N_q$ 为水电强迫出力,万kW; $K$ 为出力系数; $Q_{st}$ 为最小生态流量, $m^3/s$ ; $H$ 为发电水头,m。

$$E_z = N_p \times \Delta t \quad (3)$$

$$E_q = K \times Q_{st} \times H \times \Delta t \quad (4)$$

$$E_{kt} = E_z - E_q \quad (5)$$

式中: $E_{kt}$ 为水电可调电量,亿kW·h; $E_z$ 为水电总发电量,亿kW·h; $E_q$ 为水电强迫出力下的发电量,亿kW·h; $N_p$ 为水电平均出力,万kW; $\Delta t$ 为计算时段(每个月对应小时数),h。

## 3 基于不同情景下的非时序生产模拟模型

### 3.1 风光出力累积概率分布概化

通过对实际风电与光伏发电生产过程的运营数据分析总结,风光出力范围在零至装机之间,基于非时序生产模拟,不考虑风光出力的时间顺序,将风光出力从大到小进行排序,求其累积概率,再通过MATLAB软件将风光出力与其累积概率进行三次函数拟合,求其累积概率分布。新能源出力累积概率分布概化见图1。

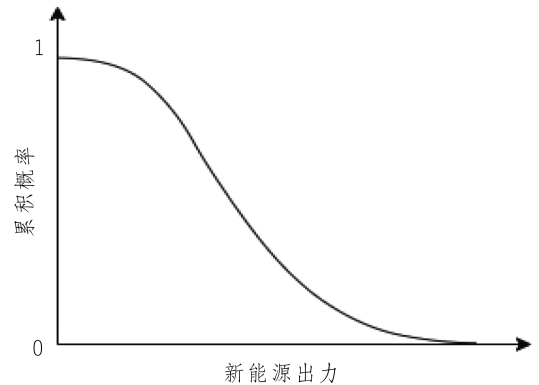


图1 新能源出力累积概率分布概化

### 3.2 不同情景下的新能源弃电公式推导

根据水电可调电力与新能源最大出力之间的关系以及水电可调电量与消纳全部新能源所需的电量之间的关系分以下四种情景进行分析:(1)情景一,可调电力足,可调电量足;(2)情景二,可调电力足,可调电量不足;(3)情景三,可调电力不足,可调电量足;(4)情景四,可调电力不足,可调电量不足。其中情景一又分为两种情况,新能源消纳空间足和新能源消纳空间不足。

(1)情景一。 $N_{kt} > N_{x,max}$ 时,表明水电有足够的可调电力来满足电力调节需求。该情况下,根据水电可调电量与消纳全部新能源所需的电量的大小关系进行进一步分析。

当 $E_b < E_{kt}$ 时,表明水电可调电量完全可以平衡全部新能源可发电量, $N_{kt} > N_{x,max}$ 时, $E_b < E_{kt}$ 示意图见图2。

该情况下,由水电可调电量与新能源可发电量之和是否大于水电可调电力对应下的发电量,

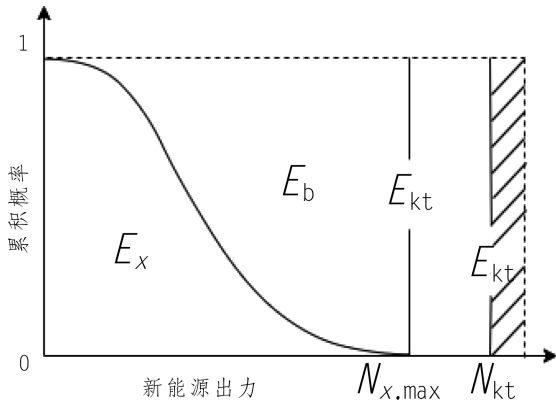


图 2  $N_{kt} > N_{x,max}$  时,  $E_b < E_{kt}$  示意图

又可分为以下两种情况:

