

引用格式:李明,魏承志,刘阳,等.一种基于附加能量回路的接地故障消弧方法[J].电力科学与技术学报,2026,41(2):304-313.

Citation: LI Ming, WEI Chengzhi, LIU Yang, et al. Arc suppression method for grounding fault based on additional energy loop[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(2): 304-313.

一种基于附加能量回路的接地故障消弧方法

李明¹, 魏承志¹, 刘阳¹, 黄润鸿¹, 赵瑞锋², 卢建刚², 陈益哲³, 黄泽钧⁴

(1. 南方电网科学研究院, 广东广州 510080; 2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东广州 510000; 3. 广东电网有限责任公司肇庆供电局, 广东肇庆 526060; 4. 湖南大学国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南长沙 410082)

摘要:多功能消弧装置(multi-function arc suppression device, MF-ASD)可较好地解决传统消弧装置利用率低下、成本高昂等问题。但 MF-ASD 在消弧期间会消耗有功功率,如何在无需外加供能单元的情况下实现有源模块的直流侧电压稳定值得深入探讨。提出一种基于附加能量回路的接地故障消弧方法。首先,对 MF-ASD 的拓扑结构和工作原理进行简要阐述;其次,分析传统消弧方法对 MF-ASD 输出有功功率、能量流向的影响机理,阐明造成直流侧电容电压变化的内在原因;再次,在电网和 MF-ASD 之间构建附加的能量回路,补偿消弧期间 MF-ASD 直流侧电压稳定所需的有功功率和无功功率,解决单相接地故障无法稳定抑制的问题;最后,结合仿真与实验 2 种方法,对所提方法的可行性与有效性进行了综合验证。

关键词:单相接地故障;接地故障调控;多功能消弧装置;附加能量回路

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.02.027 中图分类号: TM862 文章编号: 1673-9140(2026)02-0304-10

Arc suppression method for grounding fault based on additional energy loop

LI Ming¹, WEI Chengzhi¹, LIU Yang¹, HUANG Runhong¹, ZHAO Ruifeng²,
LU Jiangang², CHEN Yizhe³, HUANG Zejun⁴

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China; 2. Electric Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 3. Zhaoqing Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhaoqing 526060, China; 4. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The problems of low utilization and high cost of traditional arc suppression devices can be effectively solved by a multi-function arc suppression device (MF-ASD). However, active power is consumed by the MF-ASD during arc suppression. How to realize the DC-link voltage stability of the active module without an additional power supply unit is worth further discussion. An arc suppression method for grounding faults based on an additional energy loop is proposed. First, the topological structure and working principle of the MF-ASD are briefly described. Second, the influence mechanism of traditional arc suppression methods on the output active power and energy flow direction of the MF-ASD is analyzed, and the internal reason for the change in DC-link capacitor voltage is clarified. Third, an additional energy loop is constructed between the power grid and the MF-ASD to compensate for the active power and reactive power required for the DC-link voltage stability of the MF-ASD during arc suppression, thereby solving the problem that single line-to-ground faults cannot be stably suppressed. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed method are comprehensively verified by simulations and experiments.

Key words: single line-to-ground fault; grounding fault control; multi-function arc suppression device; additional energy loop

收稿日期: 2025-01-17; 修回日期: 2025-10-16

基金项目: 南方电网公司科技项目([031200KK52222026(GDKJXM20222220)])

通信作者: 黄泽钧(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事配电网故障主动调控方面的研究; E-mail: huangzejun0424@163.com

配电网拓扑复杂、运行方式灵活、故障随机性强,这导致单相接地故障成为配电网故障中最主要的故障类型,其在所有故障中的占比高达 70%^[1-6]。近年来,随着高比例新能源与电力电子设备并网,配电网故障特性发生了显著变化,接地电流中的有功与谐波分量明显增强^[7-11]。但配电网通常采用的消弧线圈属于无源补偿装置,其仅能抑制接地电流中的容性无功分量,无法对有功及谐波电流进行有效补偿^[12-15]。基于全控型电力电子器件的有源消弧技术得到了广泛推广,实现了对故障电流多分量的精准、协同调控。基于全控型电力电子器件的有源消弧装置在并联接入配电网后,具备接地故障调控与电能质量调节的双重功能。在电网正常运行时,该装置可用于无功补偿、谐波抑制及改善三相不平衡;在配电网故障时,则可抑制故障电流^[16-20]。但该装置的有源部分承担了线电压,导致其出现了级联数多、成本高、损耗大、功率密度低等问题^[21-24]。

为进一步解决基于全控型电力电子器件的有源消弧装置成本高昂等问题,文献[25-28]提出了一种基于有源模块与无源模块混合的消弧装置,该消弧装置逐渐成为了目前主流的研究方向。其无源模块可承担大部分电压,大幅降低了消弧装置的成本。文献[25]将消弧线圈和电力电子变压器相结合,降低了电力电子变压器整体的容量。文献[26]将有源变流器与阻抗可控制的晶闸管控制的 LC 滤波器 (thyristor-controlled LC filter, TCLC) 组合。其中, TCLC 模块在无功补偿模式和消弧模式中分别承担容性和感性电压,进一步降低了有源模块的容量,但这些拓扑的功能仅能分时复用,无法同时实现。为此,文献[27]提出了多功能消弧装置 (multi-function arc suppression device, MF-ASD), MF-ASD 将消弧线圈连接在非中性点有源消弧装置^[28]的公共点上,使该装置兼具无功补偿与主动消弧的能力,大幅提升了该设备综合利用率与工程应用价值,促进了其在配电网中的应用与推广。

MF-ASD 的直流侧电压稳定是实现接地故障可靠调控的前提。MF-ASD 的能量获取方式主要包含两类:加入额外的供能单元,控制 MF-ASD 从电网中吸收有功功率。在加入额外的供能单元这类方法中,文献[29]在每个 H 桥模块直流侧并联储能单元以实现能量补充,但这也提高了装置成本。为此,文献[30]仅在每相的一个 H 桥配置不可控整流电路,并采用模型预测控制,维持各模块直流电压均衡。该方法虽减少了装置数量,却增加了

