

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190842

网压不平衡下柔直换流端能量平衡研究

刘远¹, 夏向阳¹, 易梅生², 刘小鹏², 石超¹, 黄智¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410014; 2. 特变电工湖南电气有限公司, 湖南 衡阳 421007)

摘要: 基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流输电系统近年来受到广泛的关注。针对电网电压不平衡下 MMC 运行情况进行研究, 提出了一种能量均衡控制策略, 以改善模块化多电平变换器在不平衡网压条件下的换流器内部能量平衡。该策略通过分析桥臂能量与各电气信号耦合关系, 在 $0\partial\beta$ 坐标系下建立桥臂能量数学模型, 前馈补偿的加入提高了 MMC 在交流电网不对称故障和突发电压不平衡情况下的抗干扰能力。通过优化换流器内部电流分量进行桥臂能量平衡控制, 实现网压不平衡下交流侧电流与换流器内部能量协同控制。最后, 通过 Matlab/Simulink 平台搭建了双端 MMC 仿真模型。仿真结果验证了所提出控制策略的有效性。
关键词: 高压柔性直流输电; 模块化多电平换流器; 能量均衡控制; 网压不平衡

Research on energy balance of a flexible and direct converter terminal under unbalanced grid voltage

LIU Yuan¹, XIA Xiangyang¹, YI Meisheng², LIU Xiaopeng², SHI Chao¹, HUANG Zhi¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, China; 2. TEBIAN Hunan Electric Co., Ltd., Hengyang 421007, China)

Abstract: The flexible HVDC transmission system based on a Modular Multilevel Converter (MMC) has attracted a lot of attention in recent years. The operation of an MMC under unbalanced grid voltage is studied, and an energy balance control strategy is proposed to improve the internal energy balance of the MMC under unbalanced grid conditions. By analyzing the coupling relationship between the bridge arm energy and electrical signals, a mathematical model of bridge arm energy is established in a $0\partial\beta$ coordinate system, and the anti-interference ability of the AC network under asymmetric faults and uneven burst voltage is improved by adding feed-forward compensation. The energy balance control of the bridge arm is carried out by optimizing the internal current component of the converter. This realizes coordinated control of AC side current and internal energy of the converter under an unbalanced network voltage. Finally, a two-terminal MMC simulation model is built on the platform of Matlab/Simulink. The simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977014) and Science and Technology Project of Hunan Province (No. 2018KJ151).

Key words: high voltage flexible DC transmission; modular multi-level converter; energy balance control; unbalanced network voltage

0 引言

基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)高压柔性直流输电技术是以电压源换流器为核心的新一代直流输电技术, 是当今世界上电力电子技术应用的制高点^[1], 模块化多电平换

流器能对有功和无功进行独立控制, 具有快速的暂态响应特性, 较好的波形质量、较小的电压变化率及较低的开关频率, 近年来对于该课题的研究引起了学术界较大的关注, 成果较多, 发展前景好, 各国已陆续建成多条基于 MMC 的高压直流输电工程^[2-8]。

交流侧控制策略是 MMC 控制的关键, 直接决定了 MMC 的运行性能, 当电网处于不平衡状态时, 有关 MMC 的控制将更加复杂, 交流侧故障状态下, 负序电流的存在使得三相电流不对称, 当电流幅值

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977014); 湖南省科技计划项目资助(2018KJ151)

波动大时,可能会导致保护误动作,使得系统停运,当情况较严重时,甚至使得换流器烧毁^[9-11],同时交流侧的故障会影响 MMC 各桥臂子模块电容存储的能量分布,加剧 MMC 内部能量的波动,严重危及换流器本身的安全运行,由此,当电网不平衡时,不仅需要 MMC 外部输出特性进行考虑,还需要考虑 MMC 内部能量分布的平衡,维持子模块电压与桥臂电流波动的稳定性,避免故障时幅值过大影响换流器与本地供电的可靠性^[12-16]。文献[17]提出基于桥臂电流控制的 MMC 交流侧故障穿越方法,根据功率守恒原理,分析了故障情况下换流器内部功率分布,通过调整直流母线功率在 MMC 三相桥臂间的分布,实现交流侧电源电流的对称,仅由交流侧三相电压和直流侧母线上电压的比值来调节,但没有相应定量的分析,且未从换流器内部能量均衡的角度考虑故障下 MMC 的控制,文献[18-19]对换流器故障过程各桥臂子模块总能量变化规律进行分析,提出基于能量平衡的换流器控制策略,能够实现换流器正常及故障工况下的安全稳定控制,但其所提控制结构实现比较复杂。

基于上述分析,本文提出了一种能量均衡控制策略,通过相间能量与上下桥臂能量平衡控制实现对换流器内部环流的优化控制,由总能量平衡控制保证了交直流侧功率传输的动态平衡,有效实现 MMC 内外部能量的协调控制,最后通过在 Matlab 上进行了实验仿真,验证了本文所提控制策略的优越性。

1 MMC 拓扑结构及数学模型

图 1 为 MMC 的拓扑结构,由三相组成,每相有上下两个桥臂,每个桥臂有 N 个子模块同时串联一个电抗器 $L_0 + R_0$, 换流器上下桥臂端口电压为 v_u^k 、 v_l^k , 换流器上下桥臂电流为 i_u^k 、 i_l^k , v_g^k 、 i_g^k 代表交流侧电压和电流, V_{DC} 、 V_u^{DC} 、 V_l^{DC} 为高压直流侧电压及上下极电压,其中, $k=a, b, c$, 可在 $0\partial\beta$ 坐标系下得到如下所示电流关系表达式^[20]。

$$(L_s + \frac{1}{2}L_0) \frac{di_g^{\partial\beta}}{dt} = -(R_s + R_0) i_g^{\partial\beta} + v_g^{\partial\beta} - v_{dif}^{\partial\beta} \quad (1)$$

$$L_0 \frac{di_{cir}^{\partial\beta}}{dt} = -R_0 i_{cir}^{\partial\beta} + v_{sum}^{\partial\beta} \quad (2)$$

$$\frac{2}{3}L_0 \frac{di_{dc}}{dt} = -\frac{2}{3}R_0 i_{dc} + \sqrt{2}v_{sum}^0 - V_{DC} \quad (3)$$

式中: L_0 、 R_0 为桥臂电感电阻; 其中 $i_g^{\partial\beta}$ 即为 i_g^{∂} 、 i_g^{β} 表示的交流侧电流; $i_{cir}^{\partial\beta}$ 即为 i_{cir}^{∂} 、 i_{cir}^{β} 表示的换流器相

