

对水电效益影响最小的水光互补运行方式研究

黄显峰¹, 颜山凯¹, 李大成², 吴迪², 李旭³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要:为解决水光互补之后光伏消纳率低的问题,在水光日内互补调度规则的基础上,充分考虑水电和光伏的互补特性,提出了水光月内互补调度规则,利用梯级水库的可调节性能适应光伏出力曲线。采用水光月内互补调度规则对澜沧江上游西藏段梯级水电站进行了互补后梯级水电站出力过程和光伏消纳率计算,结果表明,水光互补之后,水电与光电的合计发电量从55.835亿kW·h上升到了59.189亿kW·h,互补后的发电增益量为33.54亿kW·h,光伏消纳率提高了20%。

关键词:水光互补;光伏消纳率;梯级电站;水电站出力过程;互补调度规则;澜沧江

中图分类号:TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0015-06

Research on hydro-photovoltaic complementary rules for minimum influence on hydropower benefit//HUANG Xianfeng¹, YAN Shankai¹, LI Dacheng², WU Di², LI Xu³(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: In order to solve the problem of low photovoltaic absorption rate after water-solar complementation, the water-solar intra-month complementary scheduling rule was proposed for the first time on the basis of the water-solar intra-day complementarity rule. The complementary characteristics of hydropower and photovoltaics were fully considered by the scheduling rule, and the adjustable performance of cascade reservoirs was adapted to the photovoltaic output curve. Based on the water-solar complementary scheduling rules, taking the cascade power station in the Tibet section of the upper reaches of the Lancang River as an example, the calculation of the output process of the cascade power station and the photovoltaic consumption rate were carried out after complementation. The analysis results show that after the water-solar complementation, the total power generation of hydropower and photovoltaics increases from 55.835 billion kW·h to 59.189 billion kW·h, and the power generation gain after complementation is 3.354 billion kW·h, indicating a 20% increase of photovoltaic absorption rate.

Key words: hydro-photovoltaic complementary; photovoltaic absorption rate; cascade power station; hydropower station output process; complementary rules; Lancang River

水能、太阳能光伏均为清洁能源,水电出力受天然来水差异的影响,表现为丰水期出力大、枯水期出力小的特性。光伏出力因季节更替、云层厚度和天气变化等因素存在“间歇性、随机性和波动性”等人为不可控的特性,对电力系统的安全和稳定运行造成不利影响,还会在光伏发电高峰时段,因富余光电无法储存而出现大量弃光现象。因此要利用水电和光伏的特性,进行水光互补调度,以实现在尽可能小影响水电效益情况下提高光伏消纳率。水光互补是利用拥有调节能力水电站的调节补偿能力,对距离稍近的光伏电站优先进行补偿,并利用水电站多余调节能力,满足电网的电力负荷需求,提高波动性大

的光伏电站的消纳,最终实现水电站和光伏电站发电的效益最大化^[1]。

风能、水能、太阳能等清洁能源的并网消纳仍有很多问题,为了使这些清洁能源能够最大限度地被电网消纳吸收,学者们进行了大量研究。安源等^[1]建立了水光日内互补协调运行模型,改善了光伏的发电质量,并提高了光伏的利用率,减少了光伏电量的损失;贾一飞等^[2]研究了单库水电站与光伏电站的互补调度,建立了水光互补短期优化调度模型,使得水光互补系统在不产生弃水的情况下,仅产生少量弃光,提高了光伏利用率;朱燕梅等^[3]建立了风光水互补发电优化模型,以弃风光电量最小和接入

的风光总规模最大为目标对模型进行求解,结果表明这种互补发电模式减小了弃风量和弃光量,提高了清洁能源的利用率。以上学者主要是对风-光-水等清洁能源的日内互补方式进行研究,一定程度上提高了清洁能源的通道利用率。

本文在水光日内互补的基础上,进一步加大水光互补的力度,进行水光月内互补,在对水电效益影响尽可能小的情况下研究互补运行方式,提出了水光月内互补调度规则,并以澜沧江上游西藏段梯级水电站为例进行了计算分析。

