第 52 卷 第 3 期：1168-1179 高电压技术 Vol.52, No.3: 1168-1179
2026 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250213

基于桥臂电流控制的 MMC 单相接地故障调控策略

赖锦木[1]，陈俊宏[1]，尹　昕[2]，王要强[1]，陈世帅[1]，尹项根[3]
（1. 郑州大学电气与信息工程学院，郑州 450001；2. 武汉理工大学自动化学院，武汉 430070；
3. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074）

摘　要：随着交直流配电网规模持续扩大及非线性负荷占比显著提升，传统消弧装置在含谐波畸变的单相接地故障场景下存在局限性。为此，提出一种基于桥臂电流控制的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)主动故障调控策略。首先，通过构建 MMC 直流侧对地支路拓扑结构，为故障期间零序电流提供可控通路，建立考虑谐波影响的故障相电压闭环控制模型；其次，提出静止坐标系下桥臂电流控制方法，在静止坐标下将基波和谐波交流、环流和直流 3 部分进行同时调控，实现无需坐标变换的统一控制架构；进而建立故障消弧过程 MMC 瞬时功率传输模型，提出计及故障消弧的 MMC 桥臂电容电压均衡控制方法，并给出桥臂子模块配置的量化设计准则。最后，通过 MATLAB/Simulink 仿真验证所提控制策略可行性和有效性。

关键词：单相接地故障；模块化多电平换流器；桥臂电流控制；故障消弧；电容电压均衡控制

Single Phase Ground Fault Regulation Strategy of Modular Multilevel Converter with Arm Current Control

LAI Jinmu[1], CHEN Junhong[1], YIN Xin[2], WANG Yaoqiang[1], CHEN Shishuai[1], YIN Xianggen[3]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the continuous expansion of AC/DC hybrid distribution networks and the significant increase in nonlinear loads, conventional arc suppression devices exhibit limitations in single-phase ground fault scenarios involving harmonic distortion. To address this challenge, this paper proposes an active ground fault control strategy based on arm current regulation by modular multilevel converters (MMCs). Firstly, a controllable DC-side grounding branch topology is constructed to provide a zero-sequence current path during fault conditions, while establishing a closed-loop compensation model for fault-phase voltage that accounts for harmonic interference. Secondly, an arm current control method in the stationary frame is developed, enabling simultaneous regulation of fundamental/harmonic components, circulating components, and DC components within a unified control architecture without coordinate transformation. Furthermore, an instantaneous power transfer model of MMC during fault arc suppression is established, and a capacitor voltage balancing control method incorporating fault suppression dynamics is proposed. Quantitative design criteria for arm submodule configuration are derived. Finally, simulations based on the MATLAB/Simulink platform verify the effectiveness of the proposed ground fault current suppression control method under different fault resistances.

Key words: single-phase ground fault; modular multilevel converter; arm current control; arc suppression; capacitor voltage balancing control

0　引言

我国中压交流配电网多采用小电流接地方式，配电网发生单相接地故障，可能会导致配电网出现过电压问题，故障点处存在电弧燃烧，严重的可能导致火灾、设备损坏等问题[1]，因此接地故障电弧可靠熄灭是配电网安全运行的重要前提之一。

随着交直流配电网规模和非线性负荷不断增加，接地故障电流大小和成分发生深刻变化，传统消弧线圈其本身为无源设备，只能补偿故障电流中的容性电流，无法补偿有功和谐波分量[2-4]，消弧效

基金资助项目：国家自然科学基金(52307148)；国家电网有限公司科技项目(5400-202199553A-0-5-ZN)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52307148), Science and Technology Project of SGCC (5400-202199553A-0-5-ZN).

果较差且响应速度慢。随着电力电子技术的发展，现主要基于有源消弧装置的配电网消弧方法进行研究。文献[5-6]提出，在配电网中性点经过变压器接入传统脉宽调制有源逆变器，通过调节逆变器输出电压和变压器变比，控制故障点处电压为零，以达到消弧目的。文献[7-9]提出一种消弧线圈和接地电力电子装置配合进行故障电流抑制。文献[10]提出通过利用多端断路器和隔离变压器将接地变压器的次级电压耦合到中性点，以补偿大部分接地故障电流。但逆变器装置调控过程复杂且对硬件要求较高，稳定性和可靠性难以保证。文献[11]提出在配电网中性点接入级联有源 H 桥，进行计及线路阻抗和负荷影响的柔性电压消弧。在中性点接入有源接地变流器通常需要额外直流电压源进行供电，利用率较低。文献[12]提出两相直挂式装置，实现直流侧免供电的配电网接地故障电流柔性调控。文献[13-14]提出采用三相级联 H 桥接入电网线路进行消弧，并采用了计及线路电流的改进电压消弧法。文献[15]基于级联 H 桥直流侧电容电压变化规律，并针对电容电压波动问题提出相应消弧控制策略。上述研究采用级联 H 桥消弧，需要专门增设消弧设备，功能单一，仅用于消弧和无功补偿，设备相对冗余利用率低。

针对上述问题，模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)具有很好的应用前景，其在电能质量控制、直流输出、故障自愈方面的能力远胜于传统变流器。针对交直流互联配电网，可基于 MMC 进行负荷转供，当发生单相接地故障时，还可进行故障电流转移，实现消弧功能[16-18]。MMC 作为一种高度可控电力电子设备，可以在其直流侧构造接地回路，实现单相接地故障电流转移功能。MMC 消弧控制通常在 *dq*0 坐标系下进行控制，通过调控零轴输出量来实现对配电网零序电压的调控，从而实现消弧。而在 MMC 接入配电网场景下，为节省成本通常采用无联结变压器方式[19]。在交流电网发生不对称故障下，可能会导致 MMC 内部存在环流、负序和零序电流分量，需专门增加控制器以保证 MMC 正常运行，增加了控制系统的复杂度。采用桥臂电流控制方法可实现对上述电流分量的统一控制，能够提高系统动态性能，并能在电网发生复杂故障时对子模块电容电压进行更直接的均衡控制[20]。然而上述研究未提及在配电网单相接地故障下采用 MMC 进行主动降压消弧的零序分量控制。MMC 通过零序分量进行主动降压消弧将改变其内部环流、零序电流等分布情况，需要进一步研究考虑多频分量的主动降压消弧对 MMC 运行影响及其统一控制策略。

本文提出在 MMC 直流侧增设对地支路，设计基于桥臂电流控制的 MMC 主动降压消弧法，将故障点电压抑制为零，故障电流转移至直流侧对地支路，实现配电网单相接地故障消弧。在三相静止坐标系下对 MMC 桥臂电流进行控制，实现消弧期间正序和零序的基波/谐波交流分量、直流和交流环流分量的综合调控。分析瞬时功率发现，在故障及消弧期间会导致相间功率不平衡，可通过调整直流母线电流在三相桥臂的分配来实现功率平衡。考虑实际消弧期间可能存在谐波，控制部分采用比例重复控制器对上述多频分量进行控制。本文所提策略将多重桥臂电流分量及消弧功能相结合，可在谐波工况下实现消弧功能，保证 MMC 稳定运行；最后通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了其有效性。

1　MMC 数学模型与单相接地故障分析

1.1　单相接地故障调控原理

当 10 kV 交流配电网发生单相接地故障时，有源消弧设备可分为中性点接入式和三相接入式，其中 MMC 作为三相接入式设备，在实现交直流功率变换的同时，也可以用于配电网消弧，设备功能丰富，利用率高。如图 1 所示，在 10 kV 配电网中，MMC 不经变压器直接接入三相配电网。当配电网正常运行时，MMC 仅作为功率传输设备稳定运行，直流侧接地支路不流经电流，当配电网发生单相接地故障时，故障电流转移至直流侧对地支路。图 1 中 $\boldsymbol{E}_j$ 为电源电压，j=a、b、c；$\boldsymbol{U}_0$ 为电网中性点电压；$\boldsymbol{u}_{sj}$ 为 MMC 并网点处电压；Z_{dc} 为阻容串联单元阻抗值。

