

电网侧电化学储能电站 AGC 控制策略优化及试验分析

张江丰¹, 苏 焱¹, 孙坚栋², 郑可轲¹, 梅 简¹,
汪自翔¹, 陆生兵³, 岳华飞⁴

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 杭州意能电力技术有限公司, 浙江 杭州 310014;
3. 国网浙江长兴县供电有限公司, 浙江 湖州 313100; 4. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要: 储能系统具有优良的功率调节性能和频率控制能力, 在新能源消纳中发挥了重要的作用。详细介绍浙江电网侧储能电站全站及储能单元 AGC 控制策略, 在考虑电池能效的基础上对该策略进行优化, 提出考虑电池能耗因子的负荷分配策略。在电化学储能电站 AGC 现场, 首先, 采用常规等比例分配策略分别进行储能单位和全站 AGC 测试, 测试结果表明, 储能单元 AGC 控制的调节速率、响应时间、稳态误差等性能均有明显提高; 然后, 采用等比例、等裕度和优化分配策略分别进行 AGC 试验, 试验结果证明, 在使用考虑电池能耗因子的负荷分配策略后, 储能单位内各 PCS 负荷分配结果具有差异性, 有利于储能系统负荷快速响应。

关 键 词: 电网侧储能; 铅碳电池; AGC 策略优化; 调频控制; 电池能效; 储能单元

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.020 中图分类号: TM912 文章编号: 1673-9140(2022)02-0173-08

Optimization and test analysis of AGC control strategy for the grid-side electrochemical energy storage power station

ZHANG Jiangfeng¹, SU Ye¹, SUN Jiandong², ZHENG Keke¹, MEI Jian¹,
WANG Zixiang¹, LU Shengbing³, YUE Huafei⁴

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 2. Hangzhou E. Energy Electric Power Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. State Grid Zhejiang Changxing County Power Supply Co., Ltd., Huzhou 313100, China; 4. NARI Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Energy storage systems have excellent power regulation and frequency control ability, so they play an important role in absorbing new energy. The AGC control strategy of the whole station and energy storage unit of Zhejiang power grid-side energy storage power stations is introduced. The AGC control strategy is optimized based on battery energy efficiency, and a load distribution strategy considering the battery energy consumption factor is proposed. At the AGC site of an electrochemical energy storage power station, the conventional equal proportion distribution strategy is used to test the AGC of the energy storage unit and the whole station, respectively. The test results show that

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-03-08

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS200003)

通信作者: 张江丰(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统网源协调控制技术的研究; E-mail: zhangjiangfeng0725@163.com

the regulation rate, response time, and steady-state error of AGC control of the energy storage unit are significantly improved. Then, AGC tests are carried out by using equal proportion distribution, equal margin distribution, and optimal distribution strategies. The test results show that after using the load distribution strategy considering the battery energy consumption factor, the load distribution results of PCS in the energy storage unit are different, which is conducive to the rapid load response of the energy storage system.

Key words: grid-side energy storage; lead-carbon battery; AGC strategy optimization; frequency modulation control; battery energy efficiency; energy storage unit

随着可再生能源在电力系统中的占比不断提高,尤其是风电、光伏等具有间歇性、波动性和随机性等发电特性的新能源高渗透率给电力系统的安全稳定运行与控制带来了巨大挑战。储能系统具有灵活的双向互动性能,在新能源消纳中发挥了非常重要的作用^[1-5]。另外,随着华东特高压交直流电网的不断并网投运,特高压紧急闭锁导致的大功率缺额在短时间内造成区域电网频率异常波动,急需区域电网具备紧急频率调节控制能力^[6-7]。储能系统在电网紧急控制与频率快速响应方面具有重要的应用价值,特别是电化学储能系统因其储能变流器(process control system, PCS)具有响应速度快、调节精度高等显著优点,相比于其他类型的储能系统,具有更优良的功率调节性能和频率控制能力^[8-10]。

近年来,中国电网侧储能电站发展非常迅速,尤其是广东、江苏、湖南、浙江等省级电网建设投运了一批电网侧电化学储能电站,这些储能电站可以为电网提供调频、调峰、备用、黑启动等多种辅助服务品种,缓解区域电网运行压力,提高电网运行效率和弹性承载能力^[11-12]。当前,国内电化学储能电站主要受调度中心控制,在运行过程中,储能电站的能量管理系统(energy management system, EMS)接收由调度下发的自动发电控制(automatic generation control, AGC)指令,从而实现全站功率调节指令的分配计算和下发^[13]。国内绝大多数储能电站仅仅实现了储能电站级 AGC 控制,不具备对独立储能单元进行 AGC 控制能力,降低了电网对储能等优异调峰调频资源的调控灵活度。