1 水光日内互补规则

1.1 水光不互补

水光不互补指的是原水电出力过程与原光伏出力过程简单叠加,得到逐时的水电与光伏叠加出力过程(以下简称水光合计)。通道为水电与光伏出力叠加之后,水光合计的出力上限,若水光合计超出通道,则需要弃光或弃水^[4]。

1.2 水光日内互补

1.2.1 水光日内互补原理

水光日内互补是指在水光不互补的基础上,利用水库的可调节性能,通过降低水光合计出力超通道时段的水电出力,腾出一定输电通道给光伏出力,使光伏电量得到最大化的消纳利用^[1]。同时,为了保证水电出力日内平衡,要尽量在光伏出力较小且受端用电高峰时段(9:00—21:00)加大水电出力。若用电高峰时段水电的出力不能平衡,则继续在用电低谷时段(0:00—8:00、22:00—24:00)加大水电出力,直到水电出力达到日内平衡^[5]。即保证一日之内不产生弃水的情况下,尽可能地消纳光伏。

但降低出力和加大出力是有限度的,亦即瞬时梯级出力上下限。瞬时梯级出力上限指当前预想出力,预想出力最大值为基地水电总装机容量。瞬时梯级出力下限为每个电站单机容量的一半之和。

汛期水电、光伏整体出力以承担基荷为主,最大限度利用通道能力送出水电和光伏电量。枯期水电出力总体较小,可利用水电调节能力调节水电日出力过程,参与受端调峰运行^[6]。在光伏出力大且用电高峰时段,为了消纳更多的光伏,水电出力可能会降至瞬时梯级出力下限以下,这时只能牺牲一部分光伏,让水电达到瞬时出力下限,以保证坝址下游生态流量^[7];若光伏出力小且当日来水较多,水电出力较大,在用电高峰时段降低水电出力之后,要在用电低谷时段加大水电出力^[8],使当日水电出力达到平衡,但加大后的水电出力不可以超过瞬时梯级上限。

结合水电站具有快速启停或调整发电出力的优

点,采用水电消纳光电即为水光互补,在光伏出力高峰时段超出电网通道时发生弃光,需要水库减小发电流量,降低该时段的水电出力,将该时段水光合计出力整体降低,原超出通道的光伏出力回落至通道以内,这部分由弃光变为可并网的光电,即为被水电消纳的光电;在光伏出力低峰段,水库增加发电流量,加大该时段的水电出力,保证水电出力平衡的同时平抑光电单独并网时的波动性。综上,通过水光互补打捆并网,可有效提高光伏利用率,同时提高光电并网时的电能质量。

1.2.2 需调和可调的概念

水光合计出力为光伏出力与梯级水电出力逐时叠加的出力过程,计算公式为

$$N_i = N_{i,h} + N_{i,p} (i = 1, 2, \cdots, 24) \quad (1)$$

式中: N_i 为水光互补系统日内第*i*个时段的水电与光伏的合计出力,万kW; $N_{i,h}$ 、 $N_{i,p}$ 为水光互补系统日内第*i*个时段的水电出力、光伏出力,万kW。

水电需调出力(简称需调)是为了保证不产生弃光,在水光合计出力超过通道的时段需要降低的梯级水电出力,亦即水电可以降低的出力下限,即当 $N_i < N_{i,c}$ 时, $N_{i,na} = 0$;当 $N_i > N_{i,c}$ 时, $N_{i,na} = N_i - N_{i,c}$,其中 $N_{i,c}$ 为水光互补系统日内第*i*个时段通道的容量,万kW, $N_{i,na}$ 为水光互补系统日内第*i*个时段梯级水电需要降低的出力,万kW。

