# 基于模型预测控制混合储能系统的 直流微电网韧性提升策略

郑子萱,倪扶瑶,汪 颖,谢 琦 (四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:受可再生能源出力波动、负荷变化、故障以及非计划性脱网等事件的影响,直流微电网将面临不同时间 尺度的动态功率不平衡问题。直流微电网运行韧性体现了系统在高频 / 小干扰事件与低频 / 极端事件下的 快速响应、减少性能损失并尽快恢复的能力。提出了一种基于有限控制集模型预测控制的混合储能系统的 直流微电网运行韧性提升策略。为完善直流微电网韧性评价体系,首先提出了量化直流微电网运行韧性的 方法。其次,建立混合储能系统离散预测模型,设计代价函数以及不同控制目标之间的权重系数,最大化功 率型与能量型储能系统的优势,实现了基于局部信号的快速充放电与能量自动恢复控制。最后,通过多种干 扰事件算例,验证所提出的韧性提升方法的可行性与有效性。

关键词:直流微电网;混合储能系统;模型预测控制;韧性 中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105043

# 0 引言

直流微电网可应用在数据中心、现代楼宇、电动 汽车充电站以及工业园区等场景中,起到提高供电 效率与可靠性、提升用户电能质量[1-2]的作用。恶劣 天气、自然灾害以及物理和网络攻击导致的非计划 性孤岛等低频 / 极端事件对系统运行造成了严重威 胁<sup>[3]</sup>。此外,随着高比例新能源和电动汽车的接入, 随机、波动的新能源出力以及不确定负荷冲击等高 频 / 小干扰事件也将给直流微电网系统的稳定控制 带来挑战。

系统韧性体现了在各种干扰事件下系统适应、 生存并恢复到原始状态的能力,具有重要的研究意 义。针对直流微电网的韧性研究主要集中在2个方 面:①直流微电网作为一种韧性资源[45],在极端情 况下利用本地发电系统提高大电网系统恢复能力; ②提高直流微电网内部重要负荷的生存能力。已有 研究利用电力弹簧<sup>[6]</sup>、改进的控制策略<sup>[7]</sup>、抵御网络 攻击<sup>[8]</sup>等方法增强系统的韧性。此外,学者们针对 恢复韧性开展了广泛的研究,而针对运行韧性的研 究还有待进一步完善评价指标体系和评估方法<sup>[9]</sup>。

与交流系统不同,直流微电网系统内不存在频 率稳定、无功功率、相位跟踪等问题,直流母线电压 是衡量直流微电网系统内动态功率平衡的唯一标 准<sup>[10]</sup>。此外,由于本地负荷通过变换器或直接通过 直流母线供电,干扰事件中抑制直流母线电压变化 并缩短电压恢复时间是直流微电网运行韧性提升的

收稿日期:2021-02-28;修回日期:2021-04-13 基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0111500) Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2019YFE0111500)

关键<sup>[11]</sup>。考虑到电力系统韧性没有普遍接受的定 义[5],本文研究的直流微电网运行韧性是指在各种 高频 / 小干扰和低频 / 极端事件下维持直流母线电 压稳定的能力。

结合了功率型和能量型储能的混合储能系统 (HESS)是提升直流微电网韧性的有效措施<sup>[3,12]</sup>。文 献[13]基于直流母线电压偏差大小提出了HESS多 模式分散控制策略。除了维持直流母线电压稳定, 单次干扰事件发生后储能系统的能量恢复对适应连 续发生、不断演变的极端事件具有重要意义。储能 单元的荷电状态(SOC)水平反映了电池剩余容量的 大小,文献[14-15]研究了多个电池储能系统SOC均 衡方法,避免了部分蓄电池的过充过放,提高了蓄电 池的使用寿命。在HESS中,功率型储能系统的能 量恢复保证了 HESS 具有较好的可持续性<sup>[16]</sup>。然 而,能量恢复与电压调节在干扰事件下是一对矛盾 体,二者的权衡还需进一步研究。上述研究普遍采用 比例积分(PI)控制<sup>[13-16]</sup>进行储能系统变换器控制, 然而PI控制系统的级联结构与饱和效应将降低储 能系统的响应速度,不利于系统运行韧性的提升[17]。 与 PI 控制技术相比,有限控制集模型预测控制 (FCS-MPC)具有采样率较高、瞬态响应较快、控制灵 活、易于实现线性和非线性系统的多目标和多约束 控制等诸多优势<sup>[18]</sup>。文献[19]针对电压波动问题, 提出了以成本控制为目标的基于模型预测控制 (MPC)的主动配电网电压控制策略;文献[20-21]分 别研究了应用于储能型准Z源逆变器和储能DC/DC 变换器的FCS-MPC,实现了对参考信号的快速跟踪; 文献[22]将虚拟电容控制与MPC进行结合,减少了 PI电压外环带来的响应延时。目前针对 HESS 的

