

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230122

电网不对称故障下 MMC 自适应相功率均衡控制策略

于吉¹, 尹项根¹, 赖锦木², 韩翔宇¹, 陈卫¹, 胡家玄¹, 窦真兰³, 孙沛⁴

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 国网上海市电力公司, 上海 200023; 4. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海, 200437)

摘要: 交流电网不对称故障工况下模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)存在相功率不均衡的问题, 常规的基于直流环流注入的调控方法会引起桥臂电流不对称, 导致各相电流应力不相等; 而基于零序电压注入的方法可能导致系统过调制, 危害系统安全稳定运行。针对传统相功率均衡控制策略的局限性, 提出一种交流电网不对称故障下 MMC 自适应相功率均衡控制策略。首先, 分析基于零序电压和直流环流注入的 MMC 相间功率调控原理, 指出不同方法单独进行相间功率均衡的局限性。其次, 研究零序电压注入方法的过调制边界, 引入相功率分配系数, 给出不同故障下相功率系数优化方法, 提出基于零序电压和直流环流注入协调的 MMC 自适应相功率均衡控制策略。最后, 通过仿真验证了机理分析与所提控制策略的正确性和有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 相功率均衡; 桥臂电流控制; 不对称故障; 零序电压注入

Adaptive leg-balancing control strategy of an MMC in an asymmetric AC grid fault

YU Ji¹, YIN Xianggen¹, LAI Jinmu², HAN Xiangyu¹, CHEN Wei¹, HU Jiakuan¹, DOU Zhenlan³, SUN Pei⁴

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200023, China; 4. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: A modular multilevel converter (MMC) has the problem of unbalanced power in asymmetric fault conditions. The conventional control method based on DC circulating current injection will cause asymmetry of arm current, resulting in unequal current of each phase. The method based on zero-sequence voltage injection may lead to over modulation and endanger the safe and stable operation of the system. Given the limitations of traditional leg-balancing control strategies, an adaptive leg-balancing control strategy of an MMC with asymmetric faults is proposed. First, the principle of leg-balancing based on zero-sequence voltage and DC circulating current injection is analyzed, and the limitations of different methods are pointed out. Second, the overmodulation boundary of the zero-sequence voltage injection method is studied, and the phase power distribution coefficient is introduced. Then the optimization method for a leg-power distribution coefficient with different faults is given and an adaptive leg-balancing control strategy of the MMC based on the coordination of zero-sequence voltage and DC circulating current is proposed. Finally, the correctness and effectiveness of the mechanical analysis and the proposed control strategy are verified by simulation.

This work is supported the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5400-20219953A-0-5-ZN).

Key words: modular multilevel converter; leg-balancing control; arm current control; unbalanced grid conditions; zero-sequence voltage injection

0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter,

MMC)具有低损耗、易于扩展、便于冗余容错设计等特点^[1-4], 被广泛应用于高压直流输电、海上风电、柔性交流输电等大功率系统。随着系统规模的扩大和可靠性要求的不断提高, MMC 不间断运行控制策略逐渐成为研究的热点与难点^[5-8]。

在实际系统运行中, 受不对称故障或线路阻抗

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5400-20219953A-0-5-ZN)

不均等因素的影响,交流侧电网电压不对称的现象时有发生^[9-11]。而目前 MMC 大多采用与传统两电平换流器相同的交流侧反馈控制策略^[12-14],交流端口通常以三相交流电流对称为目标^[15-17]。在交流侧电压不对称时会产生三相不平衡功率,进而导致 MMC 桥臂电流不平衡,造成发热不均等问题^[18-21],威胁柔性直流输电等系统的安全稳定运行。因此,如何在电网电压不对称工况下实现相功率均衡,是保障 MMC 不间断运行的关键。

针对电网电压不对称下 MMC 相功率均衡的问题,文献[22]分析了网压跌落对 MMC 运行的影响,指出当交流侧电压不对称时,MMC 输出有功功率会降低。文献[23]通过分析 MMC 内部功率关系,提出一种基于桥臂电流控制的 MMC 综合控制方案,在不对称工况下采用调控直流环流的方法均衡相功率,但直流环流的调控会引起桥臂电流不对称,各相电流应力不相等,且直流环流的注入会导致桥臂电流增大,桥臂电流应力增大,危害 MMC 的安全稳定运行^[24]。文献[25]提出了基于零序电压注入的相功率均衡控制策略,但由其仿真结果可知,零序电压注入会导致交流侧电压幅值增大,造成过调制。针对基于零序电压的相功率均衡方法造成系统过调制的问题,文献[26]指出过调制会导致子模块内部器件热应力分布不均,降低器件利用率,危及 MMC 安全运行。文献[27]通过仿真分析了单相故障下电压幅值跌落程度与调制比的关系,提出通过限制功率的方式避免过调制。但是没有对复杂故障工况下零序电压注入对调制比的影响进行分析,且限制出力会影响系统供电可靠性。综上,现有文献通常采取零序电压注入法、直流环流调控法均衡相功率。但每种方法在实际工况下均存在一定局限性,因此需要进一步研究 MMC 在不对称工况下的功率平衡问题,保障 MMC 的安全稳定运行。

通过分析电网电压不对称工况下,零序电压注入、直流环流调控方法的原理与局限性,本文提出了一种 MMC 自适应相功率均衡控制策略。引入功率分配系数根据故障情况自适应优化功率分配系数调整不对称功率在 MMC 三相桥臂中的分配,能够在交流侧电网电压不对称时,保证 MMC 三相桥臂电流平衡,实现相功率均衡。最后,通过仿真验证了本文所提策略的可行性和有效性。

1 MMC 数学模型

图 1 为经 Yg/Δ 变压器并入交流系统的 MMC 拓扑结构示意图。每相分为上、下桥臂,每个桥臂含有 N 个半桥子模块。图 1 中: L 、 R 分别为桥臂电

感、等值电阻; U_{dc} 、 i_{dc} 分别为直流母线电压、电流; u_{pj} 、 u_{nj} ($j = a, b, c$) 分别为 j 相上、下桥臂电压; i_{pj} 、 i_{nj} ($j = a, b, c$) 分别为 j 相上、下桥臂电流; u_j 、 i_j ($j = a, b, c$) 分别为 MMC 交流侧并网电压、电流。各变量参考方向如图 1 所示。

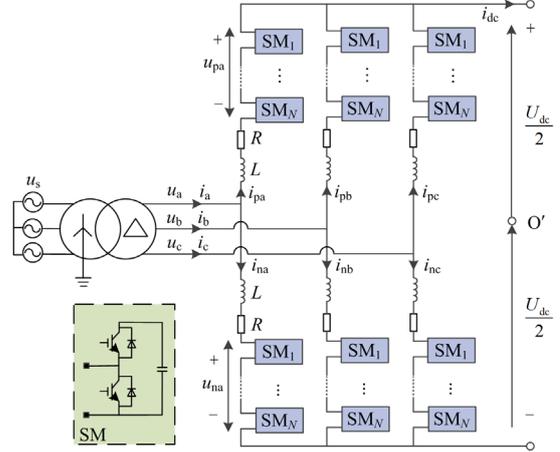


图 1 MMC 拓扑结构图

Fig. 1 Topology of the MMC

当 MMC 三相对称、上下桥臂参数对称时,通常认为直流电流分量在三相中均分,输出交流电流在上下桥臂均分。MMC 上下桥臂电流、电压可以表示为

$$\begin{cases} i_{pj} = \frac{i_j}{2} + \frac{i_{dc}}{3} + i_{cij} \\ i_{nj} = \frac{i_j}{2} - \frac{i_{dc}}{3} - i_{cij} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{pj} = \frac{U_{dc}}{2} + u_{o'o} - u_j + L \frac{di_{pj}}{dt} + Ri_{pj} \\ u_{nj} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{o'o} + u_j - L \frac{di_{nj}}{dt} - Ri_{nj} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{cij} 为 j 相单元环流的交流分量; $u_{o'o}$ 为交流系统侧电压中性点与直流侧极间电压中性点之间的电位差。

