DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.209 中图分类号：TM773 文献标志码：A

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

王呈轩[1]，宫瑞邦[1]，樊艳芳[2]，程俊文[1]，张雷亮[1]
(1.国网新疆电力有限公司电力科学研究院，乌鲁木齐 830011；2.新疆大学电气工程学院，乌鲁木齐 830011)

摘要：配电网长时间带单相接地故障运行将损坏绝缘，继而引发相间短路的故障，且接地弧光还存在一定的火灾风险。为提高供电可靠性，确保设备及环境安全，主动干预型消弧装置通过将短路电流引入站内接地点，可有效降低故障点电流水平，熄灭因接地产生的弧光。然而，主动干预型消弧装置多以零序电压为阈值作为启动判据，而单相接地过渡电阻阻值对零序电压影响较大。为保证装置的高效运行，首先分析了过渡电阻与零序电压的函数关系；其次通过矢量三角形法与函数关系法分别推导了过渡电阻的计算公式，并说明了装置零序启动电压的设置方法；最后通过仿真实验及高阻人工单相接地实验，验证了耐受过渡电阻计算方法及所提零序启动电压参数设置的有效性与合理性。

关键词：配电网单相接地；主动干预型消弧装置；过渡电阻；零序电压；人工单相接地实验

Research on Calculation Method of Withstand Transition Resistance of Active Intervention Arc Suppression Device and Parameter Setting of Zero Sequence Starting Voltage

WANG Chengxuan[1], GONG Ruibang[1], FAN Yanfang[2], CHENG Junwen[1], ZHANG Leiliang[1]
(1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China; 2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830011, China)

Abstract: Long-term operation of distribution networks with persistent single-phase grounding faults will result in insulation deterioration and subsequent phase-to-phase short-circuit faults, and grounding arcs also pose potential fire risks. In order to improve the reliability of power supply and ensure the safety of equipment and environment, the active intervention arc suppression device can effectively reduce the current level of the fault point and extinguish the arc light generated by grounding by introducing the short-circuit current into the substation. However, most of the active intervention arc suppression devices use the zero-sequence voltage as the threshold as the starting criterion, and the resistance value of the single-phase grounding transition resistance has a great influence on the zero-sequence voltage. In order to ensure the efficient operation of the device, analyzes the functional relationship between the transition resistance and the zero-sequence voltage firstly, then deduces the calculation formula of the transition resistance by the vector triangle method and the functional relationship method, and explains the setting method of the zero-sequence starting voltage of the device, and finally verifies the validity and rationality of the calculation method of the endurance transition resistance and the parameter setting of the zero-sequence starting voltage through the simulation experiments and the high-impedance artificial single-phase grounding experiment.

Keywords: Single-phase grounding of distribution network; active intervention arc suppression device; transition resistance; zero-sequence voltage; artificial single-phase grounding test

收稿日期：2024-02-04；**修回日期：**2024-04-07；**录用日期：**2024-04-21；**网络首发日期：**2024-05-11
基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2022D01C365，2022D01C662)
This work is supported by Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region under the grants 2022D01C365 and 2022D01C662

随着人民生活水平的逐渐提高与经济社会的蓬勃发展，现代电力系统对供电可靠性提出了更高要求，配电系统作为用户侧与电网侧直接相连的能量传输纽带，应具备更快速、更准确的故障定位及消缺处置能力[1-3]。配电网运行过程中单相接地故障最为常见，其故障原因多样，且配网的复杂结构将增加故障定位的难度，因此该故障处理难度较高[4-5]。随着电网技术与电力设备的不断进步，主动干预型消弧装置为单相接地的处置提供了新思路[6-7]。

国家电网公司对于单相接地故障的处置要求已从可带电运行 2 h 转变为应迅速完成故障定位、隔离及处置工作[8-9]，其主要目的在于避免由单相接地引发相间故障，从而出现电网设备损坏，故障范围扩大等不利情况[10-11]。主动干预型消弧装置适用于母线电容电流较大的线路，其安装于变电站内部，该装置优势在于可将短路电流迅速转移至站内接地点，有效降低故障点电流水平，熄灭故障点电弧，从而避免故障升级的情况；装置同时能够快速高效地完成选相选线工作，为快速处置故障奠定基础[12-14]。

主动干预型消弧装置多以零序电压越限作为启动依据，一般能够可靠处置金属性接地、弧光接地及经低电阻接地的情况[15-16]。然而当接地过渡电阻过大时，会存在零序电压值较小，从而无法达到装置的启动阈值，此时装置将无法正常启动。为避免上述情况的发生，应计算装置在常规启动电压下的最大耐受过渡电阻，以此判断电压定值设定的合理性。在修改启动电压时，应综合考虑保护线路参数，如母线电容电流、非金属性接地过渡电阻的常见范围等，根据线路实际情况调整装置零序启动电压定值[17-19]。

