

负载不平衡交流侧离网MMC-BESS相间均衡控制

杨海涛¹, 窦真兰², 江晶晶¹, 陈 婧¹, 韩 冬², 徐瀚诚²

(1. 国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200072; 2. 国网上海综合能源服务有限公司, 上海 200023)

摘要: 建立了交流侧离网的模块化多电平电池储能系统(MMC-BESS)的电压控制模型, 分析了在三相负载不平衡导致的 MMC-BESS 三相荷电状态(SOC)不均衡的问题, 提出一种 MMC-BESS 相间能量均衡控制方法。该方法实时检测负载侧的负序电流, 计算三相不平衡功率, 据此调整三相直流电流的分配, 使三相电池输出功率平衡, 避免因三相负载不平衡导致三相电池 SOC 偏差。仿真结果验证了三相负载不平衡的离网 MMC-BESS 能量均衡控制策略的正确性。

关键词: 模块化多电平电池储能系统; 交流侧模型; 三相不平衡; 直流功率分配; SOC 均衡

Interphase energy balance control of off-grid MMC-BESS under unbalanced load

YANG Haitao¹, DOU Zhenlan², JIANG Jingjing¹, CHEN Jing¹, HAN Dong², Xu Hancheng²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company Shibei Power Supply Company, Shanghai 200072, China;

2. State Grid Shanghai Comprehensive Energy Service Company, Shanghai 200023, China)

Abstract: The voltage control model of off grid MMC-BESS at AC side is established, the three-phase SOC imbalance of MMC-BESS caused by three-phase load imbalance is analyzed, then a phase to phase energy balance control method of MMC-BESS is proposed. This method detects the negative sequence current at the load side in real time, calculates the three-phase unbalanced power, and adjusts the distribution of the three-phase DC current to balance the output power of the three-phase battery, so as to avoid the SOC deviation of the three-phase batteries caused by the three-phase load imbalance. The simulation results verify the correctness of the off grid MMC-BESS energy balance control strategy with three-phase unbalanced load.

Key words: MMC-BESS; AC side mathematic model; three phase unbalance; DC power distribution; SOC balancing

0 引言

近些年来, 环保意识的加强和技术的进步带来以风电和光伏为代表的绿色能源蓬勃发展和普及, 微电网是绿色能源应用的重要形式^[1]。直驱型风机和光伏发电本身具有显著的直流电源特征^[2], 在直流电网中可以更加高效地消纳和利用, 而目前广泛而成熟的交流负载也需要交流电源的支撑。

因此, 交直流混合微电网是当前电能利用的一种客观且具有较高技术经济性的需求。电池储能作为维持微电网频率和电压稳定、功率实时平衡的关键节点, 在微电网的应用中不可或缺。

微电网的应用中模块化多电平电池储能系统(Modular Multilevel Converter based Battery Energy Storage System, MMC-BESS)可同时

连接直流电网和交流电网, 能实现直流侧、交流侧和电池侧三端口之间的能量交换^[3-4], 在交直流混合微电网中具有重要的应用价值。

MMC-BESS对外端口多, 运行方式多样, 功率控制较为复杂^[5], 对交流侧和直流侧的控制性能是MMC-BESS应用性能的重要体现^[6-7]。

在以直流电源为核心的交直流混合电网中, 直流侧并网、交流侧离网是三相三线MMC-BESS的一种典型运行工况。鉴于实际三相负载不平衡的普遍性, 不可避免会导致负载电流既包含正序分量, 也包含负序分量。由于没有零序回路, 因此零序分量为零。负序分量将使三相的

电池侧功率出现偏差, 加之电池本身的不一致性及其造成的“短板效应”, 可能导致电池簇内发生过充电、过放电现象。这不仅影响电池簇的寿命, 还有可能引发电池安全问题。

