

新型电力系统下抽水蓄能和新型储能协同运行研究

彭潜¹, 钟鑫亮¹, 李乐卿², 孙万洲², 李毓烜², 王雪林³, 钟海旺³

(1. 南方电网储能股份有限公司, 广州 510000; 2. 南方电网调峰调频发电有限公司储能研究院, 广州 510635; 3. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610213)

摘要: 为推进我国新型电力系统建设发展、增强电力系统调蓄能力, 从调度运行角度探索抽水蓄能和新型储能协同运行对电力系统不同调节需求场景的支撑情况。首先基于抽水蓄能与新型储能运行特性分析其协同运行方式, 然后构建抽水蓄能和新型储能协同优化调度模型, 综合典型用电特性和极端气象特性构造7类储能应用场景, 最后从平抑新能源波动、促进新能源消纳、增强供电可靠性和缓解系统调峰压力4个层面开展电力系统在不同储能发展策略下的系统运行效果评价模拟, 算例结果表明当系统同时布局抽水蓄能和新型储能时系统具有更优的综合运行效益。研究可为新型电力系统不同调节需求场景合理化调整储能调度运行方式提供参考。

关键词: 新型电力系统; 极端气象; 运行效果评价; 储能协同; 抽水蓄能; 新型储能

Research on Collaborative Operation of Pumped Storage and New Energy Storage in New Power System

PENG Qian¹, ZHONG Xinliang¹, LI Leqing², SUN Wanzhou², LI Yuxuan², WANG Xuelin³,
ZHONG Haiwang³

(1. CSG Energy Storage Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Power Storage Research Institute of China Southern Power Grid Power Generation Co., Ltd., Guangzhou 510635, China; 3. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: In order to promote the construction and development of the new power system and enhance the regulation and storage energy ability of the new power system, this paper explores the support of pumped storage and new energy storage coordinated operation for different regulation demand scenarios of the new power system from the perspective of scheduling operation. Firstly, based on the operational characteristics of pumped storage and new energy storage, the collaborative operation mode is analyzed. Then, the pumped storage and new energy storage collaborative optimization scheduling model is constructed, and 7 types of energy storage application scenarios are constructed based on typical power consumption characteristics and extreme meteorological characteristics. Finally, the system operation effects of the power system under different energy storage development strategies are evaluated from four aspects: calming new energy fluctuations, promoting new energy consumption, enhancing power supply reliability and alleviating system peak load pressure. The results show that when the system is deployed with pumped storage and new energy storage at the same time, the system has better comprehensive operation benefits. The research can provide reference for the rational adjustment of energy storage dispatching operation modes in different regulation demand scenarios of the new power system.

Key words: new power system; extreme weather; evaluation of operational effects; energy storage collaboration; pumped storage; new energy storage

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52122706); 中国南方电网有限责任公司软课题项目(210006004420230300026)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52122706); the Soft Topic Research Foundation of China Southern Power Grid Co., Ltd. (210006004420230300026).

0 引言

随着“双碳”目标逐步推进^[1],我国加速扩展风电、光伏等新能源布局规划,增加了系统电源出力的不确定性,给电力系统的安全稳定运行带来了极大挑战^[2-3]。为保障电力系统建设的稳步推进、充分发挥各项灵活性调节资源调节性能,国家发展改革委、能源局针对灵活性调节资源尤其是储能相继发布了一系列配套文件鼓励科学配置多元储能^[4]。储能作为支撑高比例可再生能源稳定接入和消纳的关键技术手段^[5],应对新型电力系统多样化调节需求场景,多元储能技术如何协同支撑满足系统多维度调节需求尚不明确。

目前已有大量学者研究不同储能技术协调光伏^[6-7]、风电^[8-10]、常规发电机组^[11-13]等联合运行实现降低光伏、风电出力波动^[14],促进风光资源消纳^[15]、提高碳减排能力。但当前研究基本从单一储能技术出发开展储能参与电力系统协同调度优化,很少有研究量化对比分析不同储能技术对电力系统运行的支撑情况,需要进一步探索不同评价角度、不同储能运行模式下系统运行性能差异为合理化调整储能运行方式提供参考。

近年来极端气象出现频次急剧上升,风、光出力与气象条件具有强相关性^[16],高渗透率新能源出力不确定性进一步加剧,新型电力系统对各类调节性电源的支撑能力要求进一步提升。有研究表明,气象条件变化对储能协同优化调度策略^[17-18]、储能支撑电力系统运行性能^[19-23]具有一定影响力。因此要提升新型电力系统的稳定运行能力,在极端气象条件下多元储能如何协同调度运行支撑新型电力系统的稳定运行有待进一步开展研究。

本文结合我国抽水蓄能和新型储能运行特性分析,探究抽水蓄能和新型储能在新型电力系统下的协同运行方式。基于气象特性和负荷需求分析构造了储能应用场景,考虑储能和火电机组支撑能力的差异构建了抽水蓄能和新型储能协同优化调度模型。针对抽蓄+新储、单抽蓄和单新储3种配置情况,分别开展电力系统在7个储能应用场景下优化调度运行模拟,量化对比抽水蓄能和新型储能在平抑新能源波动、促进新能源消纳、增强供电可靠性、缓解系统调峰压力4个层面的支撑能力和系统综合运行经济效益,为新型电力系统在不同调节需

求下确定储能的最优运行方式提供参考。

1 抽水蓄能与新型储能协同运行方式

1.1 运行特性分析

放电时长、响应时间、运行效率、度电成本和使用寿命作为储能技术应用场景和应用情况的重要指标。将不同储能技术的各项指标参数的性能最优为基准值1,采用百分比的形式绘制不同储能技术的性能指标参数对比图如图1所示。

