

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220136

# 基于模态划分的分布式储能型 MMC 时域解析模型

汪晋安, 王鋈鑫, 许建中

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 分布式储能型模块化多电平换流器系统电气量谐波含量高、波动大, 影响储能电池使用寿命, 甚至危害系统安全稳定运行。为直观反映系统运行规律、分析影响电容电压和电池电流波动因素, 建立了一种基于模态划分的分布式储能型模块化多电平换流器时域解析模型。将开关函数、平均值法和元件伏安特性相结合, 耦合子模块不同工作状态和模式, 列写并推导时域解析表达式。通过分析显函数的时域解析表达式, 反映子模块内部电气量的波动特征和影响因素。最后, 理论计算和 PSCAD/EMTDC 中的仿真结果对比表明, 所提出的基于模态划分的分布式储能型模块化多电平换流器时域解析模型具有较高的计算精度。此外还验证了电容电压和电池电流波动大小与电容容值、储能电感值、环流幅值相位角、电池充放电功率、调制比等参数的关系。

**关键词:** 分布式储能型 MMC; 模态划分; 开关函数; 平均值法; 时域解析模型

## A time-domain analytical model of MMC-DES based on modal division

WANG Jin'an, WANG Junxin, XU Jianzhong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** The high harmonic content and fluctuation of electrical parameters of a modular multilevel converter-distributed energy storage (MMC-DES) system affect the life of the battery, and endanger the safe and stable operation of MMC-DES. To reflect the operating rules of the system directly and analyze the factors affecting the fluctuation of the capacitor voltage and battery current, a time-domain analytical model of MMC-DES based on modal division is established. The switching function, average value method and component volt-ampere characteristics are combined to write and derive the analytical expression in the time domain by coupling different working states and modes of sub-modules. By analyzing the temporal analytical expression of the explicit function, the fluctuation characteristics and influencing factors of the electrical parameters in the sub-module are reflected. Finally, comparisons between theoretical calculation and simulation obtained from PSCAD/EMTDC show that the proposed mathematical model of MMC-DES has an acceptable calculation accuracy, and verifies the relationship between the fluctuation of capacitor voltage and battery current and capacitance value, energy storage inductance value, amplitude and phase angle of circulating current, battery charge/discharge power, modulation ratio and other parameters.

This work is supported by the Beijing Municipal Natural Science Foundation (No. 32220259).

**Key words:** MMC-DES; modal division; switching function; mean value method; time domain analytical model

## 0 引言

在当前严峻的能源压力和环境压力下, 可持续性发展新能源是必然选择。但是, 新能源发电出力的间歇性和不确定性导致功率波动、并网困难<sup>[1-4]</sup>。

储能技术的出现弥补新能源自然特性的缺陷, 将新能源发电与大容量储能装置相结合, 安全高效的消纳高比例新能源发电<sup>[5-9]</sup>, 例如级联 H 桥链式电池储能系统<sup>[10-11]</sup>和储能型模块化多电平换流器<sup>[12-13]</sup>。而储能型模块化多电平换流器因具有充分利用换流器、外送能力强、可灵活调节储能容量等显著优势, 成为最具有潜力的既能新能源外送又能储存能量的装置。

**基金项目:** 北京市自然科学基金项目资助(3222059); 中央高校基金项目资助(2020MS003)

针对储能型模块化多电平换流器, 较多研究围绕储能模块结构、多用途应用场景、荷电状态均衡控制策略以及仿真提速等方面展开。目前在众多储能模型结构中, 多采用电池经非隔离型 DC-DC 变换器或者直接并联接入方式的分布式储能型 MMC(modular multilevel converter distributed energy storage, MMC-DES)<sup>[14-16]</sup>。为解决众多电池能量消耗不一致、剩余电量不同的电池荷电状态不均衡问题, 文献[17-18]提出了各自的电池荷电状态均衡策略。虽然上述文献已解决电池荷电状态不均衡问题, 但增加了桥臂电流谐波含量, 增大了电池电流波动, 缩短了储能电池的使用寿命<sup>[19-23]</sup>。此外, 还会增大电容电压波动、增加系统损耗、电力电子器件应力, 影响储能型 MMC 系统的安全稳定运行<sup>[24-25]</sup>。在仿真建模方面, 文献[26]为提高仿真效率, 基于动态平均化理论对电路进行整合和化简, 提出一种储能型 MMC 桥臂平均值仿真模型。文献[27]基于戴维南等效方法减少储能型 MMC 模型的节点数量, 从而减小系统导纳矩阵的尺寸, 进而提高加速比。

对于分析电气量波动影响因素、设计控制系统以及仿真提速都需要精确的数学建模, 建立分布式储能型 MMC 时域解析模型直观反映系统运行特性和一般规律, 对上述研究具有理论支撑和指导作用。文献[28-29]基于储能型 MMC 系统的拓扑结构和工作原理分析, 推导得到储能型 MMC 系统直流侧与交流侧等效模型。文献[30]建立储能型 MMC 稳态平均功率模型, 分析电池端与交直流端的功率关系。文献[31]基于共模电压建立功率模型, 定性分析储能充放电功率不平衡时环流和端口电压的变化, 但未从定量角度展开分析。文献[28-31]针对分布式储能型 MMC 外部特性展开建模, 未考虑子模块内部电气量数学解析模型和波动特性。文献[32]建立一种 MMC 的时域解析数学模型。该模型仅适用于 MMC, 分布式储能型 MMC 在拓扑和控制策略上与 MMC 不尽相同, MMC 数学模型不完全适用于分布式储能型 MMC。同时, 子模块内部运行机理以及系统的运行工况都将影响电容电压、电池电流的谐波含量。因此, 亟需建立一个适用于分析影响电气量波动因素的分布式储能型 MMC 时域解析模型。但在当前现有文献中, 分布式储能型 MMC 换流器的数学模型并不多, 在分析影响分布式储能型 MMC 电容电压和电池电流波动因素上还不够完善。

基于上述研究现状, 本文根据分布式储能型 MMC 拓扑结构、子模块工作模态、基尔霍夫定律以及元件伏安特性, 利用直观法列写状态变量方程, 建立动态电路时域方程, 通过时域解法求解系统状

态变量方程。运用模态划分的方法分析子模块工作模态和充放电原理, 通过引入开关函数和平均值法, 对子模块不同的工作模态进行耦合, 建立基于模态划分的分布式储能型 MMC 时域解析模型。针对分布式储能型 MMC, 分析影响上述电气量的波动因素, 为抑制电容电压波动, 减小电流中谐波含量提供理论依据。

