

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231432

基于 MMC 的分布式储能系统及其快速 SOC 均衡控制策略

马文忠¹, 孙伟¹, 王玉生², 张文艳¹, 李恒硕¹, 朱亚恒¹

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083)

摘要: 提高基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的分布式储能系统(distributed energy storage systems, DESS)的能量利用率, 解决储能子模块(energy sub-module, ESM)荷电状态(state of charge, SOC)均衡问题至关重要。针对现有的 SOC 均衡控制策略的不足, 提出内外分层的快速 SOC 均衡控制策略。外层针对桥臂间或相间的 SOC 差异, 通过改进 MMC 模型预测控制(model predictive control, MPC), 配合自适应均衡系数, 快速调整功率差额。内层引入自适应虚拟电阻法, 根据 ESM 的 SOC 情况确定主导 ESM, 自适应调节各单元的虚拟电阻, 产生相应的电压梯度, 结合 MMC 排序算法使 ESM 按照各自 SOC 进行功率分配, 从而实现 ESM 的 SOC 快速均衡, 提高 DESS 能量利用率。通过在 Matlab/Simulink 构建仿真模型, 证明了所提控制策略的有效性和可行性。

关键词: 模块化多电平换流器; 分布式储能系统; 模型预测控制; 荷电状态; 虚拟电阻

Distributed energy storage system based on MMC and rapid SOC balancing control strategy

MA Wenzhong¹, SUN Wei¹, WANG Yusheng², ZHANG Wenyan¹, LI Hengshuo¹, ZHU Yaheng¹

(1. Institute of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. PetroChina Planning and Engineering Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the energy utilization of distributed energy storage systems (DESS) based on modular multilevel converters (MMC), it is crucial to address the state of charge (SOC) balance of energy sub-modules (ESM). To address the limitations of existing SOC balance control strategies, a fast SOC balance control strategy based on internal and external hierarchical control is proposed. The outer layer aims to address the SOC differences between upper and lower arms or phase legs. To achieve this, this paper proposes improving the model predictive control (MPC) of MMC, in conjunction with adaptive equalization coefficients, to rapidly adjust power imbalances. The inner layer introduces an adaptive virtual resistance approach. Based on the SOC of ESM, the dominant ESM is determined, and the virtual resistance of each unit is adjusted adaptively to generate a corresponding voltage gradient. Combined with the MMC sorting algorithm, the ESM are allocated power according to their respective SOC, thereby achieving fast SOC balance and improving the energy utilization of DESS. A simulation model is built in Matlab/Simulink to demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277208).

Key words: modular multilevel converter; distributed energy storage system; model predictive control; state of charge; virtual resistor

0 引言

分布式电源(distributed generation, DG)的发展提高了清洁能源的消纳能力, 对实现节能减排意义重大^[1-3]。然而, 随着 DG 接入电网规模的扩大, 弃

光、弃风率增加, 造成了可再生能源的浪费。此外, 新能源的固有特性给电网带来了电压电流畸变、网损增多和继电保护失灵等问题^[4]。储能系统(energy storage system, ESS)能弥补 DG 的缺陷, 能够削峰填谷、平波抑动和提高能量利用率^[5-6]。因此, 储能装置与新能源发电相结合的分布式储能系统(distributed energy storage systems, DESS)为解决 DG 消纳问题

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277208)

提供了解决方案^[7-9]。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的链式结构有利于储能子模块(energy sub-module, ESM)的分散接入,降低储能器件功率等级,避免大量单体储能元件串并联。同时可作为交直流电网互联的中间缓冲环节,实现四象限功率补偿^[10-11],在 DESS 工程上得到应用。由于 MMC-DESS 由大量 ESM 串联组成,系统整体能量利用率受到储能元件荷电状态(state of charge, SOC)的限制;此外, DG 的随机性和波动性加剧了 MMC-DESS 对 SOC 均衡的要求。因此,如何提高 ESM 的 SOC 均衡速度和均衡精度成为分布式储能系统稳定运行的难点之一^[12-13]。

文献[14-17]通过对装置级控制中的调制波进行修正,经过器件级载波移项控制,实现 SOC 三级均衡。文献[14]引入基频平衡因子,与调制参考指令值叠加,带来基频环流成分,实现功率在上、下桥臂的传输交换。文献[15-16]按均衡系数分配相间 ESM 功率,在桥臂调制信号中注入直流分量,实现相间 SOC 均衡;均衡系数越大,各级 SOC 均衡速度越快,但子模块调制波有可能超调。文献[17]通过重构桥臂内各子模块的调制波,分配各 ESM 的能量,实现桥臂内子模块 SOC 均衡控制。然而,载波移项控制并不适用于高电压、大功率的场合,随着电平数的增多,调制变得困难;MMC 与储能系统高度耦合的控制方式也加大了系统复杂度。因此,将 MMC 与储能系统分开管理更适用于 MMC-DESS^[18]。文献[19]将最近电平逼近法与反步法结合实现了储能系统与 MMC 的协调控制,但 SOC 均衡时间有所延长。文献[20-22]直接控制储能充放电电流,通过设置充放电功率^[20-21],内环采用模型预测控制准确跟踪电流参考值^[22],有效降低了电池纹波;但都是依靠储能系统实现 SOC 均衡,没有充分利用 MMC 功率控制能力。文献[23]提出有限控制集模型预测控制(finite control set-MPC, FCS-MPC)与 SOC 相结合的控制策略,通过控制环流来均衡 SOC,减少系统 PI 控制器数量;但均衡速度受到 SOC 差值限制,且电池与电容直接并联的方式会影响电池寿命。

针对高电压、大功率 MMC-DESS 的 SOC 均衡问题,本文提出内外分层的快速 SOC 均衡控制策略:外层针对 MMC 桥臂间、相间 ESM 的 SOC 差异,准确跟踪环流基频分量指令值和环流直流分量指令值。内层引入自适应虚拟电阻法,将子模块电压控制和 SOC 控制结合到一个单独的控制系统中。通过修正 ESM 的电压指令值,结合 MMC 排序算法合理分配各 ESM 功率,有效提高系统的 SOC 均衡速度和精度,降低系统控制的复杂度,减小子模块电容电压

波动。通过仿真分析并与 SOC 三级均衡方法对比,证明了本文所提策略的优势。

1 MMC-DESS 拓扑结构及数学模型

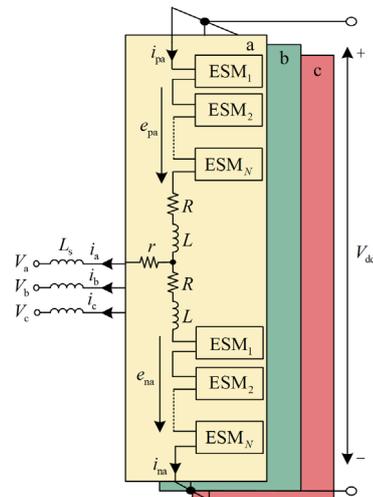
1.1 MMC-DESS 拓扑

三相 MMC-DESS 是一种带储能系统的三端口电压源换流器,拓扑如图 1(a)所示,上、下 2 个桥臂组成每相的直流侧,三相并联于公共直流母线之间;每个桥臂由多个 ESM 与桥臂电感 L 和桥臂等效电阻 R 串联构成。其中: e_{pk} 和 e_{nk} 分别为上、下桥臂的电压; V_{dc} 为直流侧电压; i_{pk} 和 i_{nk} 分别为上、下桥臂电流; V_k 和 i_k 分别为网侧电压和电流; L_s 和 r 分别为网侧等效电感和电阻; k 代表三相($k = a, b, c$)。

