

考虑光储联合系统参与频率响应的储能容量 优化配置方法

金楚^{1,2}, 周博¹, 艾小猛¹, 文劲宇¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院),
湖北省 武汉市 430074; 2. 广东电网发展研究院有限责任公司, 广东省 广州市 510030)

Optimal Configuration of Energy Storage Capacity With PV-Storage System Participating in Frequency Regulation Service

JIN Chu^{1,2}, ZHOU Bo¹, AI Xiao-meng¹, WEN Jin-yu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, Hubei Province, China;

2. Guangdong Power Grid Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510030, Guangdong Province, China)

Abstract: As the energy crisis and environmental problems becoming more and more serious, photovoltaic generation is drawing universal attention as a sustainable and clean energy source and the application of energy storage system (ESS) is increasingly widespread. However, the promotion of ESS is still faced with many challenges which involve the high cost and the difficulty of profit evaluation. Based on this, the influences and economy of the application of ESS in PV integrated system are studied in this paper. Moreover, the profits of different types of ES are evaluated and the potential possibility of PV-ES system taking part in power market ancillary service is discussed. An optimal configuration method of ESS capacity is proposed considering the benefit from system frequency response service. Simulation results indicate that the application of ESS in the PV power station and the participation of frequency response regulation will increase the total revenue of PV stations. And it is found that the weather patterns and the prices of ancillary service are the sensitive factors which will affect the configuration results of ESS.

Keywords: PV-storage combined system; frequency regulation; ancillary service; optimal configuration of energy storage system

摘要: 随着能源危机和环境污染问题的加剧, 光伏发电作为可持续的清洁能源受到越来越多的关注, 储能在含光伏电力系统中的应用也日益广泛。然而, 储能的大规模应用却面临成本高难以推广、收益衡量困难等瓶颈。基于此, 考虑光伏-储能联合系统参与系统频率响应后的经济效益, 研究光伏电站配置储能的经济性。对储能系统的潜在收益和其应

用于电力市场辅助服务的可能性进行讨论, 提出一种储能容量优化配置的方法。结果表明, 配置储能并参与系统频率响应调整辅助服务能调高光伏电站的总收益。另外, 对储能容量优化配置过程中敏感因素的影响进行了分析, 发现天气类型、调频辅助服务电价等均会导致配置结果的差异。

关键词: 光储联合系统; 频率调节; 辅助服务; 储能容量优化配置

0 引言

构建全球能源互联网, 大力发展风能、太阳能和水能等可再生能源, 是实现以清洁和绿色方式满足全球电力需求的重要途径^[1]。储能作为构建全球能源互联网的关键装备, 近年来在国家的大力支持下, 其技术有着显著进步, 同时成本也在快速下降^[2-5]。然而, 目前我国储能产业还处于初级阶段, 仍以示范应用为主, 商业化应用依然面临成本偏高等问题^[6-7]。因此, 针对不同的应用需求, 在满足技术性能要求的前提下, 优化配置储能容量是实现能源经济互联的重要问题。

储能容量优化配置一般是在综合考虑储能技术本身、设备响应特性、安装费用等多种因素前提下, 以提高系统运行可靠性、安全性以及经济性为目的, 寻求最优容量配置方案。储能设备容量配置过大, 会导致部分储能容量闲置, 降低系统运行的经济性; 储能

设备容量配置过小,则难以满足系统运行可靠性或安全性需求。因此,储能装置的容量配置一般需满足两个要求:一是储能装置的容量保证完成自身承担的任务,满足电网运行需求;二是储能装置容量的选择应满足电网的经济性需要,确保以最小的成本实现电力系统的优化运行。

目前储能优化配置研究多针对于风力发电,文献[8]基于风电场历史出力数据,提出了一种平滑风电出力波动的储能容量计算方法;文献[9]在不同风电场和储能系统的容量配比关系下进行仿真,提出了一种配置大规模储能系统的优化配置方案;文献[10]提出了一种基于频谱分析的风电场储能系统容量优化方法,可采取不同的控制机制以补偿功率偏差,大幅减小系统备用需求;文献[11]考虑到系统网架约束的影响,提出了多风电场的储能鲁棒优化配置方法;文献[12]从风电运行可行域的角度出发,提出了匹配风电运行可行域及考虑寿命减损影响的储能容量配置方法,可显著提高储能系统的利用率及经济效益;文献[13]对储能容量配置的敏感因素(如数据样本、储能类型和储能工作方式)进行了详细分析;文献[14]-[15]提出了储能参与系统一次调频的容量优化配置方法;文献[16]根据当地电网导则要求,提出一种频率支援过程中的储能经济配置方法。针对光伏发电的储能配置,目前则多集中在微电网或屋顶光伏,如文献[17]考虑了工业重要负荷的运行特性,结合工业分时电价机制,构建了工业光伏微电网的储能容量优化配置,可在离网情况下保证系统中重要负荷稳定运行;文献[18]进一步考虑了需求响应对光伏微网运行的影响,提出了储能系统多目标容量优化配置模型;文献[19]在分时电价机制下,讨论了屋顶光伏储能配置方法。

