

多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行研究

李涛¹, 胡维昊¹, 陈刚², 丁理杰², 韩晓言³, 王胜⁴, 鲜喜敏⁴, 巫里尔沙⁴, 唐炯⁴

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院, 四川 成都 611731;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 4. 中电建水电开发集团有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:四川省小金县地势东北高、西南低,且光照、水资源丰富,有利于修建梯级水-光-蓄互补电站,但是水-光-蓄的容量配置将极大地影响系统经济性。计及光伏分钟级尺度下出力波动性强,提出了在分钟级多场景下新的梯级水-光-蓄容量规划方法。从提高互补电站的经济效益与外送稳定性等角度,首先,建立投资最小与外送波动最小的梯级水-光-蓄互补电站容量配置与优化运行双层规划数学模型;其次,详细描述了基于粒子群与序列二次规划算法的双层规划算法模型求解方法与执行步骤;最后,在多场景下对双层规划模型的准确性和合理性进行了分析。分析表明,配置5 MW抽水蓄能机组能够使得梯级水-光-蓄互补系统具有最大投资效益比,且缓解外送功率波动高达11.7%。

关键词:梯级水-光-蓄;多场景;容量配置与优化运行;粒子群算法

中图分类号:TM761 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2021)02-0001-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210201

Research on Capacity Allocation and Optimized Operation of Cascaded Hydropower - Photovoltaic - Pumped Hydro Storage Hybrid System Under Multi - scenario

Li Tao¹, Hu Weihao¹, Chen Gang², Ding Lijie², Han Xiaoyan³, Wang Sheng⁴,

Xian Ximin⁴, Wu Liersha⁴, Tang Jiong⁴

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 4. PowerChina Hydropower Development Group Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Xiaojin county in Sichuan province is high in the northeast and low in the southwest, and is rich in light and water resource, which is conducive to the construction of a cascaded hydropower - photovoltaic - pumped hydro storage (HP - PV - PHS) complementary power plant. However, the HP - PV - PHS capacity ratio greatly affects the complementary benefits. Because PV output fluctuates frequently and the time scale is small, the multi - scenario cascaded HP - PV - PHS capacity allocation and optimized operation under the minutes time scale is proposed. From the view of improving the economic benefits and delivery stability of the complementary system, firstly, a bi - level mathematical model for capacity allocation and optimized operation of a cascaded HP - PV - PHS with minimal investment cost and minimal power fluctuation in delivery is established. Secondly, the method and execution steps of the bi - level programming model based on particle swarm optimization and sequential quadratic programming algorithm (PSO - SQP) are described in detail. Finally, the accuracy and reasonability of the bi - level programming model is analyzed in multiple scenarios. The case study reveals that 5 MW PHS can make the cascaded HP - PV - PHS complementary system have a maximum investment benefit ratio and mitigate the power fluctuation on tie - line by up to 11.7%.

Key words: cascaded HP - PV - PHS; multi - scenario; capacity allocation and optimized operation; particle swarm optimization algorithm

0 引言

“全面推进分布式光伏发电建设,推动多能互补、协同优化的新能源电力综合开发”是中国电力发展“十三五”规划的重点任务之一^[1-2]。储能技术的发展为大规模消纳新能源提供了保障^[3]。在中国西南地区小水电广泛分布的河流流域内,也拥有着较为丰富的太阳能资源;梯级小水电可以为抽水蓄能电站的建设运行提供便利,而抽水蓄能电站的运行也改善了梯级小水电和光伏电站的出力状况^[4];具备快速调节功能^[5-6]的抽水蓄能电站与调节能力有限^[7]的梯级小水电联合互补,可以优化调节光伏发电的随机波动性、间歇性^[8-10]等出力缺陷;这些均对发展水-光-蓄互补发电提供了有利条件。但目前还没有针对性地对水-光-蓄资源特性进行容量配置,导致新能源利用率低、系统外送的稳定性较差、经济效益不高。因此,根据期望的目标合理地优化水-光-蓄的容量配置能极大地提高整个互补发电系统经济效益与外送可靠性。

