

# 多时间尺度耦合的水风光一体化互补运行研究

周 佳, 陶湘明

(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:**随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,以水电、太阳能、风电为主的清洁能源迎来了前所未有的发展机遇,水风光一体化开发成为未来能源发展的重要方向。为促进新能源的消纳,同时平抑风光波动对电网安全稳定运行的影响,本文分别以年和日为时间尺度构建了“中长期—短期”多时间尺度耦合的水风光互补调度模型,并采用优化算法进行求解。研究成果表明,模型可通过适当调节水电年内出力过程,促进新能源消纳,并利用其调节能力强和启停迅速的特点,将日内随机波动的风电、光伏互补为稳定安全的优质电源,对水风光一体化互补运行有一定指导意义。

**关键词:**水风光一体化;互补运行;源荷匹配;出力波动

中图分类号: TN751.1; X382

文献标识码: A

文章编号: 1001-2184(2022)06-0001-05

## Study on Coupling Multi-time Scales Complementary Operation of Hydro-Wind-PV Integration

ZHOU Jia, TAO Xiangming

(PowerChina Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610072)

**Abstract:** With the proposal of the goal of emission peak and carbon neutrality, clean energy, mainly including hydropower, solar energy and wind power, has got unprecedented development opportunities, which also makes the integration of Hydro-Wind-PV an important direction of energy development in the future. In order to promote the absorption of new energy and reduce the impact of wind and solar fluctuations on the safe and stable operation of the power grid at the same time, a medium-long term and short-term coupling scheduling model is constructed in this paper, and optimization algorithms is applied to reach its solution. The results show that the model can promote the absorption of new energy by appropriately adjusting the annual output process of hydro-power, and take advantage of its strong regulation ability and rapid start and stop characteristics to complement the randomly fluctuating wind power and photovoltaic power within the day into a stable and safe high-quality power supply, which has certain guiding significance for the complementary operation of Hydro-Wind-PV integration.

**Key words:** Hydro-Wind-PV integration; Complementary operation; Matching of load and power; Output fluctuation

## 0 引言

“双碳”目标的提出,为新能源发展提出了宏伟蓝图:到 2030 年,全国风电、太阳能发电总装机容量将达到 12 亿千瓦以上<sup>[1]</sup>。

大规模风电、光伏直接并网后容易对局部电网形成冲击,对电网的稳定运行造成一定的影响,需通过电网中其他有调节能力的电源调节其出力波动。在保障电网安全的前提下,如何开展多种电源的互补运行以提高新能源消纳,已经成为当

前电力系统广泛关注的主要问题之一。通过将风电、光伏接入水电站,实施水风光一体化互补运行,利用水电良好的响应能力互补风光出力,形成优质稳定的出力后接入电网,将在一定程度上解决上述问题,为促进新能源的消纳提供有效途径。国家发改委、国家能源局《关于开展“风光水火储一体化”“源网荷储一体化”的指导意见(征求意见稿)》提出,因地制宜采取风能、太阳能、水能、煤炭等多能源品种发电互相补充,积极探索“风光储一体化”<sup>[2]</sup>。韩晓言等对近年来国内外可再生能源互补运行的研究现状进行了总结,分析了现有水

收稿日期: 2022-07-28

科技项目: 水风光储一体化关键技术及流域示范研究(P48821)

风光蓄互补模式,初步评价了水风光蓄互补运行状态<sup>[3-5]</sup>。安源等分别以黄河、金沙江上游、澜沧江、雅砻江、乌江流域为例,分析了典型水风光电站的出力特性和互补协调运行的机理及模式,探讨了梯级水库面临的协调运行问题并提出了相关建议<sup>[6-11]</sup>。上述研究成果主要基于对水风光一体化日内互补运行的研究,对于中长期水风光一体化互补运行以及“长—中—短期”互补运行的耦合问题较少涉及。本文提出一种水风光多时间尺度上的互补运行优化调度策略,以年内弃风光率最小和日内总出力波动最小(或源荷最佳匹配)为目标,构建“中长期—短期”多时间尺度耦合的水风光互补调度模型,采用优化算法进行求解,研究成果对水风光一体化调度运行管理及促进新能源消纳具有一定的参考价值。

