

面向光伏消纳的光伏-废弃矿井抽蓄-蓄电池联合发电系统优化调度策略

梁喆¹, 李梅¹, 周孟然¹, 高博², 陈凡²

1. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 淮南 232001

2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601

摘要 为提高光伏消纳能力, 构建了一种含废弃矿井抽蓄-蓄电池混合储能的联合发电系统。针对联合发电系统, 分别研究了光伏、废弃矿井抽蓄电站及蓄电池的数学模型, 引入弃光成本, 提出了以联合发电系统总运行成本最低和光伏消纳量最大为目标的优化调度模型, 结合功率平衡约束、废弃矿井抽蓄电站运行约束、电池储能运行等约束, 利用 CPLEX 优化工具实现调度模型最优解求取。通过算例, 对系统在光伏-废弃矿井抽蓄、光伏-电池储能和光伏-废弃矿井抽蓄-电池储能 3 种不同调度方式下的光伏消纳效果进行对比, 结果表明, 本调度策略可以达到系统运行成本最优、降低弃光的效果。

关键词 光伏消纳; 废弃矿井抽蓄电站; 联合发电系统; 混合储能

近年来, 光伏发电的装机容量逐年提高, 在一些能源城市, 利用废弃煤矿的工业广场和采煤沉陷区建设光伏电站^[1]得到了广泛应用。

太阳能具有间歇性、随机性特点, 需要配备储能设备, 才能满足供电可靠性的要求, 但要求配备的储能系统兼有功率密度与能量密度高的特点。目前已经成熟的能量型储能技术是抽水蓄能技术, 其具有调节容量大、单位容量成本低, 但响应速度不够迅速的特点^[2], 功率密度型储能技术如电池储

能目前也得到广泛使用^[3], 其具有响应速度快、配置成本高等特点。抽水蓄能电站天然站址资源十分丰富, 但分布不均衡。废弃煤矿的利用模式除了建设光伏电站外, 还有学者提出利用采煤沉陷区及地下巷道建设抽蓄电站^[4-5]。废弃矿井抽蓄电站的出现, 为光伏等新能源的消纳提供了新的思路。

结合抽水蓄能和电池储能运行特性的差异, 本研究提出一种废弃矿井抽蓄电站与电池储能的混合储能与光伏发电的联合发电系统。通过电池储

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(SGAHGK00DJJS1900077)

作者简介: 梁喆, 副教授, 研究方向为电力系统自动化和电力工程信号处理, 电子信箱: zhliang@aust.edu.cn

引用格式: 梁喆, 李梅, 周孟然, 等. 面向光伏消纳的光伏-废弃矿井抽蓄-蓄电池联合发电系统优化调度策略[J]. 科技导报, 2021, 39(13):

52-58; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.13.006

能与抽水蓄能的组合,既提高了光伏消纳量,又加快了储能响应速度。

国内外针对光伏、抽蓄和电池储能协调运行调度的研究较少。已有的相关研究大都集中于风储、风光储系统容量优化配置和调度等方面^[2,6-8]。文献[2]基于频谱分析及不同储能技术的运行特性,提出了电池储能与抽水蓄能复合储能在含风电的电力系统中协调优化运行模型。文献[6]提出了基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度策略。以系统运行成本最小、风光蓄发电利用率最大和系统输出功率波动最小为目标分别建立多时间尺度的优化调度模型,通过滚动修正、实时调节来提高调度精度。文献[7]将风电、抽水蓄能和蓄电池相结合,构建联合发电系统,设计了日前调度和日内调度策略,并评估了3种场景下系统的运行效果。文献[8]构建了基于碳交易的含电池储能-抽水蓄能复合储能的优化调度模型,主要应用在大规模光伏发电系统中,抽水蓄能用作接入光伏发电后系统的调峰平衡。