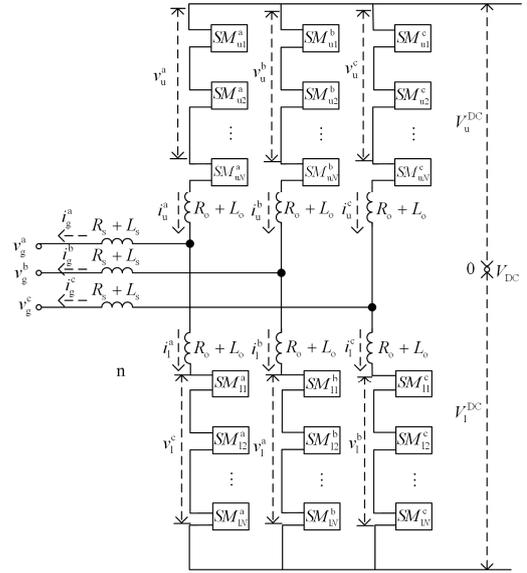


图 1 MMC 结构示意图

Fig. 1 Structure of MMC

间环流; V_{DC} 为直流侧电压,同时可得上下桥臂电流与电压之间的物理关系,桥臂电流表达式为

$$\begin{cases} i_u^k = 0.5i_g^k + i_{k_add} \\ i_l^k = -0.5i_g^k + i_{k_add} \end{cases} \quad (4)$$

$$i_{k_add} = i_{dc}^k + i_{cir}^k \quad (5)$$

式中: i_{k_add} 为换流器的 k 相环流; i_{dc}^k 为 k 相直流母线电流分量; i_{cir}^k 为 k 相交流环流分量,同时定义

$$v_{sum} = \frac{v_u + v_l}{2}, v_{dif} = \frac{v_l - v_u}{2} \quad (6)$$

式中: v_{sum} 、 v_{dif} 分别为上下桥臂电压的共模分量和差模分量。

2 交流侧电压不平衡条件下机理分析

在交流侧电压不平衡条件下,如式(7)所示,忽略 MMC 器件损耗,交流侧三相有功功率 P_{k_g} 与换流器三相桥臂输出到直流侧的有功功率 P_{k_dc} 相等,由于交流侧三相电压 v_g^k 发生不平衡,交流侧三相电流 i_g^k 也必然不平衡,其关系如下。

$$P_{k_g} = P_{k_dc} = \frac{1}{T} \int_0^T v_g^k i_g^k dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_{DC} i_{k_dc} dt \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{k_g} = P_{k_dc} \\ v_g^a \neq v_g^b \neq v_g^c \Rightarrow i_g^a \neq i_g^b \neq i_g^c \end{cases} \quad (8)$$

若控制交流侧三相电流 i_g^k 对称,由于三相电压 v_g^k 不对称,则换流器三相桥臂由交流侧吸收的有功

功率 P_{k_g} 将会不对等, 从而存在如下关系。

$$P_{a_g} \neq P_{b_g} \neq P_{c_g} \quad (9)$$

由式(7)、式(9)可知, 需调节 MMC 输出到直流母线电流分量 i_{dc}^k 在三相桥臂的分布, 以维持换流器三相间能量的平衡, 同时针对 MMC 上下桥臂能量平衡, 可通过对 MMC 上下桥臂环流交流分量 i_{cir}^k 的调节实现这一目标^[18-19]。

根据三相电压和电流可求得 MMC 每相功率, 以 a 相为例:

$$v^a = V^+ \sin(\omega t + \theta^+) + V^- \sin(-\omega t + \varphi^-) + v_{dc} \quad (10)$$

$$i^a = i^+ \sin(\omega t + \theta^+) + i^- \sin(-\omega t + \varphi^-) + i_{dc} \quad (11)$$

上式为不平衡电压下 a 相电压、电流的表达式, 其中 v_{dc} 、 i_{dc} 为桥臂中相应直流分量, 由此可得 $p_a = v_a i_a$, 展开如式(12)所示, 前五项为直流功率项, 它们的平均值非 0, 由于电压及电流负序分量的出现, 会使得桥臂能量平均值存在较大波动, 在电流控制器的设计及桥臂能量平衡控制中必须考虑这些负序分量, 式(12)中后八项为交流功率项, 将在桥臂能量中引入基频及二倍频纹波, 这两者都不会对桥臂能量的平均值造成影响。

$$\begin{aligned} 2 \frac{dE^a}{dt} = 2P^a = & 2v_{dc} i_{dc} + V^+ I^+ \cos(\varphi^+ - \theta^+) + \\ & V^- I^- \cos(\varphi^- - \theta^-) - V^- I^+ \cos(\varphi^+ + \theta^-) - \\ & V^+ I^- \cos(\varphi^- + \theta^+) + V^- I^+ \cos(2\omega t + \varphi^+ - \theta^-) + \\ & V^+ I^- \cos(-2\omega t + \varphi^- - \theta^+) + V^+ I^+ \cos(2\omega t + \varphi^+ + \theta^+) - \\ & V^- I^- \cos(-2\omega t + \varphi^- + \theta^-) + 2v_{dc} I^+ \sin(\omega t + \varphi^+) + \\ & 2V^+ i_{dc} \sin(\omega t + \theta^+) + 2V^- i_{dc} \sin(-\omega t + \theta^-) + \\ & 2v_{dc} I^- \sin(-\omega t + \varphi^-) \end{aligned} \quad (12)$$

需要指出的是, 本文所述的能量平衡是一种相对的平衡, 指的是上下桥臂间及相单元间或者交直流系统间功率差的稳定不变, 而不是能量数值上的绝对相等。

3 MMC 能量均衡控制

3.1 相间能量平衡控制

对换流器内部能量流动规律进行分析可知, 上下桥臂功率可以表示为

$$P_u^k = v_u^k i_u^k \quad (13)$$

$$P_l^k = v_l^k i_l^k \quad (14)$$

忽略 MMC 换流器内部损耗可得

$$\frac{dE_u^k}{dt} = P_u^k = (v_{sum}^k - v_{dif}^k) \left(\frac{i_{dc}^k}{3} + \frac{i_g^k}{2} + i_{cir}^k \right) \quad (15)$$

$$\frac{dE_n^k}{dt} = P_n^k = (v_{sum}^k - v_{dif}^k) \left(\frac{i_{dc}^k}{3} + \frac{i_g^k}{2} + i_{cir}^k \right) \quad (16)$$