近年来,发电系统的容量配置引发了大量学者的关注,因研究背景不同,其优化目标侧重点也不尽相同:1)文献[11-13]均以年运行维护费用最小为目标,但文献[11]还考虑到了风能损失成本和社会成本,而文献[13]还考虑了储能容量和设备安装等成本等。文献[12]针对鸭型曲线问题提出了以火电机启动成本和发电成本最小化为目标的混合系统的优化配置模型。2)文献[14-15]以收益最大为目标。文献[14]以在规划期内净现值最大为目标建立含分布式光伏与储能的容量优化模型,利用枚举法求解最优的分布式光伏储能容量。文献[15]以储能系统投入前后等效成本(电网调频成本和储能系统投资成本之和)的差值作为等效收益,并以等效收益最大为目标函数建立容量优化配置模型。3)文献[16-19]以系统输出波动最小为目标。文献[16]建立了以梯级水电、光伏联合发电系统总发电量最大以及剩余负荷曲线最平滑为多目标的优化模型。文献[17]考虑水-光互补系统发电量与出力波动,研究了其互补系统的短期经济调度问题。类似的,文献[18]考虑光伏并网的波动性与抽水蓄能的经济性,运用深度强化学习算法研究了光伏-

抽水蓄能的实时经济调度。文献[19]以风电、光伏、抽水蓄能电站联合出力特性跟随电力系统负荷特性为目标来建立联合优化运行模型,并分别在常规情景下(风光出力均按照典型周实际出力数据)和极端场景(风光出力一周内每日均出现严重的反调峰特性)进行了运行优化,优化结果均能实现风光友好消纳。

目前涉及到互补发电系统容量优化配置的研究中,对各类优化目标均有了较为详细的考虑,但仍存在一定不足。具体而言,他们大都是只针对光、水中一种发电要素的某种特性展开研究,研究规划相对孤立,考虑因素不够全面。包含梯级水电站、光伏电站、抽水蓄能电站的多种清洁能源联合互补发电系统,目前研究中对其各种发电要素的互补性研究、容量配比规划、联合优化运行、协同调度策略等关键问题研究较少。

下面以梯级水-光-蓄容量优化配置为研究对象,考虑到光伏出力波动频繁且时间尺度小,提出以互补电站收益最大为外层目标和外送波动最小优化目标为内层目标的双层优化模型。对具有强耦合、非凸以及非线性特性双层规划问题,采用改进型粒子群(PSO)算法求解上层的非凸规划问题;而下层的运行优化问题,将非线性潮流约束进行松弛后通过调用Cplex优化软件内置的二阶锥规划方法,保证计算的快速性和优化的准确性。最后,在分钟时间尺度的不同场景下,对所建立优化配置模型的正确性和可行性进行了分析。

1 容量配置双层优化模型

考虑将水-光-蓄互补系统的容量优化配置分解为由收益层和运行层构成的双层优化模型以准确描述容量配置问题。由于抽水蓄能电站和水电站的长期规划与短期运行方案相互联系,形成相互耦合的规划层与运行层,双层优化模型为

$$\begin{cases} \min C = C(x^{\text{rev}}, w) \\ \text{s. t. } R(x^{\text{rev}}) \leq 0 \\ \quad H(x^{\text{rev}}) = 0 \\ \max w = c(x^{\text{rev}}, x_t^{\text{ope}}) \\ \text{s. t. } r(x^{\text{rev}}, x_t^{\text{ope}}) \leq 0 \\ \quad h(x^{\text{rev}}, x_t^{\text{ope}}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C(\cdot)$ 和 $c(\cdot)$ 分别为上、下层目标函数; w 为下层最优值; $R(\cdot)$ 和 $H(\cdot)$ 分别为上层等式、不等式约束; $r(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 分别为下层等式、不等式约束; x^{rev} 和 x^{opc} 分别为上层和下层决策变量^[20]。

