

考虑 SOC 均衡的储能电站一次调频 协同控制方法

陈 宏¹, 贺 悝², 谭庄熙², 李雄军³, 李 勇⁴, 曲 旺³

(1. 国网湖南综合能源服务有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南湘潭 411201; 3. 湖南迪泰尔综合能源规划设计有限公司, 湖南长沙 410119; 4. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

摘 要: 针对多个储能电站参与一次调频的稳定运行问题, 提出一种考虑荷电状态(SOC)均衡需求的储能电站协同调频控制策略。首先, 建立含多个储能电站的区域电网调频控制模型, 并分析储能电站参与一次调频的基本控制规律。其次, 根据系统调频动作区和死区内的净功率变化, 对不同工作阶段区间调频功率与 SOC 均衡功率的互补耦合特性进行分析, 论证储能 SOC 均衡控制与调频需求协同响应的可行性, 在此基础上设计储能的协同调频控制策略, 并给出关键控制参数的设计方法。本文方法在改善分布式储能电站调频效果的同时, 减小了储能电站 SOC 越限风险, 使得其频率支撑能力更加稳定。最后, 搭建典型区域电网模型, 结合不同频率波动工况进行仿真验证, 结果表明所提控制策略可以有效改善频率质量, 在不增加系统调频负担的前提下实现多个储能电站的荷电状态均衡。

关 键 词: 储能电站; 一次调频; 荷电状态; 协同控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.011 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2023)06-0105-10

Coordinated control method of primary frequency regulation for energy storage power station considering SOC balance

CHEN Hong¹, HE Li², TAN Zhuangxi², LI Xiongjun³, LI Yong⁴, QU Wang³

(1. State Grid Hunan Energy Comprehensive Service Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Hunan Ditel Comprehensive Energy Planning and Design Co., Ltd., Changsha 410119, China; 4. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To deal with the stable operation of multiple energy storage power stations participating in primary frequency regulation, a cooperative frequency regulation control strategy for energy storage power stations was proposed with the consideration of the State of Charge (SOC) equilibrium demand. Firstly, the frequency regulation control model of regional power grid with multiple energy storage power stations is established, and the basic control principle of energy storage power station participating in primary frequency regulation is analyzed. Secondly, based on the net power variation within the action zone and dead zone of frequency regulation, different frequency band power and coupling complementary characteristics of SOC balance power are analyzed. The feasibility of the energy storage SOC balanced control and

收稿日期: 2022-03-19; 修回日期: 2022-08-29

基金项目: 国网湖南综合能源服务有限公司科技项目(HZN21002)

通信作者: 李 勇(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统运行与控制、电力电子系统与控制等研究; E-mail: liyong1881@163.com

coordinated control of frequency regulation demand is demonstrated, and frequency regulation is obtained on the basis of the design on the coordination of energy storage frequency regulation control strategy. The design method of key control parameters is given. The proposed method not only realizes the frequency regulation, but also reduces the SOC out-of-limit risk and enhances the frequency support effect. Finally, a typical regional power grid model is built and simulated with different frequency fluctuation conditions. The results show that the proposed control strategy can effectively improve the frequency quality and achieve the balance of the charged state of multiple energy storage stations without increasing the frequency regulation burden of the system.

Key words: energy storage station; primary frequency regulation; state of charge (SOC); coordinated control

随着电力系统低碳化进程的推进,可再生能源(renewable energy sources, RESs)发电占比不断提升,为实现其高效运行需求,实现最大功率跟踪点运行,RESs多经过电力电子变换装置并网运行,降低了电网的惯量水平^[1-2]。此外,其存在的出力预测困难、波动性较大等特性,进一步加剧了低惯量电网的频率波动,不利于电网的稳定运行^[3-4]。电池储能具有响应速度快、出力控制精确的特点,在参与快速调频的电网需求中具备极大的应用潜力^[5-6]。

规模化储能电池多以储能电站的形式接入电网中,参与调峰调频等有功需求响应的场景,目前在各省电网及示范工程中已取得初步的经济效益和运行效果^[7-8]。储能电站参与调峰主要是通过跟踪日前调度指令来实现的^[9];参与二次调频时则通过跟踪AGC指令生成功率跟踪信号,实现频率的误差调节,重点在于获得二次调频功率指令后的功率分配^[10];一次调频需要各储能电站预设一次调频系数,基于下垂控制原理实现主动自发地参与频率调节^[11]。

目前,针对储能电池参与一次调频的研究主要集中在单个储能电站的荷电状态(state of charge, SOC)维持以及调频效果改善2个方面^[12-15]。对于SOC维持的需求,文献[12]提出一种分布式一次调频控制策略,考虑电网的频率状态和电动汽车(electric vehicle, EV)的充电需求,设计了不同的控制模式,在调用集群EV资源参与频率需求响应的同时满足EV的充电需求;文献[13]提出一种调频系数自适应的储能电池参与一次调频控制方法,建立了下垂系数与SOC的动态调节函数,提出将储能SOC作为一次调频出力系数的反馈变量,从而提升了在长时扰动下维持储能电池SOC效果。为进一步提升快速调频效果,文献[14]在综合分析虚拟惯性与虚拟下垂控制优缺点的基础上,提出一种综合调频方法,实现了这2种方法的协调运行及优势互