水电的可调出力(简称可调)为通道剩余出力空间和梯级水电剩余出力空间的较小值,亦即水电可以增加的出力上限,公式如下:

$$N_{i,ca} = \min \{ N_{i,cr}, N_{i,hr} \} \quad (2)$$

式中: $N_{i,ca}$ 、 $N_{i,hr}$ 分别为水光互补系统日内第*i*个时段梯级水电出力的可调出力、剩余出力空间,万kW; $N_{i,cr}$ 为水光互补系统日内第*i*个时段通道的剩余空间,万kW。

当可调和需调不断变化时,就会出现3种情况:

- ①可调=需调,即 $\sum_{i=1}^{24} N_{i,ca} = \sum_{i=1}^{24} N_{i,na}$ 时,日内水电可以加大出力的总和与水电需要减小出力的总和恰好相等。既不会产生弃光,又不会浪费水电的可调节能力(图1(a))。图1(a)中蓝色的水电可调节出力的面积恰好等于红色水电需调出力的面积。②可调>需调,即 $\sum_{i=1}^{24} N_{i,ca} > \sum_{i=1}^{24} N_{i,na}$ 时,通过改变水电出力,可以把水光叠加出力超过通道而弃掉的那一部分光伏出力完全消纳。此时通过日内互补调节便可以把光伏完全消纳,光伏的消纳率达到100%,如图1(b)所示,图中蓝色水电可调节出力的面积大于红色水电需调出力的面积。③可调<需调,即 $\sum_{i=1}^{24} N_{i,ca} <$

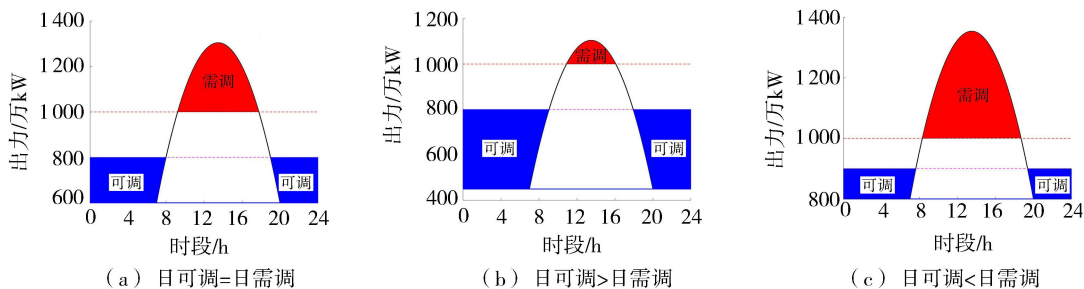


图1 日可调、日需调关系

$\sum_{i=1}^{24} N_{i,na}$ 时,通过对水电出力过程进行调整,可以消纳掉一部分原来要弃掉的光伏出力,但仍有一部分超通道的光伏出力需要弃掉。此时通过日内互补调节不能把光伏出力完全消纳,当日的光伏消纳率达不到百分之百,需要进行月内的水光互补,如图1(c)所示,图中蓝色水电可调节出力的面积小于红色水电需调出力的面积。

1.2.3 互补光伏消纳率

弃光出力为水电需调出力与可调出力之差:

$$N_{i,pd} = \begin{cases} 0 & N_{i,na} \leq N_{i,ca} \\ N_{i,na} - N_{i,ca} & N_{i,na} > N_{i,ca} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $N_{i,pd}$ 为水光互补系统日内第 i 个时段弃光出力,万 kW。

$N_{i,na} \leq N_{i,ca}$ 时,说明水库可以利用自身的调节能力调整一日之内的出力过程,使得该日的光伏被完全消纳,不会产生弃光(图1(a)(b)); $N_{i,na} > N_{i,ca}$,说明水库通过一日之内的出力调整之后,已用尽当日的可调节能力,但是仍不能将当日的光伏出力完全消纳,从而产生弃光^[9](图1(c))。