控制算法的复杂性。在控制 MF-ASD 从电网中吸收有功功率的这类方法中,文献[31]控制非故障相变流器交替进行消弧与稳压,可在不加装额外供能的前提下维持直流侧电压,但其工作状态切换时可能引发暂态冲击。文献[32]提出了一种 $P-Q$ 两相消弧策略,该策略的非故障相仅补偿零序无功功率,但其仅能适用接地故障电流有功分量较小的场合。综上所述,如何在不增加供能单元的前提下,同时实现直流侧电压的稳定控制和故障电流的全补偿仍有待研究。

本文提出一种基于附加能量回路的接地故障消弧方法。先介绍 MF-ASD 的拓扑结构和工作原理,分析传统消弧方法对 MF-ASD 输出有功功率、能量流向的影响机理;再阐明造成直流侧电容电压变化的内在原因;然后,在电网和 MF-ASD 之间构建附加的能量回路,补偿消弧期间 MF-ASD 直流侧电压稳定所需的有功功率和无功功率;最后,采用仿真与实验,验证所提方法的可行性和有效性。

1 MF-ASD 拓扑结构及工作原理

1.1 拓扑结构

MF-ASD 的拓扑结构如图 1 所示。该装置采用三相独立、对称级联的变流器架构,其公共连接点经消弧线圈接地。在图 1 中, $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ 分别为 a、b、c 三相电网电压; $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ 分别为 a、b、c 三相电网电流; $\dot{U}_{sa}, \dot{U}_{sb}, \dot{U}_{sc}$ 分别为 a、b、c 三相并网点电压; $\dot{I}_{inva}, \dot{I}_{invb}, \dot{I}_{invc}$ 分别为 MF-ASD 的 a、b、c 三相输出电流; \dot{I}_o 为消弧电感流过的电流; \dot{U}_o 为公共点电压; L_N 为连接公共点的消弧电感; R_f 为故障电阻; U_{dc} 为 MF-ASD 的直流侧电容电压; r_a, r_b, r_c 分别为 a、b、c 三相线路对地电阻; C_{0a}, C_{0b}, C_{0c} 分别为 a、b、c 三相线路对地电容; C_{dc} 为直流侧电容; L_f 为滤波电感。

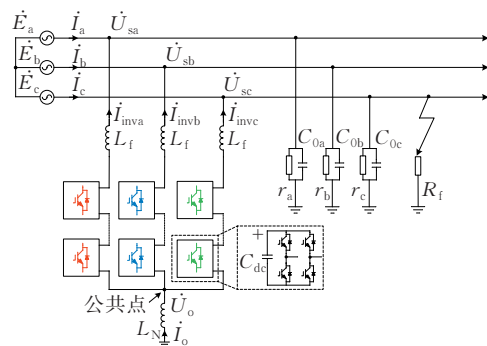


图 1 MF-ASD 拓扑结构

Figure 1 Topological structure of MF-ASD

1.2 工作原理

MF-ASD 的工作模式取决于电网运行状态。当配电网处于正常运行状态时, MF-ASD 进行无功补偿; 当电网发生单相接地故障时, MF-ASD 同时进行消弧和无功补偿。

1.2.1 电网正常运行工况

MF-ASD 向电网补偿无功功率这一过程可等效为受控电流源, 电网正常运行期间的等效电路如图 2 所示。在图 2 中, \dot{U}_o 被控制为 0 V, 消弧线圈支路相当于开路, MF-ASD 输出无功补偿电流, 此时的 MF-ASD 承担相电压。

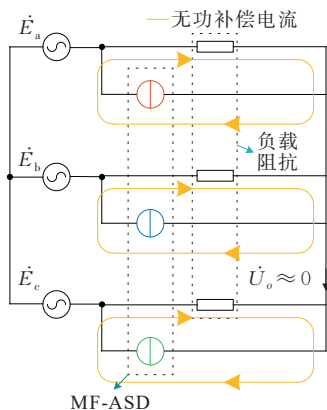


图 2 电网正常运行期间的等效电路

Figure 2 Equivalent circuit during normal operation of power grid

MF-ASD 输出的 a、b、c 三相无功补偿电流分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_{inva} = \dot{I}_{loada,Q} - j\omega C_{0a} \dot{E}_a \\ \dot{I}_{invb} = \dot{I}_{loadb,Q} - j\omega C_{0b} \dot{E}_b \\ \dot{I}_{invc} = \dot{I}_{loadc,Q} - j\omega C_{0c} \dot{E}_c \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\dot{I}_{loada,Q}$ 、 $\dot{I}_{loadb,Q}$ 、 $\dot{I}_{loadc,Q}$ 分别为 a、b、c 三相负载的无功电流; ω 为角频率, 本文取其值为 314 rad/s。

1.2.2 单相接地故障工况

当电网发生接地故障时(以 c 相发生故障为例进行分析), MF-ASD 以故障消弧模式运行, 接地故障点与大地及配电网对地参数形成回路, 配电网对地电流流经故障点形成故障电流。MF-ASD 同时进行消弧和无功补偿, 其整体依然可以等效为受控电流源。单相接地故障期间的等效电路如图 3 所示。在图 3 中, \dot{U}_o 被控制为 $-\dot{E}_c$, MF-ASD 通过输出消弧和无功补偿电流, 显著降低故障电流, 从而在单相接地故障期间维持电网的单位功率因数运行状态。

依据 D 点列的基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, KCL)方程, 带入电压和网络参数, 得

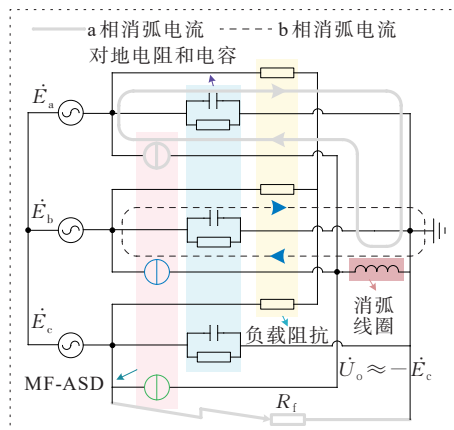


图 3 单相接地故障期间的等效电路

Figure 3 Equivalent circuit during single line-to-ground fault

$$\dot{U}_{sc} \left(\frac{1}{r_c} + \frac{1}{R_f} + j\omega C_{0c} \right) + \dot{U}_{sb} \left(\frac{1}{r_b} + j\omega C_{0b} \right) + \dot{U}_{sa} \left(\frac{1}{r_a} + j\omega C_{0a} \right) - (\dot{I}_{inva} + \dot{I}_{invb} + \dot{I}_{invc}) = 0 \quad (2)$$