补,提升了储能参与调频的动态响应性能;文献[15]提出一种基于频率偏差与频差变化率的调频控制方法,实现下垂控制与惯性控制的平滑切换,在实现调频效果的同时提升了储能电池的容量利用效率。

上述方法均把参与一次调频的储能电池资源看成统一的整体,即储能单元进行控制。而事实上,随着市场利好政策的实施,参与电网辅助服务的储能电站数量逐步增加,当多储能电站聚合参与调频服务时,由于安装容量、运行场景的差异,在运行过程中,将导致各个储能电站的SOC状态出现差异,从而使得聚合商对区域内储能电站调频资源的评估出现困难,造成功率分配不均、经济效益下降等问题^[16]。目前的研究思路多聚焦于SOC不平衡后的弥补性解决方案,即运营商需要对区域内储能电站按照SOC的不一致性进行调频能力的差异性评估,设计梯次化调频控制策略^[17-18]。

相较而言,考虑SOC均衡的调频控制可以减少储能资源分组排序的需求,更高效地利用调频资源,减小控制复杂度^[19]。另一方面,对于具备SOC状态一致性的储能集群资源,聚合商可以更好地评估区域内调频资源水平,从而设计更优的报价和盈利方案。因此,考虑SOC均衡需求,研究分布式储能电站一次调频功率控制策略,对提升聚合经济效益、促进储能的规模化应用具有重要意义。

本文提出一种考虑SOC均衡需求的分布式储能电站参与调频协同控制方法。首先,建立含多储能电站的区域电网调频模型,分析储能调频控制的特性;其次,在分析电网频率变化特征的基础上,对调频需求阶段进行划分,提出兼顾电力系统调频和电站SOC均衡需求的调频控制策略,并详细阐述参数选取方法;最后,对典型区域电网在不同净功率扰动工况下进行仿真,并对调频效果和SOC均衡控

制效果进行综合评价,验证本文方法的可行性和有效性。

1 储能集群参与调频模型及控制原理

1.1 含多个储能电站的区域电网调频模型

为研究多个储能电站接入下的电力系统一次调频问题,需要构建典型的电力系统有功频率响应模型。在一次调频的正常运行工况下,频率波动仅处于较小的范围,电力系统一次调频的频率波动小于 0.05%,而且系统频率的动态响应较电压与功角的动态响应相对迟缓。因此,当研究小扰动下电网的一次调频长周期性能时,通常可以忽略电压和功角的动态响应,默认整个电力系统的频率是统一的,各台发电机之间保持严格的同步运行。基于区域等效的方法,建立含储能电池的区域电网一次调频动态模型,含多个储能电池的区域电网调频动态模型^[20-21]如图 1 所示。

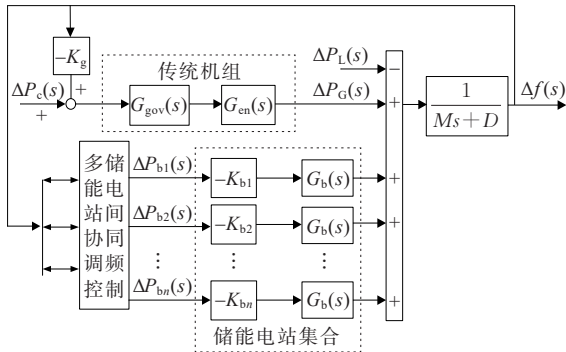


图 1 含多个储能电站区域电网控制模型

Figure 1 Regional power grid model with multiple energy storage stations

图 1 中 $\Delta P_c(s)$ 、 $\Delta P_L(s)$ 、 $\Delta f(s)$ 分别为二次调频给定值、负荷功率波动量、电网频率偏差; K_g 为传统电源的单位调节功率, K_b 为储能电池的单位调节功率; M 、 D 分别为电网惯性时间常数和负荷阻尼系数。

储能电池的一阶惯性模型为

$$G_b(s) = \frac{1}{1 + sT_b} \quad (1)$$

式中, T_b 为储能电池的时间常数。

发电机组模型 $G_g(s)$ 为调速器和再热汽轮机组的串联模型,即

$$G_{gov}(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \quad (2)$$

$$G_{en}(s) = \frac{1 + F_{HP}T_{RH}s}{(1 + T_{HC}s)(1 + T_{RH}s)} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, T_g 为调速器时间常数; T_{CH} 、 T_{RH} 、 F_{HP} 分别为汽轮机时间常数、再热器时间常数和再热器增益。式(2)为火电机组调速器传递函数,式(3)为传统再热汽轮机传递函数。

1.2 储能电站参与一次调频的传统控制策略

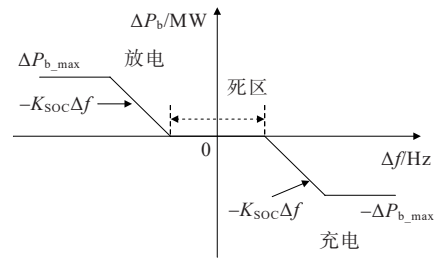
传统控制方法主要在满足调频需求的基础上,考虑储能电站安全运行需求,通过考虑 SOC 反馈设计储能的一次调频系数,在 SOC 较高时增加放电功率或减少充电功率,在 SOC 较低时增加充电功率或减少放电功率,从而将储能 SOC 维持在预期值附近^[12]。为了更清晰地描述本文方法,在此给出传统方法的简要介绍。

