

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.009

水光互补基地水库调度图绘制及应用策略

尹丽君¹, 许 昌², 黄显峰¹, 吴志远¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学新能源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对水光互补基地调度问题, 提出了一种新的水库调度图绘制方法, 该方法根据来水频率分组进行水库调度图绘制, 并给出了水库调度图的应用策略。澜沧江上游西藏段实例应用结果表明, 该方法所得结果符合工程实际要求, 有利于电网的稳定运行, 提高了混合发电系统的发电效益。

关键词: 清洁能源基地; 水光互补; 来水频率; 水库调度图; 应用策略; 梯级水电站

中图分类号: TV697.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)05-0065-05

Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir

YIN Lijun¹, XU Chang², HUANG Xianfeng¹, WU Zhiyuan¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of New Energy, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To solve the dispatching problem of water-light complementary base, a new drawing method of reservoir dispatching diagram is proposed according to the frequency group of incoming water, and the application strategy of reservoir dispatching diagram is provided. Taking the Xizang section of the upper reaches of Lancang River as an example, the results obtained by the proposed method meet the practical requirements of the project, benefit the stable operation of the power grid, and improve the efficiency of the power station.

Key words: clean energy base; water-light complement; inflow frequency; reservoir dispatching diagram; application strategy; cascade hydropower station

为了全力实现“双碳”目标,我国能源结构转型重点放在绿色能源的转型上,水力发电、风力发电、太阳能发电等多种绿色清洁能源的联合利用成为我国能源转型和发展的重点和规划方向。但是光伏发电普遍存在波动幅度大、随机性强和间接性突出等特点,大量光伏发电接入水电站将会导致电网稳定输电过程产生一系列问题,使电网也无法持续稳定的工作。水电机组能够灵活开闭,有较好的调节性能,对光伏发电的不稳定出力具有较好的平抑作用。由于水力与电力关系复杂,系统的调度运行受到能源的多种随机性的影响,同时电网电站受多种约束条件限制,因此如何合理进行水光互补调度成为亟须解决的问题。目前,雅砻江、金沙江、乌江等大型水电基地开展了水风光多能互补研究^[1],建设了一批风光试点项目。如羊峡水光互补发电站,通过水光互补技术实现了水力发电和光伏发电快速补偿的功能,解决了光伏发电的弃电和并网难题。目前我国清洁能源互补基地多依托大型流域建设,利用水电调节性能达到平抑光伏波动的效果,从而实现水光互补调度的稳定运行。

国内外学者对水光互补调度图已经开展了许多研究:明波等^[2]对水光互补中长期随机优化调度方法进行评估,基于参数-模拟-优化方法定制水光互补调度图,有效提高了发电量和发电保证率。黄显峰等^[3]建立

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0128500);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B230202006);中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ20-H20);江苏省水利科技项目(2020065)

作者简介: 尹丽君(1999—),女,硕士研究生,主要从事水光资源规划调度研究。E-mail:1215557436@qq.com

通信作者: 黄显峰(1980—),男,副教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:hxfhuang2005@163.com

引用本文: 尹丽君,许昌,黄显峰,等. 水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):65-69.

YIN Lijun, XU Chang, HUANG Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 65-69.

不同调度周期的逐步递进水光互补优化模型,有效提高了光电消纳率,提升了水光系统总发电效益。王立平等^[4]提出了一种基于水光互补的多虚拟电厂两阶段优化调度方法,有效降低了光伏固有的随机性以及可中断负荷响应的不确定性对系统运行和决策的影响,提高了能源利用率。李秀峰等^[5]基于等效电厂的梯级水光短期互补调度方法,发挥了不同调节类型水电站对光伏电互补的作用,提升水光整体调峰效果。郭晓雅等^[6]建立嵌套决策相应函数的优化调度模型,提高了系统发电量及保证率。Opan 等^[7]以发电量最大为目标开展了水风长期优化调度研究,根据比较实例计算发电量可知发电量类似的情况均高于无风电情景。Yang 等^[8]基于以最大化系统发电量和发电保证率为目标建立的确定性水光互补优化调度模型,结合隐随机优化方法,提取了水光混合发电系统的长期调度规则。Singh 等^[9]建立了以发电成本最小为目标的水火光长期优化调度模型,嵌套了短期优化调度模块,能够有效降低发电成本。

目前国内外针对水光互补的调节方法重点在调度模型建立和优化方法,针对光伏发电接入水电站方面的研究尚不充分,对水光互补水库调度图的具体绘制方法更是少有研究。为此,本文针对澜沧江上游实际情况,创新调度图绘制方法,按照来水频率分组绘制水光互补优化调度图,并给出相应的应用策略,以期能为清洁能源基地水光互补调度运行提供理论支撑。