## 1 水风光一体化互补运行模型

### 1.1 目标函数

#### 1.1.1 年内互补运行目标函数

$$\min \delta = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^T [E'_{solar}(i,j) + E'_{wind}(i,j)]}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^T [E_{solar}(i,j) + E_{wind}(i,j)]} \quad (1)$$

式中  $\delta$  为弃风弃光率;  $E_{solar}(i,j)$ 、 $E_{wind}(i,j)$  分别为光伏、风电第  $j$  时段第  $i$  小时的理论发电量,万 kWh;  $E'_{solar}(i,j)$ 、 $E'_{wind}(i,j)$  分别为光伏、风电第  $j$  时段第  $i$  小时的弃光和弃风发电量,万 kWh。

#### 1.1.2 日内互补运行目标函数

水电站利用自身水库的调节能力,在风、光电出力较大时,通过蓄水等方式降低水电站出力;在风、光电出力较小时,加大水电站出力,相当于把新能源电量以水库蓄水量的形式进行转化和在时间上重新分配,达到共同承担电力系统负荷的要求<sup>[12]</sup>。

电网对水风光一体化运行的出力需求主要可分为两类:(1)根据风电、光电出力的变化情况,调整水电出力,使水风光一体化互补运行总出力尽量稳定,保证输出到电网功率的平稳性;(2)使水风光一体化总出力满足目标电网的负荷变化需求。

据此,分别拟定两个目标函数:

(1)以总出力波动最小为目标

$$\min D_j = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (N(i,j) - \bar{N}_j)^2} \quad (2)$$

式中  $D_j$  为第  $j$  时段内水风光合计出力标准差;  $N(i,j)$  为第  $j$  时段第  $i$  小时水风光合计出力,万 kW;  $\bar{N}_j$  为第  $j$  时段水风光合计出力平均值,万 kW。

(2)以源荷匹配最佳为目标

$$\min D'_j = \sum_{i=1}^T [N(i,j) - N'(i,j)]^2 \quad (3)$$

式中  $D'_j$  为第  $j$  时段内水风光合计出力与受端电网负荷要求出力过程的偏差平方和;  $N(i,j)$  为第  $j$  时段第  $i$  小时水风光合计出力,万 kW;  $N'(i,j)$  为第  $j$  时段受端电网负荷要求出力过程或电网下达的调度曲线。

### 1.2 约束条件

#### 1.2.1 水量平衡约束

$$V(i+1,j) = V(i,j) + [q(i,j) - Q(i,j) - S(i,j)] \Delta t \quad (4)$$

式中  $V(i+1,j)$  为水电站第  $j$  时段内第  $i$  小时末蓄水量,  $m^3$ ;  $V(i,j)$  为水电站第  $j$  时段内第  $i$  小时初蓄水量,  $m^3$ ;  $q(i,j)$  为水电站第  $j$  时段内第  $i$  小时入库流量,  $m^3/s$ ;  $Q(i,j)$  为水电站第  $j$  时段内第  $i$  小时发电流量,  $m^3/s$ ;  $S(i,j)$  为水电站第  $j$  时段内第  $i$  小时弃水流量,  $m^3/s$ ;  $\Delta t$  为计算时段长度。

#### 1.2.2 水库水位约束

$$Z_{\min} \leq Z(i,j) \leq Z_{\max} \quad (5)$$

式中  $Z_{\min}$  为水电站水库最低运行水位,一般为死水位,  $m$ ;  $Z_{\max}$  为水电站允许的水库最高运行水位,一般为正常蓄水位,  $m$ 。

#### 1.2.3 水库下泄流量约束

$$Q_{\min} \leq Q(i,j) \leq Q_{\max} \quad (6)$$

式中  $Q_{\min}$  为水电站应保证的最小下泄流量或者生态流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{\max}$  为水电站最大发电引用流量,  $m^3/s$ 。