从上述研究可以发现,在光伏发电的储能配置中,目前少有讨论储能装置参与系统频率调节,实际上发电机组尤其是燃煤发电机组在调频时由于受爬坡率限制,反应较慢且成本较高,储能可以在1 min甚至更短的时间内响应系统需求,在调频辅助服务中发挥作用。因此,本文重点关注光伏-储能联合系统(以下简称光储联合系统)在调频市场辅助服务中的应用,研究应用于光伏电站的储能系统容量需求配置方法,对储能经济性进行评估,考虑光储联合系统参与系统频率响应辅助服务,以光伏电站总收益为经济性衡量指标,建立考虑经济性的储能容量优化配置模型,研究不同类型的储能、频率调节补贴等与光伏电站效益的关系。

1 光储联合系统简介及潜在收益分析

本文研究对象为如图1所示的光储联合系统,储能系统位于光伏电站内,联合光伏电站一起优化运行,改善光伏电站的并网特性,提高光伏电站的整体收益。目前,市场机制尚不健全、储能应用收益衡量也较为困难。

美国国家可再生能源实验室(NREL)在报告《储能在电网中应用的价值》^[20]中提出了如何计算为电网提供服务的储能系统的价值,以及目前的市场如何调整以支持储能项目的开展。NREL采用基于系统成本的算法和基于市场价格的算法两种方法对储能价值进行评估。具体来说前者是模拟含储能的电网在一定时间内的运行状态,计算其运行成本,后者是基于现有的市场机制,计算储能可获得的收益。

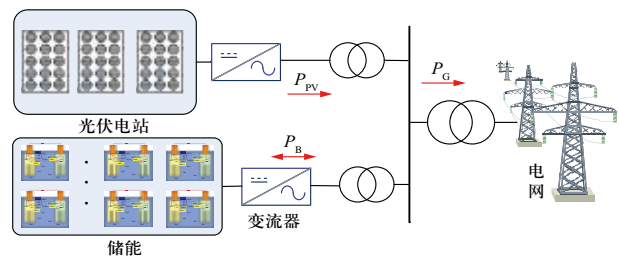


图1 光储联合系统结构示意图

Fig. 1 Structure of PV-storage combined system

储能的潜在收益是指在目前的电力市场条件下没有直接回报或市场机制不支持的间接收益,不便于量化分析。研究表明,现在储能的收益主要包括发电容量、削峰填谷、调频、负荷跟踪、备用、无功支持等,这说明储能技术在电网和新能源发电中,除了高发低储套利外,还可以在辅助服务市场中发挥重要价值^[21-23]。

2 考虑光储联合系统参与频率响应的储能容量优化配置模型

在储能应用规划和效益评估研究中,大多采用数学建模的方式。由于模型考虑的目标函数、约束条件、时段数等方面差异性,问题有单目标/多目标、线性/非线性、离散/连续之分,对应的求解方法也各不相同。数学优化方法是应用最普遍的方法,理论上解的最优性可以得到保证,但一般对目标函数和约束条件的表达式要求比较严格。本文基于问题描述和模型

考虑, 采用数学优化算法求解。

从光伏电站的角度考虑储能及光伏同时参与系统频率调节, 提供辅助服务。根据实时电价, 计及运行成本, 建立考虑经济性的储能容量优化配置模型, 确定光伏电站所需储能功率容量和能量容量, 合理安排调频容量和充放电策略, 从而最大化光储联合系统的收益。不考虑与系统频率之间的动态交互影响, 系统频率作为模型的已知量输入, 使得最终模型可用线性优化方法求解。

2.1 目标函数

模型目标是在储能使用年限内最大化光伏电站年平均收益 J , 其是储能系统成本、光储联合系统在电量市场的售电收入及提供调频辅助服务所得收益的函数。

储能系统成本主要考虑了初始安装成本及运行时的老化折旧费用。初始安装成本 C_0 由容量成本和功率成本组成, 如式(1)所示。

$$C_0 = \lambda_p \cdot P_{\text{batt}} + \lambda_E \cdot E_{\text{batt}} \quad (1)$$

其中, P_{batt} 和 E_{batt} 分别为储能系统的功率容量和能量容量, λ_p 和 λ_E 分别为储能装置的功率成本和容量成本。

储能电池每一次充放都将带来电池的老化, 该项费用由运行成本 $C_{\text{op},t}$ 表示, 如式(2)所示。

$$C_{\text{op},t} = (E_{\text{bfr},t}^- + E_{\text{bfr},t}^+ + E_{\text{bloss},t} + \varepsilon_{\text{ic},t}) \cdot \lambda_{\text{op}} \quad (2)$$