设 $\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0$, 对地电容为 C_0 , 对地电阻均为 r_0 , 将这些代入式(2), 得到注入消弧电流 \dot{I}_z :

$$\dot{I}_z = \dot{I}_{inva} + \dot{I}_{invb} + \dot{I}_{invc} = -\dot{E}_c \left(\frac{3}{r_0} + j3\omega C_0 \right) \quad (3)$$

当采用传统两相消弧方法时, MF-ASD 输出的 a、b、c 三相消弧电流 \dot{I}_{oa} 、 \dot{I}_{ob} 、 \dot{I}_{oc} 分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_{oa} = (\dot{E}_a - \dot{E}_c) \left(\frac{1}{r_0} + j\omega C_0 \right) \\ \dot{I}_{ob} = (\dot{E}_b - \dot{E}_c) \left(\frac{1}{r_0} + j\omega C_0 \right) \\ \dot{I}_{oc} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

此时, MF-ASD 的 a、b、c 三相输出电流分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_{inva} = \dot{I}_{loada,Q} + \dot{I}_{oa} \\ \dot{I}_{invb} = \dot{I}_{loadb,Q} + \dot{I}_{ob} \\ \dot{I}_{invc} = \dot{I}_{loadc,Q} + \dot{I}_{oc} \end{cases} \quad (5)$$

2 传统直流侧稳压控制策略

MF-ASD 直流侧电压的稳定决定了接地故障电流全补偿的问题, 本文分析传统直流侧稳压策略失效的原因与 MF-ASD 直流侧电压稳定机理。

分析图 3, 可得到消弧期间 MF-ASD 有源部分承担的三相电压 \dot{U}_{inva} 、 \dot{U}_{invb} 、 \dot{U}_{invc} :

$$\begin{cases} \dot{U}_{inva} = \dot{U}_{sa} - \dot{U}_o = \dot{E}_a \\ \dot{U}_{invb} = \dot{U}_{sb} - \dot{U}_o = \dot{E}_b \\ \dot{U}_{invc} = \dot{U}_{sc} - \dot{U}_o = \dot{E}_c \end{cases} \quad (6)$$

根据式(4)~(6), 可得消弧期间 MF-ASD 传输

的三相有功功率 P_{inva} 、 P_{invb} 、 P_{invc} :

$$\begin{cases} P_{inva} = \sqrt{3} E^2 \sqrt{\frac{1}{r_0^2} + \omega^2 C_0^2} \cos \theta \\ P_{invb} = \sqrt{3} E^2 \sqrt{\frac{1}{r_0^2} + \omega^2 C_0^2} \cos(\theta + 60) \\ P_{invc} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, E 为电网电压的有效值; θ 为 \dot{I}_{oa} 与 \dot{E}_a 之间的夹角。

θ 与对地电容和电阻的大小有关, 其可写作

$$\theta = \arctan(\omega C_0 r_0) - 30 \quad (8)$$

由式(7)可知, θ 能反映 MF-ASD 吸收、发出有功功率的区别, MF-ASD 的输出功率随 θ 的变化情况见表 1。

表 1 MF-ASD 的输出功率随 θ 的变化情况

Table 1 Variation in MF-ASD output power with θ

θ 范围	P_{inva}	P_{invb}	P_{invc}
$[0^\circ, 30^\circ)$	+	+	0
30°	+	0	0
$(30^\circ, 60^\circ]$	+	-	0

由表 1 可知, 当 $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ 时, $P_{inva} > 0$, 此时的 a 相电压和 a 相消弧电流的夹角始终为锐角, a 相在消弧期间消耗有功功率。当 $0 \leq \theta < 30^\circ$ 时, $P_{invb} > 0$, 此时的 b 相电压和 b 相消弧电流的夹角为锐角, b 相消耗有功功率。当 $\theta = 30^\circ$ 时, $P_{invb} > 0$, 此时的 b 相电压和 b 相消弧电流垂直, b 相在消弧期间仅传输无功功率。当 $30^\circ < \theta \leq 60^\circ$ 时, $P_{invb} < 0$, 此时的 b 相电压和消弧电流的夹角为钝角, b 相在消弧期间吸收有功功率。在消弧期间, $P_{invc} = 0$ W, c 相仅输出负载无功电流。

为补偿消弧期间的有功功率, 维持 MF-ASD 直流侧电容电压的稳定, 传统直流侧电压控制策略 MF-ASD 从电网中吸收有功功率。消弧有功电流

和稳压有功电流大小相同, 方向相反。由式(4)~(6)可知, MF-ASD 稳压有功三相电流 \dot{I}_{ca1} 、 \dot{I}_{cb1} 、 \dot{I}_{cc1} 分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_{ca1} = -\sqrt{\frac{3}{r_0^2} + 3\omega^2 C_0^2} \cos \theta \dot{E}_a \\ \dot{I}_{cb1} = -\sqrt{\frac{3}{r_0^2} + 3\omega^2 C_0^2} \cos(\theta + 60) \dot{E}_b \\ \dot{I}_{cc1} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

传统直流侧电压稳定控制策略仅能控制 MF-ASD 和电网交换有功功率。由式(9)可知, $\dot{I}_{ca1} + \dot{I}_{cb1} + \dot{I}_{cc1} \neq 0$, 此时的电网中性点无法满足 KCL, MF-ASD 和电网之间必然存在无功功率的交换。因此, 传统直流侧电压控制策略无法保持 MF-ASD 直流侧电压的稳定。

3 MF-ASD 控制策略

针对这些问题, 本文提出一种基于附加能量回路的直流侧电压控制策略, 该策略控制 MF-ASD 同时与电网交换有功和无功功率, 进而抵消消弧所需的能量, 无需供能装置, 亦可实现故障期间直流侧电容电压稳定。