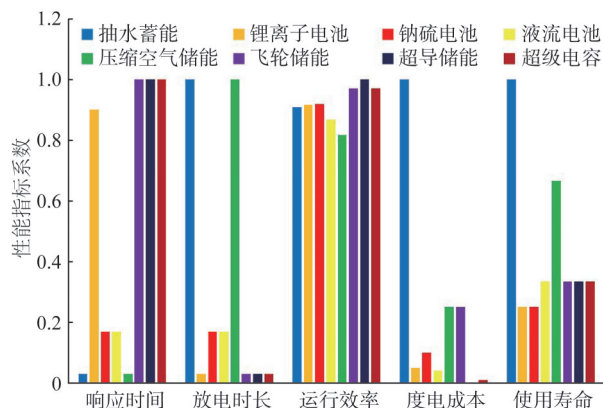


图1 储能性能参数对比

Fig. 1 Comparison of energy storage performance parameters

如图1所示,不同储能技术在不同性能指标上的差异决定其在电力系统中的应用场景,抽水蓄能、压缩空气储能能在持续放电时长、运行寿命和度电成本上具有相对优势;电化学储能、飞轮储能、超导储能和超级电容在响应时间和运行效率上具有相对优势。

1.2 协同运行方式分析

基于新型电力系统“双高”特性,电力系统在电源侧、电网侧、负荷侧对储能需求扩展到多时间尺度,单一储能技术无法满足系统灵活性调节需求。抽水蓄能具有容量大、调节能力强但环境制约度较高的特点,新型储能具有响应速度快、调节灵活性高的特点,抽水蓄能和新型储能协同运行可以为新型电力系统电力保供、应急备用、调节能力等提供多维度支撑,保障电力系统的稳定运行(本文中新型储能特指锂离子电池)。

结合新型电力系统储能调节需求场景,以系统安全性、经济性为基本原则调整抽水蓄能和新型储能的协同运行方式。当系统供需差额较大时,优先满足系统安全运行,即在满足系统约束的前提下新

型储能优先响应、抽水蓄能接替响应；当系统供需差额较小时，在满足系统约束的前提下储能和火电机组遵从系统整体运行经济效益最优对供电缺额或供电过剩进行响应，一般为抽水蓄能优先响应。

如图 2 所示，当新能源出力大幅跌落时，新型储能凭借其快速响应能力优先响应，当新型储能蓄能量耗尽时抽水蓄能可凭借出力调节速率优势和持续长时间放电优势进行负荷跟随在火电机组启动前支撑负荷需求，有效缓解风电出力反调峰和光伏出力陡降造成的供电缺额问题。

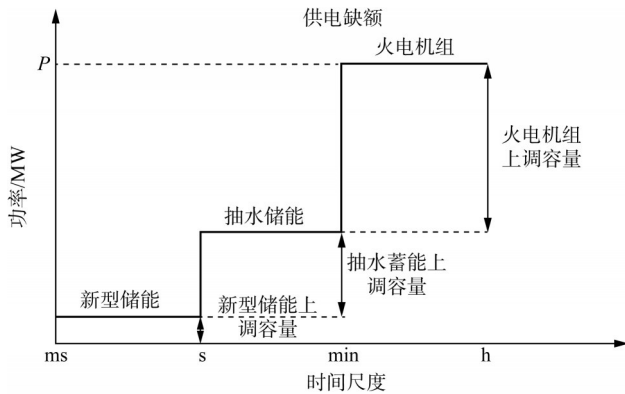


图2 供电缺额下协同响应

Fig. 2 Coordinated response under power supply gap

如图 3 所示，当新能源出力大幅增长时，新型储能优先响应，新型储能容量不足时抽水蓄能进一步响应，当超出储能容量部分火电机组进一步下调出力，有效缓解风电出力大发和光伏出力陡增造成的清洁能源电量弃用问题。

2 抽水蓄能和新型储能协同优化调度

为量化分析新型电力系统下抽水蓄能同新型储

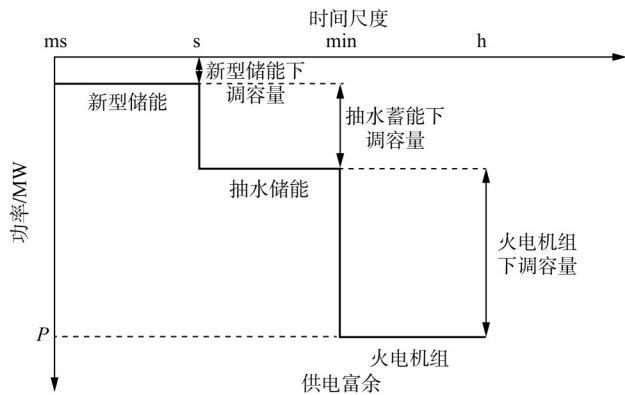


图3 供电富余下协同响应

Fig. 3 Coordinated response under surplus power supply

能协同运行在电力系统中的作用情况，本文首先基于气象特性和负荷需求分析构造储能应用场景，并计及抽水蓄能和新型储能协同运行方式构建含抽水蓄能和新型储能电力系统协同优化调度模型，提出系统协同优化调度评价策略。

2.1 储能应用场景

新能源出力受气象因素影响具有强不确定性，极端气象成为一种“新常态”，双重因素加持下气候变化及其气象问题正在深度介入新型能源供给体系的塑造过程，将直接影响新型电力系统的安全性和稳定性。

从能源消费来看，近年来连续高温、寒潮频发，将刺激降温负荷和取暖负荷不断攀升；从能源生产来看，极端天气将影响各类发电设施正常运行，削减电力保供能力。从常规角度来看，在夏季典型日和冬季典型日用户用电特性和新能源供电特性有明显差异。因此，本文综合k-medoids聚类方法和统计分析方法，综合考虑用电负荷特性和新能源出力特性构建新型电力系统储能应用场景，如表1所示。