MPC进行深入研究的文献尚未见报道,文献[23]建 立了完整的直流微电网预测模型,实现了储能单元 与负荷、分布式电源(DG)、交流大电网等单元的协 调控制,但是由多个单元间的通信延时和完整的系 统模型带来的计算量降低了储能系统的响应速度, 影响韧性提升效果。

本文首先基于直流微电网母线电压动态特性提 出了直流微电网运行韧性确定型度量方法,用于 指导和评估韧性提升工作;然后针对超导磁储能/ 电池(SMES/battery)HESS设计了基于FCS-MPC的 HESS控制方案用于提升直流微电网的运行韧性。 超导磁储能(SMES)采用单步长预测的预测电压控 制(MPVC)方法,可在干扰事件下快速充/放电,从 而调节直流母线电压;通过设计自适应权重系数实 现了直流母线电压控制与储能能量的自动恢复;最 后,通过算例验证所提控制方案的有效性与可行性, 并与PI控制下的单一电池储能系统、HESS对直流 微电网运行韧性的提升效果进行对比分析。

# 1 直流微电网结构与韧性度量

# 1.1 直流微电网结构

本文所研究的含有 HESS 的直流微电网基本拓 扑结构如图1所示。直流微电网通过并网逆变器与 交流大电网互联,其主要包括负荷单元、分布式发电 单元与储能单元,各个单元通过变换器接入直流 母线。光伏与风电系统运行在最大功率点跟踪模 式,输出功率随着光照辐射强度和风速的变化而变 化。SMES 和电池分别通过 DC / DC 变换器与直流 母线连接,这种混合储能的拓扑结构具有充 / 放 电过程可控的特点,可以提升系统寿命、减少电池 容量配置<sup>[12]</sup>。





直流微电网的动态特性可基于母线等效电容模型进行分析,该模型将直流母线视为能够快速吸收 或释放电能的等效电容。直流微电网母线电压的微 分方程如式(1)所示。

$$\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{C_{\mathrm{bus}}} \left( i_{\mathrm{G}} + i_{\mathrm{DG}} + i_{\mathrm{HESS}} - i_{\mathrm{Load}} \right) \tag{1}$$

其中, C<sub>bus</sub>为等效直流母线电容; U<sub>dc</sub>为直流母线电 压; i<sub>c</sub>为电压源换流器(VSC)输出电流; i<sub>DC</sub>为DG输 出电流; i<sub>HESS</sub>为HESS输出电流; i<sub>Load</sub>为从直流母线流 入负载的总电流。由式(1)可知, 负荷、DG出力以及 直流微电网与交流系统交换功率的变化均会引起直 流母线电压变化。

#### 1.2 直流微电网运行韧性度量

对韧性水平进行量化可指导和评估韧性提升工作。电力系统的可靠性通过停电频率和持续事件进行衡量,而运行韧性的评价则更关注干扰事件发生后系统性能的变化<sup>[5]</sup>。直流母线电压反映了系统动态功率平衡,图2为单次干扰事件(非计划性脱网)下直流母线电压的变化曲线。图中, $U_{dc.o}$ 为直流母线电压的变化曲线。图中, $U_{dc.o}$ 为直流母线电压跌落的最低值; $t_1$ 为干扰事件过程中直流母线电压跌落的最低值; $t_1$ 为干扰事件发生的时间; $t_2$ 为直流母线电压跌落至 $U_{dc.m}$ 的时间; $t_3$ 为直流母线电压恢复到 $U_{dc.o}$ 的时间。本文将直流母线电压标么值作为归一化的系统性能,参考利用受干扰后系统性能函数在整个恢复过程中的积分与恢复时间之比进行韧性度量的方法<sup>[24]</sup>,提出了直流微电网运行韧性系数 $R_{m}$ 如式(2)所示。

$$R_{\rm op} = \frac{\int_{t_1}^{t_3} (1 - \left| U_{\rm dc}(t) - U_{\rm dc_o} \right|) dt}{t_3 - t_1} \times 100 \%$$
(2)

