

基于改进 NSGA - II 算法的水 - 光 - 蓄发电系统多目标规划方法

周修宁¹, 江 军²

(1. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;
2. 中电建水电开发集团有限公司, 四川 成都 610095)

摘要:水-光-蓄联合发电系统是指利用水电和光伏发电互补性,用水电弥补光伏发电间歇性,并配备一定容量的抽水蓄能电站,利用储能手段平抑光伏出力波动性,同时提高光伏电能消纳能力的联合发电系统。水-光-蓄联合发电系统是一种有效的新能源开发利用新形势,而对联合系统的分布式光伏电站的选址定容以及抽水蓄能电站的容量配置问题是一个高维、非线性的规划问题。首先,构建了水-光-蓄联合发电系统的数学模型;其次,针对规划问题的多目标性,利用了改进的 NSGA - II 算法得到帕累托最优解集;最后,通过 TOPSIS 法完成了规划方案决策,并结合算例验证了方法的合理性。

关键词:水-光-蓄联合运行;分布式光伏选址定容;多目标规划

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954(2021)02 - 0008 - 08

DOI: 10. 16527/j. issn. 1003 - 6954. 20210202

Optimization of Hydropower - photovoltaic - pumped Hydro Storage Complementary Generation System Based on Improved NSGA - II Algorithm

Zhou Xiuning¹, Jiang Jun²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion(Shanghai Jiao Tong University), Ministry of Education, Shanghai 200240, China; 2. PowerChina Hydropower Development Group Co., Ltd., Chengdu 610095, Sichuan, China)

Abstract: A hydropower - photovoltaic - pumped hydro storage complementary generation system is proposed to solve the challenge of high uncertainty of photovoltaic. The complementary generation system takes the use of the complementarity between hydropower and photovoltaic power generation to compensate for intermittent characteristics of photovoltaic power generation. And a pumped - storage power station is equipped to stabilize the photovoltaic output fluctuation, and to improve photovoltaic energy consumption at the same time. NSGA - II is used to solve the problems of multi - objective optimization of distributed photovoltaic power generation site selection and capacity of pumped storage power station. In the end, the TOPSIS algorithm is used to screen out the optimal solution. The analysis of the optimal solution proves that this planning process is practical.

Key words: hydropower - photovoltaic - pumped hydro storage complementary power generation system; distributed photovoltaic power generation site selection; multi - objective optimization

0 引言

随着传统能源资源日益紧张,且环境污染问题愈发严重,利用清洁可再生的新能源来改善能源结构已

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905200)

经成为世界范围内的共识和战略选择^[1-2]。太阳能作为一种典型的清洁能源,已在各领域大量地运用。然而,受制于自然资源的随机性、波动性以及间歇性,可再生能源的并网带来消纳以及运行调度问题。使用水电作为光伏系统的补偿是解决光伏系统的间歇性和不可靠性的思路之一。水能作为一种利

用历史较久的清洁能源,水力发电模式发展成熟,具有较高的可靠性。储能系统具有良好的充放电功率调节能力和供电蓄电能力,能在一定程度上弥补光伏系统出力在日周期内波动大的缺陷。抽水蓄能具有功率大、容量大的特点,成本低,技术上易于实施。对于水-光伏互补系统,其地理位置具有建立抽水蓄能电站的基础。将抽水蓄能电站与水-光伏混合发电系统相结合,可以提高光能利用率,有效减少弃能现象。

对于类似的联合发电系统,已有较多的新型研究。文献[3]提出了一种利用局部可用水源的新型小型离网发电系统,利用光伏发电、抽水蓄能、太阳能水泵等组成元件之间的互补性,使系统的输出功率完全不受太阳辐射变化的影响,实现连续发电;但该联合系统容量小且不具备分布式光伏特性,具有一定的局限性。文献[4]利用了 ε 约束法,解决了以供电概率损失最低、总成本最低、总能量损失最低为目标的含风、光、电池、氢气罐在内的多能源系统多目标规划问题;在求解帕累托最优解之后没有进一步提出筛选最优解的方法。文献[5]建立了基于光伏、风力和抽水蓄能联合运行模型的仿真工具,通过仿真工具研究了混合系统对系统特性的影响;仿真情况下没有考虑到经济运行以及设备成本等实际工程问题,缺乏工程应用价值。

针对以上问题,基于实际工程出发,考虑了规划成本、运行规划等实际问题,给出了多目标规划的水-光-蓄抽水规划问题的求解方法,利用改进后的 NSGA-II 算法对问题进行了求解,并结合 TOPSIS 方法对规划方案集进行最优决策。结合实际工程算例对所提方法进行了验证。