光伏消纳率的计算公式为

$$\alpha = (\sum N_{i,p} - \sum N_{i,pd}) / \sum N_{i,p} \quad (4)$$

式中 α 为水光互补系统日内光伏消纳率,%。

2 水光月内互补规则

2.1 水光月内互补原理

进行水光月内互补时,首先要确定每日的临界出力,即为了保证一个月中的每一天均恰好不产生弃光,梯级水电站每天需要在原出力过程的基础上增加或减小后的出力,需要分为2种情况。

a. 进行日互补后,如果当月的总需调小于总可调,说明在月互补之后,光伏出力可以被完全消纳。此时,若当日的原梯级出力大于临界出力,则月互补后的日均梯级出力为

$$N_{k,hm} = N_{k,l} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式中 $N_{k,hm}$ 为水电需降低出力天数中第 k 天月互补

后的梯级出力,万 kW; $N_{k,l}$ 为水电需降低出力天数中第 k 天的临界出力,万 kW; m 为月内需要降低出力的总天数。

若当日的原梯级出力小于临界出力,则月互补后的日均梯级出力为

$$N_{j,hm} = N_{j,h} + N_{j,z} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中

$$N_{j,z} = \min \{ N_{j,z}, N'_1 \}$$

式中: $N_{j,hm}$ 为水电可增加出力天数中第 j 天月互补后的梯级出力,万 kW; $N_{j,h}$ 为水电可增加出力天数中第 j 天的原梯级出力,万 kW; $N_{j,z}$ 为第 j 天水电可以增加的出力值,万 kW; N'_1 为修正后的临界出力(水电加大出力),万 kW,可通过式(7)迭代计算求得; n 为月内可以增加出力的总天数。

$$\sum_{j=1}^n \min \{ N_{j,z}, N'_1 \} = \sum_{k=1}^m N_{k,r} \quad (7)$$

式中 $N_{k,r}$ 为第 k 天水电需要减少的出力值,万 kW。

b. 在日内互补之后,如果这个月的总需调大于总可调,说明当月光伏出力不能被完全消纳。此时,若当日的原梯级出力小于临界出力,则月互补后的日均梯级出力为

$$N_{j,hm} = N_{j,l} \quad (8)$$

式中 $N_{j,l}$ 为水电可增加出力天数中第 j 天的临界出力,万 kW。

若当日的原梯级出力大于临界出力,则月互补后的日均梯级出力为

$$N_{k,hm} = N_{k,h} + N_{k,r} \quad (9)$$

其中

$$N_{k,r} = \min \{ N_{k,r}, N''_1 \}$$

式中: $N_{k,h}$ 为水电需降低出力天数中第 k 天的原梯级出力,万 kW; N''_1 为修正后的临界出力(水电降低出力),万 kW,可通过式(10)迭代计算求得。

$$\sum_{k=1}^m \min \{ N_{k,r}, N''_1 \} = \sum_{j=1}^n N_{j,z} \quad (10)$$

2.2 月互补光伏消纳率

将月互补后的梯级出力和原光伏出力过程进行叠加,得到水光合计出力,如果水电出力加上光伏出力大于通道,说明必须弃光,每个月的弃光出力之和为

$$\sum_{i=1}^{24d} N_{i, pd} = \sum_{i=1}^{24d} (N_{i, hm} + N_{i, p} - N_t) \quad (11)$$

式中： $N_{i, hm}$ 为第 i 个时段的月互补后水电出力，万 kW； N_t 为通道出力，万 kW； d 为月内总天数。

则当月的光伏消纳率的计算公式为

$$\alpha = \sum_{i=1}^{24d} (N_{i, p} - N_{i, pd}) / \sum_{i=1}^{24d} N_{i, p} \quad (12)$$

3 实例分析

3.1 区域概况

澜沧江流域干流全长约 4 500 km，总落差约 5 060 m，流域面积约 74.4 万 km²，多年平均流量约 18 300 m³/s^[10]。澜沧江水光互补项目由澜沧江上游西藏段梯级水电站和光伏电站组成。由上而下依次是班达、如美、邦多、古学、曲孜卡、古水水电站，其中如美水库具有年调节能力，在上游梯级水电站中担任主要的调节任务。各水电站基本参数见表 1。

