

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230464

可实现低频输电系统不对称故障穿越的 M3C 电容电压均衡控制策略

郑涛¹, 康恒¹, 宋伟男²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国网辽宁省电力有限公司
大连供电公司, 辽宁 大连 116000)

摘要: 低频输电作为一种新型输电技术, 在海上风电送出、新能源场站送出等多个场景具有良好的应用前景。但在不对称故障下, 故障侧功率不对称将严重影响模块化多电平矩阵变换器(modular multilevel matrix converter, M3C)的电容电压均衡, 对低频输电系统安全稳定运行产生不利影响。为此, 提出了一种可实现低频输电系统不对称故障穿越的 M3C 电容电压均衡控制策略。首先, 介绍 M3C 的系统结构及双 $\alpha\beta$ 数学模型, 并分析不对称故障下电容电压不均衡的原因。然后, 基于双 $\alpha\beta$ 数学模型针对输电线路不对称故障情况计算桥臂功率不均衡分量的表达式, 通过 M3C 功率平衡关系引入电流补偿分量, 消除桥臂功率的不均衡, 并得到适用于不对称故障的环流控制目标, 进而通过环流控制实现故障下 M3C 电容电压的均衡。最后, 搭建基于 M3C 的低频输电系统仿真模型验证所提控制方案的可行性和有效性。

关键词: 低频输电; 模块化多电平矩阵变换器; 环流控制; 电容电压均衡

Asymmetric fault ride-through control strategy for low-frequency transmission systems realizing the capacitor voltage balance of modular multilevel matrix converters

ZHENG Tao¹, KANG Heng¹, SONG Weinan²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Dalian Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Company, Dalian 116000, China)

Abstract: As a new transmission technology, low frequency transmission has good application prospects in several scenarios such as offshore wind power transmission and new energy field station transmission. However, with asymmetric faults, the power asymmetry on the fault side will affect the capacitor voltage balance of the M3C and affect the stable operation of the low frequency transmission system. Therefore, an M3C capacitor voltage balance control strategy that can realize asymmetric fault ride-through in low frequency transmission systems is proposed. First, the system structure and dual $\alpha\beta$ mathematical model of an M3C are introduced, and the causes of capacitor voltage imbalance under asymmetric faults are analyzed. Second, based on the dual $\alpha\beta$ mathematical model for the transmission line asymmetric fault case, the expression for the bridge arm power imbalance component is calculated. Then the M3C power balance relationship introduces the current compensation to eliminate the power imbalance. It also obtains the circulating currents control objective applicable to asymmetric faults. Then through the loop current control it achieves the M3C capacitor voltage balance under faults. Finally, a simulation model of the M3C-based low frequency transmission system is built to verify the feasibility and effectiveness of the proposed control scheme.

This work is supported by the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U2166205).

Key words: low frequency transmission system; modular multilevel matrix converter; circulating currents control; capacitor voltage balance

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目资助(U2166205)

0 引言

低频输电技术,也被称为分频输电技术,通过AC/AC变频器将传统工频交流电变换为低频交流电进行输送,或者直接对新能源场站低频交流电进行送出^[1-3]。低频输电技术降低了传输损耗,提升了输送容量以及输送距离^[4-7],在中远距离海上风电送出以及城市供电系统柔性互联的多个场景中具有良好的应用前景^[8-11]。模块化多电平矩阵变换器(modular multilevel matrix converter, M3C)能够实现AC/AC直接变换,具有两侧功率因数可控,易于集成和扩展等多方面优点,被普遍认为是适用于低频输电系统的大容量AC/AC变频器^[12-13]。

在低频输电系统中,M3C作为系统运行的核心装置,其在安全可靠范围内运行对于整个低频输电系统具有重要意义。目前,对于M3C的研究多集中在控制策略层面,被广泛认可的双 $\alpha\beta 0$ 变换能够实现M3C的电气量解耦,以及输入侧、输出侧、环流部分的独立控制。在稳态运行下,文献[14]将整个M3C从输入/输出两侧视为3个子换流器并联,根据不同频率分量在不同频率旋转坐标系下的交直流特点,实现了输出频率与输入频率的解耦控制。文献[15]根据M3C的运行特性,将桥臂电流分为输入侧、输出侧以及环流分量,实现了基于输出频率环流的桥臂电流直接控制。

在不对称故障运行下,目前关于M3C电容电压均衡问题已有部分研究,文献[15]提出注入输出频率环流的子换流器内电容电压均衡策略,实现了子换流器内3个桥臂的电容电压均衡,但在输入侧不对称情况下,输出频率环流存在流入输入侧的风险,导致输入侧电能质量下降。文献[16-17]采用了注入双频环流的方式实现子换流器间/内的电容电压均衡,但该策略下环流具有复杂的约束条件,可能使得暂态过程电容电压产生显著波动^[18]。文献[19]对子换流器间均压策略进行了改进,对桥臂电容电压垂直分量进行修正,但该控制方案通过工频侧负序控制实现,无法完全实现电容电压均衡与工频侧的解耦控制。文献[20]提出了具有储能单元的M3C新型拓扑结构,通过控制储能单元充放电,进而实现不同工况下M3C有功功率的平衡,但增加了M3C的整体控制结构。文献[21]分析了不平衡电网工况对于M3C的影响,基于子换流器的共模环流控制策略,提出了相应的改进策略,但所提策略计算过程复杂且计算量较大。

在低频输电系统运行时,M3C电容电压的均衡是保障低频输电系统安全稳定运行的基础,但不

称故障引起的功率不均衡将严重影响M3C的电容电压。为此,本文提出一种能够实现低频输电系统不对称故障穿越的M3C电容电压均衡控制策略。在抑制故障线路负序电流为零的基础上,计算不对称故障引起的桥臂功率不均衡分量,通过分析M3C子换流器输入输出功率关系引入电流补偿,进而消除子换流器间的功率不均衡,并得到环流控制目标,在双 $\alpha\beta 0$ 坐标系下,基于环流控制实现不对称故障下M3C电容电压的均衡。最后,在PSCAD/EMTDC软件中建立基于M3C的低频输电系统的仿真模型,对所提方案的可行性及有效性进行仿真验证。