## 1 分布式储能型 MMC 基本原理

### 1.1 分布式储能型 MMC 拓扑和控制策略

分布式储能型 MMC 系统在本质上仍为三相电压源换流器, 是 MMC 的一个引申结构。图 1 为分布式储能型 MMC 的拓扑结构图, 储能单元采用经非隔离型双向 DC-DC 变换器的接入方式并联于半桥子模块电容侧。

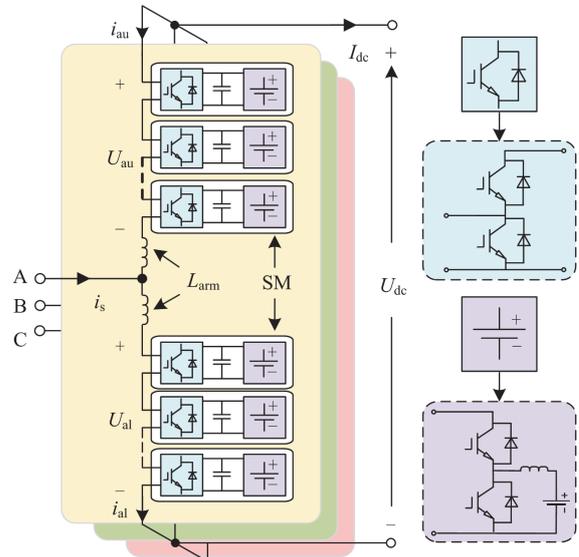


图 1 分布式储能型 MMC 拓扑结构图

Fig. 1 Topology of MMC-DES

储能型 MMC 系统属于三端口变流器, 同时连接交流端 AC、直流端 DC 和储能端 BAT, 其三端口功率满足式(1)。

$$P_{\text{sref}} + P_{\text{bref}} - P_{\text{deref}} = 0 \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{sref}}$  为交流端功率;  $P_{\text{bref}}$  为储能端总功率;  $P_{\text{deref}}$  为直流端功率。

根据能量守恒原理且忽略变流站损耗, 流入三端口变流器的功率和为零, 因此控制两端功率, 即可控制变流器三端口的功率, 增加了控制自由度。分布式储能型 MMC 的功率控制策略可分为直流端功率控制, 交流端功率控制和电池充放电功率控制。目前常用的控制策略有两种: 同时控制交流端功率和直流端功率<sup>[12]</sup>; 同时控制交流端功率和电池充放

电功率<sup>[16]</sup>。

本文采用第 2 种控制策略的分布式储能型 MMC 作为研究对象。交流端采用经典的内、外环功率解耦控制，远海风电系统中的海上 MMC 站常采用 VF 控制<sup>[33]</sup>。储能端的双向 DC-DC 变换器采用双闭环控制，相对于单闭环恒流控制，双环控制虽然更复杂，但对电池充放电功率控制更加精准。在

工作过程中，电池充放电功率追踪外环设定功率参考值，内环控制充放电电流，改变其电池端口电压，电池给交流站充电时(电池放电)，电池端口电压增大，变流站对电池放电时(电池充电)，电池端口电压减小，进而调整双向 DC-DC 变换器的占空比，独立控制每个储能模块充放电，其控制策略框图如图 2 所示。

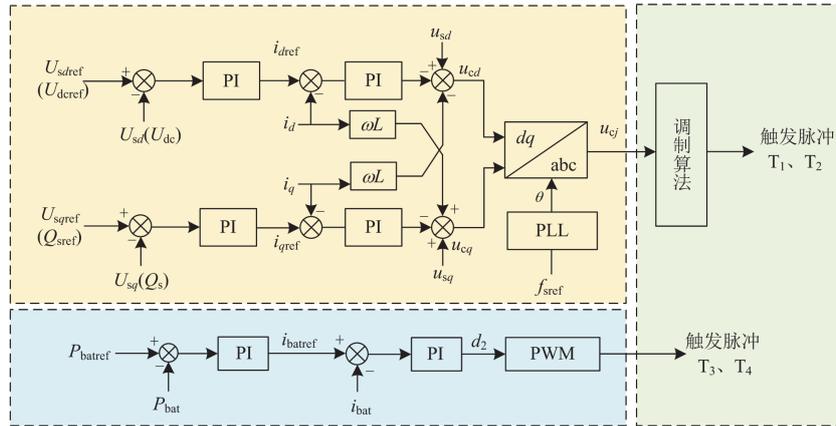


图 2 分布式储能 MMC 控制策略框图

Fig. 2 Block diagram of MMC-DES control strategy

### 1.2 分布式储能型 MMC 工作模态划分

分布式储能型 MMC 的单个子模块拓扑结构如图 3 所示， $T_i$  为 IGBT， $D_i$  为反并联二极管( $i=1\sim 4$ )， $C$  为子模块电容， $L_b$  为双向 DC-DC 变换器中的储能电感，电池组模块采用 Shepherd 模型，将其充放电简化为一个可逆过程，将其放电过程化分为 3 个区：指数区、额定工作区和深度放电区<sup>[34]</sup>。额定状态下电池组放电电压数值为额定电压  $E_b$ ， $R_b$  为电池组等效电阻，后续研究基于电池组工作在额定状态展开。

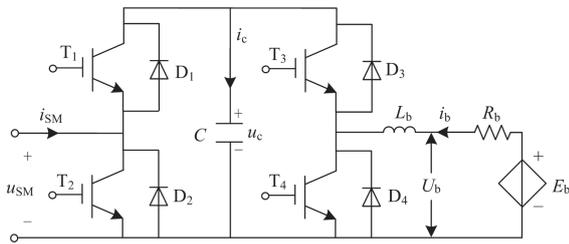


图 3 分布式储能 MMC 子模块拓扑结构图

Fig. 3 Topology of MMC-DES submodule

$T_1$  导通  $T_2$  关断为子模块投入状态，此时子模块端口电压为  $u_c$ 。 $T_1$  关断  $T_2$  导通为子模块切除状态，此时子模块端口电压为 0。 $T_1$  和  $T_2$  同时关断为子模块闭锁状态，此时工作模式为非正常工作状态。工作模式取决于桥臂电流的方向和导通的反并联二极