1.1 上层优化目标函数

定义水-光-蓄互补系统收益为上层目标函数,该目标由其实际卖电产生的收益减去系统的投资成本。投资成本采用全寿命周期净现值计算^[21],代表水-光-蓄系统在整个寿命周期内的净费用,其值的大小可以体现系统的经济性,可以用系统整个寿命周期内所产生的成本和收入的差值表示。其中,系统成本包含初始化投资、运行维护、设备的更新费用;系统收入即为设备残余价值。其表达式为

$$f_1(x) = \sum_{k=1}^k \frac{C(k)}{(1+r)^k} + \beta \cdot k_{\text{ch}} \quad (2)$$

式中: k 为系统工程寿命,元/a; r 为折旧率; $C(k)$ 为第 k 年系统成本,元/a; k_{ch} 为联络线上最大功率波动率,%; β 为联络线功率波动惩罚系数,%/元。

$C(k)$ 的计算表达式为

$$C(k) = C_1 + C_R(k) + C_M(k) \quad (3)$$

式中: C_1 为系统建设成本; $C_R(k)$ 为第 k 年设备更新费用; $C_M(k)$ 为第 k 年的设备维护费用。各变量的具体计算如式(4)。

$$\begin{cases} C_1 = \sum_{i=1}^3 C_{\text{Ihydro}}^i + C_{\text{IPV}} + C_{\text{IPHs}} \\ C_R(k) = \sum_{i=1}^3 C_{\text{Rhydro}}^i(k) + C_{\text{RPV}}(k) + C_{\text{RPHs}}(k) \\ C_M(k) = \sum_{i=1}^3 C_{\text{Mhydro}}^i(k) + C_{\text{MPV}}(k) + C_{\text{MPHs}}(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_{Ihydro}^i 为第 i 级水电站建设成本; C_{IPV} 和 C_{IPHs} 分别为光伏和抽水蓄能电站的建设成本; C_{Rhydro}^i 为第 i 级水电站设备更新费用; C_{RPV} 和 C_{RPHs} 分别为光伏和抽水蓄能电站的设备更新费用; C_{Mhydro}^i 为第 i 级水电站维护费用; C_{MPV} 和 C_{MPHs} 分别为光伏和抽水蓄能电站维护费用。

1.2 约束条件

考虑受到地理环境影响,水-光-蓄各主体的装机容量约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{hydro}}^i \leq P_{\text{hydro}}^{i,\text{max}} \\ 0 < P_{\text{PV}} \leq P_{\text{PV}}^{\text{max}} \\ 0 < P_{\text{PHs}} \leq P_{\text{PHs}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{hydro}^i 为第 i ($i=1,2,3$)级水电站的装机容量; $P_{\text{hydro}}^{i,\text{max}}$ 为第 i 级水电站最大允许装机容量;其余项分别表示光伏电站装机容量以及抽水蓄能电站上游水库容量和装机容量。

1.3 下层优化目标函数

下层优化目标主要为运行优化,由于光伏出力波动频繁且时间尺度小,小时级时间尺度下得到的容量配置结果难以满足实际应用,为此提出考虑分钟时间尺度下的优化运行建模。

利用梯级水电站的优化调度和抽水蓄能电站的灵活抽水/发电特性,采用分钟级控制模型实现对波动性的调控。提高系统出力的互补性能,减小系统外送功率的波动性。

$$\min F = \min k_{\text{ch}} \quad (6)$$

式中, k_{ch} 为联络线上最大功率波动率。

$$k_{\text{ch}} = \frac{\max |P_{\text{ch}}^{t+1} - P_{\text{ch}}^t|}{P_{\text{ch}}^{\text{average}}} \times 100\%, t=1,2,\dots,T-1 \quad (7)$$