由式(1)可知,桥臂电流包含了交流侧电流、直流电流和相单元环流交流分量等所有电流信息,通过控制 MMC 桥臂电流可以实现交流侧跟踪和相单元环流控制,进而调节 MMC 相间功率^[23]。

2 不对称故障下 MMC 相间功率均衡方法

当交流电网发生不对称故障时,MMC 交流侧电压不对称,若不对 MMC 桥臂电压或电流进行控制,会导致 MMC 输出功率不对称,造成发热不均

等问题^[24]。针对上述问题, 可以采用零序电压注入、直流环流调控等控制策略均衡桥臂电流, 但每种方法在独立使用时, 均存在一定局限性。

2.1 网压不对称下 MMC 相间功率分析

受不对称故障或线路阻抗不均等因素的影响, 交流侧电网电压不对称的现象时有发生。设电网不对称故障下, 三相电压幅值不对称度为 $\lambda_j (j = a, b, c)$ 。以 A 相为基准, B、C 相相位偏移角度 θ_b 、 θ_c 。

$$\lambda_j = \frac{U_{sj}}{U_n} \quad (3)$$

式中: $U_{sj} (j = a, b, c)$ 为三相电压幅值; U_n 为额定相电压幅值。不对称故障下交流侧三相电压可表示为

$$\begin{cases} u_{sa} = \lambda_a U_n \sin(\omega t) \\ u_{sb} = \lambda_b U_n \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta_b) \\ u_{sc} = \lambda_c U_n \sin(\omega t + 2\pi/3 + \theta_c) \end{cases} \quad (4)$$

式中, ω 为系统角频率。当 MMC 通过 Yg/Δ 变压器接入交流电网时, 交流侧没有零序电压通路。根据对称分量法, 可得各相正序电压 u_{sj}^+ 为

$$u_{sj}^+ = \frac{\lambda_a}{3} U_n \sin(\omega t + r \frac{2\pi}{3}) + \frac{\lambda_b}{3} U_n \sin(\omega t + \theta_b + r \frac{2\pi}{3}) + \frac{\lambda_c}{3} U_n \sin(\omega t + \theta_c + r \frac{2\pi}{3}) \quad (5)$$

各相负序电压 u_{sj}^- 为

$$u_{sj}^- = \frac{\lambda_a}{3} U_n \sin(\omega t - r \frac{2\pi}{3}) + \frac{\lambda_b}{3} U_n \sin(\omega t + \theta_b - (r-1) \frac{2\pi}{3}) + \frac{\lambda_c}{3} U_n \sin(\omega t + \theta_c - (r+1) \frac{2\pi}{3}) \quad (6)$$

其中, $j = a$ 时, $r = 0$; $j = b$ 时, $r = -1$; $j = c$ 时, $r = 1$ 。

当 MMC 采用传统的抑制负序电流控制策略时, 交流侧无负序分量, 三相电流可以表示为

$$\begin{cases} i_{sa} = I \sin(\omega t + \varphi) \\ i_{sb} = I \sin(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ i_{sc} = I \sin(\omega t + \varphi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (7)$$

式中: I 为电流幅值; φ 为功率因数角。设变压器变比为 $1/n$, 设变压器接线方式对正序电压会产生 δ 相位偏移, 则变压器低压侧的电流 i_{j2} 、正序电压 u_{j2}^+ 、负序电压 u_{j2}^- 分别为

$$\begin{cases} i_{j2} = i_{sj} \times e^{j\delta} / n \\ u_{j2}^+ = u_{sj}^+ \times n e^{j\delta} \\ u_{j2}^- = u_{sj}^- \times n e^{-j\delta} \end{cases} \quad (8)$$

由此可计算各相功率为

$$\begin{cases} P_a = \bar{P} + \frac{U_n I}{3} [\lambda_b \sin(\theta_b + \frac{2\pi}{3} - \varphi - 2\delta) - \lambda_a \sin(\varphi + 2\delta) + \lambda_c \sin(\theta_c - \frac{2\pi}{3} - \varphi - 2\delta)] \\ P_b = \bar{P} + \frac{U_n I}{3} [\lambda_c \sin(\theta_c + \frac{2\pi}{3} - \varphi - 2\delta) - \lambda_a \sin(\frac{2\pi}{3} + \varphi + 2\delta) + \lambda_b \sin(\theta_b - \varphi - 2\delta)] \\ P_c = \bar{P} + \frac{U_n I}{3} [\lambda_b \sin(\theta_b - \frac{2\pi}{3} - \varphi - 2\delta) + \lambda_a \sin(\frac{2\pi}{3} - \varphi - 2\delta) + \lambda_c \sin(\theta_c - \varphi - 2\delta)] \end{cases} \quad (9)$$

式中, \bar{P} 为三相正序电压与交流电流产生的功率。

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{\lambda_a}{3} U_n I \sin(-\varphi) + \frac{\lambda_c}{3} U_n I \sin(\theta_c - \varphi) + \\ &\quad \frac{\lambda_b}{3} U_n I \sin(\theta_b - \varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(9)可知, 不对称故障下交流侧负序电压与交流电流产生的功率在三相中分布不均。且功率不平衡量与三相电压不对称程度及功率因数有关。根据交直流侧功率平衡, 可求得直流功率和直流电流分别为

$$\begin{cases} P_{dcj} = P_j \\ I_{dcj} = P_j / U_{dc} \end{cases}, j = a, b, c \quad (11)$$

由式(11)可知, 交流电网不对称故障下, 交流侧三相功率不平衡, 由于交直流侧功率守恒, MMC 直流侧三相功率受交流侧故障影响也会出现不平衡, 导致直流电流不对称, 进而使 MMC 三相桥臂电流不平衡, 会出现发热不均等问题^[23]。且交流侧输出电流不对称, 影响供电质量, 不利于 MMC 的安全稳定运行。针对上述问题, 可以通过注入零序电压、直流环流等方法均衡三相功率, 使三相电流对称。

2.2 基于直流环流注入的相功率均衡方法

由 2.1 节分析可知, 当交流电网三相功率不对称时, 根据交直流功率守恒, 直流电流会出现不平衡, 进而导致桥臂电流不对称。当 MMC 直流侧母线电压不为零时, 可以直接通过调控三相直流环流, 使三相电流对称, 进而实现 MMC 三相功率的均衡。交流侧网压不对称下, 三相直流电流的不均衡量 ΔI_{dcj} 可以表示为

$$\Delta I_{dcj} = \frac{\Delta P_j}{U_{dc}} = \frac{P_j - \bar{P}}{U_{dc}}, j = a, b, c \quad (12)$$

当采用注入直流环流的方法平衡故障下的不

平衡功率时,注入的直流环流 I_{dc_inj} 需要与该相直流不平衡量大小相等、方向相反,即

$$I_{dc_inj} = -\Delta I_{dcj}, j = a, b, c \quad (13)$$

值得注意的是,注入的直流环流通过与直流电压作用产生功率,以平衡故障下的不对称功率。当发生直流两极接地等故障造成直流母线电压为零时,该方法将失效。此外,当采用基于直流环流注入的相间功率均衡方法时,会导致 MMC 桥臂电流及桥臂应力增大,桥臂电流不对称,各相电流应力不相等,危害 MMC 的安全稳定运行。

2.3 基于零序电压注入的相功率均衡方法

当 MMC 通过 Yg/Δ 变压器接入交流电网时,可以采用注入零序电压的方式实现相功率均衡。区别于直流环流调控的方法,零序电压的注入不会增大系统损耗。注入的零序分量受到角形联结变压器的隔离作用,不会传输到交流电网。

