

储能火电联合调频的容量优化配置研究

印佳敏[✉], 郑赞, 杨劲

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 为储能火电联合调频项目合理配置储能容量, 建立联合调频的收益模型, 提供储能功率选择的依据。[方法] 基于广东某电厂机组的历史运行数据和市场出清价格, 对机组和储能联合调频进行仿真计算, 分析储能功率选择对联合调频性能和收益的影响。[结果] 仿真结果表明: 储能系统通过提升机组的调频性能和增加调频里程, 大幅提升调频收益, 且随着储能功率的增加, 调频收益逐渐增加后趋于稳定; 受机组性能差异和运行状况的影响, 储能对调频性能和调频收益提升的程度不同。[结论] 证实通过仿真计算确定储能容量是合理可行的, 可为后续联合调频项目中储能容量优化提供参考。

关键词: 储能; 火电机组; 联合调频; 调频性能

中图分类号: TK01; TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0011-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Capacity Optimization of Generator-storage Combined Frequency Regulation System

YIN Jiamin[✉], ZHENG Yun, YANG Jin

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The paper aims to establish the profit model of generator-storage combined frequency regulation system and give the basis for battery storage power selection to determine the optimal capacity of battery storage. [Method] Based on the historical operation data of a power plant and market price in Guangdong Province, we simulated the participation of battery storage in frequency regulation and analyzed the influence of battery storage power selection on the performance and income of combined frequency regulation. [Result] The simulation results show that the battery storage system can greatly improve the frequency regulation income by enhancing the performance of the power unit and the mileage. With the increase of the battery storage power, the frequency regulation income gradually increases and then tends to be stable. [Conclusion] The impact of battery storage power on the performance and income is different due to the unit performance differences and operating conditions. This work provides that it is reasonable and feasible to determine the battery storage capacity through simulation calculation, which can provide reference for the optimization of battery storage capacity in subsequent projects.

Key words: battery storage; thermal power unit; generator-storage combined frequency regulation; frequency regulation performance

近年来, 随着风力发电以及光伏发电等新能源发电方式的不断并网, 增加了电网系统的运行调控难度, 电网对调频资源的需求也越来越高。同时, 传统火电机组占比降低, 电网可用的调频资源减少, 调频容量不足的问题凸显。此外, 由于传统火

电机组的旋转惯性, 对有功功率的调节响应速度较慢^[1-2], 寻求新型调频手段辅助传统火电机组提升电网整体调频性能成为当前研究的热点^[3-4]。

以广东为例, 随着大批量海上风电接入, 电网中风电装机容量不断增加, 加上西电东送占比逐年增大, 电网调频难度加剧。广东地区电源结构以大型燃煤机组为主, 占总装机容量47.1%, 调频依靠火电机组时调节任务繁重。燃煤机组长期承担繁重

收稿日期: 2020-07-16 修回日期: 2020-10-12

基金项目: 中国能建广东院科技项目“分布式储能系统联合调频优化配置模型及方法研究”(EX05131W)

的调节任务,会造成发电机组设备磨损严重,增加燃料损耗,超净排放目标难以实现等一系列负面影响^[5-6]。快速调频资源主要以联合循环电厂、抽蓄电厂和水电为主,其装机容量占全省装机容量30.4%,快速调节资源稀缺,调频的形势相对紧张。

储能应用在调频领域,由于具备有功功率双向调节、响应速度快、调节精度高的特性,调频效果远好于常规发电机组。近几年来,在我国火电机组中采用电池储能系统联合进行调频,已经在工程中逐渐得到应用^[7-9]。相关文献^[10-15]对储能联合调频的经济效益进行了计算。

虽然储能可以显著提高火电厂的AGC性能,带来调频收益的提升,但由于其成本较高,储能容量并不是越大越好。目前国内火电联合调频项目大多根据工程经验,按照1.5%~3.0%的机组容量配置储能^[16-17],区域电网对调频资源的实际需求考虑不足,也没有考虑到机组性能的差异对储能容量选型的影响。

