

模块化多电平变换器电池储能系统模型预测控制策略

王嘉豪

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月14日; 发布日期: 2025年4月21日

摘要

模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converter, MMC)与电池储能系统相结合, 既保留了MMC易于扩展, 电压等级高等特性, 也能借助储能单元为系统提供有功和无功功率, 进而改善电能质量。本文以模块化多电平变换器电池储能系统为研究对象, 建立系统输出电流与环流的多目标控制函数, 并结合在线优化方法获取最佳权重因子, 进行寻优计算。然后根据求得的储能模块的投入数, 对桥臂内部储能模块进行SOC值的排序, 最终输出系统当前时刻最佳投切状态。所提方法对系统输出电流与环流有良好的控制效果, 同时可实现电池储能系统三相间、上下桥臂间以及桥臂内模块间的SOC均衡。仿真实验验证了所提控制策略的有效性与可行性。

关键词

模块化多电平变换器, 电池储能系统, 模型预测控制, 荷电状态

Model Predictive Control Strategy for Modular Multilevel Converter-Based Battery Energy Storage Systems

Jiahao Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 14th, 2025; published: Apr. 21st, 2025

Abstract

The integration of modular multilevel converter (MMC) with battery energy storage systems (BESS)

preserves the inherent advantages of MMC, such as modular scalability and high-voltage capability, while leveraging energy storage units to provide active and reactive power support for enhanced power quality. This study focuses on an MMC-based BESS, establishing a multi-objective control framework to simultaneously regulate output current and circulating current. An online optimization method is employed to dynamically determine optimal weighting factors for Pareto-frontier tracking. Subsequently, the number of activated battery submodules is calculated based on energy requirements, followed by a state-of-charge (SOC)-sorting algorithm to prioritize submodule switching actions within each arm. The proposed strategy demonstrates precise current tracking capability while achieving SOC balancing across three critical dimensions: inter-phase, upper-lower arm, and intra-arm module levels. Simulation studies validate the effectiveness and feasibility of the control methodology in harmonizing power delivery and energy management objectives.

Keywords

Modular Multilevel Converter, Battery Energy Storage System, Model Predictive Control, State of Charge

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在大规模新能源并入电网的背景下, 新型电力系统呈现出低惯量、弱稳定性等特征。为保障电网安全性与供电可靠性, 加强储能技术建设, 推动电力系统与新能源有效整合尤为重要[1]。基于模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converter, MMC)的电池储能系统保留了 MMC 易于扩展, 电压等级高等特性, 也能借助储能单元为系统提供有功无功功率, 助力解决“双高”电力系统所面临的电能质量问题[2]。

在实际投运过程中, MMC 储能系统的子模块间电池荷电状态(State of Charge, SOC)存在的差异将随着持续的充放电过程而不断增大, 如若不加以控制, 将会影响储能系统容量利用率及平抑功率波动能力, 进而降低输出电能质量。电池储能系统 SOC 均衡是 MMC 储能系统得以正常运行的关键, 目前针对其控制策略通常为相间、相内臂间、臂内模块间三级 SOC 均衡[3]-[5]。相间均衡可通过注入零序电压、控制环流直流分量[6]等手段实现; 相内臂间均衡通过控制系统环流基频分量实现[7]; 臂内子模块间可通过补偿交直流电压分量[8]、调整子模块调制波系数等方法实现均衡。然而上述传统三级均衡策略存在控制器参数过多、参数调优过程相对复杂的问题, 且随着储能模块数量的增加, 控制算法复杂度与计算量进一步提升。模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)具有动态响应快、系统约束灵活等优点, 目前被广泛运用于电机驱动、无人驾驶等领域。文献[9]针对 MMC 拓扑, 提出基于占空比调制的 MPC 策略, 其无需重复代价函数寻优过程, 减少了控制算法计算量; 文献[10]提出 MMC 改进两段式 MPC 控制策略, 避免了权重因子整定环节, 降低了控制器计算要求, 但它需要在单个周期内选择两种开关状态, 这将增加开关器件的电流应力和导通损耗。文献[11]提出了一种用于相内环流控制的补偿模型预测电流控制策略, 它可以短时间内估算桥臂所需的子模块数量, 而无需滚动优化, 减少了系统计算负担。

