

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231044

面向新型电力系统的输电网与分布式变速抽水蓄能联合规划

徐秋实¹, 施通勤¹, 井浩然², 姚伟², 莫石¹, 赵红生¹, 文劲宇²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院
强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对高比例新能源场景下分布式变速抽水蓄能的容量配置及其在电网中的位置接入问题, 提出了输电网和分布式变速抽水蓄能的联合规划方案。首先, 考虑了各类抽水蓄能的运行和库容约束、火电机组的出力爬坡约束以及输电网的传输能力, 以分布式新能源的经济消纳为优化目标, 建立了分布式变速抽水蓄能和输电网间的联合规划模型。然后, 通过凸松弛方法将该模型转化为混合整数线性规划模型, 以两阶段优化方法求解得到了分布式变速抽水蓄能与输电网的联合规划方案。最后, 采用两个标准测试系统对比验证了所提含分布式变速抽水蓄能的联合规划相较于定速抽水蓄能的规划方案, 能更好地与其他灵活性资源相协调以消纳风光可再生能源, 总体上可降低约20%的成本。

关键词: 高比例新能源; 变速抽水蓄能; 输电网; 联合规划

Joint planning of a transmission network and distributed variable speed pumped storage for a new power system

XU Qiushi¹, SHI Tongqin¹, JING Haoran², YAO Wei², MO Shi¹, ZHAO Hongsheng¹, WEN Jinyu²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To address the capacity allocation of distributed variable-speed pumped storage and its positional access in the network when there is a high proportion of renewable energy, a joint planning scheme for the transmission network and distributed variable-speed pumped storage is proposed. First, the operation and reservoir constraints of various types of pumped storage, the output and ramp constraints of thermal power units, and the transmission capacity of the transmission networks are taken into account, and a joint planning model between distributed variable-speed pumped storage and the transmission network is established with the optimization objective of economic consumption of distributed renewable energy. Then, the model is transformed into a mixed-integer linear programming model by a convex relaxation method, and the joint planning scheme for distributed variable-speed pumped storage and the transmission network is obtained by using a two-stage optimization method. Finally, two standard test systems are adopted for comparison and validation. Compared to a fixed-speed pumped storage scheme, the proposed joint planning with distributed variable-speed pumped storage can effectively coordinate with other flexible resources to accommodate renewable energy sources, leading to approximately 20% overall cost reduction.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-20222010A-1-1-ZN).

Key words: high-penetrated renewable energy; variable speed pumped storage; transmission network; joint planning

0 引言

为实现碳达峰、碳中和目标, 构建以新能源为

主体的新型电力系统是我国的迫切需求^[1-2]。新能源具有资源丰富、可再生等特点, 但由于新能源出力具有间歇性和波动性的特点, 加之我国电源结构以燃煤机组为主, 系统运行灵活性不足, 使得高比例新能源消纳面临重大挑战^[3-4]。传统输电网规划的主要目的是根据已有网架结构规划未来几年内的电网

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-20222010A-1-1-ZN)

建设,以匹配区域内的负荷增长需求。但随着大规模波动性新能源的接入,传统的输电网规划方法已经无法处理高比例新能源场景下的电力系统规划问题,因此研究面向新型电力系统的输电网规划方法具有重大的现实意义。

早期输电网规划仅接入了一定比例的波动性风光能源,没有考虑新能源的经济消纳,导致弃风弃光率较高,造成资源浪费^[5-7]。储能作为一种能量储存装置,不仅可以有效解决大规模新能源接入电网后的弃风弃光问题,还可以很好地起到削峰填谷的作用,缓解输电通道拥塞。文献[8]研究了风电场和配套储能的建设问题,提出了含机会约束的风电场-储能-输电网联合规划模型。文献[9]考虑了储能系统的运行特性,并对其效益进行了评估,建立了储能与输电网联合规划模型。文献[10]以氢-电混合储能系统为例,建立了考虑系统功率和容量配置的双层规划模型。文献[11]考虑了重力储能、蓄电池储能、压缩空气储能等多种储能形式,提出了一种并网风光储联合规划模型。文献[12]分析了储能和火机组的相互作用,提出了考虑系统灵活性供需平衡的源-储-网一体化规划模型。

目前的储能装置主要包括电化学储能、物理储能和抽水蓄能。抽水蓄能作为技术最成熟、经济最优、最具大规模开发条件、生命周期最长的绿色低碳调节储能,可以与风光等波动性新能源形成良好的互补适配,是我国新型电力系统发展高效率调节储能设施的最优选择^[13-15]。为此,国家能源局和国家电网相继发布抽水蓄能中长期发展规划文件。目前我国抽水蓄能建成投产规模较少、在电源结构中占比较低,不能有效满足电力系统安全稳定运行和新能源大规模快速发展的需求。而且大多抽水蓄能主要采用固定转速的定速机组,无法保证抽水蓄能以最大运行效率运行,不适宜于高比例新能源的接入。变速抽水蓄能可以通过改变转速使其运行在最优工况,且具有更宽的调节范围和更大的运行效率^[16]。因此,研究输电网和分布式变速抽水蓄能的联合规划,对构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统具有重要意义。

早期抽水蓄能和输电网规划的研究大多单独规划两类灵活性资源。文献[17]考虑输电网架约束,提出了考虑梯级水电的光-水电源规划模型。文献[18]将连锁故障风险纳入模型,提出了含抽水蓄能的多目标输电网规划模型。随后,有研究者关注抽水蓄能和输电网的联合规划。文献[19]为储能引入激励机制,提出了抽水蓄能和输电网的多目标联合规划模型,以缓解输电通道拥塞。文献[20]以系统

经济性最优为目标,提出了考虑柔性负荷和抽水蓄能的输电网扩展规划模型。文献[21]考虑了电池储能、抽水蓄能、发电机组的多级协调校正控制,提出了含安全约束的抽水蓄能和输电网的联合规划模型。然而,已有文献大多没有建立抽水蓄能的具体运行模型,且主要涉及定速抽水蓄能的规划,鲜少有分布式变速抽水蓄能和输电网联合规划的研究报道。

本文提出了高比例新能源场景下的输电网和分布式变速抽水蓄能的联合规划模型,通过分布式变速抽水蓄能的配置和输电网的扩展规划,实现波动性风光能源的经济高效消纳。该模型以系统的建设成本、灵活性资源的运行成本和弃风弃光率最小为目标,考虑了网架传输能力、抽水蓄能运行和火电机组出力等约束。经过凸优化处理之后,通过两阶段优化方法求解得到了规划方案,并通过仿真验证了所提模型的有效性和优越性。

1 含分布式变速抽水蓄能的输电网系统

1.1 含分布式变速抽水蓄能的输电网系统结构

本文以 Graver-6 节点系统为例介绍含分布式变速抽水蓄能的输电网系统,其网架结构如图 1 所示。输电网系统由分布在各个区域的 6 个节点组成,系统中接入了风力发电机组、光伏发电机组、火电机组、定速抽水蓄能以及电池储能,以供给区域内的电力负荷。系统中各个节点除通过线路进行连接之外,还可以按照新能源接入和负荷增长需求在候选线路位置新建线路,也可以按照实际地理情况、水文限制等条件来规划分布式变速抽水蓄能,以实现系统电能灵活传输储存和电力电量平衡。

