

基于 ENE 指标的储能系统 SOC 控制策略

李明珀¹,孙志媛¹,郑琨¹,刘默斯¹,高立克²

(1.广西电网有限责任公司电力科学研究院,广西 南宁 530023;

2.广西电网有限责任公司,广西 南宁 530000)

摘要:随着新能源发电规模的不断增大和锂电池成本的持续降低,储能技术逐渐成为实现“双碳”目标的重要支撑技术,然而储能系统的荷电状态(SOC)过高或过低都会对其使用寿命造成影响,需要通过控制策略来避免储能系统过充或过放。因此,提出了基于 ENE 指标的储能系统 SOC 控制策略,借鉴轨道线(ENE)指标在进行股价分析时轨道趋势的研判作用,敏锐觉察储能系统运行过程中 SOC 方向的改变趋势,在 SOC 偏移超过安全范围且变化速率过快时采取控制措施来避免过充或过放。仿真结果表明,所提策略能够有效识别储能能在参与调峰调频的过程中出现的 SOC 过高或过低的风险情况,及时采取预防性措施,延长储能系统的使用寿命。

关键词:储能系统;荷电状态;ENE 指标;控制策略

中图分类号:TM28 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25908

SOC Control Strategy of Energy Storage System Based on ENE Index

LI Mingbo¹, SUN Zhiyuan¹, ZHENG Kun¹, LIU Mosi¹, GAO Like²

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, Guangxi, China;

2. Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: With the increasing scale of new energy power generation and the continuous reduction of lithium battery cost, energy storage technology has gradually become an important supporting technology to achieve the goal of "double carbon". However, the state of charge (SOC) of the energy storage system is too high or too low, which will affect its service life. It is necessary to avoid overcharge or overdischarge of the energy storage system through control strategies. Therefore, the SOC control strategy of energy storage system based on envelope (ENE) index was proposed. Based on the analysis of the track trend of ENE index in stock price analysis, the change trend of SOC direction during the operation of energy storage system is keenly aware. When the SOC offset exceeds the safe range and the change rate is too fast, control measures are taken to avoid overcharge or overdischarge. The simulation results show that the strategy proposed can effectively identify the risk of too high or too low SOC in the process of energy storage participating in peak shaving and frequency modulation, and take preventive measures in time to prolong the service life of the energy storage system.

Key words: energy storage system; state of charge (SOC); ENE index; control strategy

在实现“碳达峰”和“碳中和”的大背景下,我国正在大力发展新能源发电^[1]。随着新能源在整个能源体系中所占比重的快速增加,新能源发电的天然不稳定性越来越受到人们关注。风电、光伏发电本身的波动性和间歇性决定了灵活性将是新的能源系统必不可少的组成部分,而储能正好能够满足新的能源系统对灵活性的需求。因此,通过储能技术实现可再生能源大规模接入,

从而推动能源绿色低碳转型的路径被业界寄予厚望^[2]。

目前,根据电能的转换形式,储能可以分为机械储能、化学储能、电化学储能、电储能和热储能,其中运用最广泛的是电化学储能,近年来新能源装机项目中,在电化学储能技术中占比最大的为锂离子电池^[3]。储能具有消除电力峰谷差、实现风电、光伏等新能源平滑输出、调峰调频和

基金项目:广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20222121)

作者简介:李明珀(1985—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与分析,Email:546066282@qq.com

备用容量等作用^[4],在新能源电源侧加装储能装置的方式,可以实现新能源发电系统的持续稳定出力,有效减少新能源发电对电网的冲击。

SOC过高或过低都会对储能系统的使用寿命造成影响,导致储能系统成本增加。而目前主流的控制策略对储能系统的SOC控制较为粗略,只是将储能的SOC作为一个简单的上下限约束条件,而未考虑SOC过高或过低对储能电池带来的损伤问题。