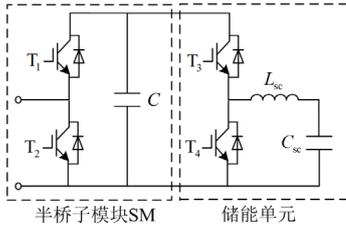
MMC-DESS 的 ESM 拓扑结构如图 1(b)所示,ESM 由 4 个 IGBT、容值为 C 的子模块电容、大小为 L_{sc} 的电感和储能元件组成; T_1 和 T_2 的开关状态决定了 ESM 的 3 种工作状态(投入、切除、闭锁)。 T_3 和 T_4 的开关状态决定了储能的充放电状态。 T_3 导通、 T_4 关断为储能投入状态; T_3 关断、 T_4 导通为储能切除状态,也为电感蓄能状态; T_3 和 T_4 同时关断为储能闭锁状态;当 T_3 处于关断状态, T_4 处于 PWM 调制状态时,储能元件工作在放电状态;当 T_4 处于关断状态, T_3 处于 PWM 调制状态时,储能元件工作在充电状态。

这里储能元件选择高功率密度的超级电容,容值为 C_{sc} ,可以外接电动汽车等直流设备或分布式电源,如图 1(c)所示。可实现分布式储能功率 P_b 、交流网侧功率 P_{ac} 、储能后级功率 P_{DL} 和中压直流母线功率 P_{dc} 的相互消纳,当系统稳定时,有

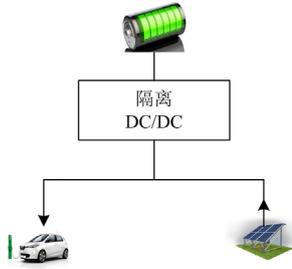
$$P_{ac} + P_{dc} + P_b + P_{DL} = 0 \quad (1)$$



(a) MMC-DESS 拓扑结构



(b) ESM拓扑图



(c) ESM后级

图1 MMC-DESS 结构

Fig. 1 Structure diagram of MMC-DESS

1.2 MMC-DESS 数学模型

MMC-DESS 的子模块状态受到桥臂电流和储能单元电流的双重影响。当储能控制环节采用双闭环控制策略时, 受控电压源的控制量可等效为一电流源、电容和受控电压源并联。上、下桥臂可以视为两个受控电压源。此外, 由于三相 MMC-DESS 拓扑为三相对称结构, 对其中任意相分析得到等效电路如图 2 所示。 i_{mkj} 、 i_{scmkj} 和 i_{cmkj} 分别为子模块电流、储能单元充放电电流和子模块电容电流。其中: $m = p, n$; $j = 1 \sim N$ 。

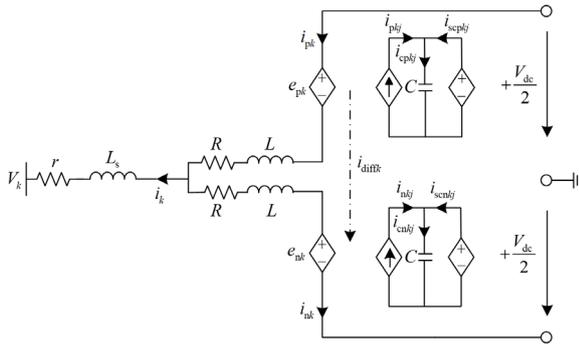


图2 单相等效开关模型

Fig. 2 Single-phase equivalent switch model

i_{pk} 、 i_{nk} 、 i_k 和不均衡电流 i_{diffk} 的关系为

$$i_{pk} = \frac{i_k}{2} + \frac{i_{dc}}{3} + i_{diffk} \quad (2)$$

$$i_{nk} = -\frac{i_k}{2} + \frac{i_{dc}}{3} + i_{diffk} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{V_{dc}}{2} - \frac{e_{pk} + e_{nk}}{2} = Ri_{diffk} + L \frac{di_{diffk}}{dt} \\ i_{diffk} = \frac{i_{pk} + i_{nk}}{2} = -\frac{i_{dc}}{3} + i_{zk} \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_{dc} 为直流母线电流; i_{zk} 为环流。 i_{zk} 和 i_{dc} 共同影响了 i_{diffk} , 在三相对称运行情况下, 直流母线电流由三相平均分配。

根据基尔霍夫定律, 得到交直流电压方程如下:

$$V_k = \frac{V_{dc}}{2} - e_{pk} - L \frac{di_{pk}}{dt} - Ri_{pk} - L_s \frac{di_k}{dt} - ri_k \quad (5)$$

$$V_k = -\frac{V_{dc}}{2} + e_{nk} + L \frac{di_{nk}}{dt} - Ri_{nk} - L_s \frac{di_k}{dt} - ri_k \quad (6)$$

定义差模电压 e_k 为

$$e_k = \frac{e_{pk} - e_{nk}}{2} \quad (7)$$

式(5)与式(6)相减, 代入式(7), 令 $L' = L_s + L/2$,

$R' = r + R/2$, 整理得到内部动态电压电流方程为

$$L' \frac{di_k}{dt} = e_k - V_k - R' i_k \quad (8)$$

MMC 稳定运行状态下, 环流主要由直流分量和二倍频分量构成。环流抑制控制策略可以很好地控制二倍频分量, 忽略二倍频以上成分, 得到上、下桥臂功率 P_{pk} 、 P_{nk} 和相功率 P_k 的数学表达式分别为

$$P_{pk} = \frac{1}{T} \int_0^T e_{pk} i_{pk} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{2} V_{dc} - e_k \right) \left(i_{zk} + \frac{1}{2} i_k \right) dt = \quad (9)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} V_{dc} i_{zk} dt - \frac{1}{2} E_k I_k \cos \varphi - \frac{1}{T} \int_0^T e_k i_{zk} dt$$

$$P_{nk} = \frac{1}{T} \int_0^T e_{nk} i_{nk} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{2} V_{dc} + e_k \right) \left(i_{zk} - \frac{1}{2} i_k \right) dt = \quad (10)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} V_{dc} i_{zk} dt - \frac{1}{2} E_k I_k \cos \varphi + \frac{1}{T} \int_0^T e_k i_{zk} dt$$

$$P_k = P_{pk} + P_{nk} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{dc} i_{zk} dt - E_k I_k \cos \varphi \quad (11)$$

