

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231671

计及 SOC 影响的电化学储能系统低电压穿越控制策略

郑涛¹, 孟令昆¹, 强降雨泽¹, 马英¹, 曹虹², 余越²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 针对电化学储能现有低电压穿越控制策略未计及荷电状态(state of charge, SOC)动态特性导致其在低 SOC 场景下出现过放这一问题, 设计并引入自适应调节系数来表征低电压穿越期间 SOC 对储能单元输出有功电流的影响, 进而提出一种计及 SOC 动态特性与充放电状态的电化学储能系统低电压穿越控制策略。该控制策略基于并网规范的电压和频率要求, 结合工程实际应用对自适应调节系数进行定量设计, 使得系统故障期间储能单元输出的有功电流能够根据 SOC 大小动态调整。仿真结果表明, 该控制策略在低 SOC 场景下能够有效限制有功电流输出, 减缓放电速度, 从而避免小容量、大放电倍率储能单元出现因 SOC 越限而退出运行的风险, 并减小低电压穿越过程中多个储能单元之间的 SOC 极差。通过与传统的低电压穿越策略对比验证了所提策略的有效性。

关键词: 电化学储能; 荷电状态; 低电压穿越策略; 自适应调节系数

Low voltage ride-through control strategy for electrochemical energy storage systems taking account of SOC effects

ZHENG Tao¹, MENG Lingkun¹, QIANG Yuze¹, MA Ying¹, CAO Hong², YU Yue²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Existing low voltage ride-through (LVRT) control strategies for electrochemical energy storage do not take into account the dynamic characteristics of state of charge (SOC). This leads to over-discharge in low SOC scenarios. Thus this paper designs and introduces an adaptive regulation coefficient to characterize the effect of SOC on the output active current of the storage unit during the LVRT period. Then an LVRT control strategy for the electrochemical energy storage system is proposed by taking into account the dynamic characteristics of the SOC and the charging/discharging state. The control strategy is based on the voltage and frequency requirements of the grid-connected specification, and the adaptive regulation coefficients are quantitatively designed in combination with practical engineering applications, so that the active current output from the storage unit can be dynamically adjusted according to the SOC during a system fault. Simulation results show that this control strategy can effectively limit the active current output and slow down the discharge rate in low SOC scenarios, thus avoiding the risk of small-capacity and large-discharge-multiplication energy storage units quitting the operation because of SOC overrun, and reducing the SOC polarity difference between multiple energy storage units in the process of LVRT. The effectiveness of the proposed strategy is verified by comparing it with the conventional LVRT strategy.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Key Technique Research on Relay Protection of Electrochemical Energy Storage Station Access to System" (No. SGTYHT/21-JS-223).

Key words: electrochemical energy storage; state of charge; low voltage ride through; adaptive regulation coefficient

0 引言

储能作为新型电力系统中不可或缺的要素和能

量规模化调节的重要手段, 具有广阔的应用前景^[1-3], 同时也对储能电站接入系统继电保护关键技术提出了较高的要求, 亟待对其故障特性开展深入的研究。

低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)控制策略决定了故障期间储能有功功率和无功功率的输出, 并进一步影响储能的故障特性, 因此 LVRT

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助“电化学储能电站接入系统继电保护关键技术研究”(SGTYHT/21-JS-223)

控制策略是研究储能故障特性的前提。文献[4]提出有功优先、兼顾无功的控制策略来实现故障穿越；文献[5]提出全发无功、不发有功的控制策略支撑并网点电压，所提控制策略对于有功、无功分配均未综合考虑到储能在 LVRT 过程中支撑频率和电压的要求^[6]；文献[7-8]提出利用储能有功调节与逆变器无功调节相协调的功率控制策略来实现低电压穿越，但并未对储能的 LVRT 策略进行单独设定，其控制策略仍按照风电与光伏进行设计；文献[9]对逆变器常见的限幅策略，如有功优先、无功优先、等比例限幅和等比例有功优先进行分析，未明确指出应用于储能场景下的 LVRT 策略；文献[10]提出储能在充电状态下并网点发生电压跌落时，应由充电状态切换至放电状态，以满足 LVRT 要求，但并未明确给出 LVRT 控制策略中有功和无功电流的参考值表达式。