配电网故障等效电路图如图 2(a)所示，忽略线路阻抗影响，其中 $\boldsymbol{U}_j$ 为相电压；r_j 为对地泄漏电阻；

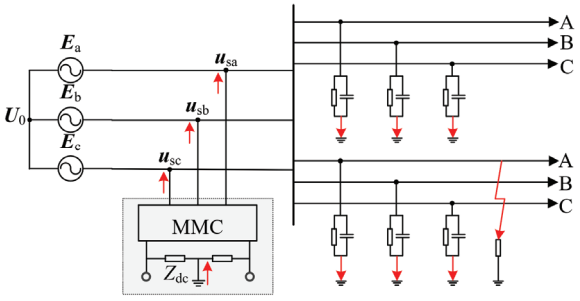


图 1　MMC 接入配电网拓扑结构

Fig.1　Topology of MMC connect to the distribution network

C_j 为泄漏电容；R_f 为故障点过渡电阻；$\boldsymbol{I}_{AG}$、$\boldsymbol{I}_{BG}$、$\boldsymbol{I}_{CG}$ 为对地泄漏电流；MMC 向配电网注入零序电流 $\boldsymbol{I}_{AZ}$、$\boldsymbol{I}_{BZ}$、$\boldsymbol{I}_{CZ}$；$\boldsymbol{I}_f$ 为故障电流。

考虑配电网可能存在谐波，电源电压 $\boldsymbol{E}_j$ 等效为正弦电压 $\boldsymbol{E}_{sj}$ 和谐波电压 $\boldsymbol{U}_{xth}$ 的叠加，即 $\boldsymbol{E}_j=\boldsymbol{E}_{sj}+\boldsymbol{U}_{xth}$($x$= 3, 5, 7, …)。假设 a 相发生单相接地故障，三相等效电路如图 2(a)所示，在 MMC 投入电压消弧运行时，控制目标为：

$$\boldsymbol{U}_a=\boldsymbol{U}_0+\boldsymbol{E}_a=0 \tag{1}$$

将故障点处电压控制为 0，忽略线路阻抗，可认为中性点电压为负的故障相电源电动势，即 $\boldsymbol{U}_0=-\boldsymbol{E}_a$。在该简化等效电路中，将谐波分量统一等效为谐波电流源，此时根据基尔霍夫电流定律可知，MMC 向配电网注入的零序电流为：

$$\boldsymbol{I}_f+\boldsymbol{I}_{AG}+\boldsymbol{I}_{BG}+\boldsymbol{I}_{CG}=\boldsymbol{I}_{AZ}+\boldsymbol{I}_{BZ}+\boldsymbol{I}_{CZ}+\boldsymbol{I}_h \tag{2}$$

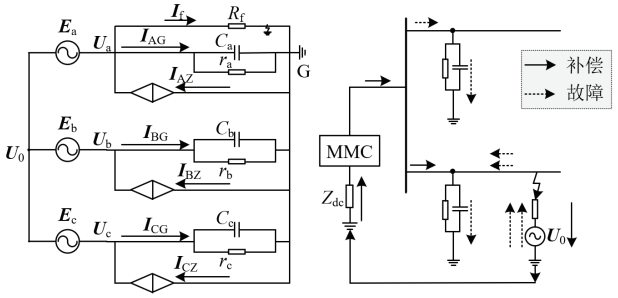
式中：$\boldsymbol{I}_h$ 为谐波电流，代入三相对地参数及故障过渡电阻可得：

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{U}_a\left(\frac{1}{R_f}+\frac{1}{r_A}+j\omega C_A\right)+\boldsymbol{U}_b\left(\frac{1}{r_B}+j\omega C_B\right)+\\&\boldsymbol{U}_c\left(\frac{1}{r_C}+j\omega C_C\right)-\boldsymbol{I}_h=\boldsymbol{I}_Z\end{aligned} \tag{3}$$

假设配电网三相参数对称，$\boldsymbol{E}_a+\boldsymbol{E}_b+\boldsymbol{E}_c=0$，$C_a=C_b=C_c=C_0$，$r_a=r_b=r_c=r_0$，结合式(1)，可将式(3)化简为：

$$\boldsymbol{I}_Z=-3\boldsymbol{E}_A\left(\frac{1}{r_0}+j\omega C_0\right)-\boldsymbol{I}_h \tag{4}$$

如图 2(b)所示，通过控制 MMC 向配电网注入零序电流 $\boldsymbol{I}_Z$，可以将故障点电流补偿为 0，故障电流转移至直流侧接地支路，实现配电网单相接地故障消弧处理。



(a) 三相等效电路图　　(b) 零序等效电路图

图 2　配电网故障等效电路图

Fig.2　Equivalent circuit diagram of distribution network under SPG fault

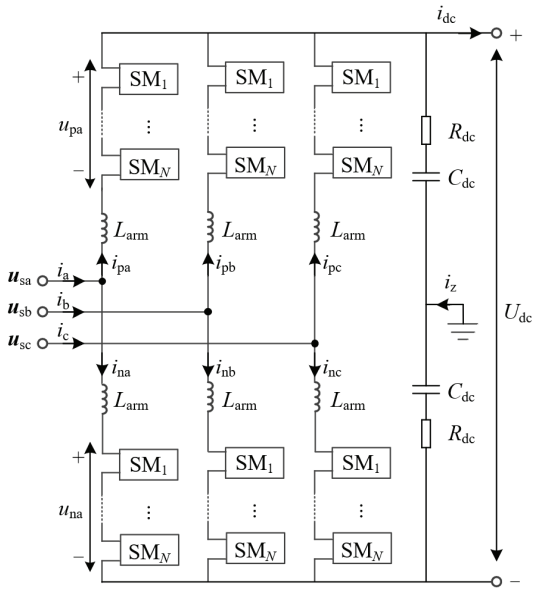


图 3　增设直流接地支路的 MMC 电路拓扑图

Fig.3　Topology diagram of MMC circuit with added DC grounding branch

1.2　MMC 拓扑结构

由上述 MMC 接入配电网的单相接地故障调控原理可知，需构造 MMC 零序分量流动回路，因此增设正负极阻容对地支路，形成如图 3 所示的三相直挂式 MMC 电路拓扑结构。图 3 中，每相上下桥臂由 N 个半桥或全桥子模块和桥臂电感 L_{arm} 组成，正负极分别经过电阻 R_{dc} 电容 C_{dc} 串联单元接地。其中 u_{sa}、u_{sb}、u_{sc} 为 MMC 并网点处三相电压；i_a、i_b、i_c 为三相电流；u_{pj}、u_{nj} 为 j 相上下桥臂子模块输出电压；i_{pj}、i_{nj} 为 j 相上下桥臂电流；U_{dc} 为正负极极间电压；i_{dc} 为直流侧电流；i_z 为消弧时流经的零序电流；N 为桥臂内子模块个数。

1.3　计及消弧功能的 MMC 数学建模及功率分析

MMC 桥臂电流中主要包含交流侧电流、直流母线电流和交流环流，而交流侧电流在故障穿越、消弧等不同故障工况下，又包括了正负零序电流。桥臂电流中交直流分量耦合特性复杂，若采用 $dq0$ 坐标系下的控制，则在 dq 轴双序电流中存在谐波，需要依赖滤波算法并增加额外控制环节，控制系统将十分复杂，因此本文采用静止坐标系下的桥臂电流直接控制方法，针对桥臂电流中的各种分量进行直接控制。

根据上述分析，MMC 上下桥臂电流可表示为：

$$\begin{cases}i_{pj}=\dfrac{i_j}{2}+i_{dcj}+i_{zacj}\\[2ex] i_{nj}=\dfrac{i_j}{2}-i_{dcj}-i_{zacj}\end{cases} \tag{5}$$

