# 不平衡网压下 MMC-BESS 的新型 SOC 均衡控制研究

#### 贺坤<sup>1</sup>,王灿<sup>1</sup>,张坎<sup>1</sup>,陈凯平<sup>2</sup>,朱汉钦<sup>2</sup>,符志宇<sup>2</sup>,徐雷<sup>2</sup>

(1.湖南长高高压开关有限公司,湖南长沙410200;2.长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南长沙410114)

摘要:针对高压直流输电系统中发生不对称故障情况下,模块化多电平储能换流器(MMC-BESS)的荷电 状态(SOC)均衡过程较长、资源配置不均、易发生过调制等影响系统安全运行的问题,提出了一种不平衡网压 下模块化多电平储能换流器的新型荷电状态均衡控制策略,该方法针对于相间、上下桥臂间及子模块间提出 两种不同的均衡控制策略。首先通过将桥臂输出能量作为反馈量调节相单元与上下桥臂的输出功率,调控桥 臂环流中的直流分量和基频分量达到相间和桥臂间的SOC快速均衡;其次,对子模块间的SOC均衡比例增益 添加限制,再通过判决函数进行判别。最后,通过验证表明,提出的控制策略与工程中常规的直接SOC均衡控 制策略相比拥有更好的控制性能和响应速度。

关键词:模块化多电平储能换流器;荷电状态;不对称故障;循环电流 中图分类号:TM28 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd23487

#### Research on a Novel SOC Equalization Control Strategy for MMC-BESS Under Unbalanced Network Voltage

HE Kun<sup>1</sup>, WANG Can<sup>1</sup>, ZHANG Kan<sup>1</sup>, CHEN Kaiping<sup>2</sup>, ZHU Hanqin<sup>2</sup>, FU Zhiyu<sup>2</sup>, XU Lei<sup>2</sup>

(1.Hunan Changgao High Voltage Switchgear Co., Ltd., Changsha 410200, Hunan, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** In the case of asymmetric faults in high voltage direct current (HVDC) transmission system, modular multilevel converter-battery energy storage system (MMC-BESS) has a longer state of charge (SOC) balancing process, uneven allocation of resources, easy to occur over modulation and other security problems, a new SOC equalization control strategy for MMC-BESS under unbalanced network pressure was presented. Two different equalization control strategies were proposed for interphase, upper and lower bridge arms and submodules. Firstly, by using the output energy of the bridge arm as the feedback quantity to adjust the output power of the phase unit and the upper and lower bridge arms, the DC component and the fundamental frequency component in the bridge arm circulation were regulated to reach the SOC rapid equilibrium between the phases and the bridge arms. Secondly, restriction was added to the proportional gain of SOC balance between submodules, and then the judgment function was used. Finally, the experimental shows that the proposed control strategy has better control performance and response speed than the conventional direct SOC equalization control strategy in engineering.

Key words: modular multilevel energy storage converter; state of charge (SOC); asymmetric fault; circulating current

基于模块化多电平换流器(modular multilevel monverter, MMC)的高压柔性直流输电技术作 为当代电压源换流器的新型直流输电技术,是当 今柔性直流输电技术的研究重点。同传统直流

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977014);长沙市重大专项(kh2003007)

作者简介:贺坤(1985—),男,学士,工程师, Email: 13574848034@qq.com

输电技术相比,基于 MMC 的柔性直流输电技术 具备独立调节有功与无功功率的能力<sup>[1-3]</sup>。但在 其控制方面,子模块电容电压的均衡问题和各桥 臂之间的环流问题一直是研究的重点<sup>[4-6]</sup>。