以上主要针对高压大规模接入的大型抽水蓄电站开展研究,大型抽水蓄电站基本都具备年调节能力和季调节能力,难以适应小型光伏发电的互补需求。废弃矿井抽水蓄电站根据改造规模,其装机容量可小于常规抽水蓄电站,从而能和小型光伏发电互补使用,但装机容量小的废弃矿井抽水蓄电站调节能力较弱,如何和光伏发电配合使用值得深入探讨。在当前多能互补联合发电系统运行研究中,并没有专门针对废弃矿井抽蓄和电池储能混合储能与光伏发电联合系统的容量优化、协调调度方面进行研究,目前已有的复合储能多是电池和超级电容的组合^[9-10]。因此有必要研究光伏-废弃矿井抽蓄-电池储能的联合发电系统运行调度等关键技术问题。

以总运行成本最低和光伏消纳量最大为目标,提出一种基于废弃矿井抽蓄-电池储能复合储能与光伏发电的联合发电系统日内调度方法,在计及功率平衡约束、废弃矿井抽水蓄电站运行约束、电池储能运行约束、抽蓄开停机约束、蓄电池充放电等约束基础上,建立联合发电系统调度模型,以完成对光伏-废弃矿井抽蓄-电池储能联合发电系统的

协同优化。应用CPLEX软件对调度模型求解,通过算例验证调度策略的有效性。

1 面向光伏消纳的联合发电系统

联合发电系统由3部分组成:光伏、废弃矿井抽蓄电站及电池储能。电池储能作为功率型储能,安装于光伏电站出口侧,主要用于平抑光伏电站短期并网功率波动,使光伏出力曲线平滑。废弃矿井抽蓄作为能量型储能,在光伏发电高峰期抽水,储存电能;在光伏发电低谷期放水,发出电能,主要用作补偿光伏的间歇性出力。废弃矿井抽蓄电站及电池储能构成的混合储能系统仅支持所在系统的光伏电站,其运行方式只受光伏电站控制,构成光-蓄-储一体化电站。图1为联合发电系统结构。

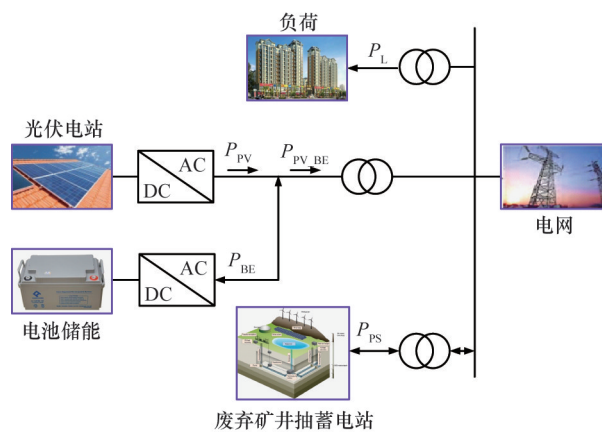


图1 联合发电系统结构

图1中, P_{PV} 为光伏发电功率; P_{BE} 为电池储能的出力,正值代表储能放电,负值代表储能充电; $P_{PV, BE}$ 为光伏发电/电池储能系统联合并网功率; P_L 为系统负荷功率; P_{PS} 为废弃矿井抽水蓄电站的发电出力。

在联合发电系统中,光伏出力大于负荷时,富裕功率由废弃矿井抽蓄和蓄电池消纳;光伏出力小于负荷时,由光伏、废弃矿井抽蓄和蓄电池联合供电。通过优化联合发电系统上网功率和抽水蓄能机组的抽水/发电功率和蓄电池的充电/发电功率,使光伏能够最大化地消纳和利用。

2 优化调度方法

2.1 目标函数

假定光伏、废弃矿井抽蓄和电池储能容量均确定,通过合理安排各发电单元的出力,使联合发电系统总运行成本最低和光伏消纳量最大。总运行成本主要包括运维成本、弃光惩罚成本以及抽蓄电站水泵机组的启停费用,引入弃光惩罚成本,能够更好地检验消纳光伏的效果。