$\frac{dE_u^k}{dt}$ 、 $\frac{dE_n^k}{dt}$ 为桥臂能量对时间的导数, 为了实现桥臂各相能量的平衡控制, 由式(15)、式(16)可得桥臂能量之和为

$$E_{sum}^k = E_u^k + E_l^k \quad (17)$$

$$\frac{dE_{sum}^{abc}}{dt} = \frac{2}{3} v_{sum}^{abc} i_{dc} - v_{dif}^{abc} \circ i_g^{abc} + 2v_{sum}^{abc} \circ i_{cir}^{abc} \quad (18)$$

式(18)中, “ \circ ” 表示每一项中单个元素相乘, 将式(18)转换到 $0\delta\beta$ 坐标系下, 按式(12)所示展开可得

$$\frac{dE_{sum}^0}{dt} = \frac{2\sqrt{2}}{3} v_{sum}^{abc} i_{dc} - \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dif}^+ I_g^+ \cos(\varphi_g^+ - \theta_{dif}^+) - \quad (19)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} V_{dif}^- I_g^- \cos(\varphi_g^- - \theta_{dif}^-)$$

$$\frac{dE_{sum}^\beta}{dt} = 2v_{sum}^{dc} i_{cir}^{\beta dc} + \frac{1}{2} V_{dif}^+ I_g^- \cos(\varphi_g^- + \theta_{dif}^+) + \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} V_{dif}^- I_g^+ \cos(\varphi_g^+ + \theta_{dif}^-)$$

$$\frac{dE_{sum}^\beta}{dt} = 2v_{sum}^{dc} i_{cir}^{\beta dc} + \frac{1}{2} V_{dif}^+ I_g^- \cos(\varphi_g^- + \theta_{dif}^+) + \quad (21)$$

$$\frac{1}{2} V_{dif}^- I_g^+ \sin(\varphi_g^+ + \theta_{dif}^-)$$

相间能量平衡表现为能量周期内直流功率项的相对稳定, 因而上式中仅包含有直流功率项, 为了获得在 $0\delta\beta$ 坐标系下换流器内部电流参考值, 得到电压和电流信号在不同坐标系下的转换关系为

$$x^\pm = X^\pm e^{j(\pm\omega t + \varphi^\pm)} = x^{\beta\pm} + jx^{\delta\pm} \quad (22)$$

由此可求得

$$v_{dif}^{\delta\pm} = V_{dif}^\pm \sin(\pm\omega t + \theta_{dif}^\pm) \quad (23)$$

$$v_{dif}^{\beta\pm} = V_{dif}^\pm \cos(\pm\omega t + \theta_{dif}^\pm) \quad (24)$$

$$i_g^{\delta\pm} = I_g^\pm \sin(\pm\omega t + \varphi_g^\pm) \quad (25)$$

$$i_g^{\beta\pm} = I_g^\pm \cos(\pm\omega t + \varphi_g^\pm) \quad (26)$$

将式(23)一式(26)代入式(19)一式(21), 经过代数变换可得

$$\frac{dE_{sum}^0}{dt} = \frac{2\sqrt{2}}{3} v_{sum}^{dc} i_{dc} - \frac{1}{\sqrt{2}} (v_{dif}^{\delta+} i_g^{\delta+} + v_{dif}^{\beta+} i_g^{\beta+}) - \quad (27)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (v_{dif}^{\delta-} i_g^{\delta-} + v_{dif}^{\beta-} i_g^{\beta-}) = u_{sum}^0$$

$$\frac{dE_{sum}^\delta}{dt} = 2v_{sum}^{dc} i_{cir}^{\delta dc} + \frac{1}{2} (v_{dif}^{\delta-} i_g^{\delta+} + v_{dif}^{\delta+} i_g^{\delta-}) + \quad (28)$$

$$\frac{1}{2} (v_{dif}^{\beta-} i_g^{\beta+} + v_{dif}^{\beta+} i_g^{\beta-}) = u_{sum}^\delta$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{\text{sum}}^{\beta}}{dt} &= 2v_{\text{sum}}^{\text{dc}} i_{\text{cir}}^{\beta\text{dc}} + \frac{1}{2}(v_{\text{dif}}^{\partial+} i_{\text{g}}^{\beta-} + v_{\text{dif}}^{\beta+} i_{\text{g}}^{\partial-}) + \\ &\frac{1}{2}(v_{\text{dif}}^{\partial-} i_{\text{g}}^{\beta+} + v_{\text{dif}}^{\beta-} i_{\text{g}}^{\partial+}) = u_{\text{sum}}^{\beta} \end{aligned} \quad (29)$$

由式(27)、式(28)可知,表明了上下桥臂子模块存储能量之和中直流功率项的动态特性,因为存在有交流正、负序电压和电流,对其动态特性造成扰动,有必要在相间能量平衡控制设计中,对扰动量进行前馈补偿,为实现相间能量的平衡控制,需对桥臂环流直流分量 $i_{\text{cir}}^{\partial\text{dc}}$ 、 $i_{\text{cir}}^{\beta\text{dc}}$ 进行控制,其中,各能量变量之间的关系为

$$E_{\text{u}}^k = 0.5 \frac{C_{\text{m}}}{N} (v_{\text{ku_cap}})^2 \quad (30)$$

$$E_{\text{l}}^k = 0.5 \frac{C_{\text{m}}}{N} (v_{\text{kl_cap}})^2 \quad (31)$$

式中: E_{u}^k 、 E_{l}^k 分别为换流器 k 相上桥臂和下桥臂的能量; $v_{\text{ku_cap}}$ 、 $v_{\text{kl_cap}}$ 为各相上桥臂和下桥臂子模块电容电压和; C_{m} 、 N 为子模块电容和换流器各桥臂子模块数量。换流器内部桥臂能量共模分量及差模分量,可分别由式(32)和式(33)表示。

$$E_{\text{sum}}^{\text{abc}} = \sum E_{\text{u}}^{\text{abc}} + \sum E_{\text{l}}^{\text{abc}} \quad (32)$$

$$E_{\text{dif}}^{\text{abc}} = \sum E_{\text{u}}^{\text{abc}} - \sum E_{\text{l}}^{\text{abc}} \quad (33)$$