在储能系统SOC控制策略方面,文献[5]针对由多个储能单元组成的大规模电池储能系统在参与功率调节时由于不规律的充放电而导致的储能单元健康状态和荷电状态不一致性问题,提出了考虑电池储能系统中单体电池健康状态及荷电状态一致性的功率优化分配策略。文献[6]针对分布式储能系统中电池由于各种因素不一致而导致的SOC极度不均衡问题,提出一种基于离散时域预测功率模型的电池SOC均衡优化控制策略。文献[7]针对分布式储能单元之间由于不合理分配而导致的SOC不均衡问题,提出一种基于模糊控制的SOC均衡控制策略。文献[8]针对分布式电池储能系统SOC不均衡的情况,基于模型预测控制实现多智能体系统的SOC分组均衡策略,使各电池单元根据自身的SOC对总功率进行自适应分配,实现SOC的动态均衡。文献[9]针对微电网孤岛运行时由于分布式储能单元与公共接线点间的线路阻抗不同而导致SOC均衡效果较差的情况,在SOC下垂控制中引入积分环节对输出的电流偏差进行补充,提高了SOC均衡速度。

以上文献均从储能电池SOC均衡性问题出发,提出不同方向的控制策略使储能系统中各电池SOC保持均衡,但对单个储能电池SOC的控制策略没有考虑。文献[10]将考虑SOC安全运行区间的下垂系数引入一次调频策略中,使储能的充放电功率在SOC较高或较低时做出相对应的改变,将储能SOC维持在期望值附近。文献[11]将考虑SOC的充放电饱和能力函数引入模型预测控制,实现对储能SOC和并网功率波动量两者控制比重的灵活调节。文献[12]将储能SOC分为偏高区、正常工作区和偏低区3个区域,并基于此提出考虑SOC控制的储能削峰填谷策略。文献[13]将储能SOC分为禁区、高位区、次高区、自主调节区、次低区和低位区6个区域,并基于此提出SOC

自恢复优化控制策略,当SOC距离最优区域越远时以更高的自恢复速度进行恢复。文献[14]根据储能SOC的最小值、较低值、偏低值、偏高值、较高值和最大值6个边界对SOC进行分区,并提出指数形式的充放电自恢复需求系数,实现SOC较小时以较大的功率充电或以较小的功率放电,SOC较大时以较大的功率放电或以较小的功率充电。

传统的储能系统SOC控制策略主要有恒功率恢复策略(constant recovery power, CRP)、BSH(battery SOC hold)控制策略和CFR(charging with frequency regulation)控制策略^[15]。恒功率恢复策略是当系统的峰值调节和频率调制需求到达死区时,储能系统以恒定功率充放电以维持储能系统的SOC,该种方法最大的问题是缺乏灵活性;BSH控制策略是在SOC较高的时候以较大的功率放电,SOC较低的时候以较大的功率充电;CFR控制策略在BSH控制策略的基础上增加了额外计划预定功率信号,该类方法存在着由于没有死区而导致储能SOC在最优值附近振荡的问题。上述的控制策略本质都是在SOC达到某值时采取控制,对SOC在短时间内急剧上升或下降的情况没有考虑,若在该情况下没有及时采取控制则可能会导致SOC过限的问题发生。

针对上述问题,为了进一步优化储能系统的SOC,提高储能的使用寿命,本文借鉴ENE指标在进行股价分析时轨道趋势的研判作用,敏锐觉察储能系统运行过程中SOC方向的改变趋势,对于储能在进行调峰调频的过程中可能会出现SOC过高或过低甚至过限的问题,在SOC偏移超过安全范围且变化速率过快时采取控制措施来避免过充或过放。为验证这一控制策略的有效性,选取包含若干个风电场和光伏电站的能源基地某日的实时运行数据作为典型日进行仿真计算,结果证明了该策略的有效性。

1 基于ENE指标的储能系统SOC控制策略

1.1 移动平均值

移动平均值作为历史悠久且运用广泛的技术分析工具,常常用在计算股票的移动平均线、存货成本等方面。移动平均值是指采用逐项递进的办法,将时间序列中的若干项数据进行算术平均计算所得到的一系列平均数,若进行算术平