基于下垂控制原理的电池储能电站一次调频输出功率为

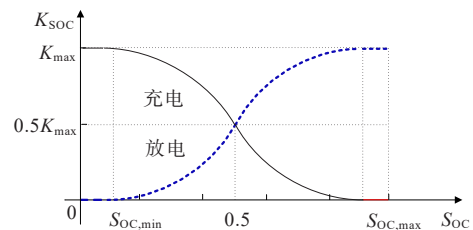
$$\begin{cases} \Delta P_b = -K_{SOC} \cdot \Delta f \\ -\Delta P_{b,max} \leq \Delta P_b \leq \Delta P_{b,max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $|\Delta f| \geq 0.033 \text{ Hz}$, $\Delta P_{b,max}$ 为储能最大出力的限制约束; K_{SOC} 为下垂系数,是 SOC 的函数。

储能出力与电网频率偏移的关系如图 2(a) 所示, K_{SOC} 与 SOC 的关系如图 2(b) 所示,其中 K_{max} 为最大下垂系数,本文取值为 3。



(a) 储能一次调频功率随频差变化关系



(b) 等效下垂系数与 SOC 的关系

图 2 储能电站参与一次调频传统控制策略

Figure 2 Conventional control strategy for energy storage station in primary frequency regulation

由图2可知,在接近SOC下限时储能以较大的功率充电或以较小的功率放电,而在接近SOC上限时则以较大的功率放电或以较小的功率充电,从而避免过充或过放。具体地,考虑SOC安全运行区间的下垂系数 K 按以下方式进行计算。

1) 当 $S_{oc} \leq 0.1$ 时,则

$$K_{soc} = \begin{cases} K_c = K_{max}, & \Delta f > 0 \\ K_d = 0, & \Delta f < 0 \end{cases} \quad (5)$$

2) 当 $S_{oc} \geq 0.9$ 时,则

$$K_{soc} = \begin{cases} K_c = 0, & \Delta f > 0 \\ K_d = K_{max}, & \Delta f < 0 \end{cases} \quad (6)$$

3) 当 $0.1 < S_{oc} \leq 0.5$ 时,则

$$K_{soc} = \begin{cases} K_c = 0.5K_{max} \left(1 + \sqrt{\frac{0.5 - S_{oc}}{0.4}} \right) \\ K_d = 0.5K_{max} \left(1 - \sqrt{\frac{0.5 - S_{oc}}{0.4}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

4) 当 $0.5 < S_{oc} < 0.9$ 时,则

$$K_{soc} = \begin{cases} K_c = 0.5K_{max} \left(1 - \sqrt{\frac{S_{oc} - 0.5}{0.4}} \right) \\ K_d = 0.5K_{max} \left(1 + \sqrt{\frac{S_{oc} - 0.5}{0.4}} \right) \end{cases} \quad (8)$$

2 考虑多阶段需求的电池储能参与一次调频控制策略

在一次调频过程中,为了使储能电站集群提供稳定频率支撑能力且健康运行,需要协调储能电站与火电机组两者的互补优势以及储能电站间的协调运行,对电池储能基本操作的要求是,储能电站集群需要维持合理的SOC,且不同储能电站的SOC差异不能过大,否则导致单个储能电站过度使用。目前的大部分研究主要集中在储能电站参与一次调频的过程中,考虑SOC反馈将储能电站的SOC维持在0.5附近,没有充分挖掘储能电站退出调频阶段的运行需求。为此,本文将储能电站的工作阶段细分为退出调频阶段和参与调频阶段,其中退出调频阶段以保持储能电站集群的SOC为主要目标,而参与调频阶段以改善电网频率调节效果

为主要目标。

此外,多个分布式储能电站参与调频的效果由其聚合出力决定,因此,对于具备SOC均衡性的储能集群资源,聚合商可以更好地评估区域内调频资源水平,从而设计更优的报价和盈利方案。若各个储能电站的SOC状态差异过大,将使得储能电站运营商对区域内储能电站调频资源的评估出现困难,造成功率分配不均,需要设计更为复杂的控制方法,进行储能参与需求响应的排序优化利用。因此,需要考虑多个储能电站参与需求响应时的SOC均衡调节需求。在系统出现调频需求时($|\Delta f| \geq 0.033$ Hz),储能电站的调频与SOC均衡协同控制的设计思路如图3所示,以调频需求为更高优先级,在调频需求与SOC均衡出力方向相同时,启用均衡控制。