式中: E_k 为输出电压有效值; I_k 为网侧电流有效值; φ 为功率因数角; T 为计算时间。

由式(9)和式(10)可知, 控制 MMC-DESS 中基频环流的大小, 就能控制上、下桥臂间的功率差额。由式(11)可知, 控制 MMC-DESS 中环流直流分量的大小, 就能控制三相之间的功率差额。这为 MMC-DESS 的 SOC 均衡提供了可能。

2 控制策略

2.1 交流侧功率控制

传统的交流侧功率控制器由多个 PI 控制器组成, 设计复杂且参数难以整定。MPC 控制原理简单, 利于多目标优化, 且交流功率控制与环流控制互不影响, 能实现对交流侧电流指令值和环流指令值的准确跟踪, 与 MMC-DESS 契合度较高。所以本文采用 MPC 方法控制交流侧功率。根据交流侧有功功率和无功功率指令值, 得到 MMC-DESS 的交流电流参考指令值, 利用 MPC 进行跟踪。

用欧拉法对式(8)进行离散化, 可得

$$i_k(t+T_s) = \frac{1}{R' + \frac{L'}{T_s}} \left[e_k(t+T_s) - V_k(t+T_s) + \frac{L'}{T_s} i_k(t) \right] \quad (12)$$

式中: $i_k(t+T_s)$ 为交流侧电流预测值; T_s 为仿真步长。

根据有功功率和无功功率指令值, 得到电流参考指令值 $i_k^*(t+T_s)$, 定义成本函数 J_k 为

$$J_k = |i_k^*(t+T_s) - i_k(t+T_s)| \quad (13)$$

FCS-MPC 根据不同开关组合确定最优导通子模块数, 根据输出电平进行预测寻优, 可以大大减少计算量。虽然需要引入电容电压排序策略, 但合理的排序策略可以降低投切频率, 延长 SOC 不平衡 ESM 的充放电时间, 加快 SOC 均衡速度。当 MMC-DESS 电平数为 $N+1$ 时, 差模电压参考值 e_k^* 取值如式(14); 将式(14)中 e_k^* 的所有取值代入式(12)和式(13), 得到最优参考电压后, 通过式(15)和式(16)即可计算得到上、下桥臂电压参考值 e_{pk}^* 、 e_{nk}^* 。控制框图如图 3 所示。

$$e_k^* = \frac{V_{dc}}{N} \left[-\frac{N}{2}, -\frac{N-1}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N-1}{2}, \frac{N}{2} \right] \quad (14)$$

$$e_{pk}^* = \frac{V_{dc}}{2} - e_k^* \quad (15)$$

$$e_{nk}^* = \frac{V_{dc}}{2} + e_k^* \quad (16)$$

式中: 上、下桥臂电压参考值 e_{mk}^* 的取值范围为 $\{0, V_{dc}/N, \dots, (N-1)V_{dc}/N, V_{dc}\}$, 其中 $m = p, n$ 。

由 e_{mk}^* 推导出初始上、下桥臂导通 ESM 数量 n_{mk0}^* 为

$$n_{mk0}^* = e_{mk}^* \frac{N}{V_{dc}} \quad (17)$$

2.2 储能功率控制

当 ESM 的双向 DC/DC 电路采用恒电压控制时,

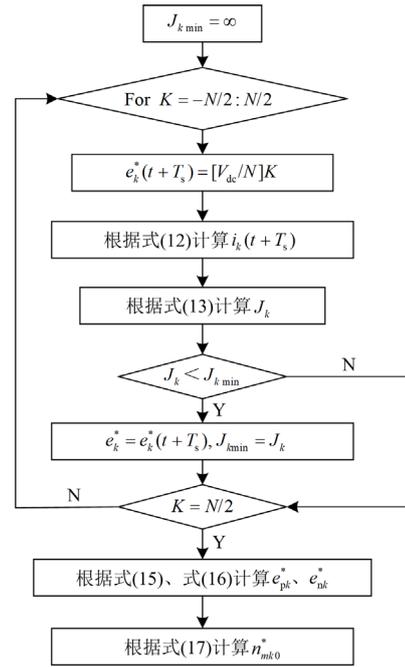
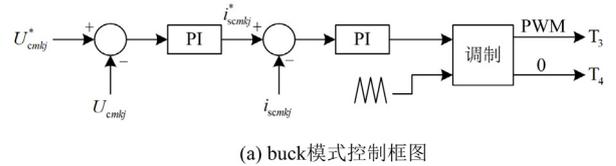


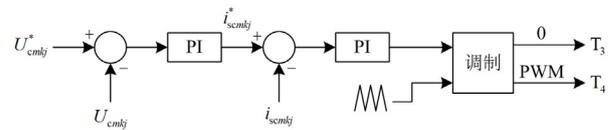
图 3 交流侧功率控制框图

Fig. 3 Block diagram of the AC side power control

可以减小子模块电容电压波动, 起到一定的均压作用, 有利于后续虚拟电阻法和 MMC 排序策略相结合, 实现 SOC 均衡控制和电容电压控制一体化。故本文双向 DC/DC 储能环节采用双闭环的恒压控制策略, 其控制框图如图 4 所示。其中: U_{cmkj} 为子模块电容电压; U_{cmkj}^* 为子模块电容电压指令值; i_{scmkj}^* 为储能单元充放电电流指令值。



(a) buck模式控制框图



(b) boost模式控制框图

图 4 双向 DC/DC 控制框图

Fig. 4 Control diagram of bidirectional DC/DC

2.3 SOC 均衡控制

当分布式电源或负荷波动性较大时, 如果 MMC-DESS 的 SOC 均衡速度慢, 会严重限制储能系统容量, 甚至会对系统稳定性造成影响。为了实现各个 ESM 的 SOC 快速均衡, 设计了基于改进

FCS-MPC 和自适应虚拟阻抗的分层 SOC 均衡控制策略。外层根据 SOC 差值和自适应均衡系数, 控制 MMC 环流产生功率差, 结合改进 FCS-MPC 实现相间和上下桥臂的 SOC 快速均衡; 内层通过引入虚拟电阻和 MMC 排序算法相结合, 实现桥臂内 ESM 的 SOC 快速均衡。

2.3.1 外层 SOC 均衡控制

由式(9)一式(11)可知, 通过控制环流的基频分量和直流分量就可以控制三相间和上、下桥臂间的功率差额, 恒压模式运行的 ESM 可吸收这些功率差额。因此, 控制三相间和上、下桥臂间的功率差额就能实现相间或上、下桥臂之间的 SOC 均衡。针对传统 FCS-MPC 难以实现网侧功率控制和环流控制解耦问题, 本节提出了准确跟踪环流指令值的改进 FCS-MPC 算法。

