

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2022.06.006

面向辅助服务的新能源场站共享储能容量优化配置

何锦华¹, 吴斌², 曹敏健¹, 胡泽春¹

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. 国网河北省电力有限公司石家庄供电分公司, 河北 石家庄 050051)

摘要:随着新能源的快速发展, 储能作用日益凸显。针对新能源场站共享储能提供一次调频的定容问题, 提出以共享储能投资商总成本最小为目标的储能优化配置方法。首先对历史频率数据的经验分布进行拟合, 利用拟合结果生成配置储能所需的频率数据。然后基于所生成的频率数据, 综合考虑一次调频约束、储能倍率特性约束和一次调频参与率约束等, 建立满足一次调频要求的储能优化配置模型。所建模型为混合整数线性规划模型, 可采用成熟的求解器进行求解。最后, 基于实际频率数据对所提方法进行仿真分析, 并对锂电池和飞轮储能的配置结果进行对比。结果表明: 相比各自独立加装储能, 多个新能源场站加装共享储能可以降低成本; 配置锂电池储能系统的容量虽然显著大于飞轮储能系统, 但其综合成本更低。

关键词: 新能源; 共享储能; 一次调频; 储能最优配置; 倍率特性; 混合整数线性规划

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)06-0050-08

0 引言

近年来, 新能源在电力系统中的渗透率快速提升^[1-5], 特别是以风电和光伏为代表的新能源发电装机容量迅速增加^[6], 使得电力系统的惯性也随之下降^[7-8], 这给电力系统的频率稳定控制带来了巨大挑战^[9-10]。根据电力行业标准 DL/T 1870—2018《电力系统网源协调技术规范》, 要求新能源场站并网运行时一次调频功能始终投入且确保该功能正常运行。基于该规范, 各新能源场站可通过压出力的形式保留有功备用, 或通过加装储能的方式达到规范要求。

在储能未得到广泛应用的情况下, 为了能有效应对电网频率波动, 风电机组或者光伏系统按照减载的最优功率曲线运行, 在电网频率出现偏移时增加或者减少出力^[11], 虽然后续有研究基于自适应低频减载以及可变减载率的一次调频控制策略^[12-13], 但是弃风弃光问题依然比较严重。随着成本的下降和技术性能的提升^[14-16], 储能作为一种快速调频资源, 已经在参与调频服务中具备一定的可行性^[17-18], 而与之相关的储能优化配置问题也逐渐受到广泛关注^[19-21]。

现有关于新能源场站储能优化运行的文献中^[22], 大多考虑了新能源场站的出力, 如文献[23-24]研究风储联合参与一次调频问题, 均分析了新能源出力波动对储能运行情况的影响, 但在储能优

化配置方面却鲜有研究。另有研究在储能优化配置方面开展相应工作, 但未考虑新能源的出力。文献[25]以最小化电池储能倍率为目标函数, 建立储能优化配置模型, 但模型中未考虑储能成本和收益。文献[26]提出电池储能参与一次调频的充放电策略, 并构建储能电池参与一次调频的技术经济模型, 以调频效果和经济性两者综合最优为目标对储能容量进行优化配置, 模型最终采用遗传算法进行求解。文献[27]以风储系统参与调频的总成本最小为目标, 建立储能优化配置模型, 并采用粒子群算法进行求解。综上所述, 在现有新能源场站储能相关研究中, 有些未对储能进行优化配置, 有些未考虑新能源出力。另外, 文献中大多采用非线性模型, 须采用启发式算法进行求解, 难以获得全局最优解。

基于以上分析, 为了让新能源场站满足规范要求, 同时减少弃风弃光, 文中提出在新能源场站聚集地区部署大规模集中共享储能, 让储能代替一片区域的新能源场站承担一次调频义务, 同时兼顾潜在的峰谷套利效益。在此基础上, 提出面向新能源场站提供一次调频的共享储能容量优化配置方法。以最小化储能投资及运行成本为目标, 考虑新能源出力的不确定性和储能的倍率特性, 建立共享储能容量优化配置模型。基于以上模型选取锂电池储能和飞轮储能进行仿真, 对投资储能的成本、类型以及加装方式进行对比分析。对比已有研究, 文中所建模型为混合整数线性规划模型, 能够保证获得全局最优解。

收稿日期: 2022-05-03; 修回日期: 2022-08-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900500)

