

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.05.010

电压互感器一次消谐电阻对有源电压消弧的影响与解决方法

郭润生¹, 牛维², 李梁¹, 王焕明¹, 李银平¹

(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公司, 太原 030000)

摘要: 10 kV 配电网中, 母线电压互感器大多采用一次侧串联消谐电阻的方式抑制谐振, 其测量的母线相电压与实际电压存在误差。而现有的有源电压消弧方法需要测量三相电压与系统中性点电压, 通过控制中性点电压来抑制故障相电压达到消弧目的, 而故障相电压的测量受到一次消谐电阻的影响。因此一次消谐电阻不仅会影响母线三相电压的测量数据, 还会影响有源电压消弧装置的消弧效果。文章通过分析一次消谐电阻与有源电压消弧的原理, 研究了一次消谐电阻影响有源电压消弧的机理, 提出了一种线电压测量的有源电压消弧计算方法。在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型, 对该方法进行仿真分析, 同时在实际变电站进行真型故障模拟, 仿真和实际模拟结果表明消弧效果良好, 从而验证了该方法的有效性。

关键词: 配电网; 电压互感器; 一次消谐电阻; 有源电压消弧

Influence of Primary Suppression Resistance of Voltage Transformer on Active Voltage Arc Suppression and Its Solution

GUO Runsheng¹, NIU Wei², LI Liang¹, WANG Huanming¹, LI Yinping¹

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

Abstract: In 10 kV distribution network, most of the busbar voltage transformers adopt the series of suppression resistance of the primary side to suppress resonance, and there is an error between the measured busbar phase voltage and the actual voltage. However, the existing active voltage suppression method needs measuring the three-phase voltage and the neutral point voltage of the system, and the fault phase voltage is suppressed by controlling the neutral point voltage to reach the purpose of arc suppression. However, the measurement of fault phase voltage is affected by the primary harmonic resistance. Therefore, the primary harmonic suppression resistance can not only affect the measured data of the three-phase voltage of the bus, but also the arc suppression effect of the active voltage arc suppression device. Based on the analysis of the principle of primary harmonic suppression resistance and active voltage arc suppression, the mechanism of the influence of primary harmonic suppression resistance on the active voltage arc suppression is studied in this paper, and a kind of calculation method of active voltage arc suppression for line voltage measurement is proposed. The simulation model is set up in Matlab/Simulink to simulate and analyze the method. At the same time, the real fault simulation is performed in actual substation is performed. The simulation and actual results shows perfect arc suppression effect, thus the effectiveness of the method is verified.

Keywords: distribution network; potential transformer; primary harmonic suppression resistance; active voltage arc suppression

收稿日期: 2023-07-13

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

0 引言

为了监测配电网运行状态,现有配电网常用的测量母线三相电压的电磁式电压互感器容易饱和从而引起铁磁谐振^[1]。目前国内常用的消谐方法是在电压互感器一次侧中性点与地之间串联一个非线性消谐电阻^[2],电网正常运行时,消谐电阻呈高阻值(几百千欧),使谐振在起始阶段不易发展。在单相接地故障时,消谐器呈低阻值(几十千欧),从而抑制谐振的发生^[3-4]。但有时仍会在电压互感器二次侧出现电压不平衡现象^[5-6],可能会影响接地保护装置的动作,如接地消弧装置和小电流接地选线装置的动作^[7-8]。

由于配电网极易产生单相接地故障,单相接地故障时容易产生较大的弧光接地过电压^[9-10],现有的消弧方法可分为无源和有源消弧方法。无源消弧装置主要有中性点经消弧线圈接地、中性点经小电阻接地和故障相母线接地旁路等^[11-13]。由于它们主要靠中性点电压的变化判断单相接地的发生,中性点电压互感器一般不装设消谐电阻,而母线电压互感器开口三角电压则会受到消谐电阻的影响,则母线电压互感器的一次消谐电阻可能会造成装置的误动作。

随着配电网系统电容电流的增大,现有的无源消弧方法已逐渐不能满足接地故障电压、电流全补偿的要求,无法完全消弧,因此有源消弧方法应运而生。有源消弧按照控制方式可分为有源电流消弧和有源电压消弧^[14-15]。