#### 1.2.4 水电站出力约束

$$N_{\min} \leq N_{hydro}(i,j) \leq N_{\max} \quad (7)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (i,j) = \overline{N_{hydro}(j)} \quad (8)$$

式中  $N_{\min}$  为水电站的允许的最小出力,一般为基荷出力要求或机组稳定运行要求,万 kW;  $N_{\max}$

为水电站预想出力,万 kW。 $\overline{N_{hydro}(j)}$  为第  $j$  时段内水电站平均出力,万 kW; $N_{hydro}(i,j)$  为第  $j$  时段内第  $i$  小时的水电出力,万 kW。

1.2.5 通道容量约束

$$\sum N(j) \leq L \quad (9)$$

式中  $\sum N(j)$  为水电、风电、光伏第  $j$  时段内合计出力,万 kW; $L$  为输电通道容量,万 kW。

1.3 模型求解算法

模型求解依次采用 POA 算法和遗传算法。首先,根据风光资源年内分配特点,采用 POA 算

法在水电站原有运行方式的基础上进行寻优,适当调整水电站年内出力分配,在风电、光伏较大的月份多蓄水少发电,反之则多发电,实现年内的互补。其次,采用遗传算法求解一个满足水风光一体化互补运行目标函数的水电日内出力分配过程;以水电站 24 h 逐时出力过程为“个体”,根据不同的水风光互补运行模式(即不同的目标函数)计算个体相应的适应度,通过繁殖、交叉、变异等操作最终求得水电日内出力分配过程,实现日内互补。模型求解计算流程见图 1。

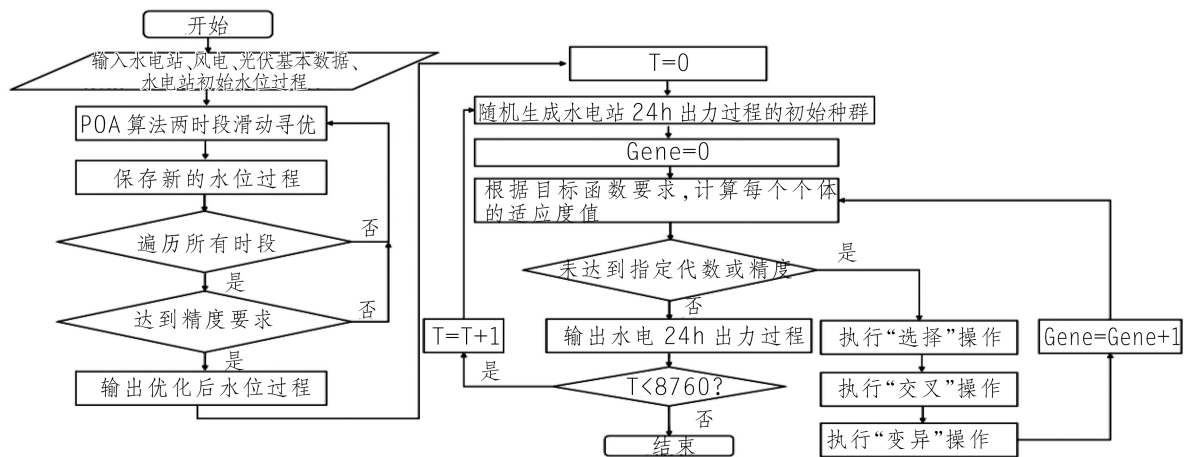


图 1 模型求解计算流程图

2 案例分析

2.1 电站及风光资源

(1)水电站。本文选取雅砻江流域两河口水电站作为研究对象。两河口水电站水库正常蓄水位 2 865.00 m,调节库容 65.6 亿 m<sup>3</sup>,具有多年调节能力。电站总装机容量 300 万 kW,发电引用流量 1 492 m<sup>3</sup>/s,多年平均发电量 110.0 亿 kWh。