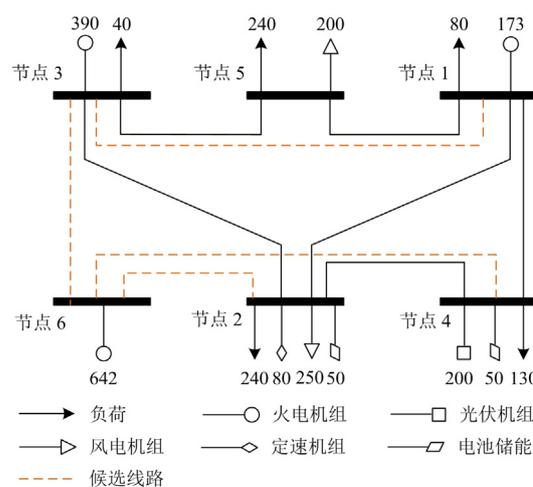


图 1 Garver-6 节点系统网架结构图

Fig. 1 Structure diagram of Garver-6 bus system

本文的研究目的是根据地理和水文等条件，考虑现有输电网中的各种灵活性资源，研究面向新型电力系统的输电网与分布式变速抽水蓄能联合规划，以实现分布式新能源的经济消纳。

1.2 定、变速抽水蓄能机组的运行特性

抽水蓄能作为技术最成熟、全生命周期经济最优的绿色低碳储能，与风光等波动性新能源有良好的互补性，适直接入输电网系统。抽水蓄能有两种运行工况：水轮机和水泵。当新能源发电过剩时，抽水蓄能运行在水泵工况，将电能转换为水能进行储存，以消纳波动性新能源；当新能源出力不足时，抽水蓄能运行在水轮机工况，将存储的水能转化为电能传输至输电线路，从而满足电负荷需求。

变速抽水蓄能相较于定速抽水蓄能的优势主要在于其具有更宽泛的转速调节范围，可以保持最佳的运行效率。定、变速抽水蓄能机组在不同工况下的运行特性曲线如图 2 所示。图 2(a)给出了抽水蓄

能机组在水轮机工况下的出力范围及效率对比图，其中： $H_{g\max}$ 、 $H_{g\min}$ 和 H_{gr} 分别表示水轮机工况下的最大、最小与额定水头； $P_{g\max}$ 和 $P_{g\min}$ 分别表示发电工况下的最大、最小出力。在水泵工况下，变速机组与定速机组在水泵工况下的出力范围及效率对比如图 2(b)所示，图中： $H_{p\max}$ 与 $H_{p\min}$ 分别表示水泵工况下的最大与最小扬程； $P_{p\max}$ 表示水泵工况下的最大入力。当抽水蓄能机组运行在水轮机工况时，定速抽水蓄能机组会偏离最优运行区，并且只能在较小范围内调节转速，而变速抽水蓄能机组能在更大范围内调节转速，保持最佳运行效率。当抽水蓄能运行在水泵工况下时，定速抽水蓄能机组只能以额定转速和额定功率进行工作，而变速抽水蓄能机组可以改变电机转速寻找最佳的运行区域。因此，变速抽水蓄能具有更优的灵活性。

2 分布式抽水蓄能与输电网联合规划模型

2.1 系统优化目标

系统的优化目标是 minimized 联合规划的总成本 C^{total} ，包括投资成本和运行维护成本，即

$$\min C^{\text{total}} = C^{\text{inv}} + \frac{(1+r)^y - 1}{r(1+r)^y} \times (C^{\text{oper}} + C^{\text{main}}) \quad (1)$$

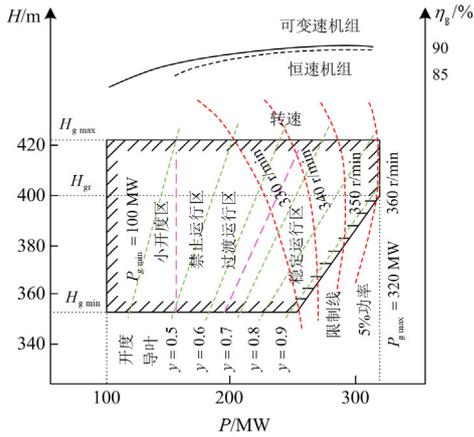
式中： C^{inv} 为投资成本； C^{oper} 为运行成本； C^{main} 为维护成本； y 为规划年限； r 为年利率。

2.1.1 投资成本

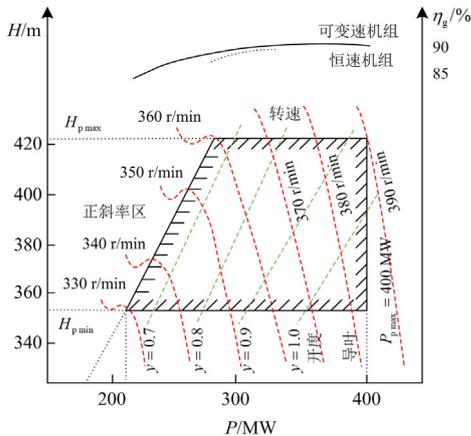
投资成本 C^{inv} 主要包括各类设备的建设成本。

$$\begin{cases} C^{\text{inv}} = C_{\text{line}}^{\text{inv}} + C_{\text{vp}}^{\text{inv}} + C_{\text{res}}^{\text{inv}} \\ C_{\text{line}}^{\text{inv}} = \sum_{l \in \Omega^{\text{L}+}} c_l^{\text{L}} x_l^{\text{L}} \\ C_{\text{vp}}^{\text{inv}} = c_{\text{vp}}^{\text{inv}} \sum_{n \in \Omega_n^{\text{vp}}} P_n^{\text{vp}} \\ C_{\text{res}}^{\text{inv}} = c_{\text{res}}^{\text{inv}} \sum_{n \in \Omega_n^{\text{res}}} V_n^{\text{res}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $C_{\text{line}}^{\text{inv}}$ 、 $C_{\text{vp}}^{\text{inv}}$ 和 $C_{\text{res}}^{\text{inv}}$ 分别表示新建线路、变速抽水蓄能机组和水库的投资成本； c_l^{L} 、 $c_{\text{vp}}^{\text{inv}}$ 和 $c_{\text{res}}^{\text{inv}}$ 分别表示新建线路 l 、新建变速抽水蓄能机组和水库的单位容量建设成本； $\Omega^{\text{L}+}$ 、 Ω_n^{vp} 分别表示候选新建线路集合、候选新建变速抽水蓄能机组及水库集合，其中变速抽水蓄能机组和水库的候选节点依据实际地理位置及水资源条件确定； P_n^{vp} 表示节点 n 处新建变速抽水蓄能机组的额定装机容量； V_n^{res} 表示节点 n 处新建水库的最大容量； x_l^{L} 表示候选线路的状态，如果建设候选线路 l ，则 $x_l^{\text{L}} = 1$ ，反之 $x_l^{\text{L}} = 0$ 。