1 M3C的数学模型及工作原理

1.1 M3C的拓扑结构

M3C的电路拓扑如图1所示,一共包含9条桥臂,每条桥臂均有一个桥臂电感 L 和 N 个级联子模块构成,其中子模块为基于IGBT的全桥功率模块。由图1可知,工频系统和低频系统通过M3C相互连接,其中 U_x 、 i_x 分别代表工频侧三相电压和三相电流; U_y 、 i_y 分别代表低频侧三相电压和三相电流; O_s 、 O_r 分别代表工频侧中性点和低频侧中性点; i_{xy} 表示桥臂 xy 的桥臂电流; u_{xy} 表示桥臂 xy 的输出桥臂电压($x = a, b, c; y = u, v, w$)。

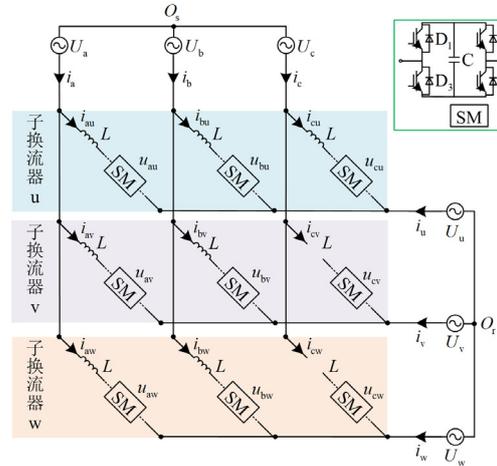


图1 M3C的电路拓扑图

Fig. 1 Circuit topology of the M3C

图1中,低频侧每相均连接了3个桥臂支路,以低频侧u相为例,其连接了au, bu, cu 3个桥臂支路,可将3个桥臂支路共同定义为子换流器u,因此M3C从低频侧可视为子换流器uvw的并联,在工频侧可视为子换流器abc的并联。

1.2 M3C的双 $\alpha\beta 0$ 数学模型

根据基尔霍夫电压定律及图1中M3C桥臂与

能够更好地保障系统的稳定性。

根据以上分析可知, 鉴于传统电容电压均衡控制策略下的环流控制目标无法适用于比例控制, 难以实现不对称故障下 M3C 电容电压的均衡, 将对整个低频输电系统的安全稳定运行产生影响。因此亟需一种能够实现 M3C 在不对称故障下电容电压均衡的控制策略, 得到能够适用于不对称故障的环

流控制目标, 保障 M3C 在不对称故障下的运行。

3 基于环流控制的电容电压均衡控制策略

3.1 不对称故障下桥臂功率计算

本文所采用低频输电系统结构如图 4 所示, 工频侧为 50 Hz 工频电网, 低频侧为 20 Hz 低频电网, 变压器 M3C 侧为角形接线, 线路侧为 Y 形接线。

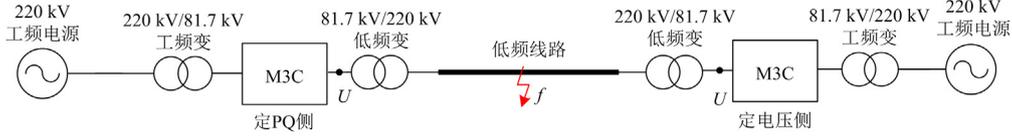


图 4 低频输电系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of low frequency transmission system

本文以低频线路中点发生不对称短路故障为例, 由于 M3C 两侧变压器低频侧均采用角形接线, 因此故障期间 M3C 出口电压电流均不包含零序分量。在低频侧不对称故障情况下, 低频侧电压可表示为

$$\begin{bmatrix} U_u \\ U_v \\ U_w \end{bmatrix} = U_{rd+} \begin{bmatrix} \sin(\omega_2 t) \\ \sin(\omega_2 t - 120^\circ) \\ \sin(\omega_2 t + 120^\circ) \end{bmatrix} + U_{rd-} \begin{bmatrix} \sin(\omega_2 t + \theta) \\ \sin(\omega_2 t + 120^\circ + \theta) \\ \sin(\omega_2 t - 120^\circ + \theta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: U_{rd+} 、 U_{rd-} 分别表示低频侧电压的正负序 d 轴分量; θ 表示正负序分量的夹角。

工频侧电压可表示为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = U_{sd+} \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t) \\ \sin(\omega_1 t - 120^\circ) \\ \sin(\omega_1 t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, U_{sd+} 表示工频侧电压的正序 d 轴分量。

低频侧电流可表示为

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = I_{rd+} \begin{bmatrix} \sin(\omega_2 t) \\ \sin(\omega_2 t - 120^\circ) \\ \sin(\omega_2 t + 120^\circ) \end{bmatrix} + I_{rq+} \begin{bmatrix} \cos(\omega_2 t) \\ \cos(\omega_2 t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_2 t + 120^\circ) \end{bmatrix} + I_{rd-} \begin{bmatrix} \sin(\omega_2 t + \theta) \\ \sin(\omega_2 t + 120^\circ + \theta) \\ \sin(\omega_2 t - 120^\circ + \theta) \end{bmatrix} + I_{rq-} \begin{bmatrix} \cos(\omega_2 t + \theta) \\ \cos(\omega_2 t + 120^\circ + \theta) \\ \cos(\omega_2 t - 120^\circ + \theta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: I_{rd+} 、 I_{rd-} 分别表示低频侧电流的正负序 d 轴分量; I_{rq+} 、 I_{rq-} 分别表示低频侧电流的正负序 q 轴分量。

工频侧电流可表示为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = I_{sd+} \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t) \\ \sin(\omega_1 t - 120^\circ) \\ \sin(\omega_1 t + 120^\circ) \end{bmatrix} + I_{sq+} \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) \\ \cos(\omega_1 t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_1 t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, I_{sd+} 、 I_{sq+} 分别表示工频频侧电流的正序 dq 轴分量。