综上所述，在储能的 LVRT 控制策略方面，目前国内外文献较少考虑储能功率双向流动的特点以及荷电状态(state of charge, SOC)的限制和动态变化特性。事实上，随着具有大放电倍率的能量型兼顾功率型的电化学储能技术发展^[11-12]，在低电压穿越过程中若不计及 SOC 的限制，则在低 SOC 场景下或将导致 SOC 越限而退出运行情况的发生，不仅影响储能电站的正常运行，严重时还可能造成系统崩溃^[13]。此外，储能电站由多个储能单元组成，为避免由于 SOC 不同导致部分储能单元过度放电或深度充电而退出工作，需使得能量在各分布式储能单元之间均衡分布^[14-15]。对电池储能 SOC 特性的研究在电网调频中应用较多^[16-20]，而在故障穿越方面较少。因此，随着储能装机容量的不断扩大以及渗透率的提高，亟需对计及 SOC 特性的 LVRT 控制策略开展相应的研究。

针对上述问题，本文基于储能变流器技术规范中对于低电压穿越的要求，重点对具有大放电倍率储能单元的 LVRT 控制策略进行研究。首先根据储能并网规范技术要求，提出充放电状态下发生故障后，储能单元应切换运行状态以满足故障期间的频率、电压要求；然后定义自适应调节系数 K_{SOC} 来表征 SOC 对储能有功电流输出的影响，并结合工程实际，利用变斜率函数曲线对该系数进行定量设计；最后通过仿真试验验证了所提控制策略在避免储能单元过放而退出运行和减小 SOC 极差的有效性。

1 电化学储能系统及其并网控制策略

电化学储能系统(electrochemical energy storage system, EESS)由多个储能单元构成，每个储能单元

在结构上可分为电能储存与电能转换两个环节。由于单级式结构具有主拓扑简单、效率和可靠性较高等优点，因此本文以单级式结构为例对其拓扑结构进行分析，如图 1 所示。

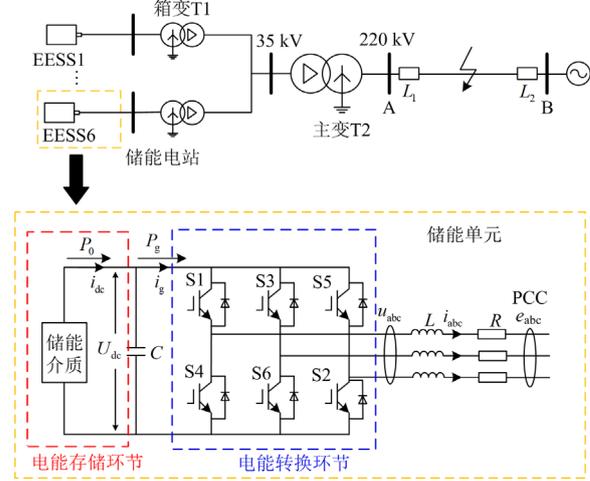


图 1 电化学储能电站及单元结构图

Fig. 1 Diagram of electrochemical energy storage power station and unit structure

由图 1 可知，PCS 端口电压和并网电流之间的物理方程如式(1)所示。

$$u_{abc} = L \frac{di_{abc}}{dt} + Ri_{abc} + e_{abc} \quad (1)$$

式中： L 与 R 分别为逆变器端口到 PCC 点之间的等效电感与电阻； u_{abc} 为桥臂电压； e_{abc} 为并网点电压； i_{abc} 为并网点电流。

EESS 通常采用 PQ 控制策略，实现平抑功率的效果^[21-22]。根据给定的 PQ 功率指令，得到功率外环的 dq 轴电流指令值 i_d^{ref} 、 i_q^{ref} ，如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} i_d^{ref} \\ i_q^{ref} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_d^2 + v_q^2} \begin{pmatrix} v_d & v_q \\ v_q & -v_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P^{ref} \\ Q^{ref} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中： v_d 、 v_q 分别为并网点电压的 d 轴和 q 轴分量； P^{ref} 、 Q^{ref} 分别为有功功率和无功功率指令值。

电流内环的控制方程为

$$\begin{cases} u_d^{ref} = e_d + Ri_d - \omega_0 Li_q + \left(K_{IP} + \frac{K_{II}}{s} \right) (i_d^{ref} - i_d) \\ u_q^{ref} = e_q + Ri_q + \omega_0 Li_d + \left(K_{IP} + \frac{K_{II}}{s} \right) (i_q^{ref} - i_q) \end{cases} \quad (3)$$