式中：i_j 为包含零序转移电流的交流侧电流；$i_{\mathrm{dc}j}$ 为直流分量；$i_{\mathrm{zac}j}$ 为交流环流分量。

MMC 作为功率变换设备，通过控制桥臂输出电压，直流侧保证极间电压不变以输出直流功率，忽略桥臂电感压降，上下桥臂输出电压表示为：

$$\begin{cases} u_{\mathrm{p}j} = u_{\mathrm{pdc}j} + u_{\mathrm{pac}j} + u_{\mathrm{pzac}j} = \dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2} + \dfrac{i_{\mathrm{z}}}{2}Z_{\mathrm{dc}} - u_{sj} \\ u_{\mathrm{n}j} = u_{\mathrm{ndc}j} + u_{\mathrm{nac}j} + u_{\mathrm{nzac}j} = \dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2} - \dfrac{i_{\mathrm{z}}}{2}Z_{\mathrm{dc}} + u_{sj} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$u_{\mathrm{pdc}j}$、$u_{\mathrm{ndc}j}$ 为直流环流分量；$u_{\mathrm{pac}j}$、$u_{\mathrm{nac}j}$ 为交流电压分量；$u_{\mathrm{pzac}j}$、$u_{\mathrm{nzac}j}$ 为交流环流分量。网侧三相交流电压分量还可分解为正负零序电压分量，即：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}_{sj} = \boldsymbol{u}_{sj}^{+} + \boldsymbol{u}_{sj}^{-} + \boldsymbol{u}_{sj}^{0} = E^{+}\sin(\omega_1 t + \theta^{+} - 2\pi m/3) + \\ E^{-}\sin(-\omega_1 t + \theta^{-} - 2\pi m/3) + E^{0}\sin(\omega_1 t + \theta^{0}) \end{aligned} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{u}_{sj}^{+}$、$\boldsymbol{u}_{sj}^{-}$、$\boldsymbol{u}_{sj}^{0}$ 为正负零序分量；E^{+}、E^{-}、E^{0} 和 θ^{+}、θ^{-}、θ^{0} 分别为正负零序电压幅值和相角；ω_1 为角频率；j=a、b、c 时，m 分别为 0、1、−1。

在 MMC 进行消弧时，故障点处故障电流被抑制为 0，故障相电压也为 0，非故障相电压升高至线电压。零序电流通过增设的直流侧对地支路，经 MMC 流入大地，MMC 并网点处的电流也分解为正负零序电流：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{i}_j = \boldsymbol{i}_j^{+} + \boldsymbol{i}_j^{-} + \boldsymbol{i}_j^{0} = I^{+}\sin(\omega_1 t + \varphi^{+} - 2\pi m/3) + \\ I^{-}\sin(-\omega_1 t + \varphi^{-} - 2\pi m/3) + I^{0}\sin(\omega_1 t + \varphi^{0}) \end{aligned} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{i}_j^{+}$、$\boldsymbol{i}_j^{-}$、$\boldsymbol{i}_j^{0}$ 为正负零序分量；I^{+}、I^{-}、I^{0} 和 φ^{+}、φ^{-}、φ^{0} 分别为正负零序电流幅值和相角。

MMC 直接并网运行，应保证输出三相电流中仅包括正序电流以及消弧所需的零序电流，不输出负序电流以免污染电网，触发保护误动作。且在配电网发生单相接地故障时，通过三序序网图分析可知，并无负序分量，仅包括正序和零序网络。MMC 在消弧期间向配电网注入的电流 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{Z}}$ 即为零序电流：

$$\boldsymbol{i}_j^{0} = \boldsymbol{I}_{\mathrm{Z}}/3 \tag{9}$$

假设各个子模块电容电压相同，桥臂电流中不包含交流环流分量，忽略上下桥臂中电感上的压降，则上下桥臂的瞬时功率分别为：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{p}j} = \left(\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2} + \dfrac{i_{\mathrm{z}}}{2}Z_{\mathrm{dc}} - u_{sj}\right)\left(-i_{\mathrm{dc}j} - \dfrac{i_j}{2}\right) \\ P_{\mathrm{n}j} = \left(\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2} - \dfrac{i_{\mathrm{z}}}{2}Z_{\mathrm{dc}} + u_{sj}\right)\left(-i_{\mathrm{dc}j} + \dfrac{i_j}{2}\right) \end{cases} \tag{10}$$

则在一个工频周期内，j 相桥臂产生的平均功率为：

$$P_j^{\Sigma} = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega}(P_{\mathrm{p}j} + P_{\mathrm{n}j})\mathrm{d}t = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} p_j^{\Sigma}\mathrm{d}t \tag{11}$$

将式(7)—(10)代入式(11)中可得：

$$\begin{aligned} P_j^{\Sigma} = -U_{\mathrm{dc}}i_{\mathrm{dc}j} + E^{+}I^{+}\cos(\theta^{+} - \varphi^{+}) + E^{0}I^{0}\cos(\theta^{0} - \varphi^{0}) + \\ E^{0}I^{+}\cos(\theta^{0} - \varphi^{+} + 2\pi m/3) + E^{+}I^{0}\cos(\theta^{+} - \varphi^{0} - 2\pi m/3) - \\ \frac{3}{2}I^{0}I^{+}Z_{\mathrm{dc}}\cos(2\pi m/3) - (\frac{3}{2}I^{0})^{2}Z_{\mathrm{dc}} \end{aligned} \tag{12}$$

在 MMC 投入消弧后，故障相电压被进一步降低至 0，三相电网电压处于严重不对称情况下，需考虑在该工况下保持正常功率传递及 MMC 自身稳态运行。消弧期间增加的零序电压电流和系统的正序电压电流将产生额外的不平衡功率，这将导致 MMC 相间子模块电容电压的不平衡。同时零序电压也会导致同相的上下桥臂子模块电容电压不平衡，诸多利用 MMC 消弧导致的其他问题都将影响其稳定运行。

针对相间功率不平衡导致的不对称，通过调整分布在三相桥臂上的直流电流来实现调控。当某相电网电压下降时，需减少对该故障相传输功率的要求，将缺少的功率转移至另外 2 个非故障相。由交直流功率守恒可知：

$$i_{\mathrm{dc}j} = \frac{P_j}{U_{\mathrm{dc}}} \tag{13}$$

为使相间功率平衡，应加入三相直流电流的不均衡量：

$$\Delta i_{\mathrm{dc}j} = \frac{\Delta P_j}{U_{\mathrm{dc}}} = \frac{P_j - \overline{P}}{U_{\mathrm{dc}}} \tag{14}$$

式中：$\overline{P}$ 为三相功率平均值；ΔP_j 为 j 相功率与平均功率的差值。

同时零序电压导致上下桥臂功率不对称，在此引入与正序电流同频同相的微调有功电流分量 Δi_{sj}，对上下桥臂子模块电容电压进行均衡控制，即：

$$P_{\mathrm{p}j} - P_{\mathrm{n}j} = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} u_{sj}\Delta i_{sj}\mathrm{d}t \tag{15}$$

式中：Δi_{sj} 为 j 相的有功微调电流。

结合上述分析，以 MMC 三相上桥臂为例，其桥臂电流应为：

$$\begin{cases} i_{\mathrm{pa}} = \dfrac{i_{\mathrm{dc}}}{3} + \Delta i_{\mathrm{dca}} + \dfrac{i_{\mathrm{a}}}{2} \\ i_{\mathrm{pb}} = \dfrac{i_{\mathrm{dc}}}{3} + \Delta i_{\mathrm{dcb}} + \dfrac{i_{\mathrm{b}}}{2} \\ i_{\mathrm{pc}} = \dfrac{i_{\mathrm{dc}}}{3} + \Delta i_{\mathrm{dcc}} + \dfrac{i_{\mathrm{c}}}{2} \end{cases} \tag{16}$$

式中：$\Delta i_{\mathrm{dc}j}$为 j 相的直流电流调整值。

在消弧期间，故障相电压降低为 0，该相传输功率也降低为 0，桥臂内流过的直流电流为 0，将故障相原本所承担的全部功率转移至另外两相。

经过相间功率均衡后，加入上下桥臂均衡控制，在上下桥臂电流中加入微调电流：

$$\begin{cases} i_{\mathrm{p}j_\mathrm{ref}} = i_{\mathrm{p}j} + \Delta i_{sj} \\ i_{\mathrm{n}j_\mathrm{ref}} = i_{\mathrm{n}j} - \Delta i_{sj} \end{cases} \tag{17}$$

式中：$i_{\mathrm{p}j_\mathrm{ref}}$和 $i_{\mathrm{n}j_\mathrm{ref}}$分别为 j 相上、下桥臂电流指令值。得到桥臂电流指令值，进行桥臂电流直接控制，通过该控制，可对桥臂内的直流、交流和环流分量在同一控制器中实现调控，无需额外增设新的控制器，降低了控制环节的复杂度。