假设一个调度周期为 24 h,分为 24 个调度时段,以 1 h 作为调度区间,优化调度的目标函数可以表示为

$$f = \omega_1 E_{PV} + \omega_2 C_{GH} \quad (1)$$

$$\max E_{PV} = \sum_{t=1}^T P_{PV}^t \Delta T \quad (2)$$

$$\min C_{GH} = C_{OM} + C_{qt} + C_{qg} \quad (3)$$

$$\begin{cases} C_{OM} = \sum_{t=1}^T (k_{pw} P_{PV}^t + X_{ps}^c k_{ps}^c P_{PS}^{c,t} + X_{ps}^d k_{ps}^d P_{PS}^{d,t} + k_{be} P_{BE}^t) \\ C_{qt} = \sum_{t=1}^T (F_{st}^t + F_{dw}^t) \\ C_{qg} = \sum_{t=1}^T k_d P_{PV}^{curt,t} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ω_1 和 ω_2 为权重因子, $\omega_1 + \omega_2 = 1$,可通过不同的求解需求进行设定; E_{PV} 为光伏最大消纳电量; T 为调度期间的时段数 $T=1, 2, \dots, 24$; P_{PV}^t 为光伏电站在 t 时段的有功出力; ΔT 为调度时间间隔; C_{GH} 、 C_{OM} 、 C_{qt} 、 C_{qg} 分别为系统总运行成本、系统总运维成本、抽蓄电站启停成本和弃光惩罚成本; k_{pw} 、 k_{ps}^c 、 k_{ps}^d 、 k_{be} 分别为光伏、废弃矿井抽蓄电站抽水、发电和电池储能电站的运行成本; X_{ps}^d 和 X_{ps}^c 为废弃矿井抽蓄电站的发电、抽水状态,为0-1变量; P_{PS}^t 、 P_{BE}^t 分别为废弃矿井抽蓄、电池储能在 t 时刻的有功出力; F_{st}^t 、 F_{dw}^t 分别为抽蓄机组在 t 时段的启动和停机一次的成本; k_d 为弃光成本惩罚因子; $P_{PV}^{curt,t}$ 为第 t 时段内弃光功率。

建立的多目标模型是含2个子目标的优化模型。在这样的多目标模型中,由于子目标单位不同,不能直接加权,必须先对目标函数归一化。则式(1)可用式(5)表示

$$f = \omega_1 \frac{E_{PV}}{E_{PV,max}} + \omega_2 \frac{C_{GH}}{C_{GH,max}} \quad (5)$$

式中, $E_{PV,max}$ 、 $C_{GH,max}$ 分别为计算周期内,光伏发电完全消纳情况下 E_{PV} 和 C_{GH} 的最大值。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束。

联合发电系统向电网提供的出力 P_{total}^t 由光伏输出 P_{PV}^t 、废弃矿井抽蓄电站发电功率输出 $P_{PS}^{d,t}$ 、抽水功率 $P_{PS}^{c,t}$ 、电池储能电站发电功率输出 $P_{BE}^{d,t}$ 和充电功率 $P_{BE}^{c,t}$ 组成,其表达式为

$$P_{total}^t = P_{PV}^t - P_{PS}^{c,t} + P_{PS}^{d,t} + P_{BE}^{d,t} - P_{BE}^{c,t} \quad (6)$$

2) 光伏出力约束。

$$\begin{cases} P_{PV}^t + P_{PV}^{curt,t} = P_{PV}^{F,t} \\ 0 \leq P_{PV}^t \leq P_{PV}^{F,max} \\ 0 \leq P_{PV}^{curt,t} \leq P_{PV}^{F,max} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $P_{PV}^{F,max}$ 为光伏电站的最大预测出力。