由于有源电流消弧法通过逆变电源向中性点注入零序电流,而注入电流仅与中性点电压、零序阻抗与系统对地等效电容有关,且需要向系统注入异频电流测量系统对地电容^[16-17]。有源电流消弧装置多采用中性点零序电压互感器测量得到的数据计算,受母线电压互感器一次消谐电阻的影响不大。

有源电压消弧法通过在中性点并联一个电压源,通过向中性点注入大小与故障相电源电压相等、方向相反的电压,将故障相母线出口处电压控制为零,忽略线路压降,可以看作是将故障点电压控制为零,因此故障残流为零,从而消弧的方法^[18-19]。

在电压消弧领域,曾祥君课题组提出了一种基于闭环控制的电压消弧技术^[20]。该方法由中性点电压外环及输出电流内环构成,实现故障点电流精确补偿。杨以涵教授课题组提出一种有源全补偿消弧线圈,将有源逆变器与消弧线圈结合补偿电网中的

有功、谐波分量^[21-22]。辅助消弧线圈的有源逆变器结构采用单相全桥电压源式逆变器结构,通过注入方波信号法检测故障点处有功、谐波分量,利用脉宽调制控制技术对有源逆变器进行控制,准确输出零序电流并从消弧线圈并联支路注入电网,可实现对主消弧线圈补偿后的故障点残余电流的精确全补偿。

无论使用何种有源电压消弧方法,在实际应用过程中均需要母线电压互感器检测并计算三相电压的数据,由于目前国内配电网母线电压互感器一次侧大多装有消谐电阻,因此有源电压消弧方法在实际应用中均会受到影响^[23-24]。

由于在实际的经消弧线圈接地系统中,有源电压消弧装置与小电流选线装置配合完成选线跳闸故障处理^[25-27],一次消谐电阻还会影响到有源电压消弧和小电流选线跳闸装置的配合作用。当单相接地故障发生时,小电流接地选线装置根据母线电压互感器开口三角电压故障暂态量选线,后投入有源电压消弧装置消弧。如果有源电压消弧装置运行一段时间后检测到接地故障仍存在,则有源电压消弧装置退出,小电流选线装置投入,选线跳闸。当存在一次消谐电阻时,有源电压消弧装置检测到故障相电源电压并未降到零,认为消弧补偿无效退出,小电流选线装置根据开口三角电压无法选线跳闸,因此有故障扩大的风险。

文章通过理论分析母线电压互感器一次侧消谐电阻影响有源电压消弧的机理,提出了一种新的有源电压消弧计算方法,避免了一次消谐电阻的影响。文章通过仿真分析了一次消谐电阻对有源电压消弧影响的效果,对提出的新计算方法进行了验证,并在某变电站进行了真型故障模拟试验。

1 电压互感器一次消谐电阻对有源电压消弧的影响

1.1 电压互感器一次消谐电阻及有源电压消弧原理

配电网系统中,需要通过母线电压互感器监测三相电压。未装设一次消谐电阻的母线电压互感器原理见图1。

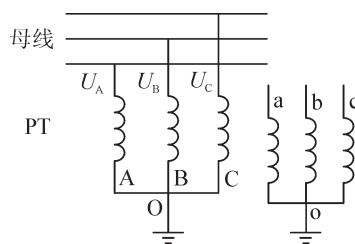


图1 母线电压互感器原理图

Fig. 1 Principle diagram of bus voltage transformer

图中 U_A 、 U_B 、 U_C 为母线三相电压值,令电压互感器的变比为 n 。当母线电压互感器没有装消谐器时,令中性点电压真实值为 U_N ,系统正常运行的三相电压如式(1)所示。

$$U_A + U_B + U_C = 3U_N = 0 \quad (1)$$

当母线电压互感器装上一次消谐电阻时示意图见图2,其中, U'_A 、 U'_B 、 U'_C 为含消谐电阻电压互感器测量得到的一次三相电压; R 为非线性的一次消谐电阻; U_R 为一次消谐电阻的电压; U_a 、 U_b 、 U_c 为电压互感器二次侧电压; U'_o 为母线电压互感器二次侧开口三角电压。

