DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.138 **中图分类号**：TM773 **文献标志码**：A

基于异构单元的多功能有源消弧装置拓扑结构及调控策略

刘红文[1]，钱信君[2](中国电源学会学生会员)，郭 祺[2](中国电源学会高级会员)，陈 饶[3]，施从新[3]，黄继盛[3]

(1.云南电网有限责任公司电力科学研究院，昆明 650217；2.国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学)，长沙 410082；3.云南电网有限责任公司临沧供电局，临沧 677000)

摘要：单相接地故障的高质量调控是支撑新型配电网安全运行的重要环节，针对有源消弧装置AASD(active-type arc suppression device)功能单一、成本高昂等问题，提出1种基于异构单元的有源消弧装置HU-AASD(AASD based on heterogeneous unit)拓扑结构及调控策略。首先，HU-AASD利用第四桥臂为虚拟中性点提供电压支撑，使得三相桥臂的耐压需求被降低至相电压，从而降低了AASD的器件成本与体积；其次，所提方案兼具容性和感性无功补偿能力，且接地故障发生后HU-AASD可不间断地向电网提供无功补偿，从而为配电网提供不间断的电压支撑；最后，仿真及实验结果验证了所提拓扑及调控策略的有效性及可行性。

关键词：配电网；单相接地故障；有源消弧装置；无功补偿；多功能

Topological Structure of Multi-functional Active-type Arc Suppression Device Based on Heterogeneous Unit and Its Control Strategy

LIU Hongwen[1], QIAN Xinjun[2], *Student Member*, *CPSS*, GUO Qi[2], *Senior Member*, *CPSS*, CHEN Rao[3], SHI Congxin[3], HUANG Jisheng[3]

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University), Changsha 410082, China; 3. Lincang Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Lincang 677000, China)

Abstract: The high-quality control of a single-phase grounding fault is important for supporting the safe operation of novel distribution network. However, the existing active-type arc suppression devices (AASDs) have some common problems, such as single function and high cost. To address these issues, a topological structure of AASD based on heterogeneous unit (HU-AASD) and its control strategy are proposed. First, the fourth arm is used to provide voltage support for the virtual neutral point of the HU-AASD, and the withstand voltage requirement of three-phase arms are reduced to the phase voltage, thus reducing the cost and volume of AASDs. Second, the capacitive and inductive reactive power compensation capabilities can be provided by the proposed scheme, and the HU-AASD can continuously provide reactive power compensation for the power grid after the single-phase grounding fault occurs, thus providing uninterrupted voltage support for the distribution network. Finally, simulation and experimental results demonstrate the validity and feasibility of the proposed topology and its control strategy.

Keywords: Distribution network; single-phase grounding fault; active-type arc suppression device (AASD); reactive power compensation; multi-functional

收稿日期：2024-11-28；**修回日期**：2024-12-21，2025-01-04；**录用日期**：2025-01-07；**网络首发日期**：2025-01-21

基金项目：南方电网公司科技项目(0562002023030301PD00015)

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid under the grant 0562002023030301PD00015

配电网深入用户终端，配电线路与周围环境交织密切，运行过程中随机性故障频发，其中单相接地故障占比最高[1-2]。传统小电流接地系统允许带故障运行 1~2 h[3]，但是未及时处置的单相接地故障成为了森林火灾、人身触电以及大面积停电的重大安全隐患。因此，新型配电网的单相接地故障自愈和自恢复能力亟待提升。

作为典型的无源消弧装置PASD(passive-type arc suppression device)，消弧线圈凭借结构简单、成本低廉等优势被广泛应用于配电网中[4]。随着电缆的普及应用和非线性负荷的广泛接入，接地故障电流中的有功分量和谐波分量日益增长[5]，但是消弧线圈仅能过补偿接地故障电流的无功分量，残余的无功、有功和谐波分量仍可能导致电弧复燃。因此，现有 PASD 调控能力有限，难以满足新型配电网快速可靠消弧的要求。

凭借接地故障电流完全补偿能力，基于电力电子器件的有源消弧装置 AASD(active-type arc suppression device)吸引了国内外学者的广泛关注。根据接入位置进行划分，AASD 可以分为中性点注入式 AASD 和分相注入式 AASD。中性点注入式 AASD 利用可控单相全桥实现了接地故障电流中无功、有功、谐波分量的全补偿[6]。文献[7-9]提出了基于单相全桥、级联 H 桥和相电源串联全桥等中性点注入式 AASD，但是上述的中性点注入式 AASD 工作于零序回路，由于配电网接地故障频次低、消弧时间短，AASD 闲置率较高。不同于中性点注入式 AASD，分相注入式 AASD 利用三相结构可以工作于正序、负序和零序回路，故而为 AASD 功能拓展提供了有效途径。文献[10-11]提出了三相级联 H 桥 CHB(cascaded H-bridge)直接接地型 AASD，但是各相 CHB 需承受线电压，功率器件投入数量较多；文献[12-13]将直接接地型 AASD 拓展用于无功补偿与有源滤波，但是直接接地型 AASD 的故障相桥臂处于开路状态，难以实现无功补偿与故障调控多功能同时运行，导致接地故障发生时电网无功缺额突增，可能威胁电网稳定运行。为了降低功率器件数量，文献[14]提出了经消弧线圈接地型 AASD，将各相桥臂耐压降低至相电压，但是受到消弧线圈元件特性的制约，其接地故障电流补偿动态性能欠佳，且体积和重量显著增加；文献[15]将第四桥臂的消弧线圈替换为 CHB，提高了 AASD 动态补偿性能和功率密度，但是第四桥臂仅工作于零序回路，需要额外附加供电装置以确保长期可靠消弧，降低了 AASD 的方案经济性。因此，为了兼顾接地故障调控装备经济性与灵活性，既有分相注入式 AASD 存在的成本高昂与多功能分时运行问题亟待突破。

为解决上述问题，本文提出 1 种基于异构单元的有源消弧装置 HU-AASD(AASD based on heterogeneous unit)拓扑结构及调控策略。首先，HU-AASD 由三相桥臂与第四桥臂共同构成，通过第四桥臂为虚拟中性点提供电压支撑，使得三相桥臂的耐压需求被降低至相电压，从而有效降低了有源消弧装置的器件成本与体积；其次，由于三相桥臂与第四桥臂彼此独立，HU-AASD 具备无功补偿与故障调控多种功能同时运行的能力；最后，通过对所提方案与既有 AASD 方案的器件数量、体积及成本进行量化分析，证明所提方案具有功率密度高、装置成本低及无需附加供电装置的优势。

1　HU-AASD 拓扑结构

本文所提 HU-AASD 拓扑结构如图 1 所示，HU-AASD 整体为三相四桥臂结构，每个桥臂均由电压源换流器 VSC(voltage source converter)单元与 CHB 单元串联构成，完全对称。VSC 单元为三相四桥臂结构，每个桥臂由多个 IGBT 器件串联构成。每个桥臂的 CHB 单元由 n 个 H 桥模块级联构成，其中每个 H 桥包含 4 个 IGBT 器件。图中：E_x (x=a, b, c)为配电网相电压；U_0 为中性点电压；U_x (x=a, b, c)为 HU-AASD 并网点电压；U_{sx} (x=a, b, c)为 VSC 单元的输出电压；U_{hx} (x=a, b, c)为 CHB 单元的输出电压；U_{cxn} (x=a, b, c)为 CHB 单元的第 n 个子模块电容电压；U_{dc} 为 VSC 单元的直流母线电压；I_{zx} (x=a, b, c)为 HU-AASD 输出电流；I_{cx} (x=a, b, c)为

线路对地泄漏电流；I_f为接地故障电流；C_{dc}为 VSC 单元的直流母线电容；C_h为 CHB 单元的子模块电容；L 为滤波电感；C_{0x} (x=a, b, c)为线路对地电容；r_{0x} (x=a, b, c)为线路对地电阻；R_f为故障过渡电阻。