本文以模块化多电平变换器电池储能系统为研究对象, 储能系统 SOC 均衡为控制目的, 建立输出电流与环流的多目标控制函数, 通过在线优化手段获取代价函数每个控制周期的环流最佳权重因子, 进行寻优后获得储能模块投切数目。然后根据储能模块投入数, 对所有桥臂内部的储能模块进行实时的 SOC 值排序, 根据充放电电流流向确定储能系统每个时刻的最佳投切状态。所提方法对系统输出电流与环流

有良好的控制效果，且能够可实现模块化多电平储能系统的三相之间、上下桥臂间以及桥臂内部子模块间的 SOC 均衡。仿真实验验证了所提控制策略的有效性与其可行性。

2. 离散数学模型

模块化多电平变换器处于正常工作状态时，三相桥臂对称运行，可取其单相电路进行分析建模。系统单相等效电路如图 1 所示。其中 u_{jp} 、 u_{jn} 为两可控电压源，表示上、下桥臂等效电压， i_{jp} 、 i_{jn} 为上、下桥臂电流， u_{sj} 、 i_j 分别为网侧电压与电流。

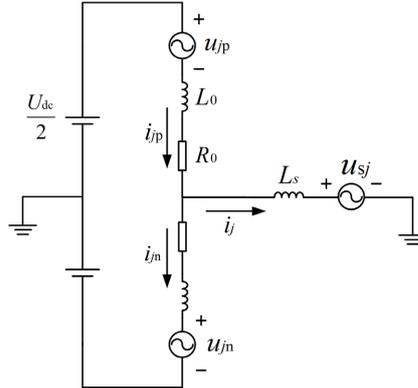


Figure 1. Single-phase equivalent circuit
图 1. 单相等效电路

定义系统的共模电压 u_{comj} 、差模电压 u_{diffj} 以及桥臂内环流 i_{cirj} 分别为：

$$u_{comj} = \frac{1}{2}(u_{jn} + u_{jp}) \quad (1)$$

$$u_{diffj} = \frac{1}{2}(u_{jn} - u_{jp}) \quad (2)$$

$$i_{cirj} = \frac{1}{2}(i_{jn} + i_{jp}) \quad (3)$$

列写基尔霍夫电压与电流方程可得

$$u_{jp} + L_0 \frac{di_{jp}}{dt} + R_0 i_{jp} + L_s \frac{di_j}{dt} + u_{sj} = \frac{U_{dc}}{2} \quad (4)$$

$$u_{jn} + L_0 \frac{di_{jn}}{dt} + R_0 i_{jn} - L_s \frac{di_j}{dt} - u_{sj} = \frac{U_{dc}}{2} \quad (5)$$

对式(4)和式(5)进一步整理， j 相的相电流与相内环流的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_j(t)}{dt} = -\frac{R_0}{L_0 + 2L_s} i_j(t) + \frac{u_{jn}(t) - u_{jp}(t) - 2u_{sj}(t)}{L_0 + 2L_s} \\ \frac{di_{cirj}(t)}{dt} = -\frac{R_0}{L_0} i_{cirj}(t) + \frac{U_{dc} - u_{jn}(t) - u_{jp}(t)}{2L_0} \end{cases} \quad (6)$$

模型预测控制通过所建模型来预测系统在未来某时间段内的输出状态并进行优化控制，预测模型通常由连续时域中描述系统动态过程的状态空间方程离散化所得。将式(6)进行离散化处理可得

$$\begin{cases} i_j(k+1) = \left(1 - \frac{R_0 T_s}{L_0 + 2L_s}\right) i_j(k) + \frac{T_s}{L_0 + 2L_s} (u_{jn}(k+1) - u_{jp}(k+1) - 2u_{sj}(k+1)) \\ i_{cirj}(k+1) = \left(1 - \frac{R_0 T_s}{L_0}\right) i_{cirj}(k) + \frac{T_s}{2L_0} (U_{dc} - u_{jn}(k+1) - u_{jp}(k+1)) \end{cases} \quad (7)$$

对于储能型变换器而言，电池单元端电压于离散时域的预测值 $u_{Bat}(k+1)$ 可表示为

$$\begin{cases} u_{Bat}(k+1) = u_{Bat}(k) + \frac{T_s}{C_{sm}} i_{jki}(k), & S_{jki}(k) = 1 \\ u_{Bat}(k+1) = u_{Bat}(k), & S_{jki}(k) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中， $i_{jki}(k)$ 为 k 时刻 j 相 k 桥臂第 i 个储能模块电池充放电电流值， $S_{jki}(k)$ 为对应储能模块 k 时刻的投切信号。 $S_{jki}(k)$ 为 1 时模块投入系统， $S_{jki}(k)$ 为 0 时模块处于切除状态，此时 $k+1$ 时刻的预测值与 k 时刻的实际值相等。