表1 场景设置及描述

Tab. 1 Scene setting and description

场景	场景描述
迎峰度冬	冬季典型日，采暖负荷增加，风光资源丰富
暴雪寒潮	采暖负荷增加，风机凝冻，光伏板受遮蔽
大风天气	节假日典型，停工停产负荷降低，风机大风停机
雾霾天气	节假日典型，停工停产负荷降低，辐照减弱
迎峰度夏	夏季典型日，降温负荷增加，风光资源丰富
对流天气	降温负荷较高，风能资源丰富，辐照减弱
台风过境	停工停产负荷降低，风机切出停机，光伏板受遮蔽

2.2 协同优化调度模型

2.2.1 目标函数

将全天的优化调度分为96个时段，以系统整体全天运行费用最小为目标函数，构建含抽水蓄能和新型储能的电力系统协同优化调度模型。

$$\min f(x) = C_1(x) + C_2(x) + M_1 C_3(x) + M_2 C_4(x) + M_3 C_5(x) \quad (1)$$

式中： $C_1(x)$ 为系统发电费用，含火电机组运行成本、火电机组启停成本、抽水蓄能运行成本、新型储能运行成本； $C_2(x)$ 为系统调峰费用； $C_3(x)$ 为系统失负荷惩罚费用； M_1 为系统失负荷惩罚系数； $C_4(x)$ 为新能源出力波动惩罚费用； M_2 为新能源出力波动惩罚系数； $C_5(x)$ 为新能源弃能惩罚费用，含风电和

光伏弃用量惩罚费用; M_3 为新能源弃能惩罚系数。在优化调度运行中, 首先保障系统的供需平衡和安全运行, 再对系统的运行费用等作进一步优化。

2.2.2 约束条件

计及抽水蓄能和新型储能的电力系统协同优化调度模型除考虑系统平衡约束、线路越限约束、常规火电机组运行约束、水电运行约束、风电机组运行约束、光伏机组运行约束及储能运行约束^[24-26]等常规约束条件外, 考虑在15 min级火电机组与储能在调节支撑性能方面的差异, 本文在模型中分别设置火电机组调节能力约束和储能调节能力约束。

1) 火电机组调节能力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{G,i,t,up} \leq \min [P_{G,i,up}, (B_{G,i,t} P_{G,i,max} - P_{G,i,t})] \\ 0 \leq P_{G,i,t,dn} \leq \min [P_{G,i,dn}, (P_{G,i,t} - B_{G,i,t} P_{G,i,min})] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{G,i,t,up}$ 、 $P_{G,i,t,dn}$ 分别为 t 时段火电机组 i 向上、下的调节功率; $P_{G,i,up}$ 、 $P_{G,i,dn}$ 分别为 t 时段火电机组 i 向上、下爬坡功率上限; $B_{G,i,t}$ 为 t 时段火电机组 i 的状态变量; $P_{G,i,max}$ 、 $P_{G,i,min}$ 分别为 t 时段火电机组 i 的出力上、下限; $P_{G,i,t}$ 为 t 时段火电机组 i 的出力情况。

2) 储能支撑调约束

根据电力系统储能发展策略调整, 此处储能特指对象也发生调整, 分别代表抽蓄+新储、单抽蓄、单新储。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{B,l,t,dup} \leq (D_{B,l,t,d} P_{B,l,d,max} - P_{B,l,t,d}) \\ 0 \leq P_{B,l,t,ddn} \leq (P_{B,l,t,d} - D_{B,l,t,d} P_{B,l,d,min}) \\ 0 \leq P_{B,l,t,cup} \leq (D_{B,l,t,c} P_{B,l,c,max} - P_{B,l,t,c}) \\ 0 \leq P_{B,l,t,cdn} \leq (P_{B,l,t,c} - D_{B,l,t,c} P_{B,l,c,min}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{B,l,t,dup}$ 、 $P_{B,l,t,ddn}$ 分别为 t 时段储能 l 放电状态下向上、下调节功率; $D_{B,l,t,d}$ 为 t 时段储能 l 放电状态变量; $P_{B,l,d,max}$ 、 $P_{B,l,d,min}$ 分别为 t 时段储能 l 放电状态下出力上、下限; $P_{B,l,t,d}$ 为 t 时段储能 l 放电功率; $P_{B,l,t,cup}$ 、 $P_{B,l,t,cdn}$ 分别为 t 时段储能 l 充电状态下向上、下调节功率; $D_{B,l,t,c}$ 为 t 时段储能 l 充电状态变量; $P_{B,l,c,max}$ 、 $P_{B,l,c,min}$ 分别为 t 时段储能 l 充电功率上、下限; $P_{B,l,t,c}$ 为 t 时段储能 l 充电功率。

3) 系统备用约束

系统备用约束包含上备用约束和下备用约束。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I P_{G,i,t,up} + \sum_{j=1}^J (P_{H,j,max} - P_{H,j,t}) + \\ & \sum_{l=1}^L (P_{B,l,t,dup} + P_{B,l,t,cup}) \geq r \times \sum_{n=1}^N L_{n,t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I P_{G,i,t,dn} + \sum_{j=1}^J P_{H,j,t} + \sum_{l=1}^L (P_{B,l,t,ddn} + P_{B,l,t,cdn}) \geq r \times \sum_{n=1}^N L_{n,t} \quad (5)$$

式中: $P_{H,j,max}$ 为水电机组 j 的出力上限; $P_{H,j,t}$ 为水电机组 j 的出力; I 为火电机组的数量; J 为水电机组的数量; L 为储能的数量; r 为系统备用率; N 为节点数量; $L_{n,t}$ 为系统节点 n 的负荷需求。