(a) 水轮机工况



(b) 水泵工况

图 2 抽水蓄能机组运行特性

Fig. 2 Operating characteristics of pumped storage units

2.1.2 运行成本

运行成本 C^{oper} 主要包括火发电机组的煤耗成本、启停成本、切负荷成本、电池退化成本、弃风和弃光惩罚成本。

$$\left\{ \begin{aligned} C^{\text{oper}} &= C_{\text{Th}}^{\text{oper}} + C_{\text{UD}}^{\text{oper}} + C_{\text{LS}}^{\text{oper}} + C_{\text{BES}}^{\text{oper}} + C_{\text{W}}^{\text{oper}} + C_{\text{PV}}^{\text{oper}} \\ C_{\text{Th}}^{\text{oper}} &= \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\sum_{i=1}^{N_G} \left(\sum_{t=1}^T c_i^{\text{Th}} P_{i,t,s}^{\text{Th}} \right) \right) \\ C_{\text{UD}}^{\text{oper}} &= \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\sum_{i=1}^{N_G} \left(\sum_{t=1}^T (c_{i,t,s}^{\text{U}} + c_{i,t,s}^{\text{D}}) \right) \right) \\ C_{\text{LS}}^{\text{oper}} &= \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\sum_{n=1}^N \left(\sum_{t=1}^T (c_n^{\text{LS}} P_{n,t,s}^{\text{LS}}) \right) \right) \\ C_{\text{BES}}^{\text{oper}} &= \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{BES}}} \left(\sum_{t=1}^T (c_i^{\text{BES}} \cdot (P_{\text{ch},i,t,s}^{\text{BES}} + P_{\text{dis},i,t,s}^{\text{BES}})) \right) \right) \\ C_{\text{W}}^{\text{oper}} &= \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T (c_i^{\text{W}} P_{i,t,s}^{\text{W}}) \right) \right) \\ C_{\text{PV}}^{\text{oper}} &= \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} \left(\sum_{t=1}^T (c_i^{\text{PV}} P_{i,t,s}^{\text{PV}}) \right) \right) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: $C_{\text{Th}}^{\text{oper}}$ 、 $C_{\text{UD}}^{\text{oper}}$ 、 $C_{\text{LS}}^{\text{oper}}$ 、 $C_{\text{BES}}^{\text{oper}}$ 、 $C_{\text{W}}^{\text{oper}}$ 、 $C_{\text{PV}}^{\text{oper}}$ 分别表示火发电机组的煤耗成本、火发电机组的启停成本、切负荷成本、电池的退化成本、弃风和弃光成本; $P_{i,t,s}^{\text{Th}}$ 表示火电机组 i 在场景 s 下时段 t 的出力; $c_{i,t,s}^{\text{U}}$ 、 $c_{i,t,s}^{\text{D}}$ 分别表示火电机组 i 在场景 s 下时段 t 的启动成本和关停成本; $P_{\text{ch},i,t,s}^{\text{BES}}$ 和 $P_{\text{dis},i,t,s}^{\text{BES}}$ 分别表示电池 i 在场景 s 下时段 t 的充、放电功率; $P_{n,t,s}^{\text{LS}}$ 表示节点 n 在场景 s 下时段 t 的切负荷功率; $P_{i,t,s}^{\text{W}}$ 表示风电机组 i 在场景 s 下时段 t 的弃风功率; $P_{i,t,s}^{\text{PV}}$ 表示光伏机组 i 在场景 s 下时段 t 的弃光功率; c_i^{Th} 表示火电机组 i 的煤耗成本系数; c_n^{LS} 表示节点 n 处的单位切负荷成本; c_i^{BES} 表示电池 i 的单位退化成本; c_i^{W} 、 c_i^{PV} 分别表示弃风、弃光惩罚系数, 可以从已有文献获取, 也可以根据当地政策规定进行设置; N 、 N_G 、 N_{BES} 、 N_W 、 N_{PV} 分别表示系统中总的节点个数、发电机个数、电池个数和风机、光伏机组个数; S 和 T 分别表示随机场景数和一天内划分的时段数; ρ_s 表示蒙特卡洛场景概率。

2.1.3 维护成本

维护成本 C^{main} 主要包括定、变速抽水蓄能机组和水库的维护成本。

$$\left\{ \begin{aligned} C^{\text{main}} &= C_{\text{sp}}^{\text{main}} + C_{\text{vp}}^{\text{main}} + C_{\text{res}}^{\text{main}} \\ C_{\text{sp}}^{\text{main}} &= c_{\text{sp}}^{\text{main}} \sum_{i=1}^{N_{\text{sp}}} P_{e,i}^{\text{sp}} \\ C_{\text{vp}}^{\text{main}} &= c_{\text{vp}}^{\text{main}} \sum_{i=1}^{N_{\text{vp}}} P_{e,i}^{\text{vp}} \\ C_{\text{res}}^{\text{main}} &= c_{\text{res}}^{\text{main}} \sum_{i=1}^{N_{\text{res}}} (V_{i,\text{max}}^{\text{UR}} + V_{i,\text{max}}^{\text{LR}} + V_{i,\text{max}}^{\prime\text{UR}} + V_{i,\text{max}}^{\prime\text{LR}}) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: $C_{\text{sp}}^{\text{main}}$ 、 $C_{\text{vp}}^{\text{main}}$ 、 $C_{\text{res}}^{\text{main}}$ 分别表示定速抽水蓄能机组、变速抽水蓄能机组和水库的维护成本; $c_{\text{sp}}^{\text{main}}$ 、 $c_{\text{vp}}^{\text{main}}$ 、 $c_{\text{res}}^{\text{main}}$ 分别表示定速抽水蓄能机组、变速抽水蓄能机组和水库单位容量的维护成本; $P_{e,i}^{\text{sp}}$ 、 $P_{e,i}^{\text{vp}}$ 分别表示定速抽水蓄能机组 i 和变速抽水蓄能机组 i 的额定装机容量; N_{sp} 、 N_{vp} 、 N_{res} 分别表示定速抽水蓄能机组、变速抽水蓄能机组和水库的总个数; $V_{i,\text{max}}^{\text{UR}}$ 、 $V_{i,\text{max}}^{\text{LR}}$ 、 $V_{i,\text{max}}^{\prime\text{UR}}$ 和 $V_{i,\text{max}}^{\prime\text{LR}}$ 分别表示已有上、下水库的最大容量和新建上、下水库的最大容量。

2.2 系统灵活性资源约束条件

系统灵活性资源约束主要包括火电机组约束、电池储能约束、定变速抽水蓄能约束、水库约束、线路潮流约束和输电网约束。

2.2.1 火电机组约束

燃煤火电机组作为传统的发电系统, 通过燃烧化石燃料将化学能转换成电能, 需要满足以下约束。

1) 机组出力约束

$$u_{i,t,s} P_{i,\text{min}}^{\text{Th}} \leq P_{i,t,s}^{\text{Th}} \leq u_{i,t,s} P_{i,\text{max}}^{\text{Th}} \quad (5)$$

式中: $u_{i,t,s}$ 表示火电机组 i 在场景 s 下时段 t 的启停状态, $u_{i,t,s} = 0$ 表示机组停止, $u_{i,t,s} = 1$ 表示机组启动; $P_{i,\text{max}}^{\text{Th}}$ 、 $P_{i,\text{min}}^{\text{Th}}$ 分别表示火电机组 i 的最大、最小出力。

2) 机组爬坡约束

$$R_i^{\text{d}} \leq P_{i,t,s}^{\text{Th}} - P_{i,t-1,s}^{\text{Th}} \leq R_i^{\text{u}} \quad (6)$$