1 交流离网的MMC-BESS拓扑

交流离网的MMC-BESS的直流侧并网, 交流侧向交流负载供电。MMC-BESS由三个相簇组成, 每个相簇又分为上下两个桥臂, 每个桥臂包含 N 个子模块 (Sub-Module, SM)。子模块由半桥电路、电池和滤波电容组成, 其中电池直接并联在滤波电容两端。其拓扑如图1所示。

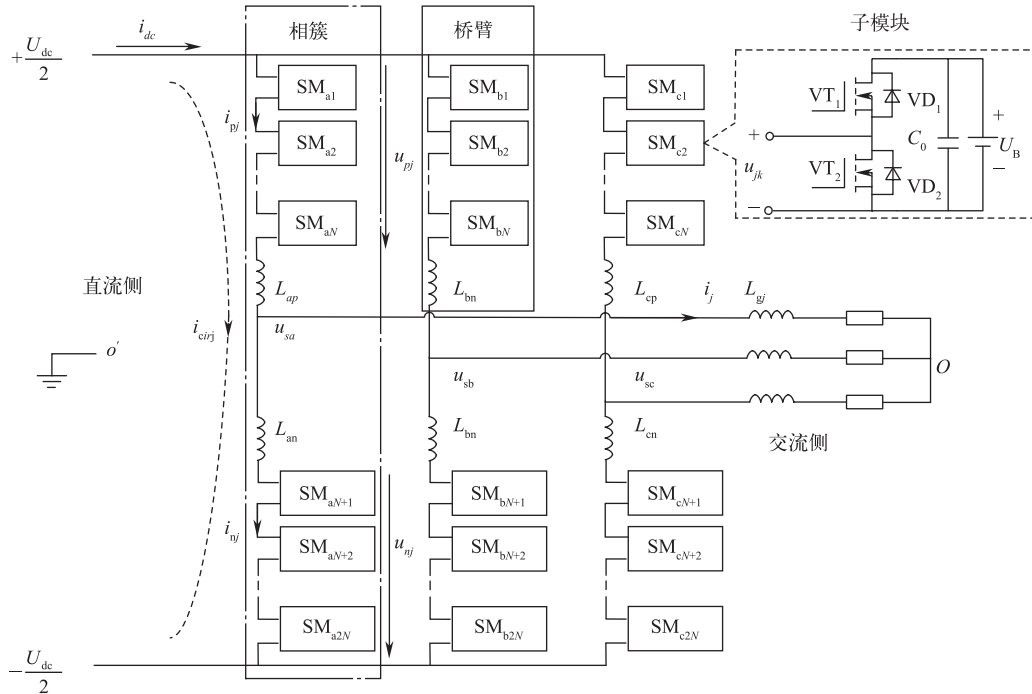


图1 MMC-BESS的拓扑

Fig. 1 Topology of MMC-BESS

图1中, 三相子模块相内统一编号 $1 \sim 2N$, 其中 $1 \sim N$ 号子模块属于上桥臂, $N+1 \sim 2N$ 号子模块属于下桥臂。下标 j 代表abc三相中任意一相, 用下标 k 代表子模块编号从 $1 \sim 2N$ 中的任意一个, 下标 p 和 n 分别表示上桥臂和下桥臂。 j 相交流电网相电压 u_{gj} 的参考点为交流电网中性点 O , j 相并网点电压 u_{sj} 的参考点为系统零电位参考点 O' 。

2 交流离网的MMC-BESS数学模型

根据拓扑图1, 对MMC交流侧列KCL和KVL方程, 得

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

$$\begin{cases} u_{sj} = \frac{1}{2}U_{dc} - u_{pj} - L_a \frac{di_{pj}}{dt} \\ u_{sj} = \frac{1}{2}U_{dc} + u_{nj} + L_a \frac{di_{nj}}{dt} \\ u_{sj} = u_{oo'} + u_{gj} + L_g \frac{di_j}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $u_{oo'}$ 为交流电网中性点 O 对系统参考点 O' 的电位, $u_{oo'} = u_o - u_{o'}$ 。