2.3.1 零序电压注入原理

电网不对称时,零序电压与基频电流产生的有功功率 ΔP_{a0} 、 ΔP_{b0} 、 ΔP_{c0} 需要完全抵消因不对称故障而产生的三相功率不对称分量^[25],即

$$\begin{cases} U_0 \sin(\varphi_0) I_d - U_0 \cos(\varphi_0) I_q = \Delta P_{a0} \\ \sqrt{3} U_0 (\cos(\varphi_0) I_d + \sin(\varphi_0) I_q) = \Delta P_{b0} - \Delta P_{c0} \end{cases} \quad (14)$$

式中: U_0 、 φ_0 分别为注入零序电压的幅值与相角; I_d 、 I_q 分别为交流侧电流 d 轴、 q 轴分量。

由式(14)可得

$$\begin{bmatrix} U_0 \cos(\varphi_0) \\ U_0 \sin(\varphi_0) \end{bmatrix} = \beta \times \begin{bmatrix} -\sqrt{3} I_q & I_d \\ \sqrt{3} I_d & I_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{a0} \\ \Delta P_{b0} - \Delta P_{c0} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{3}(I_q^2 + I_d^2)} \quad (16)$$

由式(15)、式(16)可求得注入零序电压幅值及相角。设变压器二次侧电压幅值为 U'_j 、相位为 θ'_j ,忽略变压器低压侧到 MMC 间线路的压降,注入零序电压后 MMC 交流侧输出相电压为

$$u'_j = U_0 \sin(\omega t + \varphi_0) + U'_j \sin(\omega t + r \frac{2\pi}{3} + \theta'_j) \quad (17)$$

根据调制比的定义^[25],零序电压注入后各相调制比为

$$m_j = \frac{U'_j + U_0 \cos(\theta'_j + r \frac{2\pi}{3} - \varphi_0)}{U_{dc} / 2} \quad (18)$$

其中,直流母线电压 U_{dc} 可近似看作定值。由式(15)—式(18)可知,不对称故障下通过注入零序

电压可均衡三相功率,使交流输出电流对称,但注入零序电压会使 MMC 交流侧电压幅值增大,容易引起过调制。

2.3.2 过调制风险分析

不对称故障下,MMC 通过注入零序电压可以实现相功率的均衡,但容易引起过调制^[24],过调制下输出电压超过桥臂电压上限,会导致换流器失稳,不利于 MMC 的安全稳定运行。因此亟需分析零序电压注入下调制比的影响因素及电压过调制的机理。故障下注入零序电压的幅值 U_0 、相角 φ_0 可由式(14)—式(16)求出。结合式(17)可知,零序电压注入下,MMC 调制比受网压幅值跌落程度 λ_c 、相位偏移角 θ 及功率因数角 φ 的共同影响。

由于实际电力系统中出现单相接地故障的概率较大,约占总故障的 80%,故以 YNd11 型变压器高压侧单相故障为例,设 C 相电压幅值跌落至 $U_c = \lambda_c U_n$ 、C 相电压相角不发生偏移。由于 C 相电压发生跌落,C 相不易发生过调制,而零序电压的注入会影响到 A、B 相电压调制比。系统正常运行时交流侧线电压有效值为 110 kV,直流侧电压为 ± 10 kV,桥臂电感 $L = 15$ mH。在不同故障条件下,根据式(15)—式(18)可计算出采用零序电压注入均衡相功率时各相调制比,图 2 给出了 A 相(最严重相)调制比 m_a 与 C 相电压跌落程度 λ_c 、功率因数角 φ 的变化关系。

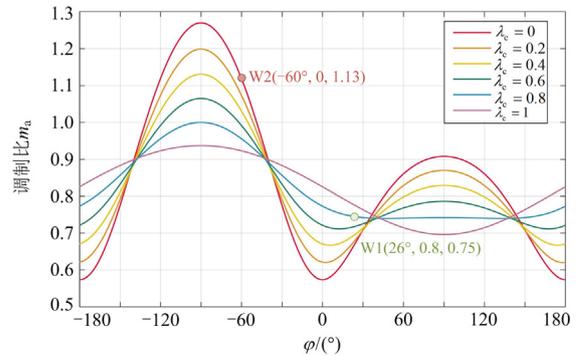


图 2 调制比随电压幅值跌落程度及功率因数角变化曲线

Fig. 2 Curve of modulation ratio with voltage amplitude drop and power factor angle

由图 2 可以看出, λ_c 、 φ 之间存在交互作用,对 m_a 的影响较为复杂。在同一幅值跌落程度下, m_a 与 φ 的关系曲线成周期性变化。当 φ 趋近于 -90° , 即传输有功功率较低、传输无功功率较多时,MMC 更易发生过调制,调制比与三相电压不对称度有关。值得注意的是,图 2 没有考虑 C 相相角偏移,当计及相角偏移时, m_a 将表现出更为复

杂的变化关系, 且在某些故障工况下将出现更为严重的过调制现象。

综上, 交流侧电网发生不对称故障时, 通过调节注入零序电压的幅值和相角可以实现三相功率均衡。零序电压注入下, MMC 调制比受到故障特性、功率因数角等因素的综合影响。当采用基于零序电压的相功率均衡控制策略时, 易导致 MMC 系统电压过调制, 致使桥臂电压超过其额定上限阈值, 且过调制下子模块内部器件热应力分布不均, 降低器件利用率, 甚至危及系统的安全稳定运行。

3 MMC 自适应相功率均衡控制策略

交流电网发生不对称故障时, 如果不对 MMC 的控制策略进行调整, 会导致 MMC 输出电流不对称, 影响供电质量, 且 MMC 相间功率不均衡, 造成发热不均等问题, 威胁系统的安全稳定运行。由第 2 节分析可知, 网压不对称时, 可以通过注入零序电压、调控直流环流均衡三相功率, 但两种方法均存在一定局限性。本文综合两种方法的优缺点与局限性, 提出一种网压不对称工况下, MMC 自适应相功率均衡控制策略, 实现 MMC 在交流侧不对称故障工况下的不间断运行。

3.1 功率分配系数优化

由 2.3 节可知, 基于零序电压注入的相功率均衡控制策略, 对 MMC 交流侧输出无影响, 但易导致电压过调制。为最大化利用系统输出上限同时避免过调制问题的发生, 亟需对零序电压注入下系统出现过调制的边界进行把控。

假设在零序电压注入幅值为 U_0 、相角为 φ_0 时, 系统不平衡功率 ΔP 完全被补偿; 在零序电压注入幅值为 U_{0b} 、相角为 φ_{0b} 时, 系统不平衡功率被补偿 $k\Delta P$, 其中 k 为功率分配系数, $k \in [0, 1]$ 。

根据式(15)、式(16)可得

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_0 \cos(\varphi_0) \\ U_0 \sin(\varphi_0) \end{bmatrix} = \beta \times \begin{bmatrix} -\sqrt{3}I_q & I_d \\ \sqrt{3}I_d & I_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{a0} \\ \Delta P_{bc} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_{0b} \cos(\varphi_{0b}) \\ U_{0b} \sin(\varphi_{0b}) \end{bmatrix} = k \times \beta \times \begin{bmatrix} -\sqrt{3}I_q & I_d \\ \sqrt{3}I_d & I_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{a0} \\ \Delta P_{bc} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\beta = \frac{1}{\sqrt{3}(I_q^2 + I_d^2)}$; $\Delta P_{bc} = \Delta P_b - \Delta P_c$ 。