3.1 MF-ASD 直流侧电压稳定机理

由文 2 的分析可知, 在单相接地故障期间, MF-ASD 与对地电阻间存在有功功率交换, MF-ASD 直流侧电容电压难以维持稳定。基于此, 为实现 MF-ASD 的直流侧电压的稳定, 必须控制 MF-ASD 从电网吸收能量。

本文所提方法通过在电网和 MF-ASD 之间构建附加的能量回路, 补偿消弧期间 MF-ASD 直流侧电压稳定所需能量。此时, 消弧有功电流和附加有功电流的大小相同, 但方向相反。根据式(3)可得消弧电流和附加有功电流的相量图, 结果如图 4 所示。

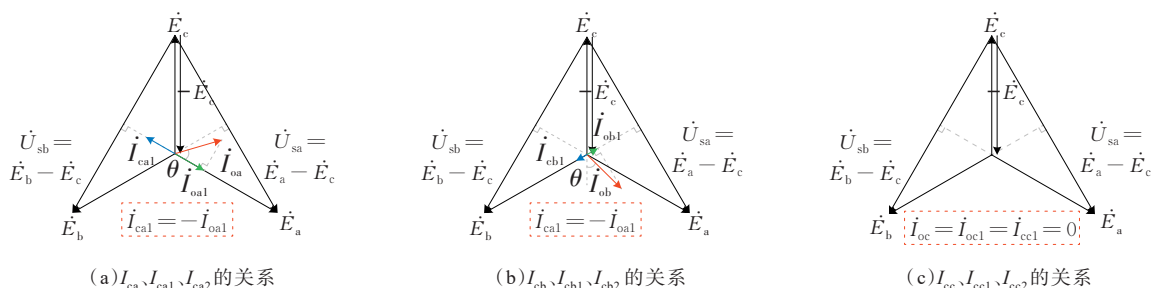


图 4 消弧电流和附加有功电流的相量关系

Figure 4 Phasor relationship between arc suppression current and additional active current

图 4 中, \dot{i}_{oa1} 、 \dot{i}_{ob1} 、 \dot{i}_{oc1} 分别为 a、b、c 三消弧有功电流, \dot{i}_{oa} 、 \dot{i}_{ob} 、 \dot{i}_{oc} 分别为 a、b、c 三消弧电流。消弧期间的有功功率流动图如图 5 所示。

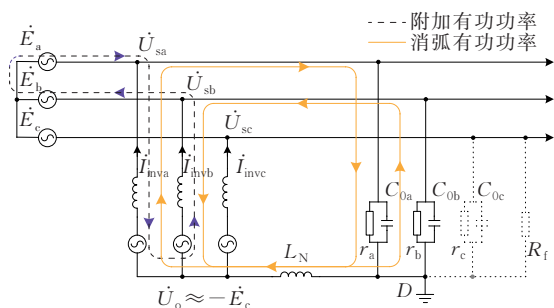


图 5 消弧期间的有功功率流动图

Figure 5 Active power flow diagram during arc suppression

为满足附加电流环的 KCL 并保持 c 相级联 H 桥 (cascaded H-bridge, CHB) 直流侧电压的稳定, c 相附加电流 \dot{i}_{cc} 应与 c 相电网电压 \dot{E}_c 相互垂直, 各相

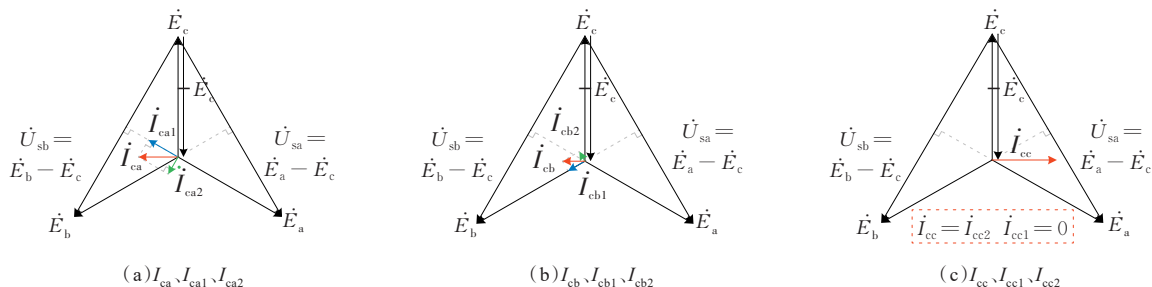


图 6 附加能量回路的相量关系

Figure 6 Phasor relationship of additional energy loop

由式 (9)、(11) 可知, a、b、c 三相附加总电流

\dot{i}_{ca} 、 \dot{i}_{cb} 、 \dot{i}_{cc} 分别为

$$\begin{cases} \dot{i}_{ca} = -2 \sqrt{\frac{1}{3r_0^2} + \frac{\omega^2 C_0^2}{3}} \cos \theta \dot{E}_{ab} \\ \dot{i}_{cb} = -2 \sqrt{\frac{1}{3r_0^2} + \frac{\omega^2 C_0^2}{3}} \cos(\theta + 60) \dot{E}_{ab} \\ \dot{i}_{cc} = 2 \sqrt{\frac{1}{3r_0^2} + \frac{\omega^2 C_0^2}{3}} (\cos \theta + \cos(\theta + 60)) \dot{E}_{ab} \end{cases} \quad (12)$$

综上所述, 由于有附加能量回路的存在, 其通过正负序回路 MF-ASD 从电网吸收消弧所需的能量。因此, 这证明了在消弧期间, 本文所提的直流侧电压控制策略能够维持 MF-ASD 的直流侧电压的稳定。