桥臂电压由该桥臂的各子模块输出电压求和得到, 即

$$\begin{cases} u_{pj} = \sum_{k=1}^N u_{jk} \\ u_{nj} = \sum_{k=N+1}^{2N} u_{jk} \end{cases} \quad (3)$$

联立式 (1)、式 (2), 得 MMC 直流侧微分方程

$$2L_a \frac{di_{dcj}}{dt} = U_{dc} - (u_{pj} + u_{nj}) \quad (4)$$

令

$$u_{dcj} = u_{nj} + u_{pj} \quad (5)$$

式中, u_{dcj} 为系统 j 相直流电压。

MMC-BESS 直流侧数学模型为

$$2L_a \frac{di_{dcj}}{dt} = U_{dc} - u_{dcj} \quad (6)$$

3 交流离网 MMC-BESS 直流功率控制

MMC-BESS 存在直流端口和交流端口, 对于交流离网的 MMC-BESS 而言, 交流侧提供电压支撑, 功率由所接负载决定, 直流侧功率控制通过 MMC-BESS 的直流并网控制实现。

直流微电网的直流功率是系统直流电压与直流电流的乘积。忽略系统直流母线电压的波动, 则直流母线电流为

$$i_{dc} = \frac{P_{dc_ref}}{U_{dc}} \quad (7)$$

式中, P_{dc_ref} 为直流侧功率给定值。

根据 KCL, 系统三相直流电流之和等于直流母线电流。假设 MMC-BESS 三相参数相同, 且各相直流电流给定值相等, 则各相直流给定值为

$$i_{dcj_ref} = \frac{i_{dc}}{3} \quad (8)$$

根据 MMC-BESS 直流侧数学模型式 (6), 利用 PI 调节控制直流电流, 可得直流电流控制模型为

$$u_{dcj_ref} = -[(i_{dcj_ref} - i_{dcj})(K_{pdc} + \frac{K_{idc}}{s}) - U_{dc}] \quad (9)$$

式中, u_{dcj_ref} 为系统 j 相直流电压给定值; K_{pdc} 为直流电流环比例参数; K_{idc} 为直流电流环积分参数。

根据控制模型可得其理想情况下直流电流控制方块图, 如图 2 所示。

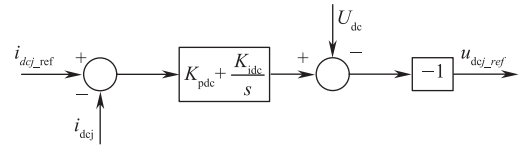


图 2 理想情况下直流侧电流模型方块图

Fig. 2 Diagram of DC control model in ideal situation

4 不平衡负载下 MMC-BESS 相间均衡

4.1 不平衡负载造成的相间功率不平衡

三相不平衡负载下, 交流侧离网运行的 MMC-BESS 中存在负序电流。如不采取一定措施, 负序电流必然造成 MMC-BESS 三相电池功率的偏差。

MMC-BESS 交流侧三相负载的电流相量表示分别为 I_a 、 I_b 和 I_c , 以 A 相电流为参考相, A 相负载电流可按下式分解为正序、负序和零序电流, 即

$$\begin{cases} I_a^+ = \frac{1}{3}(I_a + \alpha \cdot I_b + \alpha^2 \cdot I_c) \\ I_a^- = \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 \cdot I_b + \alpha \cdot I_c) \\ I_a^0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$; I_a^+ 、 I_a^- 和 I_a^0 分别为 A 相负载电流正序、负序和零序分量。

在 A 相负载电流负序分量基础上, 分别平移 120° 和 -120° 的相角, 即可得到 B 相和 C 相负载电流的负序分量, 分别记为 I_b^- 和 I_c^- 。