1 水光互补水库调度图绘制方法

水光互补水库调度图作为一种长期调度规则,旨在利用光伏、水能资源的季节性分布规律和互补特性,提高混合发电系统在长时间尺度的发电效益^[10]。常规水库调度图通常以调度所在时段和当前水库水位状态作为决策依据,不能有效利用光伏出力和径流等信息。在常规水库调度图的基础上,本文针对水光互补系统,提出适用水光互补系统的水库调度图绘制方法。

1.1 代表年的选择和处理

代表年的选取方法分为按供水期水量选取、按年水量选取、按供水期平均出力选取 3 种。本文以长系列的蓄水期水量为挑选代表年的标准。因蓄水期的水量大小对水光互补的弃光较敏感,故本文对长系列的蓄水期水量进行分组,根据水量频率分为>50% ~ 60%、>60% ~ 70%、>70% ~ 80%、>80% ~ 90%、>90% ~ 100% 共 5 个蓄水期径流组,分别绘制对应的 5 个水库调度图。

1.2 调度图绘制步骤

- a. 将汛期径流资料进行排频;根据排频结果将资料分为>50% ~ 60%、>60% ~ 70%、>70% ~ 80%、>80% ~ 90%、>90% ~ 100% 的 5 个汛期径流组。
- b. 选择第 n 个汛期径流集的第 m 个代表年;根据此代表年的汛期流量和对应年份的光伏出力,按每月的临界出力自蓄水期初的死水位顺时序逐时段计算至水库蓄满,确定每个典型年的蓄满月份。
- c. 由 b 得到的蓄满月份的月末开始,再按每月临界出力逆时序逐时段计算至蓄水期初得到蓄水过程线;将此线加入第 n 个蓄水过程线集;循环步骤 b、c 直至所有代表年均计算完成。
- d. 由于各代表年期年内径流分配不同,推求得到的指示线也不一样,取各蓄水过程线集上、下包络线,作为各汛期径流集的汛期上、下基本调度线。
- e. 将所有径流资料的枯水期资料组成枯水期径流集;选择其中某个径流数据,由枯水期末死水位开始起调,按保证出力逆时序计算至枯水期初,得到放水过程线;将此线加入放水过程线集;取放水过程线集的上、下包络线,得到枯期上、下基本调度线。
- f. 枯期上、下基本调度线与各汛期径流集的上、下基本调度线分别进行组合,形成 5 个水光互补调度图,最终得到长时间尺度的水光互补水库调度图集。

2 实例验证

2.1 研究区概况

为充分利用西藏水电资源和太阳能资源,西藏自治区计划在“十四五”期间重点打造澜沧江西藏段千万千瓦级可再生能源基地。同时建设特高压直流外送通道,将清洁能源输送到东部地区,实现“西电东输”战略的大尺度资源优化配置^[11]。澜沧江西藏段清洁能源基地规划水电装机 952.5 万 kW,计划在“十四五”期间建成投运^[12-15],各水电站特征参数见表 1。

表 1 澜沧江西藏段水电站特征参数

Table 1 Characteristic parameters of hydropower stations in the Xizang section of Lancang River

水电站	死水位/m	正常蓄水位/m	调节库容/亿 m ³	装机容量/万 kW	年平均利用时间/h	年发电量/(亿 kW · h)
班达	3024	3054	3. 81	150. 0	4 753	53. 23
如 美	2815	2895	24. 33	260. 0	4 991	104. 82
邦 多	2599	2605	0. 15	72. 0	4 964	34. 25
古 学	2512	2535	0. 47	210. 0	5 000	85. 01
曲孜卡	2336	2345	0. 13	40. 5	4 516	18. 29
古 水	2230	2265	6. 72	220. 0	4 583	87. 08

澜沧江左岸光伏场址主要包括芒康县昂多场址,光伏装机容量约 400 万 kW、贡觉县它岭场址光伏装机容量约 200 万 kW,其他 900 万 kW 光伏主要分布在澜沧江右岸的左贡县、察雅县、八宿县^[16-17]。

本文收集所涉及的班达、如美、邦多、古学、曲孜卡以及古水 6 个电站 1953—2018 年的逐日径流数据,及此时段 6 个电站的逐日区间径流数据。光伏出力分别采用该区域内已建成的贡觉、八宿、芒康、左贡、察雅光伏电站 2016 年 1 月 1 日 0:00 至 12 月 31 日 24:00 逐小时日前辐射强度和温度的预测和实测数据,基地光伏电站装机规模考虑 1 000 万 kW。