其中,U<sub>de</sub>(t)为直流母线电压实际值。R<sub>op</sub>趋于∞表示 完美韧性,即特定干扰事件不会导致直流母线电压 发生变化;R<sub>op</sub>=0表示没有韧性,即事件发生后直流 母线电压降低为0,导致系统崩溃。



single disturbance event

考虑到极端事件可能引发连锁扰动,同时直流 微电网中还存在高频干扰事件,因此本文采用单次 干扰事件结束后,系统应对下一次类似干扰事件的 能力对系统运行韧性进行修正。本文在所讨论的将 HESS作为韧性提升措施的场景中,采用功率型储能 系统容量恢复水平修正运行韧性系数。SMES的能 量*E*<sub>SMES</sub>可以表示为:

$$E_{\text{SMES}} = L_{\text{SMES}} I_{\text{SMES}}^2$$
 (3)  
其中, $L_{\text{SMES}}$ 为超导线圈电感; $I_{\text{SMES}}$ 为超导线圈电流。

因此,针对SMES能量恢复的情况,直流微电网运行韧性系数可进一步修正为:

$$R'_{\rm op} = \alpha R_{\rm op} = R_{\rm op} \frac{I_{\rm SMES\_end} + I_{\rm SMES\_o}}{2I_{\rm SMES\_o}}$$
(4)

其中, R'<sub>op</sub>为修正后的 R<sub>op</sub>; α为超导线圈电流恢复系数, 其取值为 0.5~1, 强调了功率型储能系统自动恢 复能量的能力对系统运行韧性的影响; I<sub>SMES\_o</sub>为扰动 事件发生前超导线圈的初始电流; I<sub>SMES\_end</sub>为扰动事 件结束后超导线圈的稳态电流。

# 2 基于FCS-MPC的HESS控制方法

### 2.1 控制原理

本文研究的直流微电网系统电路图及提出的控制方法框图如图3所示(光伏和并网逆变器直流母 线侧电容未在图中画出)。

(1)直流微电网系统由交流电源、电阻负荷、脉冲负荷、光伏、HESS及其功率变换器组成。其中,  $U_{\rm bat}$ 为电池端电压; $L_{\rm b}$ 为电池 Buck / Boost 双向变换器电感; $I_{\rm b}$ 为流过 $L_{\rm b}$ 的电池电流; $I_{\rm dc}$ 为 HESS 向负荷输出的总电流; $R_{\rm bad}$ 为电阻负荷; $C_{\rm dc}$ 为 HESS 端口电容; $I_{\rm dc}$ 为 HESS 向负荷输出的总电流。

(2)本文提出的HESS控制器主要由电池储能系 统电压外环控制和单步长预测的FCS-MPC这2个模 块组成。通过MPVC方法直接控制SMES充/放电, 结构简单、动态响应快,可最大限度地发挥SMES快 速大功率充/放电的优势。电池储能系统作为能量 后备单元,其通过PI电压外环和低通滤波器(LPF) 得到电池电流参考值,然后利用模型预测电流控制 (MPCC)实现对电池电流的快速跟踪。电池储能系 统只需承担低频功率需求,有效减少了电池动作的 次数,延长了电池使用寿命。FCS-MPC由预测模型 和代价函数组成,其中预测模型采用变换器的离散 时间模型,可计算不同开关状态组合下的变量预测 值,将代价函数最小的预测变量对应的开关状态作 为控制信号输出,驱动储能变换器的导通与关断。

#### 2.2 预测模型

图 3 中,当 $G_1$ 和 $G_2$ 同时导通时,SMES充电;当 $G_1$ 和 $G_2$ 同时关断时,SMES放电;当 $G_1$ 和 $G_2$ 开断状态不同时 SMES 以储能模式运行,不与直流微电网交换能量。因此,可设置 SMES 在直流母线电压出现偏差时进入充电或放电模式, $G_1$ 、 $G_2$ 的开关信号 $G_1$ 、 $G_2$ 相等。电池储能系统通过 Buck / Boost电路并网,当电池处于充电或放电模式时,可设置  $S_1$ 、 $S_2$ 的开关信号 $G_1$ 、 $G_2$ 的开关信号 $G_2$ 和等。电池储能系统通过 Buck / Boost电路并网,当电池处于充电或放电模式时,可设置  $S_1$ 、 $S_2$ 的开关信号 $G_1$ 、 $G_2$ 和可能的开关状态组合,即可生成优化开关信号。

考虑到 MPC 是在离散时间下进行的,设采样时 间为 $T_{so}$  根据基尔霍夫电流、电压定律以及前向欧 拉法,k+1时刻的超导线圈电流 $I_{SMES}(k+1)$ 、电池电流  $I_{b}(k+1)$ 以及直流母线电压预测值 $U_{de}(k+1)$ 可基于 k时刻的本地电流、电压信号得到,则 SMES / battery HESS 的预测模型可表示为:

$$\begin{cases} I_{\rm SMES}(k+1) = \frac{T_{\rm s}}{L_{\rm SMES}} \left[ (1-G)U_{\rm de}(k) \right] + I_{\rm SMES}(k) \\ I_{\rm b}(k+1) = \frac{T_{\rm s}}{L_{\rm b}} \left( U_{\rm bat}(k) - SU_{\rm de}(k) \right) + I_{\rm b}(k) \\ U_{\rm de}(k+1) = \frac{T_{\rm s}}{C_{\rm de}} \left[ -I_{\rm de}(k) + (1-G)I_{\rm SMES}(k) + (1-S)I_{\rm b}(k) \right] + U_{\rm de}(k) \end{cases}$$
(5)