式中, P_{ch}^t 为 t 时刻联络线上的交互功率,MW; $P_{\text{ch}}^{\text{average}}$ 为运行周期内联络线流过的平均功率,MW; T 为运行时长, $T=1440$ 。

$$P_{\text{L}}^t = \sum_{i=1}^{n_{\text{hyd}}} P_{\text{hydro},i}^t + \sum_{j=1}^{n_{\text{pv}}} P_{\text{pv},j}^t + \sum_{k=1}^{n_{\text{phs}}} P_{\text{phs},k}^t - P_{\text{L}}^t \quad (8)$$

式中: n_{hyd} 、 n_{pv} 、 n_{phs} 分别为水电站、分布式光伏电站和抽水蓄能电站总数; P_{L}^t 为 t 时刻的本地负荷。

2 优化算法

在考虑水-光-蓄系统的投资成本前提下,通过水电和抽水蓄能的运行方式来降低联络线上的波动,从而提升水-光-蓄系统外送能力,降低水-光-蓄系统对主网的不利影响。但是系统收益与联络线上的波动性是两个博弈的目标,且投资成本可以看成是一个规划问题,波动性可以看成是一个运行问题,二者相互关联、相互影响。可将这两个不同性质的优化问题描述为一个双层规划问题,采用双层规划结构,如图1所示。即在上层模型中,以水-光-蓄的投资成本为目标函数优化其容量配置,并将其规划方案传入下层模型;在下层模型中考虑水-光-蓄互补系统外送功率波动情况,对其进行优化运行,然后将外送功率波动罚金返回到上层模型,从而构成双层模型的目标函数。基于上述循环过程不断迭代,直至获得上层目标函数最小值,然后,输出

配置结果与优化运行策略。

双层规划是双层决策的分层优化问题^[22]。通过中间变量将模型中上、下层中各自优化目标与约束条件进行耦合联系,并实现双层问题的分层求解。

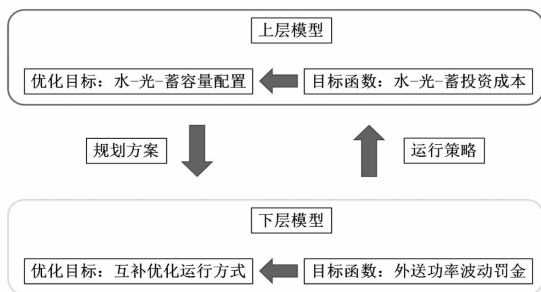


图 1 双层规划结构

上层容量配置中,目前相关文献多使用启发式算法^[23]求解。其中,粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法具有基于整体优化搜索特性,且算法结构简单、容易实现,具有良好的工程应用价值。考虑到电站建设的工程性质,其装机容量多为整数,因此,应用整数型 PSO 算法求解上层模型中容量配置问题。所谓整数型 PSO,是在标准 PSO 算法的基础上,对其迭代过程中的位置与速度均限制为整数,从而得到整数优化结果。PSO 算法的速度与位置更新公式见文献[23],这里将不在赘述。此外,在所建立的梯级水-光-蓄互补系统的容量配置与优化运行双层模型中,上层容量配置方案中具体参数为:梯级水电站装机容量、光伏电站装机容量以及抽水蓄能电站装机容量。

下层优化问题主要以 100% 消纳光伏为前提,考虑梯级水电站和抽水蓄能电站的最优运行策略,并将非线性潮流约束进行松弛后,通过调用 Cplex 优化软件内置的二阶锥规划方法对其进行快速求解,然后将下层运行结果反馈至上层目标函数中。这种上层问题采用启发式算法与下层问题使用经典的线性算法相结合的方式,保证了双层模型求解的时间效率。双层优化的流程如图 2 所示。详细执行步骤如下:

1) 初始化参数。设定最大迭代次数 N_{\max} 和粒子个数;给定粒子位置向量 $x_0 = [P_{\text{hydro}}^i, P_{\text{PV}}, P_{\text{PHS}}]^T$ 的初始值和初始迭代次数 $\text{iteration} = 0$ 。