模块化多电平变换器电池储能系统可通过控制相电流、环流和电池端电压来实现储能系统稳定运行，但由于半桥结构中的子模块电容与电池单元并联，当所有电池 SOC 值进入均衡变化阶段时，电池端电压也会稳定，因此可将电池端电压控制替换为子模块 SOC 的排序控制。

3. 电池储能系统模型预测控制

3.1. 目标函数

本文所提出的针对电池储能系统模型预测控制策略的控制目标为相电流和环流，从而实现电流跟踪和环流控制。因此，目标函数的具体构成为：参考电流与预测电流的误差、参考环流与预测环流的误差。

模块化多电平变换器电池储能系统 j 相上下桥臂的功率 P_{jp} 、 P_{jn} 的表达式为

$$\begin{cases} P_{jp} = \frac{U_{dc}}{2} i_{cirj_dc} - \frac{U_{dc}}{2} M I_{cirj_1} \sin(\theta_j + \delta_j) - \frac{U_{dc}}{4} M I_m \sin(\theta_j + \gamma_j) \\ P_{jn} = \frac{U_{dc}}{2} i_{cirj_dc} + \frac{U_{dc}}{2} M I_{cirj_1} \sin(\theta_j + \delta_j) - \frac{U_{dc}}{4} M I_m \sin(\theta_j + \gamma_j) \end{cases} \quad (9)$$

其中 i_{cirj_dc} 为相内环流直流分量， θ_j 为各相电压初相角， I_{cirj_1} 和 δ_j 为环流基频分量幅值与相角， I_m 和 γ_j 为交流侧输出相电流幅值与相角，电压调制比 $M = 2U_m/U_{dc}$ ，且 $0 \leq M \leq 1$ 。

将 P_{jp} 、 P_{jn} 求和与作差可知，控制 i_{cirj_dc} 即可调整相间功率分配，实现系统相间电池模块 SOC 的均衡效果，控制 i_{cirj_1} 即可调整相内桥臂间功率分配，实现上下桥臂间 SOC 的均衡效果。因此对于环流目标函数的建立，可将环流直流与基频量的参考值作为参考环流。

综上所述，目标函数具体表达式为

$$g = \lambda_1 |i_j(k+1) - i_j^*(k+1)| + \lambda_2 |i_{cirj}(k+1) - i_{cirj}^*(k+1)| \quad (10)$$

其中： λ_1 和 λ_2 分别表示电流跟踪和环流控制的权重因子， $i_j^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻交流侧输出相电流参考值，其可由给定有功与无功功率通过瞬时功率理论计算 d 、 q 电流参考值，再进行 $dq-abc$ 坐标变换获取； $i_{cirj}^*(k+1)$ 可由 $i_{cirj_dc}^*$ 与 $i_{cirj_1}^*$ 作和获取。

3.2. 在线优化

基于经验法确定权重因子无法保证每次寻优结果的最优，为提高 MPC 的控制性能，本节提出权重因子在线优化选取的方法。将目标函数简化为

$$g = \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2 \quad (11)$$

由于输出电流跟踪是主要控制目标，将其权重因子 λ_1 设置为 1，环流控制的权重因子 λ_2 采用在线优化选取从而确定每个采样周期中 λ_2 的值。在线优化过程步骤如下：

1) 取足够多的 λ_2 样本值代入到目标函数中，其中 $\lambda_2 \in (0,1)$ ，从而获取足量的每个控制周期内不同开关状态的 g_2 样本值。

2) 设 m 为可接受的最大误差，以 m 作为区间划分基值，将得到的 g_2 样本值划分为 n 个区间，每个区间对应一个 λ_2 值，取 $\lambda_2 = x/n$ ，其中 $x \in \{1,2,3,\dots,n\}$ ， x 的取值与定位的区间一一对应，即

$$\begin{aligned} (0, m) &\Rightarrow \lambda_2 = \frac{1}{n} \\ (m, 2m) &\Rightarrow \lambda_2 = \frac{2}{n} \\ (2m, 3m) &\Rightarrow \lambda_2 = \frac{3}{n} \\ &\dots \\ ((x-1)m, xm) &\Rightarrow \lambda_2 = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