其中 $E_{\text{bfr},t}^-$ 表示储能系统第 t 时段的上调频电量, 即 t 时段由于低频响应增加的电量, $E_{\text{bfr},t}^+$ 表示储能系统第 t 时段的下调频电量, 即由于高频响应减少的电量, $E_{\text{bloss},t}$ 为 t 时间段内储能损电量, $\varepsilon_{\text{ic},t}$ 表示储能损失的补偿电量, λ_{op} 为体现老化折旧的运行成本。

在电力市场中, 电量市场和辅助服务市场一般是分开的, 因此计算时两部分电量分开计费, 均作为光储联合系统在市场中的收入。光伏电站第 t 时段在电力市场中售电获得的收益 $R_{\text{m},t}$ 可表示为:

$$R_{\text{m},t} = \lambda_{\text{m},t} \Theta_t \quad (3)$$

而光储联合系统由于提供辅助服务参与系统调频的收入 $R_{\text{fr},t}$ 可表示为:

$$R_{\text{fr},t} = \lambda_{\text{fr},t} \varepsilon_{\text{fr},t} \quad (4)$$

其中, $\varepsilon_{\text{fr},t}$ 为光储联合系统参与频率响应的调频电量, $\lambda_{\text{fr},t}$ 为调频市场中发电方参与频率响应的补贴价格。

定义 $\varepsilon_{\text{fr},t}^+$ 和 $\varepsilon_{\text{fr},t}^-$ 分别为光储联合系统参与高频响应和低频响应的调频电量, 均为非负值, 那么, 式(4)可进一步表示为:

$$R_{\text{fr},t} = \lambda_{\text{fr},t} [u_t \varepsilon_{\text{fr},t}^+ + (1 - u_t) \varepsilon_{\text{fr},t}^-] \quad (5)$$

其中 u_t 为频率响应方向标记, 高频响应时 $u_t = 1$, 低频响应时 $u_t = 0$ 。至此, 目标函数可以用式(6)描述。

$$J = -C_0 \cdot CRF + \frac{365}{D} \sum_{t=t_0}^{N_s} [R_{\text{m},t} + R_{\text{fr},t} - C_{\text{op},t}] \quad (6)$$

$$CRF(r, Y) = \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (7)$$

式(7)表示在储能寿命内光储联合系统总收益。其中 CRF 为等年值系数, r 为贴现率, Y 为储能期望寿命, D 为采样数据天数, N_s 为数据时间段总数。 J 能在一定程度上反映光储联合系统经济性, 体现储能能在光伏电站并网中的应用。通过数学优化的方法最大化目标函数 J 的值, 计算出此时储能额定功率和额定容量, 为光伏电站储能配置提供参考。

2.2 约束条件

(1) 参与调频电量平衡约束。

光储联合系统参与高频响应和低频响应的调频电量 $\varepsilon_{\text{fr},t}^+$ 和 $\varepsilon_{\text{fr},t}^-$ 由光伏电站和储能系统共同提供, 其表达式如式(8)和式(9)所示。

$$\varepsilon_{\text{fr},t}^+ = PV_{\text{fr},t}^+ + E_{\text{bfr},t}^+ / \eta^+ \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{fr},t}^- = PV_{\text{fr},t}^- + E_{\text{bfr},t}^- \cdot \eta^- \quad (9)$$

其中, $PV_{\text{fr},t}^+$ 和 $PV_{\text{fr},t}^-$ 分别为光伏电站在系统频率升高时减少的发电量和系统频率降低时增加的发电量, η^+ 和 η^- 分别是储能电池的放电效率和充电效率。

(2) 调频电量全响应约束。

由于频率响应属于系统强制性辅助服务, 本文认为必须满足根据并网导则要求计算出的调频容量^[23], 即:

$$\varepsilon_{\text{fr},t} - E_{\text{req},t} = 0 \quad (10)$$

其中, $E_{\text{req},t}$ 为根据并网导则计算得出的 t 时段需要提供的调频容量, 与当前出力占光伏电站装机的百分比有关。

(3) 光伏电站售电量约束。

$$\Theta_t = PV_{\text{gen},t} - \varepsilon_{\text{ic},t} / \eta^+ \quad (11)$$

式中, $PV_{\text{gen},t}$ 为光伏电站第 t 时段的发电量。

(4) 光伏电站发电量约束。

$$PV_{\text{gen},t} = E_{\text{pvmax},t} - PV_{\text{res},t} - PV_{\text{fr},t}^- + PV_{\text{fr},t}^+ \quad (12)$$