设 MMC-BESS 交流侧三相输出端电压分别

为 U_a 、 U_b 和 U_c ，以A相交流输出端电压为参考量， U_a 的正序、负序和零序分量可计算为

$$\begin{cases} U_a^+ = \frac{1}{3}(U_a + \alpha U_b + \alpha^2 U_c) \\ U_a^- = \frac{1}{3}(U_a + \alpha^2 U_b + \alpha U_c) \\ U_a^0 = \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \end{cases} \quad (11)$$

在A相输出端电压正序分量基础上，分别平移 -120° 和 120° 的相角，即可得到B相和C相输出端电压的正序分量，分别记为 U_b^+ 和 U_c^+ 。

由三相负载电流中的负序分量引起的三相功率不平衡计算为

$$P_{\Delta j} = \frac{1}{T} \int_0^T U_j^+ I_j^- dt \quad (j=a,b,c) \quad (12)$$

式中， T 为工频周期。

4.2 不平衡负载下的相间功率均衡控制

负序电流是造成三相电池不均衡的根源。本文研究的MMC-BESS交流侧不并网，传统的由于相间均衡的零序电压注入法无法在不影响负载的情况下通过交流回路来实现三相的均衡，因此不再适用。

此时可以利用MMC-BESS的直流回路，通过对三相直流电流进行差异化控制，改变直流侧输入/输出到三相的功率，使得每相的直流功率与交流功率之差相等，即可维持三相电池的均衡。

基于上述思路，将式(12)中不平衡功率的绝对值 $|P_{\Delta j}|$ 按大小排序，叠加在各相直流电流给定值上的平衡电流可计算为

$$\begin{cases} \Delta I_{dc_max} = \frac{|P_{\Delta j}|_{max}}{U_{dc}} \\ \Delta I_{dc_min} = \frac{|P_{\Delta j}|_{min}}{U_{dc}} \end{cases} \quad (13)$$

式中， ΔI_{dc_max} 为不平衡功率最大的相所需的直流平衡电流； ΔI_{dc_min} 为不平衡功率最小的相所需的直流平衡电流。

为保持相间均衡前后三相直流电流之和不变，不平衡功率大小居中的相所需的直流平衡电

流 ΔI_{dc_mid} 为

$$\Delta I_{dc_mid} = 0 - \Delta I_{dc_max} - \Delta I_{dc_min} \quad (14)$$

设各相直流电流原给定值为 I_{dc_ref} ，可得调整后各相的直流电流给定值为

$$\begin{cases} I_{dc_ref_max} = I_{dc_ref} + \Delta I_{dc_max} \\ I_{dc_ref_min} = I_{dc_ref} + \Delta I_{dc_min} \\ I_{dc_ref_mid} = I_{dc_ref} + \Delta I_{dc_mid} \end{cases} \quad (15)$$

如此，通过上述差异化地分配各相的直流电流，可以消除负序电流引起的三相电池充放电功率偏差，起到电池实时均衡的效果。

4.3 相间功率均衡控制的仿真验证

为验证上述均衡控制分析和设计的正确性，在MATLAB/Simulink平台上搭建了交流侧离网MMC-BESS三相负载不平衡情况的仿真模型，对提出的相间均衡控制方法进行了仿真验证，仿真模型如图3所示。

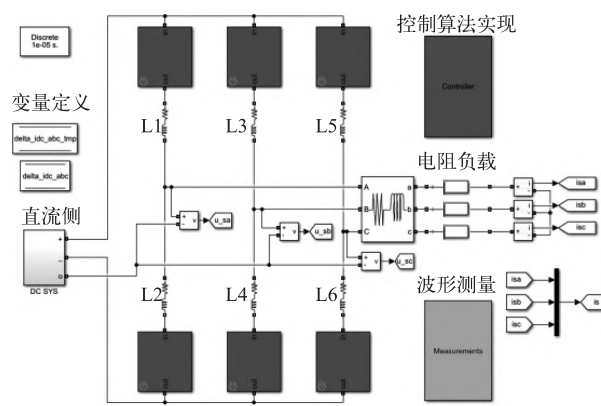


图3 离网型三相负载不平衡仿真模型

Fig. 3 Simulation model of off grid three phase load unbalance

图3中，模型参数见下表。

表 模型参数
Tab. Model parameter

参数名称	参数值
直流电压/V	750
子模块电池电压/V	51.2
桥臂子模块数量	20
桥臂电感/mH	0.5
交流电感/mH	0.5
A相负载/ Ω	2
B相负载/ Ω	5
C相负载/ Ω	8