储能系统的加入,对于增加电网供电的可靠 性和给予电网功率支撑方面起到了明显的作用。 模块化多电平储能换流器目前已经引起国内外 研究人员的关注[7-8]。由于储能电池的电压随电 荷状态变化的影响很小,故在电池的正常工作状 态可以视其电压恒定不变,储能子模块的电容电 压就可以等效为电池电压啊。故对于模块化多电 平储能换流器,其避免造成储能容量配置浪费的 子模块荷电状态的均衡控制成为研究的重点。 现有许多文献都提出了子模块的荷电状态(state of charge, SOC)均衡控制, 如通过控制相、桥臂、 子模块功率的角度研究了三级 SOC 策略,实现 SOC的均衡控制<sup>[10]</sup>。文献[11]建立电池组的非线 性模型,采用模型预测方法得到SOC控制策略, 但该方法控制复杂,参数难以整定。文献[12]分 析了电源间的功率传输关系,提出了一种故障容 错工况下的SOC均衡控制策略。

但对于不平衡网压状况下,上述方法都有所 不足。不平衡网压工况下,相间功率不均衡和二 次谐波对子模块SOC均衡的影响更为明显,过调 制现象更加严重,进而影响SOC均衡速率和系统 安全运行。基于以上,本文提出一种新型模块化 多电平储能换流器功率均衡控制策略,该方法针 对于相间,上、下桥臂间和子模块间提出两种不 同的均衡控制策略,从而缩短均衡时间,避免能 量配置上的浪费,防止过调制情况下对SOC均衡 控制的影响。最后,通过仿真实验平台验证了所 提方法的有效性和优越性。

#### 1 MMC-BESS 拓扑结构及数学模型

MMC-BESS的拓扑结构如图1所示。图1中, v<sub>j</sub>和*i<sub>j</sub>(j=a,b,c)*分别为交流侧相电压和相电流;*u<sub>ij</sub>*和*u<sub>uj</sub>*分别为上、下桥臂的桥臂电压;*i<sub>ij</sub>和i<sub>uj</sub>*分别为 流经上、下桥臂的桥臂电流;Z<sub>s</sub>和Z<sub>0</sub>分别为交流侧 等效阻抗和桥臂等效阻抗;*u<sub>dc</sub>*为直流母线电压; *i<sub>cij</sub>为j*相环流;C为子模块电容;E代表与子模块 电容并联的储能电池。由图1可以得知,若忽略 电池 SOC 变化给电池电压造成的细微影响, MMC-BESS的子模块电容电压可以等效为电池电 压,在理论分析中电池电压视为恒定值。



图1 MMC-BESS 拓扑结构

Fig.1 MMC-BESS topology

根据图1所定义的桥臂电流方向,桥臂电流 可以表示为

$$\begin{cases} i_{pj} = i_{cinj} + \frac{1}{2}i_j \\ i_{nj} = i_{cinj} - \frac{1}{2}i_j \end{cases}$$
(1)

利用KVL可以建立MMC第j相电路方程:

$$\begin{cases} u_{pj} = \frac{1}{2} u_{dc} - v_j - Z_0 i_{pj} \\ u_{nj} = \frac{1}{2} u_{dc} + v_j - Z_0 i_{nj} \end{cases}$$
(2)

将式(1)代入到式(2)中可以得到:

$$\begin{cases} u_{pj} = \frac{1}{2} u_{dc} - u_j - \frac{1}{2} i_j Z_0 - Z_0 i_{cirj\_dc} - Z_0 i_{cirj\_ac} \\ u_{nj} = \frac{1}{2} u_{dc} + u_j - \frac{1}{2} i_j Z_0 - Z_0 i_{cirj\_dc} - Z_0 i_{cirj\_ac} \end{cases}$$
(3)

式中:*i*<sub>cirj\_ac</sub>为循环电流中的交流分量;*i*<sub>cirj\_dc</sub>为循环 电流中的直流分量。

对于MMC-BESS系统来说,子模块电容电压的波动受储能电池充放电的影响很小。因此,在 正常工况下,桥臂总输出电压可以看作是稳定的, 不会出现以往传统MMC拓扑中提及的以二倍频 为主的谐波电压分量。在三相参数完全相同的情 况下,MMC-BESS内部直流侧电流由三相均分,交 流侧相电流由上、下桥臂均分,桥臂电压中的谐波 分量Z<sub>o</sub>i<sub>cirjac</sub>应为0,桥臂电流的表达式可以修正为

$$\begin{cases} i_{pj} = \frac{1}{3}i_{dc} + \frac{1}{2}i_{j} \\ i_{nj} = \frac{1}{3}i_{dc} - \frac{1}{2}i_{j} \end{cases}$$
(4)