分别将式(32)、式(33)进行坐标变换可得 $E_{\text{sum}}^{0\partial\beta}$ 、 $E_{\text{dif}}^{0\partial\beta}$, 如图2所示为相间能量平衡控制框图,通过定义辅助控制输入量 u_{sum}^0 、 $u_{\text{sum}}^{\partial}$ 和 u_{sum}^{β} , 桥臂能量中将包含交流电流的项当作扰动,用前馈方式进行补偿,设计了基于PI控制的反馈控制回路,用于实现对于MMC相间能量平衡的控制。将注入交流侧电网负序电流 $i_{\text{g}}^{\partial-}$ 、 $i_{\text{g}}^{\beta-}$ 设置为0,辅助控制输入量 $u_{\text{sum}}^{\partial}$ 、 u_{sum}^{β} 由能量反馈控制回路测量得到,可以求得桥臂电流环流直流分量的参考值为

$$i_{\text{cir}}^{\partial\text{dc_ref}} = \frac{2u_{\text{sum}}^{\partial} + v_{\text{dif}}^{\partial-} i_{\text{g}}^{\partial-} - v_{\text{dif}}^{\beta-} i_{\text{g}}^{\beta+}}{4v_{\text{sum}}^{\text{dc}}} \quad (34)$$

$$i_{\text{cir}}^{\beta\text{dc_ref}} = \frac{2u_{\text{sum}}^{\beta} - v_{\text{dif}}^{\partial-} i_{\text{g}}^{\beta-} - v_{\text{dif}}^{\beta-} i_{\text{g}}^{\partial+}}{4v_{\text{sum}}^{\text{dc}}} \quad (35)$$

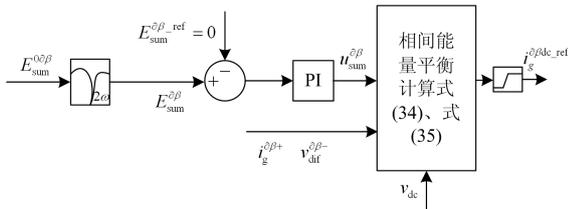


图2 相间能量平衡控制框图

Fig. 2 Block diagram of interphase energy balance control

3.2 上下桥臂能量平衡控制

为了实现上下桥臂间能量平衡控制,由式(15)、式(16)可得桥臂能量之差为

$$E_{\text{dif}}^k = E_{\text{u}}^k - E_{\text{l}}^k \quad (36)$$

$$\frac{dE_{\text{dif}}^{\text{abc}}}{dt} = \frac{2}{3} v_{\text{difm}}^{\text{abc}} i_{\text{dc}} - v_{\text{sum}}^{\text{abc}} \circ i_{\text{g}}^{\text{abc}} + 2v_{\text{dif}}^{\text{abc}} \circ i_{\text{cir}}^{\text{abc}} \quad (37)$$

同理,将式(37)转换到 $0\partial\beta$ 坐标系下,按式(12)所示展开可得

$$\frac{dE_{\text{dif}}^0}{dt} = -\sqrt{2}(v_{\text{dif}}^{\partial-} i_{\text{cir}}^{\partial-} + v_{\text{dif}}^{\beta-} i_{\text{cir}}^{\beta-}) + (v_{\text{dif}}^{\partial+} i_{\text{cir}}^{\partial+} + v_{\text{dif}}^{\beta+} i_{\text{cir}}^{\beta+}) = u_{\text{dif}}^0 \quad (38)$$

$$\frac{dE_{\text{dif}}^{\partial}}{dt} = v_{\text{dif}}^{\beta-} i_{\text{cir}}^{\beta+} + v_{\text{dif}}^{\partial-} i_{\text{cir}}^{\partial+} - v_{\text{dif}}^{\partial+} i_{\text{cir}}^{\partial-} + v_{\text{dif}}^{\beta+} i_{\text{cir}}^{\beta-} = u_{\text{dif}}^{\partial} \quad (39)$$

$$\frac{dE_{\text{dif}}^{\beta}}{dt} = v_{\text{dif}}^{\partial-} i_{\text{cir}}^{\beta+} + v_{\text{dif}}^{\beta-} i_{\text{cir}}^{\partial+} + v_{\text{dif}}^{\partial+} i_{\text{cir}}^{\beta-} + v_{\text{dif}}^{\beta+} i_{\text{cir}}^{\partial-} = u_{\text{dif}}^{\beta} \quad (40)$$

由上式可知,同样表明了上下桥臂子模块存储能量之差中直流功率项的动态特性,交流正、负序电压的存在,对这一动态特性产生扰动,因而在上下桥臂能量平衡控制设计中,需由式(38)一式(40)对扰动量进行前馈补偿。上下桥臂能量平衡可通过调节馈入同相上下桥臂的环流 $i_{\text{cir}}^{\partial+}$ 、 $i_{\text{cir}}^{\beta+}$ 、 $i_{\text{cir}}^{\partial-}$ 、 $i_{\text{cir}}^{\beta-}$ 分布来实现。如图3所示为上下桥臂能量平衡控制框图,同样的,定义辅助输入控制量 u_{dif}^0 、 $u_{\text{dif}}^{\partial}$ 、 u_{dif}^{β} 分别对桥臂能量 E_{dif}^0 、 $E_{\text{dif}}^{\partial}$ 、 E_{dif}^{β} 中的直流功率项进行动态补偿,其中, u_{dif}^0 、 $u_{\text{dif}}^{\partial}$ 、 u_{dif}^{β} 由反馈控制回路得到,设计了基于PI控制的反馈控制回路,实现上下桥臂能量平衡,由式(38)一式(40)可得到其环流交流分量正负序参考值如式(41)。

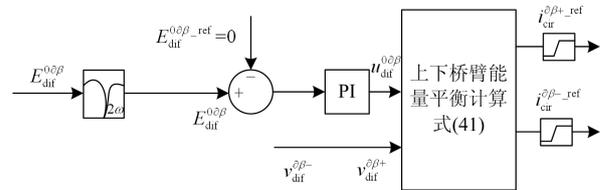


图3 上下桥臂能量平衡控制框图

Fig. 3 Energy balance control block diagram of upper and lower bridge arms

$$\begin{bmatrix} i_{\text{cir}}^{\partial+_ref} \\ i_{\text{cir}}^{\beta+_ref} \\ i_{\text{cir}}^{\partial-_ref} \\ i_{\text{cir}}^{\beta-_ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_{\text{dif}}^{\partial+} & -v_{\text{dif}}^{\beta+} & -v_{\text{dif}}^{\partial-} & -v_{\text{dif}}^{\beta-} \\ -v_{\text{dif}}^{\partial-} & v_{\text{dif}}^{\beta-} & -v_{\text{dif}}^{\partial+} & v_{\text{dif}}^{\beta+} \\ v_{\text{dif}}^{\beta-} & v_{\text{dif}}^{\partial-} & v_{\text{dif}}^{\beta+} & v_{\text{dif}}^{\partial+} \\ v_{\text{dif}}^{\beta+} & v_{\text{dif}}^{\partial+} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{\text{dif}}^0 \\ \sqrt{2} u_{\text{dif}}^{\partial} \\ u_{\text{dif}}^{\beta} \\ u_{\text{dif}}^{\beta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