为实现在三相负载不平衡的情况下的相间均衡控制,控制算法包括负序电流检测、正序电压检测、三相不平衡功率计算和直流电流偏差计算四个步骤。

仿真时长设为1 s, 0.3 s前相间均衡控制不启动, 0.3 s时投入相间均衡控制, 观察系统中各相的电池侧功率, 结果如图4所示。

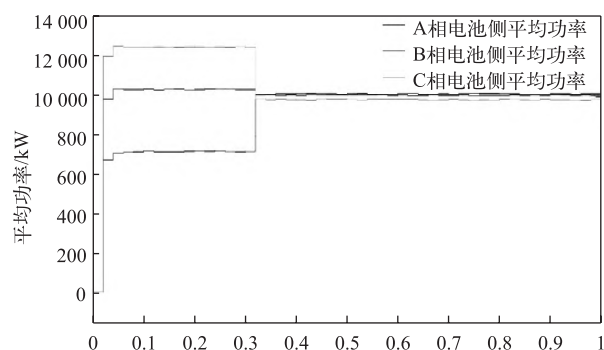


图4 MMC-BESS 各相的电池侧功率

Fig. 4 Battery power in 3 phases of MMC-BESS

由于MATLAB/Simulink模型中含有积分模块, 积分周期为工频周期, 故在仿真刚开始时以及0.3 s时存在一个工频周期的延迟。从图4可以看出, 由于三相负载不平衡, 在加入相间均衡控制之前各相电池侧的平均功率不相等; 0.3 s时开始执行相间均衡控制后, 各相的电池侧平均功率趋近一致, 即电池的充放电功率趋近一致。仿真结果验证了提出的相间均衡控制的正确性。

5 结束语

本文提出了一种针对三相负载不平衡情况下交流侧离网的MMC-BESS的相间均衡控制方法。该方法实时检测负载侧的负序电流, 计算不平衡负载在MMC-BESS三相电池产生的三相不平衡功率, 通过对三相直流电流的差异化分配, 实现三相电池功率的均衡。仿真结果验证了该方法的正确性。

该方法属于前馈型控制, 可以根据三相负载的情况实时进行三相电池SOC的均衡。因此可以达到三相电池实时均衡的效果, 提高了MMC-BESS储能电池的容量利用率, 可最大化储能

收益。

参考文献

- [1] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 92-99.
- [2] 陈长青, 阳同光. 计及柔性负荷的电网储能和光伏协调规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 169-177.
- [3] 凌志斌, 黄中, 田凯. 大容量电池储能系统技术现状与发展[J]. 供用电, 2018, 35(9): 3-8, 21.
- [4] 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.
- [5] 黄中, 陈堃, 梁靓, 等. 模块化多电平电池储能系统试验平台设计与实现[J]. 电气自动化, 2020, 42(4): 75-78.
- [6] 彭鹏, 陈满, 梁靓, 等. 相内快速SOC均衡时MMC-BESS运行边界研究[J]. 供用电, 2020, 37(9): 78-84.
- [7] 田凯, 陈堃, 陈满, 等. 基于载波移相调制的模块化多电平电池储能系统直流侧建模[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1982-1990.

作者简介

杨海涛 (1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力营销。

窦真兰 (1982—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为综合能源。

江晶晶 (1982—), 女, 本科, 工程师, 研究方向为新能源业务。

陈婧 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力营销。

韩冬 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为能源利用和新能源。

徐瀚诚 (1997—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为区域能源及合同能源管理。

(收稿日期: 2022-11-03)