其中, $PV_{\text{res},t}$ 为 t 时段光伏电站可以提供的备用容量, $E_{\text{pvmax},t}$ 为 t 时段光伏最大发电量, 由光照条件决定。该约束体现了在电力市场中, 常规市场售电量与参与辅助服务的调频电量分开计算这一特点。

(5) 备用容量约束。

$$E_{bcu,t} + PV_{res,t} + PV_{fr,t}^+ - PV_{fr,t}^- \geq E_{req,t}^{\max} \quad (13)$$

$$PV_{res,t} \leq 0.2E_{pvmax,t} \quad (14)$$

其中, $E_{req,t}^{\max}$ 为并网导则规定的最恶劣情况(频率偏移 -0.5 Hz)下所需的调频容量,也可由光伏电站与电网商议确定并签订合同。备用容量约束保证光伏备用及光储调频总容量足以应对最大频率偏差的情况。 $E_{bcu,t}$ 为 t 时段储能可用容量,满足以下两条约束:

$$E_{bcu,t} \leq P_{batt} \cdot T_s / 60 \quad (15)$$

$$E_{bcu,t} \cdot T_{sus} / T_s \leq E_{bc,t} \quad (16)$$

式中 T_s 为采样数据时间间隔, $E_{bc,t}$ 为 t 时段储能容量, T_{sus} 为频率响应持续的时间,式保证 t 时段内储能容量变化不超过最大功率限制的能量变化,式则保证系统能满足持续响应频率变化的要求。

储能系统需满足的其他约束如式(17)~式(23)所示。

(6) 储能系统电量平衡约束。

$$E_{bc,t} - E_{bc,t-1} = \varepsilon_{lc,t} + E_{bfr,t}^+ - E_{bfr,t}^- - E_{bloss,t} \quad (17)$$

(7) 储能能量上下限约束。

$$E_{bc,t} \leq SOC_{\max} \cdot E_{batt} \quad (18)$$

$$E_{bc,t} \geq SOC_{\min} \cdot E_{batt} \quad (19)$$

(8) 储能系统充放电功率限制。

$$(\varepsilon_{lc,t} + E_{bfr,t}^+) \cdot 60 / T_s \leq P_{batt} \quad (20)$$

$$(E_{bloss,t} + E_{bfr,t}^-) \cdot 60 / T_s \leq P_{batt} \quad (21)$$

(9) 储能系统损耗约束。

$$E_{bloss,t} = E_{bc,t} \cdot \gamma \quad (22)$$

$$\varepsilon_{lc,t} \leq 1.2E_{bloss,t} \quad (23)$$

其中, SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 分别为储能系统SOC上下限, γ 为考虑储能自放电后的能量损失比例。

需说明的是,该模型中 E_{batt} 、 P_{batt} 、 $E_{fr,t}^+$ 、 $E_{fr,t}^-$ 、 $PV_{fr,t}^+$ 、 $PV_{fr,t}^-$ 、 $PV_{res,t}$ 、 $\varepsilon_{lc,t}$ 等量均为非负值。由于所示的调频容量要求与当前实际出力所处区间有关,为解决此非线性关系,可引入多个0-1变量分段表示该约束条件,因篇幅所限,具体算法此处不再赘述。

3 算例分析

3.1 基础数据及参数

算例采用的光伏电站装机容量 P_{pvn} 为90 MW,模型中部分参数设置如表1所示。系统实时频率可由英国管理电力交易市场的Elxon公司网站^[25]获得。根据电网规定,系统频率发生偏移后,提供频率响应服务的时间必须持续30 min以上,因此 T_{sus} 取30 min。取当地

某天实时电价如图2所示^[26],调频电价由电网与发电方商议后签订合同定价,这里取实时电价的2倍。由于全响应约束的存在,发电商需按规定参与频率调节。

表1 算例参数设置

Table 1 Case parameters setting

参数	数值	参数	数值
数据时长 D (天)	5	数据总数 N_s	7200
时间间隔 T_s (min)	1	持续时间 T_{sus} (min)	30
储能寿命 Y (年)	15	自放电率 γ (%)	0.03
SOC_{\max}	1	SOC_{\min}	0.2
储能充电效率 η^+ (%)	80	储能放电效率 η^- (%)	80
容量成本 λ_E (元/MWh)	4805	功率成本 λ_P (元/MW)	19300
折旧成本 λ_{op} (元/MWh)	1.37	贴现率 r (%)	5