本文建立储能联合调频的收益模型,并以广东某电厂为研究对象,对机组和储能联合调频进行仿真计算,研究不同储能功率下的联合调频性能和调频收益,选择合适的储能功率,并与工程经验进行比较。

1 联合调频原理

如图1所示,电网调度AGC指令下发到机组,储能系统同时获取该AGC指令,由于火电机组响应速度较慢(min级),储能系统利用自身响应速度快(s级)的特性先弥补短时间内机组出力与AGC指令间的功率差值。等机组响应跟上之后,储能系统出力可以逐渐降低,以确保储能系统和机组联合出力与AGC指令保持一致,并准备下一次AGC指令响应。

2 调频收益模型

2.1 调频市场补偿费用

根据《广东调频辅助服务市场交易规则(试行)》,广东调频市场补偿费用分为调频里程补偿和AGC容量补偿。发电单元日AGC补偿费用计算公式如下:

$$R = R_{\text{日调频里程补偿}} + R_{\text{日AGC容量收益}} \quad (1)$$

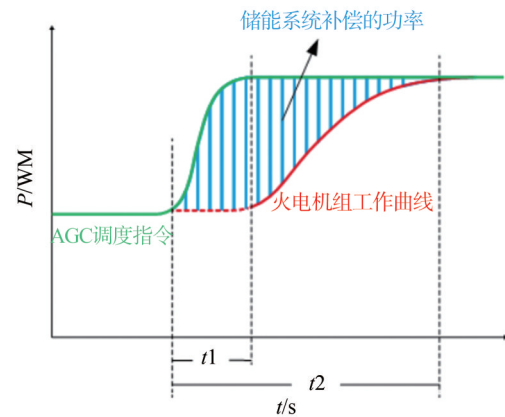


图1 联合调频原理

Fig. 1 Principle of generator-storage combined frequency regulation

2.2 里程补偿

中标发电单元在广东调频市场中提供调频服务可以获得相应的调频里程补偿。发电单元的日调频里程补偿计算公式如下:

$$R_{\text{日调频里程补偿}} = \sum_{i=1}^n (D_i \times Q_i \times K_i) \quad (2)$$

式中: n 为每日调频市场总的交易周期数; D_i 为发电单元在第 i 个交易周期提供的调频里程(MW); Q_i 为第 i 个交易周期的里程计算价格(元/MW); K_i 为发电单元在第 i 个交易周期的综合调频性能指标平均值。

2.3 容量补偿

发电单元AGC容量为发电单元当前出力点在5分钟内向上可调容量与向下可调容量之和。发电单元日AGC容量补偿计算公式如下:

$$R_{\text{日AGC容量收益}} = \sum_{j=1}^m (C_j \times T_j \times s) \quad (3)$$

式中: m 为每日总调度时段数; C_j 为发电单元在第 j 个调度时段的发电单元AGC容量(MW); T_j 为发电单元在第 j 个调度时段的调频服务时长(h); s 为AGC容量补偿标准(元/MWh)。

2.4 调频里程

调频里程是指发电单元响应AGC控制指令后结束时的实际出力值与响应指令时的出力值之差的绝对值。某时间段内的总调频里程为该时段内发电单元响应AGC控制指令的调频里程之和。总调频里程计算公式如下:

$$D = \sum_{j=1}^n D_j \quad (4)$$

式中: D_j 为发电单元第 j 次的调频里程。

2.5 综合调节性能指标

综合调节性能指标指发电单元响应 AGC 控制指令的综合性能表现, 计算公式如下:

$$k = 0.25 \times (2 \times k_1 + k_2 + k_3) \quad (5)$$

式中: 调节速率 k_1 指发电单元响应 AGC 控制指令的速率; 响应时间 k_2 指发电单元响应 AGC 控制指令的时间延迟; 调节精度 k_3 指发电单元机组响应 AGC 控制指令的精准度。

$$k_1 = \frac{\text{发电单元实测速率}}{\text{调频资源分布区内AGC发电单元平均标准调节速率}} \quad (6)$$

$$k_2 = 1 - (\text{发电单元响应延迟时间}/5 \text{ min}) \quad (7)$$

$$k_3 = 1 - \frac{\text{发电单元调节误差}}{\text{发电单元调节允许误差}} \quad (8)$$

3 储能仿真结果及分析

以广东某燃煤电厂 #2 机组和 #4 机组为储能联合调频改造对象, 单机容量 330 MW。考虑设置一套储能系统, 储能单元同时接入 #2 机组和 #4 机组, 采用一拖二方式运行, 储能可在两台机组间切换, 配合电厂的单机 AGC 运行模式。