#### 2.3 代价函数

根据2.2节完成变量预测后,通过最小化代价函数以可得到与期望相符的开关信号。代价函数的一般形式是对预测结果与参考值的偏差取平方,代价



#### 图 3 研究的直流微电网系统的电路图及提出的控制方法框图

Fig.3 Circuit diagram of studied DC microgrid system and block diagram of proposed control method

函数的设计基于系统变量和控制目标,取决于应用 场景。SMES / battery HESS 的代价函数g 可设计为:

$$g = (U_{\rm dc}(k+1) - U_{\rm dc}) + \lambda_1 (I_{\rm SMES}(k+1) - I_{\rm SMES}) + (I_{\rm b}(k+1) - I_{\rm b}^*)^2 + \lambda_2 (I_{\rm b}(k+1) - I_{\rm b}(k))^2$$
(6)

其中, $U_{de}^*$ 为直流母线电压的参考值; $I_{SMES}^*$ 为超导线 圈电流的参考值; $I_b^*$ 为电池电流的参考值; $\lambda_1,\lambda_2$ 为 自适应权重系数。直流母线电压快速调节是提升系 统运行韧性的首要目标,因此g的第1项为直流母线 电压预测值与参考值的误差,可通过控制SMES快速充放电实现对直流母线电压的调节。g的第2项 用于实现单次干扰事件结束后SMES能量的自动恢 复,以提升系统运行韧性。由于SMES电流可反映SMES电感储能的大小,因此该控制目标可转换为对 超导线圈电流参考值的跟踪,故而g的第3项通过最 小化电池电流预测值与参考值之间的误差,实现对 电池的MPCC。g的第4项用于进一步减小电池电流 变化率和减少电池充放电次数,以延长电池寿命。

通过最小化代价函数可实现对直流母线电压、 超导线圈电流、电池电流、电池电流变化率的控制, 相应的权重系数反映了某一控制目标相对其他控制 目标的重要性。文献[24]给出了MPC权重系数设 计的一般方法。对于含有主要控制目标和次要控制 目标的系统,首先将主要控制目标权重系数设置为 1,然后将次要控制目标的权重系数设置为0后逐渐 增大,通过一组仿真实验确定最合适的权重系数。

本文在传统的基于仿真实验方法的基础上设计 了随工况动态调节的权重系数。考虑到 SMES 和电 池控制的主要目标分别为直流母线电压控制和电池 电流控制,因此将代价函数中直流母线电压项和电 池电流项的权重系数设置为1。代价函数中第2项 的权重因子 $\lambda_1$ 用于权衡 SMES 控制直流母线电压与 能量恢复这2个矛盾目标。 $\lambda_1$ 越小,直流母线电压 调节性能越好; $\lambda_1$ 越大,越能保障 SMES 的理想容 量。为此,本文根据式(7)设计了权重因子 $\lambda_1$ ,从而 在不同以及不断演变的干扰事件下自动权衡这2个 控制目标。

 $\lambda_{1} = \begin{cases} 0.01 & \Delta U_{dc} \leq 0.01 \text{ p.u.} \\ 0.01 \left| \frac{I_{\text{SMES}} - I_{\text{SMES}}^{*}}{I_{\text{SMES}\_\text{lim}} - I_{\text{SMES}}^{*}} \right| & \Delta U_{dc} > 0.01 \text{ p.u.} \end{cases}$ (7)

其中, I<sub>SMES\_lim</sub>为超导线圈电流的最大 / 最小限制值。

当直流母线电压维持在参考值附近,其偏差  $\Delta U_{de} \leq 0.01$  p.u.时,将 SMES 能量恢复作为次要控制 目标,设置 $\lambda_1 = 0.01$ 可同时实现较好的能量恢复和直 流母线电压控制;当 $\Delta U_{de} > 0.01$  p.u.时,将直流母线 电压控制作为主要控制目标,通过进一步减小 $\lambda_1$ 实 现 SMES 快速动作,从而平衡系统动态功率。同时, 为了抑制 SMES 过放,当超导线圈电流逐步增大或 下降到达极限值时,λ<sub>1</sub>将随超导线圈电流的增大或 下降而增大。式(7)中的系数0.01由一组仿真实验 确定,仿真实验结果表明该值为0.01时可实现 HESS 能量的快速恢复且不影响直流母线电压调节能力。 直流母线电压偏差阈值0.01 p.u.的选择则是基于本 文的直流母线电压控制目标,为进一步提高系统运 行韧性,本文直流母线电压的控制目标为额定值 750 V。实际中,也可以根据系统中负荷的电压质量 需求选择该电压偏差阈值。