式中, R_i^{u} 、 R_i^{d} 分别表示机组 i 的上、下爬坡速率。当机组的最小出力 $P_{i,\text{min}}^{\text{Th}}$ 大于爬坡速率 R_i^{d} 时, 式(6)将使得所有关停的机组都无法启动, 因此将约束条件(6)改写为

$$P_{i,t,s}^{\text{Th}} - P_{i,t-1,s}^{\text{Th}} \leq u_{i,t-1,s} (R_i^{\text{u}} - R_{i,\text{max}}^{\text{u}}) + R_{i,\text{max}}^{\text{u}} \quad (7)$$

$$P_{i,t-1,s}^{\text{Th}} - P_{i,t,s}^{\text{Th}} \leq u_{i,t,s} (R_i^{\text{d}} - R_{i,\text{max}}^{\text{d}}) + R_{i,\text{max}}^{\text{d}} \quad (8)$$

式中, $R_{i,\text{max}}^{\text{u}}$ 、 $R_{i,\text{max}}^{\text{d}}$ 分别表示机组 i 的启动最大升速率和停机最大降速率。

3) 机组启停约束

火电机组的启动和停止必须维持一段时间, 以防止机组频繁启停造成损坏, 机组启停约束为

$$\sum_{k=t}^{t+T_S-1} (1-u_{i,k,s}) \geq T_S(u_{i,t-1,s} - u_{i,t,s}) \quad (9)$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_0-1} u_{i,k,s} \geq T_0(u_{i,t,s} - u_{i,t-1,s}) \quad (10)$$

式中, T_S 、 T_0 分别表示机组最小关停、开机时间。

2.2.2 电池储能约束

本文使用电池储能配合抽水蓄能, 以消纳高比例新能源。

1) 荷电状态约束

$$S_{i,t,s}^{\text{BES}} = S_{i,t-1,s}^{\text{BES}} + \frac{\eta_{\text{ch}}^{\text{BES}} P_{\text{ch},i,t-1,s}^{\text{BES}} \Delta t}{E_i^{\text{R}}} - \frac{P_{\text{dis},i,t-1,s}^{\text{BES}} \Delta t}{\eta_{\text{dis}}^{\text{BES}} E_i^{\text{R}}} \quad (11)$$

$$S_{\min}^{\text{BES}} \leq S_{i,t,s}^{\text{BES}} \leq S_{\max}^{\text{BES}} \quad (12)$$

式中: $S_{i,t,s}^{\text{BES}}$ 表示电池 i 在场景 s 下时段 t 的荷电状态; $\eta_{\text{ch}}^{\text{BES}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{BES}}$ 分别表示电池的充、放电效率; E_i^{R} 表示电池 i 的额定容量; Δt 表示间隔时间; S_{\max}^{BES} 、 S_{\min}^{BES} 分别表示电池荷电状态的最大值和最小值。

2) 电池充放电约束

$$0 \leq P_{\text{ch},i,t,s}^{\text{BES}} \leq x_{\text{ch},i,t,s}^{\text{BES}} P_{\text{ch,max},i}^{\text{BES}} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{\text{dis},i,t,s}^{\text{BES}} \leq x_{\text{dis},i,t,s}^{\text{BES}} P_{\text{dis,max},i}^{\text{BES}} \quad (14)$$

式中: $x_{\text{ch},i,t,s}^{\text{BES}}$ 、 $x_{\text{dis},i,t,s}^{\text{BES}}$ 分别表示电池 i 在场景 s 下时段 t 的充、放电状态; $P_{\text{ch,max},i}^{\text{BES}}$ 和 $P_{\text{dis,max},i}^{\text{BES}}$ 分别表示电池 i 的最大充、放电功率。

2.2.3 定、变速抽水蓄能约束

定、变速抽水蓄能机组和水库库容约束如下。

1) 定速抽水蓄能机组约束

$$P_{p,i,t,s}^{\text{sp}} = x_{p,i,t,s}^{\text{sp}} P_{e,i}^{\text{sp}} \quad (15)$$

$$x_{g,i,t,s}^{\text{sp}} P_{g,\min,i}^{\text{sp}} \leq P_{g,i,t,s}^{\text{sp}} \leq x_{g,i,t,s}^{\text{sp}} P_{g,\max,i}^{\text{sp}} \quad (16)$$

式中: $x_{p,i,t,s}^{\text{sp}}$ 、 $x_{g,i,t,s}^{\text{sp}}$ 分别表示定速抽水蓄能机组 i 在场景 s 下时段 t 的抽水、发电状态; $P_{p,i,t,s}^{\text{sp}}$ 、 $P_{g,i,t,s}^{\text{sp}}$ 分别表示定速抽水蓄能机组 i 在场景 s 下时段 t 的抽水、发电功率; $P_{g,\min,i}^{\text{sp}}$ 、 $P_{g,\max,i}^{\text{sp}}$ 分别表示定速抽水蓄能机组 i 的最小、最大发电功率。

2) 变速抽水蓄能机组约束

$$P_{g,\min,i}^{\text{vp}} x_{g,i,t,s}^{\text{vp}} \leq P_{g,i,t,s}^{\text{vp}} \leq P_{g,\max,i}^{\text{vp}} x_{g,i,t,s}^{\text{vp}} \quad (17)$$

$$P_{p,\min,i}^{\text{vp}} x_{p,i,t,s}^{\text{vp}} \leq P_{p,i,t,s}^{\text{vp}} \leq P_{p,\max,i}^{\text{vp}} x_{p,i,t,s}^{\text{vp}} \quad (18)$$

式中: $x_{p,i,t,s}^{\text{vp}}$ 、 $x_{g,i,t,s}^{\text{vp}}$ 分别表示变速抽水蓄能机组 i 在场景 s 下时段 t 的抽水、发电状态; $P_{p,i,t,s}^{\text{vp}}$ 、 $P_{g,i,t,s}^{\text{vp}}$ 分别表示变速抽水蓄能机组 i 在场景 s 下时段 t 的抽水、发电功率; $P_{p,\min,i}^{\text{vp}}$ 、 $P_{p,\max,i}^{\text{vp}}$ 和 $P_{g,\min,i}^{\text{vp}}$ 、 $P_{g,\max,i}^{\text{vp}}$ 分别表示变速抽水蓄能机组 i 的最小、最大抽水功率

和最小、最大发电功率。在实际情况下, 抽水蓄能机组的最大最小发电、抽水功率通常与机组的额定装机容量有关。式(17)和式(18)分别表示变速抽水蓄能机组的发电功率和抽水功率需要满足一定的范围。

3) 水库库容约束

本文假设电网中已有定速抽水蓄能机组的地方都已配备了上下水库, 本文是依据实际地理位置和水文条件来选取候选节点, 原则上会在候选节点新建变速抽水蓄能机组的同时新建配套水库。但如果候选节点处已有定速机组和水库时, 则不需要新建水库。抽水蓄能上、下水库受到如下约束。

$$V_{i,\min}^{\text{UR}} \leq V_{i,t,s}^{\text{UR}} \leq V_{i,\max}^{\text{UR}} \quad (19)$$

$$V_{i,\min}^{\text{LR}} \leq V_{i,t,s}^{\text{LR}} \leq V_{i,\max}^{\text{LR}} \quad (20)$$

$$V_{i,t+1,s}^{\text{UR}} = V_{i,t,s}^{\text{UR}} - (c_g (P_{g,i,t,s}^{\text{sp}} + P_{g,i,t,s}^{\text{vp}}) + c_p (P_{g,i,t,s}^{\text{sp}} + P_{g,i,t,s}^{\text{vp}})) \Delta t \quad (21)$$

$$V_{i,t+1,s}^{\text{LR}} = V_{i,t,s}^{\text{LR}} + (c_g (P_{g,i,t,s}^{\text{sp}} + P_{g,i,t,s}^{\text{vp}}) - c_p (P_{g,i,t,s}^{\text{sp}} + P_{g,i,t,s}^{\text{vp}})) \Delta t \quad (22)$$