由式(19)可得

$$\varphi_{0b} = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}I_d \times \Delta P_{a0} + I_q \times \Delta P_{bc}}{I_d \times \Delta P_{bc} - \sqrt{3}I_q \times \Delta P_{a0}}\right) = \varphi_0 \quad (20)$$

$$U_{0b} = kU_0 \quad (21)$$

即注入零序电压的相角只与故障特性有关, 在同一故障条件下, 与功率分配系数 k 的取值无关。而在平衡 $k\Delta P$ 时, 注入零序电压的幅值是平衡全部不平衡功率 ΔP 时的 k 倍。根据式(20)、式(21), 可求解最大化利用系统输出上限即使得 MMC 处于过调制边界时的功率分配系数 k 。当变压器高压侧 C 相发生接地故障时, 在避免过调制的前提下, 通过调节零序电压幅值均衡部分相功率, 零序电压调节示意图, 如图 3 所示。

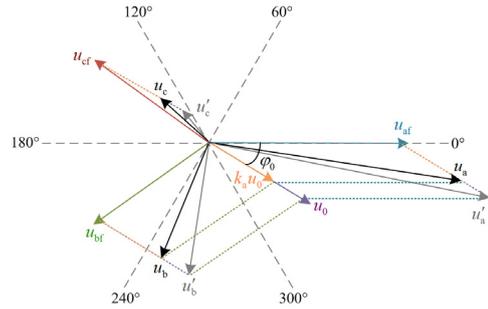


图 3 零序电压调节示意图

Fig. 3 Diagram of zero sequence voltage regulation

图 3 中, $u_{jt} (j = a, b, c)$ 为故障后交流侧三相电压, $u'_j (j = a, b, c)$ 为通过注入零序电压 u_0 , 完全平衡相功率造成过调制的三相电压相量。 $u_j (j = a, b, c)$ 为通过注入 $k_j U_0$, 使得一相电压恰好达到过调制边界时的三相电压相量。设通过注入零序电压完全平衡相功率致使系统过调制时, 零序电压幅值、相角分别为 U_0 、 φ_0 , 且过调制相的调制比为 m_j 。设在平衡 $k_j \Delta P$ 时, 恰好使得该相最大调制比为 1。根据式(20)、式(21)可知, 此时注入零序电压幅值、相角分别为 $k_j U_0$ 、 φ_0 。根据调制比定义有

$$\frac{\sqrt{U_j^2 + U_0^2 + 2U_j U_0 \cos(\theta_j + r \frac{2\pi}{3} - \varphi_0)}}{U_{dc}/2} = m_j \quad (22)$$

$$\frac{\sqrt{U_j^2 + k_j^2 U_0^2 + 2k_j U_j U_0 \cos(\theta_j + r \frac{2\pi}{3} - \varphi_0)}}{U_{dc}/2} = 1 \quad (23)$$

结合图 3 中的向量关系, 联立式(22)、式(23)可得

$$k_j = \frac{\sqrt{(\cos \varphi_0 - 1)^2 U_j^2 + (\frac{U_{dc}}{2})^2 - U_j \cos \varphi_0}}{U_0} \quad (24)$$

当有多相过调制时, 功率分配系数的选取应满足每一相调制比小于等于 1 的要求, 故取功率分

配系数 k 为

$$k = \min(k_a, k_b, k_c) \quad (25)$$

将 $k\Delta P$ 分配给零序电压注入环节，将 $(1-k)\Delta P$ 分配给直流环流调控环节，可最大化利用系统输出上限，同时实现电网不对称下相功率的平衡。

3.2 自适应相功率均衡策略

本文综合零序电压注入、直流环流调控相功率均衡方法的优缺点，提出一种面向电网对称/不对称故障下 MMC 自适应相功率均衡控制策略，MMC 综合控制框图如图 4 所示。

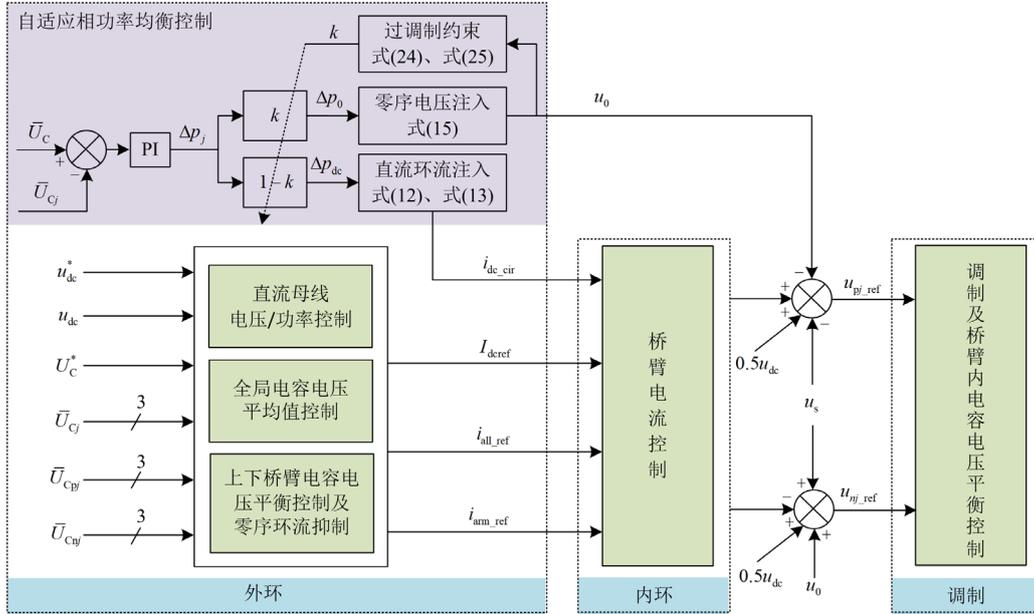


图 4 基于自适应相功率均衡控制的 MMC 综合控制框图

Fig. 4 Diagram of comprehensive control of MMC based on the adaptive leg-balancing control

MMC 综合控制包括电压外环、电流内环以及调制环节三部分。电压外环包括全局电容电压控制、直流母线电压控制、相功率均衡控制和桥臂均衡控制。相间均衡部分采用所提自适应相功率均衡策略，自适应相功率分配系数优化流程如图 5 所示。

当交流电网发生不对称故障造成 MMC 相功率不平衡时，通过对 j 相电容电压平均值 \bar{U}_{Cj} 与三相子模块总体电容电压平均值 \bar{U}_c 进行 PI 控制，得到不平衡相功率 ΔP 。为避免三相电流应力不均、桥臂电流应力增大等问题，在交流侧不对称故障下优先通过注入零序电压平衡三相功率。当不会造成过调制时，仅采用基于零序电压注入的相功率均衡控制策略；当零序电压注入会造成过调制时，最大利用系统输出上限，控制过调相的调制比为 1，定义功率分配系数 k ，结合故障工况，自适应调节功率分配系数，将 $k\Delta P$ 分配给零序电压注入环节，剩余不平衡功率 $(1-k)\Delta P$ 分配给直流环流调控环节。通过协调控制零序电压与直流环流，提高 MMC 在交流电网不对称故障下不间断运行的可靠性。

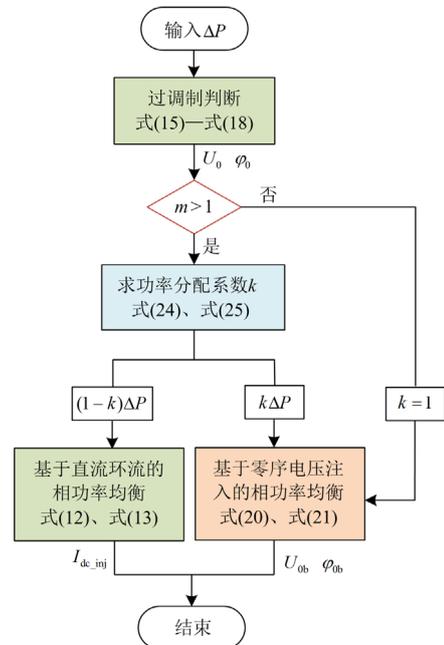


图 5 MMC 自适应相功率分配系数优化流程图
Fig. 5 Flow chart of adaptive phase power distribution coefficient optimization