2.2 调度图绘制

以如美水电站为例,代表年的选取结果见表 2。

表 2 不同频率径流分组的代表年

Table 2 Representative years of different runoff frequency sets

频率分组	代表年
>50% ~ 60%	1989—1990 年,2013—2014 年,1976—1977 年,1979—1980 年,1988—1989 年,1975—1976 年
>60% ~ 70%	1969—1970 年,1977—1978 年,1983—1984 年,2011—2012 年,1953—1954 年,1978—1979 年
>70% ~ 80%	2007—2008 年,2016—2017 年,2002—2003 年,1958—1959 年,1997—1998 年,2015—2016 年
>80% ~ 90%	1995—1996 年,1968—1969 年,1971—1972 年,1984—1985 年,2006—2007 年,1967—1968 年
>90% ~ 100%	1972—1973 年,1959—1960 年,1992—1993 年,1973—1974 年,1994—1995 年,1986—1987 年

注:代表年的选取是第一年的 6 月起至第二年的 5 月,如,1989—1990 年代表从 1989 年 6 月至 1990 年 5 月。

水光互补水库调度图结果见表 3,不同径流频率分组的水光互补水库调度图见图 1。

表 3 水光互补调度图上、下基本调度线结果

Table 3 Basic scheduling line result on/under water-light complementary scheduling diagram

月份	水位/m				
	>50% ~ 60% 频率分组	>60% ~ 70% 频率分组	>70% ~ 80% 频率分组	>80% ~ 90% 频率分组	>90% ~ 100% 频率分组
6	2816/2816	2816/2816	2816/2816	2816/2816	2816/2816
7	2844/2816	2871/2816	2889/2830	2895/2877	2895/2895
8	2880/2840	2895/2847	2895/2867	2895/2882	2895/2895
9	2883/2861	2895/2862	2895/2877	2895/2877	2895/2895
10	2895/2895	2895/2895	2895/2895	2895/2895	2895/2895
11	2895/2895	2895/2895	2895/2895	2895/2895	2895/2895
12	2895/2885	2895/2885	2895/2888	2895/2885	2895/2885
1	2889/1877	2889/2877	2889/2880	2889/2877	2889/2877
2	2879/2865	2879/2865	2879/2866	2879/2865	2879/2865
3	2865/2848	2865/2848	2865/2848	2865/2848	2865/2848
4	2849/2827	2849/2827	2849/2827	2849/2827	2849/2827
5	2833/2816	2833/2816	2833/2816	2833/2816	2833/2816
6	2816/2816	2816/2816	2816/2816	2816/2816	2816/2816

注:“/”前后数据分别为上、下基本调度线水位。

对水光互补性结果分析可得,水电总电量为 411. 26 亿 kW · h,基地水量利用率为 95. 86%,光伏利用率为 94. 36%,光伏电量为 165. 34 亿 kW · h,基地总电量为 576. 90 亿 kW · h,基地综合利用率为 95. 21%。水光互补发电量和实际运行资料接近,计算结果符合实际,通过澜沧江实例表明,水光互补基地水库调度图能够提高系统发电量,减少弃水,提高水库发电效益。