管，通常用于分布式储能型 MMC 启动时为电容器充电或系统故障将子模块旁路。子模块中含有非隔离型 DC-DC 变换器，增加 2 对 IGBT 和反并联二极管。 $T_3$  导通  $T_4$  关断为电池投入状态。 $T_3$  关断  $T_4$  导通为电池切除状态，也为电感储能状态。 $T_3$  和  $T_4$  同时关断为电池闭锁状态。由上述分析可知，子模块可分为 3 种工作状态，34 种工作模式。附录附图 A1 为子模块的部分工作模态(红色虚线为电流实际方向)和子模块正常工作且为电池充电时的分布式储能型 MMC 子模块模态转换示意图。

## 2 分布式储能型 MMC 数学原理

为建立基于模态划分的分布式储能型 MMC 数学模型，第 1 节分析了子模块不同工作模态。本节针对不同子模块工作模态数学原理分析，建立桥臂电压、电流数学模型。分析桥臂电压与电容电压的关系建立开关函数，耦合不同子模块工作模态，进而建立桥臂电流和子模块电流的关系，最后推导出分布式储能型 MMC 时域解析表达式，建立用开关函数耦合表述子模块不同工作模态的数学模型。

### 2.1 桥臂电压、电流时域解析模型

分布式储能型 MMC 系统三相桥臂结构和参数都具有对称性，电压电流在稳定工况下是对称的。因此以 A 相为例，根据图 1 所示的正方向，上、下



直流分量为 0，反之将为电容电压充放电导致直流电压不稳定。

根据基尔霍夫电流定律、电感伏安特性和非隔

离型双向 DC-DC 变换器工作原理，可求解出电池电流解析表达式  $i_{\text{bat}}$ ，如式(17)所示。子模块电容电流周期性波动会引起电池电流周期性波动。

$$\begin{cases} u_c = e^{-\frac{R}{2L}t} \left[ C_1 \cos \left( \sqrt{\frac{\alpha^2}{CL} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2} t \right) + C_2 \sin \left( \sqrt{\frac{\alpha^2}{CL} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2} t \right) \right] + y_1^* + y_2^* + y_3^* + y_4^* + y_5^* + y_6^* \\ y_1^* = \frac{E_b}{\alpha} + \frac{R}{\alpha^2} \left[ \frac{1}{6} \left( \frac{1}{4} m I_m \cos \varphi_1 + \frac{P_b}{3U_{\text{dc}}} \right) - \frac{1}{8} m I_m \sin(\varphi_1 - \varphi_3) \right] \\ y_2^* = (a_1^* + a_6^*) \sin(\omega t + \varphi_1) + (b_1^* + b_6^*) \cos(\omega t + \varphi_1) \\ y_3^* = (a_2^* + a_7^*) \sin(\omega t + \varphi_3) + (b_2^* + b_7^*) \cos(\omega t + \varphi_3) \\ y_4^* = (a_3^* + a_8^*) \sin(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3) + (b_3^* + b_8^*) \cos(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3) \\ y_5^* = (a_4^* + a_9^*) \sin(2\omega t + \varphi_2) + (b_4^* + b_9^*) \cos(2\omega t + \varphi_2) \\ y_6^* = (a_5^* + a_{10}^*) \sin(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_3) + (b_5^* + b_{10}^*) \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_3) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} i_c = e^{-\frac{R}{2L}t} \left[ C_3 \cos \left( \sqrt{\frac{\alpha^2}{CL} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2} t \right) + C_4 \sin \left( \sqrt{\frac{\alpha^2}{CL} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2} t \right) \right] + x_1^* + x_2^* + x_3^* + x_4^* + x_5^* \\ x_1^* = (\alpha c_1^* + c_6) \sin(\omega t + \varphi_1) + \alpha d_1^* \cos(\omega t + \varphi_1) \\ x_2^* = (\alpha c_2^* + c_7) \sin(\omega t + \varphi_3) + \alpha d_2^* \cos(\omega t + \varphi_3) \\ x_3^* = (\alpha c_3^* + c_8) \sin(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3) + \alpha d_3^* \cos(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3) \\ x_4^* = (\alpha c_4^* + c_9) \sin(2\omega t + \varphi_2) + \alpha d_4^* \cos(2\omega t + \varphi_2) \\ x_5^* = (\alpha c_5^* + c_{10}) \sin(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_3) + \alpha d_5^* \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_3) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} i_{\text{bat}} = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{R}{2L}t} \left[ C_1 \cos \left( \sqrt{\frac{\alpha^2}{CL} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2} t \right) + C_2 \sin \left( \sqrt{\frac{\alpha^2}{CL} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2} t \right) \right] + z_1^* + z_2^* + z_3^* + z_4^* + z_5^* + z_6^* \\ z_1^* = \frac{1}{2\alpha} \left( \frac{1}{4} m I_m \cos \varphi_1 + \frac{P_b}{3U_{\text{dc}}} \right) - \frac{1}{8\alpha} m I_m \sin(\varphi_1 - \varphi_3) \\ z_2^* = c_1^* \sin(\omega t + \varphi_1) + d_1^* \cos(\omega t + \varphi_1) \\ z_3^* = c_2^* \sin(\omega t + \varphi_3) + d_2^* \cos(\omega t + \varphi_3) \\ z_4^* = c_3^* \sin(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3) + d_3^* \cos(\omega t + \varphi_2 - \varphi_3) \\ z_5^* = c_4^* \sin(2\omega t + \varphi_2) + d_4^* \cos(2\omega t + \varphi_2) \\ z_6^* = c_5^* \sin(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_3) + d_5^* \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_3) \end{cases} \quad (17)$$

式(15)一(17)组成了分布式储能型 MMC 的数学模型。分析上述时域解析式可得如下结论：

1) 分析式(15)可知，当系统运行在稳定工况时，各子模块电容电压应保持一致且恒定，但因无功瞬时功率和电池瞬时功率在一个周期内对换流阀充放电，该能量会引起子模块电容电压波动。桥臂子模块电容电压波动受子模块电容容值、储能电感值、调制比、环流幅值比、相位角和储能模块充放电功率大小影响。采用控制变量法分析可得，电容电压

波动随着电容容值、储能电感值的增大而减小。当电池工作在充电工况时，随着充电功率增大时，电容电压的直流分量随之减小，而电容电压的基频分量随之增大，进而增大电容电压波动，而电池运行在放电工况时，电池放电功率越大，电容电压的基频分量随之减小，进而减小电容电压波动。随着桥臂环流的幅值比与相位的变化，电容电压波动大小呈现先减小后增大的趋势。