式中： i_d^{ref} 、 i_q^{ref} 和 i_d 、 i_q 分别为内环电流参考值与实际值的 d 轴和 q 轴分量； u_d^{ref} 、 u_q^{ref} 分别为外环电压参考值的 d 轴和 q 轴分量； e_d 和 e_q 分别为 PCC

点电压 d 轴和 q 轴分量; K_{p} 和 K_{i} 分别为电流内环中 PI 控制的比例、积分系数; ω_0 为电网角频率; s 为拉氏变换中的复变量。

2 SOC对LVRT控制策略的影响及改进方案

由于储能的应用场景更为灵活,其具有能量双向流动的特点,因此对于新能源较为成熟的 LVRT 控制策略^[23-24]不能直接应用于电化学储能系统中。下面将基于电化学储能系统的并网技术规范,对计及储能自身特点的 LVRT 控制策略进行研究。

2.1 电化学储能系统故障后运行状态要求

在无功电流方面,GB/T34120—2017《电化学储能系统储能变流器技术规范》规定了当电力系统发生短路故障引起电压跌落时,储能变流器注入电力系统的动态无功电流应实时跟踪并网点电压变化,动态无功电流应满足式(4)。

$$\begin{cases} I_{\text{T}} \geq 1.6 \times (0.85 - U_{\text{T}}) I_{\text{N}} & 0.2 \leq U_{\text{T}} \leq 0.85 \\ I_{\text{T}} \geq 1.04 \times I_{\text{N}} & U_{\text{T}} < 0.2 \\ I_{\text{T}} = 0 & U_{\text{T}} > 0.85 \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{T} 为储能变流器输出的动态无功电流; U_{T} 为储能变流器并网点电压标幺值; I_{N} 为储能变流器额定电流。

在有功电流方面,GB/T36547—2018《电化学储能系统接入电网技术规定》中规定了接入公共电网的电化学储能系统应满足表1的频率要求。

表1 电化学储能系统频率要求

Table 1 Frequency requirements for electrochemical energy storage systems

频率范围	运行要求
$f < 49.5 \text{ Hz}$	不应处于充电状态
$49.5 \text{ Hz} \leq f \leq 50.2 \text{ Hz}$	连续运行
$f > 50.2 \text{ Hz}$	不应处于放电状态

注: f 为电化学储能系统并网点的频率。

因此,低电压穿越过程应综合考虑无功-电压支撑与有功-频率稳定。在充电状态和放电状态下增加电流的无功分量,即向并网点输出无功可以提高并网点电压;一般认为故障发生后系统的负荷与供电不平衡造成频率下降^[25-26],因此当故障时刻储能处于充电状态时,应转为放电状态,从而避免并网点向储能输送有功导致其频率进一步下降。

2.2 SOC与自适应调节系数

现有的并网技术规范仅规定了 EESS 在不同频率范围内的运行状态要求,并未对低电压穿越过程中储能变流器输出的有功电流参考值作出明确的规

定,由于低电压穿越过程中的有功电流受到 SOC 的限制,因此需要进一步开展研究。

SOC 是 EESS 中用来表示电池剩余电量的参数,一般采用安时积分法^[27-28]获取储能电池当前的 SOC 状态值,如式(5)所示。

$$S = S_0 - \frac{1}{Q_{\text{N}}} \int_0^t I dt \quad (5)$$

式中: S 和 S_0 分别为 EESS 的当前和初始荷电状态; Q_{N} 为 EESS 的额定容量; I 为充放电电流。

由式(5)可得,充放电电流 I 与额定容量 Q_{N} 直接影响储能 SOC。此外,充放电倍率也是影响 SOC 变化的重要因素^[14]。因此在放电状态下,放电电流 I 越大、额定容量 Q_{N} 越小、放电倍率越大,则储能 SOC 下降越快,在低 SOC 场景下或将导致储能单元退出运行,影响系统稳定。