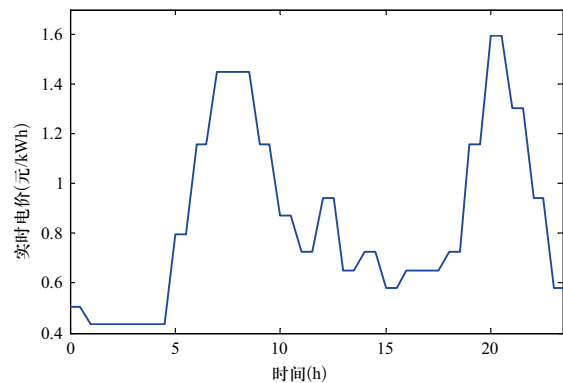


图2 某典型日实时电价曲线

Fig. 2 Real time electricity price of a typical day

根据美国电力研究协会(EPRI)报告,得到几种类型储能电池成本,这里列出技术相对成熟的铅酸电池、处于示范阶段的液流电池以及性能良好发展迅速的锂离子电池相关参数,如表2所示。

表2 储能电池成本及性能参数

Table 2 Cost and performance parameters of energy storage

储能电池类型	功率成本 (元/MW)	能量成本 (元/MWh)	寿命 (年)	效率 (%)
铅酸电池	19300	5035	5	80~85
锂电池	25740	9915	10	90
全钒液流电池	26125	5950	15	65~70

算例采用的系统频率曲线如图3所示,光伏出力为某光伏电站5天的历史数据,时间步长为1 min,如图4所示。

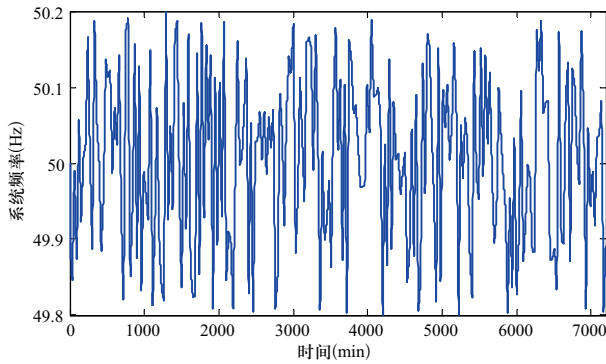


图3 系统频率曲线

Fig. 3 System frequency curve

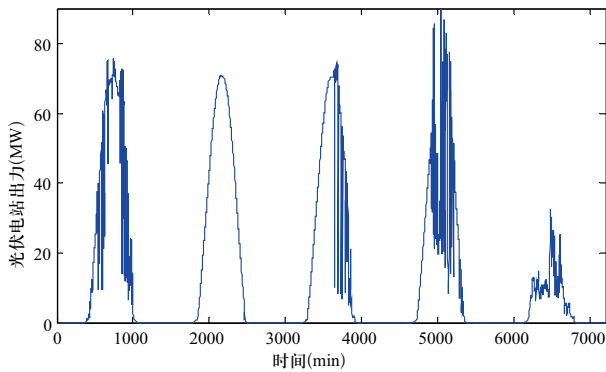


图4 光伏电站出力

Fig. 4 Photovoltaic power profile

3.2 优化结果

采用Matlab建模并调用CPLEX优化软件对模型进行求解，得到不同类型储能电池的容量优化配置结果如表3所示。

表3 不同类型储能电池容量优化配置结果

Table 3 Configuration results of different battery types

储能电池类型	功率容量 (MW)	能量容量 (MWh)	光储系统年收益 (元)
铅酸电池	12.72	5.19	9.3109×10^6
锂电池	11.31	4.62	8.7983×10^6
全钒液流电池	14.54	5.93	5.7439×10^6

根据计算结果可知，换算至储能寿命周期内每年的平均收益后，铅酸电池因成本低而收益最大，锂电池次之，全钒液流电池由于效率低且运行费用高而最不经济。对于装机90 MW的光伏电站来说，需要装设的储能容量（以铅酸电池为例）为12.72 MW/5.19 MWh，大约占光伏电站装机的14%。

现以铅酸电池为例，对比分析无储能时系统收益，结果如表4所示。

表4 有无储能优化结果对比

Table 4 Configuration results comparison with and without energy storage

优化变量	有储能	无储能
功率容量 (MW)	12.72	0
能量容量 (MWh)	5.19	0
光储系统年收益 (元)	9.3109×10^6	8.0432×10^6

由表4优化结果可得结论：在不装设储能时，根据式所示的约束条件，光伏电站需留有更高的备用容量以应对系统频率变化时所需要的频率调节容量，而装有储能的光伏发电系统能够留较少的备用容量，从而提高了系统收益。

现对含储能的算例进行分析。优化过程中，铅酸电池储能系统SOC变化及储能功率（1441~2880 min）如图5和图6所示，其中储能功率放电为正，充电为负；光伏电站最大功率、实际出力及发电功率如图7所示。其中实际出力包含用于频率调节的功率，发电功率为单纯用于向电网售电的功率。