1 服务于多个新能源场站的共享储能系统

不同于一般的储能,共享储能布置在新能源场站聚集地区,而且其规模较大,同时承担片区多个新能源场站的一次调频任务。

共享储能系统示意如图1所示。共享储能系统由共享储能、共享储能控制系统以及共享储能信息采集系统3个部分组成。共享储能与电网可直接进行双向功率交换,其通过电网可间接与多个新能源场站相连。共享储能信息采集系统负责采集电网频率数据、获取各新能源场站的出力数据以及共享储能当前的荷电状态(state of charge, SOC),并在数据处理之后将其上传到共享储能控制系统。共享储能控制系统通过本地指令对共享储能的充放电功率进行控制。

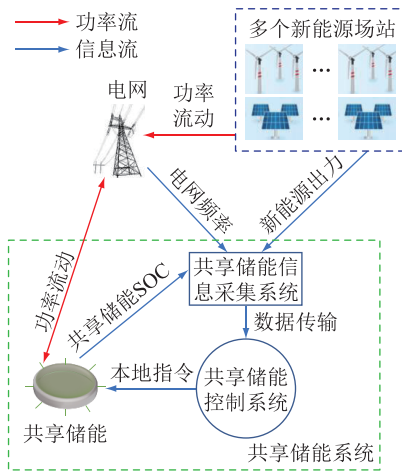


图1 共享储能系统示意

Fig.1 Schematic diagram of shared energy storage system

2 满足一次调频要求的储能优化配置模型

新能源场站通过向储能投资商购买调频服务可让共享储能代替其承担一次调频义务。当电网频率超出死区并且新能源出力超过其额定功率的一定百分比时,储能接收控制系统的指令进行充电,此时共享储能从电网吸收能量;当电网频率跌出死区并且新能源出力超过其额定功率的一定百分比时,储能接收控制系统的指令进行放电,此时共享储能向电网释放能量。当然,如果系统频率超出死区时间过长,储能会因为SOC限制导致调频失灵,比如频率长时间跌出死区导致储能持续放电之后SOC达到下限,不能再向电网释放能量。为了尽可能真实地描述电力系统频率波动情况,文中先对历史频率数据的经验分别进行拟合,该拟合模型可以较为准确地描述频率变化的规律,进而构建满足

一次调频要求的储能优化配置模型。

2.1 目标函数

考虑风电场 M 个、光伏电站 N 个;各新能源场站一次调频上调功率为其额定容量的一定百分比,该百分比用 ε_{up} 表示;各新能源场站一次调频下调功率为其额定容量的一定百分比,该百分比用 ε_{down} 表示。对于一次调频,主要目的是尽量满足一次调频要求,即储能在频率跌出死区时放电,频率超出死区时充电。在此基础上以最小化储能投资及运行成本为目标,建立共享储能容量优化配置模型。

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (1)$$

式中: C 为投建共享储能的年均总成本; C_1 为储能年均投资成本; C_2 为储能的年运行维护成本; C_3 为储能系统运行的能量平衡费用。

储能年均投资成本为:

$$C_1 = \frac{I(1+I)^T}{(1+I)^T - 1} (C_p \bar{P} + C_e \bar{E}) \quad (2)$$

$$\bar{P} = \sum_{m=1}^M P_m^{\text{windres}} + \sum_{n=1}^N P_n^{\text{solarres}} \quad (3)$$

$$P_m^{\text{windres}} = \max(S_m^w \varepsilon_{up}, S_m^w \varepsilon_{down}) \quad (4)$$

$$P_n^{\text{solarres}} = \max(S_n^s \varepsilon_{up}, S_n^s \varepsilon_{down}) \quad (5)$$

式中: I 为折现率; T 为储能使用寿命; C_p 、 C_e 分别为储能单位功率造价和单位容量造价; \bar{P} 、 \bar{E} 分别为储能额定功率和储能额定容量; P_m^{windres} 、 P_n^{solarres} 分别为风电场 m 和光伏电站 n 为满足一次调频义务而需要提供的最大一次调频容量; S_m^w 、 S_n^s 分别为风电场 m 和光伏电站 n 的额定容量。

储能项目建设完成且开始投入使用后,需要对储能系统进行定期维护,储能的年运行维护成本为:

$$C_2 = \theta (C_p \bar{P} + C_e \bar{E}) \quad (6)$$

式中: θ 为运行维护费用系数。

SOC过低或过高时无法提供向上、向下一次调频服务,为了维持储能SOC水平,保障储能使用寿命和参与调频时的可用率,需要进行主动的充放电功率优化。储能系统充放电会产生一定的能量损耗,因此可能需要向电网支付一定的电费。在采用分时电价的电网中,储能可以通过充放电功率的优化调度进行价格套利。储能为了平衡能量而向电网支付的费用为:

$$C_3 = \sum_{j=1}^J \left[W_j \sum_{i=1}^{n_d} (\pi_{i,j} P_{i,j}^{\text{inside}} \Delta t) \right] \quad (7)$$