其中，第 k 个区间对应的 λ_2 值为 k/n 。

3) 在每个控制周期，对目标函数进行寻优之前，先计算所有开关状态下的 g_2 样本值，并挑选出 g_2 样本值中的最大值。

4) 判断 g_2 样本值中的最大值对应的区间，并将区间对应的 λ_2 值作为在线优化后所得的最优值。

5) 将步骤 4) 获取的 λ_2 值代入目标函数中进行寻优，即可求得 g 的最小值，最小值对应的储能系统投切状态即为最佳开关状态。

需要注意的是，在系统每个控制周期到来时， λ_2 值都将参与在线优化整定过程，以此在保证输出相电流为主控制目标的同时，选取出可接受误差范围内最佳的环流值。根据整个流程，在在线优化第一步过程中，收集的 g_2 样本值的取值范围为 0 至 1.837，同时区间数 n 取值为 50，图 2 为在线优化流程图。

3.3. 排序控制

在前述的目标函数建立与在线优化选取权重因子步骤之后，模块化电池储能系统将在每个控制周期进行寻优计算，以确定系统每个时刻三相的上下桥臂最优参考值，进而可以确定每相上、下桥臂分别投切的子模块的个数 N_{jp} 、 N_{jn} 。

顾名思义，子模块 SOC 排序控制即按照每相上、下桥臂投切子模块的个数和当前子模块 SOC 值的大小来确定储能模块处于投入状态还是切除状态。图 3 为各相子模 SOC 排序控制流程图。首先输入实时获取的 j 相 k 桥臂内 N 个储能子模块的 SOC 值，并按从小到大排序；其次判断 j 相 k 桥臂内电流 i_{jk} 的流向，若为正则会为储能模块进行充电，此时应投入 SOC 值较小的前 N_{jk} 个子模块，若为负则应对储能模块进行放电操作，此时应投入 SOC 值较大的后 N_{jk} 个子模块；最后根据所得的储能模块最优分配情况，确定输出最优开关状态。

4. 仿真验证与分析

为验证本文所提控制策略的有效性，在 Matlab/Simulink 环境下搭建储能子模块数 N 为 4 的模块化多电平变换器电池储能系统仿真模型进行研究。仿真参数如表 1 所示。考虑到仿真环境速度限制，本文将仿真模型中单体电池模块初始 SOC 最大差值设置为 0.2%。