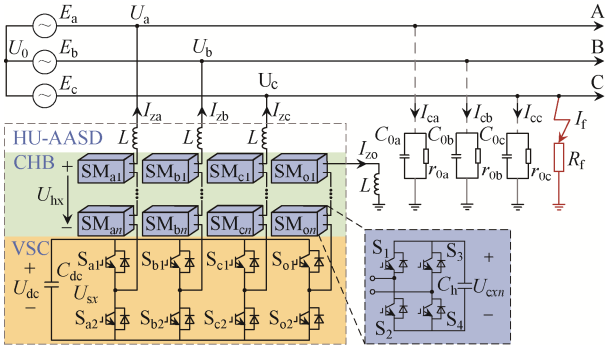


图 1 HU-AASD 拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of HU-AASD

2 HU-AASD 运行原理

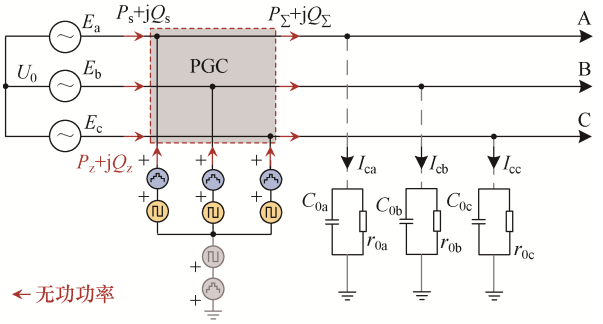
HU-AASD 主要具备 2 种运行模式，分别为无功补偿模式和故障调控模式。电网正常运行时，HU-AASD 运行于无功补偿模式；电网发生接地故障时，HU-AASD 运行于故障调控模式。

2.1 无功补偿模式

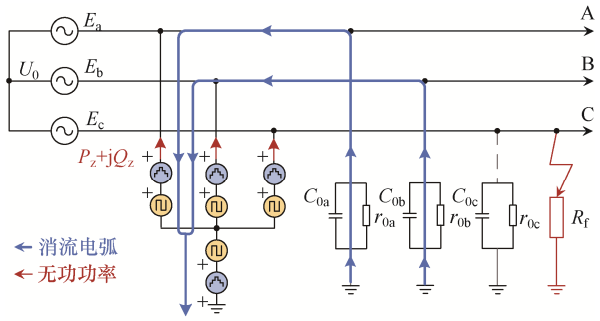
HU-AASD 无功补偿模式原理如图 2(a)所示，HU-AASD 并网点的有功功率 P_z、无功功率 Q_z 存在关系

$$\begin{cases} P_z = P_\Sigma - P_s \\ Q_z = Q_\Sigma - Q_s \end{cases} \tag{1}$$

式中：P_Σ和 Q_Σ分别为并网点下游的有功功率和无功功率；P_s和 Q_s分别为并网点上游的有功功率和无功功率。



(a) 无功补偿模式



(b) 故障调控模式

图 2 HU-AASD 运行原理

Fig. 2 Operation principle for HU-AASD

结合前文分析，P_z=0 时，存在 P_s=P_Σ。此外，HU-AASD 发出容性无功时，Q_z>0；HU-AASD 发出感性无功时，Q_z<0。此时，并网点上游功率因数 λ_s表示为

$$\lambda_s = \frac{P_\Sigma}{\sqrt{P_\Sigma^2 + (Q_\Sigma - Q_z)^2}} \tag{2}$$

若并网点上游功率因数需要提升至给定值 λ_{ref}，HU-AASD 所提供无功功率 Q_z需满足

$$Q_z = \begin{cases} Q_\Sigma - P_\Sigma \dfrac{\sqrt{1-\lambda_{ref}^2}}{\lambda_{ref}} & \text{欠补偿} \\ Q_\Sigma & \text{全补偿} \\ Q_\Sigma + P_\Sigma \dfrac{\sqrt{1-\lambda_{ref}^2}}{\lambda_{ref}} & \text{过补偿} \end{cases} \tag{3}$$

根据电网电压矢量定向方法，P_Σ和 Q_Σ可分别表示为

$$\begin{cases} P_\Sigma = -\dfrac{3}{2}\boldsymbol{U}_d I_{\Sigma d} \\ Q_\Sigma = \dfrac{3}{2}\boldsymbol{U}_d I_{\Sigma q} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{U}_d$为并网点电压矢量；$I_{\Sigma d}$和 $I_{\Sigma q}$分别为并网点下游电流的有功分量和无功分量。类似地，无功功率 Q_z可表示为

$$Q_z = \frac{3}{2}\boldsymbol{U}_d I_{zq} \tag{5}$$

式中，I_{zq}为 HU-AASD 输出电流的无功分量。结合式(3)~式(5)，可得 HU-AASD 无功补偿电流 I_{zq}为

$$I_{zq}=\begin{cases}I_{\Sigma q}+I_{\Sigma d}\dfrac{\sqrt{1-\lambda_{\mathrm{ref}}^2}}{\lambda_{\mathrm{ref}}} & \text{欠补偿}\\ I_{\Sigma q} & \text{全补偿}\\ I_{\Sigma q}-I_{\Sigma d}\dfrac{\sqrt{1-\lambda_{\mathrm{ref}}^2}}{\lambda_{\mathrm{ref}}} & \text{过补偿}\end{cases} \tag{6}$$

分析式(6)可知，通过检测并网点下游电流的有功分量和无功分量，HU-AASD 可调节并网点上游功率因数至给定值 λ_{ref}，从而降低线路损耗。

2.2 故障调控模式

以 C 相发生单相接地故障为例，HU-AASD 故障调控模态原理如图 2(b)所示。

假设馈线 n 对地导纳存在关系

$$Y_{\Sigma n}=\sum_{x=\mathrm{a,b,c}}1/r_{0xn}+\sum_{x=\mathrm{a,b,c}}\mathrm{j}\omega C_{0xn} \tag{7}$$

式中：r_{0xn} 和 C_{0xn} 分别为馈线 n 的对地电阻和对地电容。因此，配电网的对地电阻 r_{0x} 和对地电容 C_{0x} 可分别表示为

$$\begin{cases}r_{0x}=1/\left(\sum\limits_{n=1}^{N}1/r_{0xn}\right)\\ C_{0x}=\sum\limits_{n=1}^{N}C_{0xn}\end{cases} \tag{8}$$

基于图 1，可列写对地节点 KCL 方程为

$$I_{\mathrm{ca}}+I_{\mathrm{cb}}+I_{\mathrm{cc}}+I_{\mathrm{f}}-I_{\mathrm{zo}}=0 \tag{9}$$

$$\begin{cases}I_{\mathrm{ca}}=(E_{\mathrm{a}}-E_{\mathrm{c}})\left(\dfrac{1}{r_{0\mathrm{b}n}}+\mathrm{j}\omega C_{0\mathrm{b}n}\right)\\ I_{\mathrm{cb}}=(E_{\mathrm{b}}-E_{\mathrm{a}})\sum\limits_{n=1}^{N}\left(\dfrac{1}{r_{0\mathrm{b}n}}+\mathrm{j}\omega C_{0\mathrm{b}n}\right)\\ I_{\mathrm{cc}}=0\end{cases} \tag{10}$$

结合式(9)和式(10)，HU-AASD 第四桥臂输出消弧电流 I_{zo} 可表示为

$$\begin{aligned}I_{\mathrm{zo}}=&(E_{\mathrm{b}}-E_{\mathrm{c}})\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{1}{r_{0\mathrm{b}n}}+\mathrm{j}\omega C_{0\mathrm{b}n}\right)+\\&(E_{\mathrm{a}}-E_{\mathrm{c}})\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{1}{r_{0\mathrm{c}n}}+\mathrm{j}\omega C_{0\mathrm{c}n}\right)\end{aligned} \tag{11}$$

根据前文分析，由于三相桥臂与第四桥臂彼此独立，故障调控模式下第四桥臂负责调控接地故障，而三相桥臂仍可持续地进行无功补偿，为电网提供不间断的无功支撑。

3　HU-AASD 故障调控机理及策略

为了有效降低桥臂的耐受电压，首先构建故障调控模式的桥臂耐压影响机理；其次，基于第四桥臂最优输出电压，分析无功补偿与故障调控多种功能的同时运行原理；最后，提供 HU-AASD 的整体控制策略。