式中: J 为典型日的种类数; n_d 为典型日的时间段数; W_j 为一年中第 j 种典型日对应的权重; $\pi_{i,j}$ 为第 j 种典型日第 i 时段的电价; $P_{i,j}^{\text{inside}}$ 为第 j 种典型日第

i 时段系统频率在死区以内时储能的充放电功率,取正表示充电,取负表示放电,取0表示储能既不充电也不放电; Δt 取值为1 min。

2.2 约束条件

(1) SOC 约束。在一个储能充放电周期内,储能各时刻的 SOC 应保持在一定的范围内。

$$s_{\min} \leq s_{i,j} \leq s_{\max} \quad (8)$$

式中: $s_{i,j}$ 为储能在第 j 种典型日第 i 时段的 SOC; s_{\min} , s_{\max} 分别为储能 SOC 的下限和上限。

(2) 储能一天的能量平衡约束。

$$s_{0,j} = s_{n_d,j} \quad (9)$$

式中: $s_{0,j}$, $s_{n_d,j}$ 分别为储能在第 j 种典型日初始时段和结束时段时的 SOC。

(3) 储能 SOC 的时段间耦合性约束。

$$s_{i+1,j} = s_{i,j} - \frac{[-P_{i,j}]^+}{\eta_d \bar{E}} \Delta t + \frac{\eta_c [P_{i,j}]^+}{\bar{E}} \Delta t \quad (10)$$

$$P_{i,j} = P_{i,j}^{\text{inside}} + P_{i,j}^{\text{outside}} \quad (11)$$

式中: η_c , η_d 分别为储能的充、放电效率; $P_{i,j}$ 为第 j 种典型日第 i 时段储能充放电功率,取正表示充电,取负表示放电; $P_{i,j}^{\text{outside}}$ 为第 j 种典型日第 i 时段系统频率在死区以外时储能的充放电功率,取正表示充电,取负表示放电; $[x]^+ = \max(x, 0)$ 。

(4) 一次调频约束。

$$P_{i,j}^{\text{outside}} = \sum_{m=1}^M (P_m^{\text{windres}} B_{i,j,m}^w B_{i,j,m}^{\text{wv}}) + \sum_{n=1}^N (P_n^{\text{solarres}} B_{i,j,n}^s B_{i,j,n}^{\text{sv}}) \quad (12)$$

$$B_{i,j,m}^w = \begin{cases} 1 & f_{i,j} > f_{\text{up}}; P_{i,j,m}^w \geq P_m^{\text{windres}} \\ -1 & f_{i,j} < f_{\text{down}}; P_{i,j,m}^w \geq P_m^{\text{windres}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$B_{i,j,n}^s = \begin{cases} 1 & f_{i,j} > f_{\text{up}}; P_{i,j,n}^s \geq P_n^{\text{solarres}} \\ -1 & f_{i,j} < f_{\text{down}}; P_{i,j,n}^s \geq P_n^{\text{solarres}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $B_{i,j,m}^{\text{wv}}$, $B_{i,j,n}^{\text{sv}}$ 均为0-1变量,取1表示储能还拥有调频空间,可以进行充放电调频; $f_{i,j}$ 为第 j 种典型日第 i 时段的系统频率; $P_{i,j,m}^w$, $P_{i,j,n}^s$ 分别为风电场 m 、光伏电站 n 在第 j 种典型日第 i 时段的发电功率; f_{up} , f_{down} 分别为调频死区的上、下限。为了让电网频率尽快回到死区以内,文中调频功率设定为 DL/T 1870—2018《电力系统网源协调技术规范》中的最大负荷限幅^[28]。

(5) 储能补电约束。在不需要进行调频时,储能适当地进行充放电,维持 SOC 在合理范围内。

$$P_{i,j}^{\text{inside}} = P_{i,j}^v B_{i,j}^{\text{in}} \quad (15)$$

$$B_{i,j}^{\text{in}} = \begin{cases} 1 & f_{\text{down}} < f_{i,j} < f_{\text{up}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{i,j}^v$ 为引入的实数辅助变量。