2 考虑消弧的 MMC 桥臂电流控制策略

MMC 在直接接入配电网时，需面临配电网发生单相接地故障时产生的问题，首先需保证 MMC 能够进行故障穿越，保证自身正常传输功率、子模块电容电压正常等。在 MMC 实现消弧功能时，也要保证其在实现消弧功能的同时，实现交直流功率传递，本文采用桥臂电流直接控制方法，将桥臂电流指令值进行综合计算，通过对每条桥臂内直流、交流、环流分量的直接控制，可同步抑制交流电流中的负序分量，并实现对消弧所需零序电流的准确控制，最后基于比例重复控制对桥臂电流进行控制，可对指令值进行无误差跟踪，并有效抑制谐波。

2.1 外环桥臂电流指令值计算

MMC 外环采用 U_{dc}-Q 控制，经过直流母线电压控制输出直流电流参考值，在正常稳态阶段每相桥臂流过直流电流平均分配，即：

$$I_{\mathrm{dc_ref}} = (U_{\mathrm{dc_ref}} - U_{\mathrm{dc}})(K_{\mathrm{dc_p}} + K_{\mathrm{dc_i}} / s) \tag{18}$$

式中：$U_{\mathrm{dc_ref}}$和 U_{dc}分别为直流侧参考电压和实际值；$I_{\mathrm{dc_ref}}$为直流侧电流参考值；$K_{\mathrm{dc_p}}$和 $K_{\mathrm{dc_i}}$分别为直流母线电压 PI 控制环节比例系数和积分系数。

MMC 外环输出有功功率根据交直流功率守恒可计算出直流有功功率在交流侧的瞬时值表达式，为提高系统响应速度，引入前馈值 I_{ff}，即：

$$I_{\mathrm{ff}} = \frac{2U_{\mathrm{dc}}}{3U_{\mathrm{sN}}} I_{\mathrm{dc_ref}} \tag{19}$$

式中：U_{sN}为网侧相电压幅值。

无功功率由闭环控制得到，闭环输出结果应计算得出在电网中三相电路中的交流瞬时值，并分配到各个桥臂上，具体计算过程如下：

$$I_{\mathrm{q_ref}} = (Q_{\mathrm{ref}} - Q)(K_{\mathrm{Q_p}} + K_{\mathrm{Q_i}} / s) \tag{20}$$

式中：Q_{ref}和 Q 分别为无功功率参考值和实际值；$I_{\mathrm{q_ctrl}}$为无功功率控制量；$K_{\mathrm{Q_p}}$和 $K_{\mathrm{Q_i}}$分别为无功功率 PI 控制环节比例系数和积分系数。再将计算得出的控制量转换为桥臂电流瞬时值 $i_{\mathrm{Q}j_\mathrm{ref}}$，外环指令值计算如附录 A 图 A1 所示。

现对 MMC 子模块进行均压控制，由于配电网发生单相接地故障和消弧期间，网侧三相电压均处于不对称状态，均采用调整相间直流电流分布，以每相桥臂的子模块电容电压平均值和全局子模块电容电压平均值进行作差计算，可得出每相直流电流调整值 $\Delta I_{\mathrm{leg}j_\mathrm{ref}}$，即：

$$\overline{U}_{\mathrm{c}} = \frac{1}{6N}\sum_{i=1}^{N} u_{\mathrm{cx}ji},\ x = \mathrm{p,n};\ j = \mathrm{a,b,c};\ i = 1,\cdots,N \tag{21}$$

$$\Delta\overline{U}_{\mathrm{c}j} = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N} u_{\mathrm{cx}ji} - \overline{U}_{\mathrm{c}} \tag{22}$$

$$\Delta I_{\mathrm{leg}j_\mathrm{ref}} = (0 - \Delta\overline{U}_{\mathrm{c}j})(K_{\mathrm{leg_p}} + K_{\mathrm{leg_i}} / s) \tag{23}$$

式中：$\overline{U}_{\mathrm{c}}$为子模块电容电压总平均值；$u_{\mathrm{cx}ji}$为 x 桥臂 j 相第 i 个子模块电容电压；$\Delta\overline{U}_{\mathrm{c}j}$为 j 相桥臂子模块电容电压平均值和总平均值的差值；$K_{\mathrm{leg_p}}$和 $K_{\mathrm{leg_i}}$分别为相间均压 PI 控制环节比例系数和积分系数。

考虑 MMC 由于零序电压的存在，可能导致上下桥臂子模块电容电压不对称，在此利用正序有功电流对上下桥臂子模块电容电压进行调整，同样经过计算可得到调整值 $\Delta I_{\mathrm{arm}j_\mathrm{ref}}$，即：

$$\Delta\overline{U}_{\mathrm{carm}j} = \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N} u_{\mathrm{cp}ji} - \sum_{i=1}^{N} u_{\mathrm{cn}ji}\right) \tag{24}$$

$$\Delta I_{\mathrm{arm}j_\mathrm{ref}} = (0 - \Delta\overline{U}_{\mathrm{carm}j})(K_{\mathrm{arm_p}} + K_{\mathrm{arm_i}} / s) \tag{25}$$

式中：$u_{\mathrm{cp}ji}$和 $u_{\mathrm{cn}ji}$分别为 j 相上下桥臂第 i 个子模块电容电压值；$\Delta\overline{U}_{\mathrm{carm}j}$为 j 相上下桥臂子模块电容电压差值的平均值；$K_{\mathrm{arm_p}}$和 $K_{\mathrm{arm_i}}$分别为上下桥臂子模块均压 PI 控制环节比例系数和积分系数。

而上下桥臂均压控制输出量以及三相相间损耗不平衡等因素可能引入零序交流环流量，该影响因素与后续零序消弧相互影响，因此需保证桥臂内电流中只有消弧期间存在零序分量，而在其他分量中应将其滤除。对上下桥臂电流有功及均压控制量相加后，作如下处理：

$$\begin{cases} i_{\mathrm{parm_zero}} = \left(i_{\mathrm{parm_a}} + i_{\mathrm{parm_b}} + i_{\mathrm{parm_c}}\right)/3 \\ i_{\mathrm{narm_zero}} = \left(i_{\mathrm{narm_a}} + i_{\mathrm{narm_b}} + i_{\mathrm{narm_c}}\right)/3 \end{cases} \tag{26}$$

$$\begin{cases} i_{\text{pj/arm_ref}} = i_{\text{pj/arm}} - i_{\text{parm_zero}} \\ i_{\text{nj/arm_ref}} = i_{\text{nj/arm}} - i_{\text{narm_zero}} \end{cases} \tag{27}$$

式中：i_{parm_j} 和 i_{narm_j} 分别为 j 相上下桥臂电流考虑微调量后的指令值；$i_{\text{parm_zero}}$ 和 $i_{\text{narm_zero}}$ 分别为上下桥臂电流中的零序分量；$i_{\text{pj/arm_ref}}$ 和 $i_{\text{nj/arm_ref}}$ 分别为上下桥臂电流滤除零序分量后的指令值。

目前桥臂电流指令值中仅包含基频有功分量和上下桥臂均压控制量。交流指令值 $i_{\text{pj/arm}}$、$i_{\text{nj/arm}}$ 减去计算得出的零序分量 $i_{\text{parm_zero}}$、$i_{\text{narm_zero}}$ 即可得到滤除后的交流分量。计及零序电流阻隔的上下桥臂电容电压均衡控制策略框图如附录 A 图 A2 所示。

2.2　消弧零序电流指令值计算

配电网在发生单相接地故障时，通过控制 MMC 向配电网注入等同于故障电流的补偿电流可实现对故障电流的抑制，而该方法依赖于配电网对地参数的采集和确定，实际中难以精确确定参数，实现完全补偿。本文采用电压消弧法对故障电流进行抑制，针对不同类型的故障，对接地特征进行分析[21]，通过检测配电网零序电压及其变化率来判断是否发生单相接地故障[22-23]，并采用文献[24]对故障的 j 相进行检测判断。基于计算得出故障相及特征，控制 MMC 输出零序电压，使系统零序电压等于故障相电压的负值，从而控制故障点电压降为 0，实现消弧，控制框图如图 4 所示。该方法主要适用于中、高阻接地故障，考虑在消弧过程中电弧可能存在谐波分量，故 MMC 的消弧零序电流参考分量由式(28)所示的比例重复控制(proportional repetitive control，PRC)对 $U_0+E_j=0$ 进行闭环控制后生成，即：

$$G_{\text{RC}}(z) = \frac{K_{\text{r}} S(z) z^{-N_{\text{RC}}+k}}{1 - Q_{\text{RC}}(z) z^{-N_{\text{RC}}}} \tag{28}$$