2) 计算粒子适应度值。计算上层目标函数值,并基于 SQP 算法求解下层运行优化模型;然后返回到上层,由公式(2) 计算粒子适应度值。

3) 搜索全局最优适应度值。

4) 判断是否满足迭代退出条件。若满足,则输

出容量配置与优化运行结果并结束;反之,则继续。

5) 更新粒子的速度与位置。基于当前粒子的全局最优与局部最优值,更新粒子速度与位置。

6) 更新粒子适应度值。基于新的位置再次调用下层模型并返回外送功率波动罚金。

7) 迭代次数加一。

8) 重复步骤 3 至步骤 7。

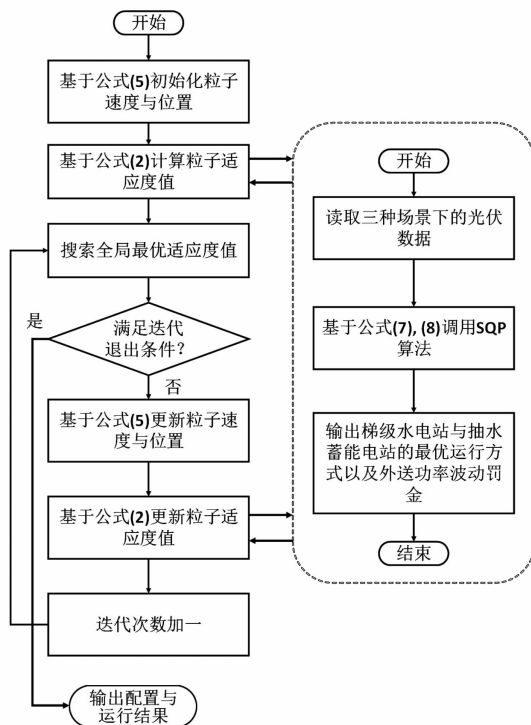


图 2 基于 PSO-SQP 算法的双层优化流程

3 算例分析

3.1 算例说明

梯级水电站在实际运行中,具有不可频繁进行调控的特性;在下层优化运行问题中,由于水电装机容量相对于抽水蓄能较大,但抽水蓄能电站具备快速正反转能力;因此,在抑制联络线上功率波动时,对水电站和抽水蓄能电站进行分级优化控制,即水电站参与一次调节抑制低频大功率波动,抽水蓄能电站参与二次调节抑制高频尖峰功率波动。定义抽水蓄能电站的发电功率为正,抽水功率为负。梯级水电站相互间存在一定的时延。

为提高下层模型优化效率,对规划区域收集到的历史数据进行了聚类分析^[24],并提炼出典型的 3 类运行场景进行对比分析,场景定义见表 1。

表 1 场景定义

分类名称	分类情况
场景 1	雨天
场景 2	阴天
场景 3	晴天

3.2 结果分析

3.2.1 水-光-蓄上层容量配置结果

在处理器为 Inter(R) Core(TM) i9-9820X CPU @ 3.30 GHz 的硬件平台上,根据第 1 章所定义的优化目标,利用 PYTHON/Cplex 工具包编程实现了第 2 章中给出的算法流程图及执行步骤;经过迭代寻优得到了水-光-蓄的最优容量配置结果见表 2。

表 2 最优容量配置结果

电站名称	装机容量/MW	备注
水电站	45	第 1 级
	60	第 2 级
	36	第 3 级
光伏电站	100	—
抽水蓄能	5	—

3.2.2 水-光-蓄下层最优运行结果

由图 3 可以看出,不同场景的光伏出力在分钟级下其波动非常频繁,而本地负荷在一天中变化较为缓慢^[25]。因此,在水-光-蓄互补系统满足本地负荷需求之外,联络线上的外送功率必然存在波动现象。不过,电厂所定义的下层优化运行策略,梯级水电站参与缓解了小部分的功率波动,即实现对外送功率波动的一次调节。