(6) 储能倍率特性约束。储能倍率是表征其充放电性能的重要参数,高倍率指储能能够快速改变充放电功率或者很好地跟踪频率变化。倍率越高表示在额定功率下储能可持续放电的时间越短。

$$C_{\min} \leq \frac{\bar{P}}{\bar{E}} \leq C_{\max} \quad (17)$$

式中: C_{\min} , C_{\max} 分别为储能的最小倍率和最大倍率,由拟投资的储能类型特性决定。

(7) 储能功率约束。

$$-\bar{P} \leq P_{i,j}^v \leq \bar{P} \quad (18)$$

$$-\bar{P} \leq P_{i,j}^{\text{outside}} \leq \bar{P} \quad (19)$$

$$-\bar{P} \leq P_{i,j} \leq \bar{P} \quad (20)$$

(8) 一次调频参与率约束。为了维持频率质量和电网稳定,储能应保证满足给定的一次调频可用率。

$$F_m^w = \sum_{j=1}^J W_j \sum_{i=1}^{n_d} B_{i,j,m}^{\text{wv}} \quad (21)$$

$$F_n^s = \sum_{j=1}^J W_j \sum_{i=1}^{n_d} B_{i,j,n}^{\text{sv}} \quad (22)$$

$$T_m^w = \sum_{j=1}^J W_j \| \mathbf{B}_{j,m}^w \|_0 \quad (23)$$

$$T_n^s = \sum_{j=1}^J W_j \| \mathbf{B}_{j,n}^s \|_0 \quad (24)$$

$$\frac{F_m^w}{T_m^w} \geq \alpha \quad (25)$$

$$\frac{F_n^s}{T_n^s} \geq \alpha \quad (26)$$

式中: T_m^w , T_n^s 分别为风电场 m 、光伏电站 n 共需要调频的次数; F_m^w , F_n^s 分别为储能替代风电场 m 、光伏电站 n 后实际参与调频的次数; $\mathbf{B}_{j,m}^w$, $\mathbf{B}_{j,n}^s$ 分别为由元素 $B_{i,j,m}^w$ 和 $B_{i,j,n}^s$ 组成的向量; $\| \cdot \|_0$ 为0范数; α 为一次调频参与率。

以上模型中,式(10)与式(17)虽然形式上为非线性约束,但可以转化为线性约束,因此所建模型为混合整数线性规划模型,可通过在 Matlab 中调用 Gurobi 软件包进行求解。

3 算例验证

3.1 算例参数设定

选取4个总容量为250 MW的风电场和4个总容量为100 MW的光伏电站,为该8个新能源场站

配置共享储能,让储能代替其承担一次调频任务。算例中,各新能源场站一次调频的上调功率和下调功率均为其额定容量的10%,共享储能提供一次调频的可用率设为95%,折现率为0.049,调频死区为 ± 0.033 Hz。此外,根据运行需求,在实际应用中共享储能提供一次调频的可用率也可设置为100%。针对锂电池和飞轮储能进行优化配置计算,储能系统参数设定如表1所示。各新能源场站的装机容量如表2所示,4个风电场和4个光伏电站在8个典型日中的总功率曲线分别如图2和图3所示。分时电价曲线如图4所示。按拟合的频率经验分布生成的日频率变化曲线如图5所示。

表1 锂电池与飞轮储能系统参数

Table 1 Parameters of lithium battery and flywheel energy storage systems

参数	锂电池储能	飞轮储能
年运行维护费用系数	0.03	0.02
容量价格/[元·(kW·h) ⁻¹]	1 650	8 000
功率价格/(元·kW ⁻¹)	300	3 000
SOC 初始值	0.50	0.50
SOC 最大值	0.95	0.95
SOC 最小值	0.15	0.05
储能最大倍率/h ⁻¹	2	60
储能最小倍率/h ⁻¹	0.2	15
充、放电效率	0.93	0.93
储能使用寿命/a	10	17

表2 新能源场站装机容量

Table 2 Installed capacities of renewable energy power stations MW

类型	编号	额定容量
风电场	1	50.0
	2	59.5
	3	69.0
	4	71.5
光伏电站	5	16.1
	6	22.3
	7	25.9
	8	35.7

根据以上数据,设置如下3个算例。算例1:各新能源场站不配置任何储能;算例2:各新能源场站独立配置锂电池储能或飞轮储能;算例3:8个新能源场站配置共享锂电池储能或共享飞轮储能。