均计算的数据项数为 N ,则称为 N 期移动平均值,因此 N 也被称为计算移动平均值的时间窗口。

将多个时刻的移动平均值连起来形成移动平均线,移动平均线具有追踪趋势的特性,能够表示股价的趋势方向,并追踪这个趋势。移动平均线存在一定的滞后效应,在股价原有趋势发生反转时,移动平均线的追踪趋势往往过于迟缓,除此之外由于移动平均值的计算方法,移动平均线还具有稳定性,通常越长期的移动平均线,越能表现稳定的特性,即移动平均线不会轻易向上或向下,必须等到股价趋势真正明朗了,才会选择延伸的方向。移动平均线的这些特性使得其能够简单直观地反应股价波动的大体趋向,因此可将该优势运用到本文策略中的储能系统 SOC 的变化趋势判断当中。

在本文中,将一天 24 h 以 min 为分辨率采集数据,得到 1 440 个采集点。选择适当的计算周期 N ,采集包括当前时刻在内的过去 N min 的储能 SOC,并计算其算术平均数,作为当前 t 时刻的移动平均值。当前 t 时刻移动平均值的公式如下式所示:

$$MA^t = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t SOC^i \quad (1)$$

式中: MA^t 为当前 t 时刻的移动平均值; N 为计算移动平均值的时间窗口; SOC^i 为第 i 时刻的储能荷电状态。

1.2 ENE 指标

ENE 指标,中文名称是轨道线,由上轨线(UPPER)和下轨线(LOWER)及中轨线(ENE)组成,轨道线的优势在于其不仅具有趋势轨道的研判作用,也可以敏锐地觉察股价运行过程中方向的改变。轨道线的形式与布林线类似,但又有本质的区别,布林线是利用统计学中标准差的原理来表达股价波动率的指标,而轨道线本质上为移动平均线的变形应用, M_1 和 M_2 为均线位移量控制参数,也是上、下振幅控制参数。上轨线、下轨线和中轨线在当前 t 时刻的值的计算公式分别如下式所示:

$$UPPER^t = (1 + \frac{M_1}{100}) \cdot MA^t \quad (2)$$

$$LOWER^t = (1 - \frac{M_2}{100}) \cdot MA^t \quad (3)$$

$$ENE^t = \frac{UPPER^t + LOWER^t}{2} \quad (4)$$

式中: $UPPER^t$, $LOWER^t$, ENE^t 分别为上轨线、下轨线和中轨线在当前 t 时刻的值; M_1 , M_2 分别为上轨线和下轨线的偏离幅度。

在实际的股票市场中,应用 ENE 指标的 5 项基本原则如下:

1) 当轨道线 ENE 向下缓慢运行时,如果股价跌穿下轨线 LOWER 后,很快重新上涨穿越 LOWER 时可以买入。

2) 当轨道线 ENE 向上缓慢运行时,如果股价跌至下轨线 LOWER 附近后重新恢复上涨行情,这时即使没有击穿 LOWER 也可以买入。

3) 当轨道线 ENE 向上缓慢运行时,如果股价上涨穿越上轨线 UPPER 后,很快掉头向下并跌穿上轨线 UPPER 时可以卖出。

4) 当轨道线向下缓慢运行时,如果股价涨至上轨线 UPPER 附近后,出现掉头下跌行情,这时即使股价没有触及上轨线 UPPER 也可以卖出。

5) 当股市处于急速上涨的过程中,需要在股价向上突破上轨线 UPPER 时为买入时机;当股市处于熊市中,在股价处于急速下跌过程中,需要以股价向下跌穿下轨线 LOWER 时为卖出时机。

结合储能 在新能源系统中出力的特点和规律,可以形成与 ENE 指标在股票市场中应用的基本原则类似的储能 SOC 控制策略。

1.3 相对位置指标和偏移指标

为反映当前 t 时刻储能 SOC 在轨道线通道中的相对位置和偏移期望值的程度,根据上轨线、下轨线在当前 t 时刻的值计算相对位置指标 L_{soc}^t ,具体的计算公式如下:

$$L_{soc}^t = \frac{SOC^t - LOWER^t}{UPPER^t - LOWER^t} \quad (5)$$

式中: SOC^t 为当前 t 时刻的储能 SOC; L_{soc}^t 为当前 t 时刻的相对位置指标。

不同的 L_{soc}^t 值表示储能 SOC 的位置,具体情况如表 1 所示。

为了减少 SOC 的优化次数,本文引入了 SOC

表 1 相对位置指标和储能状态对照表

Tab.1 Comparison table of relative position index and energy storage state

L_{soc}^t 取值	储能 SOC 状态
$(-\infty, 0)$	已越过下轨道线通道,即向下突破下轨线
0	正好处于下轨线
$(0, 1)$	处于轨道线通道内
1	正好处于上轨线
$(1, +\infty)$	已越过上轨道线通道,即向上突破上轨线