随着主动干预型消弧装置的逐步应用，设备实际使用经验正持续增加，同时研究人员也在不断发现并解决相关技术问题。文献[20]指出高阻接地时主动干预型消弧装置启动灵敏度过低的问题，并提出了主动干预型消弧装置与消弧线圈并列使用的解决方法，但该方法会在一定程度上增加设备投入成本；文献[21]指出单相接地的故障电流不仅受过渡电阻影响，还与线路阻抗有关，并推导出故障点电流，但未对主动干预型消弧装置的零序启动电压参数的设置进行讨论及说明。为进一步提升设备的现场应用效果，减少多设备投入的情况，本文对主动干预型消弧装置的耐受过渡电阻及零序启动电压参数展开具体分析。

为保证主动干预型消弧装置的启动可靠性，首先分析了配电网单相接地故障中过渡电阻与线路零序电压的关系；其次通过矢量三角形法与函数关系法分别推导了过渡电阻的计算公式，并对比了 2 类方法计算结果的差值；然后给出了装置零序启动电压的参数设置方法，同时在 MATLAB/Simulink 中搭建了相应的仿真模型，并进行了相应的仿真实验；最后于某 10 kV 配电线路进行了高阻型人工单相接地实验，验证了主动干预型消弧装置在合理定值下的启动可靠性。

1 中性点不接地系统单相接地故障特征分析

单相接地故障可分为金属性接地及经过渡电阻接地，在实际工作中，金属性接地较少，且本文研究重点为过渡电阻对主动干预型消弧装置的影响，因此仅对经过渡电阻的接地故障展开分析。中性点不接地系统单相接地故障示意如图 1 所示。

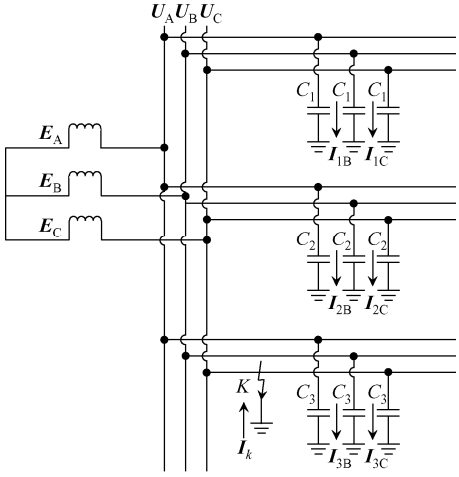


图 1 中性点不接地系统单相接地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase grounding of ungrounded neutral system

设 K 点发生故障，根据戴维南等效原理，可得零序电网等效示意如图 2 所示。图中：$\boldsymbol{E}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{E}_{\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{E}_{\mathrm{C}}$ 为三相电动势；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{eq}}$ 为等效电动势；C_{A}、C_{B}、C_{C} 为三相对地电容；C_{eq} 为等效电容；R_{g} 为过渡电阻；$\boldsymbol{U}_0$ 为零序电压，其表达式为

$$\boldsymbol{U}_0=\frac{1}{3}(\boldsymbol{U}_{AK}+\boldsymbol{U}_{BK}+\boldsymbol{U}_{CK})=-\boldsymbol{E}_{\mathrm{A}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{U}_{AK}$、$\boldsymbol{U}_{BK}$、$\boldsymbol{U}_{CK}$ 为 K 点的三相电压。

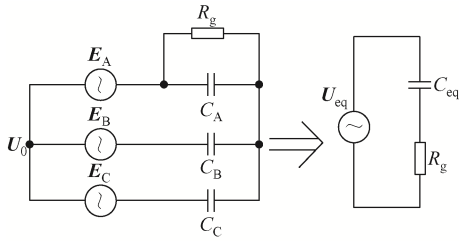


图 2　中性点不接地系统单相接地零序电网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single-phase grounding zero-sequence power grid of ungrounded neutral system

设线路为全对称结构，则 C_{A}=C_{B}=C_{C}=C，此时 C_{eq}=3C，由基尔霍夫电压定律 KVL(Kirchhoff's voltage law)可知

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{eq}}=\boldsymbol{E}_{\mathrm{A}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{U}_0+\boldsymbol{E}_{\mathrm{A}}=\boldsymbol{U}_{R_{\mathrm{g}}} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{U}_{R_{\mathrm{g}}}$ 为过渡电阻电压。

结合式(1)~式(3)可知零序电压表达式为

$$\boldsymbol{U}_0=-\boldsymbol{E}_{\mathrm{A}}\frac{1}{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega 3C}+R_{\mathrm{g}}}\cdot\frac{1}{\mathrm{j}\omega 3C}=-\frac{\boldsymbol{E}_{\mathrm{A}}}{1+\mathrm{j}\omega 3CR_{\mathrm{g}}} \tag{4}$$

式中，ω 为电网电压角频率。

进一步得到短路电流表达式为

$$I_{R_{\mathrm{g}}}=3\mathrm{j}\omega C\boldsymbol{U}_0=3\omega C\boldsymbol{U}_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{\pi}{2}} \tag{5}$$

分析可知，中性点不接地系统单相接地故障特征主要表现为：①过渡电阻与零序电压值成反比，过渡电阻为 0 时，零序电压值等于系统正常运行时的相电压值；②故障后故障相相电压趋近于 0，非故障相相电压的值增大至线电压；③故障电流呈现容性，且约为正常工作电流的 3 倍。