2) 分析式(16)可知，电容电流不含直流分量，

电容电流仅含有与电容容值和储能电感值成反比的基频和二倍频分量。电容电流波动大小与电池充放电功率大小和调制比相关, 在不同的电池充放电功率下, 随着调制比的增大, 电容电流波动呈现逐渐减小的趋势。

3) 分析式(17)可知, 非隔离型双向 DC-DC 变换器中的 IGBT  $T_3$  和  $T_4$  因较高的频率作平均值等效, 忽略了电感纹波和低频(开关次)谐波分量。但电池电流受到电池充放电模式和电容电流波动的影响, 含有直流分量、基频和二倍频交流量。电池电流直流分量受充放电功率、调制比和桥臂电流中的基频分量幅值大小影响, 反映电池一般运行规律和动态特性。电池电流波动受子模块电容容值、储能电感、电池充放电功率大小、环流幅值相位角以及储能型 MMC 的运行模式影响。电池电流纹波随着电容值和储能电感值的增大呈现逐渐减小的趋势。而电池内阻值由电池自身参数决定, 一般为生产厂家给出, 因此不再分析电池内阻值对电池电流波动的影响。在不同的调制比下, 电池电流基频分量随电池组充放电功率的增大呈现增大趋势。电池电流基频分量在不同的充放电功率下随着调制比的增大而增大, 由此可知电池电流的波动也越大。

#### 4 仿真验证

为验证分布式储能型 MMC 时域解析表达式的正确性, 在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建一个储能型 MMC-HVDC 模型。送端为分布式储能型 MMC, 受端为常规 MMC。两个 MMC 站间通过架空线连接, 线路采用依频模型。分布式储能型 MMC 系统仿真接线图, 如附录图 A2 所示, 参数如表 1 所示。

表 1 分布式储能型 MMC 参数

Table 1 Parameters of MMC-DES

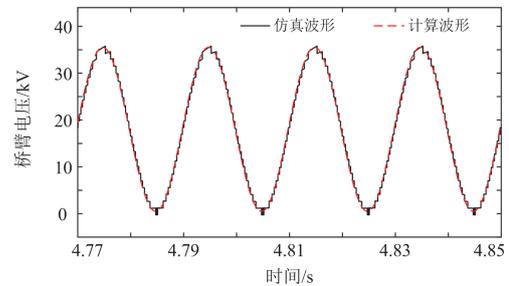
分布式储能型 MMC		储能模块参数	
容量/MVA	36	储能模块容量/Ah	200
额定直流电压/kV	36	开路电压/V	4.8
桥臂电抗/mH	14.65	储能模块内阻/ $\Omega$	0.2
桥臂电阻/ $\Omega$	0.01	储能模块个数	100
子模块电容值/ $\mu$ F	12 000	储能电感/mH	10
桥臂子模块数量	24	—	—

##### 4.1 分布式储能型 MMC 时域解析模型验证

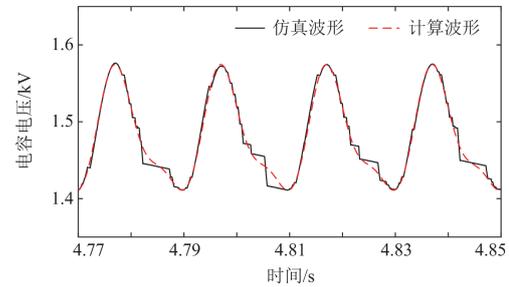
分布式储能型 MMC 系统在 0.5~2 s 时运行于空闲工况, 即功率仅在交、直流侧传递。2 s 时发生阶跃, 电池充放电总功率控制环指令从 0 MW 切换至吸收 3.6 MW, 系统运行于充电工况。在 3.5 s 时电池充放电总功率发生翻转, 电池充放电总功率从吸收 3.6 MW 切换至释放 3.6 MW, 直流端输出功率随

之改变, 系统运行于放电工况。将各电气量的仿真波形和所建立分布式储能型 MMC 数学模型的计算波形作对比, 如附录图 A3—图 A5 所示。

图 5 为分布式储能型 MMC 电压解析计算波形和仿真波形对比图。桥臂电压和电容电压的计算波形都能够很好地吻合仿真波形。图 5(b)较好地反映了电容电压的变化, 由于计算电容电压时忽略了开关函数 3 次及以上谐波, 导致计算波形与仿真波形在波谷处有微小差异。由表 2 可知, 当分布式储能型 MMC 运行在放电工况下时, 电容电压计算波形和仿真波形直流分量偏差为 0.034%, 基频分量偏差为 0.553%, 2 次谐波分量偏差为 1.022%。子模块电容电压的直流分量、基波分量、2 次谐波分量都具有较高的精度, 3、4 次谐波分量因远小于基频谐波, 可被忽略。



(a) 分布式储能型 MMC 桥臂电压



(b) 分布式储能型 MMC 电容电压

图 5 分布式储能型 MMC 电压

Fig. 5 Voltage of MMC-DES

表 2 电压谐波计算表

Table 2 Voltage harmonic calculation table

谐波次数	桥臂电压/kV		电容电压/kV	
	计算值	仿真值	计算值	仿真值
DC	18	18.0187	1.4794	1.4799
1	16.5287	16.7034	0.1636	0.1627
2	—	0.0167	0.0484	0.0489
3	—	0.0037	—	0.0032
4	—	0.0056	—	0.0013

图 6 为分布式储能型 MMC 电流解析计算波形和仿真波形图。桥臂电流计算波形能够很好地吻合

仿真波形。电容电流仿真波形和计算波形的峰谷有一定的差异是因为各个 IGBT 的导通和关断导致电容电流波形谐波含量较大。同时，计算波形忽略了 3 次及其以上的谐波分量，且引入开关函数将电容电流作等效处理，采用平均值法将占空比和流入电容的电池电流作等效处理，因此电容电流存在合理的误差。因 DC-DC 变换器中含有储能电感，储能电感的积蓄能量吸收和释放使电池电流有一定的纹波含量。因此将  $T_3$  和  $T_4$  作平均值等效，忽略电池电流的毛刺。由图 6(c)可以看出，电池电流的直流分量远大于交流分量，直观地反映了电池的运行规律，电流解析计算波形趋势符合仿真波形。