1 水-光-蓄发电系统多目标规划模型

1.1 联合发电系统建模

1.1.1 各机组出力特性分析

1) 光伏发电系统

光伏发电系统出力受温度和辐射强度影响明显,外界天气的变化会直接导致系统输出的变化。受天气影响明显,阴雨天气其出力峰值降低情况明显,如图1所示。

光伏出力同时具有波动性和不确定性,其典型日分钟级出力曲线见图2。在微小时间尺度上,光

伏输出曲线是锯齿分布,波动明显,在短时间内功率变化率可以达到20%以上。

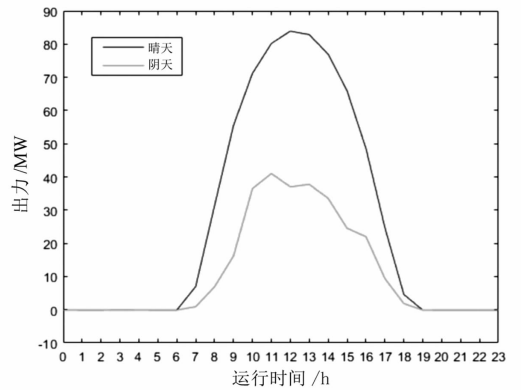


图1 晴雨天天气光伏日时间尺度出力对比

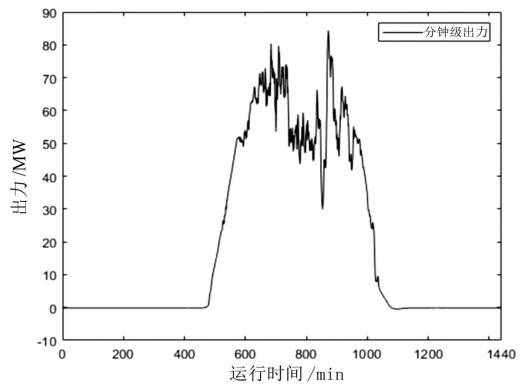


图2 光伏分钟尺度日出力典型曲线

2) 水力发电系统

水力发电系统具有运行灵活、启停机迅速、运行可靠性高等特点,可以补偿光伏系统的输出,保证系统稳定性。但同时水电站出力受来水量影响较大,由于气候和地理环境因素,电站一年中的来水量大致可以分为丰水期、平水期、枯水期3个时期。丰水期水库来水量大,水电机组能做到满发输出;平水期较丰水期而言来水量较小,其机组输出变低;而枯水期来水量极少,水电机组出力受到很大的限制,通常只为装机容量的30%~50%左右,如图3所示。

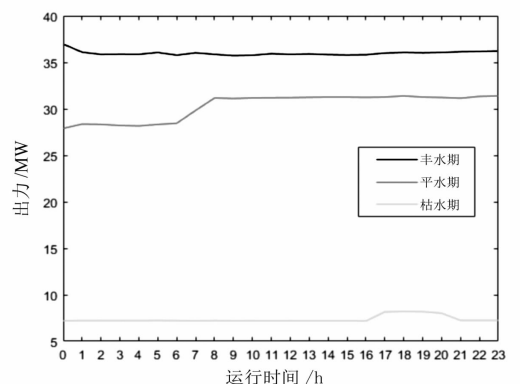


图3 不同水季水电站典型日出力曲线

3) 抽水蓄能系统

抽水蓄能电站的核心设备是用于发电的水轮机和用于抽水的水泵。随着技术的发展,如今,抽水蓄能电站通常配备可逆式涡轮机组,可实现抽水蓄能和排水发电的双重运行。然而,由于工艺和设计限制,效率通常比单独的涡轮机和泵的效率差。抽水蓄能电站在能量储存和提取过程中往往会有一部分的能量损耗。

抽水蓄能的发电模型满足:

$$P_t^{pg} P_t^{pp} = 0 \quad (1)$$

$$\sum_t^T P_t^{pg} - \frac{P_t^{pp}}{\eta} = 0 \quad (2)$$

式中: P_t^{pg} 为抽水蓄能电站工作在放水发电状态的输出功率; P_t^{pp} 为抽水蓄能电站工作在抽水蓄能状态下的输出功率; η 为水泵抽水效率和水轮机工况效率之比; T 为抽水蓄能电站的调度周期。式(1)表示抽水蓄能电站一个时间点只能工作在一种工作状态中;式(2)表示抽水蓄能电站在一个调度周期内水库水量平衡。

1.1.2 联合发电系统运行策略

光伏发电和水力发电的出力具有互补性,同时应该意识到水电站和抽水蓄能系统的建立都是在创建经济效益的同时平抑光伏出力的波动性,更好地消纳新能源。于是,联合发电系统的运行策略总结为以下3点:

1) 由于光伏出力的不可控性和波动性,在日间光照条件良好的环境下,优先调用光伏发电出力。

2) 水力作为光伏出力的补偿性电源,在光伏出力不足以满足负荷要求时,水电机组投运。

3) 抽水蓄能电站在低电价时间段抽水储能,在高电价时间段放水发电,创造经济效益,并提供调峰调频和事故备用的功能。在联合发电系统中,抽水蓄能的主要设计目标和作用是平抑光伏新能源并网带来的波动性和间歇性,将运行策略调整为在输出低谷期放水发电输出,输出高峰期抽水储能,以求尽量减小联合发电系统的波动性。

1.2 规划模型确立

1.2.1 规划目标

1) 规划投资成本最小:对于投资者而言,项目的投资成本是一个影响决策的考察重点,也是工程实践中需要考虑的第一要素。项目投资的成本自然是越小越好,由于电站规划和建设的时间较长,往往

时间跨度以年为单位,所以引入经济上的净现值概念,将投资建设成本和各年度联合运行的运行成本折算到经济现值,其定义为

$$\min F_1 = \min \left\{ \sum_y^{n_y} (1+i_t)^{-y} \frac{i_t(1+i_t)^K}{(1+i_t)^K - 1} C_{pl} + \sum_y^{n_y} (1+i_t)^{-y} C_{op} \right\} \quad (3)$$

式中: n_y 为总规划年; i_t 为贴现率; C_{op} 、 C_{pl} 为梯级水光蓄系统的年运行和规划费用; k 为机组运行年限;第一项为动态投资费用,一般为机组容量的线性函数;第二项为联合系统运行成本,包括购电成本、运行成本等。

2) 对电网波动最小:联合发电系统建设的初衷就是为了克服光伏发电的间歇性和波动性,从这个角度出发,联合发电系统整体与电网的交互功率的波动越小越好,其定义为

$$\min F_2 = \min \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T} (P_{jh,t} - \overline{P_{jh}})^2 \right\} \quad (4)$$

式中: $P_{jh,t}$ 为某一时刻联合发电系统与电网交互功率,交互功率表达了联合发电系统与负荷之间的差值; $\overline{P_{jh}}$ 为调度周期内交互功率的平均值,交互功率与平均值的差值的欧氏距离能反映系统对电网波动性的大小。

3) 弃水量最小:联合发电系统应该充分利用电站流域的水力资源,将弃水量最小作为规划的目标之一是具有合理性的。

$$\min F_3 = \min \left\{ \sum_y^{n_y} \sum_{t_1}^T P_{hy,t_1}^{\max} - P_{hy,t_1}^{\text{real}} \right\} \quad (5)$$

式中: P_{hy,t_1}^{\max} 为 t_1 时刻水电站理论最大出力; P_{hy,t_1}^{real} 为水电站实际并网出力。

4) 弃光量最小:弃光量是衡量新能源发电系统新能源消纳能力的重要指标,弃光量越小,则对新能源的消纳能力越大。

$$\min F_3 = \min \left\{ \sum_y^{n_y} \sum_{t_1}^T P_{pv,t_1}^{\max} - P_{pv,t_1}^{\text{real}} \right\} \quad (6)$$

式中: P_{pv,t_1}^{\max} 为 t_1 时刻光伏电站理论最大出力; P_{pv,t_1}^{real} 为光伏电站实际并网出力。

1.2.2 规划约束

1) 功率平衡约束:各时刻联合系统输出功率与电网交互功率之和应该等于负荷大小。

$$P_{pv,t} + P_{hy,t} + P_{pm,t} + P_{buy,t} = P_{load,t} \quad (7)$$

式中: $P_{pv,t}$ 为光伏输出功率; $P_{hy,t}$ 为水力输出功率;

$P_{pm,t}$ 为抽水蓄能输出功率(当工作在抽水蓄能状态时,其值为 $-P_t^{pp}$;当工作在放水发电状态时,其值为 P_t^{pg}); $P_{buy,t}$ 为向电网购电补偿功率; $P_{load,t}$ 为负荷功率。

2) 各机组机容量约束:机组出力值不大于其容量最大值。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{hy,t} \leq P_{hy,max} \\ 0 \leq P_{pv,t} \leq P_{pv,max} \\ 0 \leq P_t^{pp} \leq P_{max}^{pp} \\ 0 \leq P_t^{pg} \leq P_{max}^{pg} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_t^{pp} 为抽水蓄能电站工作在抽水状态时的出力; P_t^{pg} 为抽水蓄能电站工作在放水发电状态时的出力。