在不对称故障运行情况下将产生较大的负序电流, 负序电流对于电网运行具有不良影响, 为了避免向电网注入负序电流, 减少不对称故障对电网的影响, 在低频侧(故障侧)添加负序电流抑制控制, 正序控制目标由该侧传统控制产生, 结构如图 3 所示。

低频侧负序控制目标为

$$\begin{cases} I_{rd-}^* = 0 \\ I_{rq-}^* = 0 \end{cases} \quad (15)$$

在对低频侧添加负序抑制后, 低频侧故障电流变为

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = I_{rd+} \begin{bmatrix} \sin(\omega_2 t) \\ \sin(\omega_2 t - 120^\circ) \\ \sin(\omega_2 t + 120^\circ) \end{bmatrix} + I_{rq+} \begin{bmatrix} \cos(\omega_2 t) \\ \cos(\omega_2 t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_2 t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据桥臂有功功率输入输出关系计算得到低频侧发生不对称故障情况下每个桥臂的有功功率, 并提取其中的直流分量如式(17)一式(19)所示。

$$P_{au} = P_{bu} = P_{cu} = \frac{1}{3} [U_{sd+} I_{sd+} - U_{rd+} I_{rd+} - \frac{1}{2} U_{rd-} I_{rd+} \cos \theta - \frac{1}{2} U_{rd-} I_{rq+} \sin \theta] \quad (17)$$

$$P_{av} = P_{bv} = P_{cv} = \frac{1}{3} [U_{sd+} I_{sd+} - U_{rd+} I_{rd+} - \frac{1}{2} U_{rd-} I_{rd+} \cos(\theta + 240^\circ) - \frac{1}{2} U_{rd-} I_{rq+} \sin(\theta + 240^\circ)] \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 P_{aw} = P_{bw} = P_{cw} = & \frac{1}{3} [U_{sd+} I_{sd+} - U_{rd+} I_{rd+} - \\
 & \frac{1}{2} U_{rd-} I_{rd+} \cos(\theta - 240^\circ) - \\
 & \frac{1}{2} U_{rd-} I_{rq+} \sin(\theta - 240^\circ)]
 \end{aligned} \quad (19)$$

由式(17)一(19)分析可知, 相较于三相对称情况, 在不对称情况下桥臂有功功率不仅包含工/低频侧正序电压产生的有功功率直流分量, 也包括由低频侧负序电压所生成的有功功率直流分量。由于正序电压产生的有功功率直流分量满足输入输出平衡, 负序电压生成的有功功率直流分量在低频侧三相子换流器间分布不均衡, 结合式(7)可知有功功率直流分量的不均衡将导致电容电压不均衡问题的出现。

基于等功率变换对桥臂有功功率直流分量进行双 $\alpha\beta 0$ 变换, 可以得到

$$\mathbf{T}_{abc/\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} P_{au} & P_{bu} & P_{cu} \\ P_{av} & P_{bv} & P_{cv} \\ P_{aw} & P_{bw} & P_{cw} \end{bmatrix} \mathbf{T}_{abc/\alpha\beta 0}^T = \begin{bmatrix} P_{\alpha\alpha} & P_{\beta\alpha} & P_{0\alpha} \\ P_{\alpha\beta} & P_{\beta\beta} & P_{0\beta} \\ P_{\alpha 0} & P_{\beta 0} & P_{00} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, $\mathbf{T}_{abc/\alpha\beta 0}$ 为 abc 到 $\alpha\beta 0$ 基于等功率的变换矩阵; $P_{\alpha\alpha}$ 、 $P_{\alpha\beta}$ 、 $P_{\beta\alpha}$ 、 $P_{\beta\beta}$ 表示 M3C 子换流器内桥臂间的功率不平衡分量; $P_{0\alpha}$ 、 $P_{0\beta}$ 、 $P_{\alpha 0}$ 、 $P_{\beta 0}$ 表示 M3C 子换流器间的功率不平衡分量; P_{00} 表示与 M3C 输入/输出总功率有关的功率分量。

$$\begin{bmatrix} P_{0\alpha} \\ P_{0\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta P_{0\alpha} \\ -\Delta P_{0\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{4} (U_{rd-} (I_{rd+} \cos \theta + I_{rq+} \sin \theta)) \\ -\frac{\sqrt{2}}{4} (U_{rd-} (I_{rd+} \sin \theta - I_{rq+} \cos \theta)) \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中, $\Delta P_{0\alpha}$ 、 $\Delta P_{0\beta}$ 表示由不对称故障引起的有功功率不平衡分量。

3.2 基于环流控制的电容电压均衡实现

根据式(21)分析可知, 不对称故障下负序电压在子换流器间引起功率的不均衡, 将导致子换流器间电容电压的不均衡, 进而影响了不对称故障下电容电压均衡的实现。

为了消除子换流器间功率的不均衡, 可通过将 $P_{0\alpha}$ 与 $P_{0\beta}$ 控制为 0 实现。根据双 $\alpha\beta 0$ 变换过程可知 $P_{0\alpha}$ 与 $P_{0\beta}$ 描述低频侧子换流器间的功率不均衡, 根据输入/输出功率平衡关系, 低频侧子换流器有功功率可表示为

$$\begin{bmatrix} P_{Subu} \\ P_{Subv} \\ P_{Subw} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} U_{sd} \begin{bmatrix} i_{sd\alpha} \\ i_{sd\beta} \\ i_{sdw} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_u i_u \\ U_v i_v \\ U_w i_w \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: U_{sd} 为工频侧电压的 d 轴分量; $i_{sd\alpha}$ 为 i_{au} 、 i_{bu} 、 i_{cu} 在工频旋转坐标系下的 d 轴分量; $i_{sd\beta}$ 为 i_{av} 、 i_{bv} 、 i_{cv} 在工频旋转坐标系下的 d 轴分量; i_{sdw} 为 i_{aw} 、 i_{bw} 、 i_{cw} 在工频旋转坐标系下的 d 轴分量。