4 仿真结果分析

为验证本文所提 MMC 自适应相功率均衡控制策略的可行性, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示的 MMC 仿真系统, 相关参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

Table 1 Simulation system parameters

参数	数值
交流侧线电压有效值/kV	110
直流母线电压/kV	± 10
视在功率/MVA	10
桥臂子模块数/个	10
子模块电压/V	2000
子模块电容/mF	6
桥臂电感/mH	15
变压器变比	110/10

4.1 未过调制时仿真结果分析

本文设置系统运行于图 2 中的 W1 点。系统功率因数角为 26° , MMC 输出的有功功率 $P=9$ MW, 无功功率 $Q=4$ Mvar。设置 $t=3.5$ s 时, 变压器高压侧发生 C 相带过渡电阻接地故障, 过渡电阻为 2Ω 。图 6—图 8 分别为交流电网不对称故障下, 采用传统基于零序电压注入的相功率均衡方法、基于直流环流注入的相功率均衡控制、所提自适应相功率均衡方法时 MMC 主要电气量的仿真波形。

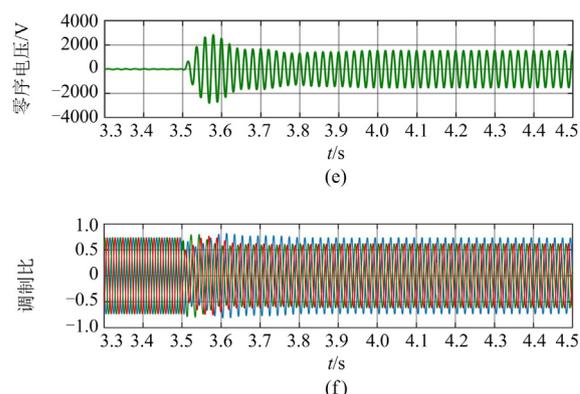
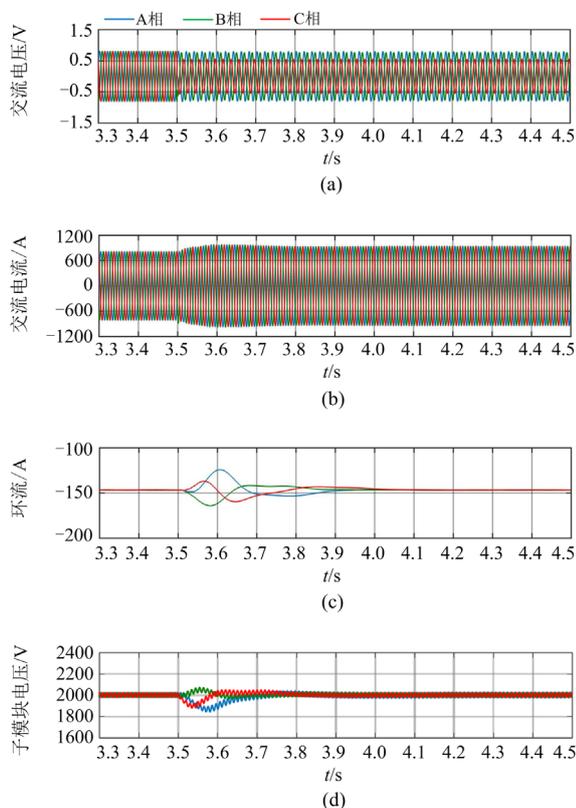


图 6 未过调制时采用传统零序电压注入策略仿真结果
Fig. 6 Simulation results of zero-sequence voltage injection strategy without overmodulation

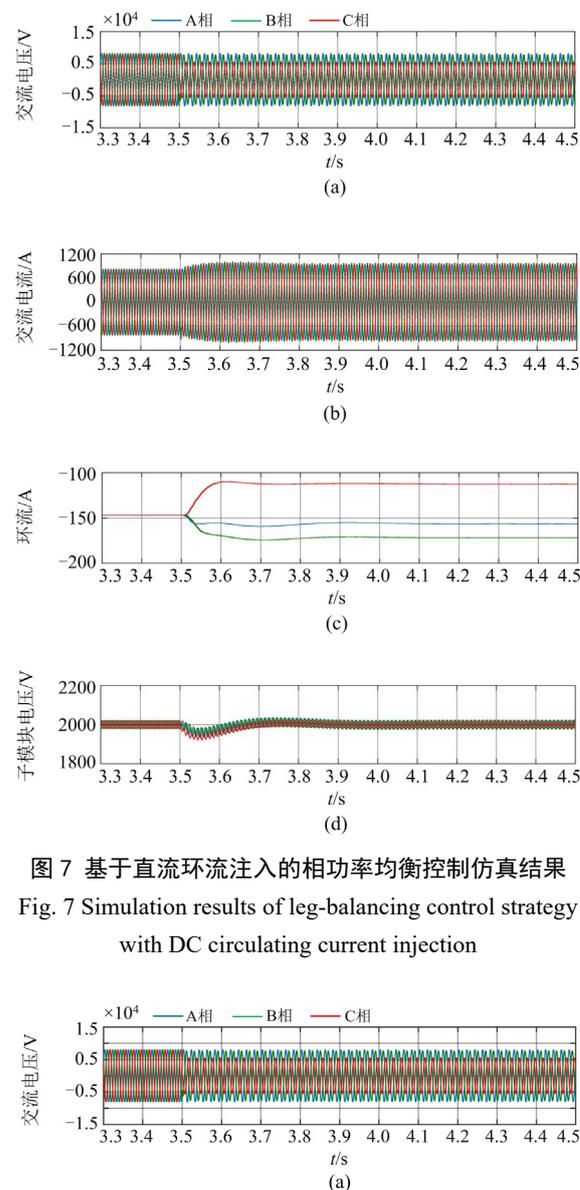


图 7 基于直流环流注入的相功率均衡控制仿真结果
Fig. 7 Simulation results of leg-balancing control strategy with DC circulating current injection

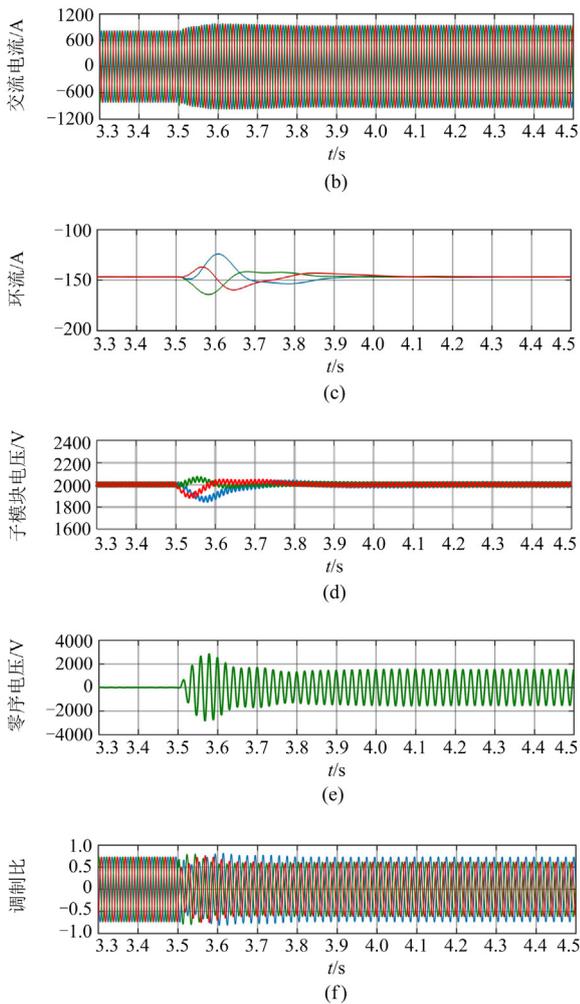


图8 未过调制时采用自适应相功率均衡控制仿真结果
Fig. 8 Simulation results of adaptive leg balancing control strategy without over modulation