式中：指数 $N_{\text{RC}}=f_{\text{s}}/f_1$，$f_{\text{s}}$ 为采样频率，f_1 为基波频率；K_{r} 为重复控制器增益；$Q_{\text{RC}}(z)$为增强重复控制器稳定性的滤波器；z^k 为 k 拍超前补偿，补偿控制器及被控对象的延时；$S(z)$为低通滤波，增强控制器稳定性；$K_{\text{p_RC}}$ 为并联比例系数，可以提高重复控制的动态响应速度。该控制可以对工频信号及其倍频进行控制，实现工频消弧的同时对谐波进行抑制。通过该控制策略，可实现将故障相电压抑制到 0，得到零序电流指令值 i_{0_ref}。

2.3　基于比例重复控制的 MMC 综合控制策略

经过上述分析，通过本文所提的 MMC 桥臂电流控制策略，可计算得出各个桥臂电流指令值，具体表述为：

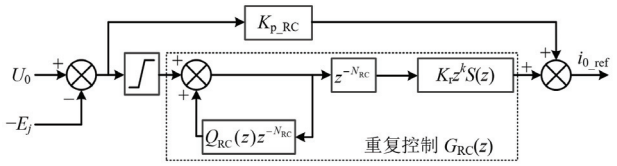


图 4　消弧控制策略框图

Fig.4　Block diagram of arc suppression control method

$$\begin{cases} i_{\text{pj_ref}} = i_{\text{pj/arm_ref}} + \dfrac{1}{3} I_{\text{dc_ref}} + \Delta I_{\text{leg}j_\text{ref}} + \dfrac{1}{2} i_{\text{Qj_ref}} + i_{0_\text{ref}} \\ i_{\text{nj_ref}} = i_{\text{nj/arm_ref}} - \dfrac{1}{3} I_{\text{dc_ref}} - \Delta I_{\text{leg}j_\text{ref}} + \dfrac{1}{2} i_{\text{Qj_ref}} + i_{0_\text{ref}} \end{cases} \tag{29}$$

式中：$i_{\text{pj/arm_ref}}$、$i_{\text{nj/arm_ref}}$ 分别为上述滤除零序分量后的控制量，包括上下桥臂均压分量和基频交流有功信号；$I_{\text{dc_ref}}/3$ 为外环直流电压控制输出值，保证 MMC 直流侧定电压控制；$\Delta I_{\text{leg}j_\text{ref}}$ 为每相直流电流调整值，调整直流环流在每相之间的分配；$i_{\text{Qj_ref}}/2$ 为每相上下桥臂内无功功率瞬时值，控制 MMC 向配电网输出无功功率；i_{0_ref} 为闭环控制计算消弧所需的零序电流值。将上述计算得到的各个分量叠加，即可得到上下桥臂电流指令值。

所得桥臂电流指令值中包括了基频交流信号和直流信号，并无交流环流及倍频谐波分量，将控制电流准确控制为指令值即可实现稳定控制，该方法适用于配电网电压不对称、桥臂参数不对称等工况下进行故障穿越，还可以切换至主动消弧模式，输出零序电流进行消弧。上述各个部分功能的实现，强烈依赖于桥臂电流实际值准确无误追踪计算得出的指令值，因此内环电流控制环节至关重要。而对于交直流耦合分量，不仅要求内环控制环节能对交直流信号进行准确跟踪，还要有较好的谐波抑制能力，以保证 MMC 电能运行质量，传统 PI 控制难以满足对交直流信号的无静差快速跟踪，因此本文采用比例重复控制器进行控制，比例重复控制对特定频次的信号具有较强控制性能，并且可以很好地抑制谐波。

由内模原理可知，基于 PRC 的故障电流抑制方法可以无误差跟踪工频交流指令信号，将故障相电压抑制为 0，且具有较大的稳定性裕度、较强的抗扰动能力和优良的谐波抑制性能。但由于重复控制器的延时特点，其在一个基波周期后才输出对应阶跃信号的控制量，这个控制量将破坏系统稳定运行状态，造成控制量的瞬态突变，其误差信号循环往复，在系统阻尼作用下最终回到稳态。该控制若应

用于消弧控制时，应注意其产生的阶跃突变量，该控制过程与单相接地故障的接地弧光短路过程相冲突，应避免其造成消弧控制期间电弧重燃，导致无法回归到稳态。MMC 桥臂电流综合控制策略框图如图 5 所示。

MMC 桥臂电流综合控制策略由电压外环、电流内环和调制 3 部分组成。电压外环实现直流母线电压控制和无功功率输出控制，加入相间均压和上下桥臂均压控制以及主动消弧零序电流控制，得到桥臂电流指令值，经过电流内环控制实现桥臂电流对指令值的跟踪，得到电压信号进入调制部分。该控制环节均在abc坐标系下进行，相比于 *dq* 坐标系，无需进行多序 *dq* 变换，直接对桥臂电流进行控制，可实现交流电网故障工况下的故障穿越，抑制多频次谐波，消除交流电流中的负序成分，控制零序分量用于消弧，保证 MMC 内部稳定运行。

2.4 MMC 子模块配置

在上述 10 kV 配电网中接入 MMC，其直流侧电压为±10 kV，电压调制比为：

$$k_{\mathrm{m}}=\frac{2U_{\mathrm{sN}}}{U_{\mathrm{dc}}}\approx 0.82 \tag{30}$$

由于本文提出基于 MMC 进行配电网单相接地故障柔性调控，因此需要考虑其上下桥臂子模块输出电压大小，来确定每个桥臂上子模块的数量配置；再根据最大最小电压值，来确定是否采用混合式子模块结构，并确定全桥混合比例。忽略桥臂电感上的压降，桥臂输出电压如式(6)所示，其中 u_{sj} 为网侧电压，包括了正序和零序分量，直流侧对地支路上的压降也叠加在桥臂电压中。则在 MMC 进行主动消弧期间，桥臂输出最大、最小电压分别为：

$$\begin{cases} U_{\max}=\dfrac{1+\sqrt{3}k}{2}U_{\mathrm{dc}}+\dfrac{3}{2}I^{0}Z_{\mathrm{dc}} \\ U_{\min}=\dfrac{1-\sqrt{3}k}{2}U_{\mathrm{dc}}-\dfrac{3}{2}I^{0}Z_{\mathrm{dc}} \end{cases} \tag{31}$$

其中假设原 10 kV 配电网所连 MMC 每个桥臂子模块个数为 N 个且均为半桥子模块，则每个子模块的电容电压为：

$$U_{\mathrm{c_ref}}=\frac{U_{\mathrm{dc}}}{2N} \tag{32}$$

考虑消弧工况下的最大桥臂输出电压，每个桥臂的子模块数量应为 $U_{\max}/U_{\mathrm{c_ref}}$，而全桥子模块的数量应为$|U_{\min}/U_{\mathrm{c_ref}}|$。在 MMC 的 k_{m}=0.82 的情况下，不考虑直流对地支路产生的压降，每个桥臂应配置至少 1.21N 个子模块，其中 0.21N 个子模块应为全桥子模块；若计及直流侧极对地支路压降，则其电压大小与故障电流和接地支路阻抗相关，应结合不同系统网侧参数进行配置设计，以保证 MMC 可进行稳定消弧，其桥臂输出电压示意图如附录 A 图 A3 所示。如附录 A 图 A3(b)所示，在主动消弧期间，桥臂电压输出最大值存在过调制，与上述分析相同，应增加整个桥臂的子模块数量，而桥臂电压输出最小值，小于 0 的部分为输出负值。由于半桥子模块无法输出负值，根据式(32)可计算得到加入的全桥子模块≥0.21N 个。

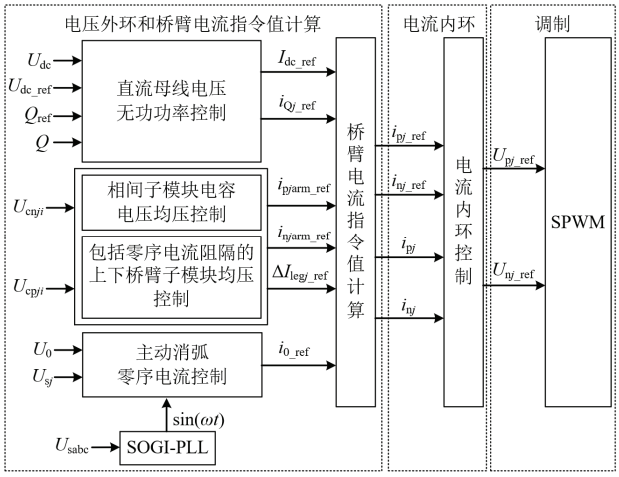


图 5 MMC 桥臂电流综合控制策略框图

Fig.5 Block diagram of comprehensive control strategy of MMC based on arm current control scheme