将式(22)从三相静止坐标系基于等功率转换为两相静止坐标系, 可得:

$$\begin{bmatrix} P_{0\alpha} \\ P_{0\beta} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc/\alpha\beta} \begin{bmatrix} P_{Subu} \\ P_{Subv} \\ P_{Subw} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} U_{sd} \begin{bmatrix} i_{sd\alpha} \\ i_{sd\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta P_{0\alpha} \\ \Delta P_{0\beta} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中, $\mathbf{T}_{abc/\alpha\beta}$ 为 abc 到 $\alpha\beta$ 基于等功率的变换矩阵。

根据式(23)可知, 为实现控制 $P_{0\alpha}$ 与 $P_{0\beta}$ 为 0 的目标, 消除不对称故障所带来的功率不均衡, 可引入基于工频的电流补偿分量, 引入的电流分量补偿值可由式(24)得到。

$$\begin{bmatrix} P_{0\alpha} \\ P_{0\beta} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} U_{sd} \begin{bmatrix} i_{sd\alpha} + \Delta i_{sd\alpha} \\ i_{sd\beta} + \Delta i_{sd\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta P_{0\alpha} \\ \Delta P_{0\beta} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{sd\alpha} \\ \Delta i_{sd\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{U_{sd}} \begin{bmatrix} \Delta P_{0\alpha} \\ \Delta P_{0\beta} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中, $\Delta i_{sd\alpha}$ 、 $\Delta i_{sd\beta}$ 表示引入的电流补偿分量, 为基于工频旋转坐标系的 d 轴分量。

由于 M3C 为两侧对称结构, 可得工频侧不对称故障时所引入的电流补偿分量表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{rd\alpha} \\ \Delta i_{rd\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{U_{rd}} \begin{bmatrix} \Delta P_{\alpha 0} \\ \Delta P_{\beta 0} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中: $\Delta i_{rd\alpha}$ 、 $\Delta i_{rd\beta}$ 表示引入的电流补偿分量, 为基于低频旋转坐标系的 d 轴分量; $\Delta P_{\alpha 0}$ 、 $\Delta P_{\beta 0}$ 表示由工频侧不对称故障引起的有功功率不平衡分量。

根据式(5)可知, 环流仅存在 M3C 内部, 两侧系统中不包含环流分量, 将引入的电流补偿分量转换为环流控制目标, 不仅能够实现电容电压的均衡, 同时能够减少由 M3C 内部控制对两侧系统解耦控制的影响。

为式(25)、式(26)电流补偿分量补充 q 轴分量, $\Delta i_{sq\alpha/\beta} = 0$ 、 $\Delta i_{rq\alpha/\beta} = 0$, 并将其转化为双 $\alpha\beta 0$ 坐标系下的环流控制目标, 转换过程如式(27)一(29)所示。

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha\alpha}^* & i_{s\alpha\beta}^* \\ i_{s\beta\alpha}^* & i_{s\beta\beta}^* \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{dq-s/\alpha\beta} \begin{bmatrix} \Delta i_{sd\alpha} & \Delta i_{sd\beta} \\ \Delta i_{sq\alpha} & \Delta i_{sq\beta} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} i_{r\alpha\alpha}^* & i_{r\alpha\beta}^* \\ i_{r\beta\alpha}^* & i_{r\beta\beta}^* \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{dq_r/\alpha\beta} \begin{bmatrix} \Delta i_{rd\alpha} & \Delta i_{rd\beta} \\ \Delta i_{rq\alpha} & \Delta i_{rq\beta} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\alpha 1}^* & i_{\alpha\beta 1}^* \\ i_{\beta\alpha 1}^* & i_{\beta\beta 1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha\alpha}^* & i_{s\alpha\beta}^* \\ i_{s\beta\alpha}^* & i_{s\beta\beta}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{r\alpha\alpha}^* & i_{r\alpha\beta}^* \\ i_{r\beta\alpha}^* & i_{r\beta\beta}^* \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中： $i_{s\alpha\alpha}^*$ 、 $i_{s\alpha\beta}^*$ 、 $i_{s\beta\alpha}^*$ 、 $i_{s\beta\beta}^*$ 为基于工频的环流控制目标； $\Delta i_{sq\alpha}$ 、 $\Delta i_{sq\beta}$ 表示引入的电流补偿分量，为基于工频旋转坐标系的 q 轴分量； $\Delta i_{rq\alpha}$ 、 $\Delta i_{rq\beta}$ 表示引入的电流补偿分量，为基于低频旋转坐标系的 q 轴分量； $i_{r\alpha\alpha}^*$ 、 $i_{r\alpha\beta}^*$ 、 $i_{r\beta\alpha}^*$ 、 $i_{r\beta\beta}^*$ 为基于低频的环流控制目标； $i_{\alpha\alpha 1}^*$ 、 $i_{\alpha\beta 1}^*$ 、 $i_{\beta\alpha 1}^*$ 、 $i_{\beta\beta 1}^*$ 表示实现子环流器间电容电压均衡的环流控制目标； $\mathbf{T}_{dq_s/\alpha\beta}$ 为基于工频的旋转坐标系到两相静止坐标系变换矩阵； $\mathbf{T}_{dq_r/\alpha\beta}$ 为基于低频的旋转坐标系到两相静止坐标系变换矩阵。

由于电容电压均衡不仅包含子换流器间均衡，同时也包含子换流器内的电容电压均衡，根据上述分析可知，式(29)计算得到的环流控制目标仅包含实现子换流器间电容电压均衡的目标，对式(9)进行调整，得到实现换流器内电容电压均衡的环流控制目标，由式(30)得到。