对电厂机组和储能系统分别建模, 并基于机组 7 天 (Day1~Day7) 的实际历史运行数据和市场出清价格, 对不同储能容量 P (MW) 进行联合调频仿真模拟运算。储能电池的放电功率按 2C 考虑, 储能功率区间设置为机组容量的 1%~5%。

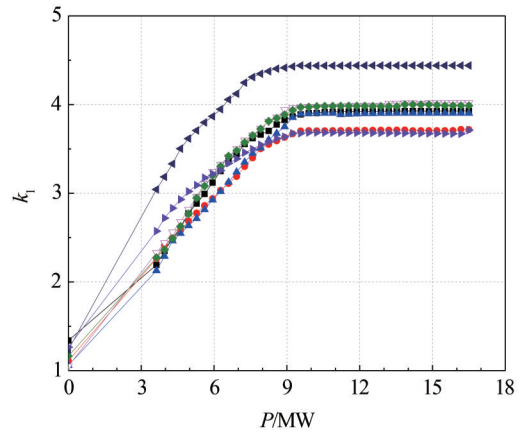
3.1 储能功率对调节性能指标的影响

1) 对调节速率 k_1 的影响

仿真结果如图 2~图 3 所示, 储能系统能大幅提升机组的 k_1 值。随着储能功率的增加, 调节速率 k_1 几乎成比例增加, 当储能功率增加到约 9 MW 以后, k_1 增加很少, 基本维持在一个稳定水平。这是因为储能系统响应速度快, 当收到 AGC 指令后, 可以快速通过充、放电, 迅速跟踪指令需求, 远高于常规火电机组的调节速度。

2) 对响应时间 k_2 的影响

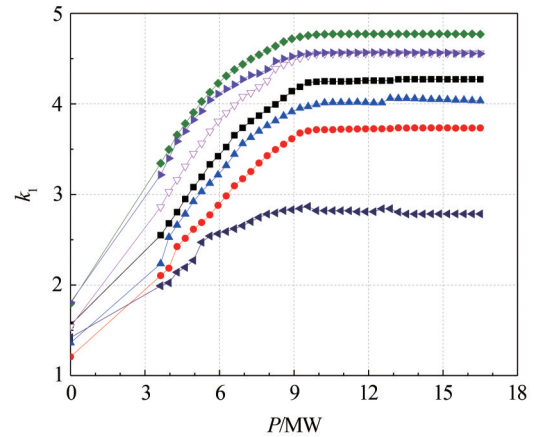
如图 4~图 5 所示, 储能系统能小幅增加机组的 k_2 值, 但随着储能功率的继续增加, k_2 几乎不变。



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 2 #2 机组不同储能功率下的调节速率 k_1

Fig. 2 Curves of regulation rate VS. battery power(#2 unit)



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 3 #4 机组不同储能功率下的调节速率 k_1

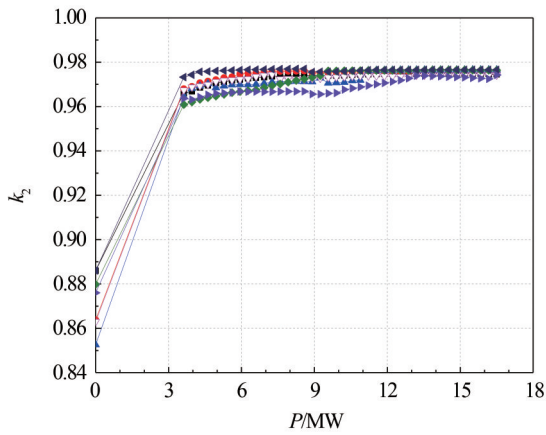
Fig. 3 Curves of regulation rate VS. battery power(#4 unit)