表 1 各水电站基本参数

水电站	装机容量/ MW	装机 台数	正常 蓄水位/m	死水 位/m	调节 库容/ 亿 m ³	年发电量/ (亿 kW·h)	调节 性能
班 达	1 500	4	3 054	3 024	8	52.3	周调节
如 美	2 600	4	2 895	2 815	24.33	104.8	年调节
邦 多	720	4	2 605	2 600	0.12	34.25	日调节
古 学	2 100	4	2 535	2 530	0.45	85.01	日调节
曲孜卡	405	3	2 345	2 335	0.13	18.29	无调节
古 水	2 200	4	2 267	2 235	6.34	87.08	季调节

光伏电站主要分布在芒康县（约 680 万 kW）、贡觉县它岭场址（约 200 万 kW）。其他 1 720 万 kW 光伏主要分布在澜沧江右岸的左贡县、察雅县、八宿县。澜沧江西藏段清洁能源基地水电与光伏的分布存在水电一条线、光伏一大片、水电与光伏场址相对较远的特点。该水光互补项目是水电和光伏共用一个外送通道，外送通道输电能力 1 000 万 kW。

广东省的用电特性为 9:00—21:00 用电需求大，用电比较集中，为用电高峰时期；0:00—8:00、22:00—24:00 用电需求小，为用电低谷时段。广东省典型日电网负荷曲线如图 2 所示，汛期代表月（8 月）和枯期代表月（12 月）逐时光伏出力过程如图 3 所示。

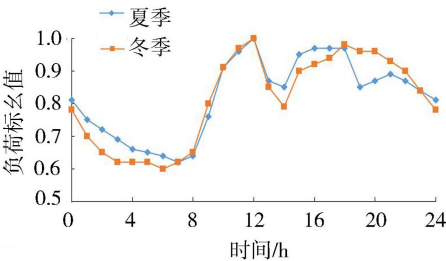


图 2 广东省典型日电网负荷曲线

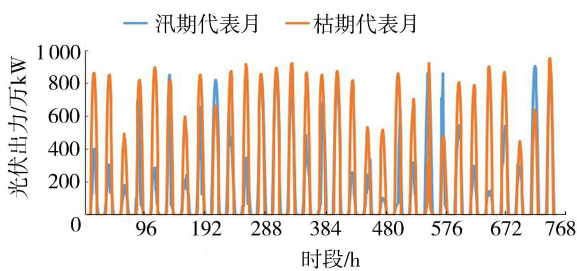


图 3 汛期、枯期代表月光伏出力过程

3.2 计算结果及分析

光伏发电与水电捆绑汇集，光伏的出力直接受到水电出力的影响，光伏出力已知的情况下，考虑通道的限制与梯级水电出力上限限制等因素，通过调节水电站的出力满足水光互补的要求。构建以水光互补年总电量最大为目标函数，以水量平衡、上下游水力联系、水位限制、发电流量限制、水电站出力约束、通道限制等为约束条件的中长期调度模型，采用分段粒子群算法求解，计算梯级水电站的出力过程^[11]。

在进行水光互补时，梯级出力过程进行了调整，光伏消纳率也会随之发生变化。根据光伏消纳率计算公式得到平水年各个月份水光不互补、水光日内互补以及水光月内互补后的光伏消纳率，而且在水光互补的过程中，水电发电效益受到的影响很小，具体计算结果见表 2、表 3。

由表 2 可见，水光不互补时，平水年各月的光伏消纳率均未达到 100%，也就是说此时平水年各月都要弃光。进行日互补之后，只有汛期的 6—9 月的光伏消纳率没有达到 100%。进行月互补之后，光伏消纳率进一步提升，只有 7 月的光伏消纳率是 94.19%，其余各月的光伏消纳率均达到了 100%。纵观平水年这一年，光伏消纳率从水光不互补的 79.62%，到水光日内互补的 93.11%，再到水光月内互补的 99.62%；光伏消纳量从水光不互补的 133.61 亿 kW·h，到水光日内互补的 156.24 亿 kW·h，再到水光月内互补的 167.16 亿 kW·h，光伏消纳率和光伏消纳量都在逐步提升。