3.3 定直流交流电压控制

定直流交流电压控制确定交流电网三相电流参考值 $I_{g_ref}^k$, 为消除直流电压控制回路和交流电压控制回路中的稳态误差, 通过负反馈 PI 调节环节实现对于电压的控制。

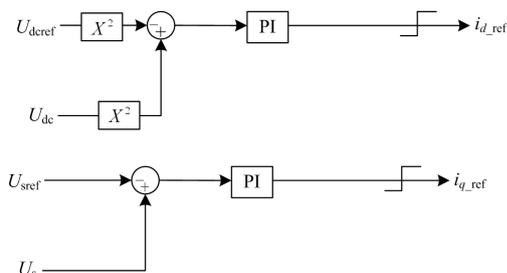


图 4 直流交流电压控制

Fig. 4 Active and reactive power control loop

为防止电流越限, 在控制回路末端增加了限幅环节, 限幅值随运行工况变化而变化, 最后, 交流电网电流 dq 轴分量参考值 i_{d_ref} 、 i_{q_ref} 经变换可得到电流 $i_g^{\beta+}$ 及三相电流参考 $i_{g_ref}^k$ 。

3.4 桥臂环流控制

由前文分析可知, 桥臂环流包含用于上下桥臂能量平衡控制的基频分量, 用于相间能量平衡控制的直流分量, 在不平衡网压下环流中直流分量不再平均分配于三相桥臂中, 各相桥臂中会存在 2 倍频的正负序分量, 这一分量不会直接进入直流母线中, 却会使得桥臂上损耗增加, 而环流中由于 2 倍频零序分量的存在, 流入直流母线中后会造成直流母线的波动^[21]。

本文提出的环流抑制策略, 能有效消除环流中的 2 倍频分量, 与网侧交流电流控制相类似, 采用的是 PR 调节器^[22-23], 将谐振频率设置为 $2\omega_0$, 环流的参考值则由前文的能量平衡控制计算得到, 如式(42)所示。

$$i_{k_add_ref} = i_{cir}^{\beta+} = i_{cir}^{\beta+}{}_{ref} + i_{cir}^{\beta-}{}_{ref} + i_{cir}^{\beta dc}{}_{ref} \quad (42)$$

如图 5 所示为桥臂环流控制框图, 所提控制策略能够实现无静差地跟踪补偿二次谐波内部环流, 有效抑制了环流中的 2 倍频正序、负序及零序分量, 且控制策略结构简单、控制目标精准。

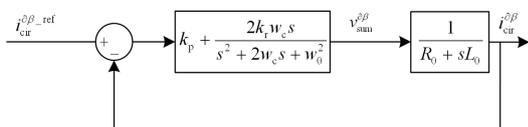


图 5 桥臂环流控制框图

Fig. 5 Block diagram of bridge arm circulation control

3.5 总能量平衡控制

总能量平衡控制体现了交流侧与直流侧功率的平衡, 由式(27)可知, E_{sum}^0 和子模块存储总能量成比例关系, 总的能量平衡可通过直流侧功率进行调节, 对于有功功率控制站可调节直流侧电流大小实现总能量平衡控制, 总能量参考值 E_{sum_ref} 则设为额定值(设置 $\pm 10\%$ 的误差), 如式(17)所示。

$$E_{sum_ref} = 6 \times 0.5 \frac{C_m}{N} (Nv_m)^2 \quad (43)$$

式中, v_m 为子模块的额定工作电压。

如图 6 所示为总能量平衡控制框图, 总能量平衡控制器为双环结构, 外环为总能量控制, 当交流侧发生故障, MMC 与交流侧交换总有功率值发生改变, 外环控制 MMC 总能量追踪其参考值, 对 MMC 与直流侧功率交换进行调节, 内环为直流电压控制环, 经 PI 调节后生成直流电压 v_{sum}^0 , 将该电压信号叠加用于生成子模块脉冲调制波。

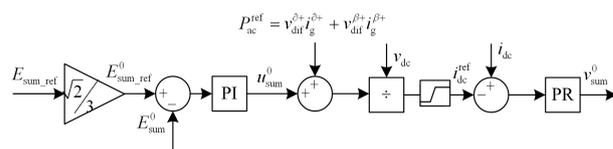


图 6 总能量控制框图

Fig. 6 Total energy control block diagram

如图 7 所示为本文所提控制策略框图, 本文采用定直流交流电压的控制策略得到电流参考信号 $i_g^{\beta+}$ 和 $i_{g_ref}^k$, 为实现 MMC 换流器内部相间及上下桥臂间能量平衡, 设计了相应能量平衡控制器, 调节换流器内部能量流动, 得到控制变量 $i_{k_add_ref}$, 总能量平衡控制的设计体现了交流侧与直流侧功率的平衡, 确保了直流侧传输功率的稳定, 最后分别通过相应内环控制策略求得桥臂电压参考。

$$v_u^k{}_{ref} = v_{sum}^k{}_{ref} + v_{dif}^k{}_{ref} \quad (44)$$

$$v_l^k{}_{ref} = v_{sum}^k{}_{ref} - v_{dif}^k{}_{ref} \quad (45)$$

4 实验与仿真

为了验证本文所提的能量均衡控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建了 51 电平双端 MMC-HVDC 仿真模型, 子模块采用半桥型拓扑, 模型结构如图 8 所示, 系统的相关参数如表 1 所示。