3) 联合发电系统并网功率在抽水状态和发电状态下约束。

由于抽蓄机组的电能由光伏提供,且抽蓄的装机容量大于蓄电池的装机容量,为了保证供电的可靠性,联合发电系统的输出功率在抽蓄机组抽水状态和发电状态下约束。

$$\begin{cases} P_{total}^{min} \leq P_{total}^{c,t} \leq X_{ps}^c P_{PV}^{F,min,t} \\ X_{ps}^d P_{PV}^{F,max,t} \leq P_{total}^{d,t} \leq P_{total}^{max} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $P_{PV}^{F,min,t}$ 和 $P_{PV}^{F,max,t}$ 为联合发电系统在第 t 时段光伏预测功率最小值和最大值; P_{total}^{min} 和 P_{total}^{max} 为联合发电系统并网功率的最小值和最大值; $P_{total}^{d,t}$ 和 $P_{total}^{c,t}$ 为联合发电系统在第 t 时段废弃矿井抽蓄处于发电状态和抽水状态下的并网功率实际值。

4) 废弃矿井抽蓄电站运行约束。

废弃矿井抽蓄电站发电、抽水状态下的功率限制以及机组运行状态间的互斥关系及上下水库的水量限制表现为

$$\begin{cases} \text{约束a: } P_{PS}^{d,min} X_{PS}^d \leq P_{PS}^{d,t} \leq P_{PS}^{d,max} X_{PS}^d \\ P_{PS}^{c,min} X_{PS}^c \leq P_{PS}^{c,t} \leq P_{PS}^{c,max} X_{PS}^c \\ \text{约束b: } X_{PS}^d X_{PS}^c = 0 \\ \text{约束c: } V_u^{min} \leq V_u^t \leq V_u^{max} \\ V_d^{min} \leq V_d^t \leq V_d^{max} \\ \text{约束d: } E_{PS}^0 - E_{PS}^{24} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $P_{PS}^{d,t}$ 、 $P_{PS}^{c,t}$ 分别为废弃矿井抽蓄电站在 t 时刻的发电、抽水功率; $P_{PS}^{d,max}$ 、 $P_{PS}^{d,min}$ 分别为废弃矿井抽蓄电站的最大、最小发电功率; $P_{PS}^{c,max}$ 、 $P_{PS}^{c,min}$ 分别为废弃矿井抽蓄电站的最大、最小抽水功率, 在常规抽水蓄能电站中, 机组抽水工况下吸收功率不可调节, 本研究将 $P_{PS}^{c,max}$ 、 $P_{PS}^{c,min}$ 设置为同一值; V_u^{min} 、 V_u^{max} 、 V_d^{min} 、 V_d^{max} 分别为上下水库的最小和最大库容; V_u^t 和 V_d^t 为上下水库在 t 时段内的实际库容; E_{PS}^0 为每天起始时刻抽蓄电站蓄能值, E_{PS}^{24} 为每天结束时刻抽蓄电站蓄能值。

式(9)约束 a 为废弃矿井抽蓄电站的运行约束; 考虑到抽蓄电站在同一个时段内不能同时发电、抽水, 约束 b 引入状态互斥约束; 约束 c 为抽水蓄能电站库容约束; 约束 d 表示废弃矿井抽蓄一个调度周期内的初始和结束蓄能值保持一致。

5) 蓄电池运行约束。

电池组充放电功率应该满足一定的输出范围

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{约束 a: } 0 \leq P_{BE}^{d,t} \leq P_{BE}^{max} Y_{BE}^d \\ \quad \quad \quad 0 \leq P_{BE}^{c,t} \leq P_{BE}^{max} Y_{BE}^c \\ \text{约束 b: } Y_{BE}^d Y_{BE}^c = 0 \\ \text{约束 c: } SOC^{min} \leq SOC^t \leq SOC^{max} \\ \text{约束 d: } E_{BE}^0 - E_{BE}^{24} = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