以上分析结果可用作主动干预型消弧装置的启动判据和选相选线依据。

2　主动干预型消弧装置结构及原理

2.1　基本结构

主动干预型消弧装置适用于中压配电网的小电流接地系统，安装于变电站内部母线侧，装置的具体结构如图 3 所示，由前置断路器、电流及电压互感器和接地元件等设备组成[20]。

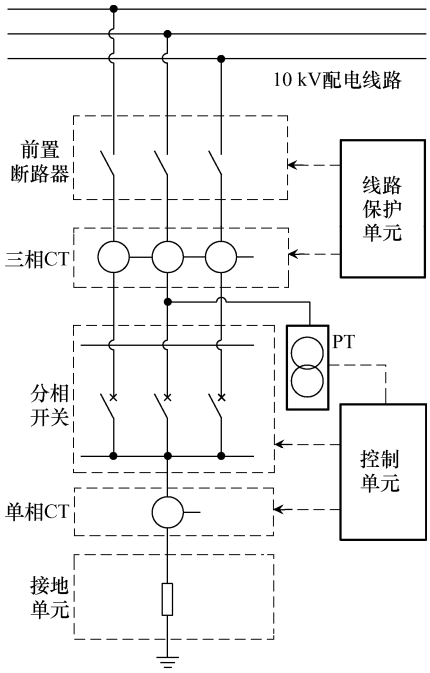


图 3　主动干预型消弧装置结构图

Fig. 3 Structural diagram of active intervention arc suppression device

2.2　动作过程

主动干预型消弧装置处置单相接地故障的原理如图 4 所示。故障发生时，装置应迅速闭合故障的接地开关，并将故障点上的电容电流转移至站内装置接地点上，从而实现降低故障电流水平及有效灭弧的目标。为实现该目标，装置应迅速完成启动、选相、选线动作，具体描述如下。

启动过程：装置采用零序电压比较启动法，通过不断检测由电压互感器提供的开口电压和三相电压，实时监测因单相接地故障产生的零序电压值 $3U_0$，当 U_0 大于装置启动定值 U_{N} 时，装置立即启动。

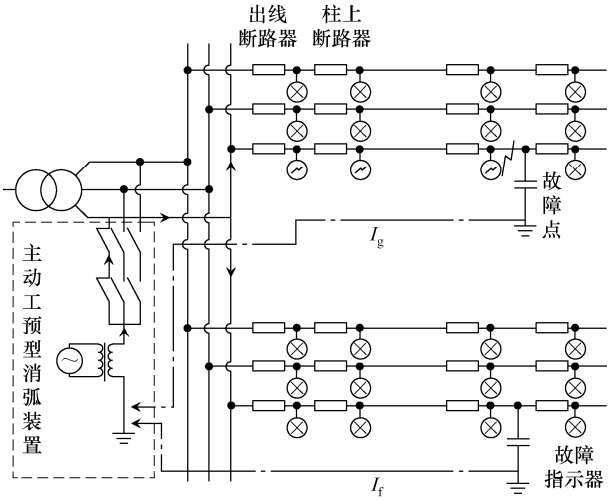


图 4 站内主动干预式消弧处置单相接地故障原理

Fig. 4 The principle of active intervention arc suppression in the substation to deal with single-phase grounding faults

选相过程：装置采用相电压幅值比较法，以故障相电压最低为选相原则。

选线过程：装置采用零序电流比较法，以电弧熄灭前、后各线路零序电流的变化为判据，从而高效精确地判断故障支线。

根据国家电网有限公司的相关要求，装置在电容电流为 65 A，过渡电阻为 1 kΩ 的条件下应能准确完成上述过程。然而过渡电阻的大小将影响零序电压的幅值，当阻值过大时会出现装置无法正常启动的情况，因此应计算装置的最大耐受过渡电阻，从而设定合理的零序电压启动定值。

3 主动干预型消弧装置过渡电阻的计算及零序启动电压的设置

为了研究主动干预型消弧装置的最低零序启动电压值，应研究最小启动电压与最大过渡电阻的关系，为简化推导过程，可代替分析 $\boldsymbol{U}_0$ 与 $\boldsymbol{U}_{R_g}$ 的函数关系。为确保计算结果的准确性，分别根据二者的矢量关系及函数关系进行推导计算，并比较 2 类不同计算方式下的计算结果。

3.1 矢量三角形计算法

电力系统中性点不接地方式下的单相故障示意如图 5 所示。图中：X_A、X_B、X_C 为线路等效阻抗；C_1、C_2、C_3 为三相对地电容；$\boldsymbol{U}_A$、$\boldsymbol{U}_B$、$\boldsymbol{U}_C$ 为三相电压。

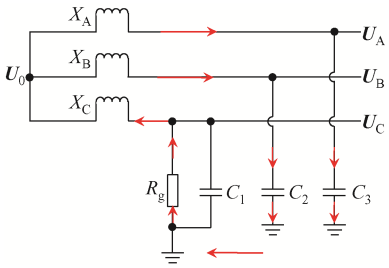


图 5 不接地系统的单相故障图

Fig. 5 Single-phase fault diagram of ungrounded neutral system

首先对中性点不接地系统的零序电压进行分析，根据地中电流总和为 0 的原则，可得

$$\frac{\boldsymbol{U}_A+\boldsymbol{U}_0}{R_g}+\frac{\boldsymbol{U}_A+\boldsymbol{U}_0}{-\mathrm{j}X_C}+\frac{\boldsymbol{U}_B+\boldsymbol{U}_0}{-\mathrm{j}X_C}+\frac{\boldsymbol{U}_C+\boldsymbol{U}_0}{-\mathrm{j}X_C}=0 \quad (6)$$