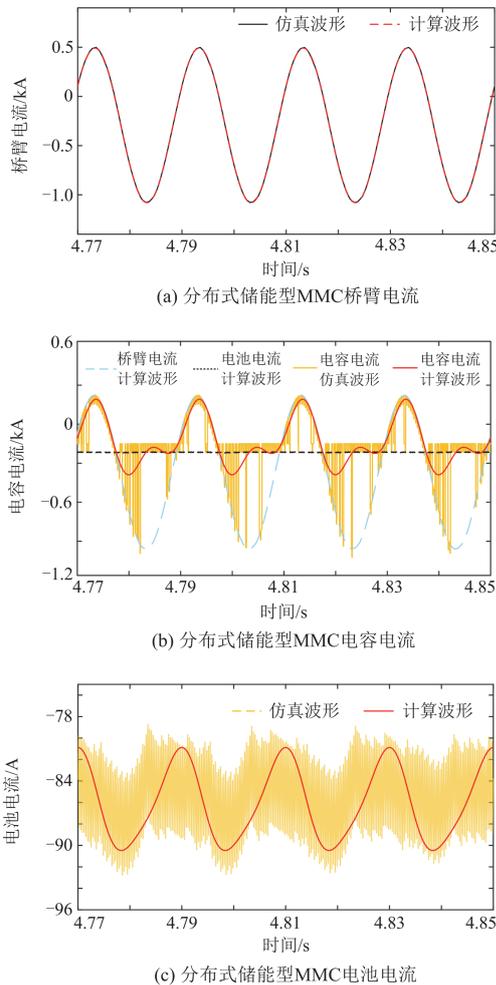


图 6 分布式储能型 MMC 电流  
Fig. 6 Current of MMC-DES

由表 3 可知，桥臂电流、电容电流和电池电流的计算波形和仿真波形直流分量偏差近似于 0。电容电流仿真峰值为 0.4974 kA，计算波形峰值为 0.4934 kA。电池电流计算波形和仿真波形的基频分量偏差为 0.2 A，二次谐波分量的仿真值和计算值都

接近于 0，可忽略不计。桥臂电流、电容电流和电池电流的直流分量、基波分量都具有较高的精度，3 次及以上次谐波分量远小于基频和二次谐波，可被忽略。

表 3 电流谐波计算表

Table 3 Current harmonic calculation table

谐波次数	桥臂电流/kA		电容电流/kA		电池电流/A	
	计算值	仿真值	计算值	仿真值	计算值	仿真值
DC	-0.3254	-0.3254	0	0.0002	-86.4	-86.2
1	1.5748	1.5851	1.2646	1.5674	10.3	10.6
2	—	0.0002	0.2796	0.2828	1.5	1.2
3	—	0.0002	—	0.0351	—	0.2
4	—	0.0003	—	0.0164	—	0.1

#### 4.2 电容电压和电池电流影响因素分析

由第 3 节建立的分布式储能型 MMC 时域解析模型理论分析可知，电容电压和电池电流波动大小受到电容容值、储能电感值、电池充放电功率、调制比以及环流幅值、相位角等众多因素的影响。

由图 7 所示，随着电容容值和储能电感值的增大，电容电压波动和电池电流波动波形整体呈现逐渐减小的趋势，即增加电容容值和储能电感值都会减小电容电压和电池电流的谐波含量。储能电感值

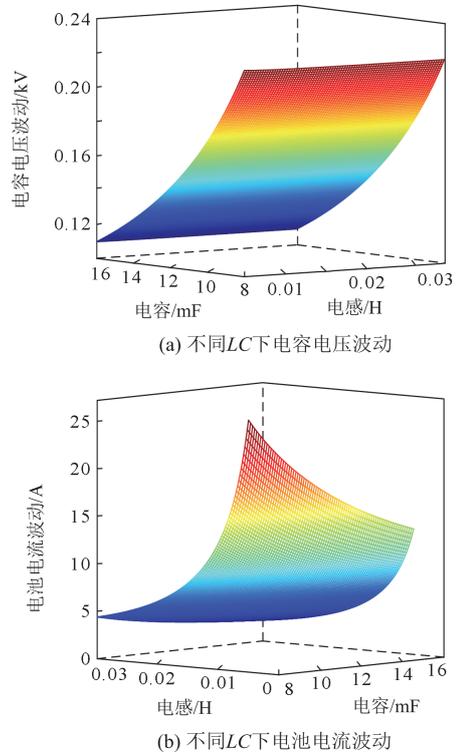


图 7 不同 LC 下电容电压和电池电流波动图  
Fig. 7 Graphs of  $u_c$  and  $i_b$  along with different LC

的变化对电容电压波动影响较小, 而对电池电流波动影响较大。

图 8 为电容电压和电池电流随调制比和电池组充放电功率变化的曲线图。随着调制比的增大, 电容电压和电池电流波动随之增大。电池组充放电功率从 0.2 MW 逐渐变化至 -0.1 MW 时, 储能型 MMC 从充电工况运行至放电工况, 电容电压和电池电流波动呈现逐渐增大的趋势, 说明电容电压和电池电流的谐波含量也增加, 与第 3 节中的理论分析结果一致。

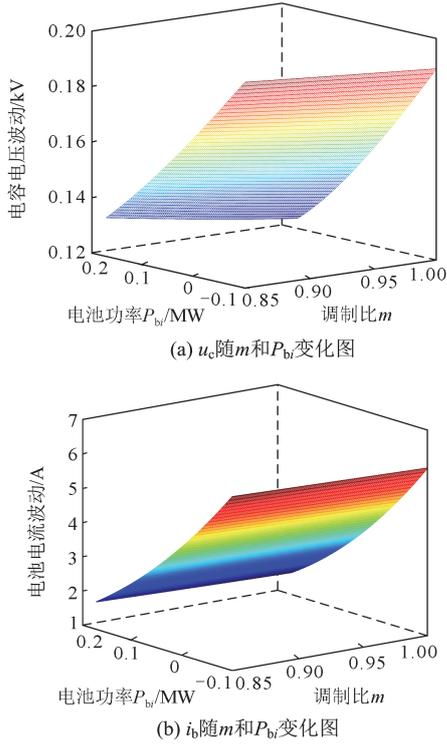


图 8  $u_c$  和  $i_b$  随  $m$  和  $P_{bi}$  变化的曲线图

Fig. 8 Graphs of  $u_c$  and  $i_b$  along with  $m$  and  $P_{bi}$

由图 9 可知, 电容电压随桥臂环流幅值比和桥臂环流相位角的变化趋势。在环流幅值与桥臂电流基频分量比值  $k_2$  为定值时, 随着环流相位角由  $-\pi$  或