式中, $P_{BE}^{d,t}$ 和 $P_{BE}^{c,t}$ 分别为电池储能电站在 t 时刻的放电、充电功率; Y_{BE}^d 表示电池储能电站的放电状态, 为 1 表示放电; Y_{BE}^c 表示电池储能电站的充电状态, 为 1 表示充电; SOC^{min} 、 SOC^{max} 为电池储能电站最小和最大剩余容量; E_{BE}^0 为每天起始时刻电池储能值, E_{BE}^{24} 为每天结束时刻电池储能值。

式(10)中约束 a 为电池储能电站的运行约束; 考虑到电池储能在同一个时段内不能同时充电、放电, 约束 b 为状态互斥约束; 约束 c 为电池储能电站剩余容量约束; 约束 d 表示每日的始、末时段, 电池储能容量约束相同。

6) 抽水蓄能机组启停次数约束。

过于频繁启停会对抽蓄机组造成损害, 启停也会增加水头损失, 增加成本, 因此需要对抽水蓄能机组的总启停次数进行限制^[11], 其表达式为

$$\sum_{t=1}^T [(X_{PS}^{d,t} - X_{PS}^{d,t-1}) + (X_{PS}^{c,t} - X_{PS}^{c,t-1})] \leq 2N_{PS} \quad (11)$$

式中, N_{PS} 为抽水蓄能机组总台数。

7) 蓄电池组充放电次数约束。

为了不使蓄电池短时内频繁充放电, 因此需要对蓄电池组充放电次数进行限制, 其表达式为

$$\sum_{t=1}^T [(Y_{BE}^{d,t} - Y_{BE}^{d,t-1}) + (Y_{BE}^{c,t} - Y_{BE}^{c,t-1})] \leq N_{BE} \quad (12)$$

式中, N_{BE} 为蓄电池充放电转换次数限值。

3 算例分析

目前中国没有建成的废弃矿井抽蓄电站, 根据文献[12]、[13]的研究数据, 构造算例, 对所提调度模型进行测试。

联合发电系统中光伏装机容量为 60 MW, 废弃矿井抽蓄电站装机容量为 22 MW, 电池储能单元额定功率 20 MW, 额定容量 60 MW·h, 光伏出力曲线如图 2 所示。

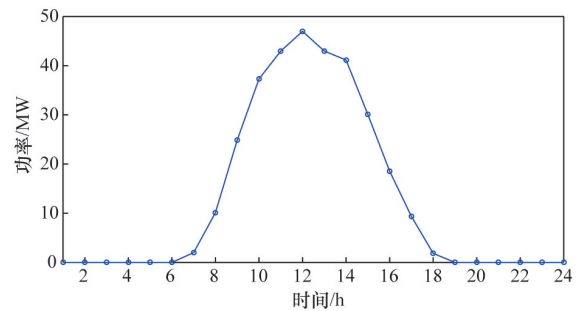


图2 光伏出力曲线

抽水蓄能电站、蓄电池的参数见表 1, 其他参数取值见表 2^[11,14-16]。

表 1 抽水蓄能电站、蓄电池的参数

抽蓄电站参数	取值	蓄电池参数	取值
抽水功率/MW	22	充电功率/MW	15
发电功率/MW	22	发电功率/MW	15
库容/(MW·h)	180	容量/(MW·h)	60
抽水效率 η_1	0.87	充电效率 η_3	0.9
发电效率 η_2	0.85	发电效率 η_4	0.9
初始库容/(MW·h)	25	初始容量/(MW·h)	12

表 2 其他参数取值(单位:元/MW·h)

参数	k_{pv}	k_{ps}^c	k_{ps}^d	k_{be}	F_{st}	F_{dw}	k_d	N_{BE}
数值	40	60	46	28.7	20	20	230	3

CPLEX 是 IBM 公司开发的商业优化软件,其可用于求解大规模的线性规划、二次规划、带约束的二次规划、二阶锥规划及相应的混合整数规划问题。在 Matlab 软件中通过 YALMIP 工具包调用 CPLEX 对调度模型进行仿真求解。