当电池电流参考值 $I_b^*$ 开始变化时,代价函数的 第4项的权重因子 $\lambda_2$ 用于权衡电池电流误差控制和 电池电流变化率控制这2个目标。电池电流方向反 复改变将导致电池充放电次数大幅增加。当 $I_b^*$ 的正 负不发生变化时,可相对地减少对电池电流的限制 以实现对参考电压的准确快速跟踪。因此,根据式 (8)设置 $\lambda_2$ :当 $I_b^*=0$ 时, $\lambda_2=0.1$ 可实现对电流方向变 化的抑制;随着 $I_b^*$ 绝对值的增大, $\lambda_2$ 的值线性下降, 从而实现对电池电流的快速跟踪,减少对 SMES 的 容量需求。式(8)中的0.1通过一组仿真实验确定。

$$\lambda_{2} = -\left| \frac{0.1}{I_{b_{\rm Lim}}} I_{b}^{*} \right| + 0.1 \tag{8}$$

其中, I<sub>h lim</sub>为电池电流的最大 / 最小限制值。

本文采用单步长预测的FCS-MPC,模型在样本 中逐步推进演算,测量值、参考值、预测值和代价函 数随之不断迭代更新,控制算法流程如图4所示。 图中,*i*取值为1—4分别对应4种变换器开关变量  $G_{S;g_i}$ 为第*i*个开关状态对应代价函数的值; $S_{opt}$ 和  $G_{opt}$ 为输出的优化开关信号。

#### 3 仿真验证

在 MATLAB / Simulink 中建立如图 3 所示的直 流微电网仿真模型,主要仿真参数见附录中表 A1。 为验证所提出的基于 FCS-MPC 的 HESS 控制方案在 提升直流微电网运行韧性上的优越性,仿真对比以 下3种方案。

(1)方案1:基于PI控制的单一电池储能系统控制方案。

(2)方案2:基于PI控制的HESS控制方案。

(3)方案3:本文提出的基于FCS-MPC的HESS控制方案。

通过方案1、2的对比来验证SMES/battery HESS 相比于单一电池储能系统在提升系统运行韧性上的 优势;通过方案2、3的对比来验证本文方案相比基 于PI控制的HESS控制方案的优势。

#### 3.1 非计划性脱网

在非计划性脱网事件中,直流微电网从并网到



图 4 基于 FCS-MPC 的 HESS 控制方法流程图 Fig.4 Flowchart of HESS control method based on FCS-MPC

孤岛运行模式的无缝切换能力体现了系统运行韧性。仿真设置0.5 s时发生非计划性脱网事件,3种方案对应的仿真结果如图5所示。由图可见,在方案1中,由于电池响应速度较慢,非计划性脱网事件发生后直流母线电压瞬间跌落到613 V;在方案2中,由于功率型储能系统SMES瞬间放电,直流母线电压可维持在参考值附近,这说明在该干扰事件下采用HESS比采用单一电池储能系统具有更好的系统运行韧性;对比方案2、3的仿真结果可知,在基于PI控制的HESS方案中,脱网过程中的大功率缺额导致超导线圈电流在1.5 s左右下降到0,SMES退出运行,直流母线电压跌落到694 V;而采用本文方案







后,直流母线电压最低值为722 V,系统运行韧性得 到了提升。此外,在本文方案中,电池储能系统的输 出电流比方案2中上升约100 A,用于 SMES 能量恢 复。在脱网暂态过程结束后,超导线圈电流逐步恢 复到初始值的80%以上,能够更好地应对后续可能 出现的负荷波动,进一步提高了系统的运行韧性。