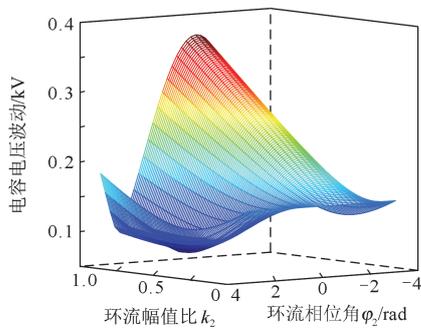


图 9 电容电压随  $k_2$  和  $\varphi_2$  变化曲线图

Fig. 9 Graphs of  $u_c$  along with  $k_2$  and  $\varphi_2$

$\pi$  向 0 变化的过程中, 电容电压波动呈现先减小后增大的趋势。在环流相位角为定值时, 电容电压波动随着环流幅值与桥臂电流基频分量的比值由 0 至 1 的变化过程中, 呈现先减小后增大的趋势。由此可说明, 注入适当的幅值和相位的环流电流有利于减小电容电压的波动。

## 5 结论

本文将分布式储能型 MMC 拓扑结构、子模块工作模态与开关函数模型和平均值法相结合, 根据基尔霍夫定律和元件 VAR 特性列写状态变量方程组, 建立了基于模态划分的分布式储能型 MMC 时域解析模型。

对比仿真结果和计算结果, 分布式储能型 MMC 运行在放电工况时, 电容电压计算波形和仿真波形直流分量偏差为 0.034%, 基频分量偏差为 0.553%。电池电流直流分量偏差为 0.2 A, 基频分量偏差为 0.3 A。基于模态划分的分布式储能型 MMC 的时域解析模型在不同工况下各分量上都有较高的精度, 且能够正确反映子模块电气量的波动特征和影响因素。

根据理论分析和仿真验证可知, 电容电压和电池电流波动受众多因素影响。增大电容容值和储能电感值, 减小系统调制比有利于减小电容电压和电池电流波动幅值。电池系统运行在不同工况时对电容电压和电池电流的波动影响不同。注入适当的幅值和相位的环流电流有利于减小电容电压的波动。该分布式储能型 MMC 时域解析模型为抑制电容电压波动和减小电池电流谐波含量提供了理论依据。

## 附录 A

$$\left\{ \begin{aligned} a_1^* &= \frac{\frac{1}{4} I_m \frac{R}{LC} (\alpha^2 - \omega^2)}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ b_1^* &= -\frac{\frac{1}{4} I_m \frac{R}{LC} \cdot \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ a_2^* &= -\frac{\frac{1}{2} m (\frac{1}{4} m I_m \cos \varphi_1 + \frac{P_{bref}}{3U_{dc}}) \frac{R}{LC} \cdot \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ b_2^* &= -\frac{\frac{1}{2} m (\frac{1}{4} m I_m \cos \varphi_1 + \frac{P_{bref}}{3U_{dc}}) \frac{R}{LC} (\alpha^2 - \omega^2)}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \end{aligned} \right.$$

$$\begin{cases} a_3^* = -\frac{\frac{1}{4}mI_2 \frac{R}{LC} (\alpha^2 - \omega^2)}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ b_3^* = -\frac{\frac{1}{4}mI_2 \frac{R}{LC} \cdot \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_8^* = -\frac{\frac{1}{4}mI_2 \frac{\omega}{C} \cdot \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ b_8^* = -\frac{\frac{1}{4}mI_2 \frac{\omega}{C} \frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{CL}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_4^* = \frac{\frac{1}{2}I_2 \frac{R}{LC} (\alpha^2 - 4\omega^2)}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \\ b_4^* = -\frac{\frac{1}{2}I_2 \frac{R}{LC} \cdot \frac{2R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_9^* = \frac{\frac{1}{2}I_2 \frac{2\omega}{C} \cdot \frac{2R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \\ b_9^* = \frac{\frac{1}{2}I_2 \frac{2\omega}{C} \frac{(\alpha^2 - 4\omega^2)}{CL}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_5^* = -\frac{\frac{1}{8}mI_m \frac{R}{LC} (\alpha^2 - 4\omega^2)}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \\ b_5^* = \frac{\frac{1}{8}mI_m \frac{R}{LC} \cdot \frac{2R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_{10}^* = -\frac{\frac{1}{8}mI_m \frac{2\omega}{C} \frac{(\alpha^2 - 4\omega^2)}{CL}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \\ b_{10}^* = -\frac{\frac{1}{8}mI_m \frac{2\omega}{C} \cdot \frac{2R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_6^* = \frac{\frac{1}{4}I_m \frac{\omega}{C} \cdot \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ b_6^* = \frac{\frac{1}{4}I_m \frac{\omega}{C} \frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{CL}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_1^* = -\frac{\frac{\alpha I_m}{4LC} \frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{CL}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ d_1^* = -\frac{\frac{\alpha I_m}{4LC} \cdot \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_7^* = \frac{\frac{1}{2}m(\frac{1}{4}mI_m \cos \varphi_1 + \frac{P_{\text{bref}}}{3U_{\text{dc}}}) \frac{\omega}{C} \frac{(\alpha^2 - \omega^2)}{CL}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ b_7^* = -\frac{\frac{1}{2}m(\frac{1}{4}mI_m \cos \varphi_1 + \frac{P_{\text{bref}}}{3U_{\text{dc}}}) \frac{\omega}{C} \cdot \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_2^* = -\frac{\frac{1}{2}m(\frac{1}{4}mI_m \cos \varphi_1 + \frac{P_{\text{bref}}}{3U_{\text{dc}}}) \frac{\alpha}{LC} \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ d_2^* = -\frac{\frac{1}{2}m(\frac{1}{4}mI_m \cos \varphi_1 + \frac{P_{\text{bref}}}{3U_{\text{dc}}}) \frac{\alpha}{LC} \cdot \frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_3^* = -\frac{\frac{1}{4}mI_2 \frac{\alpha}{LC} (\alpha^2 - \omega^2)}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \\ d_3^* = \frac{\frac{1}{4}mI_2 \frac{\alpha}{LC} \cdot \frac{R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - \omega^2)^2 + (\frac{R\omega}{L})^2} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} c_5^* = \frac{\frac{1}{8}mI_m \frac{\alpha}{LC} (\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \\ d_5^* = \frac{\frac{1}{8}mI_m \frac{\alpha}{LC} \cdot \frac{2R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_4^* = \frac{\frac{1}{2}I_2 \frac{\alpha}{LC} (\alpha^2 - 4\omega^2)}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \\ d_4^* = -\frac{\frac{1}{2}I_2 \frac{\alpha}{LC} \cdot \frac{2R\omega}{L}}{(\frac{\alpha^2}{CL} - 4\omega^2)^2 + (\frac{2R\omega}{L})^2} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} c_6 = \frac{1}{4}I_m \\ c_7 = -\frac{1}{6}m(\frac{3}{4}mI_m \cos\varphi + \frac{P_b}{U_{dc}}) \\ c_8 = -\frac{1}{4}mI_2 \\ c_9 = \frac{1}{2}I_2 \\ c_{10} = -\frac{1}{8}mI_m \end{array} \right.$$