2.2.3 求解策略

本文构建模型目标函数为系统整体运行目标最低, 该目标包含: 系统发电费用、系统调峰费用、系统失负荷惩罚费用、系统新能源出力波动惩罚费用和系统弃能惩罚费用, 为实现系统整体运行的经济效益和安全性能最优, 在模拟运行过程中本文对不同的费用目标设置不同的权重和优先级, 以保障系统安全运行为先, 将优先级设置为: $C_3(x) > C_4(x) > C_5(x) > C_2(x) = C_1(x)$ 。该优化问题为混合整数线性规划问题, 具体求解策略如图4所示。

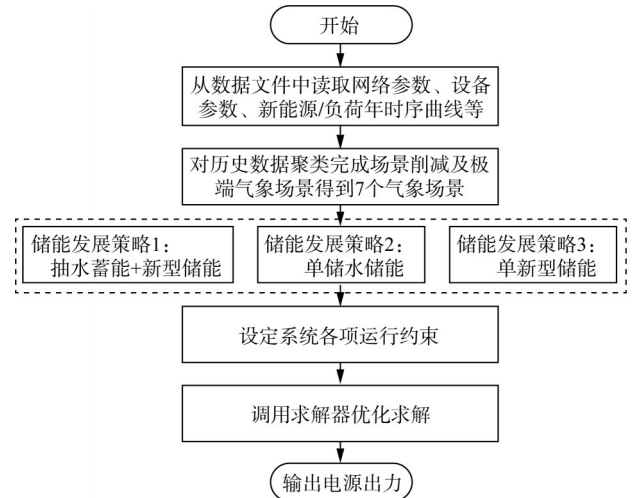


图4 模型求解策略

Fig. 4 Model solving strategy

2.3 系统运行效果评价

“保供应、保安全、促消纳”是贯穿新型电力系统构建的核心问题, 为贯彻这3个核心要点, 从增强供电可靠性、平抑新能源波动、促进新能源消纳、缓解系统调峰压力4个维度对新型电力系统调度运行效果开展评价。

2.3.1 增强供电可靠性

以系统失负荷惩罚费用作为增强系统供电可靠性的评判标准。式(6)—(7)分别为单位兆瓦装机抽

水蓄能和新型储能增强系统供电可靠性评判方法。

$$U_{PS} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M_1(C_3(x) - C_{3,PS}(x))/P_{PS} \quad (6)$$

$$U_{NEW} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M_1(C_3(x) - C_{3,NEW}(x))/P_{NEW} \quad (7)$$

式中： U_{PS} 、 U_{NEW} 分别为单位兆瓦装机抽水蓄能和新型储能共同作用下系统失负荷惩罚费用降幅，元； N 为运行场景数量； $C_{3,PS}(x)$ 、 $C_{3,NEW}(x)$ 分别为系统布局抽水蓄能和新型储能下系统失负荷费用； P_{PS} 、 P_{NEW} 分别为系统抽水蓄能和新型储能装机容量，MW。

2.3.2 平抑新能源波动

以系统新能源出力波动惩罚费用作为平抑新能源波动的评判标准。式(8)–(9)分别为单位兆瓦装机抽水蓄能和新型储能平抑新能源波动的评判方法。

$$F_{PS} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M_2(C_4(x) - C_{4,PS}(x))/P_{PS}/c_4 \quad (8)$$

$$F_{NEW} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M_2(C_4(x) - C_{4,NEW}(x))/P_{NEW}/c_4 \quad (9)$$

式中： F_{PS} 、 F_{NEW} 分别为单位兆瓦装机抽水蓄能和新型储能作用新能源出力波动降幅，MW； $C_{4,PS}(x)$ 、 $C_{4,NEW}(x)$ 分别为系统布局抽水蓄能和新型储能下系统新能源出力波动惩罚费用； c_4 为新能源出力波动费用系数。

2.3.3 促进新能源消纳

以系统新能源弃能惩罚费用作为促进新能源消纳的评判标准。式(10)–(11)分别为单位兆瓦装机抽水蓄能和新型储能促进新能源消纳评判方法。

$$C_{PS} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M_3(C_5(x) - C_{5,PS}(x))/P_{PS}/c_5 \quad (10)$$

$$C_{NEW} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M_3(C_5(x) - C_{5,NEW}(x))/P_{NEW}/c_5 \quad (11)$$

式中： C_{PS} 、 C_{NEW} 分别为单位兆瓦装机抽水蓄能和新型储能作用下新能源消纳升幅，MW； $C_{5,PS}(x)$ 、 $C_{5,NEW}(x)$ 分别为系统布局抽水蓄能和新型储能情况下系统新能源弃能惩罚费用； c_5 为弃用新能源的费用系数。

2.3.4 缓解系统调峰压力

以系统调峰费用作为缓解系统调峰压力的评判标准。式(12)–(13)分别为单位兆瓦装机抽水蓄能和新型储能缓解系统调峰压力评判方法。

$$K_{PS} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_2(x) - C_{2,PS}(x))/P_{PS} \quad (12)$$

$$K_{NEW} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_2(x) - C_{2,NEW}(x))/P_{NEW} \quad (13)$$

式中： K_{PS} 、 K_{NEW} 分别为单位兆瓦装机抽水蓄能和新型储能作用调峰费用降幅，元； $C_{2,PS}(x)$ 、 $C_{2,NEW}(x)$ 分别为系统布局抽水蓄能和新型储能下系统调峰费用。

3 调度运行实例

3.1 基础数据

某省级电网包含火电、水电、风电、光伏4类电源布局和新型储能、抽水蓄能两类储能装置布局，各类电源和储能具体装机如表2所示。结合气象数据、风光出力预测数据和负荷需求预测数据展开电力系统协同优化模拟运行测算。