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\alpha 2}^* & i_{\beta\alpha 2}^* \\ i_{\alpha\beta 2}^* & i_{\beta\beta 2}^* \end{bmatrix} = -k_{p2} \begin{bmatrix} \bar{u}_{c\alpha\alpha} \sin \omega_2 t & \bar{u}_{c\alpha\alpha} \cos \omega_2 t \\ \bar{u}_{c\alpha\beta} \sin \omega_2 t & \bar{u}_{c\alpha\beta} \cos \omega_2 t \\ -\bar{u}_{c\beta\alpha} \cos \omega_2 t & \bar{u}_{c\beta\alpha} \sin \omega_2 t \\ -\bar{u}_{c\beta\beta} \cos \omega_2 t & \bar{u}_{c\beta\beta} \sin \omega_2 t \end{bmatrix} + k_{p2} \begin{bmatrix} -\bar{u}_{c\beta\alpha} \cos \omega_2 t & \bar{u}_{c\beta\alpha} \sin \omega_2 t \\ -\bar{u}_{c\beta\beta} \cos \omega_2 t & \bar{u}_{c\beta\beta} \sin \omega_2 t \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中， $i_{\alpha\alpha 2}^*$ 、 $i_{\alpha\beta 2}^*$ 、 $i_{\beta\alpha 2}^*$ 、 $i_{\beta\beta 2}^*$ 表示实现子环流器内电容电压均衡的环流控制目标。

将式(29)与式(30)相结合得到适用于不对称故障情况下的环流控制目标，如式(31)所示。

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\alpha}^* & i_{\alpha\beta}^* \\ i_{\beta\alpha}^* & i_{\beta\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha\alpha 1}^* & i_{\alpha\beta 1}^* \\ i_{\beta\alpha 1}^* & i_{\beta\beta 1}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha\alpha 2}^* & i_{\alpha\beta 2}^* \\ i_{\beta\alpha 2}^* & i_{\beta\beta 2}^* \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中， $i_{\alpha\alpha}^*$ 、 $i_{\alpha\beta}^*$ 、 $i_{\beta\alpha}^*$ 、 $i_{\beta\beta}^*$ 表示能够实现不对称故障下M3C电容电压均衡的环流控制目标。

综上，可实现低频输电系统不对称故障穿越的M3C电容电压均衡控制策略结构如图5所示。

4 仿真验证

4.1 仿真模型及参数

基于PSCAD/EMTDC仿真系统搭建如图4所示的基于M3C的低频输电系统，工频侧为220 kV的工频电源，低频侧为20 km的依频特性仿真线路

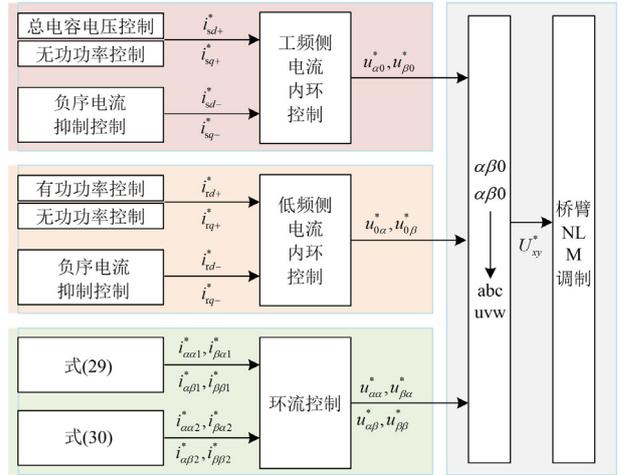


图5 本文M3C控制结构框图

Fig. 5 Block diagram of M3C control structure in this paper

模型。M3C两侧通过变压器连接至线路，可降低M3C接入的电压等级，减少桥臂子模块数量，同时能够保证输电线路电压等级。在低频线路中点处设置不对称故障，故障位置如图4中点 f 所示，在2.5 s时发生故障，故障持续时间为1 s。仿真所用相关参数如表1所示。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
系统传输功率 P/MW	50
工频侧频率 f_s/Hz	50
低频侧频率 f_l/Hz	20
工频侧电压 U_s/kV	220
低频侧电压 U_l/kV	220
桥臂电感 L/mH	15.3
子模块电容 C/mF	8.4
子模块个数 $N/\text{个}$	108
子模块电容电压额定值 V_c/kV	1.6
变压器额定容量/ MVA	330
变压器短路电压/ $\%$	1
变压器变比/ kV	220/81.7
变压器连接组别	Yn/D

4.2 仿真结果及分析

4.2.1 稳态运行仿真结果

图6为在本文控制策略下稳态运行时的仿真波形，图6(a)、图6(b)与图6(c)、图6(d)分别表示工频侧与低频侧三相电压电流，均呈现良好的三相对称正弦形式；图6(e)表示M3C桥臂子模块平均电压，稳态运行时能够保持在额定电压附近的稳定水平；图6(f)表示子换流器间电容电压均衡情况，在稳态运行时未出现子换流器间电容电压不均衡问题。由图6分析可知，在本文所提控制策略下，稳

态情况下 M3C 能够良好地运行, 所提控制策略能够良好地实现稳态运行时 M3C 电容电压的均衡。

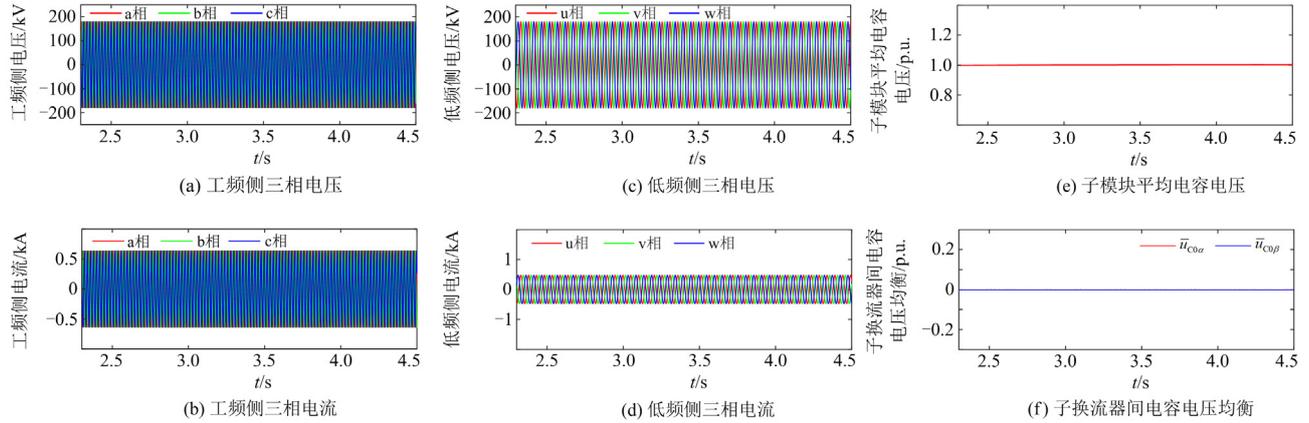


图 6 本文控制策略下稳态运行仿真波形

Fig. 6 Simulated waveforms of steady state operation under the control strategy in this paper