化简式(6)可得

$$\frac{\boldsymbol{U}_C-\boldsymbol{U}_0}{R_g}=\boldsymbol{U}_0\Big/-\mathrm{j}\frac{X_C}{3} \quad (7)$$

由式(7)可知 X_C 与 R_g 串联，基于此可得中性点不接地系统单相接地故障等效电路，如图6所示。

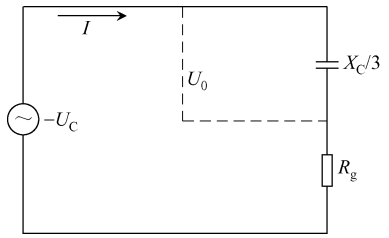


图 6 中性点不接地系统单相接地故障等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of single-phase grounding fault in ungrounded neutral system

由图 6 可以看出，X_C 与 R_g 为串联关系，I 为串联电路流过的电流，U_C 为相电压，U_0 为 X_C 两端的电压，根据电压关系，画出其矢量三角形，如图 7 所示。

$\boldsymbol{U}_{R_g}$ 的表达式为

$$\boldsymbol{U}_{R_g}=\sqrt{\boldsymbol{U}_C^2-\boldsymbol{U}_0^2} \quad (8)$$

在计算时 $\boldsymbol{U}_0$ 为设定值，因此为已知值，通过 $\boldsymbol{U}_0$ 与 $\boldsymbol{U}_{R_g}$ 模长的比，可以计算出 R_g 的值。具体推导过程如下。

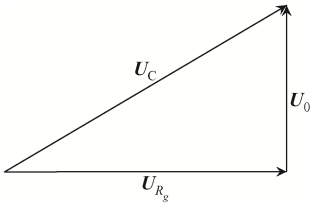


图 7　电压矢量三角形示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the voltage vector triangle

由图 7 可知，根据模长关系，可得$\boldsymbol{U}_{R_g}$与 $\boldsymbol{U}_0$模长的比，表示为

$$\frac{\left|\boldsymbol{U}_{R_g}\right|}{\left|\boldsymbol{U}_0\right|}=\frac{I\left|R_g\right|}{I\left|-\mathrm{j}X_C/3\right|} \tag{9}$$

化简式(9)得

$$\frac{\sqrt{U_C^2-U_0^2}}{U_0}=\frac{R_g}{X_C/3} \tag{10}$$

由此推导出过渡电阻的计算公式为

$$R_g=\frac{\sqrt{U_C^2-U_0^2}}{U_0}\cdot\frac{X_C}{3} \tag{11}$$

X_C的计算公式为

$$X_C=3U_C/I_C \tag{12}$$

式中，I_C为电容电流。

为方便计算，定义 K 为 U_0 相关的函数，其表达式为

$$K=\sqrt{U_C^2-U_0^2}/3U_0 \tag{13}$$

可将式(11)简写为

$$R_g=K\cdot X_C \tag{14}$$

由式(12)~式(14)可知，主动干预型消弧装置过渡电阻由 U_0、U_C及 I_C决定。

U_0 由给定的零序启动电压决定，但在计算时首先应将二次值折算至一次值进行计算。常见的一次侧电压互感器 PT(potential transformer)变比为 $10000/\sqrt{3}$，二次侧 PT 变比为 $100/\sqrt{3}$，开口三角形输出为 $3U_0$，由此得到折算公式为

$$U_{0,\mathrm{pri}}=\frac{1}{3}\cdot\frac{10\,000}{\sqrt{3}}\cdot\frac{3}{100}\cdot U_{0,\mathrm{sec}}=\frac{100}{\sqrt{3}}\cdot U_{0,\mathrm{sec}} \tag{15}$$

式中，$U_{0,\mathrm{pri}}$、$U_{0,\mathrm{sec}}$分别为 U_0的一次值、二次值。计算时电网相电压 U_C取值 5.7 kV。

在主动干预型消弧装置零序启动电压为3 V的条件下，计算 I_C分别为 100、150、200、250、300 A 下的过渡电阻，结果见表 1。

表 1　零序启动电压为 3 V 的计算结果(矢量三角形计算法)

Tab. 1 Calculation results of a zero-sequence startup voltage of 3 V (vector triangle method)

$U_{0,\mathrm{pri}}$/V	I_C/A	X_C/Ω	K	R_g/Ω
173	100	171.0	10.98	1 877.58
173	150	114.0	10.98	1 251.72
173	200	85.5	10.98	938.79
173	250	68.4	10.98	751.03
173	300	57.0	10.98	625.86

3.2　函数关系推导计算法

在矢量三角形计算法中已经对中性点不接地系统的零序电压进行了分析，如式(6)所示，对其进行化简得

$$\boldsymbol{U}_0=-\boldsymbol{U}_C\cdot 1\Big/\left(1+\frac{3R_g}{X_C}\mathrm{j}\right) \tag{16}$$