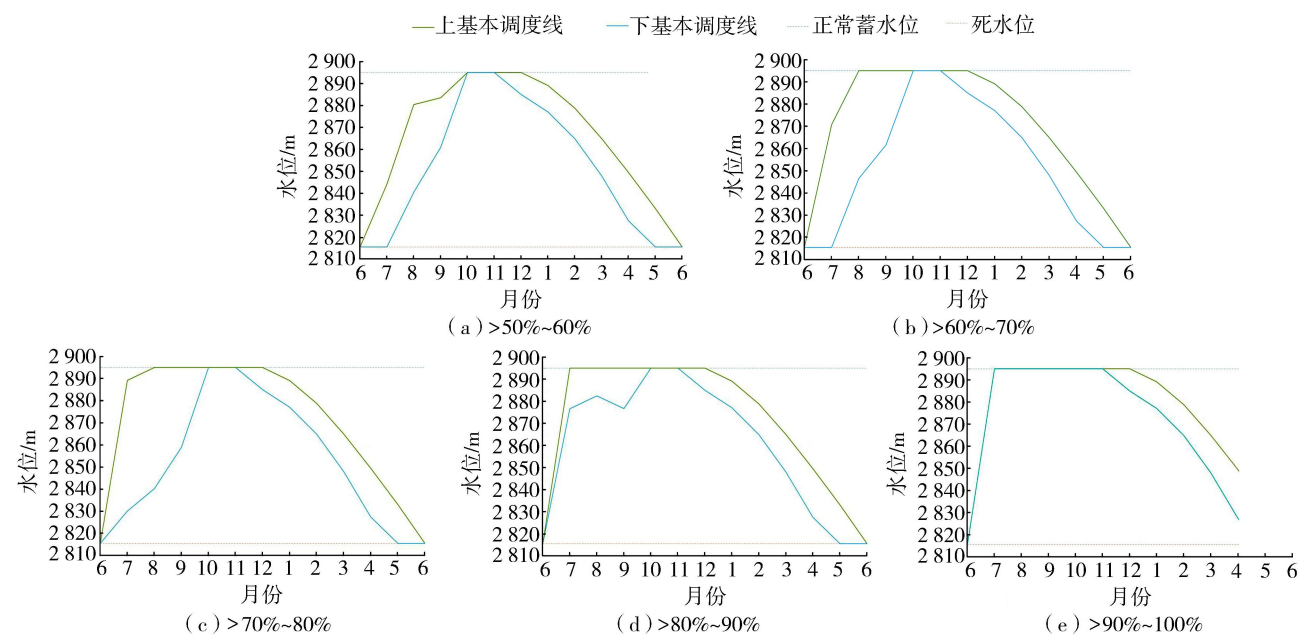


图 1 不同汛期径流集的水光互补水库调度图

Fig. 1 Operation map of water-light complementary reservoir with runoff sets in different flood seasons

3 水光互补调度图应用策略

水光互补调度图的应用策略如下：

- a. 根据入库径流,计算汛期、枯期来水频率,选取与来水频率一致的水光互补调度图。
- b. 汛期针对该月来水和水库当前水位,以水光互补系统月均临界出力发电,计算确定控制水位。将控制水位与水光互补调度图进行对比分析,确定水电站运行调度水位。若控制水位在水光互补调度图该月上、下基本调度线中间,则可直接采用水光互补系统月均临界出力指导发电。若月末水位在水光互补调度图该月下基本调度线下,则以基本调度线下限为控制降低发电出力。若月末水位在水光互补调度图该月上基本调度线上,则以基本调度线上限为控制加大发电出力。根据水库当前水位、水光互补系统月均临界出力、梯级上下游水力联系等,可计算得到梯级各个电站的出力、水位、流量等,指导各个电站的实际运行调度。
- c. 枯期针对该月来水和水库当前水位,以水光互补系统保证出力发电,计算确定水库控制水位。根据计算得到的控制水位与水光互补调度图进行对比分析,确定各个电站运行调度水位。若计算得到的控制水位在水光互补调度图该月上、下基本调度线中间,则可以直接采用混合系统保证出力指导发电。若计算得到的控制水位在水光互补调度图该月下基本调度线下面,则混合系统水电站需要降低出力发电,让水位尽快升到上、下基本调度线之间。若计算得到的控制水位在水光互补调度图该月上基本调度线上面,则基地需要加大出力发电,让水位尽快回落到上、下基本调度线之间。

4 结 语

本文提出按照来水频率分组方法绘制水光互补水库调度图,并对澜沧江上游西藏段进行实例分析验证。按汛期不同的来水频率分组,在来水偏丰的年份,汛期以防弃水为调度原则,在来水平、偏枯的年份,汛期考虑光伏全部消纳,以水电月临界出力为控制,制定汛期水库水位上、下基本调度线,指导汛期不同来水频率的水光互补运行调度;枯期按基地保证出力制定基地上、下基本调度线,给出了水光互补调度图应用策略,以指导基地枯期水光互补运行调度。

本文在调度过程中没有考虑水库径流来水预报,可能会影响调度图绘制结果的误差,同时本研究只针对年调节水库进行调节,没有对多年调节水库的调度进一步展开研究;在光伏电站数据输入时没有考虑年际变化等因素影响,因此相关研究工作还需进一步开展研究。

参考文献:

[1] 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,2021,40(6):1-6. (ZHOU Qingping, ZHAO Qiao,ZHANG Yanqing, et al. Study on complementary characteristics and operation of water-landscape integration in Wujiang River Basin[J]. Hongshuihe River,2021,40(6):1-6. (in Chinese))