偏离指标 D_{soc}^t , 以规避此类问题。根据包括当前 t 时刻在内的过去 N min 的储能 SOC 偏移期望值的程度计算 SOC 偏移指标 D_{soc}^t :

$$D_{soc}^t = \sqrt{\frac{1}{T_N} \sum_{i=t-T_N+1}^t (SOC^i - 0.5)^2} \quad (6)$$

式中: T_N 为储能 SOC 考核时段长度。

为了保证储能 SOC 能够充分利用, 且防止过充过放的问题, 设置 SOC 偏移指标限值 D_{max} , 其含义为 SOC 偏移中线的最大偏移量。当 t 时刻的 D_{soc}^t 大于 D_{max} 时, 表明此时的 SOC 值偏移量较大, 可以根据 ENE 指标情况进行 SOC 优化, 反之不需要进行优化。 D_{max} 计算如下式所示:

$$D_{max} = K \cdot \sqrt{\left(\frac{0.9P_N}{T_N \cdot C_B} - 0.5\right)^2} \quad (7)$$

式中: K 为计算 SOC 偏移指标限值的系数, 通过改变 K 的取值来改变 SOC 偏移指标限值的大小, 从而改变储能 SOC 控制的灵敏度; P_N 为储能额定出力; C_B 为储能额定容量。

1.4 基于ENE指标的储能系统SOC控制策略

根据轨道线的特性, 我们可以结合储能系统实际运行情况与 SOC 偏移指标, 调节储能系统的输出功率, 从而实现储能 SOC 优化。该策略的控制流程如下:

1) 读取当前 t 时刻时间窗口的储能 SOC 值, 根据式(5)计算出当前 t 时刻的 SOC 相对位置指标 L_{soc}^t , 根据式(6)计算出当前 t 时刻的 SOC 偏移指标 D_{soc}^t , 以及根据式(7)计算出 SOC 偏移指标限值 D_{max} ;

2) 若当前 t 时刻储能 SOC 处于上半区(即储能 SOC 大于 0.5)且向上突破上轨线(即 $L_{soc}^t > 1$), SOC 偏移指标 D_{soc}^t 大于 SOC 偏移指标限值 D_{max} , 且下一时刻储能的原计划分配出力小于 0, 此时储能 SOC 控制策略动作, 改变未来时刻的储能出力为 $P_B^{t+1} > 0$;

3) 若当前时刻储能 SOC 处于下半区(即储能 SOC 小于 0.5)且向下突破下轨线(即 $L_{soc}^t < 0$), SOC 偏移指标 D_{soc}^t 大于 SOC 偏移指标限值 D_{max} , 且下一时刻储能的原计划出力大于 0, 此时储能 SOC 控制策略动作, 改变未来时刻的储能出力为 $P_B^{t+1} < 0$;