由仿真结果可知，夜间光伏出力为零，不能提供上下调频容量，因此期间系统频率波动所需的频率响

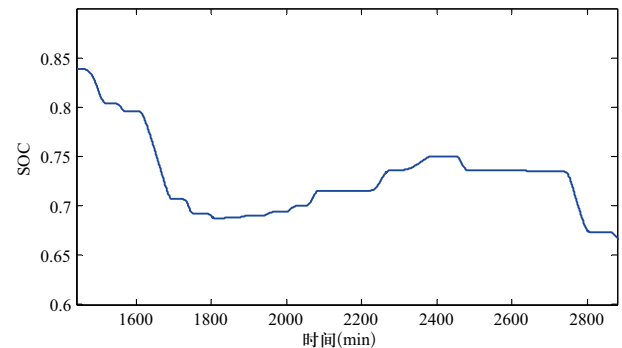


图5 储能电池SOC变化

Fig. 5 SOC of energy storage battery

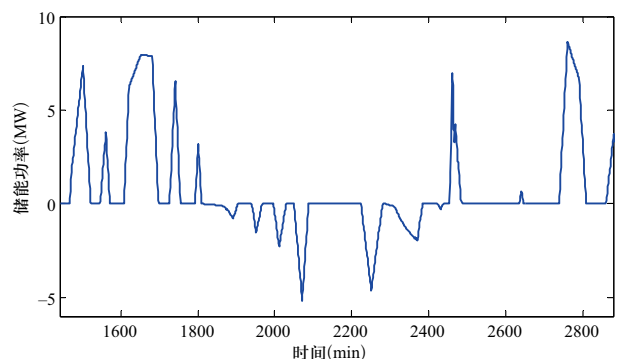


图6 储能充放电功率

Fig. 6 Power profile of energy storage

应容量均由储能承担。光伏电站实际出力是其向电网售电的发电功率与用于频率响应功率之和,根据该日午间频率低于设定值需要光伏电站增加出力,因此光伏实际出力一部分用于向上调频,向电网售电的发电功率减少。

从电量的角度看,系统低频响应要求、光储响应电量与系统高频响应要求、光储响应电量分别如图8和图9所示。

图8和图9中,黑线、红色虚线、蓝色虚线分别表示计算得出的频率响应需求、光伏电站频率响应电量、储能换算到电网侧的频率响应电量。根据的优化结果,夜间低频响应容量由储能提供,白天光伏电站由于留有备用容量用于频率响应,低频时增加出力,可以免储能电池SOC持续下降而影响后续的频率响应能力。因此可知,光伏电站高频响应始终为零,说明系统不倾向于使光伏电站降额运行以提供高频响应容量,而是采用向储能电池充电来降低光储联合系统出力,以尽量保证光伏售电量,从而充分地利用光伏发电能力和储能能量存储的功能。

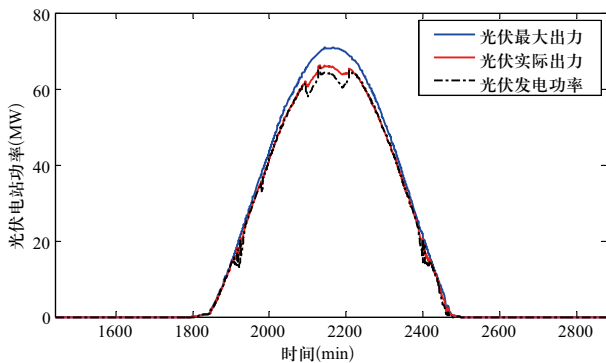


图7 光伏电站功率

Fig. 7 Power profile of PV station

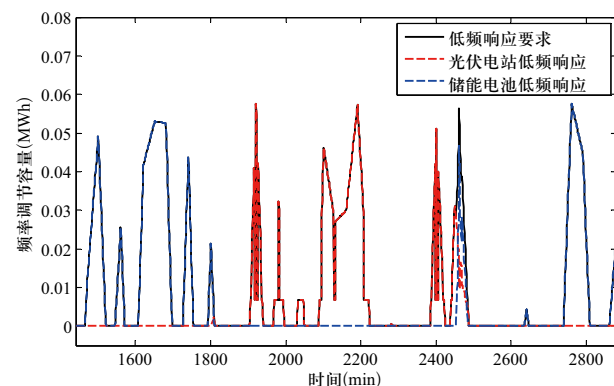


图8 系统低频响应要求及光伏、储能响应电量

Fig. 8 Low frequency response generation of system requirements, PV and energy storage