这是因为机组本身 k_2 指标已较好, k_2 的提升空间较小, 且仿真策略中为了电网的稳定, 对储能的输出进行了速率限值。考虑到 k_2 对 k 值提升的贡献度只有 25%, 故储能系统用于提升 k_2 的意义不大。

3) 对调节精度 k_3 的影响

如图 6~图 7 所示, 储能系统对调节精度 k_3 的影响不大, 在部分情况下, 甚至出现调节精度 k_3 会随储能容量的增加而稍微降低。这是由于 AGC 精度计算算法以及储能运行策略导致, 因为增加储能后会使得机组调节速度增加, 并较早结束调节, 当调节结束后储能会退出运行, 导致开始进行精度计算的时间提早, 进而造成精度降低, 若适当降低储能退出的门槛值, 精度则会提高。

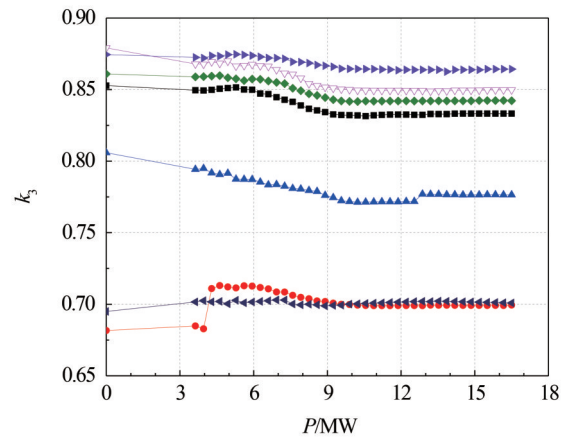
4) 对调节性能指标 k 的影响



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 4 #2 机组不同储能功率下的响应时间 k_2

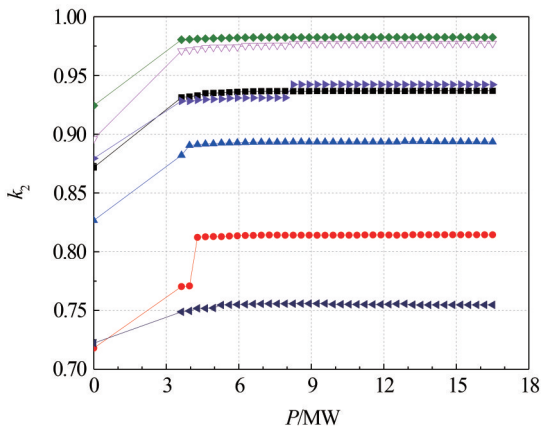
Fig. 4 Curves of response time VS. battery power(#2 unit)



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 7 #4 机组不同储能功率下的调节精度 k_3

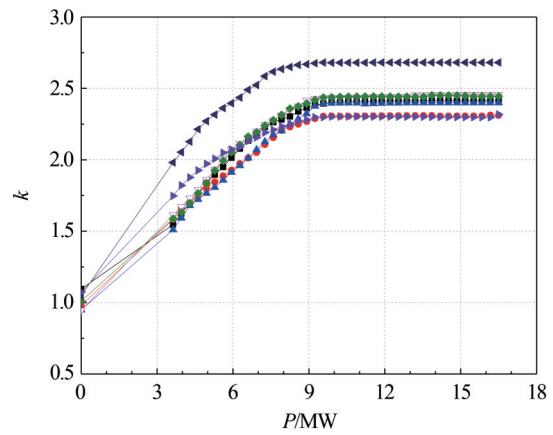
Fig. 7 Curves of adjustment accuracy VS. battery power(#4 unit)