#### 式中: i de 为直流侧电流。

因此,在正常工况下,环流中不包含二倍频 谐波分量。环流表达式可以写为

$$i_{\rm cirj} = i_{\rm cir_{dc}} = \frac{1}{2}i_{\rm dc} \tag{5}$$

对于储能电池而言,SOC的不均衡会降低系统的能源转换效率,造成资源配置的浪费。本文采用运用广泛的安时积分法对储能电池的SOC进行估计,该方法通过计算储能电池工作期间的充放电量来估算SOC,其定义表达式为

$$S(t) = S(0) - \frac{\int_{0}^{t} i(t) dt}{36000}$$
(6)

式中:S(t)为储能电池t时刻的SOC值;S(0)为储 能电池初始时刻的SOC值;Q为储能电池的总电量。

$$i(t) = \frac{P_{\rm m}}{u_{\rm m}} \tag{7}$$

式中:i(t)为储能电池t时刻的充放电电流; $P_m$ 为储能电池的功率; $u_m$ 为储能子模块电容电压。

### 2 正常工况下常规 SOC 均衡控制 策略

常规 SOC 均衡控制策略主要是以不同子模 块电池 SOC 分布和各系统级的功率参考值为依 据,对功率进行再分配,从而控制子模块电池的 充放电流大小,从而达到 SOC 均衡的目的。

定义 $S_{sum_avg}$ 为三相桥臂SOC总平均值; $S_{j_avg}$ 为 *j*相桥臂的SOC平均值; $S_{pj_avg}$ 和 $S_{nj_avg}$ 分别为*j*相上、 下桥臂的SOC平均值,它们的表达式关系如下:

$$\begin{cases} S_{\text{sum\_avg}} = \frac{1}{3} \left( S_{a\_\text{avg}} + S_{b\_\text{avg}} + S_{c\_\text{avg}} \right) \\ S_{j\_\text{avg}} = \frac{1}{2} \left( S_{pj\_\text{avg}} + S_{nj\_\text{avg}} \right) \end{cases}$$
(8)

对式(6)求导可得:

$$\frac{\mathrm{d}S(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{i(t)}{3\,600Q} \tag{9}$$

三相桥臂 SOC 总平均值 S<sub>sum\_avg</sub> 同*j* 相桥臂的 SOC 平均值 S<sub>j\_avg</sub>比较后,差值经比例放大得到*j* 相 桥臂子模块 SOC 均衡的均衡功率差值,结合式 (7)和式(9)可以得到反馈值 S<sub>j\_avg</sub>,同理可得桥臂 间和子模块间的 SOC 均衡控制策略,整体的三级 SOC 均衡控制策略如图 2 所示,其中,P<sub>sum\_avg</sub>为三 相桥臂总功率平均值,P<sub>j\_avg</sub>为*j* 相桥臂的功率平均 值,S<sup>x</sup><sub>p\_nj\_avg</sub>为*j* 相上、下桥臂第 x 个子模块电池的总 荷电状态平均值,N 为子模块个数。



由图2可以发现,传统SOC均衡控制方法是 依据SOC的差值变化量来调节子模块电池组间 的功率分配,在发生不对称故障时,相间功率会 发生突变,但SOC本身的变换是非常缓慢的,若 此时继续用SOC平均值作为反馈量,系统子模 块SOC达到平衡的时间将被拉长,造成资源上 的浪费。因此,需要对不平衡网压下系统进行 重新分析。

正常工况下,以整流端为例,忽略器件损耗, MMC-BESS在交流侧吸收的有功功率*P<sub>j\_ac</sub>*应该等 于直流侧输出的有功功率*P<sub>j de</sub>*,如下式所示:

 $P_{j\_dc} = P_{j\_ac} = \frac{1}{T} \int_0^T v_j i_j dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_{dc} i_{j\_dc} dt \quad (10)$ 式中:T为周期时间; $i_{j\_dc}$ 为交流侧相电流中的直 流分量。

根据能量守恒定理,即使在不对称故障下,交 流侧吸收的有功功率依旧应该等同于直流侧输出 的有功功率。但在网压不对称的工况下,交流侧相 电压不平衡,因此交流侧相电流也会出现不平衡:

$$\begin{cases} P_{j\_dc} = P_{j\_ac} \\ v_a \neq v_b \neq v_c \end{cases} \Rightarrow i_a \neq i_b \neq i_c \tag{11}$$

由式(11)所示,交流侧相电流的不均衡将导 致 MMC-BESS 桥臂电流的不均衡,虽然子模块电 容电压被稳定在电池工作电压,但各相间流经子 模块的电流将出现差异。交流侧传输过来的二 倍频功率脉动将进入直流侧,第x个子模块电容 电压将会产生相应的二倍频纹波。根据瞬时功 率理论,子模块瞬时功率表达式可以写为

$$P_{p_{-}nj}^{x} = u_{mp_{-}nj}^{x} i_{p_{-}nj}^{x}$$
(12)

式中: $P_{p_nj}^*$ 为j相上、下桥臂第x个子模块的瞬时功 率; $u_{np_nj}^*$ 为j相上、下桥臂第x个子模块的电容电压;  $i_{p_nj}^*$ 为j相流经上、下桥臂第x个子模块的桥臂电流。 根据式(12),子模块电池的荷电状态可以表示为

$$S_{p_{-nj}}^{x} = S_{p_{-nj_{-nn}}}^{x} - \frac{\int P_{p_{-nj}}^{x}}{O}$$
(13)

式中:S<sup>\*</sup><sub>p\_nj</sub>为j相上、下桥臂第x个子模块电池的荷 电状态;S<sup>\*</sup><sub>p\_nj\_in</sub>为j相上、下桥臂第x个子模块初始 情况下的荷电状态。

从式(12)中可以得到,子模块电池的荷电状态收到子模块瞬时功率的影响。由于在交流侧不平衡故障下,MMC-BESS系统三相交流功率不一致,储能电池在与交流侧进行能量交换后会将二倍频能量波动带到直流侧,MMC-BESS相与相间的传出功率不一致,将导致相与相间子模块电池SOC不一致。

由于电池组在工作条件和原始参数等方面 存在差异,同一相上、下桥臂的等效电动势也可 能有所差异,这是无法避免的。因此,在不平衡 网压下,控制上、下桥臂子模块电池 SOC 均衡也 非常重要。

#### 3 新型SOC均衡控制策略

## 3.1 基于环流优化的相、桥臂间 SOC 均衡控制 策略

MMC-BESS 子模块拓扑结构如图1所示,根据荷电状态的定义,可以得到第x个子模块SOC 与电池组流通电流表达式

$$\begin{cases}
i_{pj}^{x} = Q \frac{\mathrm{d}S_{pj}^{x}}{\mathrm{d}t} \\
i_{nj}^{x} = Q \frac{\mathrm{d}S_{nj}^{x}}{\mathrm{d}t}
\end{cases}$$
(14)

式中:S<sup>x</sup><sub>i</sub>,S<sup>x</sup><sub>y</sub>分别为j相上、下桥臂第x个子模块电 池的荷电状态。

根据能量平衡理论和式(12),交直流侧的功 率应保持一致,对桥臂所有子模块输出功率进行 叠加,可以得到:

$$\begin{cases} P_{pj} = i_{pj} \sum_{x=1}^{N} u_{pj}^{x} = Q \sum_{x=1}^{N} \frac{\mathrm{d}S_{pj}^{x}}{\mathrm{d}t} u_{mp}^{x} \\ P_{nj} = i_{nj} \sum_{x=1}^{N} u_{nj}^{x} = Q \sum_{x=1}^{N} \frac{\mathrm{d}S_{nj}^{x}}{\mathrm{d}t} u_{mn}^{x} \end{cases}$$
(15)