4) 根据电池储能 SOC 优化的结果, 将 $t+1$ 时段的储能出力更改后造成的出力差由能源基地其他调节电源承担。

储能 SOC 优化流程图如图 1 所示。

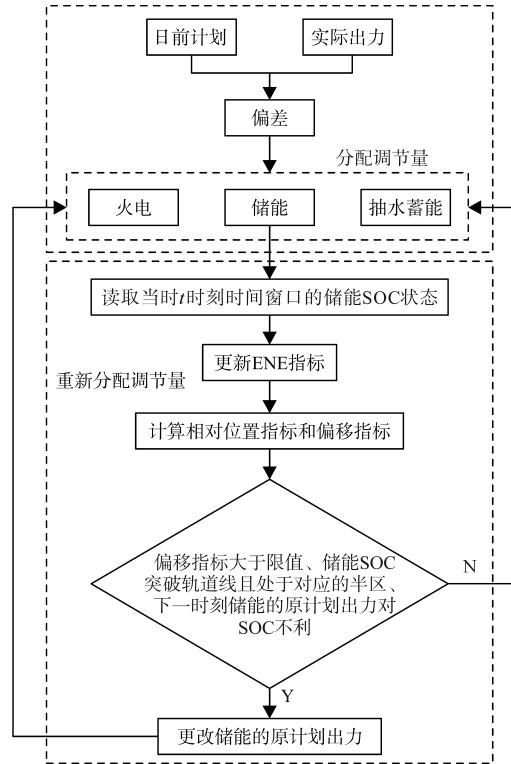


图 1 储能 SOC 优化流程

Fig.1 Energy storage SOC optimization process

2 算例分析

2.1 参数设置

选取 5 个风电场、5 个光伏电站、2 台火电机组、2 个储能电站和 2 个抽水蓄能电站组成能源基地, 其中 2 台火电机组、2 个储能电站和 2 个抽水蓄能电站的参数分别相同。

将这些风电场、光伏电站和火电机组某日的实时运行数据作为典型日, 实时运行数据来源于某些电厂实际出力的模拟结果, 它们按能源基地目前调度计划进行实时跟踪发电, 并通过线性插值法将目前调度计划 15 min 的时间尺度拓展为 1 min。

计划值与实时出力的偏差绝对值大于 30 MW 时由火电、储能和抽蓄进行补偿, 2 台火电机组和 2 个储能站的补偿比例均为 0.05, 2 台抽蓄机组的补偿比例均为 0.4; 当功率偏差绝对值小于 30 MW 时由火电和储能进行补偿, 2 台火电机组和 2 个储能站的补偿比例均为 0.25。

火电机组参数为: 装机容量 300 MW, 最大出力 300 MW, 最小出力 150 MW, 爬坡速度 9 MW/min。

储能电站参数为: 额定容量 50 MW·h, 额定功率 25 MW, SOC 初值 50%, SOC 上、下限值 90%

和10%,充/放电效率90%。

抽水蓄能参数为:最大发电功率300 MW,最小小发电功率30 MW,最大抽水功率300 MW,最小抽水功率30 MW,扬程范围276~303 m。

ENE指标选择计算移动平均值的时间窗口 N 为60、权重参数 M_1 和 M_2 均为8,取计算SOC偏移指标限值的系数 K 为0.3、储能SOC考核时段长度 T_N 为60,计算得出SOC偏移指标限值 $D_{\max} = 0.1970$,设定SOC的最优区域为0.3~0.7。

2.2 仿真分析

从00:00开始进行跟踪发电,并基于ENE指标形成的控制策略对储能SOC进行控制,跟踪发电和储能SOC控制1440个时刻。

各个时刻跟踪补偿前、后日前负荷与机组实际出力的差值对比如图2所示。由图2可知,跟踪补偿前日前负荷与机组实际出力的差值大多数时段处于[-50,50]区间,最高可达到100 MW,机组实际出力与日前负荷严重不符的情况将会对电力系统的稳定运行造成不良的影响,跟踪补偿后大多数时段的功率差值无限接近于0,部分时段存在功率差值,但最大不超过0.4 MW。由此可见,在进行储能SOC控制的情况下跟踪发电计划仍然基本满足要求,避免了大量的弃风弃光。