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 5 #4 机组不同储能功率下的响应时间 k_2

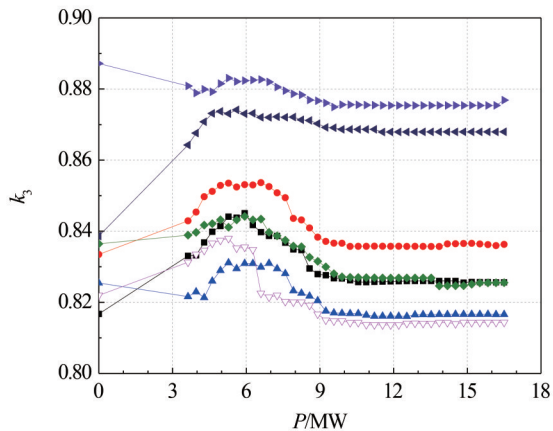
Fig. 5 Curves of response time VS. battery power(#4 unit)



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 8 #2 机组不同储能功率下的调节性能指标 k

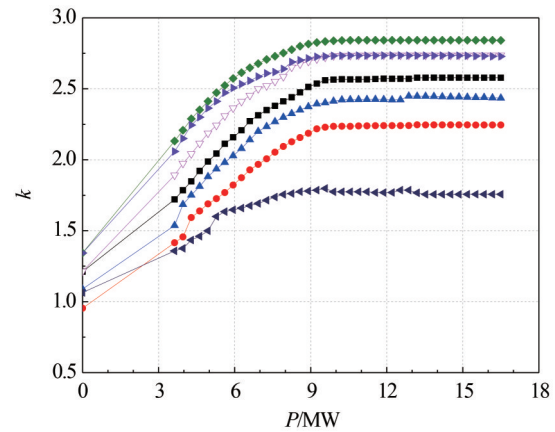
Fig. 8 Curves of performance index k VS. battery power(#2 unit)



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 6 #2 机组不同储能功率下的调节精度 k_3

Fig. 6 Curves of adjustment accuracy VS. battery power(#2 unit)



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 9 #4 机组不同储能功率下的调节性能指标 k

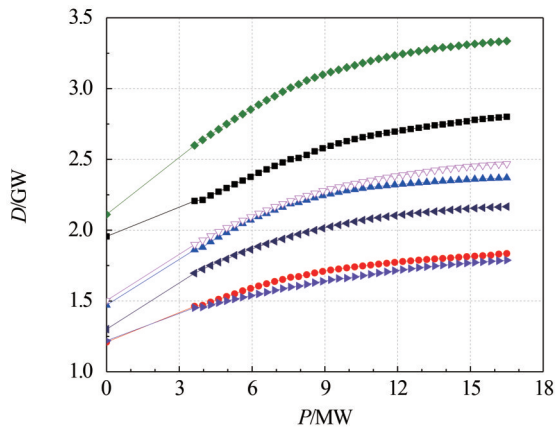
Fig. 9 Curves of performance index k VS. battery power(#4 unit)

仿真结果如图 8~图 9 所示, 储能系统能大幅提升机组的 k 值。随着储能功率的增加, k 值逐渐增加, 当储能功率增加到约 9 MW 以后, k 值基本维持在一个稳定水平。这是由于调节速率 k_1 对 k 值计算的贡献度最大, 达 50%, 因此 k_1 的大幅提升必然带来 k 值的明显提高。同时, 储能功率的增加对响应时间 k_2 和调节精度 k_3 的影响不大, 且 k_2 和 k_3 对 k 值计算的贡献度本身就较小。

以 7 天的仿真运行数据来看, 按平均值计算, 当储能功率为 9 MW、10 MW 和 12 MW 时, #2 机组的 k 值可由 1.01 分别提升至 2.39、2.42 和 2.43, #4 机组的 k 值可由 1.17 分别提升至 2.44、2.47 和 2.48。

3.2 储能功率对调频里程的影响

仿真结果如图 10~图 11 所示, 储能系统在一定程度上能增加机组的调频里程。随着储能功率的增加, D 值逐渐增加, 但增速放缓。这是由于储能联合调频后, 不仅由于调节性能指标的提升, 更容易在调频市场中中标, 而且在同样中标的情况下, 由于增加了储能, 可以在响应 AGC 指令后结束时, 减少实际出力和 AGC 指令的差值, 也即增加调频里程。

