

## 一种基于混合型柔性消弧的实时对地参数测量方法

郭润生<sup>1</sup>, 王焕明<sup>1</sup>, 李 梁<sup>1</sup>, 牛 维<sup>2</sup>, 胡 帆<sup>1</sup>

(1. 国网山西省电力公司朔州供电公司, 山西 朔州 036000; 2. 国网山西省电力公司太原供电分公司, 太原 030000)

**摘要:** 现有的配电网单相接地电流消弧装置需在配电网正常运行时测量对地参数,在故障时注入电流完成全补偿消弧。但由于三相对地参数随配电网的运行方式不同而发生改变,电流消弧装置可能因配电网单相接地故障后对地参数变化而导致注入的电流无法将系统对地参数补偿至正常状态,无法全补偿消弧。针对以上问题,文中提出了一种基于混合型柔性消弧的实时对地参数测量方法,在检测到配电网单相接地故障后,利用有源电流消弧装置注入特征频率电流信号,计算系统过渡电阻和总对地电容,并计算消弧需要注入的电流。随后闭合非电力电子设备,将电力电子设备与非电力电子设备并联,利用计算得出电流源需要注入的电流数值,实现故障消弧。MATLAB的仿真结果和真型试验场实验结果证明了所提方案在不同故障场景下均能够实时准确测量配电网对地参数并安全可靠消弧。

**关键词:** 配电网; 单相接地故障; 电流消弧; 对地参数实时测量

### Real-time Parameter Measurement Method Against Ground Based on Hybrid Flexible Arc Suppression

GUO Runsheng<sup>1</sup>, WANG Huanming<sup>1</sup>, LI Liang<sup>1</sup>, NIU Wei<sup>2</sup>, HU Fan<sup>1</sup>

(1. Shuozhou Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Shanxi Shuozhou 036000, China; 2. Taiyuan Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** The existing single-phase grounding current suppression devices for distribution network need measuring ground parameters during normal operation and injecting current to achieve full-compensation arc suppression upon fault occurrence. However, since the three-phase parameters change against ground with the operation mode of the distribution mode, the current arc suppression device may fail to compensate the system's ground parameters back to normal levels due to the parameter changes after a single-phase grounding fault. Consequently, it cannot achieve full-compensation arc suppression. To address above issues, in this paper a real-time measurement method of ground parameters based on hybrid flexible arc suppression is proposed. After detecting the single-phase grounding fault of distribution network, the active current suppression device is used to inject characteristic frequency current signals, calculate the system transition resistance and total capacitance to ground, and calculate the current to be injected. Then, the non-power electronic equipment is closed, the power electronic equipment and the non-power electronic equipment are connected in parallel, and the current value that the current source needs to be injected is calculated to achieve the fault arc suppression. The simulation results of MATLAB and the experimental results of true type test site prove that the proposed scheme can accurately measure the ground parameter of distribution network in real time under different fault scenarios and achieve safe and reliable arc suppression.

**Key words:** distribution network; single-phase ground fault; current arc suppression; real-time measurement of parameters against ground

收稿日期:2025-09-02; 修回日期:2025-11-14

基金项目:国网山西省电力公司朔州供电公司科技项目(5205F0220003)。

Project Supported by Science and Technology Project of Shuozhou Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company(5205F0220003).

## 0 引言

3~66 kV 中低压配电网系统运行环境多变,单相接地故障频发且易产生弧光接地过电压,需要及时对故障点消弧<sup>[1]</sup>。然而我国目前中低压配电网大多采用的消弧线圈接地方式仅能补偿工频容性故障电流,不能补偿有功、谐波电流,往往无法熄灭故障点电弧,因此有源电流全补偿消弧方式应运而生<sup>[2~4]</sup>。