3.1 故障调控模式桥臂耐压影响机理

通过灵活控制第四桥臂输出电压，可为 HU-AASD 的虚拟中性点提供电压支撑，从而降低三相桥臂的耐压需求，故障调控模式的耐压相量如图 3 所示。

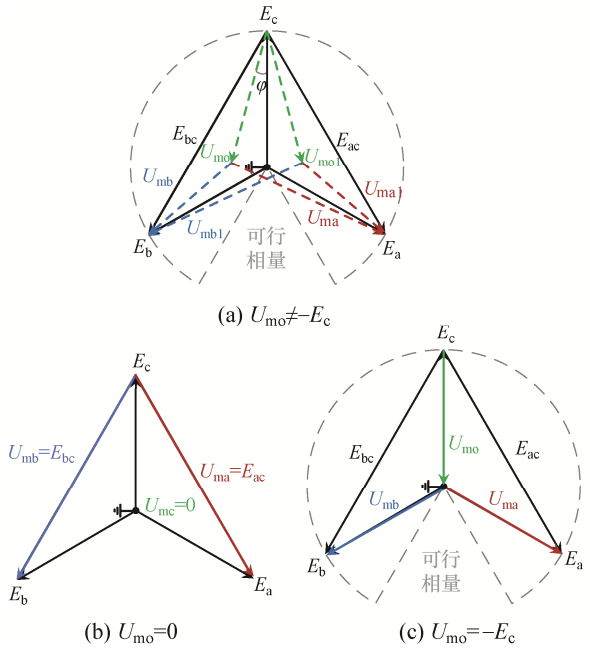


图 3　故障调控模式桥臂耐压相量

Fig. 3 Withstand voltage phasor of arm in fault control mode

以 C 相发生单相接地故障为例，当接地故障得到完全调控时，三相桥臂的耐压 U_{ma}、U_{mb}、U_{mc} 分别满足

$$\begin{cases} U_{\mathrm{ma}} = (E_{\mathrm{a}} - E_{\mathrm{c}}) - U_{\mathrm{mo}} \\ U_{\mathrm{mb}} = (E_{\mathrm{b}} - E_{\mathrm{c}}) - U_{\mathrm{mo}} \\ U_{\mathrm{mc}} = -U_{\mathrm{mo}} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$U_{\mathrm{mo}} = |U_{\mathrm{mo}}| \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}$，其中，$|U_{\mathrm{mo}}|$为第四桥臂输出电压幅值，$\varphi$ 为第四桥臂输出电压滞后于$-E_{\mathrm{c}}$ 的相角。

结合式(12)与图 3(a)，可进一步得到三相桥臂耐压幅值$|U_{\mathrm{ma}}|$、$|U_{\mathrm{mb}}|$、$|U_{\mathrm{mc}}|$与第四桥臂输出电压U_{mo}的关系为

$$\begin{cases} |U_{\mathrm{ma}}| = \sqrt{3E^2 + |U_{\mathrm{mo}}|^2 - 2\sqrt{3}E|U_{\mathrm{mo}}|\cos(\pi/6 + \varphi)} \\ |U_{\mathrm{mb}}| = \sqrt{3E^2 + |U_{\mathrm{mo}}|^2 - 2\sqrt{3}E|U_{\mathrm{mo}}|\cos(\pi/6 - \varphi)} \\ |U_{\mathrm{mc}}| = |U_{\mathrm{mo}}| \end{cases} \tag{13}$$

分析式(13)可知，通过调控第四桥臂输出电压的幅值及相位，可间接地控制三相桥臂的耐压幅值。如图 3(a)所示，在可行相量区间内，当第四桥臂输出电压 $U_{\mathrm{mo}} \neq -E_{\mathrm{c}}$时，将导致其中一个非故障相桥臂耐压超过相电压，而另一个非故障相桥臂耐压低于相电压。如图 3(b)所示，当第四桥臂输出电压$U_{\mathrm{mo}}=0$ 时，三相桥臂的耐压与直接接地型 AASD 相同，即非故障相桥臂双端耐受线电压，故障相桥臂双端耐受电压接近于 0。

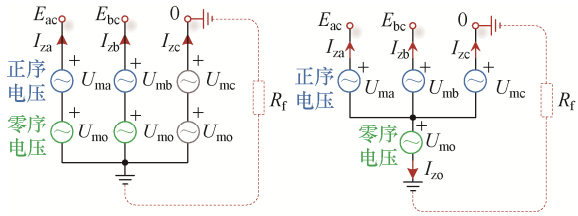
为了优化装置的整体成本，应平衡各桥臂的双端耐受电压，即$|U_{\mathrm{ma}}| = |U_{\mathrm{mb}}| = |U_{\mathrm{mc}}|$。因此，结合式(13)可进一步得到第四桥臂最优输出电压为

$$U_{\mathrm{mo}} = E\mathrm{e}^{\mathrm{j}0^\circ} \tag{14}$$

如图 3(c)所示，当第四桥臂输出电压 $U_{\mathrm{mo}}=-E_{\mathrm{c}}$ 时，三相桥臂与第四桥臂的耐压将均为相电压。综上所述，通过控制第四桥臂输出电压为负故障相电压，可将三相桥臂的耐压需求由线电压降低至相电压，从而有效降低了有源消弧装置的器件成本与体积。

3.2 多种功能同时运行原理

相较于直接接地型 AASD，所提 HU-AASD 的三相桥臂与第四桥臂的控制完全解耦，进而将多种功能的运行模式由分时运行提升至同时运行，故障调控模式等效电路如图 4 所示。



(a) 直接接地型AASD (b) 所提HU-AASD

图 4 故障调控模式等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit in fault control mode

对于直接接地型 AASD，其虚拟中性点直接接地，故障相桥臂等效于开路状态，如图 4(a)所示。因此，直接接地型 AASD 向电网注入的有功功率与无功功率可分别表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{z}} = E_{\mathrm{ac}} I_{\mathrm{za}} \cos\varphi_{\mathrm{a}} + E_{\mathrm{bc}} I_{\mathrm{zb}} \cos\varphi_{\mathrm{b}} \\ Q_{\mathrm{z}} = E_{\mathrm{ac}} I_{\mathrm{za}} \sin\varphi_{\mathrm{a}} + E_{\mathrm{bc}} I_{\mathrm{zb}} \sin\varphi_{\mathrm{b}} \end{cases} \tag{15}$$

式中，φ_{a}与 φ_{b}分别 A、B 相桥臂的功率因数角。

根据式(10)可知，为了实现单相接地故障的完全补偿，应同时满足

$$\begin{cases} I_{\mathrm{za}} = -I_{\mathrm{ca}} = (E_{\mathrm{c}} - E_{\mathrm{a}})(1/r_{0an} + \mathrm{j}\omega C_{0bn}) \\ I_{\mathrm{zb}} = -I_{\mathrm{cb}} = (E_{\mathrm{c}} - E_{\mathrm{b}})(1/r_{0bn} + \mathrm{j}\omega C_{0bn}) \end{cases} \tag{16}$$

因此，受到接地故障完全补偿的约束，直接接地型 AASD 的输出电压与输出电流均无法灵活调控。因此，故障调控模式下直接接地型 AASD 仅向电网注入消弧电流，难以实现无功补偿与故障调控的多种功能的同时运行。

对于所提 HU-AASD，其虚拟中性点经第四桥臂接地，各桥臂的双端耐受电压均为相电压，如图 4(b)所示。因此，HU-AASD 向电网注入的正序有功功率和正序无功功率可分别表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{zp}} = E_{\mathrm{a}}(I_{\mathrm{za}} + I_{\mathrm{zo}}/3)\cos\varphi_{\mathrm{a}} + E_{\mathrm{b}}(I_{\mathrm{zb}} + I_{\mathrm{zo}}/3) \\ \qquad \cos\varphi_{\mathrm{b}} + E_{\mathrm{c}}(I_{\mathrm{zc}} + I_{\mathrm{zo}}/3)\cos\varphi_{\mathrm{c}} \\ Q_{\mathrm{zp}} = E_{\mathrm{a}}(I_{\mathrm{za}} + I_{\mathrm{zo}}/3)\sin\varphi_{\mathrm{a}} + E_{\mathrm{b}}(I_{\mathrm{zb}} + I_{\mathrm{zo}}/3) \\ \qquad \sin\varphi_{\mathrm{b}} + E_{\mathrm{c}}(I_{\mathrm{zc}} + I_{\mathrm{zo}}/3)\sin\varphi_{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{17}$$

式中，φ_{c}为 C 相桥臂的功率因数角。

类似地，HU-AASD 向电网注入的零序有功功率和零序无功功率可分别表示为

$$\begin{cases} P_{zo} = E_c I_{zo} \cos\varphi_o \\ Q_{zo} = E_c I_{zo} \sin\varphi_o \end{cases} \tag{18}$$

式中，φ_o为第四桥臂的功率因数角。

分析式(17)与式(18)可知，得益于第四桥臂的解耦作用，HU-AASD 可实现无功补偿与故障调控模式多种功能的同时运行，从而在接地故障期间仍为电网提供不间断的无功支撑。