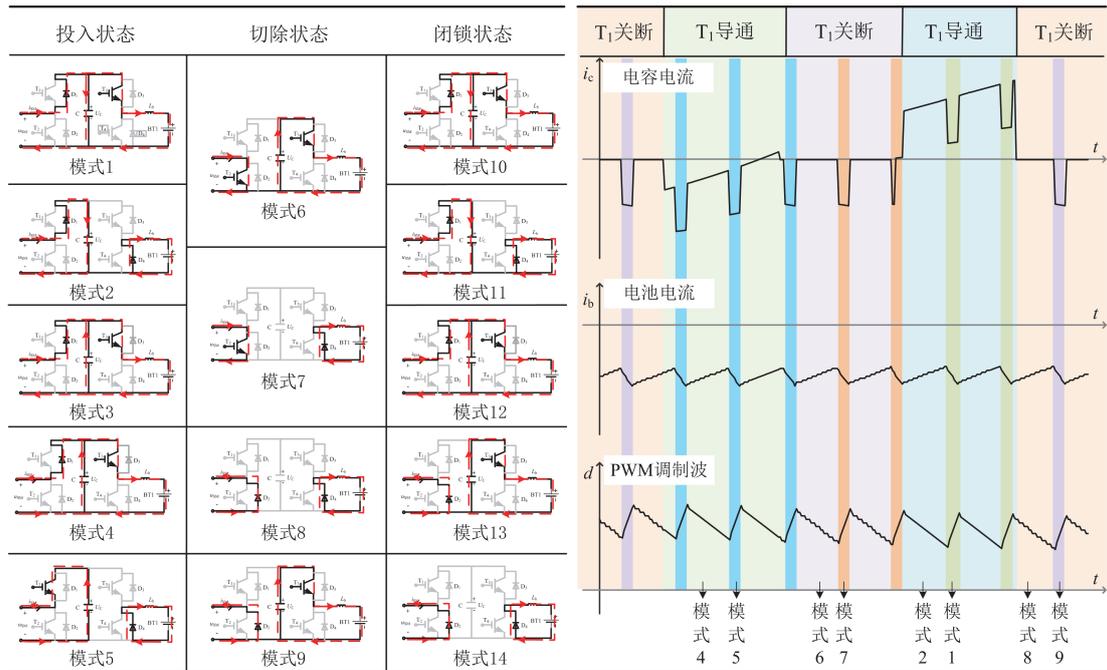


图 A1 分布式储能型 MMC 系统放电工况下模态切换示意图

Fig. A1 Schematic diagram of MMC-DES mode conversion under discharge condition

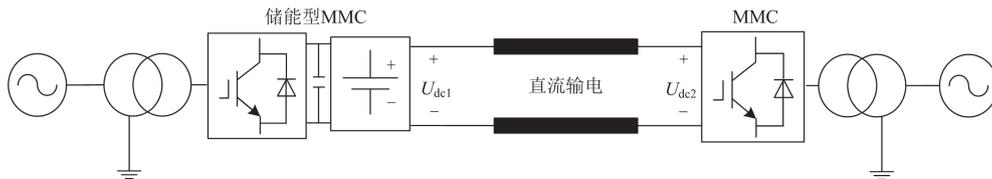


图 A2 双端分布式储能型 MMC 系统仿真接线图

Fig. A2 Simulation diagram of two-terminal MMC-DES

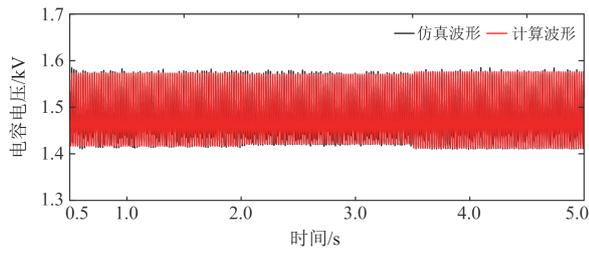


图 A3 分布式储能型 MMC 电容电压  
Fig. A3 Capacitor voltage of MMC-DES

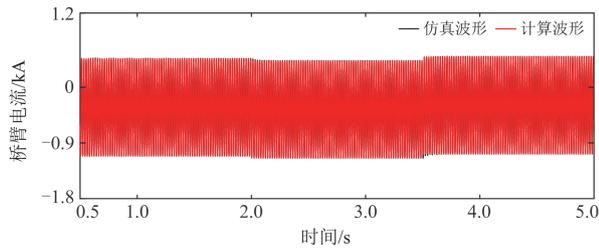


图 A4 分布式储能型 MMC 桥臂电流  
Fig. A4 Arm current of MMC-DES

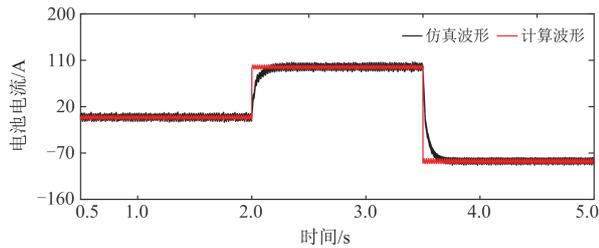


图 A5 分布式储能型 MMC 电池电流  
Fig. A5 Battery current of MMC-DES

参考文献

[1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.

[2] 薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 19-28.  
XUE Chen, REN Jing, MA Xiaowei, et al. Mechanism of peak regulation auxiliary electricity market in the presence of high-penetration renewable energy and its practice in Northwest China[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 19-28.

[3] YANG Jinye, LIU Chunyang, MI Yuanze, et al. Optimization operation model of electricity market

considering renewable energy accommodation and flexibility requirement[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 227-238.