有源电流全补偿消弧通过向配电网注入零序电流,将对地导纳补偿至与故障前一致,补偿故障点残流的有功、无功和谐波分量<sup>[5~6]</sup>,实现消弧。配电网有源电流全补偿消弧有主从式、全电力电子式等<sup>[7~8]</sup>。主从式结构补偿装置减轻了有源从消弧装置的补偿压力,在实现消弧的同时,也降低了补偿装置的容量和成本。主从式结构中消弧线圈+单级逆变器组合为常用结构。单级逆变器容量小、成本低,且能满足补偿的基本要求,但存在损耗大等问题<sup>[9]</sup>。文[10-11]提出基于单相有源滤波技术的新型主从式消弧线圈,这种方法使用的全电流补偿设备较为复杂,且现有故障谐波电流检测理论仍有研究空间。使用全电力电子式有源电流消弧结构可避免单级逆变器存在的问题,但其结构复杂,成本昂贵,控制策略实用性较差。

电压消弧将控制中性点电压为故障相电压的反相为目标,只需得到系统正常运行时故障相的相电压幅值相位,从而抑制故障相母线电压为零,实现故障消弧<sup>[12~16]</sup>。文[17-19]使用有源逆变电源注入的电压消弧法,虽然相比电流消弧法其控制更加简单,但抑制故障相母线为零的电压消弧法忽略了线路压降,无法将故障点电压精确抑制为零。文[20]在有源电压消弧的基础上提出了混合型柔性消弧系统,通过逆变电源与功率源转换模块结合的方式向中性点注入电压,以降低故障点电压,大幅降低了逆变电源的容量、节省了成本。然而此方法不能实现基于注入法的对地参数测量,不能检测故障后系统电容电流的变化。

因此,目前电压消弧方法存在精度较低、效果较差的问题;而电流消弧法需要测量三相对地参数计算残流,虽然能很好地进行阻抗控制,由于配电网运行状态多变,在故障前测量对地参数,无法反映线路实时动态变化<sup>[21]</sup>,工程应用中故障后的对地参数测量难度较大。

针对上述问题,文中提出一种基于混合型柔性消弧的实时对地参数测量方法。利用电流源装置

可实现对地参数实时测量与故障后测量,在单相接地故障发生后将电流源装置与非电力电子设备并联可实现电流源注入故障消弧。

通过实时检测单相接地故障时配电网对地电容、电阻参数,得出电流消弧所需注入电流,通过两个开关的拓扑变换,使非电力电子设备与电力电子设备共同投入补偿。不仅实时反映了配电网发生单相接地故障后的结构变化,且测量精度高、不受系统运行方式的影响,可降低逆变电源的成本及容量、原理清晰、操作简单,只需在低压侧操作,具有更好的安全性和经济性。

## 1 混合型柔性消弧原理介绍

文中提出的混合型柔性消弧方法通过采用主从式有源电流消弧的方法,将消弧线圈作为主消弧装置补偿接地故障电流中工频容性分量,将选相开关与逆变器并联,将电力电子设备与非电力电子设备作为从补偿装置注入反向补偿电流,进一步补偿主消弧装置作用后残流的有功分量、无功分量和谐波分量,实现有效消弧。

混合型柔性消弧系统实验一次接线原理图见图1,配电网正常运行时, $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 分别为三相电源电压; $C_{\Sigma}$ 为配电网各馈线对地电容之和; $R_f$ 是接地过渡电阻; $I_m$ 为柔性消弧系统注入电流; $I_{sc}$ 为逆变电源注入电流; $I_{m1}$ 为非电力电子设备注入电流; $I_{m2}$ 为注入变压器低压侧电流。接地变压器(JDB)高低压侧变比为10 kV/400 V,注入变压器(ZRB)变比为400 V/6 kV,选相开关 $k_{x1}(x=a, b, c)$ 和开关 $k_{x2}(y=a, b, c)$ 采用可控硅开关或真空接触器,逆变电源的容量为10 kVA。

在系统发生单相接地故障后,闭合开关 $k_1$ 、 $k_2$ ,投入混合型柔性消弧系统中的注入参数测量模块,通过逆变电流源从中性点注入特征频率电流 $I_m$ 进行对地参数实时测量,注入零序等效模型见图2,其中 $L_p$ 为消弧线圈电感; $I_L$ 为流过消弧线圈的电流; $U_n$ 为中性点电压; $U_f$ 为故障点电压。