(2)新能源。两河口水电站周边风能和太阳能资源丰富,接入两河口水电站的风光场址主要包括剪子湾山风电场、柯拉光伏场址,规模分别为 30 万 kW 和 320 万 kW,风电、光伏场址年内出力特性和风电、光伏场址日内出力特性见图 2、3。

从年内特性看,柯拉光伏电站出力冬春季略大,夏秋季略小,整体上月际变化较为平缓,年内差异较小;剪子湾山风电场出力月际变化较显著,呈冬春季大、夏秋季小的特点。总体而言,风、光年内出力特点与水电形成良好的互补性。

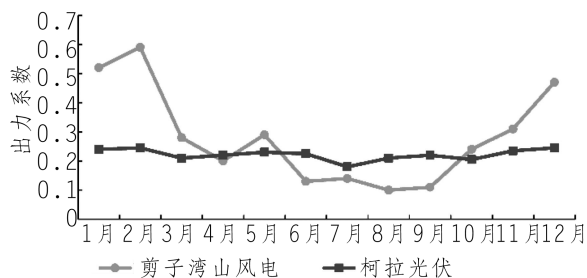


图 2 风电、光伏场址年内出力特性

从日内特性看,光伏只在白天发电,夜晚出力为零,日内波动幅度较大。风电日间出力相对较小,傍晚至夜间出力较大,峰值时间滞后于光伏出力峰值,两者互补性较弱,主要依靠水电站日内调节能力进行互补。

2.2 水风光互补运行原则及边界条件

(1)风电、光伏和水电的互补运行,以不影响水电承担原有的综合利用任务为前提。

(2)水电站在互补运行时,应满足水量平衡、水位运行区间(死水位~正常蓄水位)、最小下泄流量要求、不同水头下预想出力要求等边界条件

的约束。

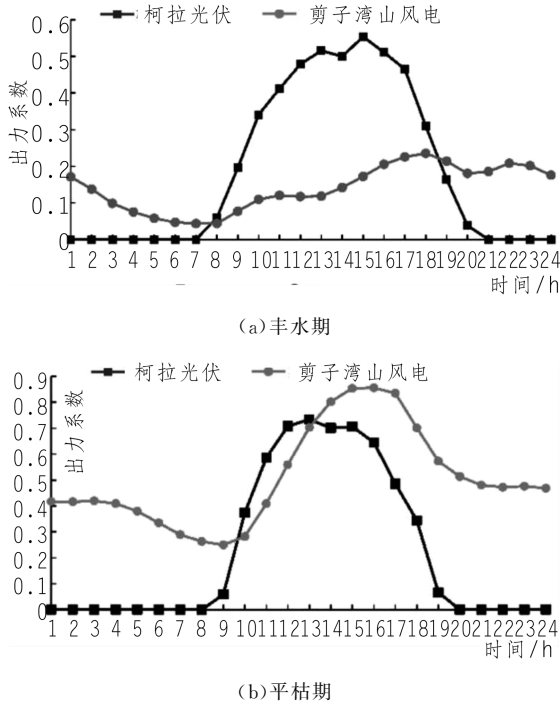


图3 风电、光伏场址日内出力特性

(3) 互补运行后,应满足水风光打捆出力不超过通道容量限制,通道容量为 300 万 kW。当水风光互补运行出力超过通道容量时,以不影响水电出力为原则,按照相同比例弃风和弃光进行考虑。

(4) 下游牙根一级水电站建成前,两河口水电站不间断泄放流量不低于  $112 \text{ m}^3/\text{s}$ ,牙根一级电站建成后,通过机组发电最小下泄流量  $125 \text{ m}^3/\text{s}$ 。两河口日内出力需在保证最小下泄流量的基础上,进行水风光互补运行。

(5) 两河口安装 6 台单机容量 50 万 kW 机组,总装机容量 300 万 kW,考虑水电出力特性,计划 12 月~翌年 5 月每月安排一台机组检修,机组检修月份水电站最大出力为 250 万 kW。