3) 线路潮流约束:节点上的功率应该在潮流稳定范围内。

$$P_{j,min} \leq P_{j,t} \leq P_{j,max} \quad (9)$$

式中: $P_{j,t}$ 为某时刻 j 节点的功率值; $P_{j,max}$ 和 $P_{j,min}$ 分别为节点潮流稳定功率值的最大值和最小值。

4) 节点电压约束:节点电压应在节点电压稳定范围内。

$$V_{j,min} \leq V_{j,t} \leq V_{j,max} \quad (10)$$

式中: $V_{j,t}$ 为某时刻 i 节点的电压大小; $V_{j,max}$ 和 $V_{j,min}$ 分别为 i 节点电压稳定范围的最大值和最小值。

5) 水量平衡约束:在抽水蓄能调度周期内电站的抽水量和放水量应该保持平衡,这里取调度周期为一日。

$$\sum_t n_k P_t^{pg} - n_k \frac{P_t^{pp}}{\eta} = 0 \quad (11)$$

式中: η 为抽水蓄能电站抽水状态对比放水状态的效率之比; n_k 为水量和电量的转换系数。

2 改进的 NSGA-II 算法

2.1 NSGA-II 法求解约束问题

NSGA-II 算法是由 Deb 提出的求解多目标优化问题的智能算法,其采用了快速非支配的排序算法,引入了精英保留策略和拥挤度的概念,确保了多目标帕累托解的均匀性和多样性^[6],其算法的基本步骤如下:

- 1) 快速非支配排序,得到所有解的帕累托等级。
- 2) 计算拥挤度,确保解的多样性。
- 3) 帕累托等级和拥挤度作为适应度算子,计算支配关系。

4) 进行选择交叉,将父辈和子代精英个体选入下一代,重复步骤 1 至步骤 3 过程。

在处理带约束条件的问题时,为了避免罚函数带来的主观性和调整难度高的问题,采用改进的适应度比较算子来处理约束条件^[7]。

首先,定义个体的约束违反度 n_v ,其反映的是个体违反约束程度的大小。需要注意的是,各个约束的量纲和数量级不同,不能进行直接的约束度相加计算,应该对数据进行归一化处理之后再行约束违反度的计算。

对所有的种群个体分别计算不等式和等式约束的违反值储存后,进行数据的归一化处理来消除量纲的影响,得到归一化后的约束违反值,再用欧式距离的定义来得到约束违反度 n_v ,计算公式为

$$n_v = \sqrt{\sum_{i=1}^p v'_{g,i}{}^2 + \sum_{j=1}^q v'_{h,j}{}^2} \quad (12)$$

式中, $v'_{g,i}$ 和 $v'_{h,j}$ 分别为归一化后的不等式、等式约束违反值,其值为 0 与约束违反值中最大值的归一结果。

对于没有违反约束的可行解,其约束违反度为 0,而不可行解的约束违反度越大说明其违反约束的程度越高。其支配规则定义为:可行解支配不可行解;约束违反度 n_v 小的不可行解支配较大的不可行解。

这种对于约束的处理方式是可行解的优先性绝对大于非可行解的,严格保证了筛选出的解的可行性。但是部分非可行解可能含有优秀的基因特征,将它们排除在搜索空间外可能会降低算法搜索的收敛性。为了处理这一问题,采用了将种群保持一定比例高质量不可行解的方法,即:先以约束支配条件保留种群大部分的精英,再在不可行解中选择一定数目的非可行解加入种群。

2.2 改进后的 NSGA-II 算法

1) 自适应变异策略

在遗传算法中引入变异算子是为了提高全局解空间中解的搜索能力。自适应变异是一种在种群进化过程中变异概率随之改变的变异算法,其算法的思想是:在算法的初步阶段,将变异概率设置得大一些,以便解在全局范围上的搜索,在开始阶段进行广泛搜索可以保持种群的多样性;在算法的中后期,缩小变异概率并进行详细搜索以防止最优解的优良特征信息被破坏。普通的自适应变异是根据进化代数的增加来进行变异概率的收缩,这种自适应方法只考虑了进化代数,并没有将种群特征信息加入考虑。考虑种群特征的自适应变异应该将种群的多样性信

息加入自适应的计算过程,在种群多样性较差时变异概率降低,多样性良好时变异概率上升。引入粒子离散度的概念^[8],其计算公式为

$$\delta = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{f(x_i^t) - f_{avg}^t}{f_{max}^t - f_{min}^t} \right| \quad (13)$$