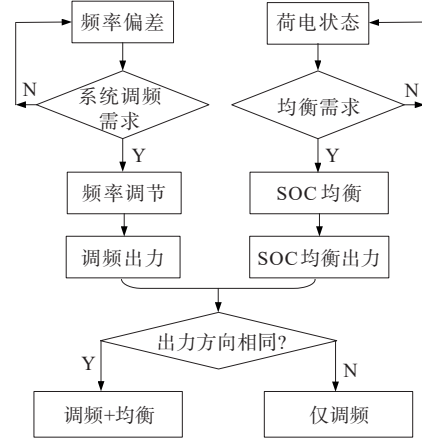


图3 参与调频时储能电站的协同控制策略设计基本思路
Figure 3 Principle of the coordinated control strategy for energy storage stations participating in the frequency regulation

2.1 退出调频阶段储能电站SOC均衡控制

根据电网的实际运行规律,系统频率大部分时间均处于电网频率调节死区内,为了避免火电、水电等常规机组频繁地参与一次调频导致其机械损耗过大,中国电网的频率调节死区设置为0.033 Hz。当系统频率处于死区内时,储能电站则处于退出调频阶段,由于下阶段的存在调频任务和储能电站的健康运行需求,此阶段需要保持储能电站集群的SOC均衡,故本文定义储能电站的SOC均衡功率需求,描述为

$$\Delta P_{BS} = \gamma K_{max} (S_{oc} - S_{oc,REF}) \quad (9)$$

式中, γ 为储能电站的充放电约束系数; $S_{oc,REF}$ 为储

能电站集群的 SOC 均衡期望值,其取值由下式确定:

$$S_{OC,REF} = \left(\sum_{i=1}^n C_i \cdot S_{OC,i} \right) / \sum_{i=1}^n C_i \quad (10)$$

式中, C_i 为第 i 个储能电站的一次调频容量; $S_{OC,i}$ 为第 i 个储能电站的荷电状态。

充放电约束系数按 SOC 均衡需求的不同设计为分段函数:

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_d, & S_{OC} > S_{OC,REF} \\ \gamma_c, & S_{OC} < S_{OC,REF} \end{cases} \quad (11)$$

其中, γ_d, γ_c 分别为储能电站的放电、充电约束系数,其作用是为了约束均衡功率,以避免调频死区内均衡动作的功率需求过大给系统频率造成负面影响,本文基于 Logistics 函数定义约束系数,具体表达式为

$$\gamma_c = \frac{\mu K_0 \exp(n \cdot \Delta f)}{\mu + K_0 [\exp(n \cdot \Delta f) - 1]} \quad (12)$$

$$\gamma_d = \frac{\mu K_0 \exp(-n \cdot \Delta f)}{\mu + K_0 [\exp(-n \cdot \Delta f) - 1]} \quad (13)$$

式中,参变量 μ 为函数终值,本文也称为储能电站均衡功率的比例系数,用以约束均衡功率,当 μ 取 0.1 时,可以保证储能电站的均衡功率最大值与储能电站的调频充放电功率相差一个数量级,减小系统频率变化的不确定性; K_0 为函数初始值, n 的作用是调节曲线变化速率,本文将 n, K_0 分别设置为 300、0.001,详细参数说明可参考文献[11]。退出调频阶段均衡约束系数 γ 随频差的变化如图 4 所示。

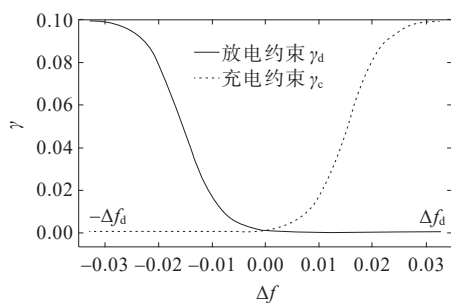


图 4 均衡功率约束系数变化曲线

Figure 4 Curve of restraint coefficient for balance power

2.2 参与调频阶段储能电站 SOC 均衡控制

当系统频率偏差超过 0.033 Hz 时,火电机组与储能电站需要参与一次调频,此阶段储能电站的主要目标是改善电网频率调节效果,若此时储能电站的均衡需求与电网频率调节需求契合,则可以进

SOC 均衡动作,且可以进一步改善频率调节效果。结合一次调频下垂控制原理,当储能电站的均衡需求为放电时,则在频率偏差跌出 -0.033 Hz 时,储能电站的放电功率为

$$\begin{cases} \Delta P_b = -K_d \cdot \Delta f + \gamma_d (S_{OC} - S_{OC,REF}) \\ \gamma_d = \mu \end{cases} \quad (14)$$

同理可知,当储能电站的均衡需求为充电时,则在频率偏差跌出 $+0.033$ Hz 时,储能电站的充电功率为

$$\begin{cases} \Delta P_b = -K_c \cdot \Delta f + \gamma_c (S_{OC} - S_{OC,REF}) \\ \gamma_c = \mu \end{cases} \quad (15)$$

不同频率偏差区间内本文所提控制策略下储能电站及传统机组的调频出力情况如表 1 所示,在调频死区内,当储能电站的 SOC 均衡需求与调频净功率调整需求契合时,储能电站将利用系统盈余(缺额)功率进行充电(放电),从而实现 SOC 的均衡调整,其余情况下不动作,以避免造成频率的反向扰动。在正常调频区间内,储能电站的均衡控制类似,但同时会叠加调频功率输出,以响应电网正常调频需求。

表 1 不同频率偏差区间调频主要出力目标

Table 1 Aims of frequency regulation with different frequency deviation intervals