此外,站端 EMS 在计算全站最大可用充/放电功率和分配 PCS 调节指令时,需要监测各电池簇组及其 PCS 的告警和故障信息,但目前并不考虑各电

池簇组的能效差异性^[14]。然而,由于电化学储能电站的电池数量众多,在长期统一充放电过程中,各组电池在电池荷电状态(state of charge, SOC)和能效特性方面必然存在较大的偏差,部分运行场景下就会出现电站效率低、损耗大等不良工况,不仅降低了储能系统经济性,也损害了电池寿命,减少了电池可运行时间。

为了提升电网侧电化学储能电站的运行效率和调控灵活性,本文以浙江省首座电网侧 10 kV 铅碳电池储能电站为例,介绍浙江电网侧电化学储能电站 AGC 控制结构、控制模式、控制策略以及现场测试分析结果。

1 电化学储能电站 AGC 控制

浙江省首座电网侧铅碳电池储能电站——雉城储能电站,浙江长兴投运后在夏季迎峰度夏时段充分发挥了电池储能系统调峰、调频、应急响应的作用,解决了湖州长兴地区夏季负荷供电缺口,有效增加了电网的调节手段和调节能力,有助于电网安全稳定运行。以该储能电站为例,介绍浙江电网侧电化学储能电站 AGC 控制结构和 AGC 控制对象。

1.1 储能 AGC 控制结构

雉城储能电站总装机 12 MW,总容量 24 MW·h,配置单台容量为 0.5 MW 的 PCS 共 24 台,储能电池选用浙江某公司生产的铅碳蓄电池,每只电池容量 12 V/200 Ah,共 20 160 只。电站由 6 个独立储能单元构成,每个储能单元由 1 台升压变、4 台 0.5 MW 的 PCS、4 MW·h 铅碳储能电池(8 簇)、4 套电池管理系统(BMS)、4 台直流汇流柜、1 台交流汇流柜组成。电站通过 10 kV 金城 309 线、10 kV

陵雉 314 线接入浙江电网, 电站 AGC 功能受浙江电力调控中心调度控制。为了提高浙江电网调节的灵活性, 该储能电站首次配置了独立储能单元的 AGC 控制功能。

电网侧储能电站 AGC 控制总体结构框图如图 1 所示。储能电站 EMS 通过远端测控单元(RTU) 接收到调度中心实时下发的 AGC 指令主要由 3 部分构成:

- 1) 电网调度中心根据控制区的区域控制偏差 (ACE) 结合频率负荷特性计算出功率调节需求;
- 2) 由负荷经济调度预测得到的生产计划曲线生成基点功率值;
- 3) 电网调度中心对所采集的新能源电站功率进行低通滤波后, 计算生成新能源电站功率波动平抑指令。

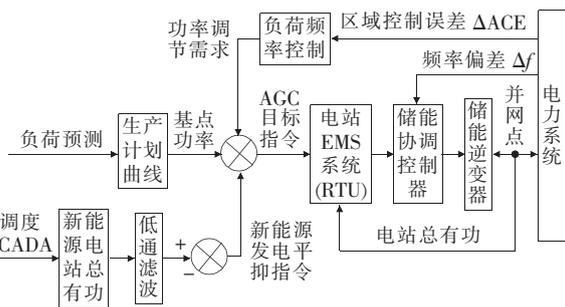


图 1 电网侧储能电站 AGC 控制总体结构框图

Figure 1 Structure diagram of AGC control of grid-side energy storage power station

储能电站 EMS 根据 AGC 指令与并网点反馈的有功功率计算出功率调节偏差, 储能协调控制器对功率调节偏差进行一次调频频差闭锁约束, 同时在线监测 6 个独立储能单元(24 组电池簇)的实时运行数据。在满足响应速度与准确性的前提下, 储

能协调控制器通过预定 AGC 控制策略整定计算出各电池簇组 PCS 间的功率调节指令, 并将功率调节指令直接分配至 PCS, 实现全站或独立储能单元有功功率的自动增减, 从而达到储能电站或单元主动参与电网频率调节控制的目的。储能电站或单元参与电网频率控制原理框图如图 2 所示。