式中:u<sup>\*</sup><sub>mp</sub>,u<sup>\*</sup><sub>mn</sub>分别为上、下桥臂第x个子模块的电池电压。

为控制子模块电池各个时刻的SOC均衡,将 SOC平均值带入式(15)中,可以得到上桥臂的平 均输出功率<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} P_{pj\_avg} = i_{pj}u_{pj} = Nu_{m\_avg}Q \frac{dS_{pj\_avg}}{dt} \\ P_{nj\_avg} = i_{nj}u_{nj} = Nu_{m\_avg}Q \frac{dS_{nj\_avg}}{dt} \end{cases}$$
(16)

式中:下标"avg"为相应变量的平均值。

将式(1)和式(2)代入式(16)中可以得到单 相总桥臂输出功率 $P_{sumj}$ 和单相上、下桥臂功率差  $P_{p \rightarrow n}$ :

$$\begin{cases} P_{\text{sumj}} = P_{\text{pj_avg}} + P_{\text{nj_avg}} \\ = Nu_{\text{m_avg}}Q(\frac{dS_{\text{pj_avg}}}{dt} + \frac{dS_{\text{nj_avg}}}{dt}) \\ = u_{\text{dc}}i_{\text{cirj}} - i_jv_j - Z_0(i_{\text{pj}}^2 + i_{\text{nj}}^2) \\ P_{\text{p}\to\text{n}} = P_{\text{pj_avg}} - P_{\text{nj_avg}} \\ = Nu_{\text{m_avg}}Q(\frac{dS_{\text{pj_avg}}}{dt} - \frac{dS_{\text{nj_avg}}}{dt}) \\ = \frac{1}{2}u_{\text{dc}}i_j - 2v_ji_{\text{cirj}} - Z_0(i_{\text{pj}}^2 - i_{\text{nj}}^2) \end{cases}$$
(17)

忽略式(17)中的交流分量,可以得到:

$$\begin{cases} Nu_{\rm m}Q\left(\frac{\mathrm{d}S_{\rm pj,avg}}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}S_{\rm nj,avg}}{\mathrm{d}t}\right) \\ \approx u_{\rm dc}I_{\rm cir_{\rm dc}} - \frac{1}{2}I_{j}v_{j}\cos\varphi_{1} \\ Nu_{\rm m}Q\left(\frac{\mathrm{d}S_{\rm pj,avg}}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}S_{\rm nj,avg}}{\mathrm{d}t}\right) \\ \approx -v_{j}I_{\rm cir1}\cos\varphi_{2} \end{cases}$$
(18)

式中:  $\varphi_1$ 为变换器出口电压超前电网电压的相 角;  $\varphi_2$ 为基频环流的相角;  $I_{cir_{dc}}$ 为环流的直流分量 幅值;  $I_{cirl}$ 为环流的基频分量幅值。

由式(18)可知,环流中的直流分量可以控制 相间子模块电池的SOC均衡,环流中的基频分量 可以控制上下桥臂间子模块电池的SOC均衡。

在正常工况下,SOC的均衡控制通常采用相 间SOC平均值(S<sub>pj\_avg</sub>+S<sub>nj\_avg</sub>)和上、下桥臂间SOC平 均值(S<sub>pj\_avg</sub>,S<sub>nj\_avg</sub>)作为输入信号进行控制。但在 不平衡网压下,三相功率出现偏差,故障相的 SOC平均值会比较正常相偏差过大,此时若仍选 择SOC平均值作为控制对象,控制时间将会过 长,造成能源分配上的浪费。因此,针对于不平 衡网压下的相间SOC均衡,本文采用各相总能量 W,作为反馈量实现相间SOC均衡。其中W,的表 达式为

$$W_{j} = \sum_{x=1}^{N} \frac{C}{2} (u_{mp}^{x})^{2} + \sum_{x=1}^{N} \frac{C}{2} (u_{mn}^{x})^{2}$$
(19)