3 仿真验证

3.1 仿真模型搭建

为验证基于桥臂电流控制的 MMC 单相接地故障柔性调控策略，利用 MATLAB/Simulink 平台搭建基于 MMC 互联的 10 kV 交直流配电网模型，交流配电网中设置有单相接地故障点 F1。仿真拓扑结构如附录 A 图 A4 所示，具体仿真参数如附录 B 表 B1、B2 所示。仿真中，本文采用二阶广义积分锁相环(second order generalized integrator phase locked loop, SOGI-PLL)提取三相电网电压的基波正序分量并进行锁相[25]。

3.2 MMC 主动消弧控制仿真

在仿真模型中，MMC 稳态运行阶段，向直流侧传递 2 MW 有功功率，向交流侧输送 0.6 Mvar 的无功功率。如附录 C 图 C1 所示，设置于 0.9 s 发生单相接地故障，接地过渡电阻为 100 Ω，在 1 s 时投

入消弧。

从仿真波形可以看出，在发生单相接地故障后，故障相电压降低，非故障相电压升高。而在此期间，三相电流保持对称，直流电压保持稳定，交直流功率正常传输，仿真验证了桥臂电流控制策略可以实现故障穿越，系统运行不受影响。在 MMC 进入主动消弧模式后，故障相电压被快速降低，根据所提闭环控制策略，故障相电压不断降低，最终接近 0。故障点处故障电流被转移至直流侧接地支路，可以看到 MMC 三相电流中包括了零序分量，三相电流不对称，且直流侧出口处包括了直流侧对地支路流过的零序电流。而在消弧期间，MMC 直流极间电压保持正常，在此期间传输的有功无功功率保持不变，MMC 正常功率传输没有受到影响。

附录 C 图 C2 为不同过渡电阻情况下的消弧效果，其中(a)、(b)、(c)、(d)分别为 20、50、100、500、1 000、5 000 Ω过渡电阻情况下的消弧仿真结果。从仿真图中可以看出，所提控制策略依然可以将故障电流抑制到接近 0，实现消弧功能。但需要注意的是，随着过渡电阻降低，故障点残流会增大，特别是在金属性单相接地故障场景，电压消弧方法失效。此时需要采用电流消弧法进行消弧。后续将开展电压电流融合消弧方法的研究，以实现在任意过渡电阻的有效消弧。

3.3　考虑谐波的 MMC 主动消弧控制仿真对比

在实际配电网中，单相接地故障常伴有电弧燃烧，电弧的重燃熄灭过程会导致电网电压中存在谐波分量。为此在配电网中各加入幅值为 500 V 的 5、7 次谐波电压，在该情况下配电网发生单相接地故障，过渡电阻为 100 Ω，验证所提控制策略是否仍可以进行有效消弧，并与 *dq* 坐标的常规消弧控制效果进行对比，如图 6 所示，图中 U_f 为故障相电压，I_f 为故障电流。

在 0.4 s 故障发生后，可以看到在故障相电压以及故障电流中均包含谐波分量。在 0.5 s 投入消弧后，采用传统消弧控制策略的残压有效值为 723.68 V，并不能做到可靠消弧。图 7 为本文所提消弧控制策略仿真图，在本文所提消弧控制策略下，故障相电压有效值被抑制为 236.6 V，更有效地降低了故障相电压残压，破坏电弧重燃条件，有助于实现降压消弧[26]。通过对比仿真可知，本文所提重复控制在消弧过程中可以抑制谐波电压，使故障相电压降低至更低的值，保证了消弧功能的可靠进行。

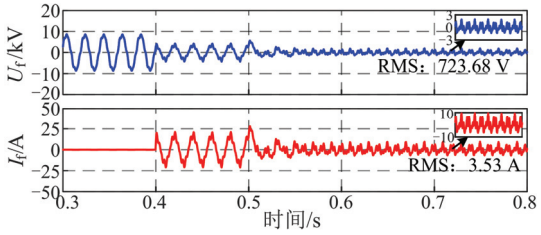


图 6　基于 *dq* 坐标的常规消弧控制策略仿真结果图

Fig.6　Simulation results of traditional arc suppression control strategy in *dq* axis

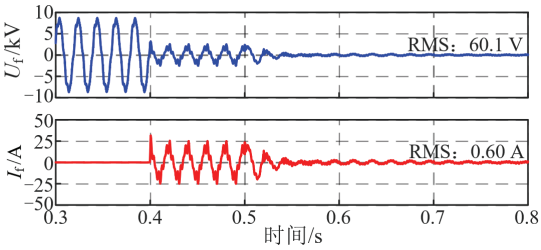


图 7　本文所提消弧控制策略仿真结果图

Fig.7　Simulation results of the proposed arc suppression control strategy

3.4　桥臂电流仿真分析

在 MMC 启动消弧后，桥臂电流中加入零序电流分量，并且由于故障后故障相电压被降低至 0，故障相不传输功率，通过桥臂内直流电流进行功率平衡。将故障相的功率转移至另外 2 个健全相上。其仿真结果如附录 C 图 C3 所示。

从上述仿真中可以看出，在故障发生前，三相桥臂内的直流环流正常分布，直流电流为 100 A，则各相平均分配得到 33 A，三相功率同时进行传输。而在进入消弧后故障相 a 相不传输功率，直流环流降低至 0，功率分配在另外两相。考虑由于消弧产生的零序影响，各相功率不平衡，在相间均压的作用下，bc 两相的直流环流并不完全相等，各相上下桥臂子模块电容电压仿真结果如附录 C 图 C4 所示。通过相间均压以及上下桥臂间均压控制，可实现在消弧期间加入零序控制量后，在短时间内迅速保证子模块电容电压恢复至正常工作值 2 000 V。

此外，关于子模块配置仿真分析见附录 D。由仿真结果可知，在正常工况下，桥臂输出电压满足需要；在投入消弧后，部分相的上下桥臂输出最高电压可达到 24.14 kV，且存在桥臂输出负值电压，超出 10 个半桥子模块的电压输出能力。当每个桥臂增设 5 个全桥子模块之后，由仿真结果可知，此时

桥臂可输出负电平，且非故障相输出电压最高可达30 kV，保证了消弧功能的实现。

4 结论

1)所提出的基于桥臂电流控制的MMC主动故障调控策略可有效应对不同过渡电阻范围的单相接地故障，在含谐波的复杂工况下仍能将故障相电压抑制至100 V以下，提升熄弧能力。

2）在消弧期间，为保证MMC的正常交直流功率传输，本文设计的分层电容电压控制策略通过桥臂间功率均衡与桥臂内调节的双层优化，有效解决了消弧期间子模块电容电压波动问题，确保系统持续可靠运行。

3）通过全桥/半桥子模块混合配置策略，理论推导证明当全桥子模块占比≥21%时，可提升故障期间桥臂输出电压范围，为单相接地故障调控与故障穿越提供足够电压裕度。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] TONG H X, ZENG X J, YU K, et al. Research on the identification method of series arc fault based on the feature sensitivity analysis and the TVA coefficient optimized random forest[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(2): 751-762.

[2] 刘宝稳，王晨雨，曾祥君，等. 三相分布参数不对称配电线路接地故障检测与消弧技术综述[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3684-3695.
LIU Baowen, WANG Chenyu, ZENG Xiangjun, et al. Review on the single line-to-ground fault detection and arc suppression techniques of distribution lines with asymmetric three-phase distribution parameters[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3684-3695.

[3] 郭谋发，游建章，郑泽胤. 配电网单相接地故障柔性消弧技术综述[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4232-4246.
GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHENG Zeyin. Review of flexible arc suppression technology for single-phase-to-ground fault in distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4232-4246.

[4] FERNANDO W S P, MAHMUD M A. A nonlinear discrete-time backstepping model predictive controller design for active arc suppression coils in compensated power systems to mitigate powerline bushfire hazards[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(11): 15077-15088.