考虑到后续提取特征频率信号的陷波算法在工频附近的增益较小,不利于信号的提取,同时容易引发谐振,因而注入信号频率应远离工频。由于低频信号的提取所需数据窗较长,增大了对地参数测量的时间,因而特征频率不应太低。此外,电流互感器对高频信号的传变特性较差,而且输电线路参数频变,高频下测得的对地参数相较于工频存在较大误差。综合以上分析,文中利用有源消弧装置



此时故障点电压为0,因此有源电流消弧中注入电流参考值只与配电网故障相电源电动势、消弧线圈支路导纳以及配电网对地导纳决定。配电网故障相电源电动势以及消弧线圈支路参数已知,因此配电网单相接地故障有源电流消弧的熄弧效果主要取决于配电网对地导纳的测量结果。目前的对地参数测量方法在故障前进行,配电网因运行方式变化等原因导致故障后对地参数不同于配电网正常运行状态,因此文中提出的对地参数实时测量可以准确测量故障后配电网对地电容,可进行精确全电流补偿。

得到故障后配电网的对地电容,进一步地,根据所示的配电网对地等效电路可知,混合型柔性消弧装置补偿电流值见式(7)

$$I_{in} = U_n \left( \frac{1}{R_L + j\omega L_p} + j\omega C_\Sigma \right) \quad (7)$$

由于文中使用的混合性柔性消弧系统采用了逆变电流源与非电力电子装置并联的结合方式,其中非电力电子设备在有源电压消弧的基础上采用了以调控中性点电压等于反相故障相电源电压的消弧方法,其原理如下。

二次侧为Dyn11接法的接地变压器的高低电压侧线电压有如式(8)关系。 $U_{ab}$ 为低压侧线电压, $U_{AB}$ 为高压侧线电压, $k_1$ 为接地变压器变比, $k_2$ 为注入变压器的变比。

$$\begin{cases} U_{ab} = \frac{1}{k_1} U_{AB} e^{j\frac{\pi}{6}} \\ U_{bc} = \frac{1}{k_1} U_{BC} e^{j\frac{\pi}{6}} \\ U_{ca} = \frac{1}{k_1} U_{CA} e^{j\frac{\pi}{6}} \end{cases} \quad (8)$$

对配电网三相系统关系为

$$\begin{cases} U_{AB} = \sqrt{3} U_A e^{j\frac{\pi}{6}} \\ U_{BC} = \sqrt{3} U_B e^{j\frac{\pi}{6}} \\ U_{CA} = \sqrt{3} U_C e^{j\frac{\pi}{6}} \end{cases} \quad (9)$$

联立式(9)、(10),整理得

$$\begin{cases} U_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{k_1} U_A e^{j\frac{\pi}{3}} = -\frac{\sqrt{3}}{k_1} U_B \\ U_{bc} = \frac{\sqrt{3}}{k_1} U_B e^{j\frac{\pi}{3}} = -\frac{\sqrt{3}}{k_1} U_C \\ U_{ca} = \frac{\sqrt{3}}{k_1} U_C e^{j\frac{\pi}{3}} = -\frac{\sqrt{3}}{k_1} U_A \end{cases} \quad (10)$$

根据电路连接关系,假设配电网发生C相单相接地故障时,此时投入选相开关 $k_{b1}$ 和 $k_{c2}$ ,接地变压器的二次侧线电压 $U_{bc}$ 经过注入变压器后连接至中

性点,则中性点电压为

$$U_n = -\sqrt{3} \frac{k_2}{k_1} U_C \quad (11)$$

中性点电压会被钳制为与反相故障相电源电压 $-U_C$ 同相位的电压。

同理,根据故障相的不同,投入相应的选相开关,可将中性点电压钳位为相对应的反相故障相电源电压,其中性点电压可分别表示为

$$\begin{cases} U_n = -\sqrt{3} \frac{k_2}{k_1} U_B \\ U_n = -\sqrt{3} \frac{k_2}{k_1} U_C \\ U_n = -\sqrt{3} \frac{k_2}{k_1} U_A \end{cases} \quad (12)$$