为实现相间能量的均衡分配,各相的能量补 偿量可以表示为

$$\Delta W_{j} = W_{j} - \frac{1}{3} \left( W_{a} + W_{b} + W_{c} \right)$$
 (20)

同时为应对不同控制目标下的输出功率变 化,在相间SOC均衡控制中加入各相功率平均值 *P<sub>j\_avg</sub>*的前馈环节。各相总能量*W<sub>j</sub>*与三相总能量平 均值*W<sub>j\_avg</sub>*比较后,输出经PI控制器后同各相功率 平均值比较,输出得到各相功率参考值,参考值 除以直流母线电压*u<sub>de</sub>*,最终得到在不平衡网压工 况下的环流直流分量参考值。

相间SOC均衡控制框图如图3所示。



图3 相间SOC均衡控制框图

Fig.3 Block diagram of phase-to-phase SOC balance control

在不对称故障下,受到交流电流中负序分量 的影响,子模块电容电压会产生二次谐波电压分 量,此时,上、下桥臂间的子模块电池组SOC变化 会出现不一致,上、下桥臂的输出功率受到桥臂间 SOC的影响,由上文可知,桥臂间的SOC均衡可以 通过控制循环电流中的基频分量实现。设计上、 下桥臂间的SOC均衡控制结构如图4所示,计算 得到各相上、下桥臂的能量平均值W<sub>p\_nj\_avg</sub>,与上、 下桥臂能量W<sub>pj</sub>和W<sub>vj</sub>比较后,对MMC-BESS中的各 相上下桥臂的输出功率平均值P<sub>pj\_avg</sub>进行 求解,最后得到实现上、下桥臂间SOC均衡的环流 基频分量参考值,其参考值的计算公式为

$$i_{\text{cirj\_acl\_ref}} = \frac{P_{\text{pj\_ref}} - P_{\text{nj\_ref}}}{2u_{sj}}$$
(21)

式中:下标"ref"为相应变量的参考值。



图4 桥臂间SOC均衡控制框图



不平衡网压下,子模块间的SOC均衡控制与

正常工况下类似,但常规控制在调节过程中,子 模块电压可能会超出输出范围、出现过调制的情况,此时系统中会产生大量谐波分量,谐波电压 分量会影响子模块电压的均衡,进而造成影响 SOC均衡控制的恶性循环。这种现象在不平衡 网压下会更加明显,若此时不对SOC均衡控制增 益进行调控,系统子模块SOC达到平衡的时间将 被拉长。

因此,增益K<sub>3</sub>应该被限制为

$$K_{3} \frac{S_{j_{avg}}/2N - S_{p_{-}nj_{avg}}^{*}}{P_{p_{-}nj_{-}}/2N} \leq \frac{1 - m}{1 + m}$$
(22)

式中:*S<sub>j\_avg</sub>*,*S<sup>x</sup><sub>p\_nj\_avg</sub>*分别为*j*相的SOC平衡值和*j*相上(下)桥臂第*x*个子模块的SOC值;*P<sub>p\_nj</sub>为<i>j*相上(下)桥臂总输出功率;*m*为调制比,当调制比*m*过大时,增益*K*<sub>3</sub>会减小,从而增加了SOC的均衡时间。

为进一步加快子模块间的 SOC 均衡控制速 率,采用判决函数对 SOC 指令值进行再分类,子 模块间的 SOC 均衡控制框图如图 5 所示,判决函 数的分类流程示意图如图 6 所示。







Fig.6 The flow block diagram of the judgment function classification 图 6 中,在得到  $S_{j_{avg}} \pi S^{*}_{p_{-nj}}$ 的差值 $\Delta S^{*}_{p_{-nj}}$ 后对 其进行再分类,挑选出在误差 $S_{Judge}$ 范围内的差值  $\Delta S^{*}_{p_{-nj}}$ ,输出所有符合条件子模块调制输出。对于 不在误差范围内的子模块进行调节,根据电池充 放电状态进行分类,根据 CPS-PWM 原理进行调 制波调整,具体步骤在文献[14]中已详细给出,最 后输出子模块调制波参考信号。