式中: $V_{i,\min}^{\text{UR}}$ 、 $V_{i,\max}^{\text{UR}}$ 分别表示上水库 i 的蓄水量下限和上限; $V_{i,\min}^{\text{LR}}$ 、 $V_{i,\max}^{\text{LR}}$ 分别表示下水库 i 的蓄水量下限和上限; $V_{i,t,s}^{\text{UR}}$ 、 $V_{i,t,s}^{\text{LR}}$ 分别表示上水库和下水库在场景 s 下时段 t 时的蓄水量; c_g 、 c_p 分别表示抽水蓄能发电、抽水功率和流量之间的转换系数^[22]。式(19)和式(20)分别表示抽水蓄能上、下水库的运行范围约束。式(21)和式(22)表示抽水蓄能的蓄水量变化约束。水库库容的上限就是本文规划水库的容量, 而水库库容的下限通常根据实际地区的地理位置、供水需求等要求设定, 需要满足一定的最低蓄水量。

2.2.4 输电网约束

1) 功率平衡约束

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in \Omega_n^w} P_{n,t,s}^w + \sum_{n \in \Omega_n^{\text{pv}}} P_{n,t,s}^{\text{pv}} + \sum_{n \in \Omega_n^{\text{th}}} P_{n,t,s}^{\text{th}} + \sum_{n \in \Omega_n^{\text{BES}}} (P_{\text{dis},n,t,s}^{\text{BES}} - P_{\text{ch},n,t,s}^{\text{BES}}) + \\ & \sum_{n \in \Omega_n^{\text{sp}}} (P_{g,n,t,s}^{\text{sp}} - P_{p,n,t,s}^{\text{sp}}) + \sum_{n \in \Omega_n^{\text{vp}}} (P_{g,n,t,s}^{\text{vp}} - P_{p,n,t,s}^{\text{vp}}) - \\ & \sum_{l|o(l)=n} P_{l,t,s}^{\text{L}} + \sum_{l|r(l)=n} P_{l,t,s}^{\text{L}} = \sum_{n \in \Omega_n^{\text{D}}} (P_{n,t}^{\text{load}} - P_{n,t}^{\text{LS}}) \end{aligned} \quad (23)$$

式中: n 表示节点号; Ω_n^w 、 Ω_n^{pv} 、 Ω_n^{th} 、 Ω_n^{BES} 、 Ω_n^{sp} 、 Ω_n^{vp} 、 Ω_n^{D} 分别表示风机、光伏、火电机组、电池、定速抽水蓄能机组、变速抽水蓄能机组和负荷的节点集合; $o(l)$ 、 $r(l)$ 分别表示传输线路 l 的起点和终点; $P_{n,t,s}^w$ 、 $P_{n,t,s}^{\text{pv}}$ 分别表示场景 s 下时段 t 的风电和光伏机组的实际发电量; $P_{l,t,s}^{\text{L}}$ 表示线路 l 在场景 s 下时段 t 的电力潮流; $P_{n,t}^{\text{load}}$ 表示节点 n 在时段 t 的负载。

2) 潮流约束

本文的线路规划是在已知候选线路最大容量的基础上, 规划是否新建候选线路及其接入点。因此建立如下潮流约束。

$$P_{l,t,s}^L = B_l(\theta_{o(l),t,s} - \theta_{r(l),t,s}) \quad \forall l \setminus l \in \Omega^{L+} \quad (24)$$

$$|P_{l,t,s}^L - B_l(\theta_{o(l),t,s} - \theta_{r(l),t,s})| \leq (1 - x_l^L)M \quad \forall l \in \Omega^{L+} \quad (25)$$

$$-F_l^{\max} \leq P_{l,t,s}^L \leq F_l^{\max} \quad \forall l \setminus l \in \Omega^{L+} \quad (26)$$

$$-x_l^L F_l^{\max} \leq P_{l,t,s}^L \leq x_l^L F_l^{\max} \quad \forall l \in \Omega^{L+} \quad (27)$$

式中: B_l 表示传输线路 l 的导纳; $\theta_{o(l),t,s}$ 、 $\theta_{r(l),t,s}$ 分别表示传输线路 l 在场景 s 下时段 t 起点和终点处的相角; F_l^{\max} 表示线路 l 的最大容量; $M = 10^6$ 。式(24)和式(25)分别表示已有线路和新建候选线路的传输功率; 式(26)和式(27)分别表示已有线路和新建候选线路的传输功率受最大传输容量限制。

3) 切负荷约束

$$0 \leq P_{n,t,s}^{LS} \leq P_{n,t}^{\text{load}} \quad (28)$$

4) 相角约束

$$-\pi \leq \theta_{n,t,s} \leq \pi \quad (29)$$

$$\theta_{R,t,s} = 0 \quad (30)$$

式中, $\theta_{n,t,s}$ 、 $\theta_{R,t,s}$ 分别表示节点 n 、参考节点 R 在场景 s 下时段 t 的电压相角。

3 求解算法

3.1 基于 McCormick 包络的非线性约束转换

由于变速抽水蓄能机组出力的上下限一般和装机容量相关, 使得投资决策变量 $P_{e,i}^{\text{vp}}$ 和运行决策变量 $x_{g,i,t,s}^{\text{vp}}$ 、 $x_{p,i,t,s}^{\text{vp}}$ 之间存在耦合关系, 导致变速抽水蓄能机组约束式(17)和式(18)中存在非线性。本文采用 McCormick 包络^[23]将非线性约束式(17)、式(18)分别转化为式(31)、式(32)的线性约束。

$$\begin{cases} w_{i,t,s}^1 \geq x_{g,i,t,s}^{\text{vp}} P_{e,i}^{\text{vp,L}} \\ w_{i,t,s}^1 \geq P_{e,i}^{\text{vp}} + x_{g,i,t,s}^{\text{vp}} P_{e,i}^{\text{vp,U}} - P_{e,i}^{\text{vp,L}} \\ w_{i,t,s}^1 \leq P_{e,i}^{\text{vp}} + x_{g,i,t,s}^{\text{vp}} P_{e,i}^{\text{vp,L}} - P_{e,i}^{\text{vp,L}} \\ w_{i,t,s}^1 \leq x_{g,i,t,s}^{\text{vp}} P_{e,i}^{\text{vp,U}} \\ \rho_{g \min}^{\text{vp}} w_{i,t,s}^1 \leq P_{g,i,t,s}^{\text{vp}} \leq \rho_{g \max}^{\text{vp}} w_{i,t,s}^1 \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} w_{i,t,s}^2 \geq x_{p,i,t,s}^{\text{vp}} P_{e,i}^{\text{vp,L}} \\ w_{i,t,s}^2 \geq P_{e,i}^{\text{vp}} + x_{p,i,t,s}^{\text{vp}} P_{e,i}^{\text{vp,U}} - P_{e,i}^{\text{vp,L}} \\ w_{i,t,s}^2 \leq P_{e,i}^{\text{vp}} + x_{p,i,t,s}^{\text{vp}} P_{e,i}^{\text{vp,L}} - P_{e,i}^{\text{vp,L}} \\ w_{i,t,s}^2 \leq x_{p,i,t,s}^{\text{vp}} P_{e,i}^{\text{vp,U}} \\ \rho_{p \min}^{\text{vp}} w_{i,t,s}^2 \leq P_{p,i,t,s}^{\text{vp}} \leq \rho_{p \max}^{\text{vp}} w_{i,t,s}^2 \end{cases} \quad (32)$$