附加电流的相量关系如图 6 所示。

在图 6 中, \dot{i}_{ca2} 、 \dot{i}_{cb2} 、 \dot{i}_{cc2} 分别为 a、b、c 相的附加无功电流, \dot{i}_{ca} 、 \dot{i}_{cb} 、 \dot{i}_{cc} 分别为 a、b、c 相的附加总电流。 \dot{i}_{cc} 、 \dot{i}_{cc1} 和 \dot{i}_{cc2} 可分别表示为

$$\begin{cases} \dot{i}_{cc1} = 0 \\ \dot{i}_{cc} = \dot{i}_{cc2} = -(\dot{i}_{ca} + \dot{i}_{cb}) \end{cases} \quad (10)$$

a、b、c 三相电网流过的附加无功电流 \dot{i}_{ca2} 、 \dot{i}_{cb2} 、 \dot{i}_{cc2} 分别为

$$\begin{cases} \dot{i}_{ca2} = -\sqrt{\frac{1}{3r_0^2} + \frac{\omega^2 C_0^2}{3}} \cos \theta \dot{E}_{cb} \\ \dot{i}_{cb2} = -\sqrt{\frac{1}{3r_0^2} + \frac{\omega^2 C_0^2}{3}} \cos(\theta + 60) \dot{E}_{ac} \\ \dot{i}_{cc2} = 2 \sqrt{\frac{1}{3r_0^2} + \frac{\omega^2 C_0^2}{3}} (\cos \theta + \cos(\theta + 60)) \dot{E}_{ab} \end{cases} \quad (11)$$

式中, \dot{E}_{cb} 、 \dot{E}_{ac} 、 \dot{E}_{ab} 分别为 cb 相线电压、ac 相线电压、ab 相线电压。

3.2 MF-ASD 控制策略

MF-ASD 控制策略如图 7 所示。在图 7 中, E_d 、 E_q 为电网电压的 d 轴和 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为 MF-ASD 输出电流的 d 轴和 q 轴分量。先将 MF-ASD 直流侧电压的参考值 $U_{dc,ref}$ 和实际值 U_{dc} 的差经电压环 PI 处理, 得到稳压环对应的有功电流参考值 $i_{d,dc}$ 与无功电流参考值 $i_{q,dc}$ 。再采集三相负载电流, 通过 dq 变换后, 得到无功补偿电流参考值 $i_{q,ref}$ 。然后, 将 $i_{d,dc}$ 作为 MF-ASD 输出电流 d 轴分量的参考值, 将 $i_{q,dc}$ 与 $i_{q,ref}$ 的和作为 MF-ASD 输出电流 q 轴分量的参考值。将 $i_{d,dc}$ 、 $i_{q,ref} + i_{q,dc}$ 分别与 i_d 、 i_q 作差后的结果经过电流环 PI 处理, 叠加电网电压的 d 轴和 q 轴分量, 生成 d 轴和 q 轴的参考信号, 将式 (3) 的消弧总电流与 i_0 的差经过电流环 PI 处理, 得到 0 轴的参考信号。最后, 经过 dq 反变换, 得到调制信号 U_{sum} 。

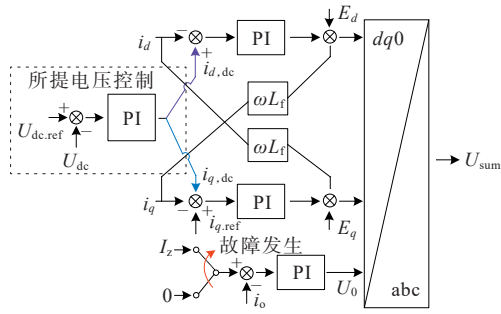


图 7 MF-ASD 控制策略

Figure 7 Control strategy of MF-ASD

4 仿真验证

为证明所提方法有效性,在 MATLAB/Simulink 中构建了 10kV 配电网仿真模型,并进行了仿真分析,主要仿真参数如下:线路对地电容 $C_0=7 \mu\text{F}$,线路泄漏电阻 $r_0=5\,000 \Omega$,滤波电感 $L_f=5 \text{ mH}$,消弧电感 $L_N=0.45 \text{ H}$,负载阻抗 $Z_L=33 \Omega$,负载功率因数 $\cos\phi=0.7$,CHB 直流侧电压 $U_{\text{dc,CHB}}=1\,000 \text{ V}$,直流侧电容 $C_{\text{dc}}=8 \text{ mF}$,CHB 模块开关频率 $f_i=10 \text{ kHz}$,CHB 级联数目 $N=9$ 。

4.1 传统直流侧电压控制策略验证

0.7~0.9 s,配电网正常运行,MF-ASD 以无功补偿模式工作;0.9 s 时,配电网的 C 相发生单相接地故障;0.9~1.3 s,MF-ASD 同时进行消弧和无功补偿;1.3 s 时,接地故障消除,MF-ASD 以故障消弧模式工作。传统直流侧电压控制方法如图 8 所示。

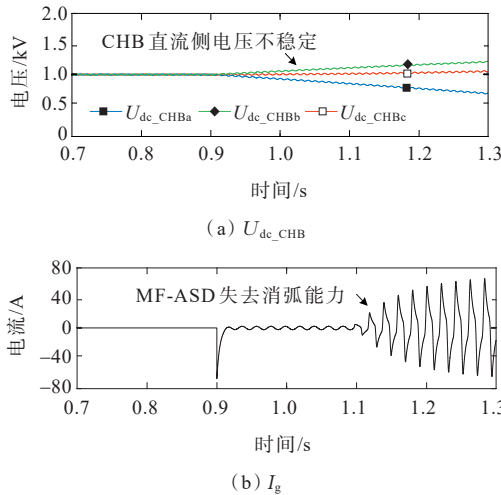


图 8 传统直流侧电压控制方法

Figure 8 Traditional DC-link voltage control strategy

在图 8 中, $U_{\text{dc,CHBa}}$ 、 $U_{\text{dc,CHBb}}$ 、 $U_{\text{dc,CHBc}}$ 分别为 MF-ASD 的 a、b、c 相直流侧电压, I_g 为故障电流。

图 8(a) 所示的是采用传统消弧方法的 CHB 直流侧电压波形。从图 8(a) 中可以看出,0.7~0.9 s, a、

b、c 三相变流器的直流侧电压维持在 1 000 V,0.9 s 时,非故障相注入消弧电流。根据式(8)计算得到的 $\theta=54.8^\circ$ 。此时,a 相消耗有功功率,a 相 CHB 直流侧电压下降,b 相吸收有功功率,b 相 CHB 直流侧电压上升。从图 8(b) 中可以看出,MF-ASD 的消弧效果与其直流侧电压的稳定有关,随着直流侧电压不断下降,故障电流增大直至完全失去补偿作用。