# 3.2 脉冲功率负荷

脉冲功率负荷在一小段时间内间歇性地从系统 中吸取大量功率,对直流微电网的正常运行造成干 扰。为验证在脉冲功率负荷干扰下,各方案对系统 运行韧性的提升效果,在并网运行的直流微电网中 设置占空比为50%、频率为1Hz的550kW脉冲功率 负荷。图6为不同方案的仿真结果,图中在0.5~1.0s 和1.5~2.0 s分别出现了1次脉冲功率负荷干扰。在 采用单一电池储能系统的情况下,2次脉冲功率负 荷干扰期间直流母线电压均出现了明显的跌落,每 次脉冲功率负荷干扰发生时电池电流均快速上升。 方案2受PI控制的影响,SMES在第1次脉冲功率负 荷干扰结束后未进行能量恢复,导致第2次脉冲功 率负荷干扰到来时,SMES能量不足,电池电流快速 上升,直流母线电压跌落到670V左右。采用本文 方案后,直流母线电压始终维持在720V以上,2次 脉冲功率负荷干扰结束后超导线圈电流恢复到初始 值的33%,第1次脉冲功率负荷干扰结束后,电池继 续放电,避免了电池在连续脉冲功率负荷干扰下的 反复动作,同时实现了SMES的能量恢复,得以在第 2次脉冲功率负荷干扰到来时能够提供足够的混合 储能容量。对比方案2、3的仿真结果可知,本文方 案在连续脉冲功率负荷事件下能够有效维持直流母 线电压恒定,提升系统的运行韧性。图6所示的仿 真结果也验证了韧性度量中考虑 SMES 能量恢复的 正确性。



图6 脉冲功率负荷事件下的仿真结果



#### 3.3 光伏出力波动

随着高比例新能源的接入,应对光伏出力连续 波动带给直流微电网冲击的能力也体现了系统运行 韧性。在仿真中设置光伏出力随机波动,直流微电 网中出现功率缺额与功率冗余的情况。直流母线电 压的跌落与抬升趋势与系统动态不平衡功率变化趋 势一致。图7给出了光伏出力波动事件下的仿真结 果。由图7可见,3种方案均能通过反复充放电抑制 光伏出力波动,直流母线电压波动范围维持在±1% 以内。采用方案1、2时,电池储能系统反复充放电 以平抑光伏出力波动。在方案2中,由于SMES承担 了部分初始功率需求,电池电流波形比方案1中 更为平滑,但电池充放电次数与单一电池储能系统 相同。而采用本文方案后,SMES快速充放电,超导 线圈电流频繁地上升、跌落。当SMES电流下降时, SMES 处于放电模式, SMES 补偿系统功率缺额; 当 SMES电流上升时,SMES处于充电模式,SMES吸收 冗余功率。本文方案实现了在直流母线电压跌落和 抬升过程中更加快速、准确的电压调节,即本文方案 不仅能够抑制直流母线电压跌落,也可应对直流母 线电压抬升的情况。此外,FCS-MPC 通过减少电池 电流变化率,进一步减少了电池充放电次数,充分利 用了SMES反复快速充放电的能力。在19s的仿真 过程中,电池充放电次数由10次下降到了1次。同 时,通过储能能量的自动恢复控制,SMES容量始终 维持在正常范围内,保证了HESS的可持续运行和 直流微电网在光伏出力随机波动场景下的适应性。



图7 光伏出力波动事件下的仿真结果



以上3种不同干扰事件对应的各方案的直流微 电网运行韧性系数*R*<sub>op</sub>如表1所示。由表可见,本文 方案在3种不同类型干扰事件下均可提升直流微电

表1 3种方案的运行韧性提升效果

Table 1 Improvement effect of operation

resilience of three schemes
-----------------------------

工业审批	$R_{_{ m op}}$ / %			
口北尹什	无储能系统	方案 1	方案 2	方案 3
非计划性脱网	0	92.2	98.1	98.4
脉冲功率负荷	91.1	95.5	96.5	98.3
光伏出力波动	98.6	99.8	99.8	99.9

网的运行韧性;在非计划性脱网极端事件中,无储能 系统情况下直流母线电压跌落至0,导致系统崩溃, 系统运行韧性系数为0;采用HESS后,方案2与本文 方案的系统运行韧性都得到了明显提升。然而考虑 到非计划性脱网后可能出现的电源故障、冲击性负 荷等情况,采用式(3)将方案2与本文方案的系统韧 性系数分别修正为47.6%和88.56%,显示了本文方 案的有效性。

在脉冲功率负荷事件下,相比无储能的情况,采 用方案1-3后运行韧性系数分别提升了4.4%、 5.4%和7.2%,本文提出的系统韧性提升方案的适 应性最佳。本文提出的混合储能方案具有更快响应 速度和持续运行能力,在连续2次干扰事件下具有 更好的运行韧性。在本文设置的较短的仿真时间 内,光伏出力波动水平较小,3种方案均可保证系统 韧性。然而,随着高比例新能源的接入,风光出力波 动将对系统韧性造成更加严重的影响,也对储能系 统的响应能力提出了更高的要求。