EESS 采用分层式控制结构^[29],通过对储能机组有功给定值 P^{ref} 的虚拟下垂系数进行修正,输出 $P^{\text{ref}*}$ 至储能单元,其中虚拟下垂系数与 SOC 有关,两者之间关系如式(6)所示。

$$P^{\text{ref}*} = K P^{\text{ref}} \quad (6)$$

式中: K 为虚拟下垂系数,根据 SOC 修正有功功率; $P^{\text{ref}*}$ 为修正后的有功功率指令值。

类似地,定义自适应调节系数 K_{soc} 满足 $0 \leq K_{\text{soc}} \leq 1$,同理,可推得低电压穿越期间的 dq 轴电流指令值 i^{ref} 与修正值 $i^{\text{ref}*}$ 的关系为

$$i^{\text{ref}*} = K_{\text{soc}} i^{\text{ref}} \quad (7)$$

根据上述分析,当储能单元发生故障处于放电状态时,若 SOC 较大,则应该使其输出较大的电流,加快放电速度,即采用较大的调节系数;若 SOC 较小,则与之相反,采用较小的调节系数,从而在低电压穿越期间避免退出运行的风险,并减小储能多单元之间的 SOC 极差。

2.3 引入自适应调节系数的 LVRT 控制策略

由于储能发生故障后通常运行于放电状态,因此下面以该场景为例,对调节系数 K_{soc} 的取值进行定量分析。

目前工程上大多采取简化处理策略,即系统故障后不计及 SOC 的影响,储能单元按照最大有功功率输出,即此时 $K_{\text{soc}} = 1$,如图 2 中的黑色实线所示。根据储能并网规范要求以及 2.2 节的分析,可以对 K_{soc} 取值进行优化,具体分为以下 3 个区间:

1) $S < 0.1$, 为避免储能单元过放的风险,需要将其闭锁^[9],退出运行,此时 $K_{\text{soc}} = 0$,如图 2 中的 a 点所示。

2) $S > 0.5$ ，为了维持储能的调频能力^[15]，在该区间内可以按照最大有功功率输出，此时 $K_{SOC} = 1$ ，如图 2 中的 c 点所示。

3) $0.1 \leq S \leq 0.5$ ，在实际工程中，对于 $S = 0.2$ ，通常限制储能出力为额定功率的一半^[30]，此时 $K_{SOC} = 0.5$ ，如图 2 中的 b 点所示。对于该区间内其他 SOC 状态，如何合理地设计 K_{SOC} 值需要进一步讨论。

若采用“定 K 法”^[31]，即用一条斜率固定的直线来刻画储能变流器输出电流和 SOC 的关系，则无法合理利用储能容量以及体现储能的灵活性。为了使储能变流器的输出电流根据 SOC 自适应的调整，因此在这里采用“变 K 法”，选取一条变斜率的曲线进行拟合。

根据上述分析，将 SOC 分别为 0.1、0.2、0.5 时的 K_{SOC} 用斜率可变的二次函数曲线拟合，如图 2 中的蓝色实线所示。该函数开口向下，并且当 SOC 越小时， $|dK_{SOC}/dS|$ 越大，使得放电过程中 SOC 降低时加速减小放电速率。故得到 $K_{SOC} - S$ 的函数关系式为

$$K_{SOC} = \begin{cases} 0 & S < 0.1 \\ -8.33S^2 + 7.5S - 0.67 & 0.1 \leq S \leq 0.5 \\ 1 & S > 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

从图 2 中可以看到，当 $S > 0.5$ 时， K_{SOC} 为恒定的常数 1，表明储能的有功出力不受限制，始终处于最大输出状态；随着 SOC 逐渐减小偏离 0.5，曲线的下降速率加快，最终限制为 0。根据该函数曲线，储能变流器能够在放电过程中，随着 SOC 的降低减小输出电流，从而减缓 SOC 的下降速度。

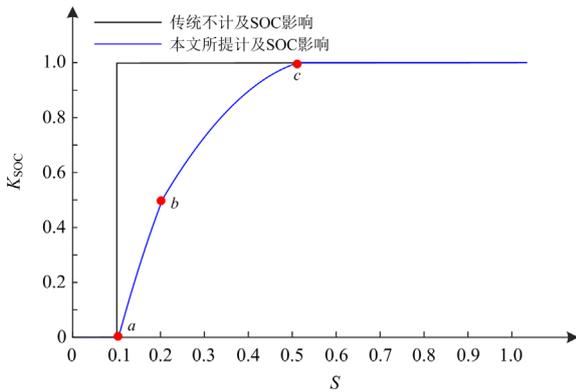


图 2 调节系数曲线图

Fig. 2 Adjustment coefficient curve chart

综上所述，计及 SOC 影响的电化学储能系统的低电压穿越控制策略如式(9)和式(10)所示。

$$i_d^* = \begin{cases} K_{SOC} \frac{P_{ref}}{U_f} & U_f \geq 0.85U_N \\ K_{SOC} \left| \frac{P_{max}}{U_f} \right| & 0.678U_N \leq U_f < 0.85U_N \\ K_{SOC} \sqrt{I_{max}^2 - i_q^{*2}} & 0.2U_N \leq U_f < 0.678U_N \\ 0 & U_f < 0.2U_N \end{cases} \quad (9)$$

$$i_q^* = \begin{cases} 0 & U_f \geq 0.85U_N \\ 1.6(0.85 - U_f) & 0.2U_N \leq U_f < 0.85U_N \\ 1.5I_N & U_f < 0.2U_N \end{cases} \quad (10)$$