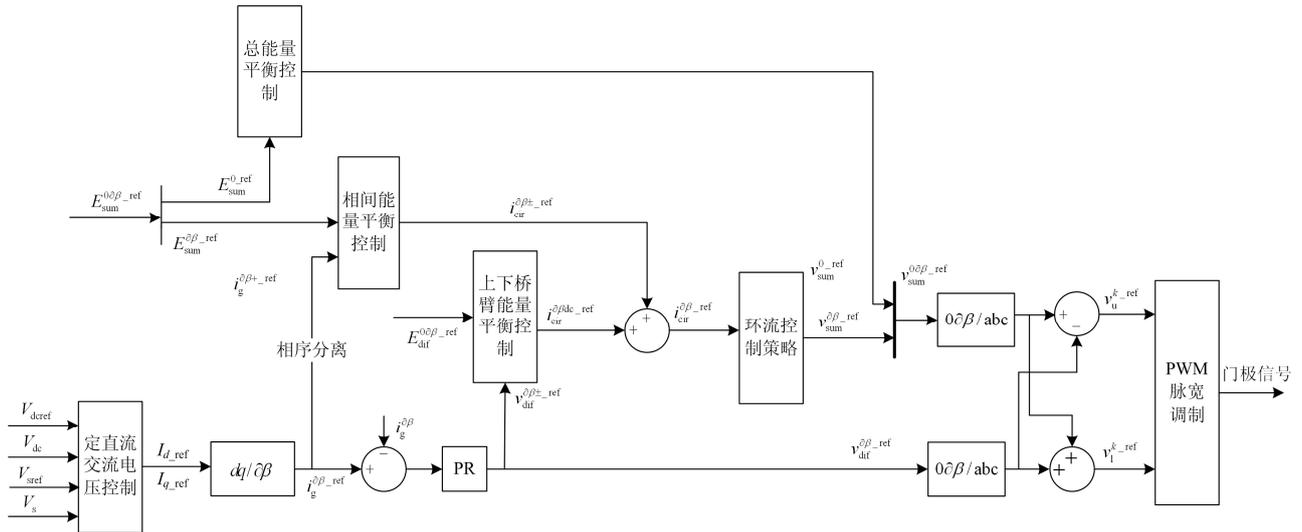


图 7 MMC 整体控制框架

Fig. 7 MMC overall control framework

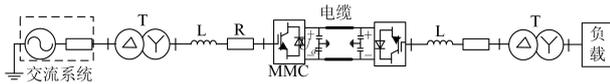


图 8 双端 MMC-HVDC 系统仿真模型结构图

Fig. 8 Structure of MMC-HVDC system simulation model

表 1 仿真平台主要参数

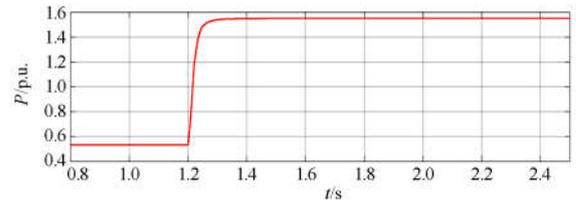
Table 1 Parameters of simulation platform system

名称	数值
交流系统额定电压	400 kV
交流系统电感	72.8 mH
系统额定频率	50 Hz
系统额定有功功率	220 MW
整流端变压器额定电压	400 kV/66 kV(Yg/Y)
整流端变压器额定功率	220 MVA
变压器漏抗	5%
逆变端变压器额定电压	66 kV/18 kV(Yg/Y)
整流端变压器额定功率	220 MVA
桥臂阻抗	0.03 Ω+0.15 H
系统电抗	0.015 H
系统电阻	0.1 Ω
稳态直流电压	135 kV
子模块额定电容	10.48 mF
子模块额定电容电压	2.7 kV

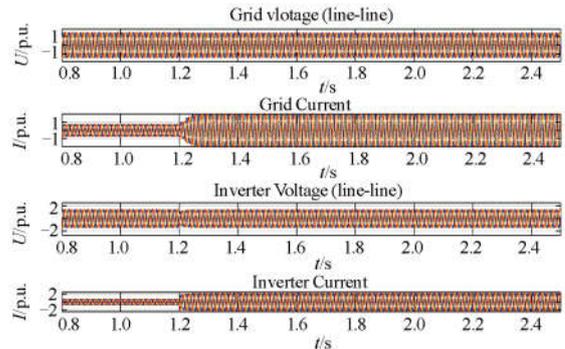
4.1 交流侧三相电压对称时的仿真结果

双端 MMC-HVDC 系统整流端采用定直流交流电压控制，逆变端采用定有功无功控制，逆变端功率直接输送给相应负载，1.2 s 时，增加 220 MW 有功负载投入，无功负载不变，系统有功阶跃如图 9 所示，可看出 1.2 s 时，有功发生阶跃，整流端与

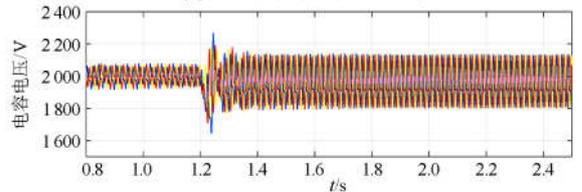
逆变端电压电流皆能保持稳定运行状态，三相上桥臂电容电压发生轻微波动，但很快恢复稳定。



(a) 系统传输有功功率



(b) 整流端与逆变端电压电流波形



(c) 三相上桥臂电容电压

图 9 有功阶跃时系统仿真结果

Fig. 9 System simulation results in active power step

保持直流电压稳定，1.2 s 时，增加 200 MW 无功负载投入，有功负载不变，系统无功阶跃如图 10 所示，1.2 s 时无功发生阶跃，整流端与逆变端电压

电流保持稳定运行状态, 三相上桥臂电容电压基本保持处于平衡状态。

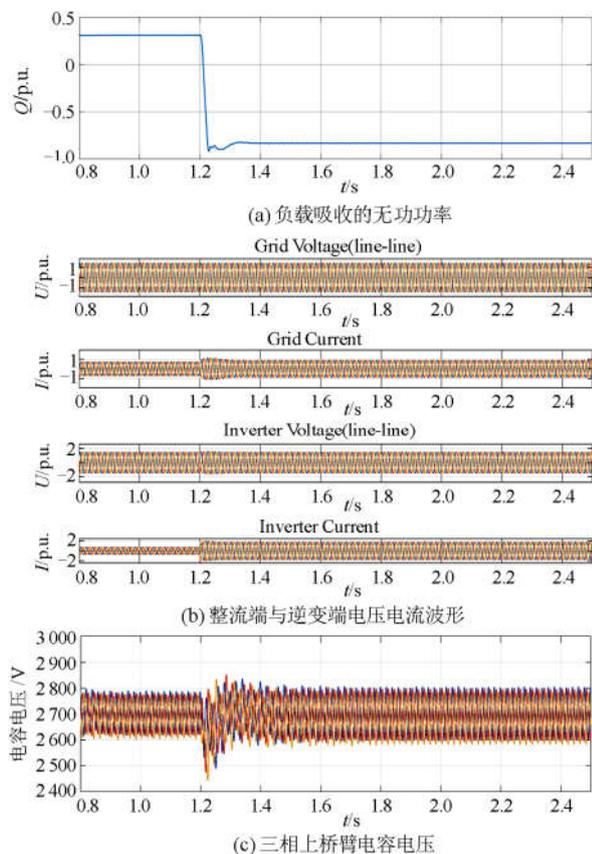


图 10 无功阶跃时系统仿真结果

Fig. 10 System simulation results in inactive power step

4.2 交流侧电压不对称时的仿真结果

为了验证本文所提出 MMC-HVDC 交流侧故障下能量均衡控制策略的优越性, 其系统故障仿真模型结构见图 11。在 MMC 交流侧电网故障下进行了实验仿真分析, $t=1.4\text{ s}$ 时, 在电网侧变压器高压侧设置故障, 使得交流侧两相电压跌落, 故障时间持续 0.4 s , 网侧电压波形如图 12(a)所示。