记 S_{ave} 为三相 ESM 的 SOC 平均值, S_k 为第 k 相 ESM 的 SOC 平均值, S_{mk} 为 k 相上/下桥臂 ESM 的 SOC 平均值, S_{mkj} 为每个 ESM 的 SOC 值, 其关系为

$$\begin{cases} S_{ave} = \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \\ S_k = \frac{1}{2}(S_{pk} + S_{nk}) \\ S_{mk} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{mkj} \end{cases} \quad (18)$$

结合式(18), 环流指令值 i_{zk}^* 由图 5 所示控制框图得到。其中 $\lambda = \{-1, 0, 1\}$; d_k 为 k 相 SOC 平均值与 S_{ave} 之差; d_{kpn} 为 k 相上、下桥臂 SOC 平均值之差; K_1 和 K_2 分别为相间和桥臂间的均衡系数。

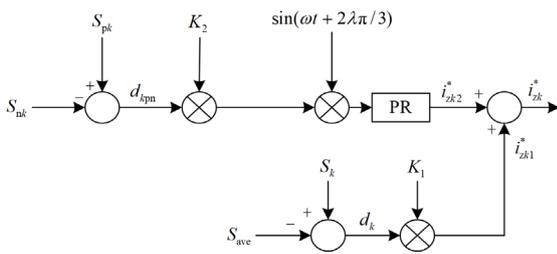


图 5 环流控制器框图

Fig. 5 Diagram of circulating current controller

如果均衡系数 K_1 和 K_2 为定值, 则 SOC 的均衡范围有限^[15], 且均衡速度随着 SOC 收敛快速下降。为了解决这一问题, 本文提出自适应均衡系数法。定义 SOC 均衡指令值为 ζ , 环流上限和下限分别为 $i_{z,max}$ 和 $i_{z,min}$ 。环流上限是为了保证系统器件安全运行, 环流下限是为了保证 SOC 的均衡速度。 ζ 和 $i_{z,min}$ 共同决定了均衡精度。均衡系数 K_1 和 K_2 的值由式

(19)得到。

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{a_1 d_k + b_1} \\ K_2 = \frac{1}{a_2 d_{kpn} + b_2} \end{cases} \quad (19)$$

根据式(19)和图 5 所示控制框图可以得到 d_k 与 i_{zk1}^* 的关系如图 6 所示。选取合适的 ζ , $i_{z,max}$ 和 $i_{z,min}$ 就能得到式(19)中 a_1 、 b_1 的值; 同理, 可以得到 a_2 、 b_2 的值。

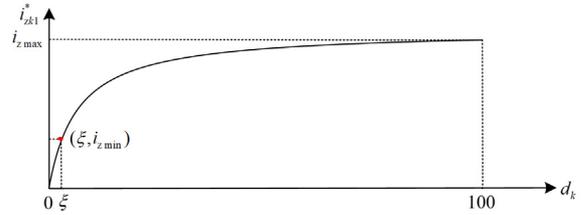


图 6 环流指令值函数

Fig. 6 Function of reference value of circulating current

用欧拉法对式(4)进行离散化, 可得

$$i_{diffk}(t+T_s) = \frac{V_{dc}(t+T_s)}{2R + \frac{2L}{T_s}} + \frac{L}{T_s} i_{diffk}(t) - \{e_{nk}^*(t+T_s) + e_{pk}^*(t+T_s)\} \quad (20)$$

由式(7)可知, e_k 由上、下桥臂的差模电压决定。因此, 在上桥臂和下桥臂加上或者减去一个相同的电压 V_{diffk} , 对 e_k 没有影响, 可以在不影响交流侧功率情况下控制环流。因此, 可以将 V_{diffk} 添加到式(20)中, 用于内部环流控制, 如式(21)所示。

$$i_{diffk}(t+T_s) = \frac{V_{dc}(t+T_s)}{2R + \frac{2L}{T_s}} + \frac{L}{T_s} i_{diffk}(t) - \{(e_{nk}^*(t+T_s) + V_{diffk}) + (e_{pk}^*(t+T_s) + V_{diffk})\} \quad (21)$$

为了减少计算量, V_{diffk} 选取 3 种状态进行寻优计算, 如式(22)所示。

$$V_{diffk} = \frac{V_{dc}}{N} [-1, 0, 1] \quad (22)$$

定义成本函数为

$$J_{diffk}(t+T_s) = \left| \frac{i_{dc}}{3} + i_{zk}^* - i_{diffk}(t+T_s) \right| \quad (23)$$

在 SOC 高度不均衡的情况下, 可以适当提高功率误差, 提高 SOC 均衡速度。为此, 改进 FCS-MPC 策略。给交流侧功率控制得到的 n_{mk0}^* 增加一个自由度 σ , 产生一个开关状态指令集, 增加环流寻优计

算的范围,实现环流准确跟踪指令值。如果取 $\sigma = 1$,生成一组开关状态指令集如表 1 所示。

表 1 开关状态指令集

Table 1 Switch state instruction set

序号	n_{pk1}^*	n_{nk1}^*	总桥臂模块数
1	n_{pk0}^*	n_{nk0}^*	N
2	$n_{pk0}^* + 1$	$n_{nk0}^* - 1$	N
3	$n_{pk0}^* - 1$	$n_{nk0}^* + 1$	N
4	n_{pk0}^*	$n_{nk0}^* + 1$	$N + 1$
5	$n_{pk0}^* + 1$	n_{nk0}^*	$N + 1$
6	n_{pk0}^*	$n_{nk0}^* - 1$	$N - 1$
7	$n_{pk0}^* - 1$	n_{nk0}^*	$N - 1$

根据指令集的每种状态,依次进行式(21)一式(23)的寻优计算,得到满足功率误差 ε 的最上、下桥臂导通电压 $e_{pk}^*(t + T_s)$ 和 $e_{nk}^*(t + T_s)$,最终得到上、下桥臂的修正投入模块数 $n_{pk}^*(t + T_s)$ 、 $n_{nk}^*(t + T_s)$,具体流程图如图 7 所示。