表2 系统电源装机容量数据

Tab. 2 System power installed capacity data

电源类型	装机容量/MW
火电	146 360
水电	8 480
风电	25 360
光伏	28 110
抽水蓄能	13 280
新型储能	9 372

3.2 协同优化调度结果

在7类储能应用场景下分别对系统设置抽蓄+新储、单抽蓄、单新储3种储能发展策略，基于本文构建的电力系统协同优化调度模型开展数模仿真，其中弃电惩罚系数参照文献[27]拟定，为突出不同目标的优先级，将失负荷目标权重系数和波动惩罚目标权重系数分别设置为15和3，使得失负荷惩罚成本系数和波动惩罚成本系数适度调大。系统在抽水蓄能和新型储能协同支撑作用下，在各类储能应用场景下的模拟仿真优化调度结果如图5所示。

如表3所示，在7类储能应用场景下，均为抽水蓄能和新型储能协同支撑下系统的综合经济效益更优，对系统布局单抽蓄时综合收益次之。结合7类储能应用场景下对系统布局抽蓄+新储的系统优化调度电源出力详情可知，当系统出现大幅供电缺额时，抽水蓄能和锂电池储能联合放电满足系统供需平衡；当系统出现大幅新能源出力过剩时，抽水蓄能和锂电池储能联合蓄能减少系统弃能；当系统出现小幅供电缺额/盈余时，抽水蓄能放电/蓄能满

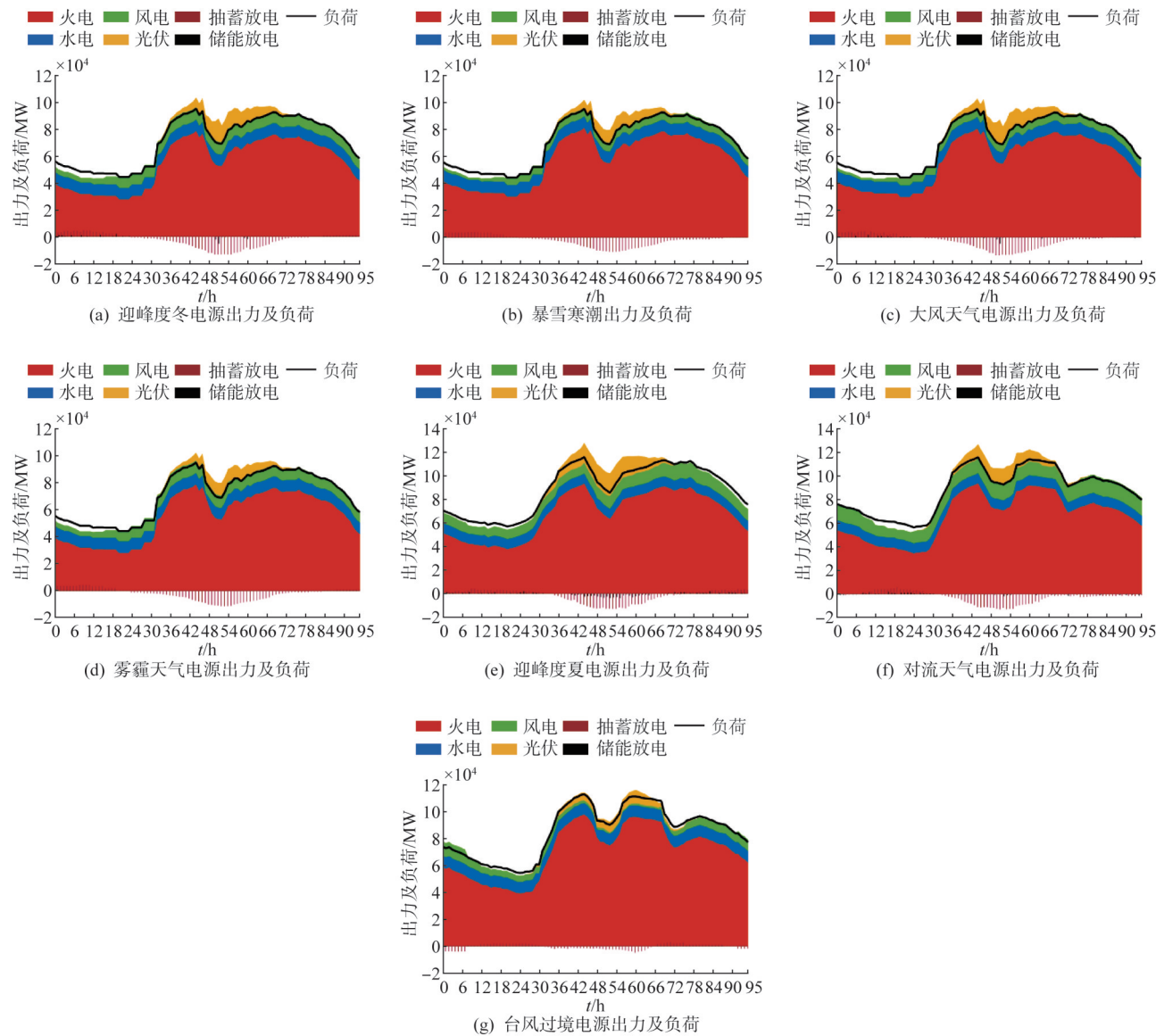


图5 系统布局抽水蓄能+新型储能在各场景下的电源出力及负荷详情

Fig. 5 Power outputs and loads of the system with pumped storage and new energy storage in various scenarios

足系统供需平衡/减少新能源弃能。

表3 系统不同储能发展策略经济收益情况

Tab. 3 System economic benefits under different energy storage development strategies