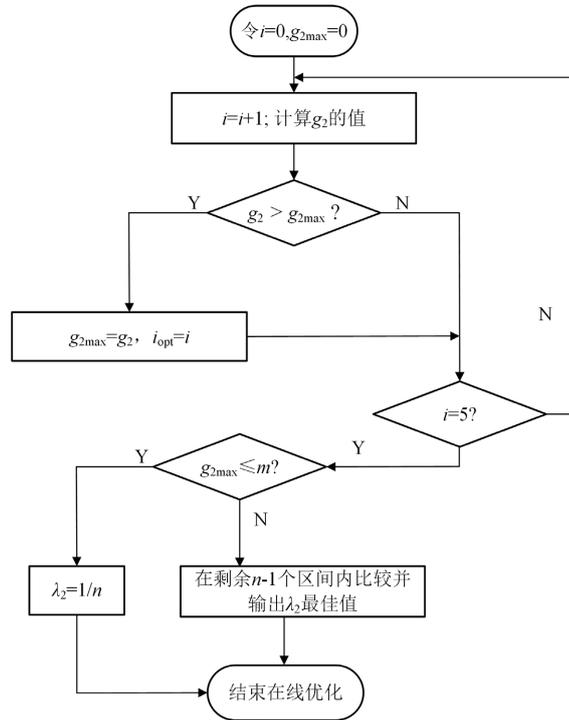


Figure 2. Online optimization flowchart
图 2. 在线优化流程图

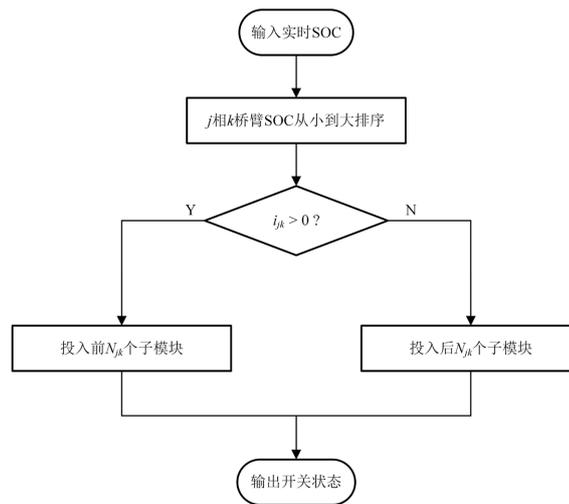


Figure 3. Diagram of sorting selection balancing control
图 3. 子模块 SOC 排序控制流程图

Table 1. Simulation parameters of modular multilevel battery energy storage system
表 1. 模块化多电平电池储能系统仿真参数

| 参数 | 取值 |
|--------------------|-----|
| 直流侧电压 U_{dc}/V | 800 |
| 交流母线相电压峰值 U_m/V | 320 |
| 储能模块电容 C_{sm}/mF | 4 |

续表

| | |
|-----------------------|------|
| 储能模块电容初始电压 U_{sm}/V | 200 |
| 电池额定容量 Q_r/Ah | 50 |
| 桥臂电感 L_0/mH | 3 |
| 桥臂电阻 R_0/Ω | 0.01 |
| 交流侧电感 L_s/mH | 4 |
| 额定有功功率 P/kW | 20 |