若  $E_{kt} < E_b + (N_{kt} - N_{x,max}) \times \Delta t$ , 表明新能源消纳空间足, 新能源可发电量完全被消纳时, 水电也不存在弃水。则:

$$E_Q = 0 \quad (6)$$

若  $E_{kt} > E_b + (N_{kt} - N_{x,max}) \times \Delta t$ , 表明新能源消纳空间不足, 新能源可发电量完全被消纳时, 会存在一部分弃电。基于前述水电消纳优先原则, 认为这部分弃电为新能源的弃电。则:

$$E_Q = E_{kt} - [E_b + (N_{kt} - N_{x,max}) \times \Delta t] \quad (7)$$

式中:  $E_Q$  为新能源弃电量, 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $N_{x,max}$  为新能源最大出力, 万  $\text{kW}$ ;  $E_b$  为消纳全部新能源所需的电量, 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(2) 情景二。  $N_{kt} > N_{x,max}$ ,  $E_b > E_{kt}$  时, 表明水电可调电量不能平衡全部新能源可发电量。  $N_{kt} > N_{x,max}$  时,  $E_b > E_{kt}$  示意图见图 3。

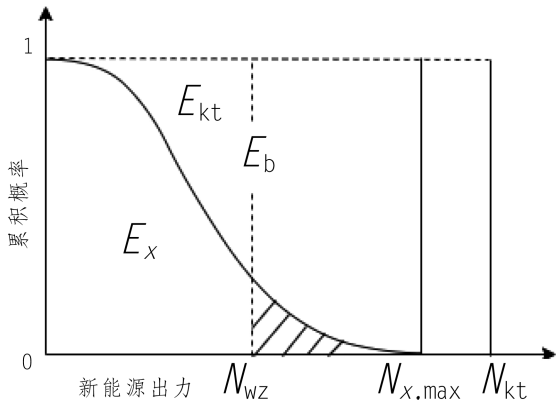


图 3  $N_{kt} > N_{x,max}$  时,  $E_b > E_{kt}$  示意图

此时, 可以参与调峰的水电电量不足, 全部新能源可发电量与水电互补后, 仍存在一部分波动性电量。基于设定的能源基地总发电过程平稳为原则, 将该部分波动性电量视为新能源弃电量, 其

即为对新能源出力累积概率分布函数积分, 积分下限为水电可调电量对应面积下的新能源出力值, 积分上限为新能源最大出力。则:

$$E_Q = \Delta t \times \int_{N_{wz}}^{N_{x,max}} f(x) dx \quad (8)$$

式中:  $N_{wz}$  为水电可调电量对应面积下的出力值, 万  $\text{kW}$ ;  $f(x)$  为新能源出力累积概率分布函数。

(3) 情景三。  $N_{kt} < N_{x,max}$  时, 表明水电可调电力不足, 不能完全满足新能源发电互补需求。而后, 根据水电可调电量与消纳全部新能源所需的电量大小关系进行进一步分析。

当  $E_b < E_{kt}$  时, 表明水电可调电量完全可以平衡水电可调电力范围内的新能源可发电量,  $N_{kt} < N_{x,max}$  时,  $E_b < E_{kt}$  示意图见图 4。

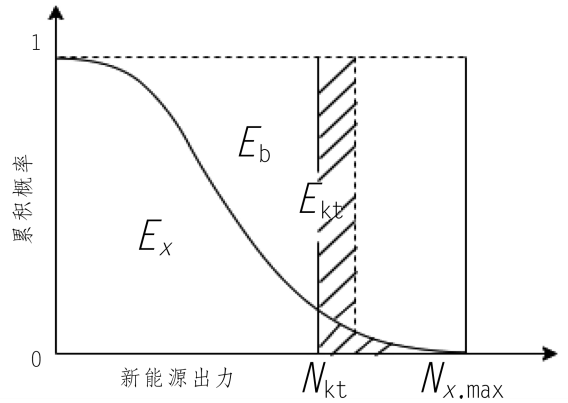


图 4  $N_{kt} < N_{x,max}$  时,  $E_b < E_{kt}$  示意图

新能源弃电量为剩余的可调电量加上新能源出力累积概率分布函数下水电可调电力到新能源最大出力之间的新能源可发电量。则:

$$E_Q = E_{kt} - E_b + \Delta t \times \int_{N_{kt}}^{N_{x,max}} f(x) dx \quad (9)$$