作为正序功率与零序功率交换的媒介，VSC 单元的直流母线电容电压稳定对于保证 HU-AASD 至关重要。为了便于分析，假设 4 个桥臂电流分别表示为

$$\begin{cases} I_{za} = I_{mp}\sin(\omega t+\varphi_p) + I_{mo}\sin(\omega t+\varphi_o)/3 \\ I_{zb} = I_{mp}\sin(\omega t+\varphi_p-2\pi/3) + I_{mo}\sin(\omega t+\varphi_o)/3 \\ I_{zc} = I_{mp}\sin(\omega t+\varphi_p+2\pi/3) + I_{mo}\sin(\omega t+\varphi_o)/3 \\ I_{zo} = -I_{mo}\sin(\omega t+\varphi_o) \end{cases} \tag{19}$$

式中：I_{mp}和 I_{mo}分别为正序和零序电流幅值；φ_p和 φ_o分别为正序和零序电流相位。

单位周期 T 中，VSC 单元直流电容电压满足

$$U_{dc} = U_{dc0} + \frac{1}{TC_{dc}}\int_0^T i_{dc}\mathrm{d}t \tag{20}$$

式中：U_{dc0}为直流母线电压初始值；i_{dc}为 VSC 单元直流电容电流，具体表示为

$$\begin{aligned} i_{dc} = {} & \mathrm{sign}(U_a^*)I_{za} + \mathrm{sign}(U_b^*)I_{zb} + \\ & \mathrm{sign}(U_c^*)I_{zc} + \mathrm{sign}(U_o^*)I_{zo} \end{aligned} \tag{21}$$

式中：sign(x)为符号函数，当 x>0 时，sign(x)=1，当 x<0 时，sign(x)=−1。

结合式(19)~式(21)，VSC 单元直流电容电压可进一步表示为

$$U_{dc} = U_{dc0} + \frac{6I_{mp}\cos\varphi_p}{\pi C_{dc}} - \frac{2I_{mo}\cos\varphi_o}{\pi C_{dc}} \tag{22}$$

为了保证正序功率与零序功率的交换，需满足单位周期内直流母线电容电压波动为 0，即 U_{dc}=U_{dc0}。根据式(22)可进一步得到

$$3I_{mp}\cos\varphi_p = I_{mo}\cos\varphi_o \tag{23}$$

分析式(23)可知，通过控制三相桥臂的正序电流可实现 VSC 单元的直流母线电容电压稳定，进而实现 HU-AASD 的无功补偿与故障调控功能。

3.3 控制策略

为实现 HU-AASD 的可靠运行，基于分级调控思想构建 HU-AASD 整体控制策略，如图 5 所示。上级调控策略主要包括 HU-AASD 总体稳压外环、无功补偿电流内环、故障调控电流内环；下级调控策略主要包括 VSC 单元调制策略、CHB 单元子模块电容稳压外环和 CHB 单元调制策略。

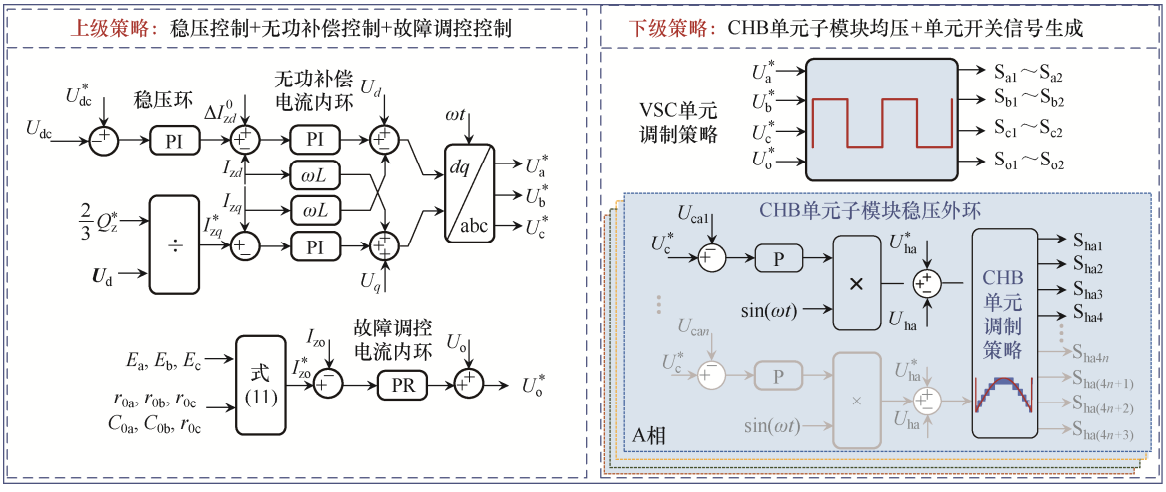


图 5　HU-AASD 控制策略

Fig. 5 Control strategy for HU-AASD

上级控制策略：需控制 HU-AASD 直流母线电容电压稳定于给定值，同时生成用于无功补偿的三相桥臂调制波U_a^*、U_b^*、U_c^*，以及用于故障调控的第四桥臂调制波U_o^*，主要包括 3 个部分：①总体稳压控制环，控制 HU-AASD 的 VSC 单元直流侧电压稳定于给定值；②无功补偿电流内环，实现

稳压有功电流、无功补偿电流的分离解耦控制，保证了 HU-AASD 总体能量平衡和不间断无功支撑能力；③故障调控电流内环，利用式(11)计算消弧电流参考值 I_{zo}^{*}，通过对第四桥臂输出电流 I_{zo} 进行反馈闭环控制，从而确保了 HCM-AASD 具备快速响应的故障调控能力。

下级调控策略：需输出相应的 VSC 单元开关信号；同时需控制各桥臂 CHB 单元子模块电容电压稳定，并输出相应的 CHB 单元开关信号，主要包括 3 个部分：①VSC 单元调制策略；②CHB 单元调制策略；③CHB 单元子模块稳压外环，将各桥臂子模块电容电压进行反馈闭环控制，进而得到 CHB 单元子模块稳压有功分量。相关调制策略在文献[16]中已得到详细的分析，本文不再赘述。

4 参数设计方法及方案对比

4.1 参数设计方法

为了便于分析，假设配电网的对地电阻与对地电容完全对称，即 $r_{0a}=r_{0b}=r_{0bc}=r_0$，$C_{0a}=C_{0b}=C_{0bc}=C_0$。结合式(11)与式(19)，接地故障调控模式桥臂电流可进一步表示为

$$\begin{cases} I_{za}=\mathrm{j}kE_a-E_c(1/r_0+\mathrm{j}\omega C_0) \\ I_{zb}=\mathrm{j}kE_b-E_c(1/r_0+\mathrm{j}\omega C_0) \\ I_{zc}=\mathrm{j}kE_c-E_c(1/r_0+\mathrm{j}\omega C_0) \\ I_{zo}=3E_c(1/r_0+\mathrm{j}\omega C_0) \end{cases} \tag{24}$$

式中，k 为无功补偿系数，$k=E/I_{mp}$。

根据式(24)，桥臂容量 S_{zx} 可进一步表示为

$$\begin{cases} S_{za}=\mathrm{j}kE_a^2-E_aE_c(1/r_0+\mathrm{j}\omega C_0) \\ S_{zb}=\mathrm{j}kE_b^2-E_bE_c(1/r_0+\mathrm{j}\omega C_0) \\ S_{zc}=\mathrm{j}kE_c^2-E_c^2(1/r_0+\mathrm{j}\omega C_0) \\ S_{zo}=-3E_c^2(1/r_0+\mathrm{j}\omega C_0) \end{cases} \tag{25}$$

分析式(25)可知，由于第四桥臂不存在正序电流，三相桥臂容量与第四桥臂容量存在差异。因此，三相桥臂与第四桥臂的设计容量 S_{zf} 与 S_{zof} 应分别满足

$$\begin{cases} S_{zf}\geqslant mE^2\sqrt{1/r_0^2+k^2-2k\omega C_0+\omega^2C_0^2} \\ S_{zof}\geqslant 3mE^2\sqrt{1/r_0^2+\omega^2C_0^2} \end{cases} \tag{26}$$

式中：m 为可靠系数，$m\approx 1.05$。其余参数设计的方法在文献[17]中已得到详细分析，本文不再赘述。

4.2 方案对比

为了清晰展示所提方案的优势，对本文所提方案与 3 种既有有源消弧装置方案进行对比分析：①直接接地型 AASD[9]；②经消弧线圈接地型 AASD[14]；③经单相 CHB 接地型 AASD[15]；④本文所提 HU-AASD。为了便于清晰对比，以上方案均按照如下条件进行：装置额定容量为 2.5 MVA，接地故障电流补偿最大值为 180 A。基于此，对不同有源消弧装置方案同时运行能力、桥臂耐压和器件数量进行对比分析，结果见表 1。