(6) 风电及光伏电站以全年 8 760 h 的出力过程参与互补运行,风电和光伏出力过程不可调。

## 2.3 水风光互补运行成果

### 2.3.1 年内互补运行

结合已建成年调节水库的调度运行经验,按照汛期等流量发电,枯水期等出力发电的运行模式可较好地模拟水库实际调度过程。因此,在计算中采用两河口水电站丰、平、枯水年汛期等流量发电,枯水期等出力的运行过程作为初始解,采用

POA 算法对两河口水电站代表年内发电过程进行优化,以促进风电和光伏消纳。丰水年水库调度运行优化前后弃风弃光率对比见图 4,可以看出,优化后 9 月份及 10 月份的弃风弃光率可分别减少 3.8% 和 7.7%,但在通道容量空闲相对较大的其他月份,调整水电站出力过程对于促进风电、光伏的消纳吸收作用不大。而对于平水年和枯水年,通过水库的调节,全年出力过程已经相对平缓,再优化水库运行方式和改变出力过程对弃风弃光率影响不大。研究发现,水电站年内运行方式的优化空间主要与水电站当年来水条件、电站原出力特性以及风电及光伏接入的规模等因素相关。

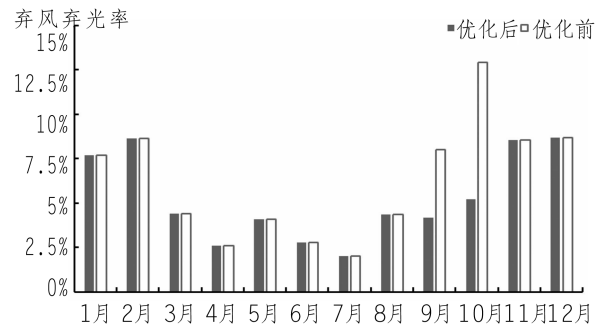


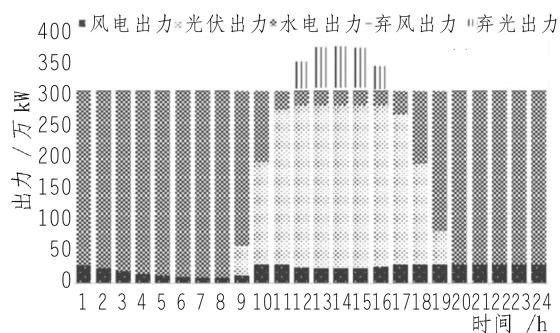
图4 水库调度运行优化前后弃风弃光率对比(丰水年)

### 2.3.2 日内互补运行

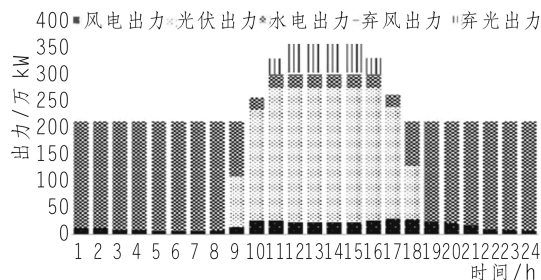
在上述水位优化过程的基础上,对水风光日内互补运行模型进行求解,以总出力波动最小互补模式和源荷匹配最佳互补模式得出的计算成果见图 5、6。

按照水风光出力波动最小的模式运行,丰水期,两河口电站日平均出力较大,通过自身调蓄能力在午间光伏出力高峰时段降低至基荷出力,在夜间风电、光伏出力低谷时段加大出力,全天维持平稳的出力过程。枯水期,两河口电站日平均出力降低,经过调蓄后可保证傍晚~翌日上午时段内出力稳定,但午间时段由于光伏出力较大,无法在全天内保持相同的出力过程。按照源荷匹配最佳的模式运行,两河口电站在午间降低出力,在晚高峰加大出力至装机容量参与调峰,以满足电网用电需求。枯水期,受水电站日平均出力下降的影响,晚高峰时水电站调峰幅度下降,部分容量发挥调峰作用。