4.2 所提直流侧电压控制策略验证

图 9 为采用所提控制方法的 CHB 部分直流侧电容电压波形。从图 9 中可以看出,在电网正常和单相接地故障期间,CHB 部分的直流侧电压均维持稳定,CHB 的电压波动约为 30 V。

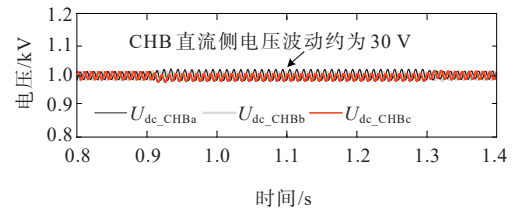


图 9 所提直流侧电压控制方法的 $U_{\text{dc,CHB}}$

Figure 9 Proposed DC-link voltage control strategy $U_{\text{dc,CHB}}$

MF-ASD 输出电流 I_{inva} 、 I_{invb} 、 I_{invc} 波形如图 10 所示。从图 10 中可以看出,在电网正常运行期间,MF-ASD 通过向电网注入无功电流补偿负载所需的无功功率。当电网发生单相接地故障时,MF-ASD 在原有无功补偿电流的基础上叠加消弧电流。

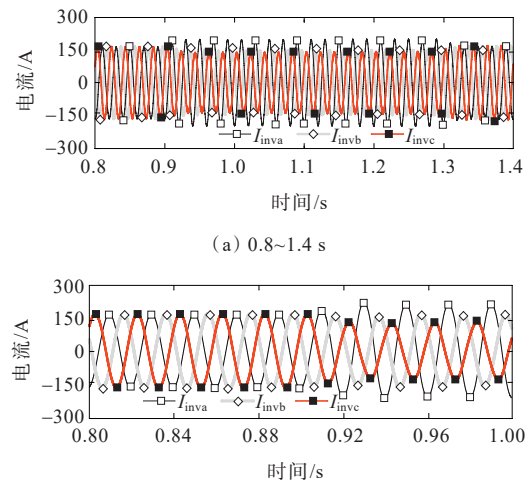


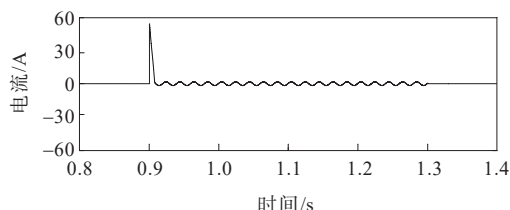
图 10 I_{inva} 、 I_{invb} 、 I_{invc} 波形

Figure 10 Waveforms of I_{inva} 、 I_{invb} and I_{invc}

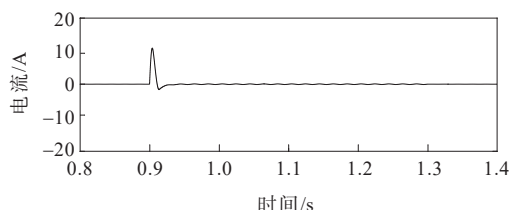
为验证本文所提方法在不同过渡电阻工况下的适应性,分别设置 10、1 000 Ω 两种过渡电阻的故

障工况,图 11 为故障电流 I_g 的波形。从图 11 中可以看出,在 0.9 s 时,电网发生 A 相接地故障;0.9~1.3 s, MF-ASD 立即动作,注入消弧电流。MF-ASD 在 0.9 s 注入消弧电流后,不同接地类型下的故障电流都得到有效抑制,电弧可自行熄灭。

三相电网电压和电流的波形如图 12 所示,从图



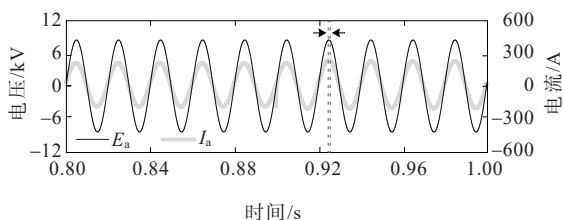
(a) $R_f=10 \Omega$



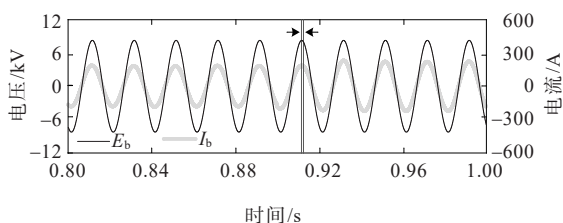
(b) $R_f=1000 \Omega$

图 11 I_g 波形

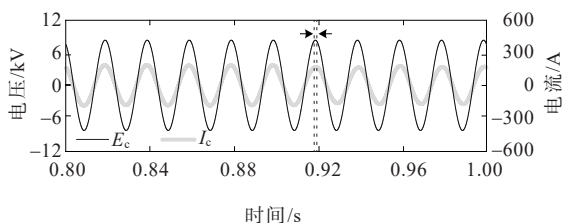
Figure 11 Waveform of I_g



(a) E_a 与 I_a



(b) E_b 与 I_b



(c) E_c 与 I_c

图 12 电网电压和电流波形

Figure 12 Waveforms of grid voltage and current

12 中可以看出,由于附加能量回路的存在,a 相的电网电流相位超前电压相位 3.1° ,b 相电网电流相位超前电压相位 1.2° ,c 相的电网电压相位超前电流相位 4.8° 。由于附加电流较小,单相接地故障持续时间短^[33-34],故所提的直流侧电压控制方法对电网无不良影响。这也表明 MF-ASD 具有良好的无功补偿效果,且在单相接地故障期间实现了消弧和无功补偿的同时运行。

5 实验验证

在文 4 模型的基础上,在硬件在环(hardware in the loop, HIL)仿真中搭建 RT-LAB 硬件实验平台^[35-36],进一步验证所提方法的正确性,该实验平台如图 13 所示。