对 VSC 单元与 CHB 单元的电容参数进行设计，同时保留一定裕量，VSC 单元的直流侧电容取

表 1 不同 AASD 方案对比分析

Tab. 1 Comparative analysis of different AASD schemes

对比方案	同时运行能力	桥臂耐压	桥臂级联数	消弧线圈	供电装置	500 μF 电容数	6 000 μF 电容数	FF300R17KE3 数量	方案成本/元	方案体积/L
方案①	—	线电压	13	无	有	—	42	84	463 736.28	959.31
方案②	√	相电压	8	有	有	—	24	48	281 708.16	2 044.18
方案③	√	相电压	8	无	无	—	32	64	353 322.88	730.90
方案④	√	相电压	4	无	无	2	16	48	209 298.92	393.63

500 μF，耐压值为 4 200 V；CHB 单元的子模块电容值取 6 000 μF，额定电压值为 1 200 V；IGBT 器件采用 Infineon 公司 FF300R17KE3，单管耐压为 1 700 V，相关体积与成本参数均引用于 Chemi-Con 与 Infineon 公司官网公开数据。

由表 1 可知：同时运行能力方面，故障调控

模态时，方案①故障相桥臂的双端电压接近于 0，难以吸收有功功率以维持直流侧电容电压稳定，仅可分时实现无功补偿和故障调控功能。由于第四桥臂为虚拟中性点提供了电压支撑，方案②~方案④各桥臂的双端耐压均接近于相电压，可同时实现无功补偿和故障调控功能。桥臂耐压方面，故障调控模态时，方案①非故障相桥臂耐压接近于线电压，为了保证装置可靠运行，各桥臂耐压应依据线电压进行设计。方案②~方案④各桥臂耐压均接近于相电压，各桥臂耐压仅需依据相电压进行设计。装置成本方面，相较于方案①与方案②，所提方案无需附加额外供电装置与无源消弧线圈，有效提升了装置经济性与功率密度。相较于方案①~方案③，所提方案的子模块电容数量分别降低 61.9%、33.3%、50.0%，所提方案的开关器件数量分别降低 42.9%、0%、19.0%，方案成本分别降低 54.87%、25.70%、40.76%。装置体积方面，相较于方案①~方案③，所提方案体积分别降低 58.97%、80.74%、46.14%。

5　仿真及实验验证

5.1　仿真参数

为了验证本文拓扑结构及调控策略的有效性，在 MATLAB/Simulink 仿真平台中搭建了 HU-AASD 仿真模型，具体仿真参数见表 2。

表 2　仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

类型	参数	数值
配电网	线电压有效值 E_{ab}/kV	10
	对地电容 C_0/μF	15
	对地电阻 r_0/kΩ	10
	故障过渡电阻 R_f/Ω	100
	负载有功功率 P_L/MW	5
	负载无功功率 Q_L/Mvar	+2.0/−1.5
HU-AASD	VSC 单元直流母线电压 U_{dc}/kV	4.2
	VSC 单元直流母线电容 C_{dc}/μF	500
	CHB 单元总模块数 n	4
	CHB 单元子模块电容电压 U_c/kV	1.2
	CHB 单元子模块电容 C_h/μF	6 000
	滤波电感 L/mH	6

5.2　无功补偿模式仿真验证

为了验证 HU-AASD 运行于无功补偿模式的有效性，设定如下运行工况：0.6 s 时刻，负荷有功功率 P_L 保持不变，负荷无功功率 Q_L 由+2.0 Mvar 变化为−1.5 Mvar。HU-AASD 无功补偿模式仿真波形如图 6。如图 6(a)所示，由于 HU-AASD 兼具感性和容性无功补偿能力，因而负荷的功率因数不影响 HU-AASD 无功补偿效果，电网电源侧始终维持单位功率因数运行。如图 6(b)所示，单位周期内，HU-AASD 具备动态响应无功补偿变化的能力，由于对地电容的容性无功功率可以部分补偿负荷感性无功功率，因而 HU-AASD 容性无功补偿电流低于感性无功补偿电流。如图 6(c)所示，VSC 单元的

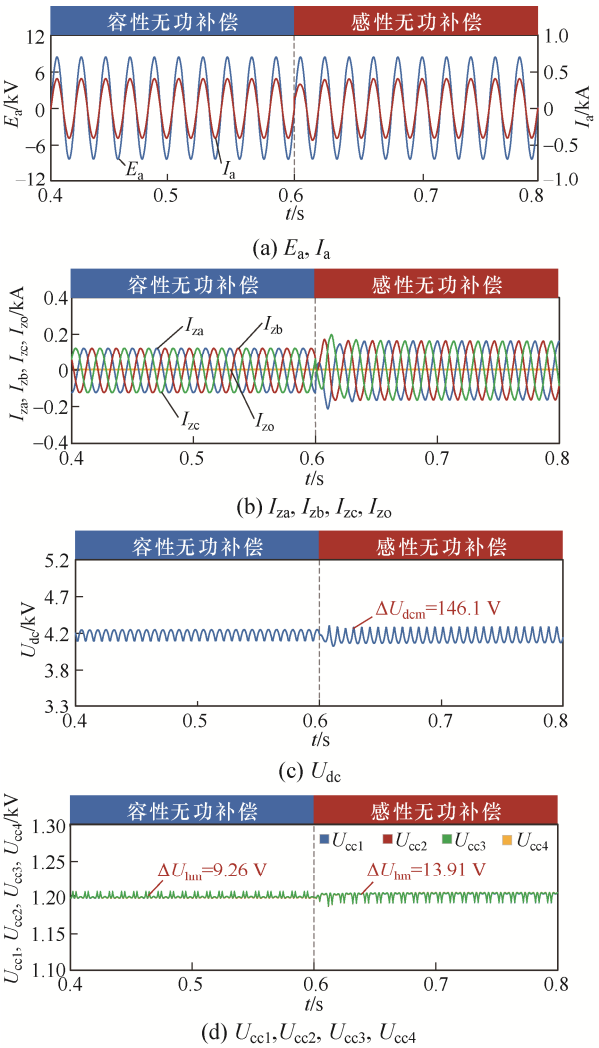


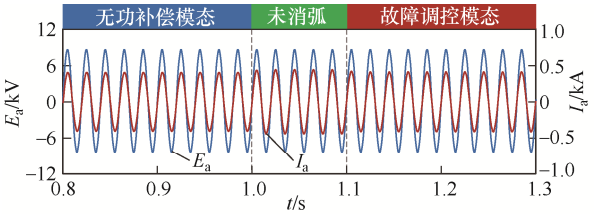
图 6　无功补偿模式仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms in reactive power compensation mode

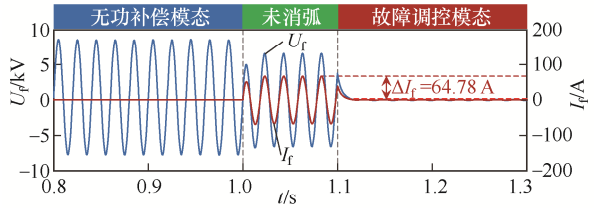
直流母线电压 U_{dc} 均围绕参考值 4 200 V 波动，直流侧电压波动最大值为 146.1 V，波动幅度处于参考值±7%以内。如图 6(d)所示，以 C 相为例，CHB 单元的子模块电容电压 U_{cc1}、U_{cc2}、U_{cc3}、U_{cc4} 均围绕参考值 1 200 V 波动，容性无功补偿时，子模块电容电压波动最大值为 9.26 V；感性无功补偿时，子模块电容电压波动最大值为 13.91 V，波动幅度均处于参考值±7%以内，验证了 HU-AASD 拓扑能量平衡及无功补偿策略的有效性。

5.3 故障调控模式仿真验证

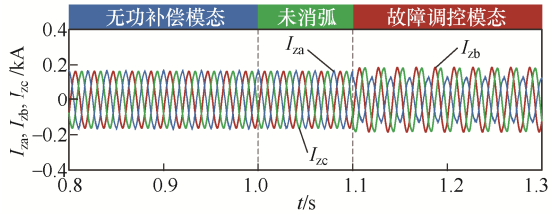
为了验证 HU-AASD 运行于故障调控模态的有效性，设定如下运行工况：1.0 s 时刻，A 相发生单相接地故障；1.0~1.1 s 阶段，HU-AASD 仍然运行于无功补偿模态；1.1 s 时刻，HU-AASD 切换至故障调控模态。HU-AASD 故障调控模态仿真波形如图 7。如图 7(a)所示，故障调控模态下，HU-AASD 仍可为电网提供不间断的无功支撑，故障发生前后，电网电源侧始终维持单位功率因数运行。如图 7(b)、(c)和(d)所示，HU-AASD 未进行消弧时，故障点残流 I_f 达到 65.49 A，故障点残压 U_f 达到 6 550.99 V，严重威胁了配电网安全可靠运行；