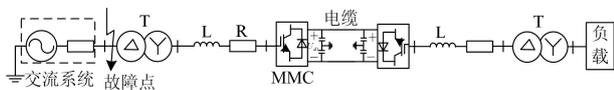
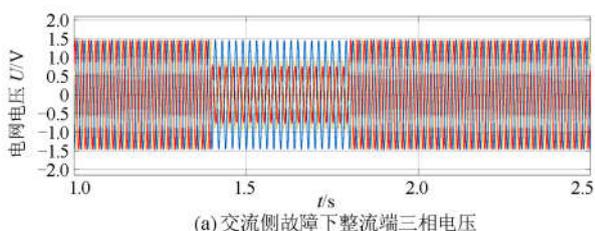


图 11 MMC-HVDC 系统故障仿真模型结构图

Fig. 11 Structure of MMC-HVDC system fault simulation model



(a) 交流侧故障下整流端三相电压

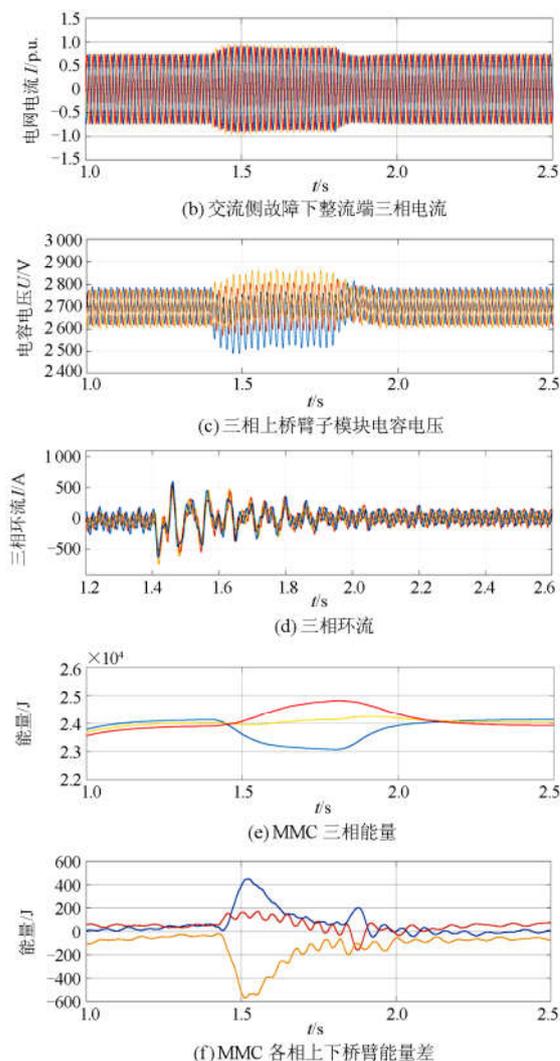


图 12 仿真结果(直接抑制负序电流)

Fig. 12 Simulation results (suppress negative sequence current)

如图 12 和图 13 所示, 为交流侧故障下直接抑制负序电流的方法与本文所提能量均衡控制策略的仿真结果, 如图 12(b)和图 13(b)分别对应两种方法在交流侧故障下整流端三相电流波形。1.4 s 故障发生时, 本文所提控制策略使得交流侧三相电流一直保持平衡状态, 图 12(c)为采用直接抑制负序电流方法的三相上桥臂子模块电容电压波形, 故障发生时, 可看出其电容电压波动明显。图 13(c)为采用本文所提控制策略三相上桥臂子模块电容电压波形, 故障时, 其电容电压波动明显减小。通过对比图 12(d)可知图 13(d)中, 由于波动的间隔变小了可以推测出环流中低次交流分量得到抑制, 从而能够降低桥臂电流峰值, 减小子模块电压波动, 提高 MMC 安全稳定运行的能力。综上所述验证了本文所提能量均衡控制策略的优越性。

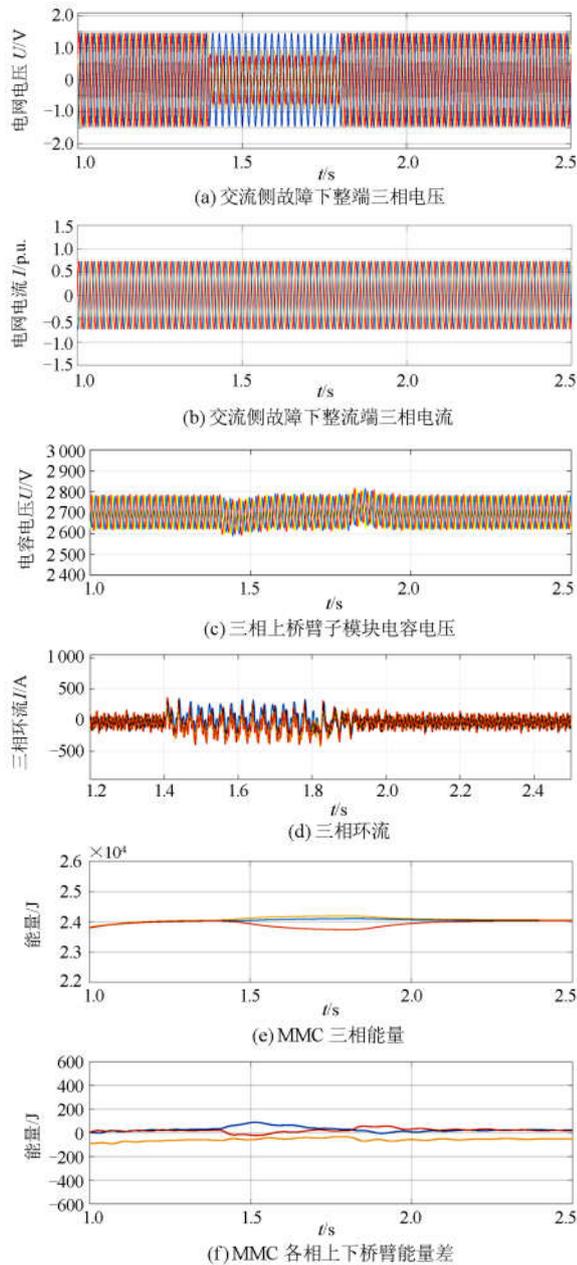


图 13 仿真结果(本文提出方法)