在最优容量配置的基础上,抽水蓄能电站作为一种柔性负荷能够灵活受控并工作在抽水和发电两种状态,能更好地缓解波动性。由图 4 可知,本地负荷在夜间处于低谷且光伏发电量为 0,因此抽水蓄能电站工作在抽水模式以消纳联络线上多余的外送功率;而在白天光伏电站出力波动较为剧烈时,抽水蓄能电站在抽水和发电两种模式切换以保证外送功率平滑。

图 5 分析了不同场景下优化前后联络线功率波动情况,对比 3 种场景可知:联络线外送功率波动的主要成因是光伏出力的波动引起的;场景 1 即雨天光伏电站出力较小,即便抽水蓄能电站不参与调节,外送功率波动也不超过 ± 15 MW/min;外送功率波动最严的场景为晴天,由于云朵随机移动引起光伏电站出力间歇性波动,无抽水蓄能电站参与调节时

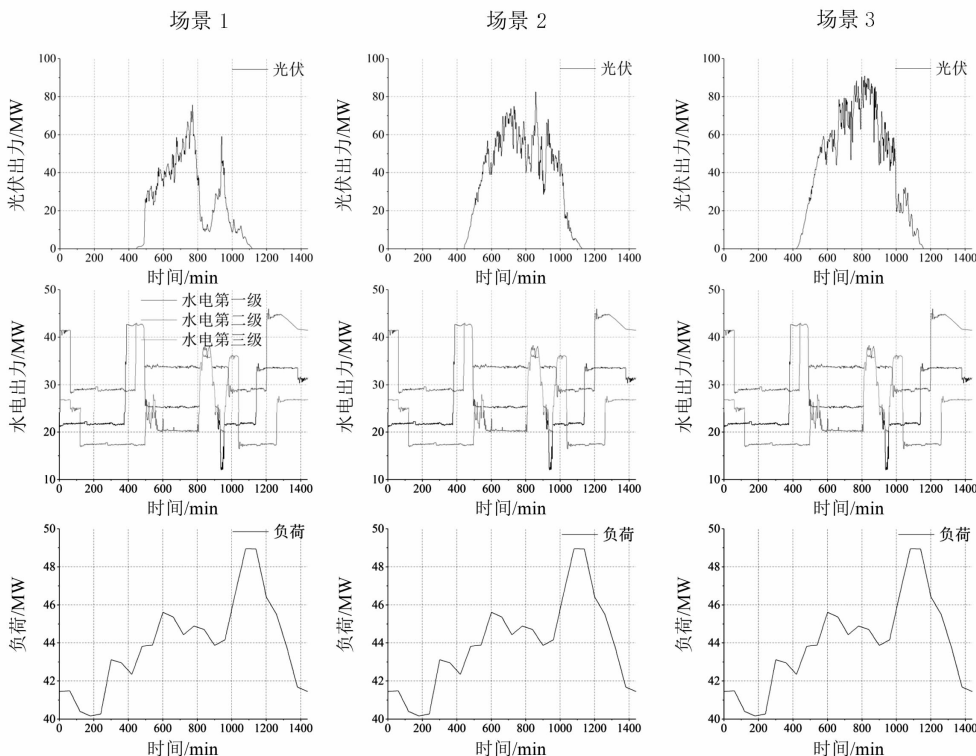


图 3 不同场景下水电站参与一次调节的出力曲线

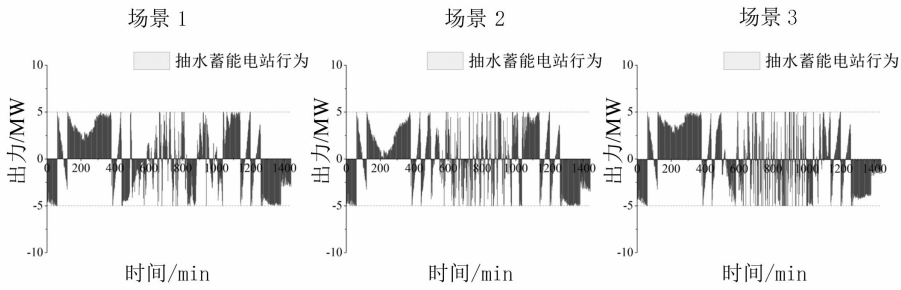


图4 不同场景下抽水蓄能电站的运行行为

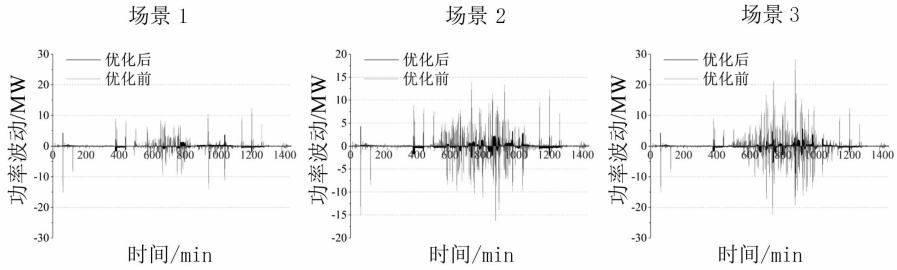


图5 不同场景下优化前后联络线功率波动

导致联络线最大功率波动接近 30 MW/min。但是,通过优化调度抽水蓄能电站的运行后,使得 3 种场景下联络线外送功率波动均被限制在 ± 5 MW/min 之内;提高了水-光-蓄互补系统外送能力。

3.3 对比分析

表 3 对比分析了抽水蓄能电站在不同装机容量下,联络线外送功率波动率与抽水蓄能电站投资成本的变化趋势。由对比结果可知,随着装机容量的增加,联络线功率波动率几乎呈现指数趋势下降,但是,随着抽水蓄能电站装机容量的增加,其投资成本必然变高。

表 3 不同抽水蓄能电站装机容量下波动率与投资成本的对比分析