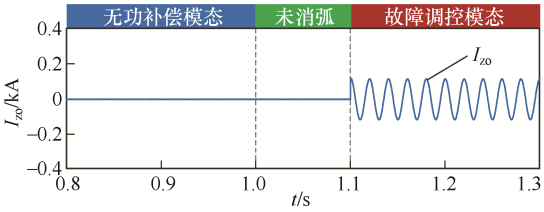
(a) E_a, I_a



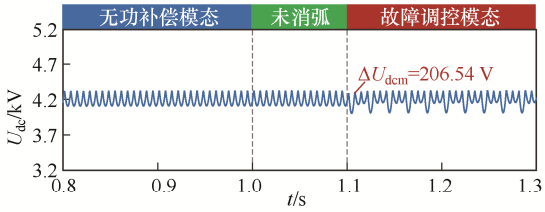
(b) U_f, I_f



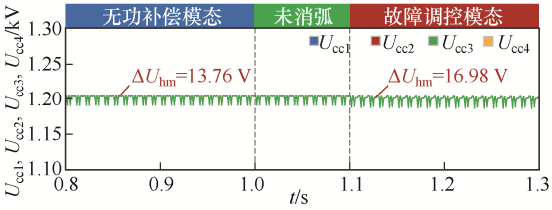
(c) I_{za}, I_{zb}, I_{zc}



(d) I_{zo}



(e) U_{dc}



(f) U_{cc1},U_{cc2}, U_{cc3}, U_{cc4}

图 7 故障调控模式仿真波形

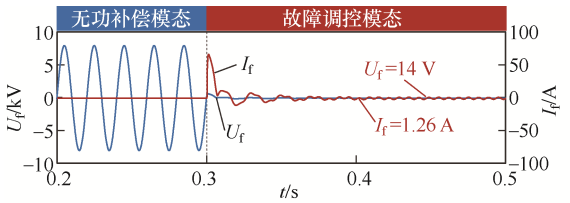
Fig. 7 Simulation waveforms in fault control mode

HU-AASD 切换至故障调控模态后，通过第四桥臂注入消弧电流 I_{zo}，故障电流残流 I_f 被抑制为 0.71 A，故障点残压被抑制为 65 V，消弧率达到 98.91%，实现了配电网接地故障的长期可靠调控。如图 7(e)所示，故障调控模态时，VSC 单元的直流母线电压 U_{dc} 围绕参考值 4 200 V 波动；由于第四桥臂输出电流的存在，直流侧电压的波动更加剧烈，直流侧电压波动最大值为 206.54 V，波动幅度处于参考值±7%以内。如图 7(f)所示，以 C 相为例，CHB 单元子模块电容电压 U_{cc1}、U_{cc2}、U_{cc3}、U_{cc4} 均围绕参考值 1 200 V 波动，无功补偿模态时，子模块电容电压波动最大值为 13.76 V；故障调控模态时，子模块电容电压波动最大值为 16.98 V，波动幅度均处于参考值±7%以内，有效验证了 HU-AASD 拓扑能量平衡及故障调控策略的有效性。

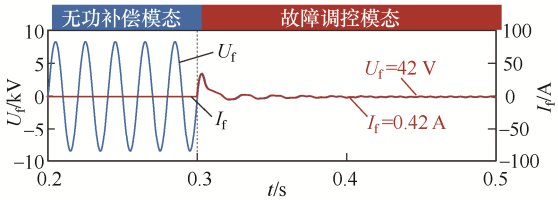
5.4 不同接地故障工况仿真验证

为了验证所提 HU-AASD 在不同接地故障工况下的调控能力，分别设置故障过渡电阻 R_f 为 10、100、1 000、10 000 Ω，其他仿真参数与前文保持一致，不同接地故障工况调控效果仿真波

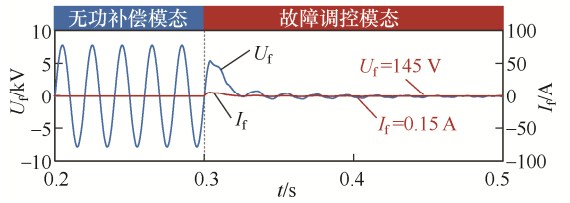
形如图 8。如图 8(a)所示，当 R_f= 10 Ω 时，故障电流残流 I_f被抑制为 1.26 A，故障点残压被抑制为 14 V。如图 8(b)所示，当 R_f= 100 Ω 时，故障电 0 流残流 I_f被抑制为 0.42 A，故障点残压被抑制为 42 V。如图 8(c)所示，当 R_f= 1 000 Ω 时，故障电流残流 I_f被抑制为 0.15 A，故障点残压被抑制为 145 V。如图 8(d)所示，当 R_f= 10 000 Ω 时，故障电流残流 I_f被抑制为 0.01 A，故障点残压被抑制为 160 V，有效验证了 HU-AASD 在不同接地故障工况下的调控能力。



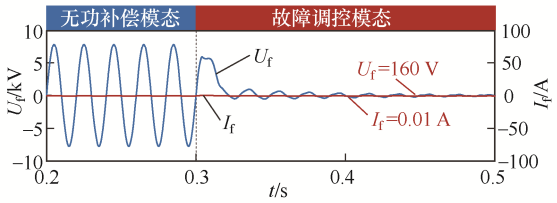
(a) R_f=10 Ω



(b) R_f=100 Ω



(c) R_f=1 000 Ω



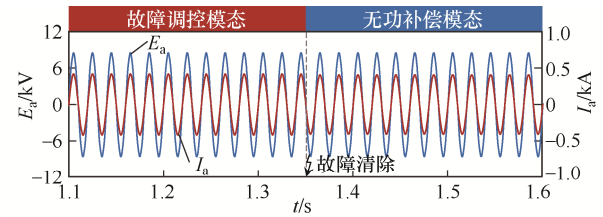
(d) R_f=10 000 Ω

图 8　不同接地故障工况调控效果

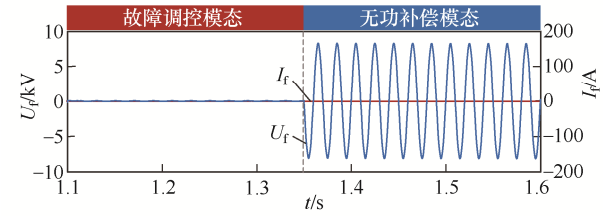
Fig. 8 Fault control effect under different grounding fault conditions

5.5　接地故障清除仿真验证

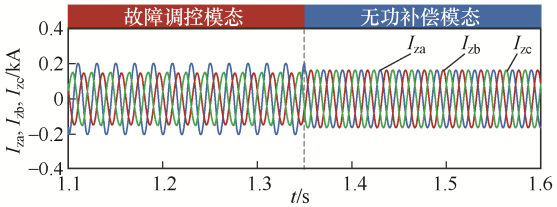
为了验证所提方案在接地故障清除后重新投入运行的有效性，假设在 1.35 s 时刻单相接地故障清除。在 1.10~1.35 s 期间，HU-AASD 运行于故障调控模态；在 1.35~1.60 s 期间，HU-AASD 运行于无功补偿模态。如图 9(a)所示，HU-AASD 可为电网提供不间断的无功支撑，故障发生前后，电网电源侧始终维持单位功率因数运行。如图 9(b)、(c)