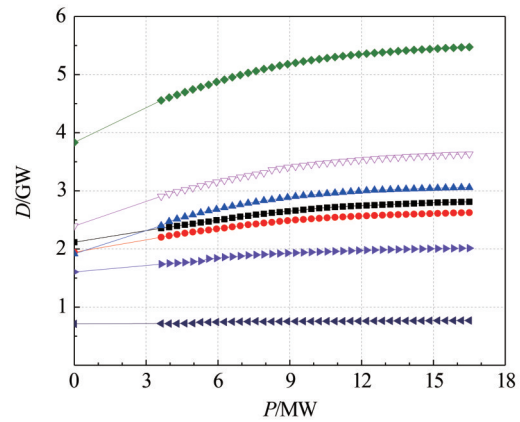


注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 10 #2 机组不同储能功率下的调频里程 D

Fig. 10 Curves of regulation mileage VS. battery power(#2 unit)

以 7 天的仿真运行数据来看, 按平均值计算, 当储能功率为 9 MW、10 MW 和 12 MW 时, #2 机组的 D 值可由 1.539 GW 分别增加至 2.223 GW、2.260 GW 和 2.317 GW, #4 机组的 D 值可由 2.074 GW 分别增加至 2.756 GW、2.792 GW 和 2.845 GW。



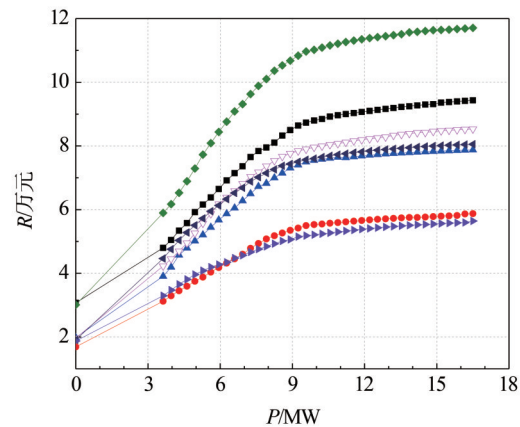
注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 11 #4 机组不同储能功率下的调频里程 D

Fig. 11 Curves of regulation mileage VS. battery power(#4 unit)

3.3 储能功率对日调频收益的影响

仿真结果如图 12~图 13 所示, 储能系统能大幅提升机组日调频收益。随着储能功率的增加, 日调频收益 R 逐渐增加, 但增速放缓。



注: ■ Day1; ● Day2; ▲ Day3; ▼ Day4; ◆ Day5; ◀ Day6; ▶ Day7。

图 12 #2 机组不同储能功率下的日调频收益

Fig. 12 Curves of income VS. battery power(#2 unit)

以 7 天的仿真运行数据来看, 按平均值计算, 当储能功率为 9 MW、10 MW 和 12 MW 时, #2 机组的 R 值可由 22 148 元增加至 74 417 元、76 663 元和 78 791 元, 分别提升 236%、246% 和 256%, #4 机组的 R 值可由 37 243 元增加至 103 163 元、105 764 元和 107 981 元, 分别提升 177%、184% 和 190%。

3.4 储能功率的选择

不同储能功率下联合调频的性能和收益见表 1。与储能功率为 9 MW 相比, 当储能功率为 10 MW 和

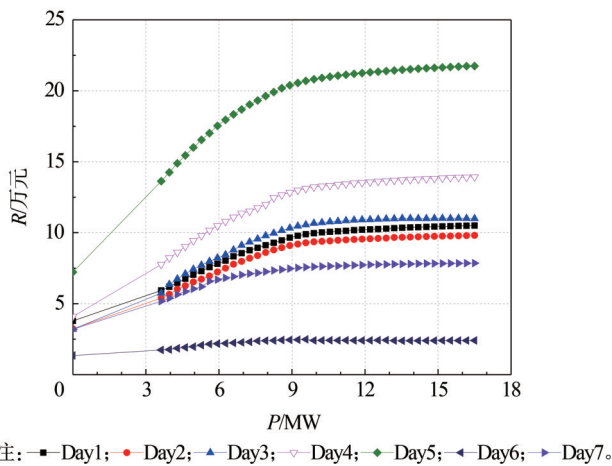


图13 #4机组不同储能功率下的日调频收益

Fig. 13 Curves of income VS. battery power (#4 unit)