通过设置合适的 $k_1$ 、 $k_2$ ,令其满足

$$k_1 = \sqrt{3} k_2 \quad (13)$$

因此发生单相接地故障时,选相开关的投切见表1,投入相应的开关可使中性点电压和相对应的电源电压为等幅值反相位关系。

表1 选相开关动作表

Table 1 Operation table of phase selector switch

故障相开关	A	B	C
$k_{a1}$	—	投入	—
$k_{b1}$	—	—	投入
$k_{c1}$	投入	—	—
$k_{a2}$	投入	—	—
$k_{b2}$	—	投入	—
$k_{c2}$	—	—	投入

在系统发生单相接地故障后,合上开关 $k_1$ 、 $k_2$ ,通过逆变电源向系统中性点注入特定频率电流,通过测量零序电压与电流进行对地电容、电阻计算,得出在故障时需要通过注入变向中性点注入的电流 $I_{in}$ ;在单相接地故障发生时将非电力电子设备与逆变电源并联,由于非电力电子设备注入为电流 $I_{in1}$ ,故逆变电源输出电流为

$$I_{VSC} = I_{in2} - I_{in1} \quad (14)$$

在测量并计算得出逆变器需要注入电流后,闭合相对应的选相开关,将逆变电源与变压器并联,共同消弧。这种方法可大大减小注入电流,降低了逆变电源容量,节省成本、提高系统稳定性。

系统对地参数实时测量及电流消弧流程见图3。

## 2 仿真分析与实验验证

### 2.1 仿真分析

为了验证配电网单相接地故障后对地参数测量以及电流消弧的可行性,文中利用MATLAB建立

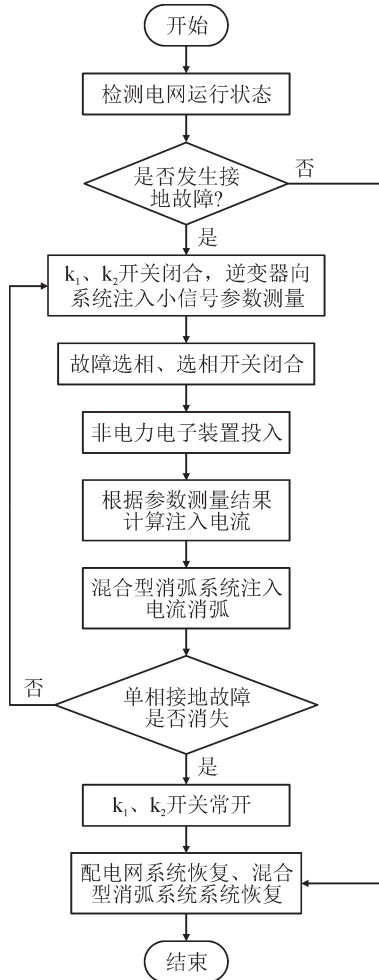


图3 对地参数实时测量及电流消弧流程

Fig. 3 Real-time measurement of parameters against ground and current arc suppression process

10 kV 配电网单相接地故障仿真模型。线路中发生单相接地故障时,有源消弧装置在故障后向系统中性点注入幅值 1 A, 频率 75 Hz 的特征电流信号,检测中性点电压的变化,在计算出对地容流后注入电流消弧。故障线路点经不同过渡电阻接地时的对地参数测量结果见表 2。

表2 不同过渡电阻下的实验结果

Table 2 Test results with different transition resistors

过渡电阻/ $\Omega$	电阻测量值/ $\Omega$	电阻测量误差/%	电容测量值/ $\mu\text{F}$	电容测量误差/%
200	202.47	1.24	798.10	5.430
500	523.38	4.66	773.58	2.190
1 000	1 090.76	9.19	771.08	1.860
2 000	2 306.41	15.33	757.28	0.037
5 000	6 156.14	23.12	727.07	0.009

从表 2 中可以看出,随着过渡电阻的不断增大,系统对地电容的测量误差逐渐减小、系统对地电阻的测量误差逐渐增大。由于在低阻故障时,线路阻抗上的压降无法忽略,线路等效的  $\Gamma$  模型有较大误