发展策略场景	抽蓄+新储	单抽蓄	单新储
迎峰度冬	283.1	283.3	373.8
暴雪寒潮	283.0	310.3	412.8
大风天气	283.2	305.4	405.9
雾霾天气	282.8	282.9	380.6
迎峰度夏	494.6	494.9	511.6
对流天气	538.2	545.9	655.1
台风过境	584.9	616.6	723.1

3.3 储能调度运行支撑对比

结合不同场景下改变系统储能发展策略下系统调度优化结果,分析系统在抽水蓄能和新型储能协同运行、单抽水蓄能运行和单新型储能运行模式下对电力系统不同维度的运行支撑情况。

3.3.1 增强供电可靠性

对比7类储能应用场景下系统在不同储能发展策略下的系统失负荷惩罚费用及储能单位兆瓦装机下系统失负荷惩罚费用降幅程度。

如图6所示,在各场景下调整系统储能发展策略,系统优化调度运行的失负荷惩罚费用均为布局抽蓄+新储<单抽蓄<单新储。且平均每兆瓦抽蓄+

新储装机可降低系统失负荷惩罚费用0.187元,每兆瓦单抽蓄装机可降低系统失负荷惩罚费用0.123元,每兆瓦单新储装机可降低系统失负荷惩罚费用0.047元。综合对比,对系统布局抽蓄+新储较布局单一储能具有更好的供电可靠性支撑能力,且优于单抽蓄和单新储的两项加和的支撑效果,而抽水蓄能较锂电池储能具有更优的供电可靠性支撑能力。

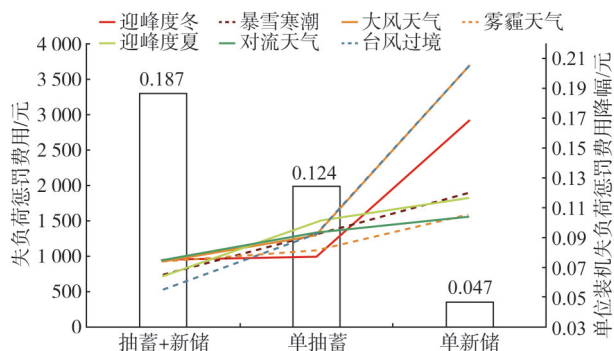


图6 供电可靠性对比

Fig. 6 Enhanced comparison of power supply reliability

3.3.2 平抑新能源波动

对比7类场景下系统在不同储能发展策略下的系统新能源出力波动惩罚费用及单位兆瓦装机储能下系统新能源出力波动降幅程度。

如图7所示,在7类场景下调整系统储能发展策略,系统优化调度运行的新能源出力波动惩罚费用均为布局抽蓄+新储<单抽蓄<单新储。平均每兆瓦抽蓄+新储装机可降低系统新能源出力波动为0.902 MW,每兆瓦单抽蓄装机可降低系统新能源出力波动为0.775 MW,每兆瓦装机单新储可降低系统新能源出力波动为0.073 MW。综合对比,对系统布局抽蓄+新储较布局单一储能具有更好的平抑新能源出力波动的能力,且优于单抽蓄和单新储的两项加和支撑效果,而抽水蓄能较锂电池储能具有更优的平滑清洁能源出力波动能力。

3.3.3 促进新能源消纳

对比7类场景下系统在不同储能发展策略下的系统新能源弃用惩罚费用及单位兆瓦装机储能下系统新能源弃用量降幅程度。

如图8所示,当系统布局抽蓄+新储和单新储时,系统在7类储能应用场景下风、光资源均实现全额消纳;而当系统布局单抽蓄时,系统在7类场景下风、光资源存在不等量弃用值。平均每兆瓦抽蓄+新储装机可降低系统新能源弃用量为0.09

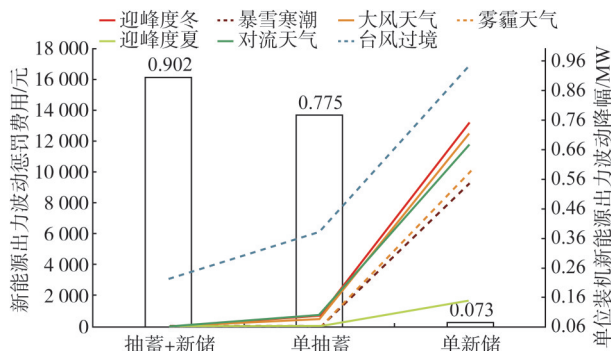


图7 平抑新能源出力波动对比

Fig. 7 Comparison of smoothing the fluctuation of new energy output

MW,每兆瓦单抽蓄装机可降低系统新能源弃用量为0.075 MW,每兆瓦单新储装机可降低系统新能源弃用量为0.218 MW。综合对比,该系统优化调度运行在促进清洁能源消纳方面主要由锂电池储能进行支撑,锂电池储能较抽水蓄能具有更优的促进新能源消纳能力。此处单位兆瓦装机抽蓄+新储较单新储减少系统新能源弃用量降幅较低,是由于在两类储能发展策略下系统均实现了全额消纳,而抽蓄+新储装机量较大进而单位折算量较小。

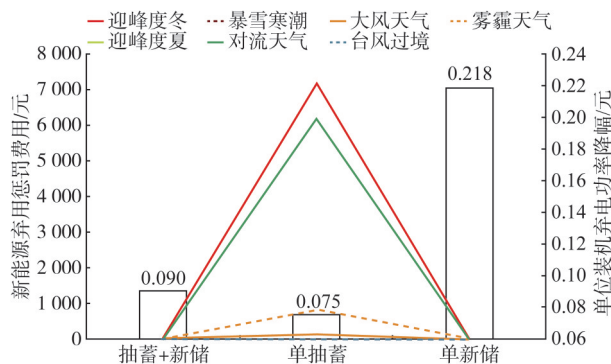


图8 促进新能源消纳对比

Fig. 8 Comparison of promoting the consumption of new energy

3.3.4 缓解系统调峰压力

对比7类场景下系统在不同储能发展策略下的系统调峰费用及单位兆瓦装机储能下系统调峰费用降幅程度。

如图9所示,在7类场景下调整系统储能布局策略,系统优化调度运行的调峰费用均为布局抽蓄+新储<单抽蓄<单新储。平均每兆瓦抽蓄+新储装机可降低系统调峰费用为0.523元,每兆瓦抽水蓄能装机可降低系统调峰费用为0.283元,每兆瓦