Fig. 13 Simulation results (proposed method)

图 12 和图 13(e)、图 13(f)分别给出了两种方法下 MMC 能量仿真结果图, 由图 12(e)和图 13(e)可知, 在两种方法下, MMC 三相能量都能恢复一定的平衡, 但明显采用能量均衡控制方法的 MMC 在故障时三相能量的波动幅度明显减小; 对比图 12(f)和图 13(f)的 MMC 三相上下桥臂能量差仿真结果, 采用负序抑制电流方法上下桥臂能量差存在严重波动, 而本文所提方法虽然存在少许波动, 但波动幅度也明显减小, 这一性能的改善减少了子模块电容电压波动, 提高了 MMC 功率传输的能力, 提升了

系统稳定安全运行的裕度。

5 结论

综上所述, 本文针对电网电压不平衡下 MMC 运行情况进行研究, 详细分析了桥臂能量与各电气信号的耦合关系, 提出了一种能量均衡控制策略, 经过分析与仿真验证得到如下结论。

(1) 本文所提控制策略, 有效控制了交流侧三相电流对称, 能够实现 MMC 正常工况与交流侧故障下的稳定控制。

(2) 通过相间能量与上下桥臂能量平衡控制实现对换流器内部环流的优化控制。能够有效减小子模块电容电压波动, 抑制环流低次分量, 实现换流器内部能量流动的平衡控制。

(3) 总能量平衡控制保证了交直侧功率传输的动态平衡, 确保了直流侧传输功率的稳定, 有效实现 MMC 内外部能量的协调控制, 最后通过在 Matlab 上进行了实验仿真, 通过两种方法的对比, 验证了本文所提控制策略的优越性。

参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] FELDMAN R, TOMASINI M, AMANKWAH E, et al. A hybrid modular multilevel voltage source converter for HVDC power transmission[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1577-1588.
- [3] MERLIN M M C, GREEN T C, MITCHESON P D, et al. The alternate arm converter: a new hybrid multilevel converter with DC-fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 310-317.
- [4] 夏向阳, 周云, 帅智康. 高压直流输电系统中模块化多电平换流器的重复预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1637-1643.
- XIA Xiangyang, ZHOU Yun, SHUAI Zhikang. Repeat predictive control of a modular multilevel converter for HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1637-1643.
- [5] 荣飞, 田新华, 饶宏. 基于全桥 MMC 柔直换流阀损耗分析方法[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 1-7, 14.
- RONG Fei, TIAN Xinhua, RAO Hong. Losses analysis method of flexible DC converter valve based on full bridge MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 1-7, 14.
- [6] 李国庆, 付贵, 王斯忱. MMC 柔性直流输电系统网侧故障时紧急功率支援控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 107-112.
- LI Guoqing, FU Gui, WANG Sichen. Emergency power support control for MMC flexible HVDC transmission system during AC fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 107-112.

- [7] 喻锋, 王西田, 张阳. 适用于不对称交流电网的 MMC 直接环流抑制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3339-3345.
YU Feng, WANG Xitian, ZHANG Yang. Direct circulating current suppressing strategy for MMC under unbalanced AC grid conditions[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3339-3345.
- [8] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [9] 张建坡, 李耐心. 电网电压不平衡条件下模块化多电平换流器高压直流输电控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 205-212.
ZHANG Jianpo, LI Naixin. The control strategies of modular multilevel converter high voltage direct current transmission under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 205-212.
- [10] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [11] GUAN M, XU Z. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [12] ZHOU Y, JIANG D, GUO J, et al. Analysis and control of modular multilevel converters under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 1986-1995.
- [13] 陆羿, 李继红. 基于电容电压波动的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 158-164.
LU Yi, LI Jihong. Capacitor voltage balancing algorithm for modular multilevel converters based on voltage fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 158-164.
- [14] 孔明, 汤广福, 贺之渊, 等. 不对称交流电网下 MMC-HVDC 输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 41-49.
KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. A control strategy for modular multilevel converter based HVDC of unbalanced AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 41-49.
- [15] 李金科, 金新民. 网压不平衡下系统控制目标对 MMC 性能的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 39-48.
LI Jinke, JIN Xinmin. The influence of system operation objectives on operation characteristics for MMC under unbalanced grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 39-48.
- [16] 陆羿, 李继红, 裘鹏, 等. 基于电容电压波动的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 158-164.
LU Yi, LI Jihong, QIU Peng, et al. Capacitor voltage balancing algorithm for modular multilevel converters based on voltage fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 158-164.
- [17] OU Z G, WANG G Z. Modular multilevel converter control strategy based on arm current control under unbalanced grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3826-3836.
- [18] PRIETO-ARAUJO E, JUNYENT-FERRÉ A, COLLADOS-RODRÍGUEZ C, et al. Control design of modular multilevel converters in normal and AC fault conditions for HVDC grids[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 152(44): 424-437.
- [19] PRIETO-ARAUJO E, JUNYENT-FERRÉ A, CLARIANA-COLET G et al. Control of modular multilevel converters under singular unbalanced voltage conditions with equal positive and negative sequence components[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2131-2141.
- [20] LIZANA R, CASTILLO C, PEREZ M, et al. Capacitor voltage balance of MMC converters in bidirectional power flow operation[C] // IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, October 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada: 4935-4940.
- [21] 张磊, 范彩云, 韩坤, 等. 电网电压不对称时 MMC-HVDC 精确环流抑制控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 42-49.
ZHANG Lei, FAN Caiyun, HAN Kun, et al. MMC-HVDC precise circulation suppression control under asymmetrical network voltage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 42-49.
- [22] 柳舟洲, 同向前. 基于准 PR 控制器的 MMC-HVDC 的控制及环流抑制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 70-75.
LIU Zhouzhou, TONG Xiangqian. Strategies of MMC-HVDC control and circulation current suppression based on quasi-PR controller[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(11): 70-75.
- [23] 汪玉凤, 王济东, 佟丽新, 等. 基于自适应准 PR 控制器的 MMC 环流控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(12): 24-31.
WANG Yufeng, WANG Jidong, TONG Lixin. Research on MMC circulation control strategy based on adaptive quasi-PR controller[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(12): 24-31.

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2019-11-14

作者简介:

刘远(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电控制; E-mail: 1272571043@qq.com

夏向阳(1968—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源并网接入和柔性直流输电控制。E-mail: 307351045@qq.com

(编辑 姜新丽)