表1 联合调频性能和收益汇总表

Tab. 1 Table of performance and income

机组号	储能容量	调节性能 k		日调频收益 $R/\text{元}$	
		绝对值	相对值/%	绝对值	相对值/%
#2	9 MW(基准)	2.39	—	74 417	—
	10 MW	2.42	101.3	76 663	103.0
	12 MW	2.43	101.7	78 791	105.9
#4	9 MW(基准)	2.44	—	103 163	—
	10 MW	2.47	101.2	105 764	102.5
	12 MW	2.48	101.6	107 981	104.7

12 MW时,日调频收益的提升很小。实际工程中,建议储能容量可按9 MW考虑,与联合调频项目经验按照3.0%的机组容量配置储能基本相符。

此外,由表1和图1~图13可见:

1) 对于不同的机组,即使处于同一调频控制区且机组容量相同,由于机组本身性能的差异,储能对机组性能提升的影响也不相同。

2) 由于每日的机组运行状况和电网调频需求不同,再加上调频市场中博弈的存在,对于同一台机组,日调频收益均不相同,储能对机组调频收益的提升也不相同。

4 结论

本文建立了储能联合调频的收益模型,并基于广东某电厂2台机组7天的历史运行数据,对机组和储能联合调频进行仿真计算,分析储能功率选择对联合调频性能的影响,并充分考虑调频市场出清价格的波动,以实际的市场出清价格进行调频收益

计算,分析储能功率对调频收益的影响,仿真结果更具有参考意义。

结果表明:

1) 储能系统能大幅提升机组的调频性能。随着储能功率的增加,调频性能的改善越来越明显,而后逐渐趋于稳定。

2) 储能系统可以增加机组的调频里程。随着储能功率的增加,调频里程逐渐增加,但增速不大且逐渐放缓。

3) 储能系统能大幅提升机组日调频收益。随着储能功率的增加,日调频收益逐渐增加,当储能功率增加到一定值后,日调频收益增速不明显。

4) 仿真结果证实了在储能联合调频项目中按照3.0%的机组容量配置储能基本是合理的,但同时也表明由于机组性能的差异和运行状况的不同,储能对机组性能和调频收益提升的影响不同。

研究结果可以应用于后续储能联合调频项目的容量优化,通过基于实际的历史运行数据和市场数据,能够更准确地分析储能对机组联合调频性能和收益的影响,为后续储能联合调频项目合理选型提供参考。

参考文献:

- [1] 邵忠卫,李国良,刘文伟. 火电联合储能调频技术的研究与应用[J]. 山西电力,2017(6):62-66.
SHAO Z W, LI G L, LIU W W. Research and application of BESS-aided thermal power frequency-regulation technology [J]. Shanxi Electric Power, 2017(6): 62-66.
- [2] 张涛. 储能电池技术参与火电厂AGC调频的应用[J]. 中国电业,2019(5): 94-95.
ZHANG T. Application of energy storage battery technology in AGC frequency modulation of thermal power plant [J]. China Electric Power, 2019(5): 94-95.
- [3] 徐国敬. 储能系统与火电机组联合调频的自动发电控制优化[D]. 天津: 天津大学, 2018.
XU G J. Automatic power generation control optimization of combined frequency modulation of energy storage system and thermal power unit [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [4] 孙冰莹. 储能辅助火电机组AGC调频运行方法及容量配置研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
Sun B Y. Research on AGC frequency modulation operation method and capacity configuration of energy storage auxiliary thermal power unit [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [5] 张平. 火电与电储能联合调频方法的研究[J]. 通信电源技