式中, f_{avg}^t 、 f_{max}^t 、 f_{min}^t 分别为第 t 代粒子适应度的平均值、最大值和最小值。

需要注意的是, NSGA-II 算法中有多个目标,其适应度无法通过简单的目标函数来替代,里采用的是多目标函数归一化后用欧氏距离来表示的等效适应度函数。

个体的离散度反映的是个体的适应度与总体平均适应度的偏差,其值越大,则粒子离散程度越大,说明个体的多样性好,变异概率应该设置得越高。设计变异概率计算式为

$$p_m^t = \delta p_m^0 \quad (14)$$

式中: p_m^0 为初始变异率; p_m^t 为第 t 代粒子的变异效率。

2) 多种群协同进化

遗传算法依赖于个体在解空间内的搜索来进行寻优,其种群数越大,则在解空间域的分布就越广,搜索能力越强。但是种群数目变大也会带来算法复杂度提高、运算速率慢的问题。为了提高遗传算法的全局搜索能力,引入多种群协同进化的改进算法。在算法中设置一个主群和多个子群,各种群的初始化、选择、交叉、变异均独立进行,但子群最优解会进入主群,并替代排序值最低的个体。通过这种种群间的协同进化手段能加大种群的全局搜索能力,防止算法陷入局部最优。

以上两种机制的引入的确可以改善 NSGA-II 算法的收敛性和局部最优搜索能力,但是在实践中发现,由于水-光-蓄联合发电系统规划问题的决策空间维度很高,算法搜索帕累托前沿的效果仍然难以达到令人满意的地步。为了解决这个问题,考虑将水-光-蓄联合发电系统规划问题进行分解,通过分步来求解模型问题,达到将问题降维的目的,具体的过程将在下一章中详细描述。

3 算例

3.1 算例参数设置

结合实际工程算例,设定工程已有 150 MW 水电装机容量,完成对水-光-蓄联合发电系统中的光伏电站和抽水蓄能电站进行选址定容问题的求解。

由于水-光-蓄联合系统的规划涉及到规划年内电站的出力调度优化,而已有的水电站均为日调度电站,联系前面所提到的水电的季节特性和光伏在阴雨天气和晴朗天气出力不同的情况,考虑设计具有代表性的典型日场景集来综合代替年调度场景,以达到将场景缩减和将问题降维的目的。

采用 k-means++ 算法对数据先行处理。根据上面的分析,水电站受水文环境的影响,一年按来水量可分为丰水、平水、枯水 3 个时期,将水电站按照其来水量划分为丰水期出力、平水期出力、枯水期出力 3 个典型场景。而光伏受辐射强度影响,可以分为辐射强度高(代表晴朗天气)、辐射强度低(代表阴雨天气)两种典型场景。将数据时间尺度统一到分钟级尺度,考虑到水电站数据集中有异常停机或检修的场景,设置水电数据聚类数为 4,光伏聚类数为 2。算例结果如图 4 和图 5 所示。图中带标识的粗线为各场景的聚类中心,即各场景的典型出力值,浅色的细线为各聚类场景的数据集。