由表 3 可见，虽然水光互补作用下，平水年的光伏消纳率得到了大幅提升，然而，梯级水电站在水光互补前、后的发电量均为 424.7 亿 kW·h，说明水电的发电效益在进行水光互补后并没有产生损失。这样既充分满足了水电的发电要求，在保证不弃水的情况下，光伏消纳率也几乎达到了 100%。在水光互补之后，水电与光电的合计发电量也从 558.35 亿 kW·h 上升到了 591.89 亿 kW·h，互补后的发电增益量为 33.54 亿 kW·h，水光合计发电效益提高了 6%，极大地发挥了两者的效益，进一步地提高了清洁能源的使用效率。

表 2 平水年水光日互补、月互补计算结果

月份	光伏电量/ (万 kW · h ⁻¹)	不互补光伏消纳量/ (万 kW · h ⁻¹)	不互补光伏 消纳率/%	日互补光伏消纳量/ (万 kW · h ⁻¹)	日互补光伏 消纳率/%	月互补光伏消纳量/ (万 kW · h ⁻¹)	月互补光伏 消纳率/%
6	117 503.84	87 694.37	74.63	106 463.59	90.60	117 503.66	100
7	110 032.61	46 229.11	42.01	60 621.60	55.09	103 635.93	94.19
8	113 946.60	56 130.22	49.26	87 648.08	76.92	113 946.60	100
9	123 125.31	62 496.65	50.76	94 316.70	76.60	123 125.30	100
10	152 457.27	97 874.80	64.20	152 457.27	100	152 457.27	100
11	156 289.05	138 641.61	88.71	156 289.05	100	156 289.05	100
12	165 272.92	152 981.58	92.56	165 272.92	100	165 272.92	100
1	163 428.92	149 657.10	91.57	163 428.92	100	163 428.92	100
2	151 337.99	138 047.08	91.22	151 337.99	100	151 337.99	100
3	156 593.36	151 109.24	96.50	156 593.36	100	156 593.36	100
4	132 676.38	124 968.55	94.19	132 676.38	100	132 676.38	100
5	135 365.41	130 246.03	96.22	135 365.41	100	135 365.41	100
合计	1 678 029.66	1 336 076.34	79.62	1 562 471.26	93.11	1 671 632.79	99.62

表 3 平水年水光月互补前后水电、光伏发电量

月份	水电发电量/(万 kW · h ⁻¹)		合计发电量/(万 kW · h ⁻¹)	
	互补前	互补后	互补前	互补后
6	451 095.55	451 089.55	538 789.92	568 593.21
7	615 866.58	615 859.58	662 095.69	719 495.50
8	570 022.42	570 014.42	626 152.64	683 961.02
9	543 649.48	543 640.48	606 146.13	666 765.78
10	474 644.52	474 634.52	572 519.32	627 091.79
11	270 194.90	270 183.90	408 836.51	426 472.95
12	220 818.08	220 806.08	373 799.66	386 079.00
1	220 893.79	220 892.79	370 550.88	384 321.70
2	205 824.77	205 822.77	343 871.84	357 160.75
3	202 419.96	202 416.96	353 529.21	359 010.33
4	205 485.77	205 481.77	330 454.32	338 158.15
5	266 468.25	266 463.25	396 714.28	401 828.66
合计	4 247 384.05	4 247 306.05	5 583 460.40	5 918 938.84