式中： U_f 为故障后电压标幺值； P_{max} 与 I_{max} 分别为储能最大充放功率与电流； $0.678U_N$ 为 PCS 达到限流约束条件的边界电压，具体计算详见文献[32]。

3 仿真实验

为验证本文所提低电压穿越控制策略在避免 SOC 越限以及减小 SOC 极差上的可行性与有效性，在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建了图 1 所示的电磁暂态模型，仿真模型的额定参数详见表 2。

表 2 电化学储能系统模型的额定参数

Table 2 Rated parameters of electrochemical energy

storage system model	
参数	值
额定容量/kWh	20
电网额定电压/kV	10
滤波电感/mH	5
滤波电容/ μ F	25
等效电阻/m Ω	0.5
功率外环 K_{pp} 、 K_{pi}	1、100
电流内环 K_{ip} 、 K_{ii}	1、100

3.1 不同运行状态下 SOC 变化对比

图 3 所示的实线和虚线分别为储能单元在充电状态和放电状态下发生故障时的 SOC 变化。0.5 s 时并网点电压跌落至 0.7 p.u，放电倍率为 2 C。

由图 3 可得：充电状态发生故障前后，SOC 分别呈现上升和下降的趋势，而放电状态发生故障前后，SOC 均呈现下降趋势；并且在不同 SOC 状态值下故障后的曲线下降斜率不同，表明了输出系数 K_{SOC} 与故障过程中 SOC 的状态值有关，其中故障过程中 SOC 越小，输出系数 K_{SOC} 也越小，即限制输出的能力越强，此时放电速率越慢。该控制策略可以有效避免 SOC 处于较低水平时仍以大功率放电导致退出运行的问题。

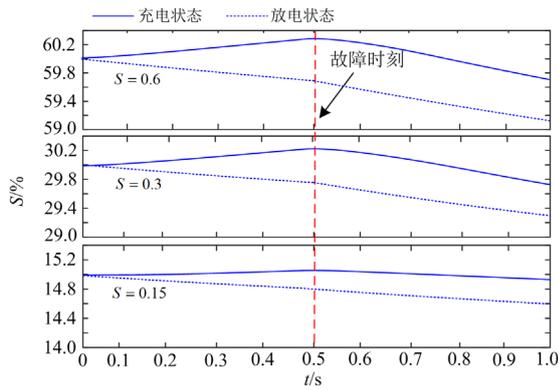


图3 充放电状态下故障前后 SOC 变化

Fig. 3 Changes of SOC before and after fault in charge and discharge states

3.2 不同策略下 SOC 变化对比

为研究不同低电压穿越控制策略下的 SOC 变化, 故以现有控制策略^[4-5]以及本文所提控制策略为例进行对比分析, 不同策略下故障前后 SOC 变化如图 4 所示。图 4 中, 策略 1 为全发有功控制策略; 策略 2 为无功优先但不考虑 SOC 控制策略。仿真以放电状态下发生故障为例, 初始时刻储能 SOC 为 0.15, 放电倍率为 2 C, 在 0.5 s 时并网点电压跌落至 0.7 p.u.。

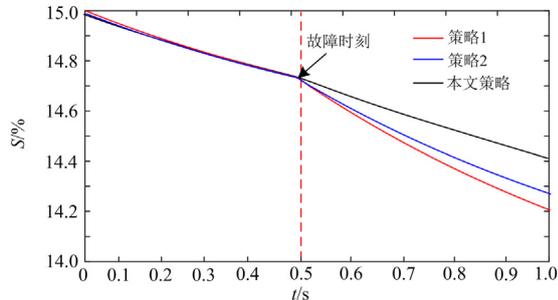


图4 不同策略下故障前后 SOC 变化

Fig. 4 SOC change before and after failure under different strategies

假定故障前各控制策略的指令值相同, 因此 SOC 下降速率也相同; 故障后由于各控制策略对 i_d 的要求不同, 下降速率也有区别, 其中全发有功的控制策略 SOC 下降速率最快。相较于无功优先但不计及 SOC 的传统控制策略, 本文所提出的计及 SOC 的控制策略能够在 SOC 处于较低水平时有效减缓 SOC 的下降速度。