式中: $w_{i,t,s}^1 = P_{e,i}^{\text{vp}} x_{g,i,t,s}^{\text{vp}}$ 和 $w_{i,t,s}^2 = P_{e,i}^{\text{vp}} x_{p,i,t,s}^{\text{vp}}$ 为转换后的线性变量; $P_{e,i}^{\text{vp,L}}$ 和 $P_{e,i}^{\text{vp,U}}$ 分别表示变速抽水蓄能机组 i 的最小、最大装机容量; $\rho_{p \min}^{\text{vp}}$ 、 $\rho_{p \max}^{\text{vp}}$ 和 $\rho_{g \min}^{\text{vp}}$ 、 $\rho_{g \max}^{\text{vp}}$ 分别表示机组最小、最大抽水功率和最小、最大发电功率与装机容量的转换系数。

3.2 两阶段优化方案

针对上述分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划模型, 依据不同的时间尺度可以分为两个优化阶段。第一阶段是系统的投资阶段, 该阶段以规划年限为基准, 得到输电线路的建设方案、抽水蓄能电站的选址和容量配置方案。第二阶段是系统的运行阶段, 该阶段以典型日每小时为基准, 对电网中的各设备出力进行规划, 从而计算出系统的运维成本。两个阶段互相耦合、相辅相成, 在优化投资成本的同时, 通过现值转换系数将运行维护成本折算到投资成本中, 最终得到总成本最小的分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划方案。

综上所述, 分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划模型包含一次性投资目标函数式(1)和各种灵活性资源约束式(5)一式(14)、抽水蓄能机组约束式(15)一式(22)和输电电网网架约束式(23)一式(30)等运行约束。经过 McCormick 包络处理之后, 该优化问题转化为一个多变量混合整数线性规划问题。为保证优化过程的低复杂性和计算精度, 本文通过 Matlab 软件的 YALMIP 工具箱, 调用较为成熟的 CPLEX 求解器对模型进行求解。

4 算例仿真

本节将针对上述构建的分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划模型, 以之前研究中经典和常用的 Graver-6 节点系统和 IEEE RTS-24 节点系统为例进行仿真分析。本文考虑的均是额定容量不超过 100 MW 的分布式抽水蓄能。通过对比变速抽水蓄能和定速抽水蓄能两种方案来分析不同抽水蓄能机组对系统规划结果的影响, 从而验证本文提出的含分布式变速抽水蓄能联合规划模型的有效性和优越性。方案 1 为分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划; 方案 2 为分布式定速抽水蓄能和输电网的联合规划。

4.1 Graver-6 节点系统仿真分析

Graver-6 节点系统的拓扑结构如图 1 所示。电网负荷、风光出力、现有线路和候选线路的具体数据参考文献[24]。本文通过蒙特卡洛法生成了 1000 个风电和光伏场景, 然后通过场景缩减方法削减到 10 个场景, 削减后的风光出力及场景概率详见附录

A 图 A1 和表 A1。火电机组参数见附录 A 表 A2。结合我国实际情况，考虑定速抽水蓄能机组的投资成本和维护成本分别为 1500 元/kW、15 元/(kW/年)，电池及其他抽水蓄能参数参考文献[25]。假设依据实际地理和水文限制，节点 1、2、4 和 5 为具有抽水蓄能电站建设条件的候选节点。

分别采用两种联合规划方案的系统规划结果如图 3 所示，系统规划所需成本见表 1。由图 3 可以看出，不管是方案 1 还是方案 2，都需要新建两条线路来保证输电网系统的供需平衡，防止电网中某条线路潮流过大导致系统出现故障。两种方案都需要新建抽水蓄能机组来消纳电网中的波动性新能源。虽然两种方案新建抽水蓄能机组的总容量差不多，但由于定速抽水蓄能机组的出力不能灵活调节，需要在不同的节点建造，从而导致需要新建水库。并且定速抽水蓄能方案要用更多的火电和电池出力来满足供需平衡，也导致了系统总成本增大。由表 1 也能看出方案 1 的总成本相较于方案 2 要少近 20%，这说明了分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划方案具有更好的经济性。

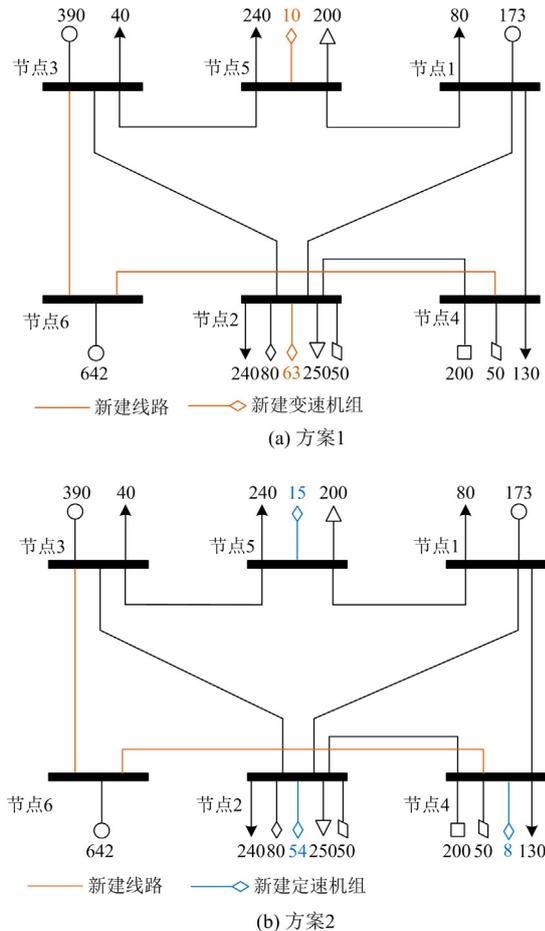


图 3 两种联合规划方案结果比较

Fig. 3 Comparison of the results of two joint planning schemes

表 1 系统规划所需成本
Table 1 Cost of system planning

经济成本	方案 1	方案 2
新建线路投资成本	1.380×10^8	1.380×10^8
新建机组投资成本	1.533×10^8	1.617×10^8
新建水库投资成本	5.850×10^8	1.045×10^9
火电机组运行成本	1.707×10^8	2.101×10^8
电池退化成本	6.116×10^7	8.230×10^7
水电运维成本	1.734×10^9	1.882×10^9
总成本	2.842×10^9	3.519×10^9

图 4 给出了变速抽水蓄能规划方案传输线路节点 2—节点 4 的传输容量数据对比图。由图 4 可以看出，在进行输电网规划前，该输电线路的传输功率在用电高峰期(如 12:00—14:00、19:00—21:00)已经达到其能容忍的最大容量限制 100 MW；而在规划后，输电线路的新建带来了更多的传输通道，并且由于变速抽水蓄能机组具有较高的灵活性，新建的变速抽水蓄能电站可以更加灵活地进行新能源的储存与发电，从而使线路的潮流阻塞情况得到了缓解。这也表明进行输电网规划能够减小系统中输电线路的压力，促进系统新能源消纳。