差,因此电容误差较大,由于忽略对地电导,因此过渡电阻误差较小;在高阻故障时,线路阻抗压降可以忽略,测量电容准确度上升、过渡电阻较大时,忽略线路对地电导会导致测量电阻误差增大。在过渡电阻为 200  $\Omega$  时,线路阻抗上的压降减小,实际模型与等效模型一致,电容测量误差仅为 5.43%;在过渡电阻为 5 000  $\Omega$  时,电容测量误差可以达到 0.009%。

为了进一步验证本方法对地参数测量的准确性,文中根据不同过渡电阻下线路中点发生单相接地故障的对地参数测量结果,计算消弧装置的输出电流指令,并对比了有源消弧装置投入前后故障点电流幅值的变化,仿真结果见图 4。

由图 4(d)可得出,接地系统于 0.1 s 发生过渡电阻为 5 000  $\Omega$  的 A 相接地故障时,故障处的故障点电流为 1.15 A,故障点电压为 5 764 V。当系统在 0.15 s 投入逆变电源后,同样在 ms 级内使故障点电流下降至 0.36 mA。因此逆变电源的投入可以对故障点残流有效补偿。

不同过渡电阻下装置消弧仿真结果见表 3,由图 4 及表 3 中各参数的详细数据得出,在不同过渡电阻时,通过故障后实时参数测量计算并注入相应的电流后,故障点电流均被抑制到几乎为零,电流消弧效果较好。该方法不仅可以实现对地参数的准确测量,其对地参数测量结果提高了有源电流消弧的消弧准确性。

## 2.2 实验验证

为了进一步研究论文所提方法的有效性,在西安西瑞 10 kV 真型试验场中开展了不同接地电阻与对地电容下单相接地故障的对地参数测量与有源电流消弧模拟实验。

注入异频信号后获取中性点零序电压与电流,对滤波前后的零序电流和中性点电压进行频谱分析,对零序电流和中性点电压滤除工频分量,保留 75 Hz 分量计算,得出不同过渡电阻时实时测量的电容、电阻值见表 4(对地电容为 7.57  $\mu\text{F}$ )。

由表 4 可得,过渡电阻较小时,对地电容的测量误差偏大,这是由于低阻时线路阻抗无法忽略,会引起较大误差;对地电阻误差较小,这是由于忽略接地电导对过渡电阻的影响较小;而在过渡电阻较大时,对地电容测量误差显著降低,这与之前的理论分析结果一致;在高阻故障时,流过过渡电阻支路的特征频率分量较小,其计算结果受互感器的传变特性等因素影响较大,因而高阻故障时过渡电阻的测量误差偏大。