进一步为探究本文所提控制策略在 LVRT 过程减小 SOC 极差方面的有效性, 选择 SOC 极差为 5%, 初始值选取 15%~20% 的 6 组 EESS 进行仿真实验。

由于只发有功的控制策略无法满足电压要求, 因此仅对比策略 2 和本文所提的 LVRT 控制策略, 多储能单元在两控制策略下 SOC 的变化如图 5 所示, 其中虚线和实线分别为策略 2 和本文策略的 SOC 变化曲线。

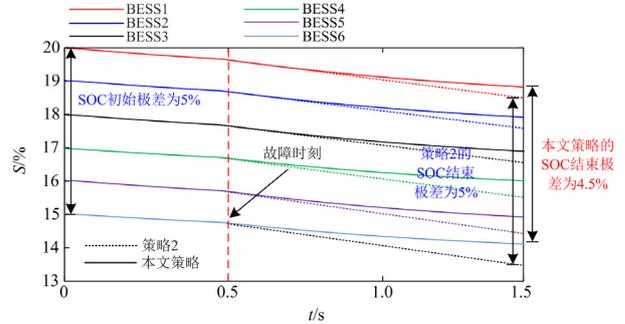


图5 多储能单元在不同控制策略下 SOC 变化

Fig. 5 SOC variation of multiple energy storage units with different control strategies

由图 5 可得, 故障前 EESS 的 SOC 极差为 5%, 根据策略 2, 储能在不同的 SOC 下具有相同的放电速率, 因此在 LVRT 过程中 SOC 极差不变, 仍为 5%, 并且由于该策略在低 SOC 时对有功电流没有限制, 仍以较大的有功功率进行输出, 存在过放的风险。本文提出的计及 SOC 状态的控制策略, 能够使得储能输出的有功电流根据 SOC 的变化进行自适应调整, 即 LVRT 过程中的 SOC 越小, 输出的有功电流越小, 因此 SOC 下降的速度也越慢, 在 LVRT 过程中 SOC 极差由 5% 减小到 4.5% 左右, 并随着时间的推移该极差逐渐减小, 最终实现 SOC 均衡的效果。

3.3 不同放电倍率下 SOC 变化对比

由 2.2 节的分析可知, SOC 变化与放电倍率有着密切的关系, 为进一步研究本文所提控制策略的优越性, 研究低 SOC 场景下, 不同放电倍率对 SOC 的影响。

该场景下单个储能单元在不同控制策略下的 SOC 变化, 如图 6 所示。

由图 6 可得, 放电倍率对于 SOC 变化有着显著的影响, 随着放电倍率的增大, SOC 下降速度加快。当放电倍率为 3 C 时, 由于策略 2 未计及 SOC 的限制, 因此 SOC 跌落至 0.1 的阈值, 造成了储能单元退出运行; 而本文所提策略能够根据 SOC 对有功电流进行自适应调整, SOC 越小下降速度越慢, 避免 SOC 越限而退出运行的情况发生。

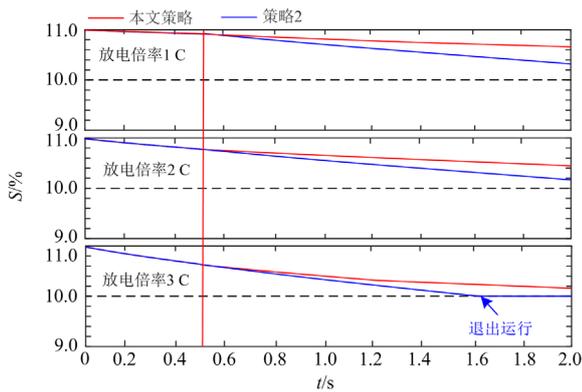


图 6 不同放电倍率下 SOC 变化

Fig. 6 SOC variation at different discharge rates

在该场景下，研究多个储能单元在本文所提控制策略下 SOC 极差变化，故障前储能单元的 SOC 极差为 5%。表 3 为故障前后两种策略下的 SOC 极差对比。

表 3 不同放电倍率下储能 SOC 极差

Table 3 SOC polarity difference of energy storage under different discharge rates