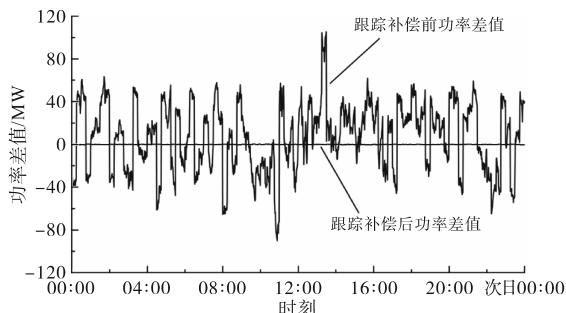


图2 日前负荷与机组实际出力差值
Fig.2 Difference between daily load and actual unit output

采取基于ENE指标的储能SOC控制策略后各个时刻储能SOC状态如图3所示。由图3可知,控制策略在18:00左右通过改变未来的储能出力使SOC回升,使储能SOC的偏移量在超出最优区域后及时减小。而没有采取储能SOC控制策略的储能SOC偏移量在超出最优区域后持续增大,由于持续的放电操作导致储能SOC低于0.2,使储能的放电裕度减小,若此时电力系统突发的状况需要储能持续高强度地进行放电操作,最终可能造成储能SOC突破下限的情况发生,为储能的稳定运行增添了不确定因素。

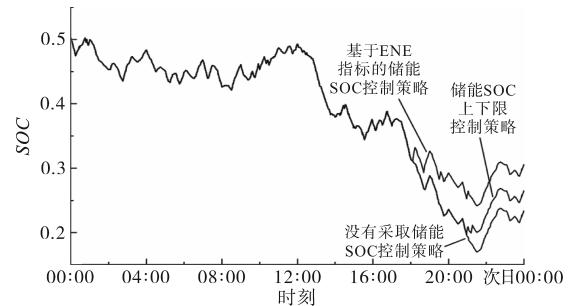


图3 储能系统SOC状态

Fig.3 SOC status of energy storage system

图3还将传统的储能SOC上下限控制策略与基于ENE指标的储能SOC控制策略相对比,由图3可知,采取上下限控制的储能SOC在超过设定的下限之后才通过改变未来时刻的储能出力使SOC适当回升,而基于ENE指标的储能SOC控制策略在SOC偏移最优区域超过一定程度且正好处于急剧下降的情况下采取控制,避免了在21:00之后SOC下降至0.2的情况。通过两种控制策略的对比,可以看出传统的储能SOC上下限控制策略没有考虑储能系统的充放电裕度问题,只考虑在SOC超过限值时采取控制,而基于ENE指标的储能SOC控制策略充分考虑这一问题,在判断是否采取控制的条件中加入SOC变化速率这一因素,在SOC偏移最优区域超过一定程度的前提下,当SOC朝着不利的方向急剧变化时采取控制,避免了SOC过分接近上下限的情况,增大了储能系统的充放电裕度。

储能SOC状态的ENE指标如图4所示,由图3可知,储能SOC在18:00左右采取控制策略,由图4b可看出,储能SOC在18:00左右急剧下降并向下突破下轨线,且下一时刻储能的原计划出力对SOC不利,根据上文提出的控制策略,并在该仿真中为了增强控制的效果,改变未来3个时刻的储能出力为10 MW,使储能SOC及时回升。而在12:00和15:00之间虽然存在储能SOC向下突破下轨线且正好处于下半区,同时下一时刻储能的原计划出力也会加剧SOC偏移的情况,但由于储能SOC偏移没有超过安全范围,因此下一时刻控制策略没有动作。同时在21:00至次日00:00之间的时段储能SOC急剧上升并向上突破上轨线,但此时储能SOC所处的半区为下半区且下一时刻储能的原计划出力将会减少SOC偏移量,因此下一时刻控制策略也没有动作。由此可见若想让储能SOC采取控制策略,需要同时满足本文