单相接地故障消弧时在参数测量完成后系统

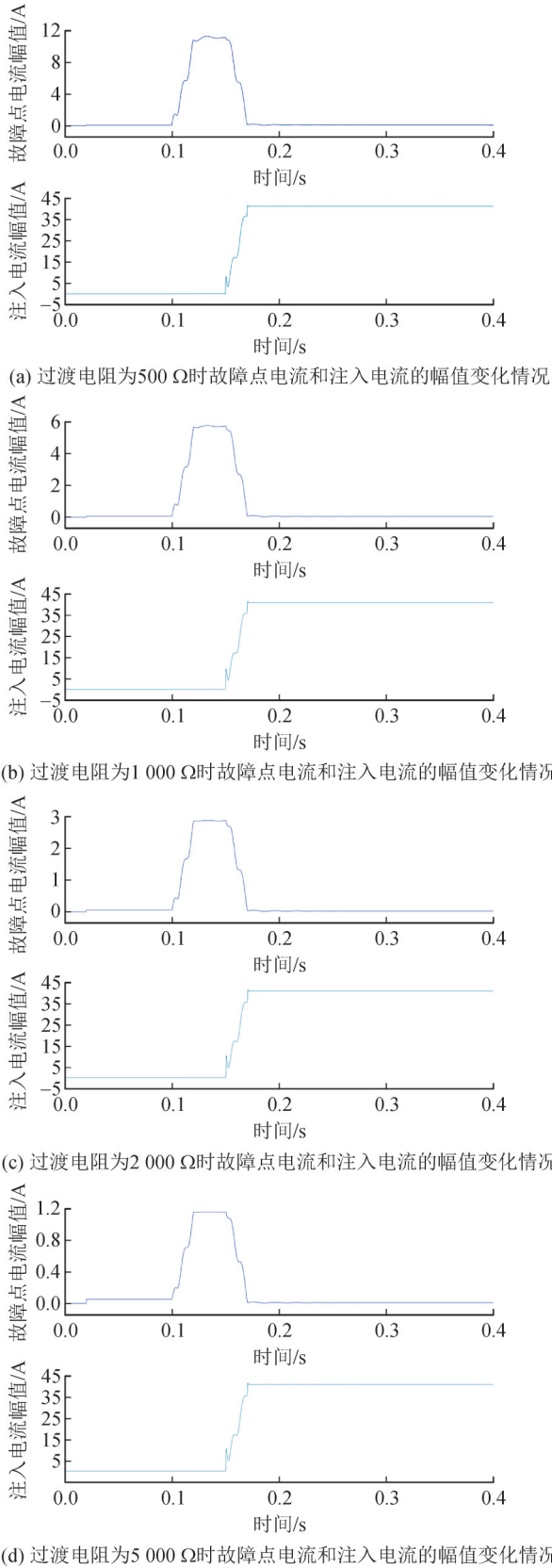


图4 不同过渡电阻时电流消弧的注入电流与故障点电流幅值变化

Fig. 4 Change of the amplitudes of injection current and fault point current change under different transition resistance

闭合选相开关,投入柔性消弧系统消弧,在真型实验场中模拟了3种不同接地电阻的单相接地故障情况,实验波形见图5。

表3 不同过渡电阻下装置消弧仿真结果

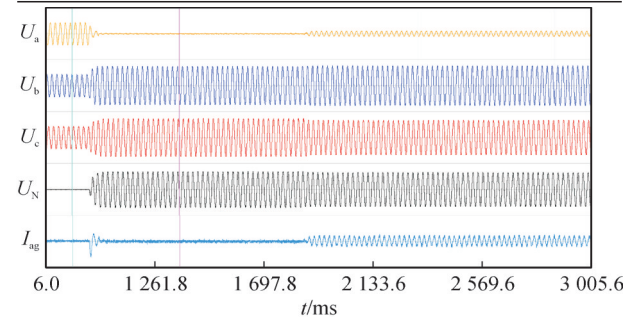
Table 3 Simulation results of arc suppression under different transition resistors

过渡电阻/ $\Omega$		$-U_a/V$	$U_b/V$	$U_c/V$	$I/A$
500	未投入	5 773	5 445	469.7	0.93
	投入后	5 773	5 755	17.9	0.03
2 000	未投入	5 773	5 380	614.3	0.30
	投入后	5 773	5 755	18.1	0.09
5 000	未投入	5 773	5 304	654.5	0.13
	投入后	5 773	5 755	18.2	0.03

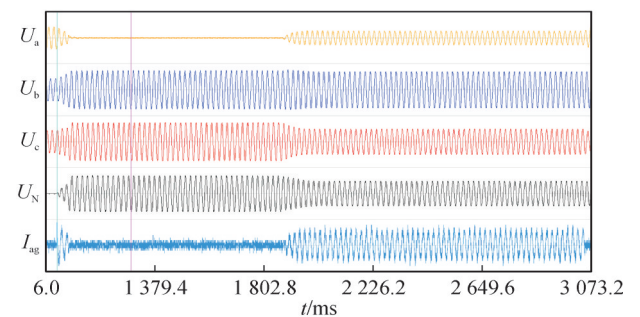
表4 不同过渡电阻下参数测量结果

Table 4 Parameter measurements with different transition resistors

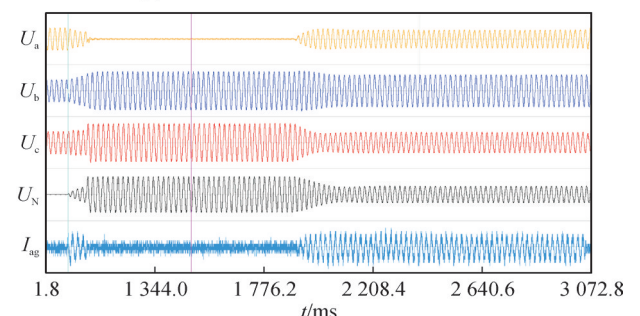
过渡电阻/ $\Omega$	过渡电阻测量值/ $\Omega$	过渡电阻相对误差/%	对地电容测量值/ $\mu F$	对地电容相对误差/%
500	504.8	0.96	7.82	3.33
1 000	1 028.3	2.83	7.67	1.37
2 000	2 272.0	13.60	7.73	2.01