4.2.2 低频侧不对称故障仿真结果

为验证所提控制策略在不对称故障下的控制特性, 附录 A 图 A1 为低频侧 U 相单相接地故障仿真波形图。由图 A1(a)—图 A1(d)分析可知, 在传统控制下, 低频侧 u 相接地导致低频侧非故障相电压存在一定程度的跌落, 故障相电压基本保持为 0; 在故障电流方面, 低频侧电流无法保持三相对称状态, 同时各相电流都有增大, 其中 u 相与 w 相比较稳态电流幅值增大 7~8 倍。低频侧三相电流较传统控制, 在本文控制策略下故障电流幅值有明显下降, 一定程度上减少了故障电流引起的一系列过流问题, 且三相电流基本呈现三相对称状态。

图 A1(e)—图 A1(h)分别表示在传统控制与本文控制策略下子模块平均电容电压与子换流器间电容电压均衡。在传统控制下, 故障期间子模块平均电压无法稳定在额定电压附近, 子模块电容电压出现较大起伏, 同时由于子换流器间不平衡功率的影响, 子换流器间电容电压无法实现均衡。通过引入本文控制策略, 故障期间子模块平均电容电压在经过短暂的暂态过程后稳定在额定电压附近, 子换流器间实现了电容电压均衡。

图 A1(i)—A1(l)为低频侧 dq 轴电流分量的参考值与实际值, 由于不对称故障的影响, d 轴电流分量参考值大幅上升, dq 轴电流均出现较大波动, 无法良好地实现低频侧 dq 轴电流的控制。在本文控制策略下 d 轴分量参考值仅有小幅度上升, dq 轴电流分量均能得到良好的控制, 低频侧控制性能良好。

4.2.3 工频侧不对称故障仿真结果

为进一步验证不同频率侧本文所提控制策略的

控制特性, 附录 A 图 A2 给出了工频侧单相接地故障仿真波形图。由图 A2 分析可知, 故障时工频侧 a 相电压跌落明显, 非故障相电压有一定程度跌落, 故障特征明显。在本文控制策略下, 故障电流幅值得到控制, 下降为传统控制的三分之一。此外, 子模块平均电压上升得到有效抑制, 在故障时能够稳定在额定电压附近运行, 并且故障期间良好地实现了子换流器间电容电压的均衡。相比于传统控制, 本文控制策略下, dq 轴电流分量参考值在故障期间仅存在小幅变化, 工频侧 dq 轴电流得到了有效控制, 工频侧控制性能得到了提升。

5 结论

本文提出一种可实现 M3C 电容电压均衡的低频输电系统不对称故障穿越策略, 结论如下。

1) 通过分析不对称故障对桥臂功率的影响, 计算得到桥臂间功率不平衡分量的表达式, 引入电流补偿分量并转换为环流控制目标, 实现了基于双 $\alpha\beta$ 数学模型不对称故障下 M3C 电容电压的均衡。