- 术,2018,35(10):31-33.
- ZHANG P. Research on the combined FM method of thermal power and energy storage [J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(10): 31-33.
- [6] 高海翔,董超,孟子杰,等. 机组-储能联合系统参与调频辅助服务市场的关键技术研究与实践 [J]. 广东电力, 2020, 33(6):46-52.
- GAO H X, DONG C, MENG Z J, et al. Key technologies and practice of generator-storage combination system participating in frequency regulation ancillary service markets [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(6): 46-52.
- [7] 牟春华,兀鹏越,孙钢虎,等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用 [J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
- MU C H, WU P Y, SUN G H, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29-34.
- [8] 刘强. 储能系统在火力发电厂联合调频应用[J]. 通信电源技术, 2020, 37(3): 120-122+125.
- LIU Q. Application of energy storage system in joint frequency regulation of thermal power plant [J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(3): 120-122+125.
- [9] 王斐,梁涛. 储能系统辅助火电机组联合 AGC 调频技术的应用 [J]. 电工电气, 2018(9): 34-37.
- WANG F, LIANG T. Application of combined automatic gain control frequency modulation technology for energy storage system auxiliary thermal power unit [J]. Electrotechnics Electric, 2018(9): 34-37.
- [10] 孙钢虎,王小辉,陈远志,等. 储能联合发电机组调频经济效益分析 [J/OL]. 电源学报, 2020, 18(4): 151-156. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20190528.1549.008.html>.
- SUN G H, WANG X H, CHEN Y Z, et al. Research on economic benefits of frequency modulation for energy storage combined generating units [J/OL]. Journal of Power Supply, 2020, 18(4): 151-156. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20190528.1549.008.html>.
- [11] 王琦. 储能火电联合调频的容量配置及收益预测研究 [J]. 现代信息科技, 2019, 3(16): 43-45.
- WANG Q. Research on capacity allocation and revenue prediction of joint frequency modulation for energy storage and thermal power [J]. Modern Information Technology, 2019, 3(16): 43-45.
- [12] 黄际元,刘博,李欣然,等. 储能电池参与电网快速调频的经济性分析 [J]. 电器与能效管理技术, 2017(23): 65-70.
- HUANG J Y, LIU B, LI X R, et al. Economic analysis of energy storage participating in fast frequency regulation [J]. Low Voltage Apparatus, 2017(23): 65-70.
- [13] 李军徽,范兴凯,穆钢,等. 应用于电网调频的储能系统经济性分析 [J]. 全球能源互联网, 2018, 1(3): 355-360.
- LI J H, FAN X K, MU G, et al. Economic analysis of energy storage applied to grid frequency regulation [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 355-360.
- [14] 牟爱政,彭博伟,张连焱,等. 储能系统应用于火电厂调频经济性评价的研究 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(5): 479-485+492.
- MOU A Z, PENG B W, ZHANG L Y, et al. Study on application of energy storage system to economic evaluation of power plant frequency regulation [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(5): 479-485+492.
- [15] 饶宇飞,高泽,杨水丽,等. 大规模电池储能调频应用运行效益评估 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1828-1836.
- RAO Y F, GAO Z, YANG S L, et al. Operational benefit evaluation for frequency regulation application of large-scale battery energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1828-1836.
- [16] 王华卫,张平. 350 MW 级火电机组与电储能联合调频系统设计研究 [J]. 电工技术, 2019(6): 61-63+117.
- WANG H W, ZHANG P. Design and research on joint frequency modulation system for 350 MW grade thermal power unit and energy storage [J]. Electric Engineering, 2019(6): 61-63+117.
- [17] 王兴兴,孙建桥,陈明. 储能火电联合调频系统设计与研究 [J]. 华电技术, 2020, 42(4): 72-76.
- WANG X X, SUN J Q, CHEN M. Design and research on energy storage and thermal power combined frequency modulation systems [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 72-76.

作者简介:



印佳敏

印佳敏 (通信作者)

1982-, 女, 江苏南通人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 清华大学动力工程及工程热物理博士, 主要从事综合能源、储能、热力系统技术研究及咨询设计 (e-mail) yinjiamin@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)