$ \Delta f $	调频需求	均衡需求	传统机组	储能电站
< 0.033 Hz 调频死区	频率下降	SOC 上调	不动作	不动作
		$S_{OC,i} < S_{OC,REF}$		
	频率上升	SOC 下调	不动作	均衡 放电
		$S_{OC,i} > S_{OC,REF}$		
> 0.033 Hz 调频区	频率下降	SOC 上调	一次调频	调频
		$S_{OC,i} < S_{OC,REF}$		
		SOC 下调	一次调频	调频 & 均衡放电
		$S_{OC,i} > S_{OC,REF}$		
	频率上升	SOC 上调	一次调频	调频 & 均衡充电
		$S_{OC,i} < S_{OC,REF}$		
		SOC 下调	一次调频	调频
		$S_{OC,i} > S_{OC,REF}$		

2.3 调频评价指标

针对单个频率波动,选取 Δf_m 最大频率偏差作为评价指标, Δf_m 值越小,表明调频效果越显著;针对连续频率波动,选取频率偏差和SOC偏差(偏离 $S_{OC,REF}$ 的程度)的均方根值作为评价指标,分别为反应调频效果和SOC保持效果的 f_{rms} 、 $S_{OC,rms}$,具体如下:

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_0)^2} \quad (16)$$

$$S_{OC,rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{OC,i} - S_{OC,REF})^2} \quad (17)$$

式(16)、(17)中, f_i 、 $S_{OC,i}$ 分别为第*i*个采样点的频率和SOC; f_0 为额定频率(50 Hz); $S_{OC,REF}$ 计算公式见式(10); n 为总采样点的个数,由仿真步长和仿真窗口时长决定。

当系统频率的分布符合以标准频率为数学期望值的正态分布时, f_{rms} 、 $S_{OC,rms}$ 反应了系统频率分布函数的离散程度,即这2个指标值越小,系统频率或SOC偏离标准频率或SOC的程度越低,表示调频效果或SOC保持效果越好。

3 算例分析

为了验证本文所提方法在多个储能电站参与一次调频场景中的可行性,选取某区域电网作为研究对象,相应的调频仿真模型见图1,其中系统额定容量为1 000 MW,3组储能电池容量分别为3、3、2 MW·h,初始SOC分别设置为0.70、0.40、0.30,仿真系统其余重要参数如表2所示。

表2 仿真模型参数

Table 2 Parameters of the simulation model

$D/p.u.$	M/s	$K_g/p.u.$	T_g/s	T_{CH}/s	K_0	
1	5	20	0.08	0.3	0.001	
额定功率/MW						
储能1		储能2	储能3	T_{RH}/s	$F_{HP}/p.u.$	n
3	3	2	10	0.5	300	

假设开机上网机组均为满发,参数以额定频率50 Hz和机组额定容量为基准值进行标么化。为说明本文所提控制策略的正确性及有效性,分别在小

扰动和大扰动2种典型负荷扰动工况下进行对比仿真分析,传统方法为目前参与一次调频的储能电站常用控制思路,即在满足调频需求的基础上尽量维持SOC在初始设定状态^[12]。需要指出的是,由于储能电站的引入,其一次调频效果显然会优于无储能的调频效果,故不再给出无储能情况下调频效果对比。

3.1 大扰动工况

该部分仿真通过极端大扰动工况下的调频性能验证了所提方法一致性控制策略不仅能够改善系统调频效果,还能够更好地实现多个储能电站的SOC均衡控制。不同控制方法下的频率偏差曲线如图5所示,采用本文、传统方法的储能电站频率偏差均方根分别为0.020 5、0.027 6 Hz,调频效果提升了25.7%。3 000 s后本文、传统方法的调频效果接近,这是由于3个储能电站的SOC趋于相同,本文一致性策略动作逐渐停止。

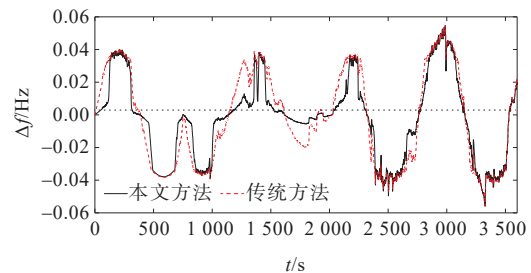


图5 大负荷扰动下频率偏差曲线

Figure 5 Frequency deviation under heavy load disturbance

不同方法下3个储能电站的SOC波动曲线如图6所示。在0~500 s时,采用本文方法时储能电站1的SOC上升较储能电站2、3小,这是由于频率上升导致系统的调频需求为充电,而储能电站群的一致性需求仅储能电站2、3的充电需求契合系统的调频需求,所以此时储能电站2、3的一致性动作是一个双赢的结果。而储能电站1的均衡需求要求其放电,这与当前系统调频需求相违背,因此,储能电站1在此区间内仅参与频率调节,在1 500、2 300 s附近的场景也类似此原理,不再赘述。在500~1 000 s时,由于储能电站2、3的一致性动作需求为充电,此时系统频率跌至额定频率以下,系统的调频需求为放电,故此时储能电站2、3仅仅参与一次调频而不