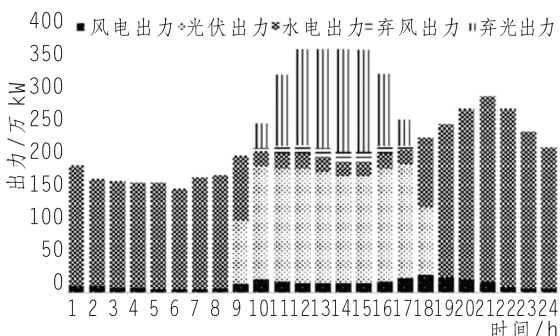


(a) 丰水期

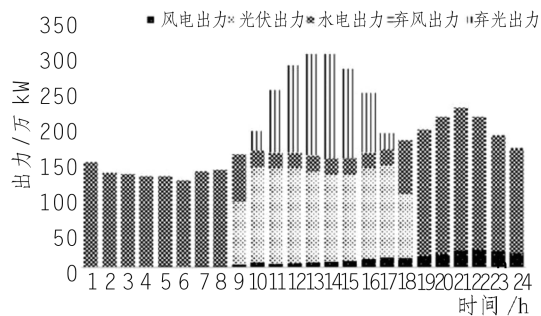


(b) 平枯期

图 5 总出力波动最小互补模式



(a) 丰水期



(b) 平枯期

图 6 源荷匹配最佳互补模式

### 3 结 语

水风光一体化互补运行是我国构建以新能源为主体的新型电力系统的重要支撑,目前研究成果多以水风光日内互补运行为主。考虑到大型水

库调节能力较好,可以在周、旬甚至月的时间尺度上对风光输出的波动进行互补,本文基于水库电站年内运行方式的优化,建立了“中长期—短期”多时间尺度的水风光互补调度模型,并通过智能算法进行求解,实现了不同时间尺度的水风光一体化互补运行的耦合,进一步降低了水风光一体化运行的弃风弃光率。该研究成果拓展了当前以日为单一时间尺度的水风光一体化研究思路,实现了丰富了水风光一体化互补运行模型的应用场景,对于年季调节电站的水风光一体化互补调度有较好的指导意义。未来可围绕多梯级、多约束、多目标的水风光一体化优化调度运行以及优化算法进一步开展研究。

#### 参考文献:

- [1] 国务院.《2030年前碳达峰行动方案》[Z]. 2021.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局.国家发展改革委、国家能源局关于开展“风光水火储一体化”“源网荷储一体化”的指导意义(征求意见稿)[Z]. 2020.
- [3] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等.梯级水光蓄互补联合发电关键技术研究与展望[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2709-2722.
- [4] 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.
- [5] 叶林,屈晓旭,么艳香,等.风光水多能互补发电系统日内时间尺度运行特性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 158-164.
- [6] 安源,方伟,黄强,等.水光互补协调运行的理论与方法初探[J]. 太阳能学报, 2016, (8): 1986-1992.
- [7] 刘娟楠,王守国,王敏.水光互补系统对龙羊峡水电站综合运用影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(9): 83-87.
- [8] 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.
- [9] 孙艺轩.基于多能源互补特性的水风光短期优化调度[D]. 大连理工大学, 2020.
- [10] 何思聪.雅砻江水风光互补与梯级水库协调运行研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(3): 130-137.
- [11] 周清平,赵乔,张艳青,等.乌江流域水风光一体化互补特性及运行研究[J]. 红水河, 2021, (6): 1-6.
- [12] 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.

#### 作者简介:

周 佳(1984-),男,湖南凤凰人,高级工程师,硕士研究生,主要从事水电水利规划经济、水库调度工作;

陶湘明(1991-),男,湖南益阳人,工程师,硕士研究生,主要从事水电水利规划经济、水库调度工作。

(责任编辑:卓政昌)