(4) 情景四。  $N_{kt} < N_{x,max}$ ,  $E_b > E_{kt}$  时, 表明水电可调电量不能完全平衡水电可调电力范围内的新能源可发电量,  $N_{kt} < N_{x,max}$  时,  $E_b > E_{kt}$  示意图见图 5。

新能源弃电量为  $N_{wz1}$  对出力累积概率分布函数积分, 积分下限为水电可调电量对应面积下的新能源出力值, 积分上限为新能源最大出力。则:

$$E_Q = \Delta t \times \int_{N_{wz1}}^{N_{x,max}} f(x) dx \quad (10)$$

## 4 水风光互补发电系统容量优化配置

### 4.1 模型的目标函数

在不考虑负荷需求的影响下, 为充分利用水电站的调节能力, 以水风光互补发电系统弃电量

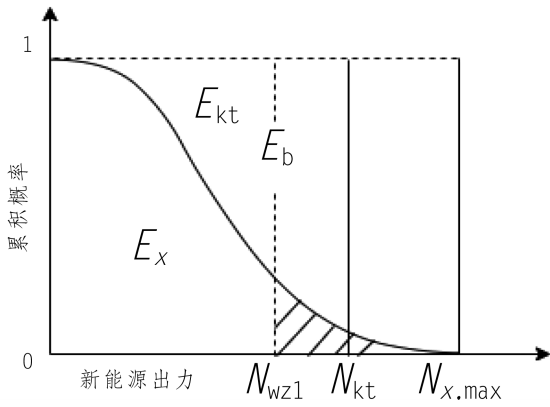


图5  $N_{kt} < N_{x,max}$  时,  $E_b > E_{kt}$  示意图

最小为目标,构建水风光多能互补优化调度模型。其中,将互补发电系统总发电量大于系统最小平稳出力过程所发电量的剩余电量视为弃电;把各时刻锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩、桐子林五级电站的下泄流量视为多能互补调度程序中的决策变量,进行优化计算。优化目标的表达式如下:

$$E_1 = \sum_{i=1}^T (P_h(i) + P_w(i) + P_s(i)) \times \Delta t \quad (11)$$

$$E_2 = T \times \min\{P_h(1) + P_w(1) + P_s(1), P_h(2) + P_w(2) + P_s(2), \dots, P_h(T) + P_w(T) + P_s(T)\} \quad (12)$$

$$\min E = E_1 - E_2 \quad (13)$$

式中: $E_1$ 为多能互补系统总发电量,亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $E_2$ 为多能互补过后最小平稳出力过程对应的发电量,亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $E$ 为多能互补系统总弃电量,亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $P_h(i)$ 为第  $i$  时段水电平均输出功率,万  $\text{kW}$ ;  $P_w(i)$ 为第  $i$  时段风电平均输出功率,万  $\text{kW}$ ;  $P_s(i)$ 为第  $i$  时段光电平均输出功率,万  $\text{kW}$ ;  $T$ 为各月小时数,  $\text{h}$ ;  $\Delta t$ 为 1。

#### 4.2 模型的约束条件

多能互补调度模型的约束主要包括水量平衡、水电站出力等。各约束的表达式如下:

(1)水电站出力约束。

$$N_{i,t}^{\min} \leq N_{i,t} \leq N_{i,t}^{\max} \quad (14)$$

(2)水量平衡约束。

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (q_{i,t} - Q_{i,t}) \times \Delta t \quad (15)$$

(3)流量平衡约束。

$$q_{i+1,t} = q_{i,t} + q_{i,t}^0 \quad (16)$$

(4)水位约束。

$$Z_{i,t}^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\max} \quad (17)$$