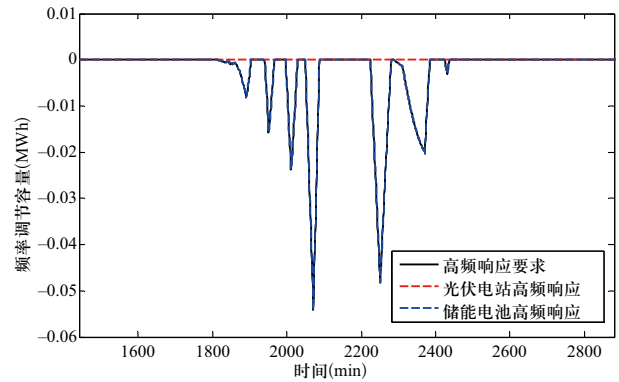


图9 系统高频响应要求及光伏、储能响应电量

Fig. 9 High frequency response generation of system requirements, PV and energy storage

3.3 影响因素及灵敏度分析

下面分析储能容量优化配置模型中参数设置对配置结果及总收益的影响,主要包括所采用的光伏电站原始数据天气状况、频率响应辅助服务电价等几个方面。

(1) 天气因素。

取不同天气状况的光伏出力原始数据进行优化配置分析,得到储能优化配置结果如表5所示。

表5 不同天气类型下电池容量优化配置结果

Table 5 Configuration results under different weather conditions

天气类型	功率容量 (MW)	能量容量 (MWh)	光储系统年收益 (元)
晴天	10.68	5.05	8.3903×10^7
阴天	12.72	6.19	5.5884×10^7
雨天	14.83	6.93	4.8869×10^6

由计算结果可知,天气状况不同会导致容量配置结果的差异。若原始数据为晴天,光伏电站出力较大且平滑,则储能配置需求最少;若均取自雨天,光伏出力很小且抖动剧烈,储能配置结果最大。根据不同原始数据计算出的光储系统年收益差别非常明显,因此,在选取光伏出力数据时应当综合考虑各种天气状况,才能使配置结果合理且经济。

(2) 频率响应辅助服务电价。

改变频率响应辅助服务电价 λ_{fr} ,这里分别取为实时电价 λ_m 的0.8倍、1.2倍、2倍,得到储能优化配置结果如表6所示。

由优化结果可以看出,随着频率响应辅助服务电价的升高,储能电池容量优化配置结果有增大的趋

势, 且光储系统年收益增加, 说明辅助服务价格越高, 配置储能的经济性越明显。从另一方面来说, 储能应用的推广依赖于电力市场机制的激励和辅助服务市场效益的增加。

表 6 不同频率响应辅助服务电价下电池容量优化配置结果
Table 6 Configuration results with different frequency response ancillary service price

λ_{fr}/λ_m	功率容量 (MW)	能量容量 (MWh)	光储系统年收益 (元)
0.8	10.83	4.20	7.6031×10^6
1.2	11.55	4.81	8.1759×10^6
2	12.72	5.19	9.3109×10^6

4 结论

目前储能成本较高, 但在电力市场机制健全后, 配置储能仍有望提高光伏电站整体经济效益。基于此, 本文讨论了储能系统的潜在收益和其应用于电力市场辅助服务的可能性, 考虑光储联合系统参与系统频率响应辅助服务, 提出一种储能容量优化配置的方法。结果表明, 配置储能并参与系统频率响应调整辅助服务能调高光伏电站的总收益。最后分析了储能容量优化配置模型中的敏感因素的影响, 发现天气类型、调频辅助服务电价等均会导致配置结果的差异, 其中调频电价升高会使得储能配置经济性更好, 能促进其在电力系统中的应用。