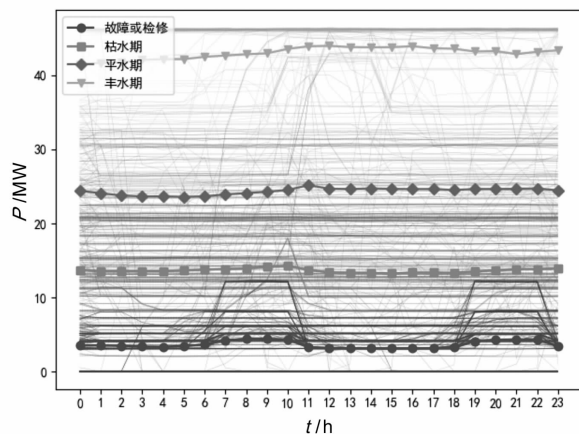


图 4 水电站出力聚类结果

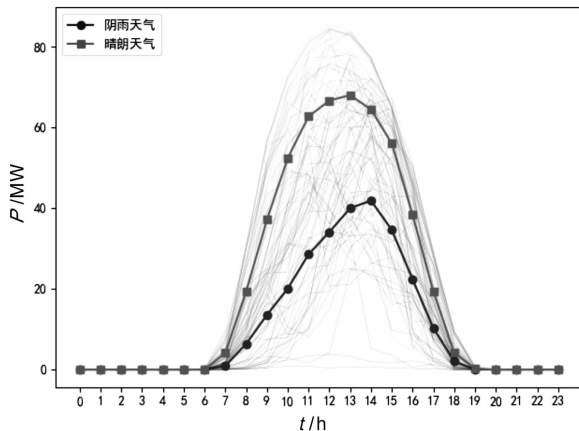


图 5 光伏电站出力聚类结果

综合水电站 3 种和光伏电站 2 种典型场景,得到 6 种典型场景,其在规划年内的时期占比如表 1 所示。

表 1 典型日场景数比例

场景类型	比例/%
丰水期晴天	22.7
丰水期阴天	17.3
平水期晴天	11.5
平水期阴天	8.5
枯水期晴天	22.7
枯水期阴天	17.3

已有的典型日负荷数据较少,对于负荷的预测效果较差,考虑规划年的负荷增长用负荷增长系数来求取。当前的负荷典型日曲线见图 6。

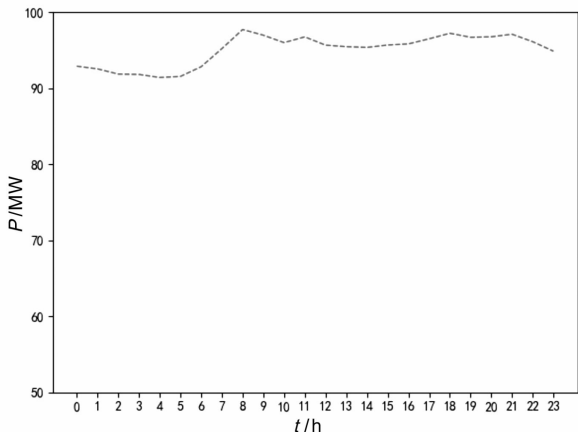


图 6 负荷典型日曲线

由于抽水蓄能的建设选址需要考虑地理水文环境因素,在数据不足且结合工程实际的情况下,假定其位置固定,只需规划容量。光伏的出力受光照和温度的影响,为了简化计算,选取了 5 个光伏电站待选点,规划算例网络示意如图 7 所示。

设置总规划年为未来 5 年,贴现率为 6%,负荷增长率为 10%。考虑到水-光-蓄联合发电系统在枯水期夜晚出力不足,不能满足负荷需求,设置水-光-蓄联合发电系统与主网间存在购电功率交互行为,如表 2 所示。表 3 为各待选机组的详细参数。5 个光伏待选位置单位容量光伏电站输出见图 8。

表 2 分时电价

时间段	(0:00—7:00) 谷时	(7:00—9:00, 12:00—17:00, 22:00—24:00) 平时	(9:00—12:00, 17:00—22:00) 峰时
电价/ (元/kWh)	0.47	0.88	1.1