3.2 算例结果及对比分析

3.2.1 算例1结果及分析

当各新能源场站不配置储能时,由于仍然需要进行一次调频,新能源场站只能按照压出力方式运

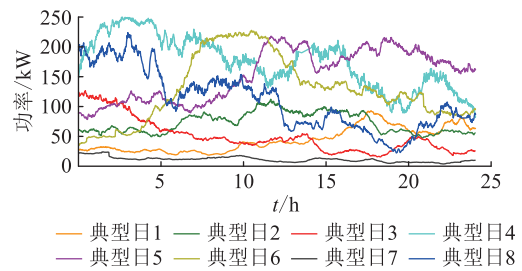


图2 风电场典型日出力

Fig.2 Typical daily outputs of wind farms

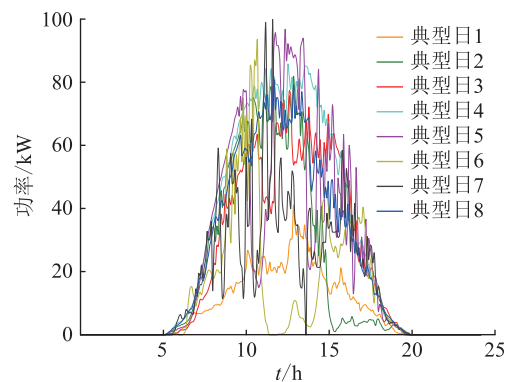


图3 光伏电站典型日出力

Fig.3 Typical daily outputs of photovoltaic power stations

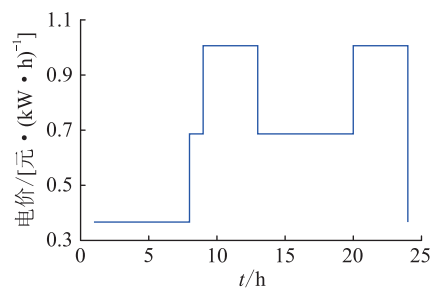


图4 分时电价

Fig.4 Time-of-use tariff

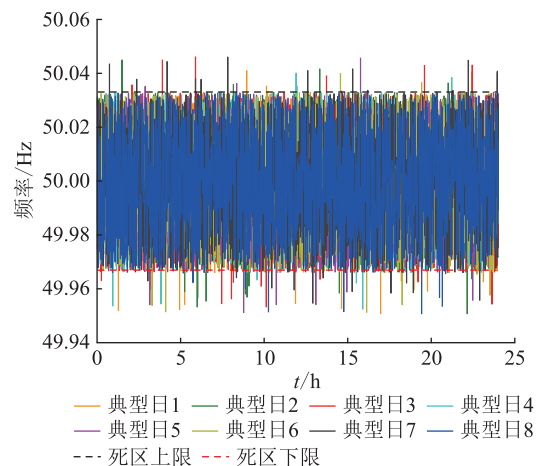


图5 日频率变化曲线

Fig.5 Daily frequency curves

行,这会导致严重的弃风弃光。按照文中设定的参数,新能源场站出力超过其自身额定功率的 10% 时,新能源场站需要压出力运行,放弃的功率为额定功率的 10%。各新能源场站按照压出力方式运行所造成的经济损失可认为是场站的一次调频成本,该成本计算方式为:

$$C_{\text{prime}} = \pi_{\text{online}} E_{\text{prime}} \quad (27)$$

式中: E_{prime} 为场站按压出力方式运行所浪费的电能; π_{online} 为新能源的上网电价,风电和光伏上网电价分别为 0.34 元/(kW·h) 和 0.45 元/(kW·h)。

经过计算,新能源场站弃风弃光率与一次调频成本见表 3。各新能源场站的弃风或弃光率均超过 16%。各新能源场站的一次调频成本普遍较高,其中 4 号风电场一次调频成本高达 1 334.25 万元/a。

表 3 新能源场站弃风弃光率与一次调频成本

Table 3 Curtailment rates and primary frequency regulation costs of renewable energy power stations

类型	编号	弃风弃光率/%	一次调频成本/(万元·a ⁻¹)
风电场	1	17.32	897.26
	2	16.96	1 256.94
	3	19.80	989.25
	4	18.31	1 334.25
光伏电站	5	16.21	257.95
	6	17.14	330.65
	7	16.93	359.29
	8	16.33	498.82

3.2.2 算例 2 结果及分析

当各新能源场站独立配置储能时,需要为独立储能支付的成本包括储能投资成本、储能运行维护成本以及储能能量平衡费用。各场站需要独立配置锂电池储能或飞轮储能的成本见表 4。由表 4 可知,8 个新能源场站独立配置锂电池储能的总成本为 477.48 万元/a,独立配置飞轮储能的总成本为 1 395.69 万元/a,即独立配置锂电池储能成本更低。而且光伏电站独立配置储能的成本比风电场低,这是因为光伏电站的额定容量较小。

3.2.3 算例 3 结果及分析

当各新能源场站选择配置共享储能时,共享锂电池储能或共享飞轮储能的优化配置结果如表 5 所示。由表 5 可知,各新能源场站配置共享锂电池储能的总成本为 412.86 万元/a,配置共享飞轮储能的总成本为 1 391.00 万元/a。

从运行角度来看,2 种储能某一典型日的 SOC 和充放电曲线见图 6。由图 6 可知,锂电池储能一天的循环次数远小于飞轮储能,这是因为飞轮储能

表 4 各新能源场站独立配置锂电池储能或飞轮储能的成本

Table 4 Cost of each renewable energy power station while installing lithium battery and flywheel energy storage independently