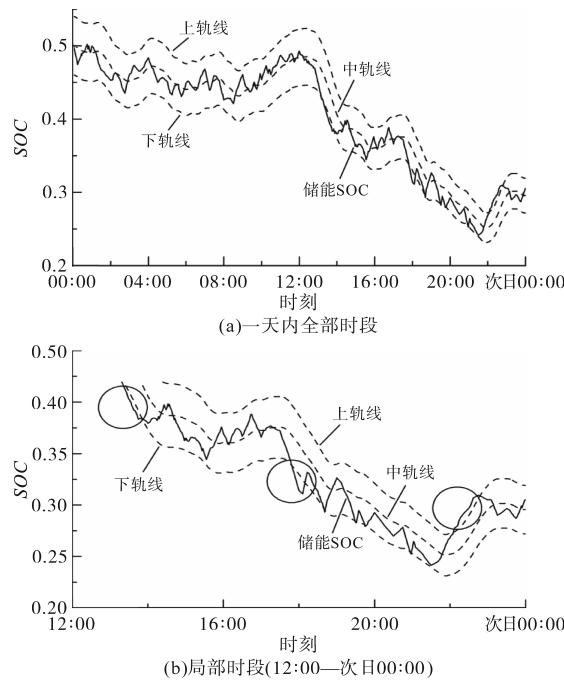


Fig.4 ENE index for the SOC status of the energy storage system

1.4 节提出的基于 ENE 指标的储能系统 SOC 控制策略中 SOC 处于上半区或下半区的全部条件。

根据新能源系统中储能出力的规律可知,储能系统的 SOC 状态浮动在最优区域时,具有的充放电裕度通常能够应对电力系统中的突发状态,而当储能 SOC 急剧上升或下降导致自身过分接近上下限值时,储能系统的充电裕度或放电裕度也会随着减小,若此时电力系统中突发的状况需要储能持续高强度地进行充电操作或放电操作,会极大地增加储能 SOC 过限的可能性。用 ENE 指标来表示储能 SOC 不仅可以直观地反映出急剧变化的趋势,还可以敏锐地察觉储能 SOC 的变化方向。将采取控制策略前后储能 SOC 状态相对比,可以看出通过本文所提的基于 ENE 指标的控制策略在进行跟踪发电时对储能 SOC 状态采取控制,在满足跟踪发电基本要求的情况下有效地避免了储能 SOC 过高或过低,增大了储能系统的充放电裕度。

3 结论

储能系统每次的充放电都会对 SOC 造成变化,SOC 过高或过低都会对储能系统的使用寿命造成影响。为避免储能系统过度充电或放电导致 SOC 过限问题发生,减少储能系统的成本,提高风光储互补发电系统的经济性,从而促进新能源的发展,本文充分利用轨道线在进行股票分析

时的优势,提出基于 ENE 指标的储能系统 SOC 控制策略,在 SOC 偏移超过安全范围且变化速率过快时采取控制措施,对于储能正在进行调峰调频的过程中可能会出现 SOC 过高或过低甚至过限的问题采取预防性措施,基于 ENE 指标的储能系统 SOC 控制策略的具体步骤流程如下:

1) 将一天以 min 为分辨率得到 1 440 个采集点,选择适当的计算周期 N ,采集包括当前时刻在内的过去 N min 的储能 SOC,计算算术平均数作为移动平均值,根据移动平均值计算 ENE 指标,并根据 ENE 指标计算储能 SOC 的相对位置指标和偏移指标;

2) 根据储能 SOC 处在上半区(即储能 SOC 大于 0.5)或下半区(即储能 SOC 小于 0.5)形成不同的控制策略,设定合适的储能 SOC 偏移指标限值,将步骤 1)计算得到的储能 SOC 的相对位置指标和偏移指标代入控制策略,若控制策略的条件满足则对下一时刻的储能出力进行控制,避免储能 SOC 过限的情况发生。

仿真结果表明,采取控制策略后储能 SOC 偏移在超过安全范围后通过控制策略及时减小,对于储能 SOC 急剧上升或下降这类易发生过限的情况采取控制,有效地避免了储能 SOC 的过限。

本文围绕储能 SOC 的过限问题提出了基于 ENE 指标的控制策略并对此展开了研究,但仍存在一些未涉及或仍待后续研究解决的问题,如:若满足控制策略的条件对下一时刻的储能出力进行控制,在本文中只是简单地将下一时刻储能的出力修改成合适的固定值,没有结合文献[9]中的 SOC 自恢复优化控制策略;在研究 SOC 控制策略时没有考虑储能的经济成本因素;等等。

参考文献

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [2] 郑琼,江丽霞,徐玉杰,等.碳达峰、碳中和背景下储能技术研究进展与发展建议[J].中国科学院院刊,2022,37(4):529-540.
ZHENG Qiong, JIANG Lixia, XU Yujie, et al. Research progress and development suggestions of energy storage technology