(5)下泄流量约束。

$$Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad (18)$$

(6)非负约束:以上数据均为非负值( $\geq 0$ )。

式中: $N_{max i,t}$ 、 $N_{min i,t}$ 为第  $t$  时段第  $i$  个水电站出力上、下限,万  $\text{kW}$ ;  $V_{i,t+1}$ 为第  $t$  时段第  $i$  个水库的末库容,  $\text{m}^3$ ;  $V_{i,t}$ 为第  $t$  时段第  $i$  个水库的初库容,  $\text{m}^3$ ;  $q_{i,t}$ 为第  $t$  时段第  $i$  个水库的入库流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{i,t}$ 为第  $t$  时段第  $i$  个水库的发电流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_{i,t}^0$ 为第  $t$  时段第  $i$  个水库与第  $i+1$  个水库的区间入流,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $V_{max i,t}$ 、 $V_{min i,t}$ 为第  $t$  时段末第  $i$  个水库库容上、下限,  $\text{m}^3$ ;  $Z_{max i,t}$ 、 $Z_{min i,t}$ 为第  $t$  时段末第  $i$  个水库水位上、下限,  $\text{m}$ ;  $Z_{i,t}$ 为第  $t$  时段末第  $i$  个水库的水位,  $\text{m}$ ;  $Q_{max i,t}$ 、 $Q_{min i,t}$ 为第  $t$  时段末第  $i$  个水库下泄流量上、下限,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

#### 4.3 模型求解算法及流程

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)基本原理是把鸟群的进食或居住地视为优化问题的最可能解对策,使鸟群进行鸟群间的合作与数据共享向着优化问题的最佳解对策方向前进,并经过持续的努力寻找最佳优化问题的解空间,直到获得全局最佳值<sup>[15]</sup>。

粒子群算法中寻优的关键问题是速度和位置更新,关于下一批种群的速度和位置的表述包括:

$$v_{id} = w \cdot v_{id} + C_1 \cdot r_1(p_{id} - x_{id}) + C_2 \cdot r_2(p_{gd} - x_{id}) \quad (19)$$

$$x_{id} = x_{id} + c_{id} \quad (20)$$

式中: $v_{id}$ 为粒子速度; $x_{id}$ 为粒子位置; $P_{id}$ 为粒子个体最优; $P_{gd}$ 为粒子全局最优; $w$ 为惯性权重; $C_1$ 为自我学习因子; $C_2$ 为群体学习因子; $r_1$ 、 $r_2$ 为 0 到 1 之间的随机数。其中  $w$  值越大,则全局寻优性能越好;相反,若  $w$  值较小,其局部寻优性能好。

多能互补优化调度模型求解具体步骤如下:

(1)数据输入。在程序中输入水电站基本参数、水电站月入库流量过程、水库初水位及末水位、风电和光伏月出力过程等;

(2)初始化种群相关参数。选择粒子群算法参数时,把决策变量设定为水库下泄流量,即种群中各粒子在每一时间段的水库下泄量;

(3)粒子适应度计算,初始化个体和全局极值。根据多能互补优化调度模型的目标函数计算

每个粒子的适应度值,初始化个体最优位置  $P_{id}$  和全局最优位置  $P_{gd}$ ;

(4)更新粒子速度和位置。根据公式(19)、(20)更新粒子速度和位置;

(5)更新个体和全局极值。计算粒子新的适应度,更新个体最优位置  $P_{id}$  和全局最优位置  $P_{gd}$ ;

(6)是否满足算法终止条件,若是则结束,若否则转入步骤(4)。

## 5 实例应用

### 5.1 概况

雅砻江是金沙江第一大支流,位于青藏高原东部,发源于青海省玉树州境内的巴颜喀拉山南麓,自西北向东南流。干流全长约 1 570 km,流域面积约 13.6 万  $\text{km}^2$ 。

雅砻江流域共规划了 23 座梯级水电站,总装机容量 2 885 万 kW,在全国规划的十三大水电基地中,装机规模排名第三。选取雅砻江下游锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩以及桐子林电站为例进行分析,其装机规模共 1 470 万 kW。

### 5.2 数据说明

数据说明:(1)计算周期、时段。以年为计算周期,月为计算时段;(2)水电站出力。锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩以及桐子林电站出力过程,由径流资料计算得出;(3)风光电站出力。由格林威治数据平台模拟风电场,得到风速、风向数据;