如图6—图8所示, 3.5 s前, MMC输出交流电压、电流三相对称, 注入的零序电压分量为0。子模块电容电压稳定在2000 V左右, MMC能正常并网运行。3.5 s时, 变压器高压侧发生C相带过渡电阻接地故障, 高压侧C相电压幅值跌落至正常运行时的80%, 与图2中W1点一致。变压器低压侧相电压波形如图6(a)、图7(a)、图8(a)所示, A相电压保持不变, B相电压与C相电压幅值均发生跌落, 且C相电压幅值跌落更为严重。为保证传输功率不变, 交流电流幅值增大。为平衡三相功率, 注入幅值约为1800 V的零序电压, 如图6(e)、图8(e)所示。如图6(f)、图8(f)所示, 采用传统基于零序电压注入的方法以及采用所提自适应相功率均衡控制策略均衡相功率均未发生过调制, A相调制比约为0.75, 与图2分析一致。MMC输出交流电流三相对

称, 如图6(b)、图8(b)所示。直流环流与子模块电压在故障初期波动幅度较小逐渐趋于稳定, 如图6(c)、图6(d)、图8(c)、图8(d)所示。而采用传统基于直流环流调控的相功率均衡控制时, 三相桥臂环流不对称, 如图7(c)所示, 导致三相桥臂应力不均, 与2.2节分析一致。

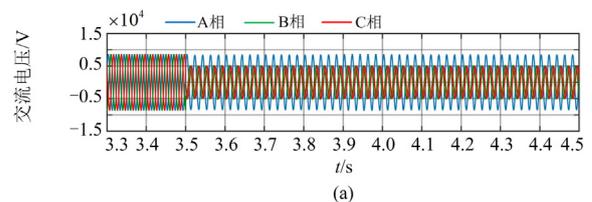
仿真结果表明, 当注入零序电压没有导致系统过调制时, 所提自适应相功率均衡控制策略与传统零序电压注入方法均能实现相功率平衡, 避免了直流环流调控下桥臂环流增大、三相电流应力不均等问题, 实现交流侧电压不对称下MMC的故障穿越。

4.2 单相接地故障

为验证采用本文所提自适应相功率均衡方法的MMC在单相故障下的运行性能, 设置系统运行于图2中的W2点时, 系统功率因数角为 -60° , MMC输出的有功功率 $P=5\text{ MW}$, 无功 $Q=-8.7\text{ Mvar}$ 。设置 $t=3.5\text{ s}$ 时, 变压器高压侧发生C相金属性接地故障。图9、图10分别为采用传统基于零序电压注入的相功率均衡方法、本文所提自适应相功率均衡方法时, 故障下MMC各主要电气量的仿真波形。

如图9所示, 3.5 s前, MMC交流电压、电流三相对称, 注入的零序电压分量为0。子模块电容电压稳定在2000 V左右, MMC能正常并网运行。3.5 s时, 变压器高压侧发生C相金属性接地故障。变压器低压侧相电压波形如图9(a)所示, A相电压保持不变, B相电压与C相电压幅值均发生跌落, 且B、C相电压幅值相等。为保证传输功率不变, 交流电流幅值增大。为均衡三相功率, 注入幅值约为3000 V的零序电压, 如图9(e)所示。

如图9(f)所示, 当采用传统基于零序电压注入的方法平衡相功率时, 系统出现过调制, 如图9(b)所示, MMC输出交流电流畸变严重, A相电流THD达到8.9%, 直流环流与子模块电压在故障后的0.6 s内存在较大波动, 如图9(c)、图9(d)所示, 影响MMC正常运行, 符合2.3.2节中的理论分析。仿真结果表明, 传统基于零序电压注入的相功率均衡控制策略可能造成MMC过调制, 影响MMC安全稳定运行。且在MMC过调制时, 该方法会失效, 桥臂环流、子模块电压等存在波动, MMC输出交流电流畸变, 无法实现相功率的均衡。



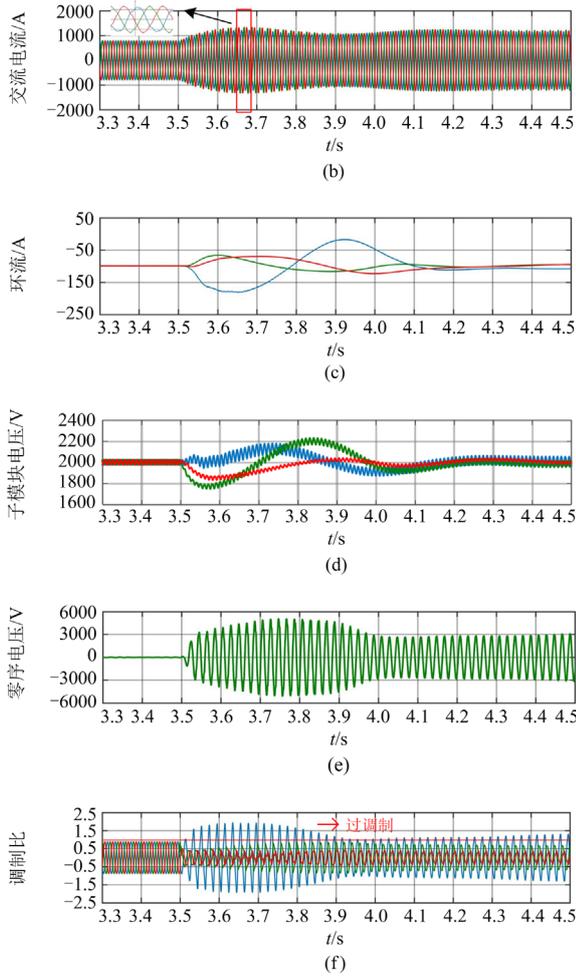


图9 单相接地故障下传统零序电压注入策略仿真结果
Fig. 9 Simulation results of zero-sequence voltage injection strategy under single-phase grounding fault

设置与图9中相同的故障, MMC采用自适应相功率均衡控制时, 各电气量波形如图10所示, 3.5s前, MMC同样能正常并网稳定运行。3.5s时高压侧发生C相金属性接地故障后, 控制系统自适应调节不平衡功率分配系数。为避免MMC出现过调制, 将A相调制比维持在1, 如图10(f)所示。调节图10(e)中注入零序电压的幅值与相角, 同时配合图10(c)中直流环流指令值的调控, 保持三相电流对称, 如图10(d)、图10(b)所示, MMC子模块电压波动较小, 输出交流电流三相对称, A相电流THD仅为1.54%。所提控制策略有效实现了不对称故障下相功率的均衡, 同时避免了电压过调制等问题。