放电倍率/C	策略 2 SOC 极差/%	本文策略 SOC 极差/%
1	5.0	4.8
2	5.0	4.5
3	5.0	4.0

由表 3 可得，由于未计及 SOC 的策略 2 各储能单元输出电流相同，因此故障前后 SOC 极差保持不变；而本文所提策略能够根据各储能单元 SOC 动态调整有功输出，在故障期间可以减小 SOC 极差，并且放电倍率越大，效果越明显。

综上所述，本文所提控制策略在故障跌落程度较浅(带故障运行时间长)、放电倍率较大(SOC 变化速率快)的场景下，能够有效避免过放导致储能单元退出运行的风险，并且减小 SOC 极差。

4 结论

针对目前电化学储能系统在低电压穿越控制策略方面的不足，本文重点对具有大放电倍率的储能单元进行研究，提出了计及 SOC 影响的电化学储能系统低电压穿越控制策略，得到以下结论：

1) 低电压穿越过程应综合考虑无功-电压支撑与有功-频率稳定两方面，根据电压和频率要求输出有功和无功，满足电压和频率要求；

2) 故障期间储能输出的有功电流受到 SOC 状态值的限制，所提出的调节系数曲线可以根据故障

过程中的 SOC 状态值动态调整有功电流；

3) 与现有低电压穿越控制策略相比，本文所提策略在单个储能单元 SOC 较低时可有效减缓 SOC 的下降速度，尤其在故障跌落程度较浅、储能单元放电倍率大的场景下能避免 SOC 越限导致退出运行的风险，并且在多储能单元场景下可以进一步减小 SOC 极差。

参考文献

[1] LIU J Y, ZHANG Y J. Has carbon emissions trading system promoted non-fossil energy development in China[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117613.

[2] 魏妍萍, 王军, 李南帆. 可再生能源接入对电网电能质量的影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 108-114.

WEI Yanping, WANG Jun, LI Nanfan. An analysis of the influence of grid-connected renewable energy on power quality of power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 108-114.

[3] 徐良德, 郭挺, 吴晗, 等. 考虑多场景满意度评价的可再生能源规划[J]. 供用电, 2022, 39(12): 89-97.

XU Liangde, GUO Ting, WU Han, et al. Renewable energy planning based on multi scenario technology and satisfaction evaluation[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(12): 89-97.

[4] 侯桂欣, 刘其辉, 谢孟丽. 对称及不对称电网故障下的电池储能系统低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 62-67.

HOU Guixin, LIU Qihui, XIE Mengli. The LVRT of the BESS under both balance and unbalance grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 62-67.

[5] 刘其辉, 葛立坤, 郭晓芸. 适应多类型电网故障的储能系统预测电流控制与 LVRT 策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 96-103.

LIU Qihui, GE Likun, GUO Xiaoyun. A low voltage ride through technology adapting to multi-grid fault of battery energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 96-103.

[6] 国家标准化管理委员会. 电化学储能系统接入电网技术规定: GB/T36547—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical rule for electrochemical energy storage system connected to power grid: GB/T 36547—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[7] 刘耀远, 曾成碧, 李庭敏, 等. 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 77-82.