[5] LUAN X M, LI X P, WU S Y, et al. Arc suppression control with adaptive parameters of active grounding device considering ground fault resistance uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(1): 426-435.

[6] 喻 锟，杨理斌，曾祥君，等. 风电场集电线路单相接地故障柔性电压消弧与动态保护新原理[J]. 中国电机工程学报，2024，44(5)：1789-1801.
YU Kun, YANG Libin, ZENG Xiangjun, et al. A new principle of flexible voltage arc suppression and dynamic protection for single phase grounding faults of wind farm collector line[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1789-1801.

[7] GUO M F, JIAO Y H, ZHENG Z Y, et al. Online split-phase identification of asymmetric parameters between distribution lines and ground for unbalanced voltage compensation based on power electronics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(8): 10067-10078.

[8] 王义凯，郑海然，乔 健，等. 发电机定子绕组接地故障混合柔性消弧方法[J]. 电力自动化设备，2025，45(3)：109-114，123.
WANG Yikai, ZHENG Hairan, QIAO Jian, et al. Hybrid flexible arc suppression method of generator stator winding grounding fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(3): 109-114, 123.

[9] 喻 泉，曾祥君，喻 锟，等. 基于对地参数双端测量及闭环控制的配电网柔性接地有源消弧方法[J]. 高电压技术，2022，48(3)：1011-1021.
YU Quan, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Flexible-grounding active arc-suppression method for distribution network based on double-end measurement of ground parameters and closed-loop control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1011-1021.

[10] WANG Z, ZENG X J, LI Z W, et al. An active voltage-type grounding fault protection method for medium-voltage distribution networks with neutral point voltage flexible regulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(3): 1538-1548.

[11] 游建章，郭谋发，郑泽胤，等. 配电网接地故障自适应融合抑制方法[J]. 电网技术，2023，47(12)：5215-5224.
YOU Jianzhang, GUO Moufa, ZHENG Zeyin, et al. Adaptive fusion suppression for ground faults in distribution networks[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5215-5224.

[12] 简玉婕，郭谋发，张彬隆. 直流侧免供电的配电网接地故障电流柔性调控方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(6)：2306-2318.
JIAN Yujie, GUO Moufa, ZHANG Binlong. Flexible adjustment and control method for grounding fault in distribution networks without power supply in DC-side[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2306-2318.

[13] HOU Y C, GUO Q, TU C M, et al. Adaptive active voltage-type arc suppression strategy considering the influence of line parameters in active distribution network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(5): 4799-4808.

[14] 郭谋发，刘鑫斌，张彬隆，等. 故障相桥臂转移接地消弧装置直流侧电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(19)：1-14.
GUO Moufa, LIU Xinbin, ZHANG Binlong, et al. DC-link voltage control method of a fault phase bridge arm transfer grounding arc suppression device[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 1-14.

[15] ZHANG B L, GUO M F, LAK M, et al. Minimizing required DC sources of cascaded H-bridge multilevel converter for fault suppression in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(6): 5761-5770.

[16] 张彬隆，郭谋发，简玉婕. 具备接地故障电流转移功能的配电网柔性多状态开关设计方法研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(24)：8910-8920.
ZHANG Binlong, GUO Moufa, JIAN Yujie. Research on design method of flexible multi-state switch with ground fault current transfer function for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8910-8920.

[17] 简玉婕，郭谋发，游建章. 含电力电子变压器的配电网单相接地故障集成化消弧方法[J]. 电力自动化设备，2022，42(5)：125-134.
JIAN Yujie, GUO Moufa, YOU Jianzhang. Integrated arc suppression method of single-phase grounding fault in distribution network with power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 125-134.

[18] JIANG L, YIN X G, LAI J M, et al. A novel voltage arc suppression method for single-phase grounding fault in distribution network based

on power router[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 231: 110369.

[19] BU Z M, WANG J, LI X, et al. Parameters influences analysis and optimization design method for synchronous transformer of switched-capacitor MMC-SST[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 3298-3314.

[20] 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研究[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.

[21] LIU B W, WANG C Y, ZENG X J, et al. Single line-to-ground fault protection method considering three phase-to-ground parameters asymmetry in active flexible grounding systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(4): 2207-2218.

[22] 曾祥君，李　理，喻　锟，等. 配电网相电源馈入中性点的接地故障相主动降压消弧新原理[J]. 中国电机工程学报，2023，43(8)：2953-2965.
ZENG Xiangjun, LI Li, YU Kun, et al. Novel principle of arc suppression for grounding phase voltage actively reduced based on phase power supply feedback in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2953-2965.

[23] 曾祥君，王　沾，喻　锟，等. 相电源馈入中性点的配电网接地故障相主动降压消弧装置及其应用[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3356-3366.
ZENG Xiangjun, WANG Zhan, YU Kun, et al. Arc suppression device for actively reducing grounding fault phase voltage based on phase power supply feedback in distribution network and its application[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3356-3366.

[24] 鲁晓天，唐金锐，尹　昕，等. 基于多维时频特征的新型配电系统单相接地故障定位方法[J]. 高电压技术，2025，51(2)：903-914.
LU Xiaotian, TANG Jinrui, YIN Xin, et al. Single-phase-to-ground fault section location in new-type distribution system based on multi-dimensional time-frequency distribution characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 903-914.

[25] 齐　琛，吕浩敏，李卫星. 采用双二阶广义积分器锁相环的 MMC 多谐波线性化阻抗建模与分析[J]. 电网技术，2024，48(11)：4608-4619.
QI Chen, LÜ Haomin, LI Weixing. Multi-harmonic linearized impedance modeling and analysis of MMC with DSOGI-PLL[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4608-4619.

[26] 刘宝稳，万子雄，曾祥君，等. 融合灭弧信息的有源串联接地配电网故障检测方法[J]. 电网技术，2024，48(11)：4767-4776.
LIU Baowen, WANG Zixiong, ZENG Xiangjun, et al. Fault detection method of active series grounding distribution network combining the arc extinguishing information[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4767-4776.



赖锦木
1990—，男，博士，副教授
主要从事电力电子技术及其在电力系统中应用的研究工作
E-mail: laijinmu@zzu.edu.cn

LAI Jinmu
Ph.D.
Associate professor



陈俊宏
2001—，男，硕士生
主要从事电力电子技术及其在电力系统中应用的研究工作
E-mail: awcjh231209@qq.com

CHEN Junhong



尹　昕(通信作者)
1986—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为新能源配电网控制与保护、新型电力系统电力电子技术、控制理论与应用
E-mail: yinxin@whut. edu.cn

YIN Xin
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-02-20　修回日期　2025-06-11　　编辑　程子丰

附录 A

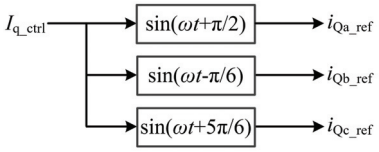


图 A1　无功指令值瞬时值计算

Fig.A1　Calculation of instantaneous reactive power command value

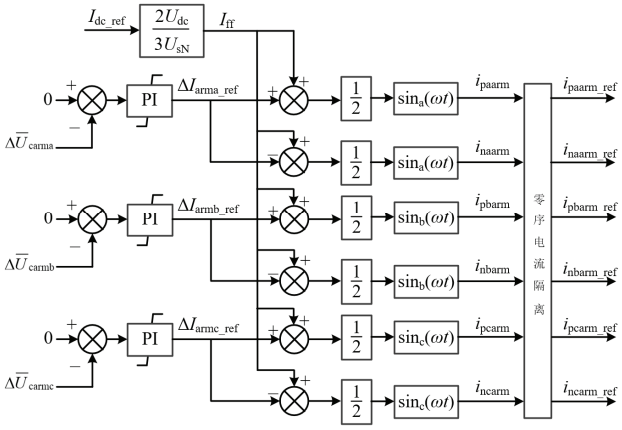
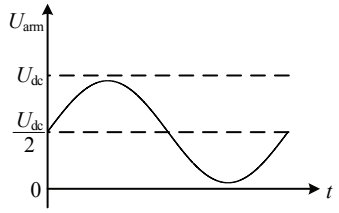
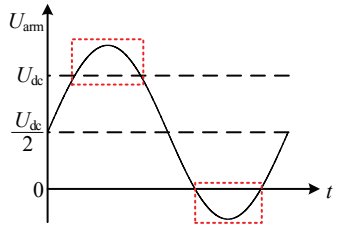