类型	编号	锂电池储能配置成本/(万元·a ⁻¹)	飞轮储能配置成本/(万元·a ⁻¹)
风电场	1	68.25	203.03
	2	81.21	241.60
	3	94.67	280.19
	4	97.68	290.37
光伏电站	5	25.24	63.37
	6	30.28	84.29
	7	34.29	97.90
	8	45.86	134.94

表 5 共享锂电池储能或飞轮储能优化配置结果

Table 5 Optimal configuration results while installing shared lithium battery or flywheel energy storage independently

参数	锂电池储能	飞轮储能
额定功率/MW	35	35
额定容量/(MW·h)	105.73	0.70
等年值初始投资成本/(万元·a ⁻¹)	2 383.60	973.40
年运行维护成本/(万元·a ⁻¹)	554.86	221.20
能量平衡费用/(万元·a ⁻¹)	-2 525.60	196.40

的倍率较高,其持续充、放电时间有限。从锂电池储能充放电功率曲线来看,锂电池储能基本在低价时充电(曲线为正)而在高电价时放电(曲线为负),即锂电池储能在进行套利。

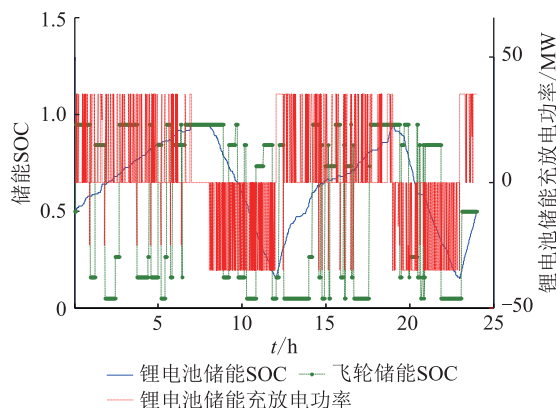


图 6 共享锂电池储能和飞轮储能的 SOC 和充放电曲线

Fig.6 Curves of SOC and charge-discharge for shared lithium battery and flywheel energy storage

3.2.4 算例对比分析

首先需要说明,无论各新能源场站独立配置储能还是配置共享储能,新能源场站都不必压出力运行,则相应的弃风弃光率基本为 0。结合表 3—表 5 可知,新能源场站选择配置储能的成本远远低于不

配置储能时的一次调频成本。

其次,对比表4和表5可知,相比各新能源场站独立配置储能,配置共享储能的总成本更低,且共享锂电池储能的总成本低于共享飞轮储能的总成本。这一方面是因为飞轮储能的功率单价和容量单价较高;另一方面是因为飞轮储能的电量少,难以通过低储高放的模式进行价格套利,这一点可以从储能的能量平衡费用得到验证。

实际上,当加装储能电站时,无论新能源场站选择各自独立加装储能还是选择加装共享储能,都不仅需要考虑配置成本,还需要考虑储能电站基础设施建设成本以及人工成本。而根据已有文献,后两者成本的总和占储能投资成本的30%~50%^[29],由于规模效应,建设共享储能可以大幅削减该部分成本。

4 结论

DL/T 1870—2018《电力系统网源协调技术规范》要求新能源场站并网运行时一次调频功能始终投入且确保正常运行,文中基于共享储能的理念即在新能源场站聚集地区配置大规模集中储能,让储能系统承担多个新能源场站的一次调频义务。考虑电网频率的变化特性和储能提供一次调频的功率、能量和可用率等约束,建立共享储能优化配置问题的混合整数线性规划模型。基于电网实际历史频率数据,对所建配置模型进行仿真测试,并选取锂电池和飞轮储能系统进行对比分析,结论为:

(1) 相比各自独立加装储能,采用多个新能源场站加装共享储能模式可以降低成本;

(2) 基于文中所选参数,配置锂电池储能系统的容量虽然显著大于飞轮储能,但其综合成本更低。

后续将研究考虑储能寿命折损和共享储能提供其他类型辅助服务对储能配置的影响。

参考文献:

- [1] LIU F L, WANG F, YAN J M, et al. Estimating maximum penetration level of renewable energy based on frequency stability constrains in power grid [C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chengdu, China. IEEE, 2020: 607-611.
- [2] 魏博, 王定美, 葛晓琳, 等. 考虑连续调度周期调峰约束的风光水火多能源短期优化调度[J]. 供用电, 2022, 39(6): 69-75.
WEI Bo, WANG Dingmei, GE Xiaolin, et al. Short-term optimal scheduling of multi-energy considering continuous dispatching cycle peak-shifting constraints [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(6): 69-75.
- [3] 张元星, 刁晓虹, 李涛永, 等. 区块链在绿色能源证书交易方面的应用与实践[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(6): 75-81.
ZHANG Yuanxing, DIAO Xiaohong, LI Taoyong, et al. Application and practice of blockchain in green energy certificate trading [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(6): 75-81.
- [4] WANG S Y, ZHANG Y P, ZHANG C, et al. Improved artificial neural network method for predicting photovoltaic output performance [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 553-561.
- [5] 郁丹, 郭雨涵, 唐人. 基于场景聚类的分布鲁棒区域新能源容量规划策略[J]. 供用电, 2022, 39(2): 86-92.
YU Dan, GUO Yuhan, TANG Ren. Distributed robust regional new energy capacity planning strategy based on scenario clustering [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 86-92.
- [6] XU X F, WEI Z F, JI Q, et al. Global renewable energy development: influencing factors, trend predictions and countermeasures [J]. Resources Policy, 2019, 63: 101470.
- [7] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, VIGUERAS-RODRÍGUEZ A, MOLINA-GARCÍA Á. Analysis of power system inertia estimation in high wind power plant integration scenarios [J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(15): 2807-2816.
- [8] REZKALLA M, PERTL M, MARINELLI M. Electric power system inertia: requirements, challenges and solutions [J]. Electrical Engineering, 2018, 100(4): 2677-2693.
- [9] SOFIA GUZMAN E N, ARRIAGA M, CAÑIZARES C A, et al. Regulation signal design and fast frequency control with energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 224-236.
- [10] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109369.
- [11] DE ALMEIDA R G, PECAS LOPES J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 944-950.
- [12] 李世春, 吕翔生, 钟浩, 等. 大规模双馈风电机组参与调频的电网自适应低频减载策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 109-115.
LI Shichun, LYU Xiangsheng, ZHONG Hao, et al. Adaptive under-frequency load shedding strategy of power grid with large-scale DFIG wind turbines participating in frequency regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 109-115.
- [13] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1013-1024.
ZHONG Cheng, ZHOU Shunkang, YAN Gangui, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1013-

- 1024.
- [14] SCHMIDT O, HAWKES A, GAMBHIR A, et al. The future cost of electrical energy storage based on experience rates[J]. Nature Energy, 2017, 2: 17110.
- [15] MOSTAFA M H, ABDEL ALEEM S H E, ALI S G, et al. Techno-economic assessment of energy storage systems using annualized life cycle cost of storage (LCCOS) and levelized cost of energy (LCOE) metrics[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101345.
- [16] ELIO J, PHELAN P, VILLALOBOS R, et al. A review of energy storage technologies for demand-side management in industrial facilities[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 307: 127322.
- [17] STROE D I, KNAP V, SWIERCZYNSKI M, et al. Operation of a grid-connected lithium-ion battery energy storage system for primary frequency regulation; a battery lifetime perspective[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 430-438.
- [18] 李相俊, 赵珊珊, 惠东. 面向新型电力系统的大型储能电站关键技术发展趋势分析与展望[J]. 供用电, 2022, 39(7): 2-8, 24.
LI Xiangjun, ZHAO Shanshan, HUI Dong. Development trend analysis and prospect of key technologies of large energy storage station in new type power system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 2-8, 24.
- [19] 徐海华, 王旭东, 朱星阳, 等. 用户侧综合能源系统中能源储能优化配置模型研究[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(2): 13-20.
XU Haihua, WANG Xudong, ZHU Xingyang, et al. Research on the optimal configuration of energy storage in user side integrated energy system[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(2): 13-20.
- [20] ZHAO X Y, SHEN X W, GUO Q L, et al. A stochastic distribution system planning method considering regulation services and energy storage degradation[J]. Applied Energy, 2020, 277: 115520.
- [21] 吴玮坪, 胡泽春, 宋永华. 结合随机规划和序贯蒙特卡洛模拟的风电场储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1055-1062.
WU Weiping, HU Zechun, SONG Yonghua. Optimal sizing of energy storage system for wind farms combining stochastic programming and sequential Monte Carlo simulation[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1055-1062.
- [22] 耿健, 杨冬梅, 高正平, 等. 含储能的冷热电联供分布式综合能源微网优化运行[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 25-32.
GENG Jian, YANG Dongmei, GAO Zhengping, et al. Optimal operation of distributed integrated energy microgrid with CCHP considering energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 25-32.
- [23] 刘辉, 葛俊, 巩宇, 等. 风电场参与电网一次调频最优方案选择与风储协调控制策略研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 44-52.
LIU Hui, GE Jun, GONG Yu, et al. Optimization scheme selection of wind farm participation in grid primary frequency modulation and study of wind-storage coordination control strategy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 44-52.
- [24] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平. 风储联合调频下的电力系统频率特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2209-2216.
MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Analysis of frequency characteristics of power system based on wind farm-energy storage combined frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2209-2216.
- [25] 黎淑娟, 李欣然, 黄际元, 等. 考虑倍率特性的调频用储能电池优化配置[J]. 太阳能学报, 2020, 41(3): 127-132.
LI Shujuan, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Optimal configuration of frequency regulation battery energy storage considering rate characteristics[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(3): 127-132.
- [26] 黄际元, 李欣然, 常敏, 等. 考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 112-121.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 112-121.
- [27] 沃克. 风-储调频系统的控制与容量配置策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
WO Ke. Research on operation control and capacity configuration strategy of wind-energy storage frequency regulation system[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
- [28] 国家能源局. 电力系统网源协调技术规范: DL/T 1870—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
National Energy Administration. Technical specification for power grid and source coordination: DL/T 1870-2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [29] 杨海波. 智能配电网储能系统的技术经济综合评价方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
YANG Haibo. Research on comprehensive evaluation method of energy storage system for smart distribution grid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