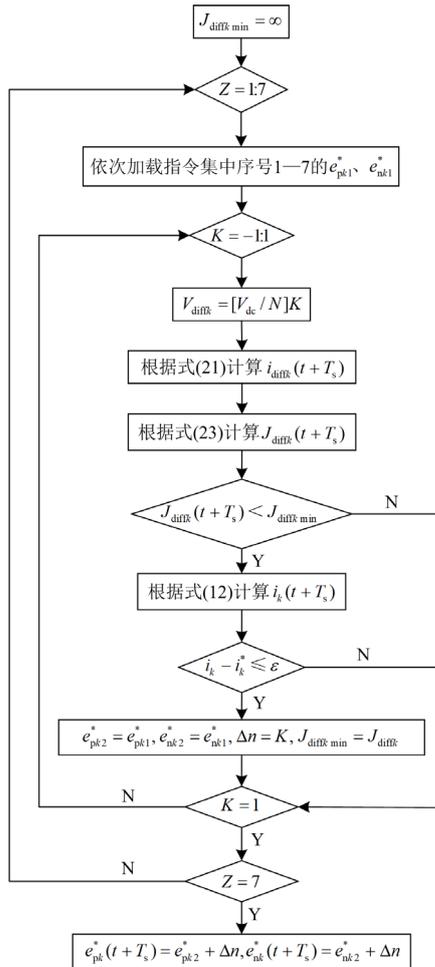


图 7 环流控制框图

Fig. 7 Block diagram of the circulating current

2.3.2 内层 SOC 均衡控制

如果将子模块电容看作恒定功率源,计及虚拟阻抗的 ESM 的等效电路如图 8 所示。由于每一桥臂分析方法相同,所以只对一个桥臂进行分析; R_{vmkj} 、 I_{Lmkj} 分别为 k 相 m 桥臂第 j 个 ESM 的虚拟电阻和电感电流, V_{ref} 为 SM 电容电压参考值, V_{mkj} 为 ESM 出口端电压,通过改变虚拟电阻的大小,就可以调整 ESM 出口端电压^[24]。

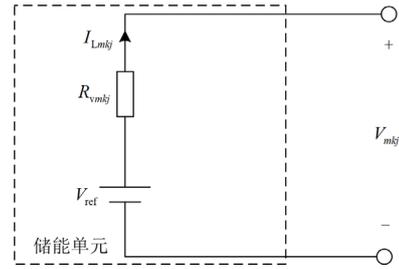


图 8 ESM 等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit diagram of ESM

由于虚拟电阻的存在,产生的电压偏差 V_{dmkj} 为

$$V_{dmkj} = I_{Lmkj} R_{vmkj} = V_{mkj} - V_{ref} \quad (24)$$

ESM 充电时, V_{dmkj} 大于 0; ESM 放电时, V_{dmkj} 小于 0。ESM 的 SOC 根据式(25)计算。

$$S_{mkj} = S_{mkj}(0) - \int_0^t \frac{I_{Lmkj}(t)}{C_{sc}} dt \quad (25)$$

式中: S_{mkj} 为 ESM 的当前荷电状态; $S_{mkj}(0)$ 为 ESM 初始荷电状态。

联立式(24)和式(25),得到 ESM 的 SOC 变化量 ΔS_{mkj} 为

$$\Delta S_{mkj} = S_{mkj} - S_{mkj}(0) = - \int_0^t \frac{I_{Lmkj}(t)}{C_{sc}} dt = \int_0^t \frac{V_{dmkj}(t)}{R_{vmkj} C_{sc}} dt \quad (26)$$

由式(26)可知,ESM 的 SOC 变化量与虚拟电阻大小有关,虚拟电阻越小,ESM 的 SOC 变化量越大。所以充电过程中,SOC 值较大的 ESM 虚拟电阻值应该较大;放电过程中,SOC 值较大的 ESM 虚拟电阻值应该较小。虚拟电阻越大,相应的电压偏差 V_{dmkj} 也越大。在充电过程中,选取 SOC 较小的 ESM 为主导 ESM;在放电过程中,选取 SOC 较大的 ESM 为主导 ESM。为了保证各子模块的电压偏差在一定范围内,规定:

$$\max \{|V_{dmk1}|, |V_{dmk2}|, \dots, |V_{dmkN}|\} \leq V_{dmax} \quad (27)$$

式中, V_{dmax} 为子模块最大允许电压偏差。

根据上述原理,可以规定 ESM 的 SOC 上限为 S_{max} , ESM 的 SOC 下限为 S_{min} ,主导 ESM 的 SOC

为 S_{mkn} , 最大虚拟电阻为 $R_{vmk \max}$ 。根据 ESM 的 SOC 情况设置各 ESM 的虚拟电阻 R_{vmkj} 。

$$R_{vmkj} = \begin{cases} \frac{S_{mkj} - S_{mkn}}{S_{\max} - S_{mkn}} R_{vmk \max}, V_{dmkj} \geq 0 \\ \frac{S_{mkn} - S_{mkj}}{S_{mkn} - S_{\min}} R_{vmk \max}, V_{dmkj} < 0 \end{cases} \quad (28)$$

结合式(24)、式(27)和式(28), 最大虚拟电阻 $R_{vmk \max}$ 可以由式(29)计算。

$$R_{vmk \max} = \begin{cases} \frac{(S_{\max} - S_{mkn})|V_{d \max}|}{(S'_{mk \max} - S_{mkn})I_{L \max}}, V_{dmkj} \geq 0 \\ \frac{(S_{mk \min} - S_{\min})|V_{d \max}|}{(S_{mkn} - S'_{mk \min})I_{L \max}}, V_{dmkj} < 0 \end{cases} \quad (29)$$

式中: $I_{L \max}$ 为 ESM 最大电流值; $S'_{mk \max}$ 和 $S'_{mk \min}$ 分别为 k 相 m 桥臂内 ESM 的最大 SOC 值和最小 SOC 值。

经过上述虚拟电阻设置, SOC 较大的 ESM 充电较慢且放电较快, SOC 较小的 ESM 充电较快而放电较慢。虚拟电阻根据 SOC 均衡情况自适应调整, 在任何 SOC 初始情况下, 都可以保证子模块电容电压稳定和 SOC 均衡速度; 由于虚拟电阻的不同, U_{cmkj}^* 会根据 SOC 的不同, 产生一个电压梯度如式(30)所示。

$$U_{cmkj}^* = V_{\text{ref}} - R_{vmkj} I_{Lmkj} \quad (30)$$

在此电压梯度下, SOC 较大的 ESM 电容电压较高, SOC 较小的 ESM 电容电压较低; 这可以与 MMC 子模块电容排序策略结合, 增加/减少 SOC 较大的 ESM 放电/充电投入时间, 增加/减少 SOC 较小的 ESM 充电/放电投入时间; 实现 SOC 均衡控制和子模块电容电压控制的协调配合。此外, 如果降低子模块投切频率, 就能延长 SOC 偏差较大 ESM 的充放电时间, 加快 SOC 均衡速度。建立关于子模块电容电压的目标函数如式(31)所示。