对式(16)进行去虚部处理，得

$$\left|\boldsymbol{U}_0\right|=\left|\frac{U_C X_C}{X_C+3R_g\mathrm{j}}\right| \tag{17}$$

$$U_0=U_C X_C/\sqrt{X_C^2+9R_g^2} \tag{18}$$

对式(18)两边同时加平方，可推导出 R_g与 U_0的函数关系为

$$R_g=\frac{1}{3}X_C\sqrt{\frac{U_C^2}{U_0^2}-1} \tag{19}$$

为验证理论计算的正确性，在与矢量三角形算法相同的条件下，计算 I_C分别为 100、150、200、250、300 A 下的过渡电阻，结果见表 2。

3.3　不同过渡电阻计算方法结果对比

2 种不同计算方法下的结果对比见表 3。可知，2 类原理下的过渡电阻的计算结果基本一致，二者之间的计算误差率不超过 0.03%，符合工程要求，验证了过渡电阻计算方法的合理性与计算结果的准确性。

3.4　装置零序启动电压设置方法

本节推导了主动干预型消弧装置的零序启动电压与过渡电阻的函数关系，并给出了过渡电阻的

表 2 零序启动电压为 3 V 的计算结果

(函数关系推导计算法)

Tab. 2 Calculation results of zero-sequence startup voltage of 3 V (functional relationship derivation calculation method)

$U_{0,pri}$/V	I_C/A	X_C/Ω	R_g/Ω
173	100	171.0	1 877.16
173	150	114.0	1 251.44
173	200	85.5	938.58
173	250	68.4	750.86
173	300	57.0	625.72

表 3 不同计算方法下的过渡电阻阻值对比

Tab. 3 Comparison of transition resistance values under different calculation methods

I_C/A	R_g/Ω (矢量)	R_g/Ω (函数)	R_g/Ω (差值)	误差率/%
100	1 877.58	1 877.16	0.42	0.02
150	1 251.72	1 251.44	0.28	0.02
200	938.79	938.58	0.21	0.02
250	751.03	750.86	0.17	0.02
300	625.86	625.72	0.14	0.02

函数表达式。在实际应用场景中，零序启动电压设置方法与过渡电阻阻值的推导过程是相反的，应根据母线电容电流、线路阻抗值、非金属性接地过渡电阻的常见范围，瞬时及永久性单相接地故障的发生频率等诸多因素综合考虑，根据式(15)和式(18)确定主动干预型消弧装置的零序启动电压定值。

4 主动干预型消弧装置的仿真及现场实验

4.1 主动干预型消弧装置的仿真实验

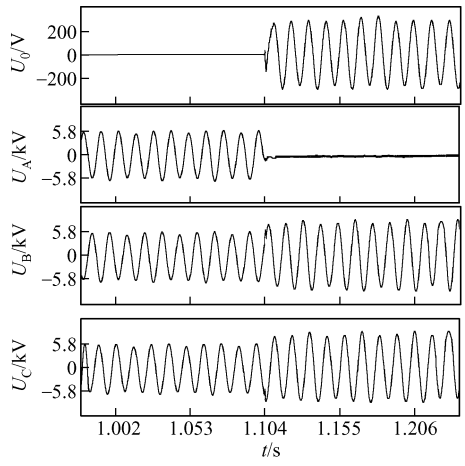
为确保参数设置的有效性与现场实验的安全性，首先应对主动干预型消弧装置开展相应的仿真实验。第 3 节研究了单相接地故障过渡电阻的计算方法及主动干预型消弧装置零序启动电压的参数设置，为保证装置的启动可靠性，应根据实际线路参数设置不同的启动参数。为验证零序启动电压计算方法的有效性，在 MATLAB/Simulink 中搭建了相应的仿真模型，为与现场线路保持一致，仿真参数见表 4。

表 4 仿真参数设置

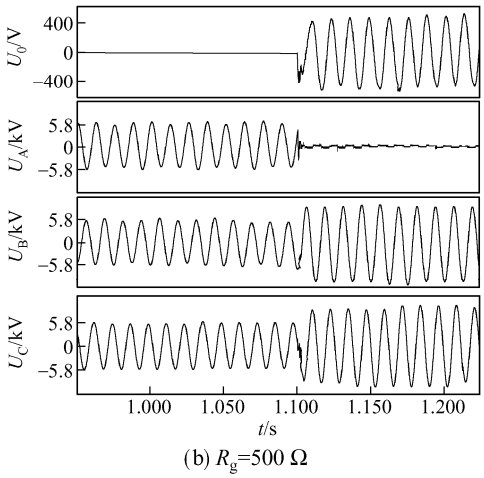
Tab. 4 Simulation parameter settings

参数	数值
电容电流 I_C/A	150
线路阻抗 X_C/Ω	114
二次侧零序电压启动值 U_N/V	3.00
接地第一次判定时间 t_1/s	4.00
接地第二次判定时间 t_2/s	10.00
接地第三次判定时间 t_3/s	900.00