表 3 待选机组参数

类型	投资费用/ (10 ⁶ 元/MW)	机组运行 年限/年	效率/ %
光伏	8.0	20	0.90
抽水蓄能	7.5	20	0.75

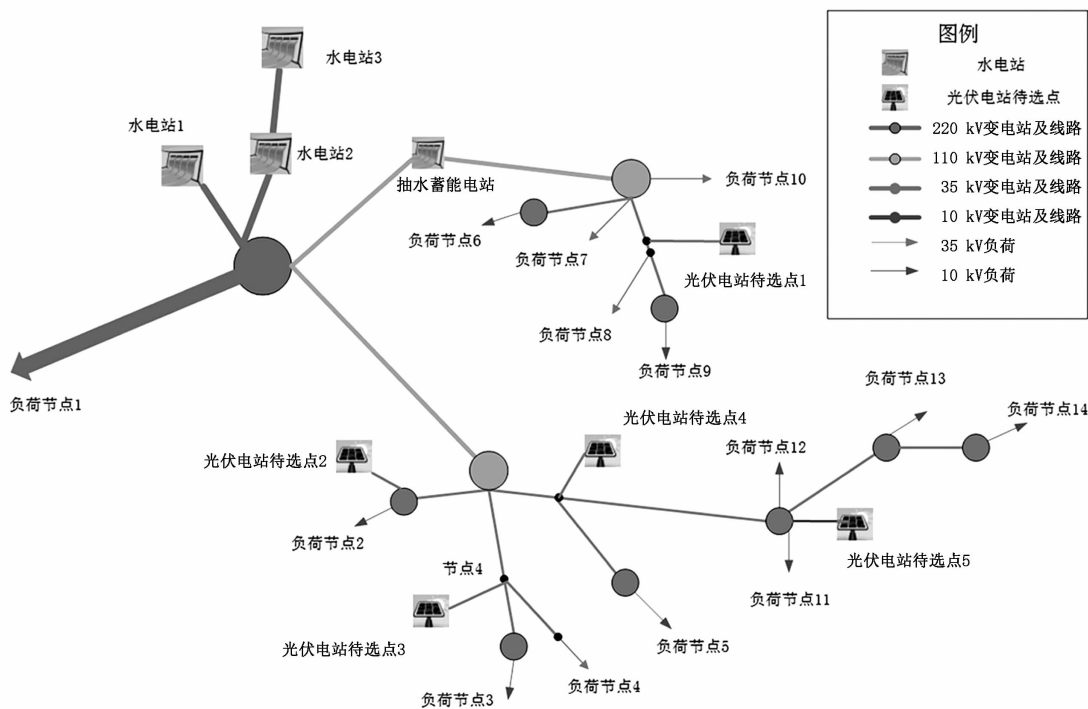


图 7 算例网架接线

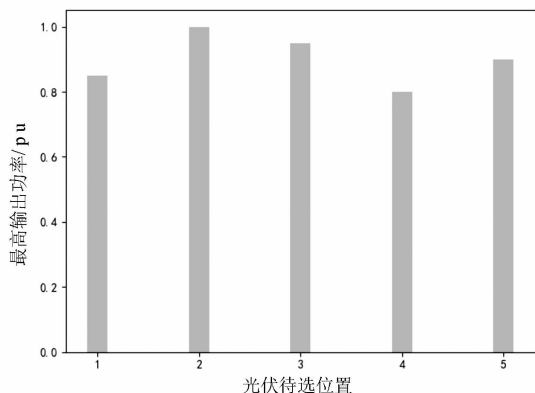


图 8 光伏待选位置单位容量光伏电站输出

3.2 模型求解

考虑到 NSGA - II 算法在面对高维问题时表现出的容易陷入局部最优和早熟收敛的现象,将水 - 光 - 蓄联合发电系统的规划问题转化成规划和优化运行两个层面的问题进行研究。首先,用 NSGA - II 算法求得规划方案,再在相应的规划方案下求取每个规划年每个典型场景下的出力调度优化,实现问题的降维处理,简化计算过程。

1) 规划模型求解

规划模型确定各规划年在不同待选位置上建设的光伏电站容量以及抽水蓄能电站新增容量,规划方案确定了投资模型中的投资费用,同时影响到运行优化,是一个非线性的优化问题。采用 NSGA - II 算法进行规划模型的求解,运行成本、弃光率、弃水率等目标由优化运行系统模型确定,每个个体执行一次水 - 光 - 蓄联合发电模型的优化程序,时间成本较高。

2) 水 - 光 - 蓄联合发电系统优化运行模型求解

水光蓄联合发电系统的运行影响到运行成本、弃光率、弃水率等多项影响目标函数,原则上是一个多目标优化的问题。但是考虑到时间成本上的问题,同时对于一个确定的规划模型而言,显然其机组运行的策略是确定且唯一的,将其作为多目标优化模型来处理是不合适的。从工程实际出发,往往机组运行的目标是在确保电网运行稳定的前提下尽量减少运行成本,于是将水 - 光 - 蓄联合发电系统优化问题转化为运行成本最低的单目标规划。

同时考虑到所强调的是水光之间的互补性,在水电站的容量已经确定的情况下,应该尽可能地消纳新建的光伏电站输出。因此在光资源和水资源同

样充足的情况下,优先考虑将光伏并网,水电资源弃置或留作备用,这也是符合实际运行原则的。

在算法的实现层面,为了保证光伏发电并网的优先度高于水电,设置水电运行成本为一个很小的值,而光伏发电成本设置为 0。同时抽水蓄能运行过程存在非线性约束式(11),引入新的布尔变量后将约束线性化后,将优化运行问题转换成易于求解的线性规划问题,提高算法效率。

求解得到一系列的帕累托最优解,由于将光伏输出优先并入电网,所有的最优解弃光率目标均为 0,另外 3 个目标在目标空间的分布如图 9 所示。

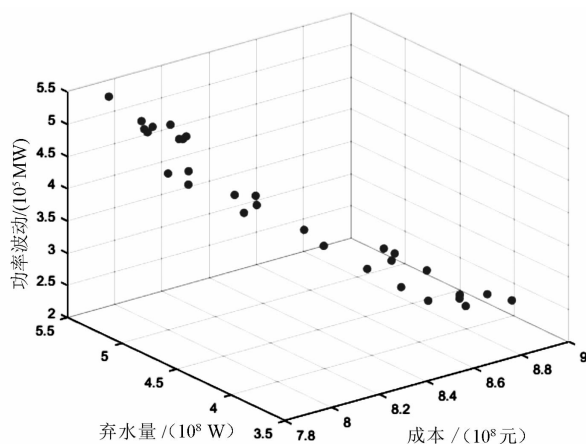


图 9 帕累托解在三维目标空间中的分布

对得到的帕累托最优解集通过 TOPSIS 算法进行排序,就能得到最优解。TOPSIS 法是一种逼近理想解的排序办法,通过检测评价对象与理想解和负理想解的距离来进行排序^[9],限于篇幅原因不再展开。