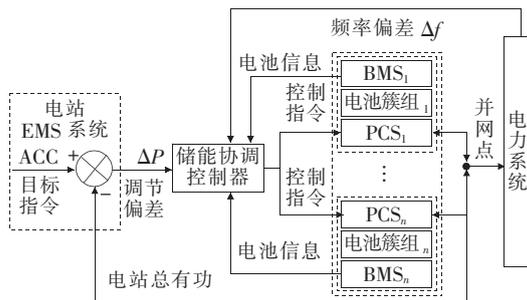


图 2 储能电站或单元参与电网频率控制原理

Figure 2 Schematic diagram of energy storage power station or unit participating in grid frequency control

1.2 储能 AGC 控制对象

浙江电网侧储能电站除配置电站级 AGC 控制的基本功能外, 首次部署了独立储能单元的 AGC 直接控制功能, 提升了浙江电网对电化学储能等高效调峰调频资源的调控灵活性。如图 3 所示, 10 kV 雉城储能电站由 6 个独立储能单元构成, 每个储能单元配置 4 台 500 kW 的 PCS 和 8 簇 4 MW·h 铅酸储能电池组。操作员可以在电站 EMS 监控画面上选择 AGC 控制对象, 并将所选的 AGC 控制对象信息上送至调度中心完成 AGC 信息闭环。如: 操作员将 #1 储能单元 AGC 控制投入, #2~#6 储能单元 AGC 控制撤出, 全站 AGC 控制撤出。此时, 调度中心能够实现对雉城 #1 储能单元的 AGC 独立调度控制。

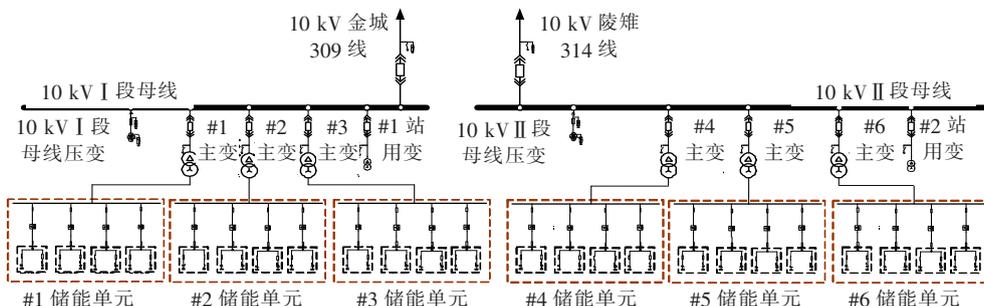


图 3 10 kV 雉城储能电站一次接线示意

Figure 3 Schematic diagram of the primary wiring of Zhicheng energy storage power station

2 考虑电池能效的 AGC 控制策略优化

目前,浙江电网侧电化学储能电站主要受浙江电力调度机构控制,在运行过程中,储能电站接收到调度下发的 AGC 指令后,根据储能电站 EMS 所选择的 AGC 控制对象是全站或某个独立储能单元,对 AGC 指令进行最大可充放电功率上/下限值约束,同时 AGC 指令还要进行一次调频闭锁约束。然后,储能协调控制器根据预选的功率分配策略进行 PCS 功率控制指令计算。全站或独立储能单元 AGC 控制策略计算流程如图 4 所示。

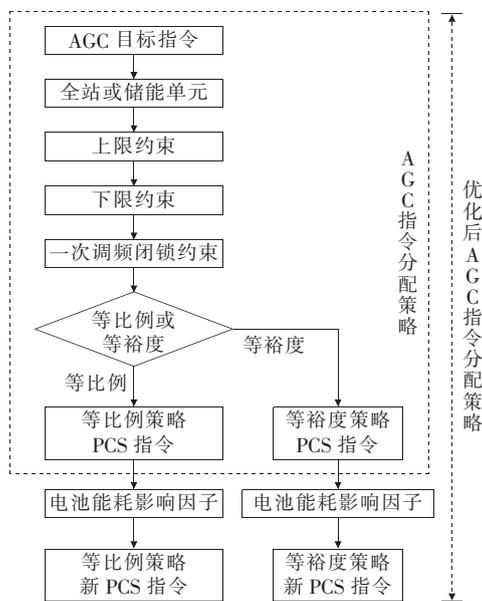


图 4 储能 AGC 控制策略(优化)指令计算流程
Figure 4 Energy storage AGC control strategy (optimization) instruction calculation flowchart