## 4 结论

本文提出了一种基于直流母线电压的直流微电 网运行韧性定量评估方法,设计并对比验证了基于 FCS-MPC的HESS控制方案对直流微电网运行韧性 的提升效果。该方案通过协调功率型与能量型储 能装置,实现了对直流微电网动态不平衡功率的快 速补偿,对提高系统重要负荷在低频 / 极端事件与 高频 / 小干扰事件生存能力具有重要意义。此外, 该方案无需建立 HESS 与其他单元之间的通信,储 能系统响应能力不易受通信故障、网络攻击等极端 事件影响,进一步提高了系统运行韧性。本文中的 运行韧性分析方法适用于储能系统抑制干扰的情 况,下一步可开展分布式电源与负荷共同参与直流 微电网韧性提升的研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等.直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
   SUN Pengfei,HE Chunguang,SHAO Hua,et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):64-73.
- [2] 王守相,刘琪,赵倩宇,等. 配电网弹性内涵分析与研究展望
   [J/OL]. 电力系统自动化. (2020-11-17)[2021-04-29]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20201117.1558.006.html.
- [3] 葛少云,张成昊,刘洪,等.考虑微能源网支撑作用的配电网弹 性提升策略[J].电网技术,2019,43(7):2306-2317.
   GE Shaoyun, ZHANG Chenghao, LIU Hong, et al. Resilience enhancement strategy for distribution network considering supporting role of micro energy grid[J]. Power System Technology, 2019,43(7):2306-2317.

[4] LI Z, SHAHIDEHPOUR M, AMINIFAR F, et al. Networked microgrids for enhancing the power system resilience [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1289-1310.

158

- [5] LIANG L, HOU Y H, HILL D J, et al. Enhancing resilience of microgrids with electric springs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2235-2247.
- [6] CHE L, SHAHIDEHPOUR M. DC microgrids: economic operation and enhancement of resilience by hierarchical control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2517-2526.
- 「7]汤奕,李梦雅,王琦,等. 电力信息物理系统网络攻击与防御研 究综述:(二)检测与保护[J]. 电力系统自动化,2019,43(10): 1-10,18.

TANG Yi, LI Mengya, WANG Qi, et al. A review on research of cyber-attacks and defense in cyber physical power systems:part two detection and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10):1-10, 18.

- [8]孙建军.现代配电网电压暂降问题及其运行韧性提升[J].电 气应用,2019,38(3):4-7.
- [9]李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-16. LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(1):2-17.
- [10] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析 方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513. ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513.
- [11] 何俊强,师长立,马明,等. 基于元模型优化算法的混合储能 系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(7): 157-164.

HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):157-164.

- [12] 顾煜炯,谢典,和学豪,等.海岛直流微网复合储能系统控制策 略设计与实现[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):1-6. GU Yujiong, XIE Dian, HE Xuehao, et al. Design and implementation of control strategy of hybrid energy storage system in island DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 1-6.
- [13] 王正男,张新慧,彭克,等. 虚拟直流发电机控制下SOC均衡功率分 配策略[J]. 高电压技术. (2020-11-25)[2021-01-14]. https:// doi.org / 10.13336 / j.1003-6520.hve.20200988.
- [14] 米阳,吴彦伟,纪宏澎,等. 基于多组储能动态调节的独立直流 微电网协调控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):170-176. MI Yang, WU Yanwei, JI Hongpeng, et al. Coordinative control based on dynamic load allocation among multiple energy storages for islanded DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5); 170-176.
- [15] 郭伟,赵洪山. 基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系 统分层协调控制方法[J]. 电工技术学报,2020,35(5):1140-1151.

GUO Wei, ZHAO Hongshan. Coordinated control method of multiple hybrid energy storage system in DC microgrid based on event-triggered mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5):1140-1151.

[16] SHAN Y H, HU J F, CHAN K W, et al. Model predictive

control of bidirectional DC-DC converters and AC / DC interlinking converters-a new control method for PV-wind-battery microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019,  $10(4) \cdot 1823 - 1833.$ 

- [17] HREDZAK B, AGELIDIS V G, JANG M. A model predictive control system for a hybrid battery-ultracapacitor power source [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1469-1479.
- [18] 蔡宇,林今,宋永华,等. 基于模型预测控制的主动配电网电压 控制[J]. 电工技术学报,2015,30(23):42-49. CAI Yu,LIN Jin,SONG Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,  $30(23) \cdot 42-49$
- [19] 方番,李媛,肖先勇,等. 储能型准Z源逆变器的有限集模型预 测控制策略[J]. 中国电机工程学报,2019,39(7):2133-2144. FANG Fan, LI Yuan, XIAO Xianyong, et al. An finite control set-model predictive control for energy-stored quasi-Z-source inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2133-2144.
- [20] 杨帆,刘珊,李东东. 具有模式激活的储能双向 DC-DC 变换 器的有限集模型预测控制方法[J]. 水电能源科学,2019,37(5): 185-188

YANG Fan, LIU Shan, LI Dongdong. Finite control set model predictive control with mode activation for energy storage bidirectional DC-DC converter[J]. Water Resources and Power, 2019.37(5):185-188.