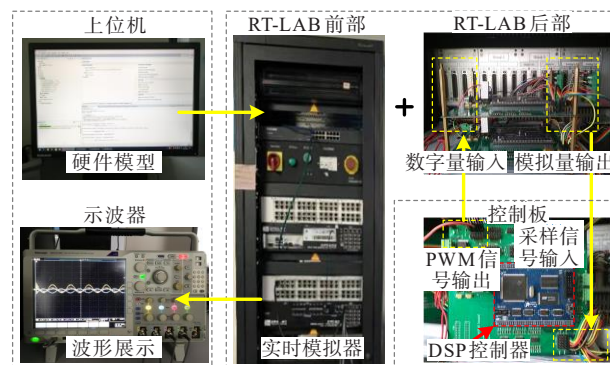


图 13 在环实验平台的 RT-LAB 硬件

Figure 13 RT-LAB hardware of hardware-in-the-loop experimental platform

该模型由三相电源、MF-ASD、三相负载、对地电容和电阻、故障模块等构成,经过 RT-LAB 系统进行实时化处理,通过 TCP/IP 通信,将分割的模型传递到 RT-LAB 目标机 OP5600 中进行运算处理。控制器选择 TI 公司的 TMS320F28335 型数字信号处理芯片,通过信号转换模块与 RT-LAB 目标机连接,进行信息交流,并通过 Windows 上位机对系统的整个运行过程进行监控,实验参数如下: $C_0=40 \mu\text{F}$, $r_0=500 \Omega$, $R_f=10 \Omega$, $L_f=5 \text{ mH}$, $L_N=50 \text{ mH}$, $Z_L=22 \Omega$, $\cos\phi=0.7$, $U_{\text{dc,CHB}}=100 \text{ V}$, $C_{\text{dc}}=1880 \mu\text{F}$, $N=3$ 。

图 14 为 $U_{\text{dc,CHBa}}$ 、 $U_{\text{dc,CHBb}}$ 、 $U_{\text{dc,CHBc}}$ 的实验波形。从图 14 中可以看出,当采用所提方法时,在消弧期间 CHB 的直流侧电压保持稳定。图 15 为 E_b 、 I_b 、 I_o 、 I_g 的实验波形。从图 15 中可以看出,当 MF-ASD 开始消弧时,消弧电流由 0.0 A 增大到 12.0 A,故障电流由 6.5 A 减小到 0.1 A。在正常工况下, MF-ASD

通过注入无功电流补偿负载的无功功率,使系统维持单位功率因数运行。当配电网发生故障时,MF-ASD 输出消弧电流为 12.0 A,无功补偿和消弧可同时进行。

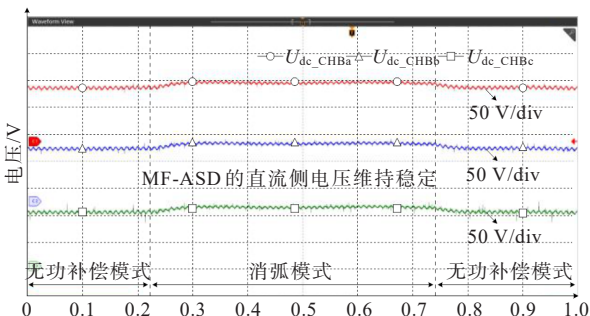


图 14 U_{dc_CHBa} 、 U_{dc_CHBb} 、 U_{dc_CHBc} 实验波形
Figure 14 Experimental waveforms of U_{dc_CHBa} , U_{dc_CHBb} , and U_{dc_CHBc}

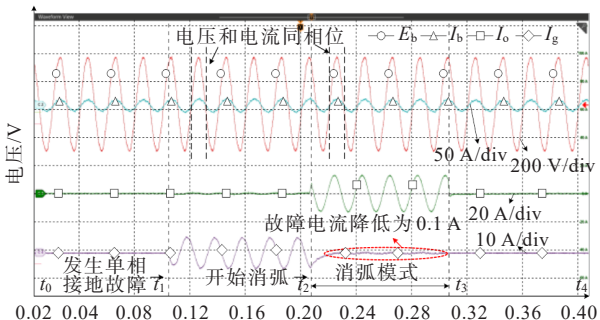


图 15 E_b 、 I_b 、 I_o 、 I_g 实验波形
Figure 15 Experimental waveforms of E_b , I_b , I_o , and I_g

6 结语

针对多功能消弧装置在消弧期间难以获取能量的问题,本文提出一种基于附加能量回路的接地故障消弧方法。通过仿真和实验验证了所提方法的可行性与优越性,所得结论如下:

1) 本文分析了消弧期间 MF-ASD 输出有功功率、能量流向的变化规律,阐明了传统直流侧稳压策略失效的原因,揭示了 MF-ASD 直流侧电压稳定机理。

2) 在配电网发生单相接地故障后,通过在电网和 MF-ASD 之间构建附加的能量回路,补偿消弧期间 MF-ASD 直流侧电压稳定所需的有功功率和无功功率,所提方法不仅能有效抑制故障电流,还可保持 MF-ASD 直流侧电压稳定。

3) 本文通过采用基于附加能量回路的接地故障消弧方法有效避免了在 MF-ASD 的直流侧增加额外的供能装置,降低了装置整体的成本,保证了 MF-ASD 的安全运行。

参考文献:

[1] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[2] 李继刚,徐肃,董昭阳,等. 智能综合接地消弧系统的研究 [J/OL]. 高压电器, 1-9[2025-01-27]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20250113.1622.002>.
LI Jigang, XU Su, DONG Zhaoyang, et al. Research and implementation of a phase and line selection method in single-phase-to-ground fault based on phase current increment unsymmetrical[J/OL]. High Voltage Apparatus, 1-9[2025-01-27]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20250113.1622.002>.

[3] 刘宝稳,王晨雨,曾祥君,等. 三相分布参数不对称配电网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.

[4] 杨广杰,卜明新,陈伟刚,等. 考虑相量量测单元数据不同步的双端输电线路正序以及零序参数辨识方法[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(6): 738-750.
YANG Guangjie, BU Mingxin, CHEN Weigang, et al. Identification of positive sequence and zero sequence parameters of double-ended transmission lines considering phasor measurement unit data asynchrony [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7 (6): 738-750.

[5] 曾祥君,李理,喻锴,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.

[6] 杨鹏辉,钱国超,白浩,等. 参数不对称配电网高阻接地故障感知与辨识方法[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 22-32.
YANG Penghui, QIAN Guochao, BAI Hao, et al. High resistance grounding fault perception and identification method in asymmetric distribution network[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 22-32.