表 1 非时序生产模拟方法下新能源全年弃电率

风光装机	风光比例						
	0.5 : 1	0.75 : 1	1 : 1	1.25 : 1	1.5 : 1	1.75 : 1	2 : 1
1 000 万 kW	0.23%	0.20%	0.21%	0.21%	0.21%	0.22%	0.22%
1 250 万 kW	0.52%	0.40%	0.38%	0.38%	0.41%	0.48%	0.59%
1 500 万 kW	1.05%	0.76%	0.68%	0.75%	0.85%	0.98%	1.15%
1 750 万 kW	1.60%	1.19%	1.09%	1.23%	1.39%	1.60%	1.89%
2 000 万 kW	2.28%	1.74%	1.64%	1.83%	2.08%	2.46%	2.89%

由表 1 可以看出,当新能源装机规模一定时,新能源弃电率随着风光比例的增加大致呈现出先减小后增加的趋势,表明在风光比例增加的过程中,存在一个合适的风光比例,使新能源的弃电率达到最小。在非时序生产模拟过程中,新能源可发电量能够保持较低的弃电率。

### 5.4 优化算法下枯水期互补运行分析

选取风光装机 1 500 万 kW、风光比例为 1 : 1

由 Meeonorm8 得到太阳能辐照度数据。采用风电、光伏出力物理模型,得到风电和光伏出力;(4)风光规模比例变化范围、变化梯度。风光规模比例变化范围为 0.5 : 1~2 : 1,比例变化梯度选为 0.25;(5)新能源弃电率。笔者将新能源弃电率控制在 5% 以下为目标开展研究。

### 5.3 非时序生产模拟方法下的新能源弃电分析

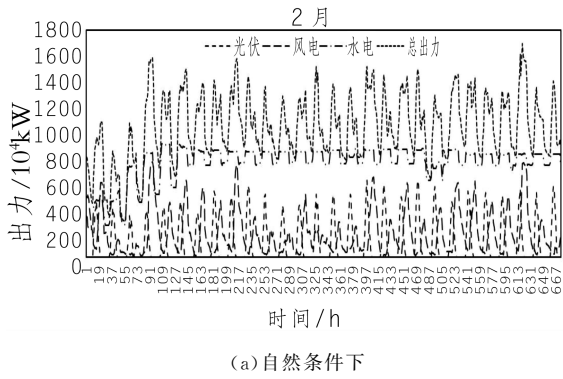
选择 2017 年作为研究的典型年进行分析,采用公式(1)到(5)计算得到锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩及桐子林五座水电站总的平均出力、强迫出力、可调电力及可调电量。枯水期各电站水库水位较低,基于最小生态流量下的强迫出力较小,使水电可调电力较大。枯水期水量较小,水电站平均出力也较小,导致水电可调电量较小。汛期水量较大,水电站出力较大,使水电站可调电力较小,水电可调电量较大。

得到新能源出力序列后,将新能源出力从大到小进行排序,得到各场景下出力累积概率分布。由图 1 可以得知,累积概率函数求积分与研究周期的乘积即为新能源的可发电量<sup>[16]</sup>。新能源可发电量主要集中在 50% 以下出力区段<sup>[17]</sup>,随着出力的增加,新能源累积电量增加的速度变缓。

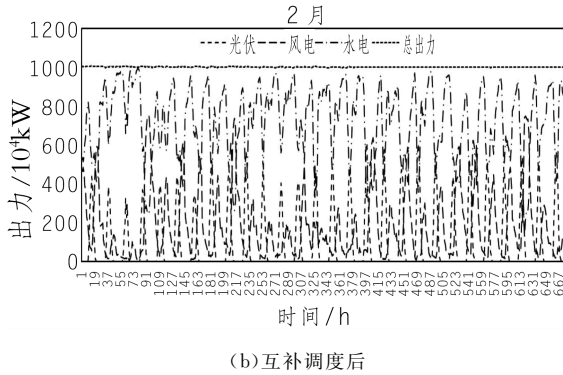
根据水电可调电力电量和新能源出力累积概率分布,结合 4 种情景下的弃电公式,可以得到非时序生产模拟方法下新能源全年弃电率(表 1)。

场景下的优化调度结果进行分析,并选择其中 2 月为代表进行分析。以水风光互补发电系统弃电量最小为评价标准,得到雅砻江下游五个电站在枯水期水风光自然条件下和多能互补后的出力过程(图 6)。