$$J_{cmkj} = i_{mk} \left(U_{cmkj} - \frac{V_{dc}}{N} \right) \quad (31)$$

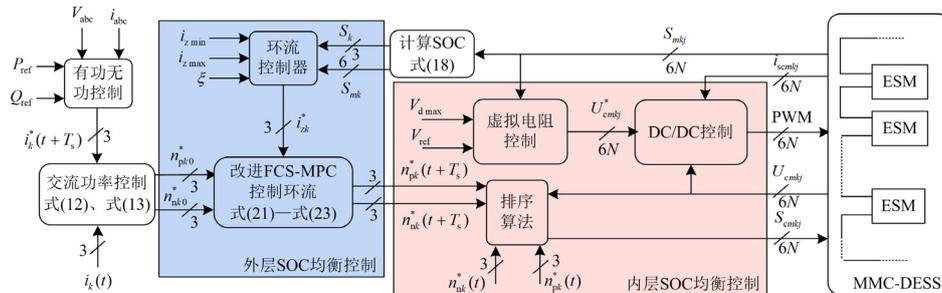


图 10 MMC-DESS 总体控制框图

Fig. 10 Overall control block diagram of MMC-DESS

每个桥臂的 SM 分为投入组和切除组两组, 当需要增加桥臂 SM 投入数量时, 从切除组中选取 J_{cmkj} 值最小的加入投入组; 当需要减少桥臂 SM 数量时, 从投入组中选择 J_{cmkj} 值最小的加入切除组。定义上、下桥臂投入 SM 变化数量 ΔN_{pk} 、 ΔN_{nk} 为

$$\begin{cases} \Delta N_{pk} = n_{pk}^*(t + T_s) - n_{pk}^*(t) \\ \Delta N_{nk} = n_{nk}^*(t + T_s) - n_{nk}^*(t) \end{cases} \quad (32)$$

式中, $n_{pk}^*(t)$ 、 $n_{nk}^*(t)$ 分别为上个周期的上、下桥臂的最终投入模块数。

定义 S_{cmkj} 为子模块开关信号, $S_{cmkj} = 1$ 表示子模块投入, $S_{cmkj} = 0$ 表示子模块切除; 具体流程图如图 9 所示; 总体控制框图如图 10 所示。

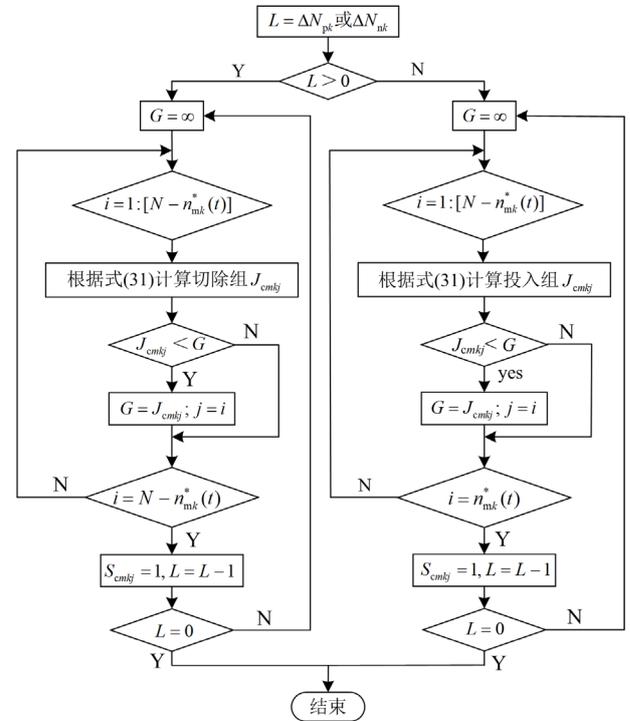


图 9 SM 排序流程图

Fig. 9 Flow chart of SM sorting

3 仿真验证与分析

为了验证所提的分层快速 SOC 均衡控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 环境下搭建了三相十一电平的两端 MMC-DESS 仿真模型。交流侧并网,直流侧接普通 MMC。仿真系统各参数如表 2 所示。其中,储能模块容量不会影响控制效果;受仿真时间的限制,将储能容量设置到一个较低的值,以便在短时间内验证控制策略的有效性。

表 2 MMC-DESS 仿真系统参数

Table 2 Parameters of MMC-DESS simulation system

参数	数值
交流侧电压幅值/kV	10
额定直流电压/kV	20
额定容量/MVA	20
桥臂子模块数量 N	10
子模块电容 C/F	0.02
桥臂电感 L/H	0.03
桥臂电阻 R/Ω	0.1
超级电容容值 C_{sc}/F	1
ESM 电感 L_{sc}/mH	5
有功无功控制 PI 参数	$K_p = 0.01, K_i = 0.2$
均衡指令值 ζ	0.001
环流上限 $i_{z,max}/A$	200
环流下限 $i_{z,min}/A$	10
子模块电容电压参考值 V_{ref}/V	2000
最大电压偏差 $V_{d,max}/V$	50
系统仿真步长 $T_s/\mu s$	20

3.1 稳态运行不投入 SOC 均衡控制

MMC-DESS 稳态运行时,交流侧功率为 10 MW,直流侧功率为 8 MW,不投入本文所提 SOC 均衡策略,各桥臂分别选取 2 个 ESM,编号如图 11 所示, SOC 依次相差 0.1%, 仿真运行 8 s。由于交直流侧的功率差额,储能系统释放功率,总体 SOC 下降;各 ESM 的 SOC 差值几乎不变化。如果长时间运行,会导致部分 ESM 达到 SOC 最小阈值退出运行,严重影响了储能系统的容量利用率。未投入 SOC 均衡策略的 ESM 的 SOC 仿真波形如图 11 所示。

3.2 稳态运行投入 SOC 均衡控制

为了更直观地观测 SOC 均衡效果,交流侧功率和直流侧功率均为 10 MW,其余条件与 3.1 节相同, $t = 0$ s 时, MMC-DESS 投入本文 SOC 均衡控制,并与文献[23]所提三级均衡控制效果相比较,如图 12 所示。

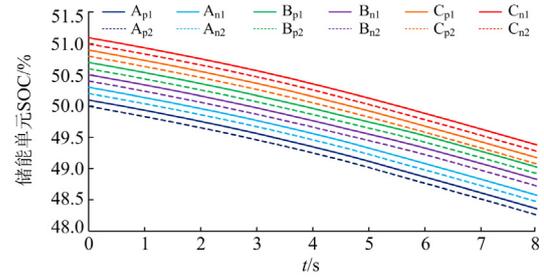
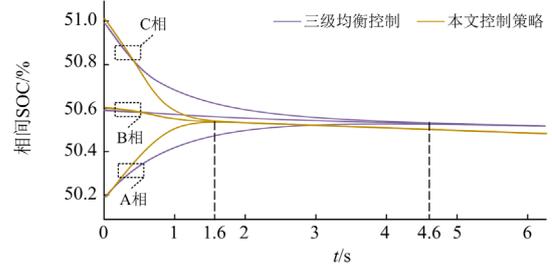
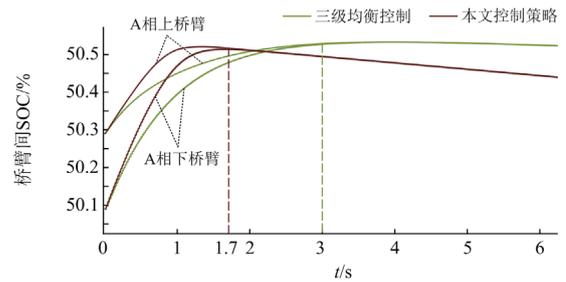