2) 所提不对称故障穿越策略基于 M3C 的环流控制, 与工/低频侧控制相互独立, 不影响工/低频侧的解耦控制特性。

3) 在系统稳态运行与不对称故障运行时, 所提策略均能实现 M3C 电容电压的均衡控制, 无需多种控制相互切换。

在实现低频输电系统不对称故障穿越的基础上, 基于 M3C 的低频输电系统故障特征分析及保护新原理是下一步研究的方向。

附录 A

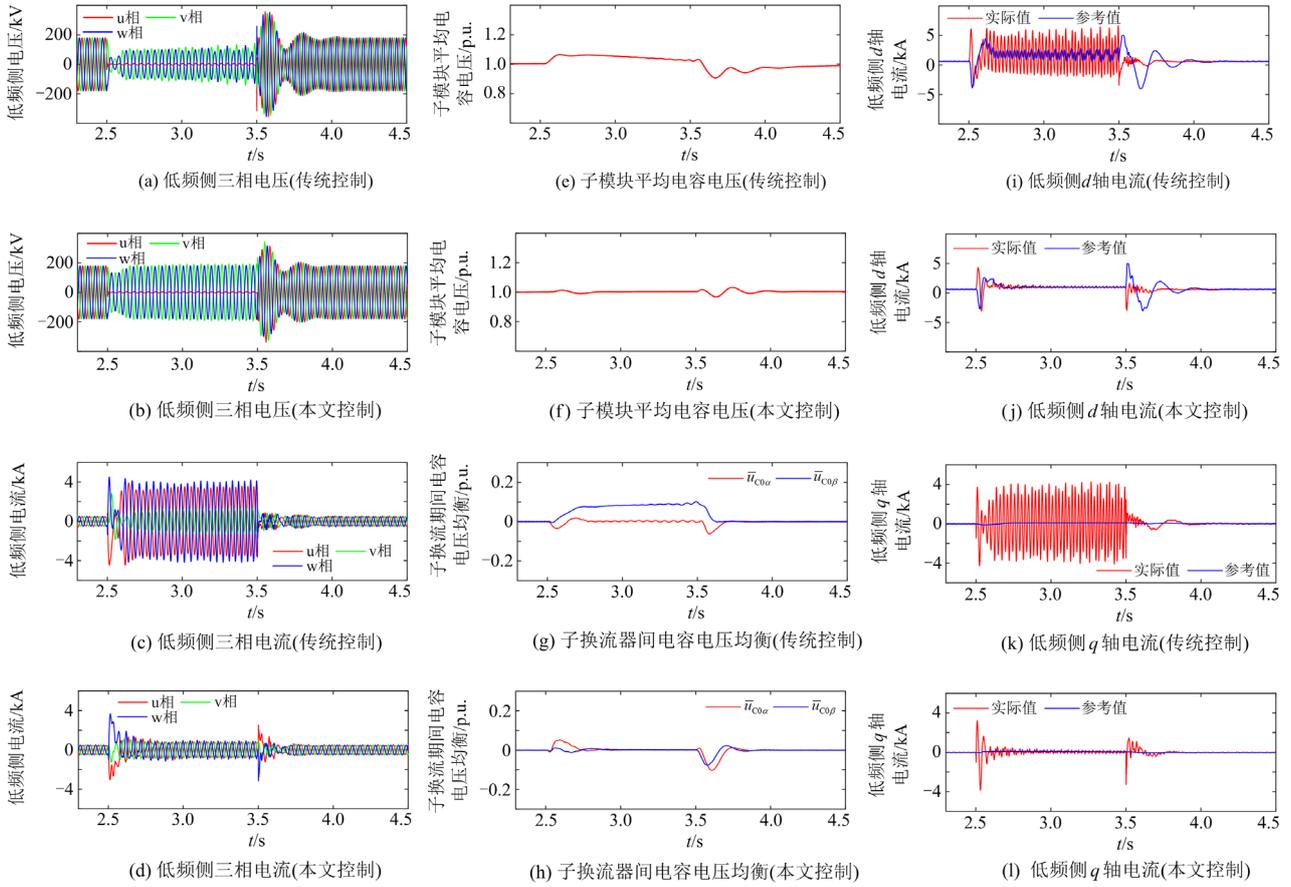
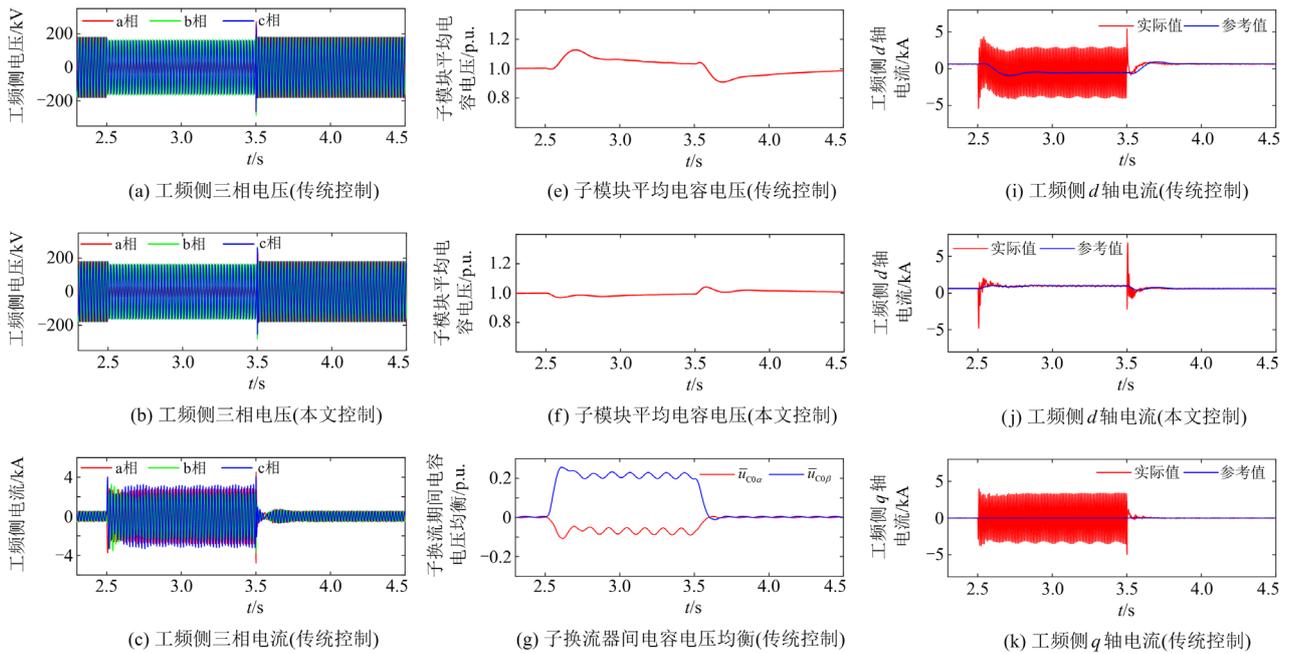


图 A1 低频侧单相接地故障仿真波形

Fig. A1 Simulation waveforms of single-phase ground fault on low frequency side



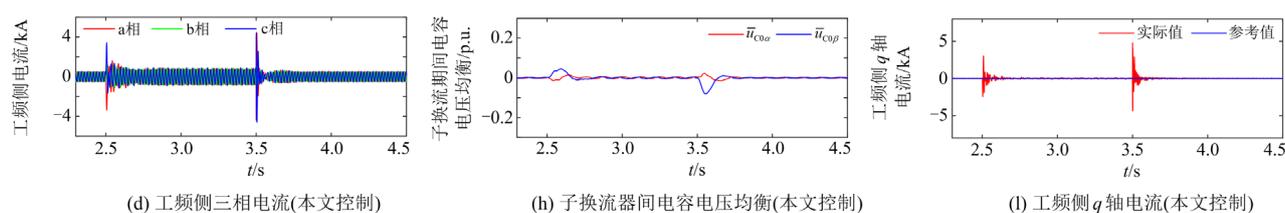


图 A2 工频侧单相接地故障仿真波形

Fig. A2 Simulation waveforms of single-phase ground fault on fundamental frequency side