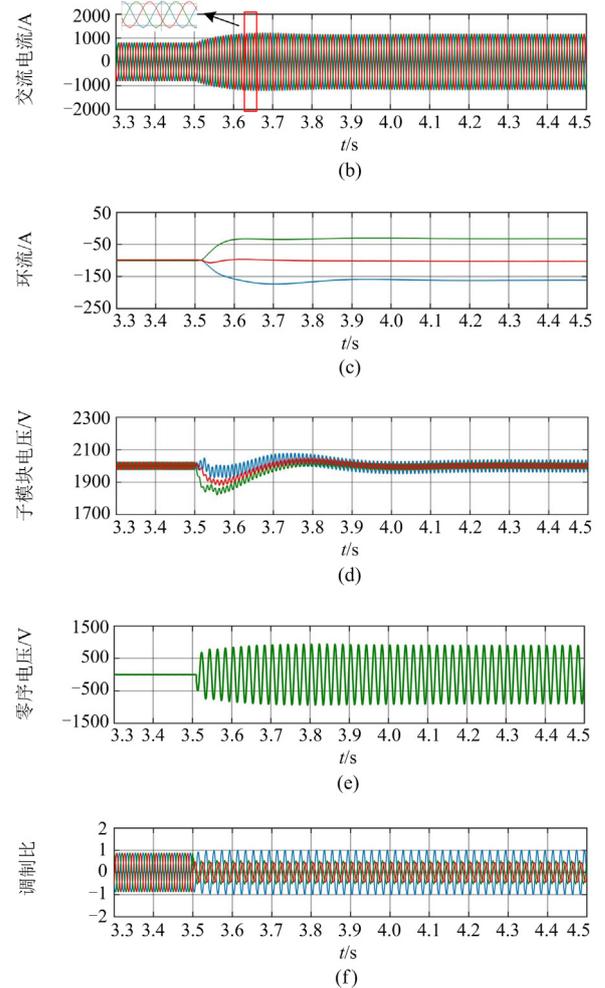
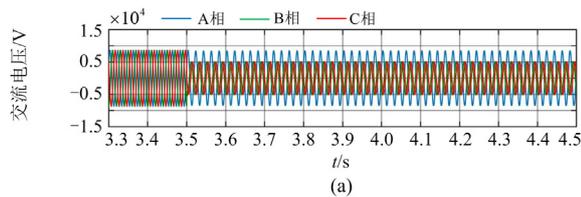


图10 单相接地故障下自适应相功率均衡策略仿真结果
Fig. 10 Simulation results of adaptive leg balancing control strategy under single-phase grounding fault

4.3 两相接地故障

为验证所提自适应相功率均衡控制策略在高压侧发生两相接地短路时的有效性, 设置MMC输出有功功率为6 MW, 无功功率为-8 Mvar, $t=3.5$ s时变压器高压侧发生B、C相经过渡电阻接地, B相电压跌落80%, C相电压跌落50%。MMC分别采用传统基于零序电压注入的相功率均衡控制、自适应相功率均衡控制策略, 所得仿真波形分别如图11、图12所示。故障下变压器低压侧三相电压幅值出现不同程度跌落, 相位不再互差 120° , 如图11(a)、图12(a)所示。对比图11(e)、图12(e), 采用传统零序电压注入下, 注入幅值约为3000 V的零序电压; 采用自适应相功率均衡时, 注入零序电压的幅值约为1500 V, 剩下的不平衡功率由中直流环流调控, 如图12(c)所示。对比图11(f)、图12(f), 采用传统方法平衡相功率时, 会造成MMC过调制, 而自适应相功率均衡控制下各相调制比均小于等于1, 桥臂

电压始终在其约束范围内。对比图 11(b)、图 12(b)、图 11(d)、图 12(d)可知,采用本文所提相功率均衡策略可以有效避免传统方法过调制导致 MMC 交流侧电流畸变及子模块电压长时间波动等问题。

综合上述各故障工况下的仿真结果及其分析可知,在交流侧不对称故障下,MMC 采用传统基于零序电压注入的相功率均衡控制时易导致电压过调制。且在 MMC 过调制时该方法会失效,致使交流侧电流畸变,影响供电质量,危害 MMC 的安全稳定运行。采用本文所提的自适应相功率均衡控制时,通过优化功率分配系数,协调控制零序电压及

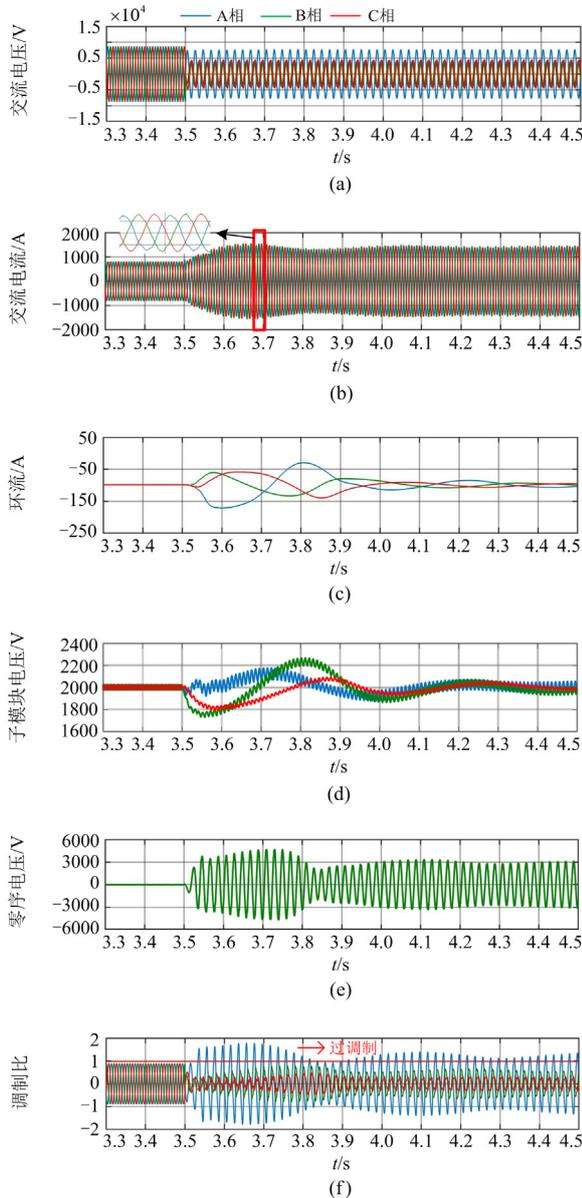


图 11 两相接地故障下传统零序电压注入策略仿真结果
Fig. 11 Simulation results of zero-sequence voltage injection strategy under two-phase grounding fault

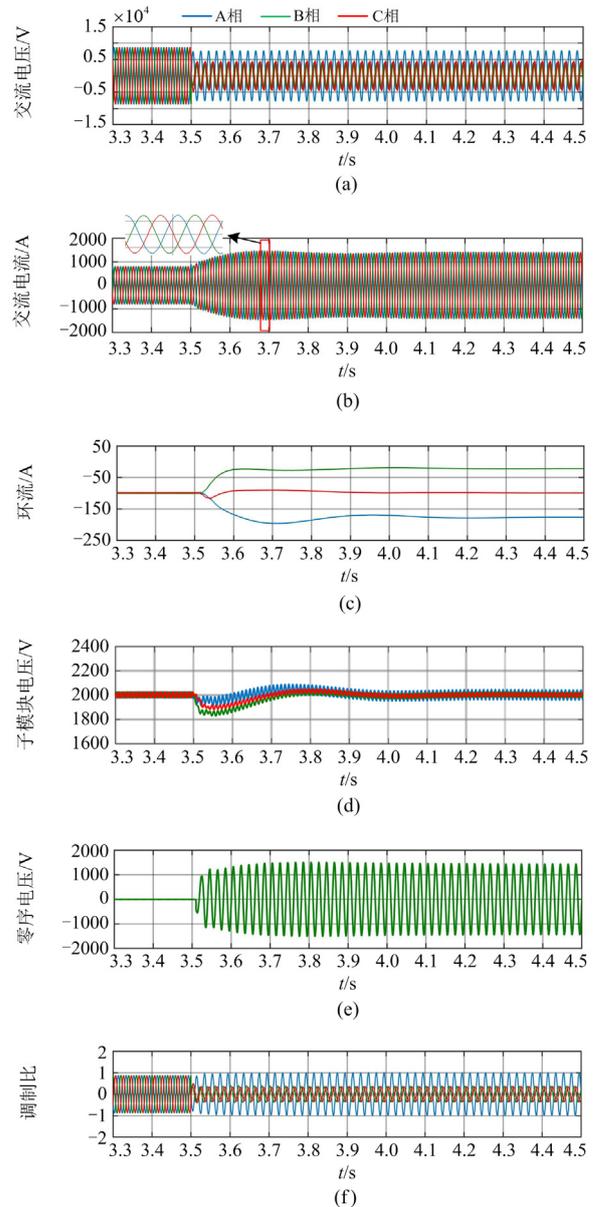


图 12 两相接地故障下自适应相功率均衡控制仿真结果
Fig. 12 Simulation results of adaptive leg balancing control strategy under two-phase grounding fault