图 11 未投入均衡控制 ESM 的 SOC

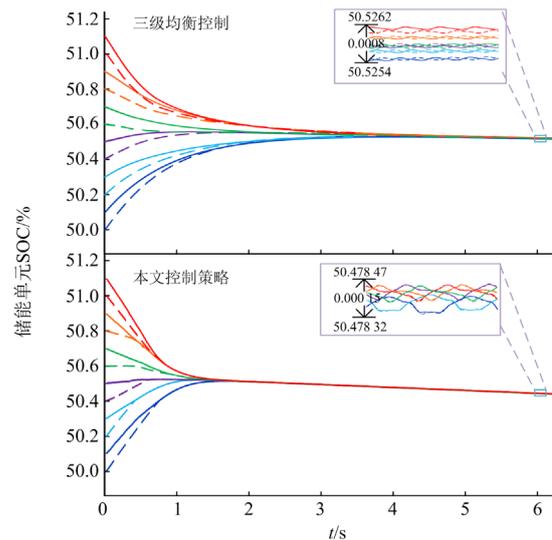
Fig. 11 SOC of ESM without balance control



(a) 相间SOC均衡速度对比图



(b) 桥臂间SOC均衡速度对比图



(c) 相间、桥臂间和桥臂内SOC均衡速度对比图

图 12 稳态运行下 ESM 的 SOC

Fig. 12 SOC of ESM in steady-state operation

经过仿真验证, 在本文控制策略下, 相间、桥臂间和桥臂内各 ESU 的 SOC 逐渐趋于一致。如图 12(a)和图 12(b)所示, 传统均衡系数短时间后均衡速度逐渐降低, 而采用自适应均衡系数后, 系统会保持高均衡速度, 将 SOC 均衡到较接近的程度后, 才逐渐降低均衡速度。大大缩短了均衡时间。相间 SOC 均衡时间较三级均衡控制缩短 3 s, 上、下桥臂 SOC 均衡时间较三级均衡控制缩短 1.3 s。

如图 12(c)所示, 桥臂内 SOC 均衡速度也有提升; 相间、桥臂间和桥臂内 SOC 均衡速度显著提升。此外 SOC 最大差值降至三级均衡控制方法的 18.75%。由此说明, 本文所提控制策略对 SOC 均衡速度和均衡精度都有较大提升。

3.3 功率波动情况下 SOC 均衡控制

在功率波动情况下, 储能系统功率也会受到交流侧功率变化的影响。储能功率及 SOC 均衡情况如图 13 所示。1~3 s 时, 交流侧功率为 -10 MW, 直流侧功率为 10 MW, 储能系统处于 SOC 均衡状态; 在 3 s 时, 直流侧功率突变为 8 MW, 交流侧功率不变, 储能系统处于放电状态; 在 6 s 时, 交流侧功率突变为 -8 MW, 直流侧功率突变为 10 MW, 储能系统处于充电状态。

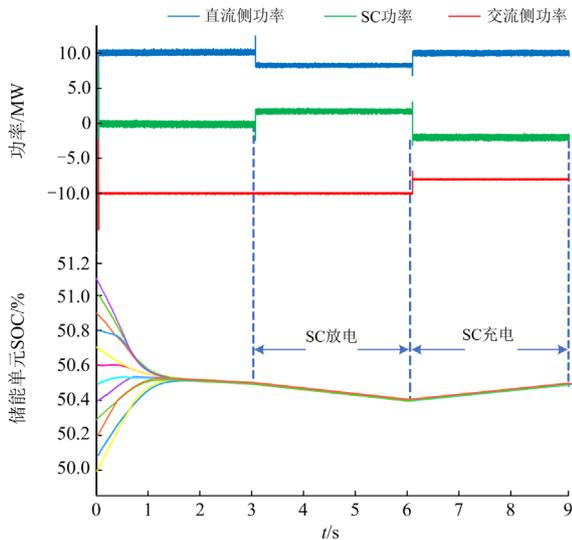


图 13 功率波动情况下系统 SOC 图

Fig. 13 SOC diagram of the system under power fluctuations

由仿真波形可知, 交直流侧和储能系统功率达到动态平衡; 储能系统在功率突变和充放电工况下, 均有较快的动态响应速度, 维持 SOC 均衡状态。

3.4 不平衡网压工况

在电网发生某相或者多相电压跌落导致交流侧电压不平衡时, 交流侧功率降低, 交、直流侧功率

产生波动。为维持直流功率, 子模块电容电压会产生较大的波动。在本文控制策略下, 储能系统可以为直流侧提供功率支撑, 稳定直流功率, 保持子模块电压稳定。

不平衡网压工况下功率如图 14 所示。0.1 s 时, A 相电压跌落 50%, B 相和 C 相不变; 0.4 s 时系统恢复正常; 0.5 s 时 B 相电压跌落 30%, C 相电压跌落 40%, A 相电压正常。由于电压跌落, 导致交流侧输出功率下降。此时, 储能系统提供功率支撑, 维持直流侧功率稳定。此外, 由于 ESU 对子模块电容电压的支撑作用, 子模块电容电压几乎没有受到电压跌落影响, 如图 15 所示。

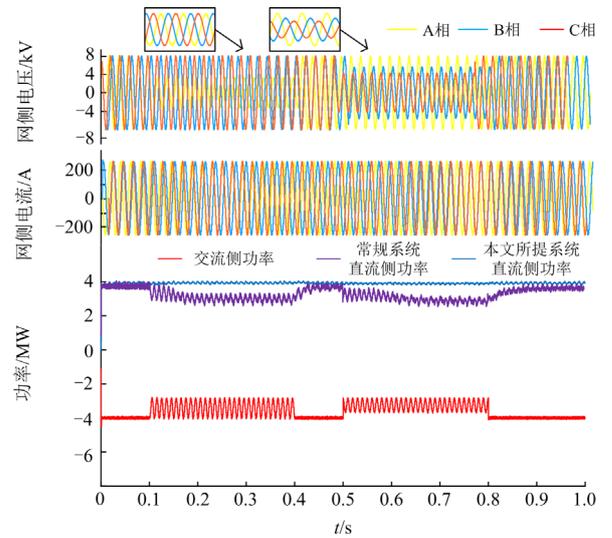


图 14 不平衡网压工况下功率图

Fig. 14 Power diagram under unbalanced network voltage

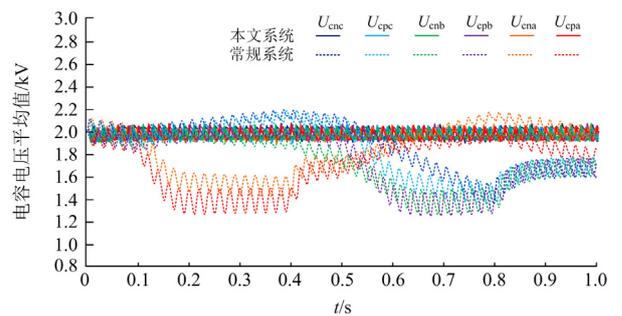


图 15 不平衡网压工况下子模块电压图

Fig. 15 SM voltage diagram under unbalanced network

由于电压的不平衡, 电压降落相环流显著增大, 导致该相 SOC 下降, 逐渐偏离平均值。由图 16 仿真结果可知, 本文控制策略在检测到 SOC 偏离后, 快速修正环流, 减少电压跌落相和其他相环流偏差, 维持 SOC 再次均衡。