当前,国内电网侧储能电站在监测各电池簇组和 PCS 的故障或告警基础上,绝大多数仅仅采取等比例或等裕度分配策略生成各电池簇组 PCS 的功率控制指令,并不考虑电池簇组的能效差异性。然而,由于电化学储能电站的电池数量众多,在长期统一的充放电过程中各组电池必然存在 SOC 和能效特性较大偏差,在部分运行场景下就会出现电池效率低、损耗大等不良工况,不仅降低了储能系统经济效益,也损害了电池寿命,减少了电池可运行时间。

目前,电网侧储能电站的充放电策略主要有 2

种:①根据每台 PCS 当前可用充放电功率进行等比例分配(简称等比例算法);②根据每台 PCS 充放电功率与额度功率的占比进行等裕度分配(简称等裕度算法)。但这 2 种功率分配策略均没有考虑电池能耗问题。

因此,本文在等比例或等裕度分配策略的基础上引入电池能耗影响因子,对 AGC 指令的功率分配策略进行优化,并应用于浙江雉城 12 MW/24 MW·h 电网侧储能电站(电池充放电 SOC 约束区间为[10%,80%]),指令计算流程见图 4。

2.1 等比例分配策略

若储能电站共有 n 台 PCS,单台 PCS 的充放电功率记为 P_i ,则储能电站各 PCS 的充放电功率应满足调度 AGC 指令的功率约束:

$$P_{AGC} = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

当储能 AGC 控制策略采用等比例分配算法时,每台 PCS 的充放电功率应满足等式约束:

$$P_1 = P_2 = \dots = P_n \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得到

$$\begin{cases} P_i = \frac{P_{AGC}}{n} \\ \Delta P_i = P_i - P_s \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_s 为该 PCS 当前实发功率。由式(3)可计算出某台 PCS 的充放电功率控制指令 P_i 和功率控制偏差 ΔP_i 。

2.2 等裕度分配策略

同理,当储能 AGC 控制策略采用等裕度分配算法时,则每台 PCS 的充放电功率应同时满足式(1)和另一等式约束,即

$$\frac{P_1}{P_{e1}} = \frac{P_2}{P_{e2}} = \dots = \frac{P_n}{P_{en}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),得到

$$\begin{cases} P_i = \frac{P_{AGC}}{n} \cdot P_{ei} \\ \Delta P_i = P_i - P_s \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_{ei} 为该 PCS 额定功率。由式(5)可计算出某台 PCS 的充放电功率控制指令 P_i 和功率控制偏差 ΔP_i 。

2.3 引入电池能耗因子

显然,当利用储能 AGC 控制策略计算单台 PCS 充放电功率控制指令时,若引入电池能耗因子 K_i ,则每台 PCS 的充放电功率应同时满足等式约束:

$$P_{AGC} =$$

$$K_1 P_1 + K_2 P_2 + \dots + K_n P_n = \sum_{i=1}^n K_i P_i \quad (6)$$

$$K_1 + K_2 + \dots + K_n = \sum_{i=1}^n K_i = n \quad (7)$$

根据电池材料及电荷特性,某簇电池组的能耗因子 K_i 与该簇组电池的充放电循环次数、运行时长和日历寿命相关,记为

$$K_i = f(C_i, H_i, D_i) \quad (8)$$

式中 C_i 为某簇组电池的充放电循环次数; H_i 为运行时长; D_i 为日历寿命。

由于充放电循环次数、运行时长等参数与电池簇组的能耗因子呈反比,故某簇组电池充放电循环次数在 AGC 功率分配中的影响因子可用该电池簇组充放电循环次数 C_i 占电池簇组平均充放电循环次数 $\text{average}(C_1, C_2, \dots, C_n)$ 比重的倒数来表示,记为 η_{C_i} ,满足等式:

$$\eta_{C_i} = \frac{\text{average}(C_1, C_2, \dots, C_n)}{C_i} \quad (9)$$

同理,运行时长的影响因子记为 η_{H_i} 的影响因子,并且分别满足:

$$\eta_{H_i} = \frac{\text{average}(H_1, H_2, \dots, H_n)}{H_i} \quad (10)$$

由于电池簇组的日历寿命与能耗因子呈正比,故某簇组日历寿命在 AGC 功率分配中的影响因子可用该电池簇组充放电循环次数 D_i 占电池簇组平均充放电循环次数 $\text{average}(D_1, D_2, \dots, D_n)$ 比重来表示,记为 η_{D_i} ,满足:

$$\eta_{D_i} = \frac{D_i}{\text{average}(D_1, D_2, \dots, D_n)} \quad (11)$$

则某簇电池组影响因子可记为 η_i ,并满足:

$$\eta_i = \eta_{C_i} \cdot \eta_{H_i} \cdot \eta_{D_i} \quad (12)$$

因此,某簇电池组在 AGC 功率分配中的能耗因子可用该电池簇组影响因子 η_i 占电池簇组平均影响因子 $\text{average}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$ 的比重来表示,记

为 K_i ,并满足:

$$K_i = \frac{\eta_i}{\text{average}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)} \quad (13)$$

对于因出现部分 PCS 告警或者 BMS 告警等异常情况导致 PCS 功率指令计算分配结果越功率限制值的工况,要采用凸规划进行求解^[15-16]。对等比例分配策略、等裕度分配策略以及引入能耗因子优化后的策略进行现场实际测试比对,基于现场测试数据进行分析比较,以确定不同分配策略对储能 AGC 控制时各 PCS 运行工况的影响。

3 电化学储能电站 AGC 现场测试

3.1 AGC 现场测试重点

根据《电力系统安全稳定导则》(GB 38755—2019)、《电网运行准则》(GB/T 31464—2015)、《电化学储能系统接入电网技术规定》(GB/T 36547—2018)、《电化学储能系统接入电网测试规范》(GB/T 36548—2018)、《电力系统网源协调技术规范》(DL/T 1870—2018)和华东监能市场[2019]30号《华东区域发电厂并网运行管理实施细则》等文件要求,浙江电网侧储能电站 AGC 功能现场测试需要重点验证以下内容。

1)信息通信精确性测试。主要验证调度 AGC 主站与电站间的遥调、遥信、遥测等信息通信是否精确。

2)AGC 控制参数和策略的检查及验证。在电站侧检查有功协调控制周期、有功分配算法、有功调节死区、电池组 SOC 控制上/下限值等 AGC 控制相关参数定值是否配置正确。同时,验证储能 AGC 调节启动条件、调度指令校验、调节功能闭锁等控制逻辑及策略的正确性。

3)独立储能单元或储能电站的 AGC 调节速率及调节精度测试。在 AGC 控制模式下,验证独立储能单元或储能电站能否自动跟踪调度 AGC 指令,采取正确高效的功率分配策略进行计算与控制。测试独立储能单元或全站有功功率对 AGC 指令的响应时间、调节速率和调节精度等性能是否满足电网技术要求。

3.2 AGC 现场联调测试步骤

对雒城储能电站分别开展独立储能单元和全站的 AGC 现场试验,以其中#2 储能单元为例分析独立储能单元 AGC 现场测试基本过程。

3.2.1 独立储能单元 AGC 测试基本步骤

1) 电站须撤出 AGC 控制方式,验证调度 AGC 主站与电站间的遥信是否正确,遥调、遥测等信息是否收到,精度能否满足要求。

2) 检查储能单元 AGC 有功出力上/下限值、调节死区、有功分配策略等参数设置值。

3) 储能单元负荷闭环控制投入,#2 储能单元 AGC 控制投入,#1、#3~#6 储能单元 AGC 控制退出,EMS 监测的电池、PCS 等各项相关参数均正常稳定。

4) 调度中心依次下发 AGC 指令:0→2→-2→2→0→-2→0 MW,确认#2 储能单元依据 AGC 指令快速进行负荷升降响应,记录曲线,进行试验结果分析。

3.2.2 全站 AGC 测试基本步骤

1) 电站须撤出 AGC 控制方式,参照上述步骤 1 完成全站 AGC 控制相关的遥信、遥调、遥测等信息核对。

2) 检查储能电站和各独立单元的 AGC 有功出力上/下限值、调节死区、有功分配策略等参数设置是否正确。

3) 储能电站和各独立单元的负荷闭环控制均投入,储能电站 AGC 投入,EMS 监测的电池、PCS 等各项相关参数均正常稳定。

4) 调度中心依次下发 AGC 指令:0→6→12→6→0 MW、0→-6→-12→-6→0 MW、0→12→-12→12→0 MW,确认储能电站依据 AGC 指令快速进行负荷升降响应,记录曲线,进行试验结果分析。