- under background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4):529–540.
- [3] 李根,崔启利,林庆仁,等.浅谈新能源发电侧储能技术的应用现状[J].中国设备工程,2023(9):242–244.
- LI Gen, CUI Qili, LIN Qingren, et al. Discuss the application status of energy storage technology on the renewable energy generation side[J]. China Plant Engineering, 2023 (9) : 242–244.
- [4] 孙玉树,杨敏,师长立,等.储能的应用现状和发展趋势分析[J].高电压技术,2020,46(1):80–89.
- SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1):80–89.
- [5] 段双明,于航,刘聪,等.考虑储能单元健康状态与荷电状态一致性的BESS功率分配策略[J].电力系统自动化,2023,47(5):65–73.
- DUAN Shuangming, YU Hang, LIU Cong, et al. Power allocation strategy for battery energy storage system considering consistency of state of health and state of charge of energy storage units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (5) : 65–73.
- [6] 汪晋安,许建中.分布式储能型MMC电池荷电状态均衡优化控制策略[J].电力自动化设备,2023,43(7):44–50.
- WANG Jin'an, XU Jianzhong. SOC balancing optimal control strategy amongst batteries in MMC-DES[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7):44–50.
- [7] 班国邦,徐玉韬,袁旭峰,等.基于模糊理论的柔性配电网多储能SoC均衡控制策略研究[J].电力大数据,2022,25(12):1–8.
- BAN Guobang, XU Yutao, YUAN Xufeng, et al. Research on balanced control strategy of energy storage SoC based on fuzzy rules[J]. Power Systems and Big Data, 2022, 25 (12):1–8.
- [8] 施锐,张新燕,刘莎莎,等.基于SOC均衡的分布式电池储能系统协同控制策略[J].太阳能学报,2023,44(9):546–552.
- SHI Rui, ZHANG Xinyan, LIU Shasha, et al. Co-control strategy of distributed battery energy storage system based on SOC equalization[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(9):546–552.
- [9] 么钟然,孙丽颖.考虑线路阻抗的分布式储能SOC均衡控制策略[J].中国电力,2024,57(9):238–246.
- YAO Zhongran, SUN Liying. Balanced control strategy of distributed energy storage SOC considering line impedance[J]. Electric Power, 2024, 57(9):238–246.
- [10] 陈宏,贺惺,谭庄熙,等.考虑SOC均衡的储能电站一次调频协同控制方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(6):105–114.
- CHEN Hong, HE Li, TAN Zhuangxi, et al. Coordinated control method of primary frequency regulation for energy storage power station considering SOC balance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6):105–114.
- [11] 林莉,林雨露,谭惠丹,等.计及SOC自恢复的混合储能平抑风电功率波动控制[J].电工技术学报,2024,39(3):658–671.
- LIN Li, LIN Yulu, TAN Huidan, et al. Hybrid energy storage control with SOC self-recovery to smooth out wind power fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3):658–671.
- [12] 高利,万君.基于SOC的储能削峰填谷控制策略[J].电气应用,2022,41(7):91–97.
- GAO Li, WAN Jun. Peak shaving and valley filling control strategy of energy storage based on SOC[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(7):91–97.
- [13] 李盈,赵伟,赵立宁,等.基于电池储能SOC的调峰、调频混合控制策略[J].高压电器,2023,59(7):48–55,74.
- LI Ying, ZHAO Wei, ZHAO Lining, et al. Mixed control strategy of peak regulation and frequency modulation based on SOC of battery energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (7):48–55,74.
- [14] 侯涛.辅助新型电力系统调频的电化学储能控制策略[D].吉林:东北电力大学,2023.
- HOU Tao. Control strategy of battery energy storage system participating in frequency regulation in the new power system[D]. Jilin:Northeast Electric Power University, 2023.
- [15] 谭庄熙.电池储能参与电网调频的综合协同控制方法研究[D].长沙:湖南大学,2022.
- TAN Zhuangxi. Research on integrated collaborative control strategy of battery energy storage system participating in frequency regulation[D]. Changsha:Hunan University, 2022.

收稿日期:2024-05-06

修改稿日期:2024-07-01