本文进行了 2 组高阻接地实验，过渡电阻分别为 1 000、500 Ω。由于仿真实验中系统需要一定的时间进入稳态，因此设置在第 1.100 s 时发生 A 相单相接地故障，选相仿真结果如图 8 所示。可以看出，当过渡电阻分别为 1 000、500 Ω 时，零序电压一次值分别为 220.00 V、439.00 V，对应零序电



(a) R_g=1 000 Ω



(b) R_g=500 Ω

图 8 仿真实验选相动作波形

Fig. 8 Simulation experiments phase selection action waveform

压二次值分别为 3.81 V、8.60 V，均高于设置启动电压 3.00 V，装置均正常启动。根据故障特征分析，接地相相电压减小，非故障相相电压增大，选出 A 相为故障相。仿真实验的结果验证了理论分析的正确性，同时为现场实验的开展奠定了基础。

4.2 主动干预型消弧装置的现场实验

为验证零序启动电压参数设置的有效性，于乌鲁木齐某 10 kV 配电线路开展人工单相接地实验。本次实验涉及的设备主要包括 2 部分：站内安装的主动干预型消弧装置，站外的单相接地故障模拟实验装置。主动干预型消弧装置的动作流程在第 3 节中已详细论述，JDBH-II 型主动干预型消弧装置如图 9 所示。



图 9　JDBH-II 型主动干预型消弧装置

Fig.9 JDBH-II type active intervention arc suppression device

本次实验的目的在于测试以理论推导为基础而设置的常规启动定值下，设备在过渡电阻阻值较大的情况下能否正常动作，并有效完成故障点的选相选线工作。依据所测线路的电容电流等相关数据，以 I_C=150 A 为参考，设置装置参数见表 5。

表 5　主动干预型消弧装置启动定值表

Tab. 5 Start-up value table of active intervention arc suppression device

参数	数值
二次侧零序电压启动值 U_N/V	3
接地第一次判定时间 t_1/s	4
接地第二次判定时间 t_2/s	10
接地第三次判定时间 t_3/s	900

人工单相接地故障模拟实验装置通过将实验线路与其连接，通过电脑远端操作并制造不同故障时间、过渡电阻、弧光类型的接地故障，实验装置如图 10 所示。



图 10　单相接地故障模拟实验装置

Fig.10 Single-phase grounding fault simulation experimental device

本文主要研究对象为主动干预型消弧装置的过渡电阻与零序启动电压的关系，因此设置故障类型为永久性的非金属性接地故障，接地实验装置内部的过渡电阻连接如图 11 所示。通过控制开关 KM1~KM5 改变电阻 R_1~R_5 的串联关系，从而调整过渡电阻阻值，当 KM1~KM5 均处于断开状态时，对应装置能够制造最大的过渡电阻。

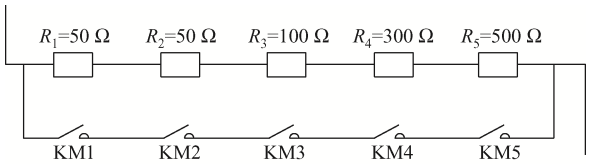
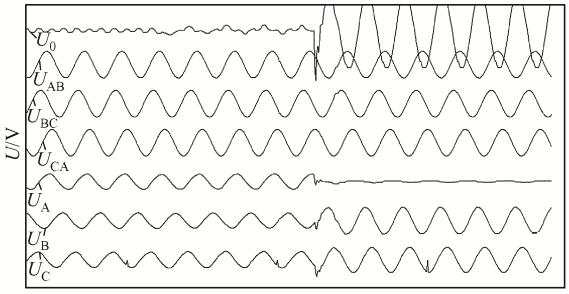


图 11　单相接地故障模拟实验装置分档可调电阻器

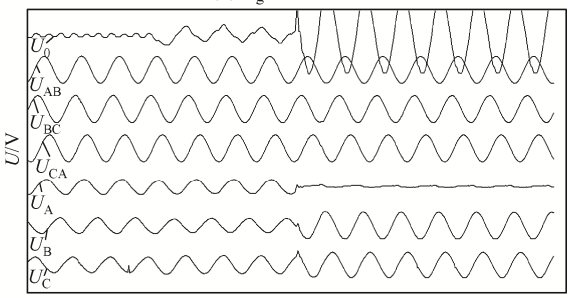
Fig. 11 Binned adjustable resistor in a single-phase grounding fault simulation experimental device

根据可调电阻器的调整范围，设置 2 组非金属性接地实验，其过渡电阻分别为 1 000、500 Ω，故障选相波形如图 12 所示，当单相接地故障发生时，2 组实验中二次侧 U_0 值分别为 4.17、10.96 V，均超过装置零序电压启动值 3.00 V。以故障相相电压明显减小、非故障相相电压增大为选相原则，2 组实验选相结果均为 A 相，与实际情况一致。

故障选线动作波形如图 13 所示，当单相接地故障发生时，以电流明显增大为选线原则，2 组实验选线结果均为 1 025 线，与实际情况一致。主动干预型消弧装置可将短路电流转移至站内，从而降低线路上短路电流的水平。