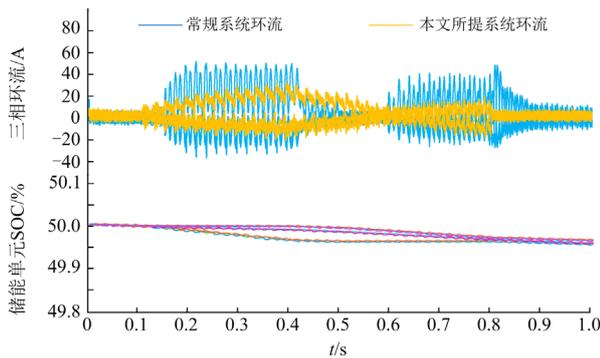


图 16 不平衡网压工况下环流及 SOC 图

Fig. 16 Circulation and SOC under unbalanced network

4 结论

本文针对当前大功率分布式储能系统 SOC 均衡速度慢、均衡范围窄、控制复杂等问题，通过对 MMC-DESS 进行建模分析，引入分层模型预测控制方法，提出了一种基于虚拟电阻及改进 FCS-MPC 算法的 MMC-DESS 控制策略，实现 MMC-DESS 的 SOC 快速均衡和 SOC 与电容电压控制一体化。

1) 仿真结果表明，本文所提控制策略能快速均衡相间、桥臂间和桥臂内 ESM 的 SOC，有效提高储能系统利用率。在稳态运行和不平衡网压情况下，为系统提供功率支撑，稳定子模块电压，减小环流波动，提升系统鲁棒性。

2) 分层控制策略减少了 PI 控制器数量，降低了系统复杂度；实现 SOC 和子模块电压的同步均衡，利于模块化管理。更加适用于高电压大功率的 MMC-DESS 控制。

3) 在本文所提快速 SOC 均衡控制策略基础上，可进一步研究如何加快三相不平衡工况下的 SOC 均衡速度和稳定能力，实现消纳不平衡负荷和提供惯性支撑等功能，进一步提升电网的新能源消纳能力。

参考文献

- [1] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 76-83.
LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 76-83.
- [2] 陈岩, 靳伟, 王文宾, 等. 区域储能站参与扰动平抑的配电网多时间尺度自律策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 134-143.

- CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. Regional energy storage stations participate in disturbance stabilization of a distribution network multi-time-scale self-discipline operation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 134-143.
- [3] 王婷, 陈晨, 谢海鹏. 配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 12-24.
WANG Ting, CHEN Chen, XIE Haipeng. Review on evaluation and promotion methods of carrying capacity for distributed generation and electric vehicles in distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 12-24.
- [4] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [5] 余鹏飞, 朱继忠, 熊小伏, 等. 基于储能的电力系统安全调控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 173-186.
YU Pengfei, ZHU Jizhong, XIONG Xiaofu, et al. Regulating & control method of power system security based on battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 173-186.
- [6] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防御体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5732.
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5732.
- [7] 汪晋安, 王黎鑫, 许建中. 基于模态划分的分布式储能型 MMC 时域解析模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 28-40.
WANG Jin'an, WANG Junxin, XU Jianzhong. A time-domain analytical model of MMC-DES based on modal division[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 28-40.
- [8] 蔡福霖, 胡泽春, 曹敏健, 等. 提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 23-32.
CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage for improving renewable energy accommodation capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 23-32.
- [9] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 47-56.
LI Junhui, SUN Dapeng, ZHU Xingxu, et al. Voltage

- regulation strategy for distributed energy storage considering coordination among clusters with high penetration of photovoltaics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 47-56.
- [10] 杨玉坤, 许建中. 基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 106-116.
YANG Yukun, XU Jianzhong. Low voltage ride-through strategy for high-capacity direct-drive wind turbines based on supercapacitor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 106-116.
- [11] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 58-65.
LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 58-65.
- [12] 李泽杰, 杨晓峰, 陶海波, 等. 一种基于改进型 MMC 的超级电容对称储能系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1617-1631.
LI Zejie, YANG Xiaofeng, TAO Haibo, et al. An improved modular multilevel converter based symmetrical integrated super capacitor energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1617-1631.
- [13] GUAN Y, MENG L, LI C, et al. A dynamic consensus algorithm to adjust virtual impedance loops for discharge rate balancing of AC microgrid energy storage units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4847-4860.
- [14] 陶海波, 杨晓峰, 李泽杰, 等. 电能路由器中基于 MMC 的超级电容储能系统及其改进 SOC 均衡控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3970-3978.
TAO Haibo, YANG Xiaofeng, LI Zejie, et al. A modified SOC equalization control strategy of MMC based super capacitor energy storage system in electrical energy router application[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3970-3978.
- [15] 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.
- [16] LIANG G, TAFTI H D, FARIVAR G G, et al. Analytical derivation of intersubmodule active power disparity limits in modular multilevel converter-based battery energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2864-2874.
- [17] 程从智, 徐晨, 戴珂, 等. MMC-BESS 电池荷电状态三级均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 100-108.
CHENG Congzhi, XU Chen, DAI Ke, et al. Three-level balancing control for battery state-of-charge based on MMC-BESS[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 100-108.
- [18] BI K, SUN L, AN Q, et al. Active SOC balancing control strategy for modular multilevel super capacitor energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4981-4992.
- [19] 闫士杰, 沈千翔, 李相俊. 大功率模块化储能系统 SOC 优化均衡控制[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 49-56.
YAN Shijie, SHEN Qianxiang, LI Xiangjun. Optimized SOC balancing control for high power modular energy storage system[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 49-56.
- [20] 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.
- [21] MA Z, GAO F, LI N, et al. Multilayer SOH equalization scheme for MMC battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13514-13527.
- [22] MA Y, XIAO J, LIN H, et al. A novel battery integration method of modular multilevel converter with battery energy storage system for capacitor voltage ripple reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12250-12261.
- [23] 李楠, 高峰. 电池储能型模块化多电平变换器的混合模型预测控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 165-174.
LI Nan, GAO Feng. A hybrid model predictive control method for modular multilevel converter of battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 165-174.
- [24] 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.

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2023-12-28

作者简介:

马文忠(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为柔性直流输电与能源互联网等; E-mail: mawenzhong@126.com

孙伟(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电与储能技术。E-mail: UPCsunwei@163.com

(编辑 魏小丽)