装机锂电池储能装机可降低系统调峰费用为0.173元。综合对比,对系统布局抽蓄+新储较布局单一储能具有更好缓解系统调峰压力的能力,且优于单抽蓄和单新储的两项加和支撑效果,而抽水蓄能较锂电池储能具有更优的系统调峰支撑能力

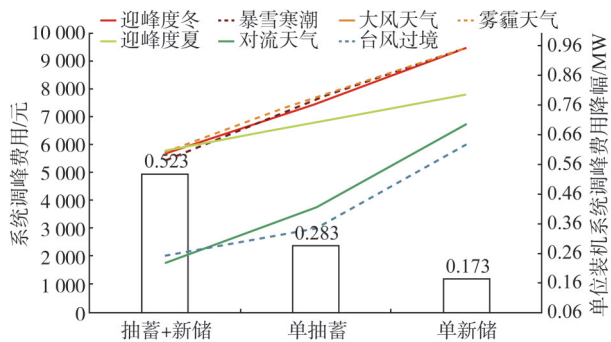


图9 缓解系统调峰压力对比

Fig. 9 Comparison of alleviating system peak load pressure

4 结论

本文构建了含抽水蓄能和新型储能电力系统协同调度优化模型,在不同储能应用场景下对比了系统布局抽水蓄能+新型储能、单新型储能和单抽水蓄能情况,对电力系统运行的支撑效果进行了仿真模拟计算,得到以下两个结论。

1)具有多维储能调节支撑需求的电力系统在抽水蓄能和新型储能协同运行模式下能取得最优经济效益,抽水蓄能和新型储能协同运行对电力系统的支撑效果优于单抽水蓄能和单新型储能,且能够达到“1+1>2”的效果。

2)抽水蓄能和锂电池储能在电力系统的不同评价维度的支撑效果有所差异,抽水蓄能在增强供电可靠性、平抑新能源出力波动、缓解系统调峰压力3个维度具有更优的支撑效益,锂电池储能在促进新能源消纳维度具有更优的支撑效益。

随着新型电力系统发展进程对储能调节需求进一步提升、储能需求场景更加多样化,灵活调整储能协同运行模式可提升电力系统综合效益、提升多场景调度应用需求,结合不同储能运行方式对电力系统的不同维度的支持效果开展评价,可以为适应新型电力系统具体场景需求合理化调整储能调度运行方式提供参考。

参考文献

- [1] 郭锦辉. 加快规划建设新型能源体系 助力实现“双碳”目标[N]. 中国经济时报, 2022-11-10(001).
- [2] 李灏恩, 姜雨萌, 宋天立, 等. 新型电力系统背景下电力供需平衡特征和保供策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 72-78.
LI Haoen, JIANG Yumeng, SONG Tianli, et al. Research on the characteristics of power supply and demand balance and supply guarantee strategies in the context of new power systems[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 72-78.
- [3] 郭创新, 刘祝平, 冯斌, 等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3394-3404.
GUO Chuangxin, LIU Zhuping, FENG Bin, et al. Research status and prospect of new-type power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404.
- [4] 国家能源局. 关于加强新型电力系统稳定工作的指导意见(征求意见稿)[R/OL]. [2023-04-20]. https://www.nea.gov.cn/2023-04/24/c_1310713405.htm.
- [5] 修晓青, 李相俊, 李蓓, 等. 电网侧储能多重应用价值及运营策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 539-545.
XIU Xiaoqing, LI Xiangjun, LI Bei, et al. Research on multiple application value and operation strategy of grid side energy storage[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(9): 539-545.
- [6] 陶琼, 桑丙玉, 叶季蕾, 等. 高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2158-2165.
TAO Qiong, SANG Bingyu, YE Jilei, et al. Optimal configuration method of distributed energy storage systems in distribution network with high penetration of photovoltaic[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2158-2165.
- [7] 南斌, 董树峰, 唐坤杰, 等. 考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1340-1352.
NAN Bin, DONG Shufeng, TANG Kunjie, et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1340-1352.
- [8] 李鹏, 张凡, 马溪原, 等. 储能电站消纳地区风电的调控策略[J]. 可再生能源, 2023, 41(7): 949-956.
LI Peng, ZHANG Fan, MA Xiyuan, et al. Control strategy of energy storage power station to promote consumption of wind power[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(7): 949-956.
- [9] 孙秦峰, 李凤婷, 王森, 等. 提升风电场有功调节能力的风储系统多时间尺度运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 21-31.
SUN Qinfeng, LI Fengting, WANG Sen, et al. Multi-timescale operation strategy of a wind storage system to enhance the active regulation capacity of wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 21-31.
- [10] 杨朋朋, 张修平, 王明强, 等. 计及调峰能力的风光储联合系统优化调度[J]. 电力建设, 2019, 40(9): 124-130.
YANG Peng, ZHANG Xiuping, WANG Mingqiang, et al. Optimal operation of wind-PV-ES joint system considering the peak regulation capability[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(9): 124-130.
- [11] 杨子建, 赵璐, 王越超, 等. 计及厂用电不平衡状态感知与碳