#### 3.3 不平衡网压下桥臂能量波动抑制

正常工况下,MMC-BESS的子模块电容电压 被稳定为电池电压,但当系统发生不对称故障 时,交流电流中会产生影响功率均衡的负序分 量。以抑制负序电流为目标,同时为抵御2倍频 波动对子模块电容电压的影响,本文采用2倍频 环流注入的方法,进一步降低不平衡网压工况下 对 MMC-BESS系统的冲击,所注入的2倍频环流 参考值为

$$\begin{split} i_{\text{cirj\_ac2\_ref}} &= \frac{UI}{2u_{\text{dc}}} \cos(2\omega t + \varphi) + \\ &\quad r \frac{UI}{2u_{\text{dc}}} \cos(2\omega t + \varphi + \theta) \end{split}$$

(23)

式中:U,I分别为三相交流电压、电流的幅值;ω 为交流系统电压的角频率;θ为负序网压的相位; φ为交流侧相电流的相角;r为交流系统电压的不 平衡度。

为实现系统相间 SOC 均衡、桥臂间 SOC 均衡 以及2倍频波动抑制,最终得到的环流参考值可 以表达为

 $i_{cirj\_ref} = i_{cirj\_dc\_ref} + i_{cirj\_ac1\_ref} + i_{cirj\_ac2\_ref}$  (24) 式中:下标"1","2"分别为相应变量的1,2倍频 变量。

综合以上,图7为系统总体控制框图,在该控制策略下能保证在不平衡网压下的正常运行,并 且保持相间和桥臂间的SOC均衡。



#### 4 实物验证

为验证在不平衡网压下,新型SOC均衡控制 策略的可行性,配合传统SOC均衡控制策略进行 对比实验,搭建了11电平的实验平台,平台照片 如图8所示,平台具体参数如下所示:子模块个数 N=10个,桥臂电感L=2.5 mH,桥臂电阻R=0.1 Ω, 直流侧电压U<sub>de</sub>=0.4 kV,子模块额定电容C=12 mF, 负载电阻R=20 Ω,负载电感L=10 mH。在1 s时, B相电压跌落50%,并网侧三相电压波形v<sub>s</sub>如图 9所示。



图 10 为本文所提控制策略和传统控制策略 两种均衡控制策略下的并网侧三相电流*i<sub>s</sub>*波形, 通过观察可以发现,两种均衡控制都能使三相电 流保持平稳,并且将幅值控制在合理范围内。但 新型 SOC 均衡控制策略相比较传统控制策略而 言平衡速度更快,并且纹波水平明显更小。





图 10 中,1 s时,b相电压跌落,三相并网功率 P<sub>mj</sub>如图 11 所示。此时,SOC 均衡控制策略启动, 三相电池组的输出功率如图 12 所示。





由图 12a 可知,即使是在三相并网功率不一 致的工况下,新型 SOC 均衡控制策略依旧能使得 电池组输出功率趋于一致,并且相比较图 12b 中 的传统控制策略来说,输出功率的平衡速度明显 更快,这是由于本文所提控制策略跳过 SOC 估算 环流,采用能量反馈量直接控制的结果。

两种控制策略在不对称故障下电池组 SOC 曲线如图 13 所示。



值高于其他两相。在3.6 s左右,本文所提控制策 略已经实现相间的SOC均衡,这跟三相电池组输 出功率的结果基本一致。而在常规控制策略下, SOC的均衡时间较长,由于仿真平台的电压等级 和电平数较小,若是在实际工程运用中,两种控 制策略下SOC的均衡时间差将更长,这段时间造 成的能源浪费不可小觑。

#### 5 结论

1)通过对不对称故障下的 MMC-BESS 系统 进行分析,计算其相间和桥臂间子模块 SOC 平均 值公式,得到了桥臂环流中直流分量和基频分量 与子模块 SOC 之间的关系,优化桥臂环流分量可 以实现相间和桥臂间 SOC 的精准控制。