进行均衡动作。而储能电站1的初始SOC为0.70,其一致性动作为放电,与系统调频需求契合,故调频时可以适当地进行一致性动作,不仅可以进一步改善频率调节效果,而且可以更快地使其SOC趋于预期值。

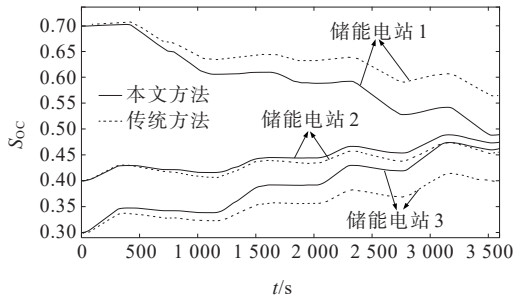


图6 大扰动下SOC变化曲线

Figure 6 SOC variation under heavy load disturbance

传统方法仅仅考虑储能电站的SOC维持效果,在1 h内大扰动工况下,3个电站的SOC分别为0.56、0.45、0.40,而本文方法下3个电站的SOC分别为0.48、0.47、0.45,由此可以看出,传统方法下的SOC运行均衡性较差,易导致单个储能电站的过度使用,且其SOC容易长时间处于不健康区间,不利于储能电站的长时间稳定运行。

为了进一步说明本文方法的优势,需要对比火电机组的调频出力和频次,火电机组的出力调整幅度越大、次数越多则说明火电机组的调频压力越大。大扰动工况下火电机组的调频出力如图7所示,本文方法比传统方法下的储能电站可以更好地缓解火电机组的调频压力,火电机组的调频功率波动更小。这说明本文方法下调频效果和SOC均衡效果的改善并不是以损失火电机组的运行经济性为代价的。

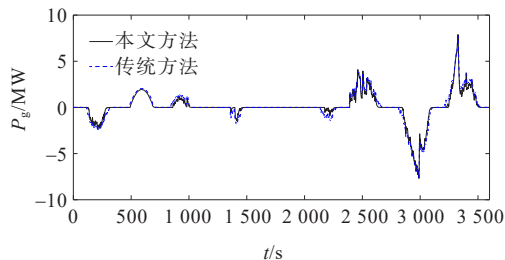


图7 大扰动下传统机组调频出力

Figure 7 Output power of frequency regulation of conventional generator under heavy load disturbance

综上所述,在极端大扰动工况下,本文方法相对传统方法在频率调节效果指标方面提升了25.7%,3个储能电站在SOC均衡性指标方面分别提升了24.9%、19.6%、27.2%,具体指标参数如表3所示。本文仿真步长为100 ms,则大扰动工况下SOC均衡性指标计算时仿真采样点数为36 000个。由上述分析可见,本文方法能够挖掘不同荷电状态的储能电站的调频潜力,同时可以有效避免储能电站SOC越限,有助于各储能电站SOC的状态一致性。

表3 大扰动工况下对应调频指标

Table 3 Frequency regulation index under heavy load disturbance

方法	f_{rms}	$S_{OC,rms1}$	$S_{OC,rms2}$	$S_{OC,rms3}$
本文	0.020 5	0.127	0.041	0.099
传统	0.027 6	0.169	0.051	0.136

3.2 小扰动工况

该部分仿真通过常规小扰动工况下的调频性能,验证所提方法一致性控制策略能够有效利用电网调频死区内(储能电站退出调频阶段)改善储能电站SOC一致性的可行性,还能够获得更好的频率调节效果。如图8所示,传统方法下的电网频率波动为 $-0.037 2 \sim 0.033 6$ Hz,而本文方法下电网频率波动为 $-0.026 7 \sim 0.014 3$ Hz。具体来说,传统方法和本文方法下电网的最大频率偏差分别为0.037 2、0.026 7 Hz,频率偏差均方根分别为0.072 9、0.018 0 Hz,频率调节效果提升了75.3%。这是由于传统方法并未利用系统死区场景,而在储能电站存在SOC均衡需求时,本文方法可以有效利用频率死区内的净功率波动。具体而言,若系统频率高于额定频率,则说明存在供电功率大于负荷用电功率的情况,且由于尚在调频死区内,火电等常规机组并不能参与频率调节,在本文控制策略下,储能电站2、3将利用系统净功率盈余进行SOC均衡操作,在满足SOC均衡需求的同时亦实现系统频率波动的抑制。

不同方法下3个储能电站的SOC波动曲线如图9所示,当采用本文方法时,在初始SOC分别为0.70、0.40、0.30的条件下,最终SOC分别达到了0.60、0.43、0.36。由于电网大部分时间的频率偏差

均在死区附近或者死区内,也即储能电站大部分时间是处于退出调频阶段,故此时储能电站的SOC均衡性调节可以有效地为下阶段的一次调频任务做好准备,这表明本文方法具有较强的适应性。利用电网频率死区内的随机负荷波动进行储能电站SOC均衡调节,不仅可以进一步改善调频效果,且能减小储能电站过充过放的可能性。