4 AGC 测试结果分析

4.1 独立储能单元试验结果分析

根据独立储能单元 AGC 测试步骤并确认协调控制器中 AGC 控制策略为等比例分配策略,依次记录 AGC 指令、储能单元实际负荷及其 PCS 指令

等数据。通过整理分析试验数据可知,在对储能单元进行 AGC 调控时,平均响应滞后时间为 42.20 ms,平均调节时间 157.95 ms,平均调节速率达到 258% P_e /300 ms 以上,平均稳态误差控制在 $\pm 0.78\%P_e$ 以内,具体结果如表 1 所示。

表 1 储能单元试验数据分析处理

Table 1 Energy storage power unit test data analysis and processing table

平均响应滞后时间/ms	平均调节时间/ms	平均调节速率 (100% P_e /300 ms)	平均稳态误差 ($\pm\%P_e$)
42.20	157.95	2.58	0.78

4.2 全站试验结果分析

根据全站 AGC 测试步骤并确认协调控制器中 AGC 控制策略为等比例分配策略,依次记录 AGC 指令、储能电站实际负荷及其 PCS 指令等数据。通过整理分析试验数据可知,在对储能电站进行 AGC 调控时,平均响应滞后时间为 43.29 ms,平均调节时间 202.09 ms,平均调节速率达到 115% P_e /300 ms 以上,平均稳态误差控制在 $\pm 0.97\%P_e$ 以内,具体结果如表 2 所示。显然,在采用相同 AGC 控制策略—等比例分配策略时,测试数据表明全站 AGC 控制相比于独立储能单元控制时调节速率、响应滞后时间、稳态误差等性能均有所降低。

表 2 储能电站试验数据分析处理

Table 2 Energy storage power station test data analysis and processing table

平均响应滞后时间/ms	平均调节时间/ms	平均调节速率 (100% P_e /300 ms)	平均稳态误差 ($\pm\%P_e$)
43.29	202.09	1.15	0.97

4.3 策略优化后对比分析

对#2 储能单元分别进行 AGC 策略优化前、后对比测试,并基于测试数据计算给定样本方差,测试结果如表 3 所示。从测试结果可以看出,在 PCS 初始状态为 0 时,等裕度和等比例算法的策略分配计算结果是一致的。随着 AGC 指令调节需求的增加,本文算法的策略分配计算结果的差异性逐渐增大,表明在不同 AGC 指令工况下,本文所提出的 AGC 优化策略是有效可行的。

表 3 3 种分配算法的数据分析比较

Table 3 Data analysis and comparison of three allocation algorithms

PCS 序号	算法的策略分配比/%								
	AGC 指令:0.5 MW			AGC 指令:1 MW			AGC 指令:1.5 MW		
	本文算法	等比例算法	等裕度算法	本文算法	等比例算法	等裕度算法	本文算法	等比例算法	等裕度算法
# 2-1	22.73	25	25	43.29	50	50	71.96	75	75
# 2-2	27.18	25	25	53.98	50	50	80.23	75	75
# 2-3	24.26	25	25	47.23	50	50	68.26	75	75
# 2-4	25.83	25	2	55.51	50	50	79.53	75	75
方差/%	0.04	0	0	0.33	0	0	0.34	0	0

5 结语

对于电网侧电化学储能电站的 AGC 运行控制,本文重点分析了基于电池能耗因子的电网侧电化学储能电站 AGC 控制策略优化算法,并且对比现有的 AGC 控制策略进行了不同工况和不同控制对象的现场测试。基于现场测试数据的分析表明,本文所提的算法是可行有效的。此外,电网侧电化学储能电站的最优 AGC 策略应随着 AGC 指令工况和运行场景的变化而进行选择,单一 AGC 控制策略不能满足所有的运行场景需求。鉴于目前浙江电网侧电化学储能电站运行考核评价指标尚未明确,各项标准尚不健全,电网侧电化学储能电站的 AGC 运行控制及管理尚有很多值得挖掘和提升的空间。

参考文献:

- [1] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2008,32(7):1-9.
ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [2] 陈璟,杨洪明,邓友均. 考虑不间断电源储能的数据中心电—冷联供系统优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 129-135.
CHEN Jing, YANG Hongmin, DENG Youjun. Optimal operation of combined cooling and power system in green data center considering UPS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 129-135.
- [3] 伍俊,鲁宗相,乔颖,等. 考虑储能动态充放电效率特性

的风储电站运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 41-47+101.