图 A2　上下桥臂均压控制框图

Fig.A2　Diagram of arm voltage balancing control



(a) 正常工况下



(b) 考虑主动消弧期间桥臂输出电压

图 A3　桥臂输出电压波形图

Fig.A3　Arm output voltage waveform

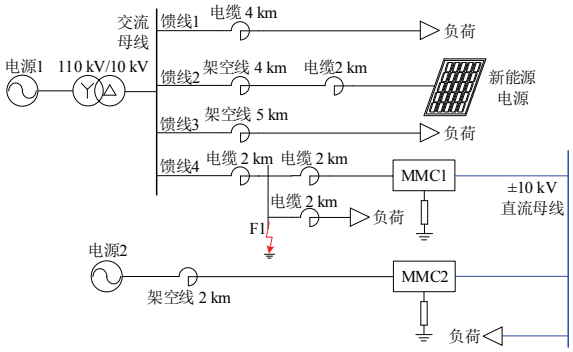


图 A4　仿真拓扑结构图

Fig.A4　Simulation topology diagram

附录 B

表 B1　配电网及 MMC 参数

Table B1　Distribution network and MMC parameters

参数	数值
线电压	10 kV
系统频率	50 Hz
过渡电阻	50, 100, 500, 1 000 Ω
直流电压	±10 kV
直流侧接地阻抗 Z_{dc}	1 000 μF, 50 Ω
额定容量	2 MVA
每桥臂子模块数	15
桥臂电感	40 mH
子模块电容电压	2 000 V
子模块电容值	2 mF
子模块 IGBT 耐压	3 300 V
子模块 IGBT 耐流	180 A

表 B2　线路参数

Table B2　Line parameters

线路类型	相序	电阻/(Ω·km^{-1})	电感/(mH·km^{-1})	电容/(μF·km^{-1})
架空线路	正序	0.125 0	1.300 0	0.009 6
	零序	0.275 0	4.600 0	0.005 4
电缆线路	正序	0.270 0	0.339 0	0.255 0
	零序	2.700 0	0.280 0	1.019 0

附录 C

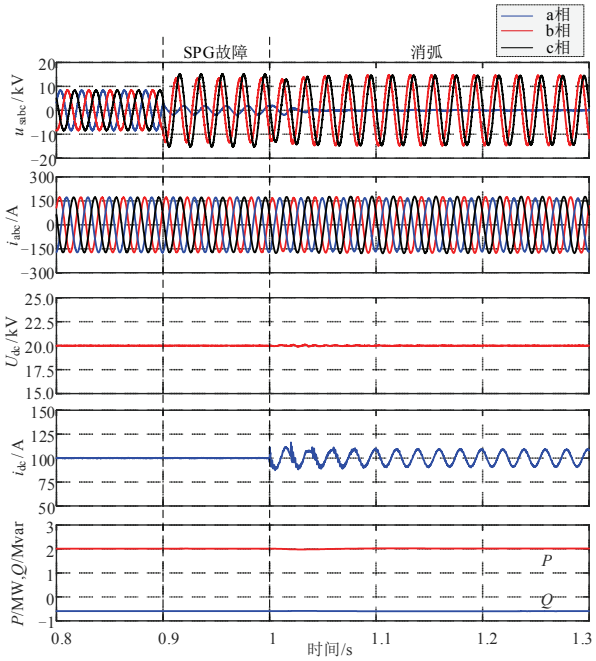


图 C1　MMC 消弧结果仿真波形

Fig.C1　Simulation result of arc suppression by MMC

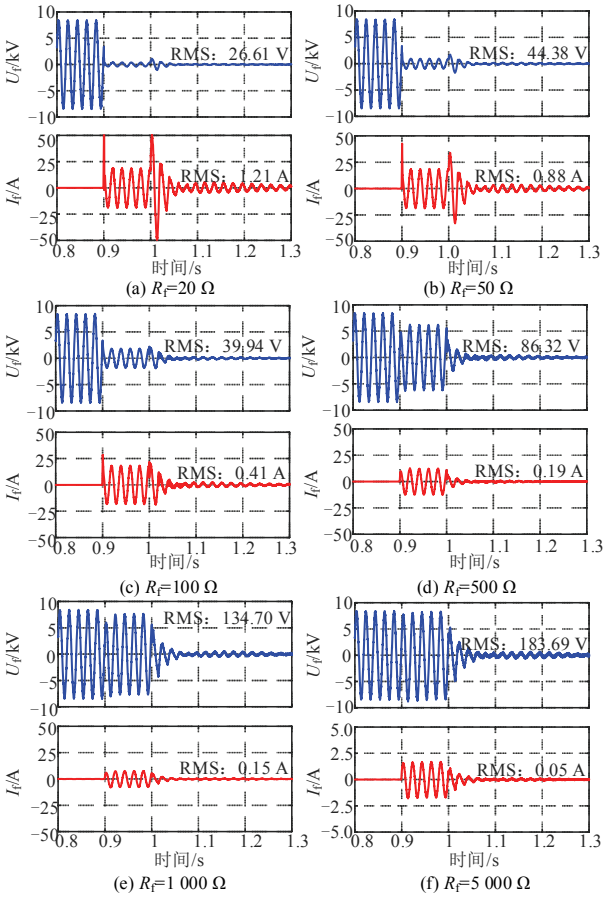


图 C2　MMC 在不同过渡电阻的消弧仿真波形

Fig.C2　Simulation results of arc suppression by MMC under different grounding resistances

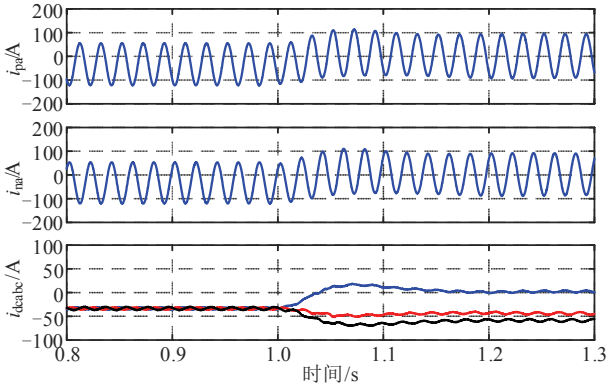


图 C3　消弧期间 MMC 桥臂电流波形

Fig.C3　Waveform of arm current of MMC during arc suppression period

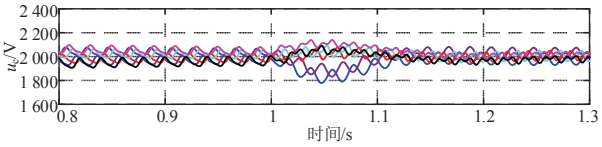


图 C4　MMC 各相上下桥臂子模块电容电压平均值

Fig.C4　Average sub-module capacitor voltage of each upper and lower arm of MMC

附录 D

在配电网三相电压正常稳态工况下，根据上述分析可知，在 k_m=0.82 情况下，如仿真模型中的设置，每个子模块电容电压为 2 000 V，若每个桥臂子模块为 10 个，则无法满足消弧期间桥臂输出电压需求。因此在仿真中设置桥臂子模块存在冗余，各桥臂 15 个子模块，其三相上下桥臂输出电压的仿真结果如图 D1 所示。

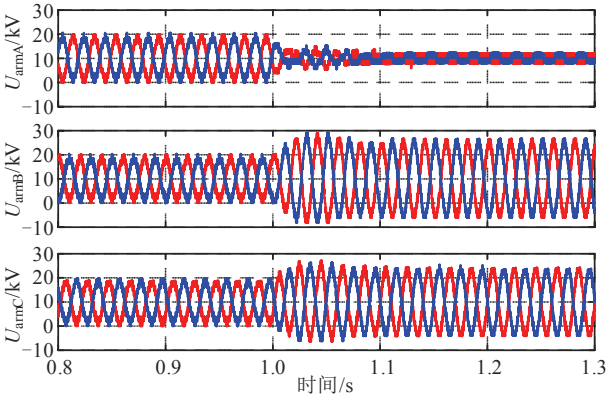


图 D1　MMC 桥臂输出电压波形

Fig.D1　Waveform of MMC arm output voltage