2)在不对称故障下,MMC-BESS系统相间输 出功率出现不均衡,但SOC本身的变化率是缓慢 的,因此无法实时反馈SOC平均值。若改用桥臂 能量作为反馈量,在调控桥臂输出功率的同时, 可以绕过SOC平均值对SOC均衡进行间接控制, 其均衡速度大大加快,避免了SOC均衡过程中的 能源浪费。对于子模块间的SOC均衡,在增益限 制的基础上采用判决函数对调制信号重新调整, 该方法可以避免过调制的发生,同时大大提高了 SOC的收敛速率。

3)本文未考虑子模块电池组的健康状态 (state of health, SOH)参数的影响,SOH的改变是 否会对不对称故障下的SOC均衡造成影响,这也 是后续研究需要考虑的内容。

#### 参考文献

- 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2012.
   Xu Zheng. Flexible DC transmission system[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [2] Xia Xiangyang, Zhou Yun, Fu Chunhui, et al. Research on high voltage DC transmission system optimal control based on MMC[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 82:207-212.
- [3] 管敏渊.基于模块化多电平换流器的直流输电系统控制策 略研究[D].杭州:浙江大学,2013.
  - Guan Minyuan. Research on control strategy of DC transmission system based on modular multilevel converter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] 肖胜,郭伯春.基于环流注入的MMC电容电压平衡控制策略[J].电气传动,2020,50(2):39-46.

Xiao Sheng, Guo Bochun. MMC capacitor voltage balancing control strategy based on circulating current injection[J]. Electric Drive, 2020, 50(2): 39-46.

[5] 喻建瑜,刘崇茹,王洁聪.不对称工况下MMC-HVDC的故障 穿越控制策略[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5653-5665.

Yu Jianyu, Liu Chongru, Wang Jiecong. Fault ride-through control strategy of MMC-HVDC system under asymmetric grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5653– 5665.

- [6] Li J , Konstantinou G , Wickramasinghe H R , et al. Investigation of MMC-HVDC operating region by circulating current control under grid imbalances[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 152:211–222.
- [7] Michail V, Alfred R. Analysis and control of modular multilevel converters with integrated battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):163–175.
- [8] 李善颖,吴涛,任彬,等.基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J].电力系统保护与控制,2015,43(16):139-146.
  Li Shanying, Wu Tao, Ren Bin, *et al.* Review of energy storage system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control,2015,43(16):139-146.
- [9] 王帅, 荆龙, 吴学智, 等. 基于直流环流注入的 MMC 储能系
   统相间功率均衡控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2862-2869.

Wang Shuai, Jing Long, Wu Xuezhi, *et al.* Interphase power equalization control strategy for MMC energy storage system based on DC circulating current injection[J]. Power System Technology, 2017, 41(9):2862–2869.

[10] 陈强,张鲁华,吴延俊,等.储能型 MMC 换流器的 SOC 均衡

策略研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 37-43.

Chen Qiang, Zhang Luhua, Wu Yanjun, *et al.* Study on SOC balanced control strategy of MMC based BESS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 37–43.

- [11] Zhu Xiaojun, Li Yan, Yang Haidi, et al. Research on SOC balance strategy of STEKF battery based on MMC-BESS model[C]//IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020.
- [12] 郭龙,梁晖,张维戈.基于模块化多电平变流器的电池储能 系统荷电状态均衡控制策略[J].电网技术,2017,41(8): 2688-2697.

Guo Long, Liang Hui, Zhang Weige. State-of-charge balancing control strategy for battery energy storage system based on modular multi-level converter[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2688–2697.

- [13] 李楠,张磊,马士聪,等.基于模块化多电平换流器的电池储 能系统控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(9):144-150.
  Li Nan, Zhang Lei, Ma Shicong, *et al.* Control strategy for battery energy storage system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 144-150.
- [14] 黄永烁. 基于 MMC 的电池储能系统控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

Huang Yongshuo. Control strategy of battery energy storage system based on MMC[D]. WuHan : Huazhong University of Science & Technology, 2019.

> 收稿日期:2021-05-12 修改稿日期:2021-07-11