3.1 优化调度结果分析

设系统的总运行成本和光伏消纳权重相同,取值: $\omega_1=0.5, \omega_2=0.5$ 。为研究光伏消纳受储能的影响和光伏/废弃矿井抽蓄电站/蓄电池联合调度,分别按照光伏和蓄电池联合运行、光伏和废弃矿井抽蓄电站联合运行、光伏/废弃矿井抽蓄电站/蓄电池联合运行 3 种场景进行调度策略仿真。3 种场景下均实现光伏和不同储能的联合调度,场景 1 和场景 2 下的约束条件均采用功率平衡、光伏出力 and 相应的储能出力及次数限制约束条件,场景 3 采用 2.2 节中的所有约束条件。在上述的约束条件中,废弃矿井抽蓄每天的启停次数限制为 2 次,蓄电池充放电次数限制为 6 次。

1) 场景 1: 光伏和蓄电池联合运行。

该场景下废弃矿井抽蓄电站不参与调度,运行结果如图 3、表 3 所示。

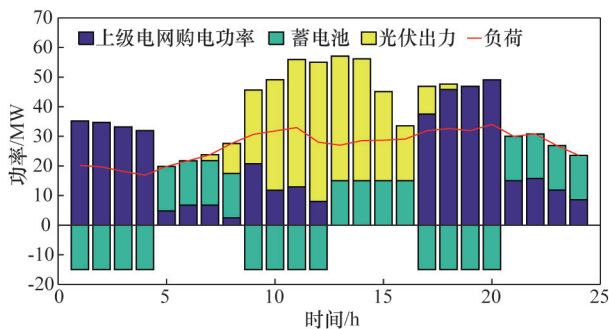


图3 光伏和蓄电池联合运行出力

表3 光伏和蓄电池联合运行结果

运行成本/ 万元	光伏消纳电量/ MW	弃光率/%	弃光惩罚/ 万元
2.5	267.89	13.1	0.93

图 3 中出力大于 0 表示光伏或电池储能处于发电状态,出力小于 0 表示蓄电池处于充电状态。从图 3 中可以看出,蓄电池的充放电策略通过优化计算得到了合理的分配:在光伏出力期间(9:00—13:

00)处于充电状态,在光伏无出力期间(5:00—9:00,21:00—1:00)进行放电。其余时间段通过上级电网对电池充电或对负荷供电,弃光主要集中在 13:00—16:00 时段。本配置蓄电池的功率为 15 MW,容量为 60 WM·h,即 3~4 h 就能将蓄电池充满,或者完全释放。从图 3 中可以看出蓄电池的每次充电或放电均在 4 h 之内。

在蓄电池的单独调节下,系统弃光率达到 13.1%,此时的运行成本为 2.5 万元,其中弃光惩罚为 0.93 万元。

2) 场景 2: 光伏和废弃矿井抽蓄电站联合运行。

该场景下废弃矿井抽蓄电站不参与调度,运行结果如图 4、表 4 所示。

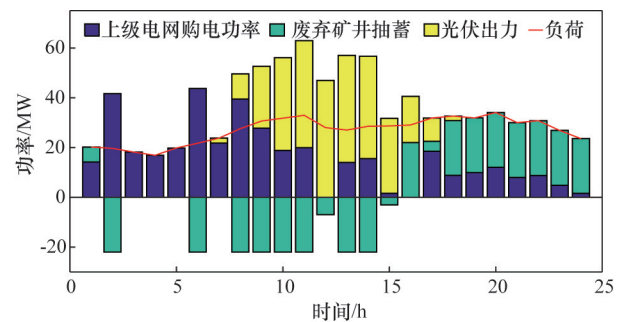


图4 光伏和废弃矿井抽蓄电站联合运行出力

表4 光伏和废弃矿井抽蓄电站联合运行结果

运行成本/ 万元	光伏消纳 电量/MW	弃光率/%	弃光惩罚/ 万元
3.9	271.02	11.8	0.83

图 4 为光伏和废弃矿井抽蓄电站联合运行调度结果。从图 4 可以看出,抽水蓄能机组抽水状态大多集中 8:00—16:00 时间段,用以存储弃光电量,这个时间段中光伏出力为 240.08 MW,弃光功率为 36.38 MW,光伏无出力时段废弃矿井抽蓄电站将存储的电能释放并维持调节周期内水库库容的平衡。配置抽蓄电站的机组为 22 MW,抽蓄电站的水库容量为 180 MW·h,也就是抽蓄机组以额定功率发电,8~10 h 就能将抽蓄电站的水用完。