- [21] 朱晓荣, 候顺达, 李铮. 基于模型预测控制的直流微电网电压 动态响应优化[J]. 电网技术,2020,44(6):2187-2195. ZHU Xiaorong, HOU Shunda, LI Zheng. Voltage dynamic response optimization of DC microgrid based on model predictive control[J]. Power System Technology, 2020, 44(6):2187-2195.
- [22] MARDANI M M, KHOOBAN M H, MASOUDIAN A, et al. Model predictive control of DC-DC converters to mitigate the effects of pulsed power loads in naval DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5676-5685.
- [23] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure [J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 174-180.
- [24] CORTES P, KOURO S, LA ROCCA B, et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives[C] //2009 IEEE International Conference on Industrial Technology. Churchill, VIC, Australia: IEEE, 2009:1-7.

#### 作者简介:



郑子萱(1990-),男,安徽天长人,副教 授,博士,研究方向为直流电网安全稳定运 行、新能源并网控制(E-mail: zhengzixuan@ scu.edu.cn);

倪扶瑶(1995-),女,四川成都人,硕 士研究生,主要研究方向为电能质量与直流 供电技术(E-mail:603590155@qq.com);

郑子萱

20312028@qq.com)<sub>o</sub>

汪 颖(1981-),女,重庆人,教授,博 士,通信作者,主要研究方向为电能质量与优质供电(E-mail:

(编辑 任思思)

# Operation resilience enhancing strategy of DC microgrid based on model predictive controlled hybrid energy storage system

ZHENG Zixuan, NI Fuyao, WANG Ying, XIE Qi

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: DC microgrids face dynamic power imbalance problems at different time scales due to renewable energy power fluctuations, load changes, faults and unplanned off-grid events. Operation resilience of DC microgrid reflects the system ability to respond quickly, reduce performance loss and recover as soon as possible under high frequency / small disturbance events and low frequency / extreme events. An enhancement strategy of DC microgrid operation resilience based on FCS-MPC(Finite Control Set Model Predictive Control) of hybrid energy storage system is proposed. To improve the evaluation system of DC microgrid resilience, a method to quantify the operation resilience of DC microgrid is proposed. Secondly, a discrete prediction model of hybrid energy storage system is established, and the cost function and the weighting factors between different control objectives are designed to maximize the advantages of power-type and energy-type energy storage systems. The fast charging and discharging ability and automatic energy recovery based on local signals are realized. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed resilience enhancement method are verified by cases of multiple disturbance events.

Key words: DC microgrid; hybrid energy storage system; model predictive control; resilience

(上接第144页 continued from page 144)

# Dynamic stability control strategy of DC microgrid based on additional electric quantity

FU Yuan, SHAO Xinyu, ZHAO Xinyan, ZHANG Xiangyu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract**: The low inertia of the DC microgrid, as well as the negative damping introduced by short-time constant power of distributed power supply and load after disturbance, will weaken the dynamic stability of DC voltage. Thus the dynamic stability mechanism of DC microgrid is deeply discussed, and the stability criterion of the system is endowed with physical significance from the perspective of electric quantity. Firstly, based on the volt-ampere characteristics of DC microgrid, the movement trajectory and stable operation constraints of the system operating point are analyzed. Secondly, based on the state equation of the DC microgrid, the electric quantity model of the system is derived, and the influence mechanism of the transient electric quantity provided by the converters at each terminal on the stable operation of DC microgrid based on additional electric quantity are proposed. Thirdly, based on the dynamic stability margin of DC microgrid, by improving the voltage droop control of the energy storage side converter, a DC microgrid voltage transient process is analyzed. Finally, a multi-terminal DC microgrid simulation system is built to verify the correctness of the proposed voltage dynamic stability criterion and the supporting ability of additional electric quantity to dynamic stability of DC microgrid.

Key words: DC microgrid; volt-ampere characteristics; additional electric quantity; stability margin; voltage stability

参数	数值
直流母线电压 U <sub>dc</sub> /V	750
电池电压 Ubat/V	600
电池单元电感 L <sub>b</sub> /H	0.001
超导磁体电感 L <sub>SMES</sub> /H	1.2
直流母线电容 Cbus/mF	40
电阻负载 P <sub>r</sub> /kW	1000
脉冲功率负载 Pppl/kW	450
光伏发电系统额定功率 Ppv_rate/kW	$100 \times 5$
MPC 采样时间 T <sub>s</sub> /µ s	50

表 A1 直流微电网仿真参数 Table A1 Parameters of DC microgrid system in simulation