对于日调节水库,一般只进行水光日内互补;对于年调节及多年调节水库,则可以进行月内互补和年内互补。如美水库为年调节水库,因此要考虑月内互补和年内互补。因为平水年来水过程比较均匀,更具有代表性,所以典型年选取平水年作为代表年,且平水年不同时期的来水过程存在差异,水电出力过程也各不相同。在汛期(6—10月),澜沧江流域天然来水量大,各日的水电出力也较大;在枯期(11月至次年5月)来水较小,各日的水电出力也较小。平水年汛期和枯期中各选取一个月作为代表月,汛期取8月,枯期取12月,按照文中所述梯级调度规则进行水光互补,得到各代表月互补前后梯级出力过程如图4所示。

由图4可知,汛期8月出力过程互补后的梯级出力更加合理。在8月9日、12日、13日、14日、17日、23日、25日、28日、30日、31日原水光合计出力均大于1 000万kW,超过通道出力能力,若不进行互补只能弃光,光伏消纳率就相对较小。因此,在进行月互补时,这几天的梯级出力都适当地减小,同

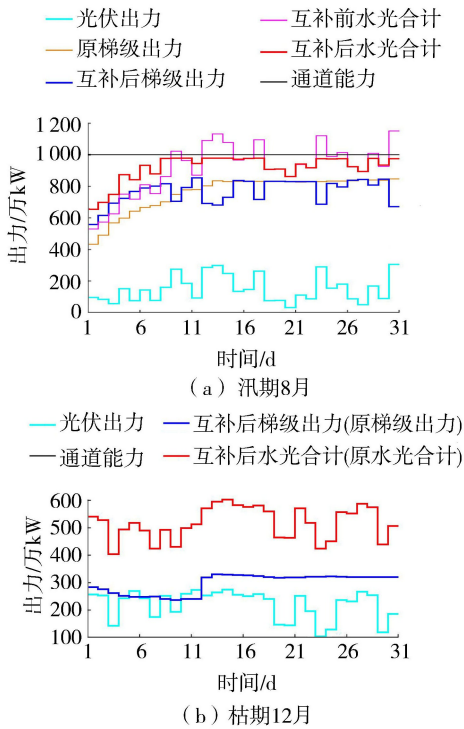


图 4 汛期 8 月和枯期 12 月出力过程

时为了保证当月水电发电效益受到的影响尽可能小,将该月剩余 21 天的梯级出力在原梯级出力的基础上适当增加。最后得到的原梯级出力和互补后梯级出力之和相等,即尽可能小的影响水电效益,且互补后每日的水光合计出力过程没有超过通道的现象,也就是说汛期 8 月在互补后既不弃水也不弃光。

枯期原水光合计出力没有超过通道的情况,因此不会出现弃光的现象,所以梯级出力过程不需要调整,也不需要考虑临界出力的作用,枯期互补前后的梯级出力过程一致。

4 结 语

针对光伏利用率偏低的问题,提出了梯级水电

站的调度规则,该规则既可以充分保证水电的效益不受损失,又可以显著提高光伏的利用率,水光互补之后澜沧江上游西藏段梯级水电站可以使光伏消纳率提高 20%,在互补的同时梯级水电站的发电效益也没有受到损失,水光合计发电效益也提高了 6%。该调度规则为水电和光伏的互补调度提供了新思路,为提高多种清洁能源的利用率提供了新方法。

当前水光互补是出力平衡和水量平衡分开考虑的,梯级调度得到的是整个梯级电站总体的出力过程。在今后的研究中,要在此研究的基础上,将出力平衡和水量平衡同时考虑进来,并将梯级整体的出力过程具体分配到各个电站。

参考文献:

[1] 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,2016,37(8):1985-1992. (AN Yuan, FANG Wei, HUANG Qiang, et al. Preliminary research of theory and method of hydro-solar complementary operation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2016,37(8):1985-1992. (in Chinese))

[2] 贾一飞,林梦然,董增川. 龙羊峡水电站水光互补优化调度研究[J]. 水电能源科学,2020,38(10):207-210. (JIA Yifei, LIN Mengran, DONG Zengchuan. Research on optimal of hydro photovoltaic complementarity in Longyangxia Hydropower Station [J]. Water Resources and Power,2020,38(10):207-210. (in Chinese))