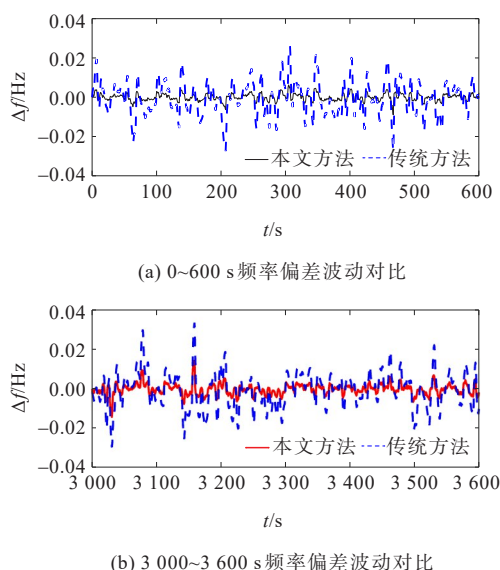


图8 小扰动下频率偏差曲线

Figure 8 Frequency deviation under small load disturbance

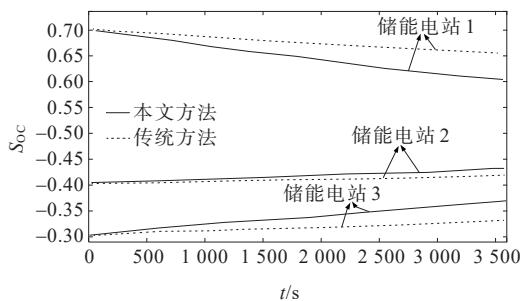


图9 小扰动下SOC变化曲线

Figure 9 SOC variation under small load disturbance

相较而言,由于传统方法仅仅考虑储能电站参与一次调频时的SOC维持效果,其在1 h内小扰动工况下3个电站的SOC分别为0.65、0.42、0.33。相较于本文方法下的0.60、0.43、0.36,传统方法下的SOC均衡性较差,在参与下一阶段调频需求时需要进行梯次化调用。换言之,传统方法下当区域内若干个储能电站的SOC出现较大差异时,仅靠下垂系数调整无法保证储能电站的安全运行,需要根据剩余电量进行排序,逐个调用参与调频,这种调用方

法属于SOC不平衡产生后的“补救”措施,属于被动调节,不利于储能资源的高效利用及储能电站的长时间安全运行。

小扰动下传统机组调频出力如图10所示,储能电站使用传统方法使得火电机组分别在1 417、3 159 s时进行了出力调整,参与一次调频,而使用本文方法的火电机组在1 h的小扰动工况下均未参与出力调整,说明本文方法不仅获得更好的频率调节性能,而且较好地缓解了火电机组的调频压力。

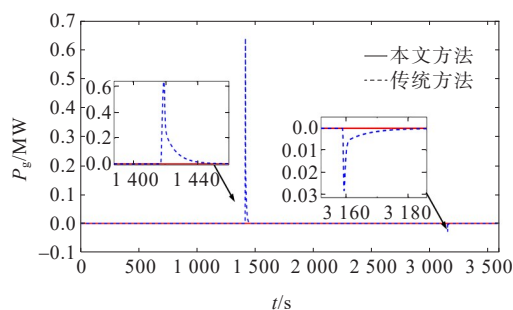


图10 小扰动下传统机组调频出力

Figure 10 Output power of frequency regulation of conventional generator under small load disturbance

综上所述,在常规小扰动工况下,本文方法相对传统方法在频率调节效果指标方面提升了75.3%,3个储能电站在SOC均衡指标方面分别提升了13.7%、9.9%、12.4%,具体指标参数如表4所示。由此可见,本文方法能够在退出调频的情况下,利用不同荷电状态储能电站的调频能力获得更优的系统调频效果,且有利于各储能电站的SOC均衡性调节,为储能电站在调频阶段的统筹调度发挥聚合效应提供有利条件。

表4 小扰动工况下对应调频指标

Table 4 Frequency regulation index under small load disturbance

方法	f_{rms}	$Soc_{,rms1}$	$Soc_{,rms2}$	$Soc_{,rms3}$
本文	0.018 0	1.928	0.625	1.511
传统	0.072 9	2.235	0.694	1.725

4 结语

本文针对多个分布式储能电站参与一次调频的SOC均衡问题,兼顾系统调频以及电站自身安全

运行需求,提出了考虑SOC均衡需求的分布式储能电站协同调频控制策略。该策略通过分析不同频率波动区间下系统调频功率及储能SOC均衡需求的耦合特性,使储能电站可以在不同调频阶段充分利用系统的净功率波动进行自身SOC均衡调节,从而在不增加传统机组调频负担的前提下,实现系统频率的稳定调节和储能资源的高效利用。仿真结果表明本文方法与传统方法相比,有助于储能电站的安全稳定运行及调频能力的聚合利用。下一步将对储能电站的储能类型、充放电损耗和老化问题等作进一步研究。

参考文献:

- [1] 许海园,程帆,徐业琰,等.基于分布式光伏和ZIP负荷协同的系统频率控制方法[J].智慧电力,2022,50(4):43-50.
XU Haiyuan, CHENG Fan, XU Yeyan, et al. System frequency control method based on coordination between distributed photovoltaic and ZIP load[J]. Smart Power, 2022,50(4):43-50.
- [2] 李铁成,闫鹏,胡雪凯,等.光伏高占比系统中储能辅助调频控制策略研究[J].太阳能学报,2023,44(8): 282-291.
LI Tiecheng, YAN Peng, HU Xuekai, et al. Research on energy storage assisted frequency modulation control strategy in photovoltaic high duty cycle system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2023,44(8):282-291.
- [3] KNAP V, CHAUDHARY S K, STROE D L, et al. Sizing of an energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016,99: 1-10.
- [4] 王博,杨德友,蔡国伟.高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J].电网技术,2020,44(8): 2998-3006.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review on inertia related problems of power system under high proportion of new energy access [J]. Power Grid Technology, 2020,44(8): 2998-3006.
- [5] 王凯丰,谢丽蓉,乔颖,等.电池储能提高电力系统调频性能分析[J].电力系统自动化,2022,46(1):174-181.
WANG Kaifeng, XIE Lirong, QIAO Ying, et al. Analysis of frequency regulation performance of power system improved by battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(1):174-181.
- [6] 李建林,牛萌,周喜超,等.能源互联网中微能源系统储能容量规划及投资效益分析[J].电工技术学报,2020,35(4):874-884.
LI Jianlin, NIU Meng, ZHOU Xichao, et al. Energy storage capacity planning and investment benefit analysis of micro-energy system in energy interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 874-884.
- [7] 李军徽,侯涛,穆钢,等.电力市场环境下考虑风电调度和调频极限的储能优化控制[J].电工技术学报,2021,36(9):1791-1804.
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Optimal control strategy for energy storage considering wind farm scheduling plan and modulation frequency limitation under electricity market environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021,36(9):1791-1804.
- [8] 鲁鹏,田浩,武伟鸣,等.需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑负荷峰谷模型[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):42-51.
LU Peng, TIAN Hao, WU Weiming, et al. Demand side energy hub and energy storage cooperate to smooth peak and valley and improve wind power consumption model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1):42-51.
- [9] 文贤旭,张世海,邓彤天,等.大容量电力储能调峰调频性能综述[J].发电技术,2018,39(6):487-492.
WEN Xiankui, ZHANG Shihai, DENG Tongtian, et al. A summary of large capacity power energy storage peak regulation and frequency adjustment performance[J]. Power Generation Technology, 2018,39(6):487-492.
- [10] 丁冬,刘宗歧,杨水丽,等.基于模糊控制的电池储能系统辅助AGC调频方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(8):81-87.
DING dong, LIU Zongqi, YANG Shuili, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2015,43(8):81-87.
- [11] 颜湘武,宋子君,崔森,等.基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术学报,2020,35(3):530-541.
YAN Xiangwu, SONG Zijun, CUI Sen, et al. Primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on variable power point tracking and supercapacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(3):530-541.

- [12] 乔志杰,马临超.适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J].高压电器,2022,58(12):75-84.
QIAO Zhijie, Ma Linchao. Research on large-scale energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 75-84.
- [13] HERNÁNDEZ J C, SANCHEZ-SUTIL F, VIDAL P G, et al. Primary frequency control and dynamic grid support for vehicle-to-grid in transmission systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 100: 152-166.
- [14] 马智慧,李欣然,谭庄熙,等.考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J].电工技术学报,2019,34(10):2102-2115.
MA Zhihui, LI Xinran, TAN Zhuangxi et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [15] HERNANDEZ J C, BUENO P G, SANCHEZ-SUTIL F. Enhanced utility-scale photovoltaic units with frequency support functions and dynamic grid support for transmission systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(3): 361-372.
- [16] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等.国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J].电力系统自动化,2017,41(11):8-16+38
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16+38.
- [17] 严干贵,刘莹,段双明,等.电池储能单元群参与电力系统二次调频的功率分配策略[J].电力系统自动化,2020,44(14):26-34.
YAN Gangui, LIU Ying, DUAN Shuangming et al. Power distribution strategy for battery energy storage unit group participating in secondary frequency regulation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 26-34.
- [18] 郭伟,赵洪山.基于改进分布式一致性算法的电池储能阵列分组控制策略[J].电工技术学报,2019,34(23):4992-5000.
GUO Wei, ZHAO Hongshan. Grouping control strategy of battery energy storage array system based on an improved distributed consensus algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4992-5000.
- [19] 李军徽,侯涛,严干贵,等.计及调频成本和荷电状态恢复的多储能系统调频功率双层优化[J].中国电机工程学报,2021,41(23):8020-8033.
LI Junhui, HOU Tao, YAN Gangui, et al. Two-layer optimization of frequency modulation power in multi-battery energy storage system considering frequency modulation cost and recovery of state of charge[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8020-8033.
- [20] 苗福丰,唐西胜,齐智平,等.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 Xicheng, QI Zhiping, et al. 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.
- [21] 赵良德,梁晓伟,庄磊,等.电力市场下的分布式模型预测负荷频率控制[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):109-115.
ZHAO Liangde, LIANG Xiaowei, ZHUANG Lei, et al. Distributed model predictive load frequency control in electricity market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 109-115.