WU Jun, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Optimal operation of wind farm with hybrid storage devices considering efficiency characteristics of dynamic charging and discharging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 41-47+101.

- [4] 黄万友,程勇,王宏栋,等. 纯电动汽车磷酸铁锂电池组放电效率模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 129-132.
HUANG Wanyou, CHENG Yong, WANG Hongdong, et al. Discharging efficiency model of LiFePO₄/C battery pack for electric vehicles[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 40(5): 129-132.
- [5] 胡安平,李官军,桑丙玉,等. 新能源电站的储能多频段阻尼控制方法[J]. 电源技术, 2020, 44(11): 1679-1682.
HU Anping, LI Guanjun, SANG Bingyu, et al. Multi-frequency damping control method for new energy power station[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(11): 1679-1682.
- [6] 李兆伟,吴雪莲,庄侃沁,等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.
- [7] 王玮,余向阳,高春阳,等. 全钒液流电池储能在配电网中优化配置策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 83-89.
WANG Wei, YU Xiangyang, GAO Chunyang, et al. Op-

- timal configuration strategy of vanadium redox flow battery energy storage in distribution networks [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 83-89.
- [8] 梅简, 张杰, 刘双宇, 等. 电池储能技术发展现状[J]. 浙江电力, 2020, 39(3): 75-81.
MEI Jian, ZHANG Jie, LIU Shuangyu, et al. Development status of battery energy storage technology [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(3): 75-81.
- [9] 陈娟, 惠东, 范茂松, 等. 基于粗糙集的电池储能电站海量数据处理方法[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 44-50+208.
CHEN Juan, HUI Dong, FAN Maosong, et al. Massive data processing method for battery energy storage power stations based on rough sets [J]. Electric Power, 2022, 55(2): 44-50+208.
- [10] 汪洋叶, 赵力航, 常伟光, 等. 基于模型预测控制的虚拟电厂储能系统能量协同优化调控方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 16-22.
WANG Yangye, ZHAO Lihang, CHANG Weiguang, et al. Model predictive control based energy collaborative optimization control method for energy storage system of virtual power plant [J]. Smart Power, 2021, 49(7): 16-22.
- [11] 史林军, 杨帆, 刘英, 等. 计及社会发展的多场景用户侧储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 59-66.
SHI Linjun, YANG Fan, LIU Ying, WU Feng. Multi-scenario user-side energy storage capacity optimization configuration considering social development [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 59-66.
- [12] 李建林, 王上行, 袁晓冬, 等. 江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 1-9+103.
LI Jianlin, WANG Shangxing, YUAN Xiaodong, et al. Enlightenment from construction and operation of battery energy storage station on grid side in Jiangsu Power Grid [J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(21): 1-9+103.
- [13] 李军, 胡斌奇, 杨俊, 等. 湖南电网侧电池储能电站概况及调控运行启示[J]. 湖南电力, 2020, 40(1): 73-78.
LI Jun, HU Bingqi, YANG Jun, et al. General situation and regulating operation enlightenment of side battery storage power station in Hunan Power Grid [J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(1): 73-78.
- [14] 陈浩, 贾燕冰, 郑晋, 等. 规模化储能调频辅助服务市场机制及调度策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3606-3617.
CHEN Hao, JIA Yanbing, ZHENG Jin, et al. Research on market mechanism and scheduling strategy of frequency regulation auxiliary service of large-scale energy storage [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3606-3617.
- [15] 李官军, 胡安平, 杨婷, 等. 电池储能电站即插即用运行关键技术研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 59-67.
LI Guanjun, HU Anping, YANG Ting, et al. Research on the key technologies of battery energy storage power station for plug and play operation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 59-67.
- [16] 郜宁, 张慧媛, 王子琪, 等. 区域电网分布式储能选址定容规划[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 52-58.
GAO Ning, ZHANG Huiyuan, WANG Ziqi, et al. Planning for site selection and capacity determination of distributed energy storage in regional power grid [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 52-58.