[3] 朱燕梅,陈仕军,黄炜斌,等. 一定弃风光率下的水光风互补发电系统容量优化配置研究[J]. 水电能源科学,2018,36(7):215-218. (ZHU Yanmei, CHEN Shijun, HUANG Weibin, et al. Optimal capacity configuration of hydro-photovoltaic-wind complementary power generation system under wind and photovoltaic curtailment [J]. Water Resources and Power,2018,36(7):215-218. (in Chinese))

[4] MARGETA J, GLASNOVIC Z. Theoretical settings of photovoltaic-hydro energy system for sustainable energy

production[J]. Solar Energy,2012,86(3):972-982.

[5] 李蒙. 多年调节水库水-光互补调度研究[D]. 天津:天津大学,2018.

[6] 陈文伯,李灿,姚李孝. 梯级水电站与光伏电站的联合优化运行[J]. 电网与清洁能源,2017,33(8):113-117. (CHEN Wenbo, LI Can, YAO Lixiao. Joint optimal operation of cascaded hydropower station and photovoltaic power station [J]. Power System and Clean Energy,2017,33(8):113-117. (in Chinese))

[7] 田旭,张祥成,白左霞,等. 青海省水电与光伏互补特性分析与效果评价[J]. 电力建设,2015,36(10):67-72. (TIAN Xu, ZHANG Xiangcheng, BAI Zuoxia, et al. Characteristic analysis and effect evaluation of synergy between hydropower and photovoltaic power in Qinghai Province [J]. Electric Power Construction,2015,36(10):67-72. (in Chinese))

[8] PÉREZ CIRIA T, PUSPITARINI H D, CHIOGNA G, et al. Multi-temporal scale analysis of complementarity between hydro and solar power along an alpine transect [J]. Science of the Total Environment,2020,741:140179.

[9] 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. (PANG Xiulan, ZHANG Wei. Hydro-photovoltaic complementary technology research and application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(7):1-13. (in Chinese))

[10] 王政祥. 澜沧江流域近 15 年水资源及其利用状况分析[J]. 人民长江,2018,49(22):40-44. (WANG Zhengxiang. Analysis of water resources and utilization in Lancang River Basin in 2003-2017 [J]. Yangtze River,2018,49(22):40-44. (in Chinese))

[11] 黄显峰,格桑央拉,吴志远,等. 水光互补能源基地的多时间尺度优化调度[J]. 水力发电,2022,48(1):106-111. (HUANG Xianfeng, KELSANG Yartha, WU Zhiyuan, et al. Multi-time scale optimization scheduling of hydro-photovoltaic complementary energy base [J]. Water Power,2022,48(1):106-111. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-27 编辑:刘晓艳)

(上接第 14 页)

[18] 尹星,权力. 基于 BWM 的反坦克分队打击目标模糊优选[J]. 指挥控制与仿真,2021,43(2):76-81. (YIN Xing, QUAN Li. Fuzzy optimization of antitank element attacking target based on Best-Worst Method [J]. Command Control & Simulation,2021,43(2):76-81. (in Chinese))

[19] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems;the critic method[J]. Computers & Operations Research,1995,22(7):763-770.

[20] 张玉,魏华波. 基于 CRITIC 的多属性决策组合赋权方法[J]. 统计与决策,2012,28(16):75-77. (ZHANG

Yu, WEI Huabo. Combined weighting method of multi-attribute decision making based on critical [J]. Statistics and Decision,2012,28(16):75-77. (in Chinese))

[21] 朱雪龙. 应用信息论基础[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

[22] 王子悦,徐慧,黄丹姿,等. 基于熵权物元模型的长三角幸福河层次评价[J]. 水资源保护,2021,37(4):69-74. (WANG Ziyue, XU Hui, HUANG Danzi, et al. Hierarchy evaluation of Happy River in the Yangtze River Delta based on entropy weight and matter element model [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):69-74. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-30 编辑:俞云利)