添加抽蓄后,抽蓄通过光伏出力高峰时抽水,光伏无出力时放电的方式显著促进了光伏消纳量

的增加。对比场景1与场景2的光伏消纳电量,可发现光伏消纳电量增加了。

3) 场景3:光伏、废弃矿井抽蓄电站、电池储能联合运行的调度方式。

图5为光伏、废弃矿井抽蓄电站、蓄电池联合运行调度结果。从图5中可以看出,系统各时刻调度出力的累加值为646.35 MW,光伏出力为297.85 MW,蓄电池出力为64.77 MW,抽蓄出力为186 MW。废弃矿井抽蓄的主要出力时间在17:00—24:00,在1:00—6:00和19:00—24:00时段中,光伏无出力,16:00—19:00时段,光伏最大出力仅为29.78 MW,因此可以利用废弃矿井抽蓄为负荷提供功率支持,从而保证了供电可靠性。在9:00、12:00—14:00和15:00时间段蓄电池的出力用来平抑光伏的出力波动,和光伏出力共同为负荷提供功率支持,同时多余的电能供废弃矿井抽蓄电站抽水储能。通过优化调度,各发电单元的出力最大化地帮助了光伏能源的消纳,有效地降低了系统运行成本。

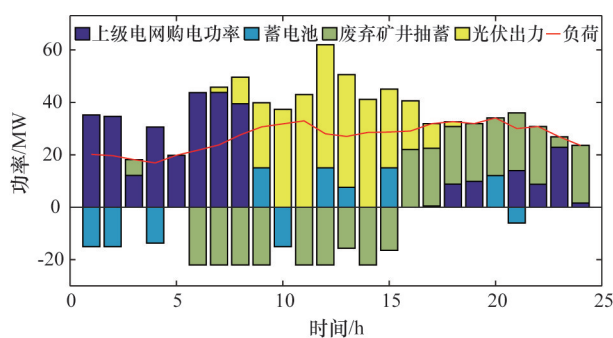


图5 光伏、废弃矿井抽蓄电站、蓄电池联合运行出力

对于联合发电系统,从表5可以看出弃光率已降低很多。相对于场景1、场景2,弃光率分别由13.1%和11.8%降低到5.3%,联合调度有效解决了单独电池储能或者抽蓄调节时弃光率过高的问题,提高了光伏发电的消纳电量。

表5 光伏、废弃矿井抽蓄电站、电池联合运行结果

运行成本/ 万元	光伏消纳电 量/MW	弃光率/%	弃光惩罚/ 万元
3.76	297.85	5.3	0.46

3.2 弃光惩罚系数灵敏度分析

上述算例均在固定弃光惩罚系数下取得,对弃

光惩罚系数做灵敏度分析,分析不同弃光惩罚系数对弃光率的影响,变化区间为 $[-50\%, 50\%]$,变化步长为25%,结果见表6。

表6 弃光率指标分析

场景	弃光惩罚系数/%				
	$k_{\text{弃}}=115$	$k_{\text{弃}}=173$	$k_{\text{弃}}=230$	$k_{\text{弃}}=288$	$k_{\text{弃}}=345$
1	16.7	16.7	13.1	13.1	13.1
2	14.9	14.9	11.8	11	11
3	8.8	8.8	6.4	6.4	6.1

由表6可见,随着弃光惩罚系数的增加,弃光率均变化很小或不变化,混合储能和单一储能相比,混合储能的弃光率低于单一储能,可见为进一步促进光伏消纳,建立多能互补的联合发电系统势在必行。