4.1. 环流与相电流

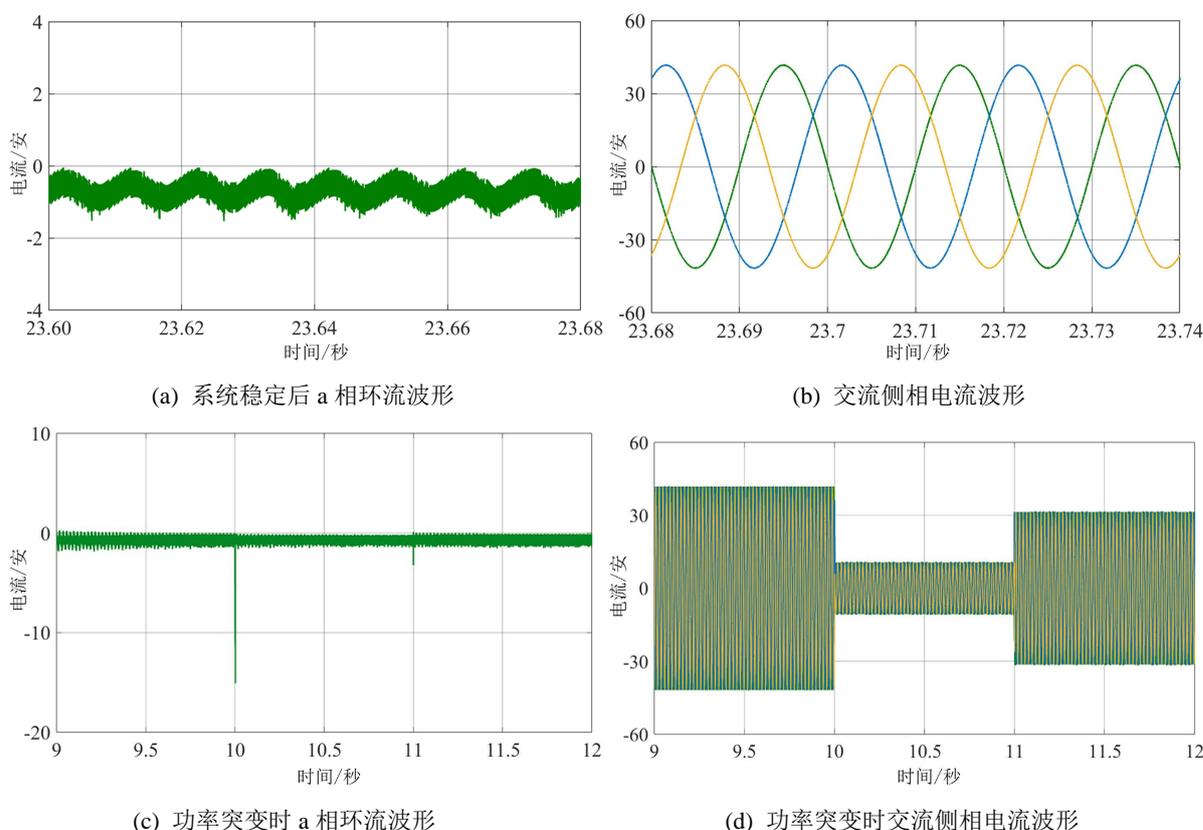


Figure 4. Circulating current and output current waveforms under MPC strategy

图 4. 模型预测控制策略下环流与输出电流波形图

图 4(a)为系统稳定后 a 相环流波形图，可见环流动态平衡的范围为-2 A 至 0 A，验证了所提模型预测控制的环流控制效果；图 4(b)为网侧电流波形图，在储能系统达到 SOC 均衡后其电流峰值为 41.85 A，经 FFT 分析可得 THD 值为 5.03%，印证了模型预测控制的输出电流跟踪效果。

为验证所提策略的动态性能，设定系统 10 s 时功率由 20 kW 突变为-5 kW，维持 1 s 后功率恢复至 15 kW。图 4(c)与图 4(d)为功率突变工况下环流与相电流动态响应波形，可见环流在功率突变时刻会突然变大，但短时间内立刻恢复正常范围；相电流在功率突变时会相应地变大/变小，动态性能较好。综上可见，所提策略对环流与相电流的控制效果较好。