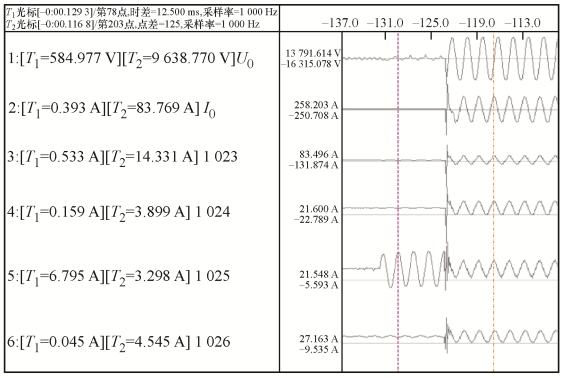
(a) R_g=1 000 Ω



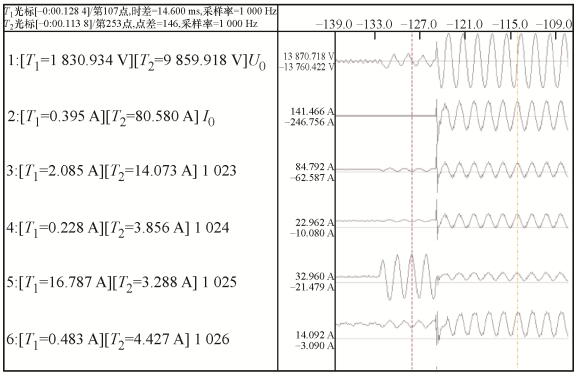
(b) R_g=500 Ω

图 12 人工接地实验选相动作波形

Fig. 12 Waveform of phase selection in artificial grounding test



(a) R_g=1 000 Ω



(b) R_g=500 Ω

图 13 人工接地实验选线动作波形

Fig. 13 Waveform of line selection in manual grounding test

由实验结果可知，单相接地故障发生时，过渡电阻越大，零序电压值越小，根据线路参数及理论计算可以合理地设置装置的零序启动电压定值，从而确保装置动作的可靠性及灵敏性。

通过对比仿真实验结果与现场实验结果可知，现场实验中的线路参数不准确等因素，使得实际电容电流与计算参数设置时选择的理论值有偏差，因此零序电压的实际值略大于理论值，但误差在可控范围内，且装置在高阻接地的情况下能够正常启动，并正确地完成选相选线工作。根据理论分析得到的主动干预型消弧装置零序电压参数设置方法，在线路参数可靠的情况下，能够有效避免装置拒动的情况，有效提升装置的实际使用效果。

5 结语

主动干预型消弧装置是单相接地故障处置的一种新设备，可以将故障点电流转移至站内，从而实现减小故障电流与抑制弧光的目标，但过渡电阻阻值过大时存在装置无法正常启动的问题，高阻接地中该问题将更加明显。本文首先分析了过渡电阻与零序电压之间的反比函数关系；其次推导了装置耐受过渡电阻的函数表达式，通过对比矢量三角形法与函数关系推导法的结果验证了过渡电阻计算方法的准确性，并给出了应根据母线电容电流和线路常见非金属性接地过渡电阻阻值范围等因素，计算主动干预型消弧装置零序启动电压定值的设置方法；最后通过高阻型单相接地仿真实验及人工单相接地实验，验证了所提定值设置方法的合理性。

参考文献：

[1] 王玉梅，王露露. 基于多类需求响应的配电网优化调度[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 273-282.
Wang Yumei, Wang Lulu. Optimal dispatching of distribution network based on multi-type demand response [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 273-282. (in Chinese)

[2] 兰征，杨淳智，谭仁煜，等. 考虑异构分布式光伏电压

治理潜力的配电网集群式优化调控方法[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 196-207.
Lan Zheng, Yang Chunzhi, Tan Renyu, et al. Optimal regulation method for distribution network clustering considering voltage governance potential of heterogeneous distributed photovoltaics [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 196-207. (in Chinese)

[3] 胡亚辉, 韦延方, 王鹏, 等. 基于PCA和EEMD的柔性直流配电网故障选线算法[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 305-315.
Hu Yahui, Wei Yanfang, Wang Peng, et al. Fault line selection algorithm for flexible DC distribution network based on PCA and EEMD [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 305-315. (in Chinese)

[4] 张明泽, 栾文鹏, 艾欣, 等. 基于低压侧负序量特征的小电流系统单相接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1654-1662.
Zhang Mingze, Luan Wenpeng, Ai Xin, et al. Single-phase grounding fault detection in non-solidly earthed network based on negative sequence characteristics of low-voltage side [J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1654-1662. (in Chinese)

[5] 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. (in Chinese)

[6] 贺晓, 陈洁羽, 张志华, 等. 含有主动干预消弧装置的变电站消弧线圈动作特性[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 1-7, 12.
He Xiao, Chen Jieyu, Zhang Zhihua, et al. Action behaviors of the arc suppression coil of the substation containing the active intervention arc suppression device [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2020, 36(6): 1-7, 12. (in Chinese)

[7] Li Qingpeng, Yang Qin, Zhang Rongrong, et al. Improvement measures of active intervention arc suppression technology [C]// 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Xi'an, China, 2020: 1141-1145.