4 结论

为了提高光伏消纳能力,提出了结合废弃矿井抽蓄、蓄电池构建的光伏-废弃矿井抽蓄-蓄电池联合发电系统的调度方法,通过算例分析,可得到以下结论。

1) 将废弃矿井抽蓄、蓄电池和光伏组成联合发电系统,可以综合不同能源的出力特性,达到多种能源综合互补利用;废弃矿井抽蓄和蓄电池2种储能电站参与调度,能够提高光伏消纳,降低弃光惩罚成本从而降低系统运行成本。

2) 蓄电池有快速调节能力,能够有效地对抽水蓄能储能电站的调节能力进行互补,为高发时期的光伏提供更好的存储空间,实现在不同时段的高可靠供电。

参考文献 (References)

- [1] 李全生, 李瑞峰, 张广军, 等. 我国废弃矿井可再生能源开发利用战略[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 9-14.
- [2] 娄素华, 杨天蒙, 吴耀武, 等. 含高渗透率风电的电力系统复合储能协调优化运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 30-35.
- [3] 马伟, 王玮, 吴学智, 等. 平抑光伏并网功率波动的混合

- 储能系统优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 58-69.
- [4] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 965-972.
- [5] Menéndez J, Loredó J S S. Use of coal mines facilities in northern Spain for the production of sustainable energy [J]. *International Journal of Environmental Science*, 2017, 2: 324-328.
- [6] 刘德顺, 董海鹰, 汪宁渤, 等. 基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 73-83.
- [7] Li J H, 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(3): 21-34.
- [8] 车泉辉, 吴耀武, 祝志刚, 等. 基于碳交易的含大规模光伏发电系统复合储能优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 76-83.
- [9] 丁明, 吴杰, 张晶晶. 面向风电平抑的混合储能系统容量配置方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 593-599.
- [10] 苏浩, 张建成, 冯冬涵, 等. 模块化混合储能系统及其能量管理策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 127-133.
- [11] 肖白, 丛晶, 高晓峰, 等. 风电-抽水蓄能联合系统综合效益评价方法[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 400-404.
- [12] 杨秋霞, 高辰, 刘同心, 等. 考虑柔性负荷的含光伏电力系统模糊随机优化调度风险研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 142-151.
- [13] 熊猛, 高峰, 张海峰, 等. 基于混合储能系统的风电场调度策略[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1242-1249.
- [14] 吴红斌, 陈斌, 郭彩云. 风光互补发电系统中混合储能单元的容量优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 241-245.
- [15] 苏康博, 杨洪明, 余千, 等. 考虑多类型水电协调的风光电站容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 80-88.
- [16] 崔杨, 张家瑞, 王铮, 等. 计及价格型需求响应的风-光-光热联合发电系统日前调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3103-3114.

Optimal scheduling strategy for PV-abandoned mine pumped storage-battery hybrid power generation system for PV energy consumption

LIANG Zhe¹, LI Mei¹, ZHOU Mengran¹, GAO Bo², CHEN Fan²

1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

2. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China

Abstract To improve the capacity of photovoltaic energy consumption, a hybrid power generation system of abandoned mine pumped storage and battery is constructed. Aiming at the hybrid power generation system, mathematical models of PV, abandoned mine pumped storage power station and battery are studied respectively. By introducing the cost of light discarding, an optimal scheduling model is proposed, which aims at the lowest total operating cost and the maximum PV energy consumption of the hybrid power generation system. Combined with power balance constraints, operation constraints of abandoned mine pumped storage power station and battery energy storage, an optimal solution of the scheduling model is obtained by means of CPLEX optimization tool. The results show that the scheduling strategy can achieve the optimal operation cost of the system and reduce the waste light effect.

Keywords PV consumption; abandoned mine pumped storage station; hybrid power generation system; hybrid energy storage ●



(责任编辑 刘志远)