装机容量/ MW	波动率/%			投资成本/ 万元
	场景 1	场景 2	场景 3	
0	15.3	15.5	19.5	0
3	8.7	9.0	13.3	1854
5	4.7	4.8	7.8	3090
7	1.9	2.1	5.0	4326

表 4 抽水蓄能电站不同装机容量范围的投资效益

装机容量 变化范围/MW	波动率最大 下降量/%	投资效益/ (%/万元)
0~3	6.6	0.003 6
>3~5	5.5	0.004 4
>5~7	2.8	0.002 3

引入容量配置效益量化指标投资效益,其定义为:3 种场景中波动率下降最大值与抽水蓄能投资成本增加值之比。表 4 给出了抽水蓄能不同装机容量变化范围内,3 种场景中波动率最大下降量以及抽水蓄能的投资效益。随着抽水蓄能装机容量的增加,并网点功率波动率下降量逐渐减缓;此外,可清晰地看到 3~5 MW 变化范围下的投资效益为 0.004 4%/万元,均高于 0~3 MW 和 5~7 MW 时的投资效益,即配置 5 MW 抽水蓄能电站的投资效益最高,且能够将所有场景下外送功率波动限制在 8% 以内。上述分析验证了所提出的多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行的准确性与合理性。

4 结 语

针对梯级水-光-蓄互补系统,从互补系统容量配置与优化运行等角度出发,研究了多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行的双层规划问题。算例分析表明:

1) 在三级水电站总装机容量 141 MW 和光伏装机容量 100 MW 条件下,晴天仅靠水电站参与调节光伏功率波动时,互补系统外送功率每分钟波动量高达 20% 左右。