参考文献

- [1] 孙玉巍, 常静恬, 付超, 等. 分频输电系统模块化多电平矩阵变换器谐波特性分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 21-30, 84.
SUN Yuwei, CHANG Jingtian, FU Chao, et al. Harmonic characteristics analysis of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 21-30, 84.
- [2] 赵国亮, 陈维江, 邓占锋, 等. 柔性低频交流输电关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 1-10.
ZHAO Guoliang, CHEN Weijiang, DENG Zhanfeng, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 1-10.
- [3] YANG Bo, LIU Bingqiang, ZHOU Hongyu, et al. A critical survey of technologies of large offshore wind farm integration: summary, advances, and perspectives[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 233-264.
- [4] CHEN H, JOHNSON M, ALIPRANTIS D. Low-frequency AC transmission for offshore wind power[C] // 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, MD, USA.
- [5] 王秀丽, 赵勃扬, 黄明煌, 等. 大规模深远海风电送出方式比较及集成设计关键技术研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 138-145.
WANG Xiuli, ZHAO Boyang, HUANG Minghuang, et al. Study on key technologies of large-scale and far-reaching sea breeze electrical transmission and integrated design[J]. Global Energy Internet, 2019, 2(2): 138-145.
- [6] 黄明煌, 王秀丽, 刘沈全, 等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 167-174.
HUANG Minghuang, WANG Xiuli, LIU Shenquan, et al. Technical and economic analysis of fractional frequency transmission applied to deep sea breeze electric connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 167-174.
- [7] SEHLOFF D, ROALD L A. Low frequency AC transmission upgrades with optimal frequency selection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1437-1448.
- [8] 张悛宁, 罗易萍, 洪妍妍. 基于多端口混合直流断路器的 LCC-VSC 混合多端直流输电系统故障清除方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 146-153.
ZHANG Yining, LUO Yiping, HONG Yanyan. Multi-port DC circuit breaker-based fault clearing scheme for LCC-VSC hybrid multi-terminal HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 146-153.
- [9] LIU Shenquan, WANG Xifan, NING Lianhui, et al. Integrating offshore wind power via fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1253-1261.
- [10] 陆立文, 吴小丹, 周前, 等. 双端柔性低频输电系统无扰动并网控制策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 31-39.
LU Liwen, WU Xiaodan, ZHOU Qian, et al. Undisturbed grid connection control strategy for two-terminal flexible low-frequency transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 31-39.
- [11] 张昭丞, 郭佳田, 诸浩君, 等. 基于全生命周期成本的海上风电并网方案优选分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 51-57.
ZHANG Zhaocheng, GUO Jitian, ZHU Haojun, et al. Optimization scheme of offshore wind power grid connection based on LCC model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 51-57.
- [12] MA Zhengxiong, NING Lianhui, HAN Jingwen. Research on the control strategy of multi-terminal low frequency transmission system for island power supply scenes[C] // 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC), November 6-9, 2020, Xi'an, China: 616-621.
- [13] 于飞, 王子豪, 刘喜梅. 新型模块化多电平换流器的设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 69-77.
YU Fei, WANG Zihao, LIU Ximei. A gradationally

- controlled modular multilevel converter and its application[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 69-77.
- [14] LIU Shenquan, WANG Xifan, MENG Yongqing, et al. A decoupled control strategy of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 2111-2121.
- [15] JIANKAI M, DAHIDAH M S A, PICKERT V, et al. A hierarchical energy balance control method for M3C based on injecting output frequency circulating currents[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 2424-2435.
- [16] YAN Yinyu, SUN Yichao, TEIXEIRA C, et al. Inter-arm voltage balance control of a modular multilevel matrix converter with injecting dual frequency circulating current[C] // 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020- ECCE Asia), November 29-December 2, Nanjing, China: 2396-2401.
- [17] 吴小丹. 面向低频海上风电送出的模块化多电平矩阵变换器输入输出侧解耦控制[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2909-2923.
- WU Xiaodan. Input/output side decoupling control of modular multilevel matrix converter for low-frequency offshore wind power transmission[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2909-2923.
- [18] YAN Yinyu, SUN Yichao, TEIXEIRA C, et al. Enhanced dynamic voltage balance control of modular multilevel matrix converters with switched circulating current control[C] // 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020- ECCE Asia), November 29-December 2, Nanjing, China: 3391-3396.
- [19] 赵勃扬, 王锡凡, 宁联辉, 等. 低频海上风电系统的不对称故障穿越控制[J]. 中国电机工程学报: 1-12[2023-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220622.1606.005.html>.
- ZHAO Boyang, WANG Xifan, NING Lianhui, et al. Ride-through control of fractional frequency offshore wind power system during unsymmetrical grid faults[J]. Proceedings of the CSEE: 1-12[2023-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220622.1606.005.html>.
- [20] 唐英杰, 张哲任, 徐政. 基于有源型 M3C 矩阵变换器的海上风电低频送出方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 113-122.
- TANG Yingjie, ZHANG Zheren, XU Zheng. Low-frequency transmission scheme for offshore wind power based on active modular multilevel matrix converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 113-122.
- [21] LIU Shenquan, SAEEDIFARD M, WANG Xifan. Analysis and control of the modular multilevel matrix converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1979-1989.
- [22] 张翀. 模块化多电平矩阵换流器在 AC/AC 系统应用中的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- ZHANG Chong. Research on key technology of modular multilevel matrix converter applied in AC/AC system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [23] 蔡永梁, 任成林, 周竞宇, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电电容电压波动抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 45-50.
- CAI Yongliang, REN Chenglin, ZHOU Jingyu, et al. Control strategy for suppressing capacitor voltage ripple of MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 45-50.
- [24] 马文忠, 田洪英, 刘慧玉, 等. 非隔离型模块化多电平 DC/DC 变换器的最小化桥臂环流控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 51-58.
- MA Wenzhong, TIAN Hongying, LIU Huiyu, et al. A minimized AC circulating control strategy for a non-isolated modular multilevel DC/DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 51-58.
- [25] KAWAMURA W, AKAGI H. Control of the modular multilevel cascade converter based on triple-star bridge-cells (MMCC-TSBC) for motor drives[C] // 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 15-20, 2012, Raleigh, NC, USA: 3506-3513.

收稿日期: 2023-04-24; 修回日期: 2023-07-19

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护等; E-mail: zhengtao_sf@126.com

康恒(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为低频输电系统; E-mail: khengwork@163.com

宋伟男(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为低频输电系统。E-mail: ncepu_swn@163.com

(编辑 张颖)