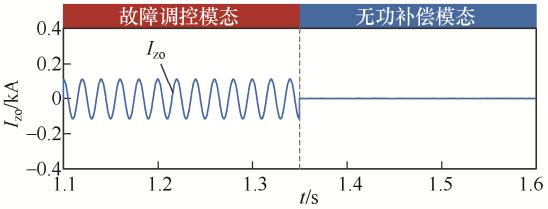
(a) E_a, I_a



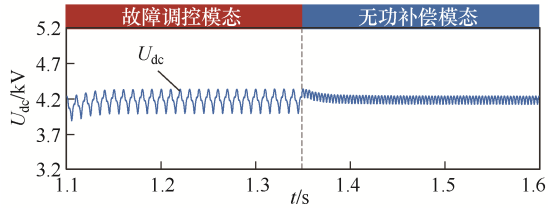
(b) U_f, I_f



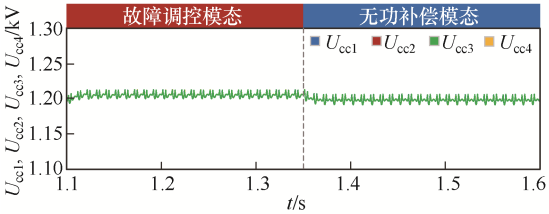
(c) I_{za}, I_{zb}, I_{zc}



(d) I_{zo}



(e) U_{dc}



(f) U_{cc1},U_{cc2}, U_{cc3}, U_{cc4}

图 9　接地故障清除仿真波形

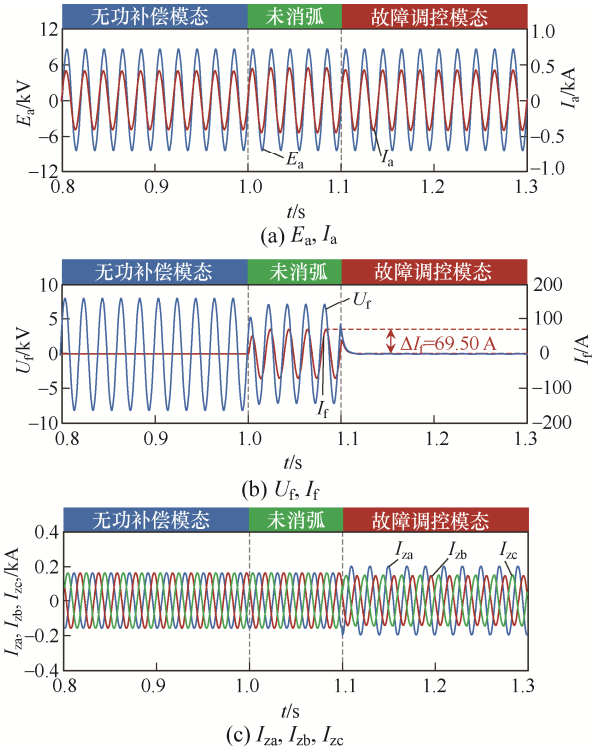
Fig. 9 Simulation waveforms in the case of grounding fault removal

和(d)所示，单相接地故障清除后，HU-AASD 第四桥臂停止注入消弧电流 I_{zo}，三相桥臂仍保持对电网进行无功补偿。如图 9(e)所示，VSC 单元的直流母线电压 U_{dc} 始终围绕参考值 4 200 V 波动，波动幅度处于参考值±7%以内。如图 9(f)所示，以 C 相为例，CHB 单元子模块电容电压 U_{cc1}、U_{cc2}、U_{cc3}、U_{cc4} 均围绕参考值 1 200 V 波动，波动幅度均处于参考值±7%以内，有效验证了所提方案在接地故障清除后重新投入运行的有效性。

5.6 间歇性弧光接地故障仿真验证

现实中，配电网导线坠地、碰树等情景易产生具有随机性的电弧，弧光接地故障发生后迅速进入稳定状态[18]。相关研究表明：弧光接地的过渡电阻存在明显的感性分量，电压相位超前电流相位最大约 10°[19]。为了验证所提方案对间歇性弧光接地故障场景的有效性，假设过渡电阻的阻抗角为 10°，其余仿真参数与前文保持一致。

如图 10(a)所示，HU-AASD 可为电网提供不间断的无功支撑，故障发生前后，电网电源侧始终维持单位功率因数运行。如图 10(b)、(c)和(d)所示，HU-AASD 未进行消弧时，故障点残流 I_f 达到 69.95 A，故障点残压 U_f 达到 7 109.55 V，且未消弧期间故障点电压相位超前电流相位 10.5°；HU-AASD 切换至故障调控模态后，通过第四桥臂注入消弧电流 I_{zo}，故障电流残流 I_f 被抑制为 0.45 A，故障点残压被抑制为 46 V，消弧率达到 99.41%，实现了配电网接地故障的长期可靠调控。如图 10(e)所示，故障调控模态时，VSC 单元的直流母线电压 U_{dc} 围绕参考值 4 200 V 波动；由于第四桥臂输出电流的存在，直流侧电压的波动更加剧烈，直流侧电压波动最大值为 224.12 V，波动幅度处于参考值±7%以内。如图 10(f)所示，以 C 相为例，CHB 单元子模块电容电压 U_{cc1}、U_{cc2}、U_{cc3}、U_{cc4} 均围绕参考值 1 200 V 波动，无功补偿模态时，子模块电容电压波动最大值为 13.32 V；故障调控模态时，子模块电容电压波动最大值为 12.33 V，波动幅度均处于参考值±7%以内，有效验证了 HU-AASD 对间歇性弧光接地故障场景的有效性。



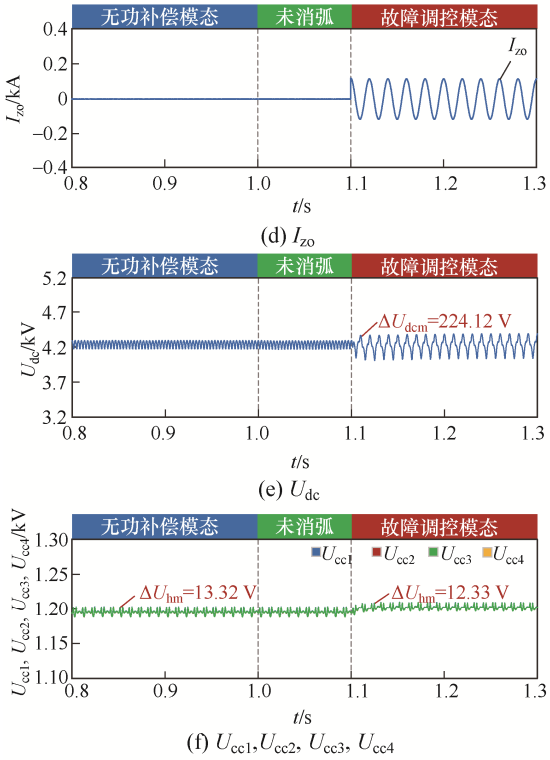


图 10 间歇性弧光接地故障仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms under intermittent arc grounding fault

5.7 实验验证

为了进一步验证所提拓扑及调控策略的有效性，搭建了 380 V 实验平台如图 11 所示，相关实

验参数见表 3。

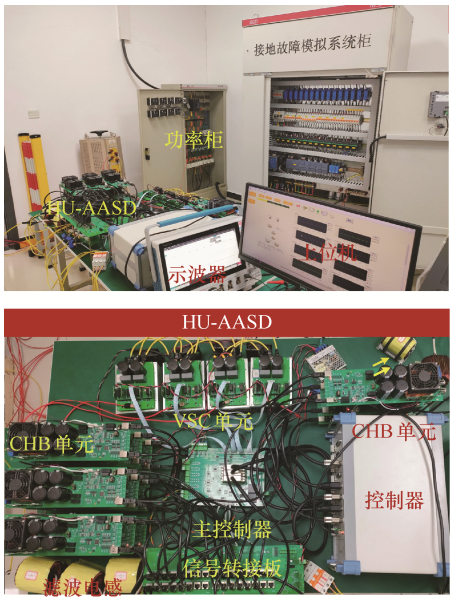


图 11　实验平台

Fig. 11 Experimental platform

表 3　实验参数

Tab. 3 Experimental parameters

参数	数值
线电压有效值 E_{ab}/V	380
对地电容 C_0/μF	40
对地电阻 r_0/Ω	500
故障过渡电阻 R_f/Ω	50
VSC 单元直流母线电压 U_{dc}/V	200
VSC 单元直流母线电容 C_{dc}/μF	680
CHB 单元总模块数 n	3
CHB 单元子模块电容电压 U_c/V	80
CHB 单元子模块电容 C_h/μF	1 880
滤波电感 L/mH	5

HU-AASD 实验波形如图 12 所示，在 t_2 时刻，电网的 A 相发生单相接地故障。如图 12(a)所示，HU-AASD 未进行消弧时，故障点残流 I_f 达到 4.93 A，故障点残压 U_f 达到 259.9 V，严重威胁了配电网安全可靠运行。HU-AASD 运行于故障调控模式后，通过第四桥臂注入消弧电流 I_{zo}，故障电流残流 I_f 被抑制为 0.21 A，故障点残压被抑制为 16.5 V，消弧率达到 95.7%。如图 12(b)所示，以 A 相为例，VSC 单元输出电压 U_{sa} 为两电平方波，CHB 单元输出电压 U_{ha} 为七电平阶梯波，HU-AASD 桥臂总输出电压 U_{sha} 为 VSC 单元与 CHB 单元输出电压之和，有效验证了 HU-AASD 拓扑及调控策略的有效性。