- LIU Yaoyuan, ZENG Chengbi, LI Tingmin, et al. Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super-capacitor[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(13): 77-82.
- [8] 杨堤, 程浩忠, 马紫峰, 等. 基于储能技术提高风电机组低电压穿越能力的分析和展望[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(12): 1-10, 20.
- YANG Di, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Analysis and prospect of LVRT improvement based on energy storage technology for wind turbine generator system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(12): 1-10, 20.
- [9] 霍启迪, 唐晓骏, 马世英, 等. 不对称短路故障下电池储能影响交流系统短路电流机理及算法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(3): 153-160.
- HUO Qidi, TANG Xiaojun, MA Shiyang, et al. Mechanism and algorithm of short circuit current in AC system affected by BESS under asymmetric short circuit faults[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(3): 153-160.
- [10] BAK Y, LEE J S, LEE K B. A low voltage ride through control strategy for energy storage systems[C] // 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 18-22, 2016, Milwaukee, WI, USA: 1-6.
- [11] 张振宇, 汪光森, 聂世雄, 等. 脉冲大倍率放电条件下磷酸铁锂电池荷电状态估计[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(8): 1769-1779.
- ZHANG Zhenyu, WANG Guangsen, NIE Shixiong, et al. State of charge estimation of LiFePO₄ battery under the condition of high rate pulsed discharge[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(8): 1769-1779.
- [12] LI Junhui, MU Gang, ZHANG Jiahui, et al. Dynamic economic evaluation of hundred megawatt-scale electrochemical energy storage for auxiliary peak shaving[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(3): 851-868.
- [13] 邓诗蕾, 王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(24): 40-46.
- DENG Shilei, WANG Mingyu. Cooperative control strategy of DC microgrid power flow controller and distributed energy storage system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 40-46.
- [14] 马文忠, 王立博, 王玉生, 等. 考虑 SOC 的混合储能功率分配与自适应虚拟惯性控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(5): 83-93.
- MA Wenzhong, WANG Libo, WANG Yusheng, et al. Hybrid energy storage power distribution and adaptive virtual inertia control considering SOC[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(5): 83-93.
- [15] 林嘉伟, 王志新, 张永. 独立直流微电网中考虑不同容量的分布式储能系统能量控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(10): 139-146.
- LIN Jiawei, WANG Zhixin, ZHANG Yong. Energy control strategy of distributed energy storage system considering different capacities in isolated DC microgrid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(10): 139-146.
- [16] 陈长青, 李欣然, 张冰玉, 等. 基于多时间尺度的储能调峰调频协同控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(5): 94-105.
- CHEN Changqing, LI Xinran, ZHANG Bingyu, et al. Energy storage peak and frequency modulation cooperative control strategy based on multi-time-scale[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(5): 94-105.
- [17] MI Yang, CHEN Boyang, CAI Pengcheng, et al. Frequency control of a wind-diesel system based on hybrid energy storage[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(3): 446-458.
- [18] 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.
- 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.
- [19] 赵熙临, 桂玥, 付波, 等. 考虑 SOC 的自适应分组策略在储能参与一次调频中的应用[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(10): 116-125.
- ZHAO Xilin, GUI Yue, FU Bo, et al. Adaptive grouping strategy of the battery energy storage system participating in the primary frequency regulation considering SOC[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(10): 116-125.
- [20] 刘英培, 田仕杰, 梁海平, 等. 考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(13): 107-118.
- LIU Yingpei, TIAN Shijie, LIANG Haiping, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 107-118.
- [21] 艾欣, 董春发. 储能技术在新能源电力系统中的研究综述[J]. *现代电力*, 2015, 32(5): 1-9.
- AI Xin, DONG Chunfa. Review on the application of energy storage technology in power system with renewable energy sources[J]. *Modern Electric Power*, 2015, 32(5): 1-9.
- [22] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3315-3325.
- LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for

- battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [23] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [24] 国家电网公司光伏电站接入电网技术规范: Q/GDW 617—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [25] 刘洋, 王聪颖, 夏德明, 等. 电网故障导致大面积风电低电压穿越对电网频率的影响分析及措施[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3505-3514.
LIU Yang, WANG Congying, XIA Deming, et al. Influence of large area wind power low voltage ride-through on power grid frequency caused by power grid faults[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3505-3514.
- [26] 花赞玥, 吴琛, 黄伟, 等. 考虑风电低电压穿越过程的频率最低点量化及其提升方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 126-134.
HUA Yunyue, WU Chen, HUANG Wei, et al. Quantification and enhancement method for frequency nadir considering low voltage ride-through process of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 126-134.
- [27] 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 automation of electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 174-181.
- [28] 李凯. 电池储能系统的分层控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
LI Kai. Research on the hierarchy control strategy of battery energy storage system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [29] LU X N, SUN K, GUERRERO J M, et al. Double-quadrant state of charge based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 147-157.
- [30] 余勇, 年珩. 电池储能集成技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [31] NG Y J A, ZHAO C H, TANG W R, et al. Profit maximizing planning and control of battery energy storage systems for primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 712-723.
- [32] 焦彦军, 梁霄, 蒋晨阳. 计及LVRT控制策略的光伏电站并网配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 92-99.
JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang. Failure analysis method in distribution network considering LVRT control strategy of grid-connected photovoltaic station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 92-99.

收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-05-07

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhengtao@ncepu.edu.cn

孟令昆(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统保护与控制。E-mail: 2674562822@qq.com

(编辑 许威)