[7] 负保记,马柯翔,司渭滨,等. 配电网单相接地故障的柔性熄弧装置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 124-134.

- YUN Baoji, MA Kexiang, SI Weibin, et al. Flexible arc extinguishing device for a single-phase ground fault in a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(19): 124-134.
- [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.
- [9] 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): 5381-5390.
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): 5381-5390.
- [10] 李冠华, 黄珂, 何建营, 等. 配电网单相电弧性接地故障电弧动态特性研究[J]. *供用电*, 2025, 42(10): 118-125+135.
LI Guanhua, HUANG Ke, HE Jianying, et al. Research on dynamic characteristics of single-phase arc grounding faults in distribution networks[J]. *Distribution & Utilization*, 2025, 42(10): 118-125+135.
- [11] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(20): 1-7.
XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(20): 1-7.
- [12] 涂春鸣, 侯玉超, 郭祺, 等. 计及配电网线路阻抗影响的自适应接地故障消弧控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(8): 163-171.
TU Chunming, HOU Yuchao, GUO Qi, et al. Adaptive arc suppression control strategy for grounding fault considering influence of line impedance in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 163-171.
- [13] FAN B S, YAO G Z, WANG W, et al. Principle and control design of a novel hybrid arc suppression device in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(1): 41-51.
- [14] 齐郑, 张淇钰, 兰冠仪. 考虑分布式电源接入的配电网有源电压消弧技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(17): 145-155.
QI Zheng, ZHANG Qiyu, LAN Guanyi. Active voltage arc suppression technology for distribution networks considering distributed generation integration[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(17): 145-155.
- [15] 陈锐, 王文, 翁洪杰, 等. 配电网过电压有源抑制的注入电流控制方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(5): 1-6.
CHEN Rui, WANG Wen, WENG Hongjie, et al. Injecting current control method for active overvoltage suppression in distribution network[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2018, 30(5): 1-6.
- [16] 邵庆祝, 崔鑫, 谢民, 等. 弧光高阻接地故障建模及数据修正算法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(11): 120-125.
SHAO Qingzhu, CUI Xin, XIE Min, et al. Modeling and data correction algorithm for arc high resistance grounding fault[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(11): 120-125.
- [17] 雷莱, 王晓卫, 田影, 等. 基于综合位置峰值检测的电网高阻故障检测方法[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(3): 60-66.
LEI Lai, WANG Xiaowei, TIAN Ying, et al. A microgrid high impedance fault detection based on integrated position peak[J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(3): 60-66.
- [18] 喻泉, 曾祥君, 喻锷, 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.
- [19] 江浪, 窦真兰, 尹项根, 等. 基于电能路由器的新型配电网系统接地故障柔性降压消弧[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(19): 1-12.
JIANG Lang, DOU Zhenlan, YIN Xianggen, et al. Flexible voltage arc suppression for single line-to-ground fault in distribution systems based on power routers[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(19): 1-12.
- [20] 周兴达, 陆帅, 陈杨明, 等. 基于SVG两相电流注入的配电网单相接地故障消弧方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(10): 142-149.
ZHOU Xingda, LU Shuai, CHEN Yangming, et al. Single-phase-to-ground fault arc-extinguishing method for distribution network based on SVG two-phase current injection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(10): 142-149.
- [21] DONG Y F, YANG H Y, LI W H, et al. Neutral-point-shift-based active thermal control for a modular multilevel converter under a single-phase-to-ground fault [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(3): 2474-2484.
- [22] 李振兴, 杨梓康, 胡聪, 等. 基于母线接地的光伏场站

- 集电线路快速消弧及故障选线方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 108-116.
- LI Zhenxing, YANG Zikang, HU Cong, et al. A rapid arc extinction and fault line selection method for collection lines in PV power stations based on bus grounding[J]. Smart Power, 2025, 53(9): 108-116.
- [23] 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.
- [24] LIU P H, DU S T, SUN K, et al. Single-line-to-ground fault feeder selection considering device polarity reverse installation in resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2204-2212.
- [25] ZHANG B L, GUO M F, ZHENG Z Y, et al. Fault current limitation with energy recovery based on power electronics in hybrid AC - DC active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12593-12606.
- [26] 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.
- [27] 郭谋发, 游建章, 张伟骏, 等. 基于三相级联 H 桥变流器的配电网接地故障分相柔性消弧方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 11-22.
- GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHANG Weijun, et al. Separate-phase flexible arc-suppression method of earth-fault in distribution systems based on three-phase cascaded H-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 11-22.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] QIU W Q, GUO M F, YANG G J, et al. Model-predictive-control-based flexible arc-suppression method for earth fault in distribution networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 16051-16065.
- [31] HUANG Z J, GUO Q, TU C M, et al. A non-neutral alternate arc suppression method for single phase grounding fault in active distribution network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 152: 109182.
- [32] 唐立军, 钱信君, 刘红文, 等. 基于站内资源的新型无功功率支撑与接地故障调控复合装置[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 186-195.
- TANG Lijun, QIAN Xinjun, LIU Hongwen, et al. A novel reactive power support and grounding fault control composite device based on station resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 186-195.
- [33] 丁敬明, 邹贵彬, 周成瀚, 等. 考虑参数不对称的配电网单相接地故障柔性消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 58-67.
- DING Jingming, ZOU Guibin, ZHOU Chenghan, et al. A flexible arc suppression method for a single-phase grounding fault in a distribution network considering parameter asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 58-67.
- [34] 赵国军, 陈坤焱, 曾伟, 等. 计及等效负载变化的消弧逆变器性能分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023(1): 148-157.
- ZHAO Guojun, CHEN Kunyi, ZENG Wei, et al. Performance analysis and design of an arc suppression inverter considering equivalent load change[J]. Power System Protection and Control, 2023(1): 148-157.
- [35] JAFARIAN H, KIM N, PARKHIDEH B. Decentralized control strategy for AC-stacked PV inverter architecture under grid background harmonics[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 84-93.
- [36] SHUAI Z K, PENG Y L, GUERRERO J M, et al. Transient response analysis of inverter-based microgrids under unbalanced conditions using a dynamic phasor model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2868-2879.