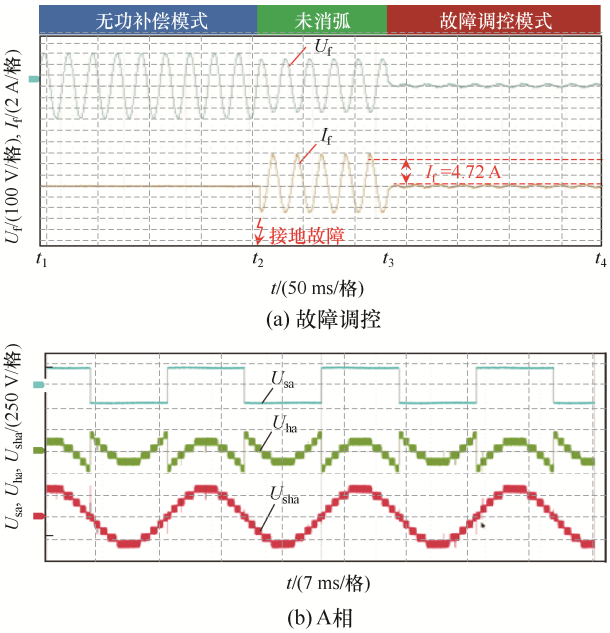


图 12　HU-AASD 实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms of HU-AASD

6　结论

本文提出了 1 种基于异构单元的多功能有源消弧装置拓扑结构及调控策略，通过 VSC 单元输出两电平方波电压，CHB 单元输出多电平阶梯波整形电压，从而保证了输出波形质量。通过理论分析及实验验证，可得出如下结论。

(1)得益于三相四桥臂的异构单元集成，故障调控时各桥臂仅承担相电压。相较于既有方案，所提方案的所需电容与器件数量更少，有效提升了 HU-AASD 的功率密度及经济性。

(2)HU-AASD 具备故障调控与无功补偿多种功能的同时运行能力，提升了装置利用率及无功补偿能力的可靠性，且无需附加供电装置即可实现接地故障电流完全补偿。

后续将进一步验证 10 kV 级 HU-AASD 工程样机的有效性与可行性。

参考文献：

[1] 王呈轩，宫瑞邦，樊艳芳，等. 主动干预型消弧装置耐受过渡电阻的计算方法及零序启动电压的参数设置研

究[J/OL]. 电源学报，1-14. (2024-05-11)[2024-11-20]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240510.1827.006.
Wang Chengxuan, Gong Ruibang, Fan Yanfang, et al. Research on calculation method of withstand transition resistance of active intervention arc suppression device and parameter setting of zero sequence starting voltage [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-14. (2024-05-11)[2024-11-20]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240510.1827.006. (in Chinese)

[2] 王玉梅, 张家康. 基于卷积神经网络多判据融合的井下电网故障选线方法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 110-117.
Wang Yumei, Zhang Jiakang. Fault line selection method for mine power grid based on fusion of multiple criteria of convolutional neural network [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 110-117. (in Chinese)

[3] 刘可, 邓其军, 杨嘉, 等. 行波理论支持下多电源配电网故障定位系统[J]. 电源学报, 2022, 20(4): 163-170.
Liu Ke, Deng Qijun, Yang Jia, et al. Fault location system for multi-power distribution network based on travelling wave theory [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(4): 163-170. (in Chinese)

[4] Liu Baowen, Wang Chenyu, Zeng Xiangjun, 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.

[5] 刘健, 陈曦子, 张志华, 等. 基于消弧线圈调制信号相关检测的高阻单相接地选线[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 63-70.
Liu Jian, Chen Xizi, Zhang Zhihua, et al. High resistance single-phase grounding line selection in resonant grounding systems based on correlation detection [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 63-70. (in Chinese)

[6] 王义凯, 尹项根, 谭力铭, 等. 基于波形匹配电流源注入的网源直连系统接地故障有源消弧技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5381-5391.
Wang Yikai, Yin Xianggen, Tan Liming, et al. Active arc suppression technology based on waveform-matching current source injection for ground fault of generator-grid directly connected system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5381-5391. (in Chinese)

[7] Zheng Zeyin, Guo Moufa, Yang N C, et al. Single-phase flexible arc suppression device based on BSC-SOGI-PLL method for distribution networks [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106100.

[8] 常新建, 邵文权, 程远, 等. 基于模型预测控制的配电网单相接地故障有源消弧[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 161-169.
Chang Xinjian, Shao Wenquan, Cheng Yuan, et al. Active arc suppression of a single-phase grounding fault in distribution network based on model predictive control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 161-169. (in Chinese)

[9] 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): 2953-2966.
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): 2953-2966. (in Chinese)

[10] 郭谋发, 郭彩虹, 郑泽胤. 基于多变量解耦控制的配电网单相接地故障集成化柔性消弧方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 133-139.
Guo Moufa, Guo Caihong, Zheng Zeyin. Integrated flexible arc suppression method based on multi-variable decoupling control for single-phase grounding fault in distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 133-139. (in Chinese)

[11] 涂春鸣, 黄泽钧, 郭祺, 等. 一种具备单相接地故障调控与无功补偿能力的多功能并网型变流器[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4286-4295.
Tu Chunming, Huang Zejun, Guo Qi, et al. Multifunctional grid-connected converter with capabilities of single-phase grounding fault regulation and reactive power compensation [J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4286-4295. (in Chinese)

[12] 游建章, 郭谋发. 集成无功补偿和故障抑制功能的一体化变流器及其控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(6):

2241-2248.

You Jianzhang, Guo Moufa. Integrated converter with reactive power compensation and fault suppression and its control strategy [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2241-2248. (in Chinese)

[13] Qiu Weiqiang, Guo Moufa, Yang Gengjie, et al. Model-predictive-control-based flexible arc-suppression method for earth fault in distribution networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 16051-16065.

[14] 周兴达, 陆帅. 一种基于消弧线圈和静止同步补偿器协同作用的配电网消弧结构与方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1251-1262.

Zhou Xingda, Lu Shuai. An arc-suppression method based on the coordinated operation of the petersen coil and the static synchronous compensator in distribution networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1251-1262. (in Chinese)

[15] 游建章, 郭谋发. 含四桥臂 H 桥变流器的不对称配电网综合补偿方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2849-2858.

You Jianzhang, Guo Moufa. Comprehensive compensation method for asymmetric distribution network with four-arm H-bridge converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2849-2858. (in Chinese)

[16] Hu Pengfei, Guerrero J M, He Zhengxu. Design and analysis of a transformerless STATCOM based on hybrid cascaded multilevel converter [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 694-704.

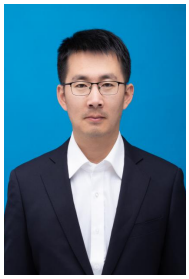
[17] Hou Yuchao, Guo Qi, Ren Peng, et al. A hybrid cascaded multilevel converter based on Si and SiC devices and its regulation optimization strategy [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(3): 4001-4011.

[18] 刘宝稳, 曾祥君, 张慧芬, 等. 有源柔性接地配电网弧光高阻接地故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4001-4013.

Liu Baowen, Zeng Xiangjun, Zhang Huifen, et al. Arc high resistance grounding fault detection method for active flexible grounding distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4001-4013. (in Chinese)

[19] 梁晨光, 王宾, 李凤婷, 等. 高压线路单相弧光接地对数仿真模型数据修正算法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 126-131.

Liang Chenguang, Wang Bin, Li Fengting, et al. Data correction algorithm of logarithmic simulation model for single-phase arc grounding fault on high-voltage transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 126-131. (in Chinese)



刘红文

作者简介：

刘红文(1984—)，男，高级工程师。研究方向：过电压和绝缘协调，配电网柔性接地技术，接地故障处理技术和智能传感器。E-mail：liuhongwen19@qq.com。

钱信君(1999—)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，博士研究生。研究方向：电力系统电力电子装备。E-mail：qianxj2021@163.com。

郭祺(1993—)，男，中国电源学会高级会员，博士，研究员。研究方向：电力电子变换器，分布式发电与电能质量先进控制。E-mail：qguo_215@163.com。

陈饶(1987—)，男，本科，高级工程师。研究方向：配电网运行及其控制。E-mail：764598551@qq.com。

施从新(1984—)，男，本科，工程师。研究方向：配电网运行及其控制。E-mail：1729086158@qq.com。

黄继盛(1985—)，男，本科，高级工程师。研究方向：输电运维与科技管理。E-mail：luocheng01329@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)