4.2. 电池储能系统 SOC 均衡效果

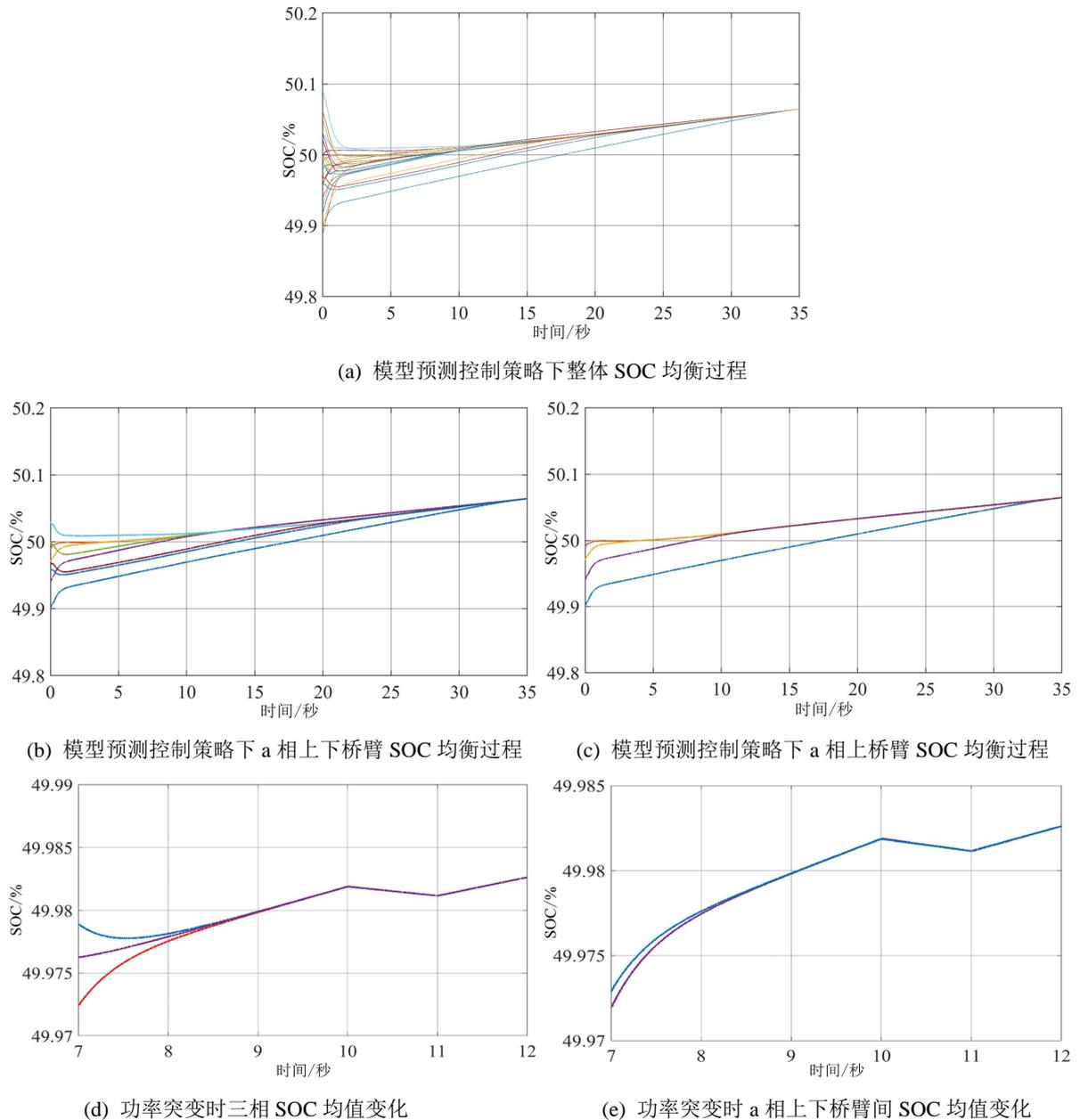


Figure 5. SOC balancing diagram of energy storage system under MPC strategy

图 5. 模型预测控制策略下储能系统 SOC 均衡图

为验证本文所提模型预测控制策略的电池储能系统 SOC 均衡效果, 分别对该策略下的电池储能系统三相所有模块、a 相上下桥臂模块以及 a 相上桥臂模块的均衡情况进行仿真。图 5(a)为在所提策略下电池储能系统的整体 SOC 均衡过程图, 系统于近 34 s 达到均衡, 均衡值约为 50.05%; 图 5(b)为 a 相桥臂间的模块均衡效果, 可见 a 相臂间 SOC 均衡时间约为 33.6 s, 均衡值约为 50.05%; 图 5(c)以 a 相上桥臂为例, 展示子模块排序控制策略的 SOC 均衡效果, 可见均衡时间约为 33 s, 均衡值约为 50.06%。图 5(d)与图 5(f)为功率突变工况下三相 SOC 均值与 a 相桥臂间 SOC 均值动态响应图, 功率突变情况设置同前述

工况。可见不管是相间还是相内的均值，在功率突变瞬间会立刻响应并做出相应变化，均值上升对应充电状态，均值下降对应放电状态。由此可知所提策略在储能系统 SOC 均衡控制方面的动态性能较好。

由上述仿真分析可知，所提模型预测控制策略能够对模块化多电平电池储能系统的相电流与环流实现良好的控制效果，同时可在电池 SOC 值不均衡的初始设定下实现电池储能系统三相间、上下桥臂间以及子模块间的 SOC 均衡状态。

5. 结论

本文以模块化多电平变流器电池储能系统为研究对象，通过建立输出电流与环流的多目标控制函数，结合在线优化选取权重因子，实现对储能系统输出电流与环流良好的控制效果。同时基于代价函数寻优获取的子模块投切数，结合 SOC 排序控制确定电池储能系统的最佳开关状态。在所提策略的控制下，模块化多电平变流器电池储能系统能够实现三相间、上下桥臂间以及桥臂内部储能模块间的 SOC 均衡。最后通过仿真实验验证了该策略的可行性与有效性。

参考文献

- [1] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [2] 李善颖, 吴涛, 任彬, 等. 基于模块化多电平变流器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 139-146.
- [3] 彭鹏, 陈满, 李毓烜, 等. MMC 电池储能系统直流侧三级能量均衡控制[J]. 电气自动化, 2023, 45(6): 52-55.
- [4] 吴佳健. MMC 电池储能系统控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [5] 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.
- [6] Ma, Y., Lin, H., Wang, Z. and Ze, Z. (2019) Modified State-of-Charge Balancing Control of Modular Multilevel Converter with Integrated Battery Energy Storage System. *Energies*, **12**, Article 96. <https://doi.org/10.3390/en12010096>
- [7] 黄永烁. 基于 MMC 的电池储能系统控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [8] 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.
- [9] 杨兴武, 杨帆, 薛花, 江友华, 鲍伟, 张建文. 基于占空比调制的模块化多电平换流器模型预测控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 134-142.
- [10] 李天皓, 姚磊, 张帅龙. 模块化多电平变流器改进两段式模型预测控制[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 96-104.
- [11] Ma, W., Gong, D., Guan, Z., Li, W., Meng, F., Liu, X. and Wang, Y.B. (2022) Compensatory Model Predictive Current Control for Modular Multilevel Converter with Reduced Computational Complexity. *IEEE Access*, **10**, 106859-106872. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3208971>