[8] 李金东, 王勇, 王猛, 等. 基于二次扰动的配电网单相接地故障有源电流消弧方案[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12): 72-78.
Li Jindong, Wang Yong, Wang Meng, et al. An active current arc suppression method for single-phase grounding faults in the distribution network based on secondary current disturbance [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2022, 38(12): 72-78. (in Chinese)

[9] 郭亮, 屈新宇, 王晓卫, 等. 基于改进 Hough 变换的消弧线圈接地配电网故障选线新方法[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 132-142.
Guo Liang, Qu Xinyu, Wang Xiaowei, et al. A novel fault feeder selection method for resonant grounding distribution networks based on improved Hough transform [J]. Electric Power, 2024, 57(7): 132-142. (in Chinese)

[10] 吴春阳, 倪良华, 汤智谦, 等. 基于动态模式匹配距离的配电网单相接地故障选线研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 1-9.
Wu Chunyang, Ni Lianghua, Tang Zhiqian, et al. A study on single-phase grounding fault line selection of distribution network based on dynamic pattern matching distance [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 1-9. (in Chinese)

[11] 谭卫斌, 吴浩波, 张志华, 等. 基于线路容流暂态信号能量流向特征的小电流单相接地故障区段定位算法[J]. 现代电子技术, 2024, 47(2): 121-126.
Tan Weibin, Wu Haobo, Zhang Zhihua, et al. A small current single-phase grounding fault segments locating algorithm based on energy flow characteristics of transient signal of line capacity [J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(2): 121-126. (in Chinese)

[12] Xu Kai, Wang Peng, Shi Fang, et al. Faulty line selection based on active-intervention-type arc suppression device via additional neutral resistance [C]// 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). Shanghai, China, 2019. DOI:10.1049/cp.2019.0279.

[13] 王鹏, 张贺军, 徐凯, 等. 主动干预型消弧装置的附加电阻故障选相方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4):

180-186.
Wang Peng, Zhang Hejun, Xu Kai, et al. Additional resistance based fault phase identification method suitable for active interference arc suppression device [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(4): 180-186. (in Chinese)

[14] 杨海波, 姜鹏, 李士国, 等. 主动干预保安消弧装置故障选线及消除方法[J]. 电力设备管理, 2021(9): 41-43.
Yang Haibo, Jiang Peng, Li Shiguo, et al. Active intervention security arc suppression device fault selection and elimination method [J]. Electric Power Equipment Management, 2021(9): 41-43. (in Chinese)

[15] 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. (in Chinese)

[16] 徐凯. 主动干预型消弧装置选相判据研究及其对故障诊断的影响[D]. 济南: 山东大学, 2021.
Xu Kai. Research on fault phase selection criterion of active-intervention-type arc suppression device and its influence on fault diagnosis [D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)

[17] 刘健, 常小强, 张志华, 等. 基于零序电压的小电流接地系统高阻单相接地检测启动性能分析及其应用[J]. 供用电, 2023, 40(9): 27-35, 73.
Liu Jian, Chang Xiaoqiang, Zhang Zhihua, et al. Analysis and applications of startup performance based on zero-sequence-voltage for single phase grounding fault detection of small current grounding systems [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 27-35, 73. (in Chinese)

[18] 田君杨, 柳影, 薛永端, 等. 小电流接地故障选线装置零序电压启动分析[J]. 供用电, 2022, 39(5): 54-60.
Tian Junyang, Liu Ying, Xue Yongduan, et al. Analysis of zero sequence voltage starting of small current grounding fault line selection device [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 54-60. (in Chinese)

[19] 李文龙, 何山, 王维庆, 等. 主动干预型消弧装置应用性研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 1-9.
Li Wenlong, He Shan, Wang Weiqing, et al. Applied research on active intervention-type arc extinguishing devices [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 1-9. (in Chinese)

[20] 胡裕峰, 杨琴, 齐金伟, 等. 主动干预装置与消弧线圈并列消弧技术分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 132-138.
Hu Yufeng, Yang Qin, Qi Jinwei, et al. Analysis of active intervention device and arc suppression coil parallel arc suppression technology [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(10): 132-138. (in Chinese)

[21] 朱文葛, 李景禄, 易洲楠, 等. 考虑线路阻抗的主动干预型熄弧装置应用分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(5): 41-47.
Zhu Wenge, Li Jinglu, Yi Zhounan, et al. Application analysis of active intervention type arc-extinguishing device considering line impedance [J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(5): 41-47. (in Chinese)



王呈轩

作者简介：

王呈轩(1997—)，男，通信作者，硕士，助理工程师。研究方向：配电网自动化建设。E-mail：wangchengxuan@dky.xj.sgcc.com.cn。

宫瑞邦(1989—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：配电网稳定运行。E-mail：gongruibang@dky.xj.sgcc.com.cn。

樊艳芳(1971—)，女，硕士，教授。研究方向：电力系统稳定性分析。E-mail：fyf3985@xju.edu.cn。

程俊文(1990—)，男，本科，高级工程师。研究方向：配电网稳定运行。E-mail：chengjunwen@dky.xj.sgcc.com.cn。

张雷亮(1997—)，男，本科，助理工程师。研究方向：配电网稳定运行。E-mail：zhangleiliang@dky.xj.sgcc.com.cn。

(责任编辑：郭凯凯)