2) 水电站参与一次调节、抽水蓄能参与二次调节,可使得 3 种场景下联络线外送功率波动均被限

制在 $\pm 5 \text{ MW/min}$ 之内,互补系统最大外送功率波动率仅为 7.8%。

3)通过投资效益分析,突出了互补系统配置 5 MW 抽水蓄能电站的优越性,验证了互补系统容量配置与优化运行的准确性与合理性。

参考文献

- [1] 谢建. 太阳能光伏发电工程实用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [2] 陈汉雄. 四川电力发展对新能源建设规模影响分析[J]. 四川电力技术,2018,41(2):46-50.
- [3] 李勇,刘俊勇,胡灿. 超导储能技术在电力系统中的应用与展望[J]. 四川电力技术,2009,32(增刊1):33-37.
- [4] 黄汉云. 太阳能光伏发电应用原理[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [5] 高苏杰,娄素华. 抽水蓄能综合效益评估综述[J]. 水电自动化与大坝监测,2008,32(1):11-15.
- [6] 张立锋,徐潜,何志强,等. 阿里电网经济可靠运行相关问题研究[J]. 四川电力技术,2019,42(3):29-33.
- [7] Chalmers S. M.; Hitt M. M. The Effect of Photovoltaic Power Generation on Utility Operation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1985,104(3):524-530.
- [8] 王亮,陈刚,苗树敏,等. 梯级水光联合发电系统短期优化调度模型[J]. 水力发电,2020,46(3):94-98.
- [9] 杨清,袁越,王敏,等. 独立型水光储微电网系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):37-44.
- [10] Li J, Wang S, Ye L, et al. A Coordinated Dispatch Method With Pumped-storage and Battery-storage for Compensating the Variation of Wind Power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,2018,3(1):1-14.
- [11] Hozouri M A, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M, et al. On the Use of Pumped Storage for Wind Energy Maximization in Transmission-constrained Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(2):1017-1025.
- [12] Howlader H O R, Sediqi M M, Ibrahimi A M, et al. Optimal Thermal Unit Commitment for Solving Duck Curve Problem by Introducing CSP, PSH and Demand Response[J]. IEEE Access,2018,6:4834-4844.
- [13] 夏永洪,吴虹剑,辛建波,等. 考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):63-69.
- [14] 温正楠,刘继春. 风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J]. 电网技术,2019,43(7):2449-2460.
- [15] 丁磊,刘俊勇,刘友波,等. 考虑分布式发电商投资的区域配电网光伏储能容量配置[J]. 可再生能源,2017,35(03):374-383.
- [16] 付爱慧,张峰,张利,等. 考虑爬坡功率有限平抑的高渗透率光伏电网储能配置策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(15):53-61.
- [17] 朱燕梅,陈仕军,马光文,等. 计及发电量和出力波动的水光互补短期调度[J]. 电工技术学报,2020,35(13):2769-2779.
- [18] 李涛,胡维昊,李坚,等. 基于深度强化学习算法的光伏-抽蓄互补系统智能调度[J]. 电工技术学报,2020,35(13):2757-2768.
- [19] 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.
- [20] 田录林,张欣,侯彤晖,等. 含风电接入的配电网储能系统优化配置[J]. 西北水电,2018(5):1-7.
- [21] 刘鹏越. 独立风/光/柴/储微网系统容量优化配置研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
- [22] 张欣. 二阶锥优化在含风电接入的配电网储能规划双层模型中的应用[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [23] Li T, Hu W H, Xu X, et al. Optimized Operation of Hybrid System Integrated With MHP, PV and PHS Considering Generation/Load Similarity[J]. IEEE Access,2019,7:107793-107804.
- [24] 杨晶显,刘俊勇,韩晓言,等. 基于深度嵌入聚类的水光荷不确定性源场景生成方法[J]. 中国电机工程学报,40(22):7296-7305.
- [25] 杨博宇,陈仕军. 电力负荷预测研究综述及预测分析[J]. 四川电力技术,2018,41(3):56-60.

作者简介:

李涛(1994),男,硕士研究生,研究方向为可再生能源系统运行与控制;

胡维昊(1982),男,教授,博士生导师,研究方向为人工智能在电力系统中的应用、可再生能源发电技术。

(收稿日期:2020-09-28)