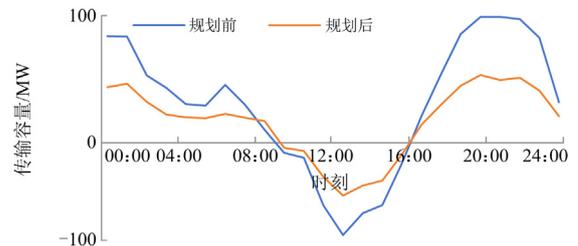


图 4 Graver-6 节点系统线路节点 2—节点 4 规划前后传输容量对比图

Fig. 4 Comparison of transmission capacity before and after planning for line bus 2—bus 4 of the Graver-6 bus system

4.2 IEEE RTS-24 节点系统仿真分析

本节通过 IEEE RTS-24 节点系统来验证所提分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划方案对大节点系统的适应性和兼容性。IEEE RTS-24 节点系统的拓扑结构见文献[26]，它由 10 台火电机组、6 台风电机组、4 台光伏机组、4 台定速抽水蓄能机组以及 5 个蓄电池组成。风电机组和光伏机组的装机容量均为 400 MW，具体数据参考文献[26]，其余参数和 4.1 节相同。假设依据实际地理和水文限制，节点 1、3、7、9、10、12、16、18、20 和 22 为具有抽水蓄能电站建设条件的候选节点。

方案 1 的规划结果如表 2 所示，系统需要新建

3 条线路来满足电力传输。对于电力系统中产生的多余新能源电力, 原有系统会造成较多浪费, 因此需要新建 6 台不同装机容量的变速抽水蓄能机组来尽可能消纳新能源。方案 1 和方案 2 的系统规划成本如表 3 所示, 同样可以看出方案 2 的火电运行、电池退化和抽水蓄能成本更高, 因此方案 1 的规划结果更加经济。

表 2 IEEE RTS-24 节点系统规划结果

Table 2 Planning results of IEEE RTS-24 bus system

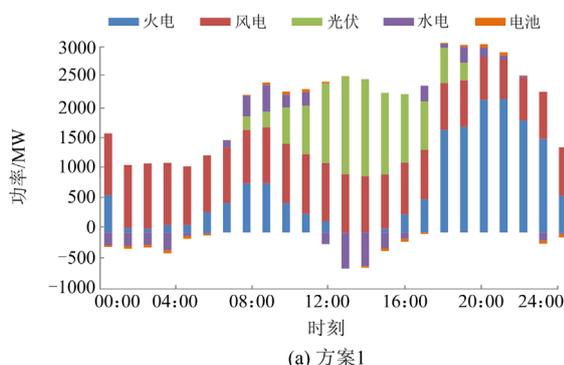
新建线路		7-8
新建变速机组		12-23
		17-18
新建变速机组	节点 3	100 MW
	节点 7	14 MW
	节点 12	73 MW
	节点 16	46 MW
	节点 20	100 MW
	节点 22	67 MW

表 3 IEEE RTS-24 节点系统规划成本

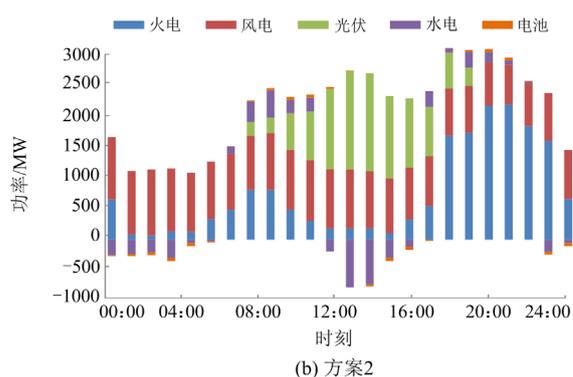
Table 3 Cost of IEEE RTS-24 bus system planning

经济成本	方案 1	方案 2
新建线路投资成本	1.440×10^9	1.440×10^9
新建机组投资成本	8.400×10^8	9.556×10^8
新建水库投资成本	6.611×10^9	7.774×10^9
火电机组运行成本	9.010×10^8	1.006×10^9
电池退化成本	1.025×10^8	1.213×10^8
水电运维成本	7.822×10^9	8.970×10^9
总成本	1.772×10^{10}	2.027×10^{10}

图 5 比较了采用不同方案时典型日不同机组的输出功率。可以看出方案 1 中的火电出力及电池发电量均小于方案 2, 并且抽水蓄能运行在水轮机工况下的出力要大于方案 2, 这体现出变速抽水蓄能相较定速抽水蓄能更为灵活。而在水泵工况下, 由



(a) 方案1



(b) 方案2

图 5 IEEE RTS-24 系统机组输出功率

Fig. 5 Output power of units in IEEE RTS-24 system

于抽水功率的限制, 方案 2 需要更多的火电出力, 最终也导致其经济性较差。

5 结论

本文基于高比例新能源场景, 构建了面向新型电力系统的分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划模型。该模型以新能源消纳和系统经济性最优为目标, 充分考虑了系统中抽水蓄能和灵活性资源约束。最后通过两个测试系统仿真验证了该规划模型的可行性和优越性, 并得到了如下结论。

1) 变速抽水蓄能具有比定速抽水蓄能更大、更灵活的运行范围, 从而能最大程度地利用分布式波动性新能源, 缓解弃风、弃光现象, 也可以充分发挥抽水蓄能在削峰填谷中的优势。

2) 仿真结果表明, 相比于定速抽水蓄能规划方案, 变速抽水蓄能规划方案能有效降低火电机组的启停频率、减缓电池储能的老化, 从而可以降低近 20% 的成本, 因此采用分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划方案具有更好的经济性。

3) 本文所提分布式变速抽水蓄能和输电网的联合规划方案能够经济高效地消纳波动性风光新能源, 并能更好地与灵活性资源进行协调, 有效降低了资源的浪费。

附录 A

表 A1 场景削减概率

Table A1 Scene reduction probability

场景	概率	场景	概率
场景 1	0.10	场景 6	0.10
场景 2	0.12	场景 7	0.10
场景 3	0.08	场景 8	0.11
场景 4	0.10	场景 9	0.12
场景 5	0.12	场景 10	0.05

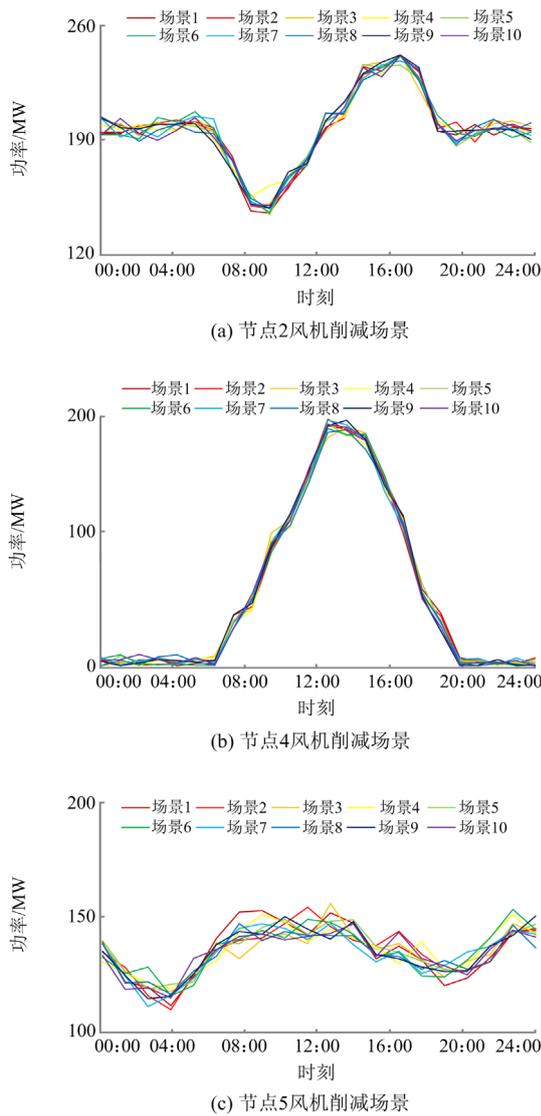


图 A1 场景削减后的风光出力

Fig. A1 Wind and photovoltaic generation with scene reduction

表 A2 火电机组参数

Table A2 Parameters of thermal power unit

节点号	1	3	6
最大出力/MW	173	390	642
最小出力/MW	60	120	240
煤耗成本/(元/MWh)	10	8	12
爬坡速率/(MW/h)	100	250	350
启停最小持续时间/h	2	2	2
启动成本/元	1000	1600	2000
关停成本/元	800	1000	1200

参考文献

[1] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.

ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.

[2] 祁晓笑, 程静, 王维庆, 等. 基于 SC 的光伏发电并网系统次同步振荡抑制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 88-95.

QI Xiaoxiao, CHENG Jing, WANG Weiqing, et al. Sub-synchronous oscillation suppression of photovoltaic grid-connected system based on SC[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 88-95.

[3] 臧延雪, 边晓燕, 梁思琪, 等. 计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 15-26.

ZANG Yanxue, BIAN Xiaoyan, LIANG Siqi, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatching method of a renewable energy power system considering line transmission capacity[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 15-26.

[4] 金梦, 朱鑫要, 周前. 新能源对电网调峰特性影响定量评估及应用[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 70-76.

JIN Meng, ZHU Xinyao, ZHOU Qian. Quantitative assessment of influence of renewable energy on peak regulation characteristics of power grid and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 70-76.

[5] 高赐威, 吴天婴, 何叶, 等. 考虑风电接入的电源电网协调规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 30-35.

GAO Ciwei, WU Tianying, HE Ye, et al. Generation and transmission coordinated planning considering wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 30-35.

[6] ORFANOS G A, GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28(2): 1355-1362.

[7] 张新松, 袁越, 吴博文, 等. 电力市场环境含大规模风电场的输电规划[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 100-103.

ZHANG Xinsong, YUAN Yue, WU Bowen, et al. Expansion planning of transmission network with large wind farm in deregulated electricity market environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 100-103.

[8] 李昀昊, 王建学, 曹晓宇, 等. 面向风电场-储能-输电网联合规划的机会约束 IGDT 模型[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3715-3724.

LI Yunhao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu, et al. A chance-constrained IGDT model for joint planning of wind farm, energy storage and transmission[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3715-3724.

[9] 孙伟卿, 刘唯, 裴亮, 等. 高比例可再生能源背景下考虑储能系统价值的储-输多阶段联合规划[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 983-993.

SUN Weiqing, LIU Wei, PEI Liang, et al. Multistage energy storage-transmission network joint planning considering

- the system value of energy storage under the background of high penetration renewable energy[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(3): 983-993.
- [10] 陈颖, 石永富, 钟鸿鸣, 等. 含高比例风光接入的输电网氢-电混合储能系统配置方法[J]. *电力建设*, 2022, 43(11): 85-98.
- CHEN Ying, SHI Yongfu, ZHONG Hongming, et al. Configuration method for hydrogen-electricity hybrid energy storage system in transmission grid with high proportion of PV and wind power connection[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(11): 85-98.
- [11] 侯慧, 徐焘, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(17): 74-84.
- HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, et al. Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(17): 74-84.
- [12] 杨修宇, 穆钢, 柴国峰, 等. 考虑灵活性供需平衡的源-储-网一体化规划方法[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3238-3246.
- YANG Xiuyu, MU Gang, CHAI Guofeng, et al. Source-storage-grid integrated planning considering flexible supply-demand balance[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3238-3246.
- [13] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 1-10.
- WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 1-10.
- [14] 阳婷婷, 李晓刚, 邹斌, 等. 促进灵活性资源的辅助服务市场分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(7): 73-83.
- YANG Tingting, LI Xiaogang, ZOU Bin, et al. Market analysis of an ancillary service to promote flexible resources[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(7): 73-83.
- [15] 严中华, 王建功, 朱英刚, 等. 考虑碳排放流理论的风-碳捕集-电转气联合新型中长期调度方式[J]. *智慧电力*, 2022, 50(6): 14-21.
- YAN Zhonghua, WANG Jianguo, ZHU Yinggang, et al. New medium-long term dispatching mode of wind-carbon capture P2G combined system considering carbon emission flow theory[J]. *Smart Power*, 2022, 50(6): 14-21.
- [16] 张占安, 蔡兴国. 考虑可变速抽水蓄能机组运行特性的低碳调度[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(增刊 1): 51-60.
- ZHANG Zhan'an, CAI Xingguo. Low-carbon dispatch considering operating characteristics of variable speed pumped storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(S1): 51-60.
- [17] DU Mingkun, HUANG Yuan, LIU Junyong, et al. CVaR-based generation expansion planning of cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage system with uncertain solar power considering flexibility constraints[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2021, 15(21): 2953-2966.
- [18] GJORGIEV B, DAVID A E, SANSAVINI G. Cascade-risk-informed transmission expansion planning of AC electric power systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 204: 107685.
- [19] TARASHANDEH N, KARIMI A. Utilization of energy storage systems in congestion management of transmission networks with incentive-based approach for investors[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 33: 102034.
- [20] 陈长青, 阳同光. 计及柔性负荷的电网储能和光伏协调规划研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(4): 169-177.
- CHEN Changqing, YANG Tongguang. Research on grid energy storage and photovoltaic coordination planning with flexible load[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(4): 169-177.
- [21] GAN Wei, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Security constrained co-planning of transmission expansion and energy storage[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 383-394.
- [22] 曹敏健, 胡泽春, 孟颖, 等. 含抽水蓄能与新能源发电的柔性直流系统日前优化调度方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(15): 36-44.
- CAO Minjian, HU Zechun, MENG Ying, et al. Day-ahead optimal dispatch method for flexible DC system with pumped storage hydropower plant and new energy power generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(15): 36-44.
- [23] CASTRO P M. Tightening piecewise McCormick relaxations for bilinear problems[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, 72: 300-311.
- [24] ANSARI M R, PIROUZI S, KAZEMI M, et al. Renewable generation and transmission expansion planning coordination with energy storage system: a flexibility point of view[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3303.
- [25] 井浩然, 赵红生, 姚伟, 等. 含分布式变速抽水蓄能的新能源发电系统灵活性资源规划[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(11): 117-123, 173.
- JING Haoran, ZHAO Hongsheng, YAO Wei, et al. Flexible resource planning of renewable generation systems with distributed variable speed pumped storages[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(11): 117-123, 173.
- [26] GREENWOOD D M, LIM K Y, PATSIO S, et al. Frequency response services designed for energy storage[J]. *Applied Energy*, 2017, 203(1): 115-127.

收稿日期: 2023-08-14; 修回日期: 2024-01-09

作者简介:

徐秋实(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网规划与运行、能源经济; E-mail: xu_qiushi@163.com

井浩然(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行、规划。E-mail: hr_jing@foxmail.com

(编辑 周金梅)