参考文献

- [1] 黄其励. 中国可再生能源发展对建设全球能源互联网的启示[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 1-9.
Huang Qili. Insights from China Renewable Energy Development for Global Energy Interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 1-9(in Chinese).
- [2] 文劲宇, 方家琨. 能源互联网中的关键设备与支撑技术[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 1-10.
Wen Jinyu, Fang Jiakun. Key Facilities and Supportive Technologies in Energy Internet[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 1-10(in Chinese).
- [3] 胡泽春, 丁华杰, 宋永华, 等. 能源互联网背景下储能应用的研究现状与展望[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 8-17.
Hu Zechun, Ding Huajie, Song Yonghua, et al. Research Status and Prospect of Energy Storage Application under Energy Internet Background[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 8-17(in Chinese).
- [4] 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 Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(2): 68-75(in Chinese).
- [5] 中关村储能产业技术联盟. 储能研究白皮书[R]. 2017. China Energy Storage Alliance. White paper on energy storage[R]. 2017(in Chinese).
- [6] 刘英军, 刘畅, 王伟, 等. 储能发展现状与趋势分析[J]. 中外能源, 2017, 22(4): 80-88.
Liu Yingjun, Liu Chang, Wang Wei, et al. Analysis of Development Status and Trend of Energy Storage Technology[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(4): 80-88(in Chinese).
- [7] 李琼慧, 王彩霞, 张静, 等. 适用于电网的先进大容量储能技术发展路线图[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 141-146.
Li Qionghui, Wang Caixia, Zhang Jing, et al. A roadmap for large scale energy storage for grid-level applications [J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(1): 141-146(in Chinese).
- [8] J V Paatero, P D Lund. Effect of energy storage on variations in wind power[J]. Wind Energy, 2005, 8(4): 424-441.
- [9] 梁亮, 李建林, 惠东. 大型风电场用储能装置容量的优化配置[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 930-936.
Liang Liang, Li Jianlin, Hui Dong. Optimization configuration for capacity of energy storage system in large-scale wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 930-936(in Chinese).
- [10] 李滨, 陈姝, 韦化. 风电场储能容量优化的频谱分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2128-2134.
Li Bin, Chen Shu, Wei Hua. Optimization of Energy Storage Capacity Based on Spectral Analysis for Wind Farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2128-2134(in Chinese).
- [11] 韩杏宁, 黎嘉明, 文劲宇, 等. 含多风电场的电力系统储能鲁棒优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2120-2127.
Han Xingning, Li Jiaming, Wen Jinyu, et al. Optimization for Robust Energy Storage Allocation in Power System With Multiple Wind Farms Integrated [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2120-2127(in Chinese).
- [12] 张钰, 肖白, 穆钢, 等. 基于风电可行域及寿命减损的储能配置方法[J]. 电力建设, 2018, 39(4): 60-66.
Zhang Yu, Xiao Bai, Mu Gang, et al. A Capacity Configuration Method for Energy Storage Based on Feasible Operation Region of Wind Power and Life Attenuation[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(4): 60-66(in Chinese).
- [13] 马会萌, 李蓓, 李建林, 等. 适用于集中式可再生能源的储容配置敏感因素分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 328-334.

- Ma Huimeng, Li Bei, Li Jianlin, et al. Analysis on factors sensitive to capacity configuration of battery energy storage system suitable for centralized renewable energy sources[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 328-334(in Chinese).
- [14] A Oudalov, D Chartouni, C Ohler. Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1259-1266.
- [15] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平. 储能参与风电一次调频的容量优化[J]. 电工电能新技术, 2016, 35 (4): 23-29.
Miao FuFeng, Tang XiSheng, Qi Zhiping. Capacity optimization of energy storage participating to wind plant primary frequency regulation [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35 (4): 23-29(in Chinese).
- [16] L Johnston, F Díaz-González, O Gomis-Bellmunt, et al. Methodology for the economic optimisation of energy storage systems for frequency support in wind power plants[J]. Applied Energy, 2015, 137: 660-669.
- [17] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (9): 29-37.
Xu Jian, Liu Nian, Yu Lei, et al. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (9): 29-37(in Chinese).
- [18] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40 (6): 1709-1716.
Zhou Nan, Fan Wei, Liu Nian, et al. Battery Storage Multi-Objective Optimization for Capacity Configuration of PV-Based Microgrid Considering Demand Response [J]. Power System Technology, 2016, 40 (6): 1709-1716(in Chinese).
- [19] 吴杰, 温晨阳, 李珊, 等. 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置[J]. 电工电能新技术, 2018, 37 (1): 23-30.
Wu Jie, Wen Chenyang, Li Shan, et al. Optimal allocation of PV and accumulator system based on time-of-use price [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37 (1): 23-30(in Chinese).
- [20] NREL. The value of energy storage for grid applications[R], 2013.
- [21] 孙振新, 刘汉强, 赵喆, 等. 储能经济性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 54-58.
Sun Zhenxin, Liu Hanqiang, Zhao Zhe, et al. Research on economical efficiency of energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S1): 54-58(in Chinese).
- [22] 王承民, 孙伟卿, 衣涛, 等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33-41.
Wang Chengmin, Sun Weiqing, Yi Tao, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41(in Chinese).
- [23] 刘畅, 徐玉杰, 张静, 等. 储能经济性研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6 (5): 1084-1093.
Liu Chang, Xu Yujie, Zhang Jing, et al. Research progress in economic study of energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6 (5): 1084-1093(in Chinese).
- [24] National Grid Electricity Transmission plc. The Grid Code[S]. Issue 5, Revision 15, 2016.
- [25] Elxon. http://www.bmreports.com/bsp/bsp_home.htm.
- [26] A Berrada, K Loudiyi. Operation, sizing and economic evaluation of storage for solar and wind power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 1117-1129.

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-06-15。

作者简介:

金楚 (1990), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统规划与分析。
E-mail: jinchu1990@163.com。

艾小猛 (1986), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为储能优化配置, 鲁棒优化理论在电力系统中的应用, 可再生能源特性分析与并网优化运行等。E-mail: xiaomengai1986@foxmail.com。

文劲宇 (1970), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、储能与新能源并网、微电网与舰船电力系统。E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)