[2] 明波,郭鹏程,陈晶,等. 水光互补电站中长期随机优化调度方法评估[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(5):20-24. (MING Bo,GUO Pengcheng,CHEN Jing,et al. Evaluation of medium and long term stochastic optimal dispatching method for water-light complementary power station[J]. Hydropower and Pumped Storage,2021,7(5):20-24. (in Chinese))

[3] 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,GESANG Yangla,WU Zhiyuan et al. Multi-time scale optimal scheduling of water-light complementary energy base [J]. Journal of Hydroelectric Power,2022,48(1):106-111. (in Chinese))

[4] 王立平,邹朋,周全,等. 基于水光互补的多个虚拟电厂两阶段优化调度方法[J]. 供电,2022,39(3):92-98. (WANG Liping,ZOU Peng,ZHOU Quan,et al. Based on above the complementary multiple virtual power plant two phase optimization scheduling method[J]. Power Supply,2022,39(3):92-98. (in Chinese))

[5] 李秀峰,李刚,张扬科. 水光互补组合等效电厂的短期调峰调度方法[J]. 水力发电学报,2023,42(2):36-44. (LI Xiufeng, LI Gang, ZHANG Yangke. Short-term peak regulating and dispatching method for equivalent power plant with water-light complementary combination[J]. Journal of Hydroelectric Power,2023,42(2):36-44. (in Chinese))

[6] 郭晓雅,李庚达,崔青汝,等. 考虑风险与调峰性能的水光互补中长期调度[J]. 水力发电学报,2023,42(2):56-65. (GUO Xiaoya,LI Gengda,CUI Qingru,et al. Water and light complementary medium and long term scheduling considering risk and peak regulating performance[J]. Journal of Hydroelectric Power,2023,42(2):56-65. (in Chinese))

[7] OPAN M,UNLU M,OZKALE C,et al. Optimal energy production from wind and hydroelectric power plants[J]. Energy Sources, 2019,41(13-18):2219-2232.

[8] YANG Z,LIU P,CHENG L,et al. Deriving operating rules for a large-scale hydro-photovoltaic power system using implicit stochastic optimization[J]. Journal of Cleaner Production,2018,195:562-572.

[9] SINGH R,BANERJEE R. Impact of large-scale rooftop solar PV integration: an algorithm for hydrothermal-solar scheduling (HTSS) [J]. Solar Energy,2017,157:988-1004.

[10] 白涛,徐燕,孙宪阁,等. 官厅水库多目标调度规律与方案研究[J]. 水资源保护,2023,39(2):101-108. (BAI Tao,XU Yan, SUN Xian'ge,et al. Study on multi-objective ecological operation of Guanting Reservoir[J]. Water Resources Protection,2023, 39(2):101-108. (in Chinese))

[11] LI Fangfang,QIU Jun. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system[J]. Applied Energy,2016, 167:377-384.

[12] TAN Qiaofeng,WEN Xin,SUN Yuanliang,et al. Evaluation of the risk and benefit of the complementary operation of the large wind-photovoltaic-hydropower system considering forecast uncertainty[J]. Applied Energy,2021,285(64):11644.

[13] LIU Weifeng,ZHU Feilin,CHEN Juan,et al. Multi-objective optimization scheduling of wind-photovoltaic-hydropower systems considering riverine ecosystem[J]. Energy Conversion and Management,2019,196:32-43.

[14] 申建建,王月,程春田,等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(11):3871-3885. (SHEN Jianjian,WANG Yue,CHENG Chuntian,et al. Current status and prospect of research on Scheduling Problems of water-wind multi-energy complementary power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (11): 3871-3885. (in Chinese))

[15] 黄显峰,颜山凯,李大成,等. 对水电效益影响最小的水光互补运行方式研究[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):15-20. (HUANG Xianfeng,YAN Shankai,LI Dacheng,et al. Research on hydro-photovoltaic complementary rules for minimum influence on hydropower benefit[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):15-20. (in Chinese))

[16] 宋鑫,贝耀平,袁丙青,等. 水上光伏电站对淮南采煤沉陷积水区水生态环境的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):204-211. (SONG Xin,BEI Yaoping,YUAN Bingqing,et al. Influence of floating photovoltaic power plants on water ecological environment in coal mining subsidence water area of Huainan City[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):204-211. (in Chinese))

[17] 王宗志,谈丽婷,耿敏,等. 考虑调水和供水规则的水库优化调度[J]. 水资源保护,2023,39(1):15-21. (WANG Zongzhi, TAN Liting,GENG Min,et al. Reservoir optimal operation considering water transfer and supply rules [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):15-21. (in Chinese))