作者简介:



何锦华

何锦华(1996),男,博士在读,研究方向为储能系统规划(E-mail: hjh21@mails.tsinghua.edu.cn);

吴斌(1977),男,硕士,高级工程师,从事电网规划和电力市场工作;

曹敏健(1989),男,博士,研究方向为储能系统规划与运行。

Capacity optimization configuration of shared energy storage in renewable energy stations for ancillary service

HE Jinhua¹, WU Bin², CAO Minjian¹, HU Zechun¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Grid Shijiazhuang Power Supply Company of Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: With the rapid development of renewable energy, the role of energy storage has become increasingly prominent. In terms of sizing problems of shared energy storage to provide primary frequency regulation for multiple renewable energy stations, an optimal energy storage configuration method is proposed aiming to minimize the total cost of shared energy storage investors. Firstly, the empirical distribution of historical frequency data is fitted, and the result is used to generate frequency data to further configure the energy storage. Then, based on the frequency data, an optimal configuration model of energy storage is developed which meets the requirements of primary frequency regulation. The primary frequency regulation constraints, energy storage rate characteristics constraints, and primary frequency regulation participation rate constraints and so on are considered in the optimal configuration model. The model is a mixed-integer linear programming model which can be solved by mature solvers. Finally, the proposed method is simulated and analyzed according to the actual frequency data, and the configuration results of the lithium-ion battery and flywheel are compared. The results show that the total cost can be reduced by installing shared energy storage compared with independent energy storage. Although the capacity of the lithium-ion battery energy storage systems is significantly greater than that of flywheel energy storage systems, the total cost of lithium-ion battery energy storage systems is lower.

Keywords: renewable energy; shared energy storage; primary frequency regulation; optimal configuration of storage; rate characteristics; mixed-integer linear programming

(编辑 吴楠)

(上接第 20 页)

A strategy for smart building-based virtual power plants participating in frequency regulation auxiliary service

ZHAN Gui¹, YIN Shuangrui¹, AI Qian¹, CHEN Yun², WANG Jiayu², CUI Yong³

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,

Shanghai 200240; 2. State Grid Pudong Power Supply Company, SMEPC, Shanghai 200120, China;

3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: With the support of advanced measurement technologies and regulation terminals, demand-side flexible resources such as electric vehicles and air-conditioning loads in smart buildings have good power response potential in real time and can be aggregated to form virtual power plants to participate in frequency regulation auxiliary service of the system. To protect the needs of users when virtual power plants participate in frequency regulation auxiliary services, a control strategy for smart building-based virtual power plants is proposed in this paper. Firstly, the frequency regulation operation mode of the virtual power plant is analyzed, and a typical demand-side resource model and virtual energy storage model of the smart building-based virtual power plants are established. Secondly, considering the uncertainty of frequency regulation signal and user side, a day-ahead optimal scheduling model based on opportunity constrained planning is established. Then the real-time power allocation is realized based on the principle of cost optimization. Finally, the effectiveness and feasibility of the frequency regulation strategy of the virtual power plants proposed in this paper are verified by simulation calculations, and the joint scheduling of demand-side resources can improve the revenue of the virtual power plants while safeguarding the needs of users.

Keywords: virtual power plant (VPP); frequency regulation auxiliary service; smart building; electric vehicle; air-conditioning load; demand-side resource

(编辑 陆海霞)