[4] 李晓鹏, 李岩, 刘舒然, 等. 基于可变速抽水蓄能技术提升区域电网新能源消纳水平的研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 52-58, 112.  
LI Xiaopeng, LI Yan, LIU Shuran, et al. Research on promotion of renewable energy integration into regional power grid by variable speed pumped storage technology[J]. Smart Power, 2021, 49(10): 52-58, 112.

[5] 侯慧, 徐焘, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 74-84.  
HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, et al. Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 74-84.

[6] 赵伟, 李雄, 乔仁飞, 等. 基于混合储能的孤岛微网 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 33-40.  
ZHAO Wei, LI Xiong, QIAO Renfei, et al. VSG control strategy of an isolated microgrid based on hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 33-40.

[7] FANG Baomin, QIU Weiqiang, WANG Maochun, et al. Evaluation index system of shared energy storage market towards renewable energy accommodation scenario: a China's Qinghai province context[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 77-95.

[8] 郭晨, 王碧阳, 李立, 等. 特高压直流送端系统的运行约束及新能源消纳挑战研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 56-62.  
GUO Chen, WANG Biyang, LI Li, et al. Power System operation constraint and new energy consumption challenge of UHV DC transmission system[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 56-62.

[9] 罗庆, 张新燕, 罗晨, 等. 新能源发电中储能综合利用的优化评估[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 51-55, 62.  
LUO Qing, ZHANG Xinyan, LUO Chen, et al. Optimal evaluation of energy storage comprehensive utilization in new energy generation[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 51-55, 62.

[10] 陈舒钰, 刘文华, 赵香花, 等. 注入无功功率的链式电池储能系统荷电状态均衡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 83-91.  
CHEN Shuyu, LIU Wenhua, ZHAO Xianghua, et al. Balancing control strategy of state of charge for cascaded battery energy storage system with injection of reactive

- power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 83-91.
- [11] 蔡旭, 李睿, 刘畅, 等. 高压直挂储能功率变换技术与世界首例应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 200-211, 387.  
CAI Xu, LI Rui, LIU Chang, et al. Transformerless high-voltage power conversion system for battery energy storage system and the first demonstration application in world[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 200-211, 387.
- [12] VASILADIOTIS M, CHERIX N, RUFER A M. Impact of grid asymmetries on the operation and capacitive energy storage design of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 6697-6707.
- [13] 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.
- [14] 花雅文, 李庚, 韩国栋, 等. 混合背靠背模块化多电平变换器设计[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 70-76.  
HUA Yawen, LI Geng, HAN Guodong, et al. Design of hybrid back-to-back modular multilevel converter[J]. Smart Power, 2021, 49(8): 70-76.
- [15] ZENG W, LI R, CAI X. A new hybrid modular multilevel converter with integrated energy storage[J]. IEEE Access, 2019, 7: 172981-172993.
- [16] 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.
- [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] MUKHERJEE N, STRICKLAND D. Analysis and comparative study of different converter modes in modular second-life hybrid battery energy storage systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2): 547-563.
- [19] LIU C, LAI J. Low frequency current ripple reduction technique with active control in a fuel cell power system with inverter load[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1429-1436.
- [20] PUARANIK I, ZHANG L, QIN J. Impact of low frequency ripple on lifetime of battery in MMC-based battery storage systems[C] // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 23-27, 2018, Portland, OR, USA: 2748-2752.
- [21] 李大祥, 张新松. 用户侧电池储能系统运行策略优化与效益分析[J]. 智慧电力, 2021, 49(12): 31-36.  
LI Daxiang, ZHANG Xinsong. Operation strategy optimization and benefits analysis of user side battery energy storage systems[J]. Smart Power, 2021, 49(12): 31-36.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] SOONG T, LEHN P W. Internal power flow of a modular multilevel converter with distributed energy resources[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1127-1138.
- [25] 金成. 基于模块化多电平的储能装置控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
JIN Cheng. Research on control strategy of energy storage device based on modular multilevel converter[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [26] 唐英杰, 张哲任, 徐政. 有源型模块化多电平换流器桥臂全状态平均值仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 146-154.  
TANG Yingjie, ZHANG Zheren, XU Zheng. Full-state arm average value model for simulation of active modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 146-154.
- [27] HERATH N, FILIZADEH S, TOULABI M S. Modeling of a modular multilevel converter with embedded energy storage for electromagnetic transient simulations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2096-2105.
- [28] 连祖尧. 电池储能型模块化多电平变换器(MMC-

- BESS)容错运行研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- ZE Zuyao. Research on fault-tolerant operation of modular multilevel converter with battery energy storage system (MMC-BESS)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [29] 吉宇. 储能型模块化多电平变换器的关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- JI Yu. Research on key technologies of energy storage modular multilevel converter[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [30] ZHANG L, GAO F, LI N, et al. Interlinking modular multilevel converter of hybrid AC-DC distribution system with integrated battery energy storage[C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 20-24, 2015, Montreal, QC, Canada: 70-77.
- [31] VASILADIOTIS M, RUFER A. Analysis and control of modular multilevel converters with integrated battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 163-175.
- [32] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Modeling of modular multi-level voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8.
- [33] 许建中, 汪晋安. 一种基于模态划分的有源型 MMC 时域解析建模方法: 中国专利, CN113673099A[P]. 2021-11-19.
- [34] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90.
- WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.
- [35] 肖硕霜. 带蓄电池储能的风电机组并网控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- XIAO Shuoshuang. Research on grid-connection control of wind power generator with battery energy storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [36] ZHAO F, XIAO G, ZHAO T. Accurate steady-state mathematical models of arm and line harmonic characteristics for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1308-1318.
- [37] 许建中, 汪晋安. 一种基于模态划分的储能型 MMC 精确解析建模方法: 中国专利, CN113489360A[P]. 2021-10-08.
- [38] 张兴伟, 谭丽平, 陈文浩, 等. 基于二次系统优化的储能变流器惯性提升方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 128-135.
- ZHANG Xingwei, TAN Liping, CHEN Wenhao, et al. Inertial lifting method of an energy storage converter based on secondary system optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 128-135.

收稿日期: 2022-01-30; 修回日期: 2022-03-31

作者简介:

汪晋安(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电与储能技术; E-mail: 513279466@qq.com

王鋆鑫(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电; E-mail: wang\_jun\_xin@126.com

许建中(1987—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为柔性直流输电技术、储能技术与直流电网技术。E-mail: xujianzhong@ncepu.edu.cn

(编辑 周金梅)