由图 6 可以看出,在枯水期自然条件下,水风光三种电源各自为政,总出力过程变化幅度较大,并网时将给电网的运行带来巨大挑战。从 2 月份



(a)自然条件下



(b)互补调度后

图6 枯水期水风光自然条件下和多能互补后的出力过程

可以看出,互补调度后的总出力过程几乎呈一条直线,消除了风光出力的波动性,此时,新能源弃电很少。

### 5.5 优化算法下丰水期互补运行分析

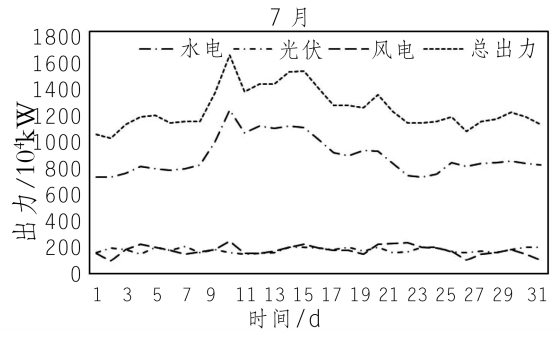
选取风光装机2000万kW,风光比例为1:1场景下的优化调度结果进行分析,并选择其中7月为代表进行分析。以水风光互补发电系统弃电量最小为评价标准,得到雅砻江下游五个电站在自然条件下和多能互补模式下的水风光总的出力过程,枯水期水风光自然条件下和多能互补后的

表2 优化算法下新能源全年弃电率

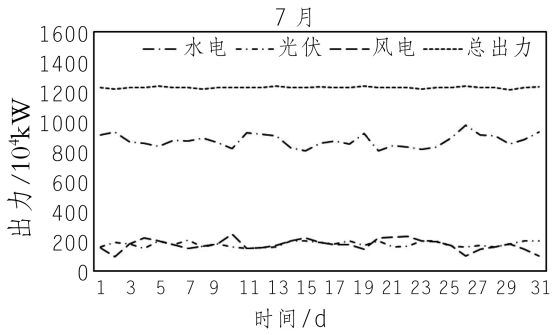
风光装机	风光比例						
	0.5:1	0.75:1	1:1	1.25:1	1.5:1	1.75:1	2:1
1000万kW	4.30%	4.50%	4.07%	4.36%	4.21%	3.89%	4.78%
1250万kW	5.64%	4.25%	4.13%	4.08%	4.19%	4.16%	4.30%
1500万kW	5.30%	4.15%	4.32%	4.21%	4.93%	5.41%	6.01%
1750万kW	6.15%	4.90%	5.09%	5.19%	5.52%	6.18%	6.83%
2000万kW	6.75%	5.87%	5.77%	6.92%	7.46%	8.44%	9.16%

由表2可以看出,当新能源装机规模一定时,随着风光比例增加,新能源弃电率大致呈现先减小后增加的趋势,与非时序生产模拟弃电率结果呈相同趋势。在水风光多能互补调度配合下,雅砻江下游水电站也可以很好地消纳新能源。

出力过程见图7。



(a)自然条件下



(b)互补调度后

图7 丰水期水风光自然条件下和多能互补后的出力过程

由图7可以看出,在丰水期自然条件下,同样水风光三种电源各自为政,总出力过程变化幅度较大。在水风光互补调度后,从7月份互补后的出力过程可以看出,以日为计算时段的多能互补调度,也可以很好地平抑风光出力过程。丰水期水风光自然条件下和多能互补后的出力过程见图7。

### 5.6 优化算法下的新能源弃电分析

综上所述,可以得到水风光互补优化算法下新能源全年弃电率(表2)。

### 5.7 结果对比

笔者主要介绍了非时序生产模拟,即不考虑水风光出力的时间顺序,以电力电量平衡、不弃水调峰和能源基地总发电过程平稳为原则的一种水电平衡新能源的方法。通过与粒子群优化算法结