(1) 假设各规划目标指标权重相同,均为 0.25,则可得到最优规划方案 1,其规划结果见表 4,规划目标值见表 5。

表 4 最优规划方案 1

规划年份	抽水蓄能电站新建容量/MW	光伏电站新建容量/MW				
		待选点 1	待选点 2	待选点 3	待选点 4	待选点 5
第 1 年	5	6	5	7	10	5
第 2 年	5	5	2	5	10	2
第 3 年	2	5	2	7	8	3
第 4 年	0	10	9	1	6	10
第 5 年	4	4	9	7	6	6
合计	16	30	27	27	40	26

表5 最优规划方案1 电网规划目标值

交互功率波动/ MW ²	规划成本/ 10 ⁶ 元	弃水量/ MWh	弃光量/ MWh
1 331.14	801.91	523 871	0

(2) 考虑到经济性指标和波动性指标对于综合电站的建设和运行影响程度较大,考虑将这两个指标权重调高,设置权重向量为 $[0.3, 0.3, 0.2, 0.2]$,得到规划方案2,规划结果见表6,规划目标见表7。

表6 最优规划方案2

规划 年份	抽水蓄能 电站新建 容量/MW	光伏电站新建容量/MW				
		待选 点1	待选 点2	待选 点3	待选 点4	待选 点5
第1年	5	6	5	8	4	5
第2年	5	10	1	7	7	7
第3年	5	4	10	4	8	3
第4年	1	10	9	10	2	3
第5年	4	1	7	9	6	8
合计	20	31	32	38	27	26

表7 最优规划方案2 电网规划目标值

交互功率波动/ MW ²	规划成本/ 10 ⁶ 元	弃水量/ MWh	弃光量/ MWh
1 491.62	790.46	534 508	0

对比分析规划方案1和规划方案2,发现规划方案2比方案1建设的光伏容量更大,光伏的加入虽然增加了建设成本,但减小了联合发电系统的外购电量和运行成本,使得经济性效益提高,但同时也引起了系统交互功率波动变高、同时弃水量升高。另外方案2建设抽水蓄能电站的容量也更大,其在经济方面的有益作用也是明显的,且更大抽水蓄能容量的加入能提高系统的稳定裕度。

4 结 语

上面设计了一种联合了水力发电和分布式光伏以及抽水蓄能电站联合运行的发电系统,借此来解决光伏电能消纳困难的问题。同时针对水-光-蓄联合发电系统的多目标规划问题,联合了改进的NSGA-II算法和TOPSIS算法给出了最优解的求解方法。通过设置不同的权重,可以得到不同的规划结果,以适应不同的优化目标。

参考文献

- [1] Liu Y, Tan S, Jiang C. Interval Optimal Scheduling of Hydro - PV - Wind Hybrid System Considering Firm Generation Coordination[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 11(1): 63 - 72.
- [2] Parastegari M, Hooshmand R A, Khodabakhshian A, et al. Joint Operation of Wind Farm, Photovoltaic, Pump - storage and Energy Storage Devices in Energy and Reserve Markets[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 275 - 284.
- [3] Pali B S, Vadhera S. A Novel Solar Photovoltaic System With Pumped - water Storage for Continuous Power at Constant Voltage [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 133 - 142.
- [4] Bakhtiari H, Naghizadeh R A. Multi - criteria Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Systems Including wind, Photovoltaic, Battery, and Hydrogen Storage with ϵ - constraint Method [J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(8): 883 - 892.
- [5] Notton G, Mistrushi D, Stoyanov L, et al. Operation of A Photovoltaic - wind Plant with A Hydro Pumping - storage for Electricity Peak - shaving in an Island Context [J]. Solar Energy, 2017, 157: 20 - 34.
- [6] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm; NSGA - II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 - 197.
- [7] Seshadri A. Multi - objective Optimization Using Evolutionary Algorithms (MOEA) [J/OL]. Matlab Website: [Http://www. Mathworks. com/matlabcentral/fileexchange/10429](http://www. Mathworks. com/matlabcentral/fileexchange/10429), by, 2006, 19.
- [8] 黄松, 田娜, 纪志成. 基于自适应变异概率粒子群优化算法的研究 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 874 - 879.
- [9] Lai Y J, Liu T Y, Hwang C L. Topsis for MODM [J]. European Journal of Operational Research, 1994, 76(3): 486 - 500.

作者简介:

周修宁 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源、电力市场、电力系统优化。

(收稿日期: 2020 - 09 - 28)