(a) 过渡电阻为500 Ω时的实验波形图



(b) 过渡电阻为2 000 Ω时的实验波形图



(c) 过渡电阻为4 000 Ω时的实验波形图

图5 不同过渡电阻时的实验波形图

Fig. 5 Experimental waveforms for different transition resistors

由图5(b)可得出,当发生过渡电阻为2 000  $\Omega$ 的A相接地故障时,此时产生的故障点电压为4 124 V,故障点电流为1.82 A;当柔性消弧系统投入后,故障点电流降低为0.11 A,为毫安级,结果表明该柔性消弧系统可以快速可靠地消弧。不同过渡电阻下的实验结果见表5。

表5 不同过渡电阻下的实验结果

Table 5 Experimental results under different transition resistors

过渡电阻/ $\Omega$		$U_n/V$	$U_f/V$	$I_f/A$
500	未投	4 140	1 358	2.48
	投入	5 787	36	0.02
2 000	未投	1 532	4 124	1.78
	投入	5 788	39	0.11
4 000	未投	816	6 496	1.02
	投入	5 788	44	0.03

由图5及表4数据可知,柔性消弧系统投入运行后,可将故障点电流抑制达到毫安级。在高阻接地情况下,同样可以降低故障残流,熄灭电弧。该实验表明,文中所提的混合型柔性消弧方法能可靠地补偿故障残流,并抑制故障电弧复燃。

### 3 结论

文中提出了一种基于混合型柔性消弧的实时对地参数测量方法,可对配电网系统对地参数进行实时监测,以适应故障时系统参数变化、精确计算注入电流。通过提出一种新型混合型柔性消弧及参数测量方法,通过将电流源与非电力电子设备并联实现电流消弧,不仅降低了逆变电源的容量、节省了成本、提高系统稳定性。对结构的理论分析、仿真和实验表明:

- 1)有源电流消弧中注入电流参考值与过渡电阻无关,补偿效果主要取决于对地参数测量的准确性。
- 2)随着过渡电阻阻值升高,测量得过渡电阻相对误差升高;对地电容相对误差降低。

文中提出的拓扑变换方法能够实现对地参数准确测量与电流消弧,消弧效果较好,提高了电网稳定性。

### 致谢

文中实验所用柔性消弧系统、真型试验场与实验数据的获取是在西安西瑞控制技术股份有限公司的大力支持下完成的,在此向他(她)们表示衷心的感谢。

### 参考文献:

- [1] 罗建,夏豪,钟加勇,等.基于消弧线圈补偿特性的单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(11):158-169.  
LUO Jian, XIA Hao, ZHONG Jiayong, et al. A single-phase ground fault line selection method based on arc suppression coil compensation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(11): 158-169.
- [2] 李晓波. 柔性零残流消弧线圈的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2010.  
LI Xiaobo. Research on flexible zero-residual-current arc suppression coil[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2010.
- [3] 王呈轩,宫瑞邦,程俊文,等.不同接地方式下10 kV配电网主动干预型消弧装置技术对比[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(5):83-90.  
WANG Chengxuan, GONG Ruibang, CHENG Junwen, et al. Technical comparison of active intervention arc suppression device for 10 kV distribution network under different grounding modes[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 83-90.
- [4] 李景丽,赵子敬,刘鹏,等.配电网弧光接地故障相辨识方法研究[J]. 电瓷避雷器,2022(6):137-146.  
LI Jingli, ZHAO Zijing, LIU Peng, et al. Phase identification method of arc grounding fault in distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 137-146.
- [5] 刘维功.小电流接地故障的有源消弧新算法[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2014.  
LIU Weigong. A new active arc-suppression algorithm of single phase earth fault[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2014.
- [6] 滑军杰,邵文权,程远,等.比例谐振控制的配电网有源全补偿消弧方法[J]. 西安工程大学学报,2020,34(2):79-84.  
HUA Junjie, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Active full compensation arc suppression method for distribution network based on proportional resonant control[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(2): 79-84.
- [7] 王呈轩,宫瑞邦,程俊文,等.不同接地方式下10 kV配电网主动干预型消弧装置技术对比[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(5):83-90.  
WANG CHENGXUAN, GONG RUIBANG, CHENG JUNWEN, et al. Technical comparison of active intervention arc suppression device for 10 kV distribution network under different grounding modes[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 83-90.
- [8] 邵文权,徐嘉鹏,卫晓辉,等.采用PI+重复控制策略的配电网有源电流消弧方案[J]. 西安工程大学学报,2022,36(5):87-94.  
SHAO Wenquan, XU Jiapeng, WEI Xiaohui, et al. An active current arc suppression scheme using PI and repetitive control strategy for distribution networks[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2022, 36(5): 87-94.
- [9] 吕涛. 配电网单相接地故障电流有源全补偿技术的研究[D].