- 减排的多能源储能优化配置模型[J]. 可再生能源, 2023, 41(11): 1512 – 1519.
- YANG Zijian, ZHAO Lu, WANG Chaoyue, et al. An optimal configuration model of multi-energy storage considering the situation awareness of plant power imbalance and the carbon emission reduction[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(11): 1512 – 1519.
- [12] 高嵩, 李军, 宋辉, 等. 提升火电机组一次调频性能的火电-储能一体化系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 116 – 125.
- GAO Song, LI Jun, SONG Hui, et al. An integrated thermal power-energy storage system for improving primary frequency regulation performance of thermal power units [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 116 – 125.
- [13] 李雄威, 王昕, 顾佳伟, 等. 考虑火电深度调峰的风光火储系统日前优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 1 – 7, 48.
- LI Xiongwei, WANG Xin, GU Jiawei, et al. Day-ahead optimal dispatching of wind-solar-thermal power storage system considering deep peak shaving of thermal power [J]. Electric Power, 2023, 56(1): 1 – 7, 48.
- [14] 朱继忠, 余鹏飞, 禚培正, 等. 计及风电和储能的综合经济调度方法[J]. 南方电网技术, 2017, 11(2): 2 – 7.
- ZHU Jizhong, YU Pengfei, XUAN Peizheng, et al. Comprehensive economic dispatch method with energy storage and wind power generation [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(2): 2 – 7.
- [15] 胡洋, 马溪原, 雷博, 等. 储能促进南方电网地区新能源消纳的可行性研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(9): 53 – 61.
- HU Yang, MA Xiyuan, LEI Bo, et al. Feasibility study on energy storage promoting new energy consumption in China southern power grid area[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(9): 53 – 61.
- [16] 李宝聚, 齐宏伟, 傅吉悦, 等. 极端气象天气对新能源运行影响分析[J]. 吉林电力, 2022, 50(1): 10 – 13.
- LI Baoju, QI Hongwei, FU Jiyue, et al. Analysis on the impact of extreme weather on the new energy operation [J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(1): 10 – 13.
- [17] 曹远征, 张雷. 风电场储能系统的多目标优化调度策略[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8677 – 8685.
- CAO Yuanzheng, ZHANG Lei. Multi-objective optimal scheduling of energy storage system in wind farms[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8677 – 8685.
- [18] 陈睿彬, 陆玲霞, 包哲静, 等. 电池储能系统参与用户侧削峰填谷的鲁棒优化调度策略[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 66 – 76.
- CHEN Ruibin, LU Lingxia, BAO Zhejing, et al. Robust optimal dispatch strategy for battery energy storage system participating in user-side peak load shifting[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 66 – 76.
- [19] 陈海生, 刘畅, 徐玉杰, 等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1477 – 1485.
- CHEN Haisheng, LIU Chang, XU Yujie, et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of carbon peak and carbon neutrality [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1477 – 1485.
- [20] 朱永强, 郝嘉诚, 赵娜, 等. 能源互联网中的储能需求、储能的功能和作用方式[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(2): 68 – 75.
- ZHU Yongqiang, HAO Jiacheng, ZHAO Na, et al. Demands, functions and action manners of energy storage in Energy Internet [J]. Advanced Technology of Electrival Engineering and Energy, 2018, 37(2): 68 – 75.
- [21] 唐西胜. 储能在电力系统中的作用与运营模式[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 2 – 7.
- TANG Xisheng. Applications and marketing mode of energy Storages in power system [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 2 – 7.
- [22] 罗城鑫, 吕彦龙, 刘润宝, 等. 计及灵活性不足风险的配电网智能软开关与多类型共享储能协调优化[J]. 发电技术, 2025, 46(6): 1085 – 1096.
- LUO Chengxin, LÜ Yanlong, LIU Runbao, et al. Exergoeconomic research on low-carbon-emission combined cooling, heating, and power system based on heat pump technology [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(6): 1085 – 1096.
- [23] 李红, 王浩, 董海鹰, 等. 考虑配电网脆弱性与经济性的储能优化配置[J]. 南方电网技术, 2025, 19(11): 132 – 140.
- LI Hong, WANG Hao, DONG Haiying, et al. Optimal allocation of energy storage considering distribution network vulnerability and economics [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(11): 132 – 140.
- [24] 姜海洋, 杜尔顺, 金晨, 等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2101 – 2115.
- JIANG Haiyang, DU Ershun, JIN Chen, et al. Optimal planning of multi-time scale energy storage capacity of cross-national interconnected power system with high proportion of clean energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2101 – 2115.
- [25] 禚培正, 朱继忠, 谢平平. 含风电电力系统鲁棒调度保守度的多目标优化方法[J]. 南方电网技术, 2017, 11(2): 8 – 15.
- XUAN Peizheng, ZHU Jizhong, XIE Pingping. Multi-objective optimization method of robust dispatch conservativeness of power system with wind power [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(2): 8 – 15.
- [26] 孟繁林, 钟海旺, 夏清. 高比例可再生能源电力系统中电量约束型机组参与现货市场的机制[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1047 – 1055.
- MENG Fanlin, ZHONG Haiwang, XIA Qing. Spot market mechanism for energy constrained generation units in high proportion renewable energy power system [J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1047 – 1055.
- [27] 崔杨, 郭福音, 付小标, 等. 供用能转换促进风电消纳的综合能源系统源荷协调优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1437 – 1447.
- CUI Yang, GUO Fuyin, FU Xiaobiao, et al. Source-load coordinated optimal dispatch of integrated energy system based on conversion of energy supply and use to promote wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1437 – 1447.

收稿日期: 2024-04-15; 网络首发日期: 2024-07-17

作者简介:

彭潜(1981), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为抽水蓄能和储能电池发展规划;

钟鑫亮(1987), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为抽水蓄能和储能电池发展规划;

王雪林(1997), 女, 通信作者, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统调度运行和储能技术, 1696955301@qq.com。