果对比可以得到两种方法不同新能源装机规模和比例下的新能源弃电量误差,两种计算方法下的

新能源弃电量误差见表 3。

由表 3 可以看出,两种方法计算出的不同装

表 3 两种计算方法下的新能源弃电量误差

风光装机	风光比例						
	0.5 : 1	0.75 : 1	1 : 1	1.25 : 1	1.5 : 1	1.75 : 1	2 : 1
1 000 万 kW	4.07%	4.30%	3.86%	4.15%	3.99%	3.67%	4.55%
1 250 万 kW	5.11%	3.85%	3.74%	3.69%	3.77%	3.67%	3.70%
1 500 万 kW	4.23%	3.39%	3.63%	3.45%	4.07%	4.42%	4.85%
1 750 万 kW	4.52%	3.69%	3.98%	3.95%	4.11%	4.56%	4.92%
2 000 万 kW	4.43%	4.10%	4.11%	5.06%	5.35%	5.95%	6.23%

机规模和比例场景下的弃电量误差平均在 4.26%,误差相对较小,从而可以证明非时序生产模拟方法的合理性与有效性。

### 6 结 语

针对大规模风电、光伏并网的情况,提出了水电平衡新能源的思想,阐明了水电平衡新能源的原则;以电力电量平衡、不弃水调峰和能源基地总发电过程平稳为原则结合新能源出力累积概率分布,推导了非时序生产模拟方法下新能源弃电量的公式,得到不同新能源装机规模、比例下的新能源弃电率。通过与粒子群优化算法结果比较,新能源弃电量误差在 5% 以内,从而验证了该方法的有效性和实用性。同时,以雅砻江下游流域为例,分析了现规划阶段已建成的下游五个水电站对流域周边规划的新能源的平衡。该方法可以确定一定弃电率下新能源的装机规模和配比,可为未来大规模新能源并网电源规划提供一种可行的方法。

### 参考文献:

[1] 张玉胜. 水电互补型清洁能源系统容量配置与优化运行研究[D]. 天津大学, 2022.

[2] 王亮,向铁元,董峰,等. 含水电的区域风光容量优化配置[J]. 现代电力, 2015, 32(1):89-94.

[3] 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.

[4] 朱燕梅,邹祖建,黄炜斌,等. 金沙江上游典型电站水风光互补运行研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(4):78-85.

[5] 李伟楠,王现勋,梅亚东,等. 基于趋势场景缩减的水风光协同运行随机模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(8):120-127.

[6] 畅建霞,王义民,黄强,等. 水电与风电联合补偿调度机理研究与应用[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3):68-73+80.

[7] 陈森林,高仕春,万飏,等. 水电站水库运行与调度[M].

北京:中国电力出版社, 2008.

[8] 余志勇,陈浩,孙春顺,等. 基于改进粒子群算法的风光水蓄互补微电网优化运行研究[J]. 供用电, 2014 (7):58-61.

[9] 支悦,艾学山,董祥,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.

[10] 明波. 大规模水光互补系统全生命周期协同运行研究[D]. 武汉:武汉大学, 2019.

[11] 张歆萌,黄炜斌,王峰,等. 大型风光水混合能源互补发电系统的优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2019 (12): 181-185.

[12] 赵珍玉,张一,李刚,等. 风电并网条件下的梯级水电站长期优化调度[J]. 水力发电学报, 2020, 39(12): 62-75.

[13] ASHOFTEH P, BOZORG H O, LOAICIGA H A. Development of adaptive strategies for irrigation water demand management under climate change [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143 (2): 04016077.

[14] 马小莉. 流域风光水多能源互补特性及预测的不确定性研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2020.

[15] 周建中,李英海,肖刚,等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1212-1219.

[16] 鲁宗相,李海波,乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):9-20.

[17] 吴来群,王化中. 水电站与风电补偿运行探讨[J]. 西北水电, 2013(4):85-88.

### 作者简介:

闫林林(1996-),男,河南焦作人,工程师,硕士,从事新能源规划及多能互补工作;

李良县(1981-),男,四川广汉人,高级工程师,硕士,从事新能源规划及多能互补工作;

郁永静(1987-),女,河北邢台人,高级工程师,硕士,从事新能源规划及多能互补工作.

(编辑:吴永红)