- 西安:西安工程大学,2018.
- LYU Tao.Research on active full - compensation single - phase grounding fault current in distribution network[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.
- [10] 曲铁龙,董一脉,谭伟璞,等. 基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈的研究[J]. 继电器,2007,35(3):29-33.
- QU Yilong, DONG Yimai, TAN Weipu, et al. Research on new type arc-suppression coil based on single-phase active power filter technology[J]. Relay, 2007, 35(3):29-33.
- [11] 董一脉. 有源全补偿消弧控制的研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
- DONG Yimai.Research on active & full compensating arc suppression control[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [12] 李一博. 基于柔性全补偿消弧装置的配电网对地电容电流测量技术研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019.
- LI Yibo.Research on capacitance-to-ground current measurement technology of distribution network based on flexible full - compensation arc - suppression device[D]. Zhengzhou: North China Electric Power University, 2019.
- [13] 刘维功,薛永端,徐丙垠,等. 可适应线路结构动态变化的有源消弧算法[J]. 电网技术,2014,38(7):2008-2013.
- LIU Weigong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. An active arc-suppression algorithm adaptable to dynamic structure variation of transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 2008-2013.
- [14] 陈锐,周丰,翁洪杰,等. 基于双闭环控制的配电网单相接地故障有源消弧方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(5):128-133.
- CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Active arc - suppression method based on double closed - loop control under single - phase grounding faults in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 128-133.
- [15] 喻泉,曾祥君,喻锐,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.
- [16] 曾祥君,卓超,喻锐,等. 基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降压消弧与保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1523-1533.
- ZENG Xiangjun, ZHUO Chao, YU Kun, et al. A novel method of faults arc extinguishing and feeder protection based on voltage regulating intervention with grounding transformer winding taps for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1523-1533.
- [17] 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[D]. 福州:福州大学,2016.
- GUO Moufa, YOU Jianzhang, ZHANG Weijun, et al. Research of flexible arc-suppression and fault line selection methods of earth-fault in distribution systems based on cascaded H-bridge converter [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016.
- [18] 曾祥君,王媛媛,李健,等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):137-143.
- ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):137-143.
- [19] 郭谋发,游建章,林先辉,等. 适应线路参数及负载变化的配电网柔性优化消弧方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):138-145.
- GUO Moufa, YOU Jianzhang, LIN Xianhui, et al. Flexible arc - suppression optimization method for distribution network adaptable to variation of line parameters and load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 138-145.
- [20] 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.
- YUAN 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.
- [21] 彭沙沙,曾祥君,喻锐,等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):142-149.
- PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active arc - suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20):142-149.
- 郭润生(1969—),男,本科,教授级高级工程师,研究方向为电网故障诊断和继电保护(E-mail:grs2283@163.com)。
- 王焕明(1979—),男,本科,高级工程师,研究方向为电力系统运行(E-mail:18903492418@189.cn)。
- 李梁(1991—),男,硕士,工程师,研究方向为配电网继电保护(通信作者)(E-mail:1217916875@qq.com)。