直流环流,限制桥臂电压始终在其额定允许范围,可有效避免系统出现过调制,同时能最大化利用系统输出容量。仿真结果表明,所提控制策略在多种复杂不对称故障工况下均具有良好的性能。

5 结语

本文提出了一种交流电网不对称故障下 MMC 自适应相功率均衡控制策略,解决了常规相功率均衡策略导致的桥臂应力增大、三相电流应力不均或过调制工况下相功率均衡控制策略失效等问题。主

要结论如下:

1) 在网压不对称深度跌落且 MMC 功率因数较低工况下, 采用基于零序电压注入的相功率均衡控制方法容易引起过调制现象, 并导致电流畸变严重。

2) 通过分析过调制边界, 引入相功率分配系数, 给出不同故障下相功率系数优化方法, 自适应协调基于零序电压注入和直流环流注入的相功率平衡控制, 实现三相间不平衡功率的再分配。

3) 仿真结果验证了所提控制策略的有效性, 避免网压深度跌落下过调制现象, 保证交流电网不对称下 MMC 相间功率均衡、子模块电容电压平均值保持恒定, 提高 MMC 在电网不对称故障下的运行性能。

参考文献

- [1] 王少林, 王刚, 陈琦, 等. 考虑线路电阻影响的 MMC-MTDC 自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 40-47.
WANG Shaolin, WANG Gang, CHEN Qi, et al. An adaptive droop control method considering the influence of line resistance for MMC-MTDC[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 40-47.
- [2] LAI Jinmu, YIN Xianggen, YIN Xin, et al. Improved comprehensive control of modular multilevel converter under AC/DC grid faults and harmonic operation conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6537-6556.
- [3] 单节杉, 任敏, 田鑫萃, 等. MMC 换流站阀侧交流接地故障电流解析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 36-48.
SHAN Jieshan, REN Min, TIAN Xincui, et al. Analysis of grounding fault current at the AC valve side of an MMC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 36-48.
- [4] 陆书豪, 贾秀芳. LCC-MMC 混合直流输电系统单阀投入过程定有功 MMC 站电压平衡策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 111-116.
LU Shuhao, JIA Xiufang. Voltage balance strategy for constant active power MMC station in the process of valve deblock in LCC-MMC hybrid DC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 111-116.
- [5] AHMAD M, GONG Chunyang, NADEEM M H, et al. A hybrid circuit breaker with fault current limiter circuit in a VSC-HVDC application[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 657-669.
- [6] 李国庆, 徐亚男, 江守其, 等. 海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 111-119.
LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of an MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 111-119.
- [7] 随顺科, 任铁强, 邹强, 等. 连接风电系统的柔性直流电网 MMC 在线投入分析与验证[J]. 供用电, 2022, 39(11): 26-31.
SUI Shunke, REN Tieqiang, ZOU Qiang, et al. Analysis and verification of MMC online entry into a flexible DC grid connected to wind power system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 26-31.
- [8] 梁家豪, 张朝辉, 胡秋玲, 等. 水路及均压电极布置方式对 MMC 换流阀阀端间交直流耐压试验的影响研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 123-132.
LIANG Jiahao, ZHANG Chaohui, HU Qiuling, et al. Study on influence of waterway and equalizing electrode arrangement on AC-DC voltage withstand test between mmc converter valve terminals[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 123-132.
- [9] LIN Weixing, JOVICIC D, NGUEFEU S, et al. Full-bridge MMC converter optimal design to HVDC operational requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1342-1350.
- [10] LI Shaohua, WANG Xiuli, YAO Zhiqing, et al. Circulating current suppressing strategy for MMC-HVDC based on nonideal proportional resonant controllers under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 387-397.
- [11] CUI Shenghui, SUL S. A comprehensive DC short-circuit fault ride through strategy of hybrid modular multilevel converters (MMCs) for overhead line transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 34(11): 7780-7796.
- [12] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1933-1943.
LUO Yongjie, LI Yaohua, LI Zixin, et al. DC short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1933-1943.
- [13] 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.
- [14] 郝亮亮, 李伟杰, 王卓雅, 等. MMC-HVDC 电网输电线路双极短路故障电流的实用计算[J]. 电力系统自动

- 化, 2020, 44(5): 68-76.
- HAO Liangliang, LI Weijie, WANG Zhuoya, et al. Practical calculation for bipolar short-circuit fault current of transmission line in MMC-HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 68-76.
- [15] GUO Chunyi, YANG Jiayi, ZHAO Chengyong. Investigation of small-signal dynamics of modular multilevel converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2269-2279.
- [16] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
- TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [17] SHI Xiaojie, WANG Zhiqiang, LIU Bo, et al. Characteristic investigation and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under single-line-to-ground fault conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 408-421.
- [18] TU Qingrui, XU Zheng, CHANG Yong, et al. Suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1332-1338.
- [19] SANZ I M, JUDGE P D, SPALLAROSSA C E, et al. Dynamic overload capability of VSC HVDC interconnections for frequency support[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1544-1533.
- [20] JUDGE P D, GREEN T. Dynamic thermal rating of a modular multilevel converter HVDC link with overload capacity[J]. IEEE Eindhoven Powertech, 2015: 1-6.
- [21] 黄怡, 王祺, 向晖, 等. 基于桥臂虚拟电压的 MMC-MG 相间功率平衡控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 46-56.
- HUANG Yi, WANG Qi, XIANG Hui, et al. Inter-phase power balance control strategy of MMC-MG based on bridge arm virtual voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 46-56.
- [22] VASILADIOTIS M, CHERIX N, RUFER A. 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.
- [23] 赖锦木, 尹项根, 王要强, 等. 基于桥臂电流控制的 MMC 改进电容电压均衡控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3132-3145.
- LAI Jinmu, YIN Xianggen, WANG Yaoqiang, et al. Improved capacitor voltage balancing control strategy for modular multilevel converter with arm current control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3132-3145.
- [24] 刘文君, 严嘉浩, 王要强, 等. 环形 MMC 桥臂电流应力分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3507-3518.
- LIU Wenjun, YAN Jiahao, WANG Yaoqiang, et al. Current stress analysis of ring MMC bridge arm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3507-3518.
- [25] OU Zhujian, WANG Guangzhu, ZHANG Lanhua. 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.
- [26] 盛景, 董玉斐, 李武华, 等. 混合型 MMC 换流器过调制下的热-电应力分布特性研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 445-453.
- SHENG Jing, DONG Yufei, LI Wuhua, et al. Thermal and electrical stress distribution characteristics of hybrid MMC converters under over-modulation operation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 445-453.
- [27] WANG Jinyu, TANG Yi, LIU Xiong. Arm current balancing control for modular multilevel converters under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 2467-24793.

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-10-28

作者简介:

于吉(1998—), 女, 硕士, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: 1484302355@11.com

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制、电力电子技术及其在电力系统中的应用; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

赖锦木(1990—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: laijinmu@126.com

(编辑 许威)