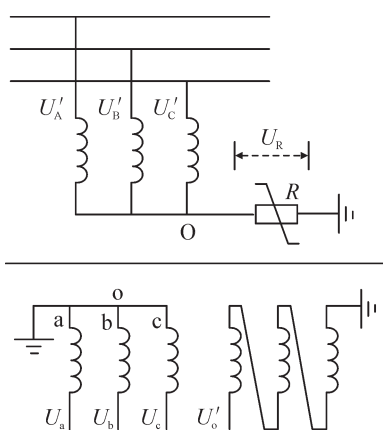


图2 带消谐电阻的母线电压互感器示意图
Fig. 2 Schematic diagram of busbar voltage transformer with harmonic suppression resistance

由图2可知此时消谐器上存在的阻值有数十千欧至上百千欧(消谐器型号不同,阻值不同),因此电压互感器高压侧中性点的电压不为零,其值为 U_R ,则电压互感器二次侧电压为

$$\begin{aligned} U_a &= (U_A - U_R)/n \\ U_b &= (U_B - U_R)/n \\ U_c &= (U_C - U_R)/n \end{aligned} \quad (2)$$

当电压互感器二次侧有开口三角时,开口三角电压为 U'_o ,与式(1)联立可得式(3)为

$$\begin{aligned} U'_o &= (U_A - U_R)/\sqrt{3}n + (U_B - U_R)/\sqrt{3}n + \\ & (U_C - U_R)/\sqrt{3}n = \frac{3(U_N - U_R)}{\sqrt{3}n} = -\sqrt{3}U_R/n \end{aligned} \quad (3)$$

在配电网系统发生单相接地故障时系统A相发生金属性接地故障,即 $U_{A1} = 0$ 时。

因此另外两相:

$$\begin{aligned} U_{B1} &= \sqrt{3}U_A e^{-j150} \\ U_{C1} &= \sqrt{3}U_A e^{j150} \end{aligned} \quad (4)$$

则有源电压消弧装置经过含消谐电阻电压互感器测量所得二次侧三相电压如式(5)所示。

$$\begin{aligned} U_{a1} &= -U_R/n \\ U_{b1} &= (\sqrt{3}U_A e^{-j150} - U_R)/n \\ U_{c1} &= (\sqrt{3}U_A e^{j150} - U_R)/n \end{aligned} \quad (5)$$

如式(6)所示,此时二次侧开口三角电压 U'_{o1} 也存在一定误差。

$$U'_{o1} = (U_{a1} + U_{b1} + U_{c1}) = \frac{3U_A e^{-j180} - 3U_R}{n} \quad (6)$$

因此由图2和式(2)-(6)可得出,在系统正常运行和单相接地故障时一次消谐电阻均会对三相电压和开口三角零序电压产生影响。

在配电网系统中,有源电压消弧装置为了准确消弧,需要通过母线电压互感器测量母线三相电压。因此故障相电源电压与中性点电压的测量对有源电压消弧的准确性尤为重要。图3为有源电压消弧原理图, E_A 、 E_B 、 E_C 为三相电源电压,此时系统发生A相接地故障, U_N 为中性点电压,有源电压消弧装置的逆变器与消弧线圈并联, T 为注入变压器。

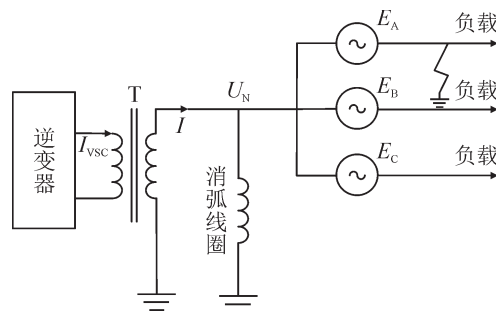


图3 电压消弧原理图
Fig. 3 Voltage arc suppression principle diagram

在发生A相接地故障时,此时配电网的零序电路见图4。

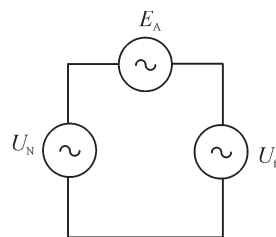


图4 配电网单相接地故障零序电路图
Fig. 4 Zero sequence circuit diagram of single phase ground fault of distribution network

图中, U_N 为中性点电压; E_A 为故障相电源电压; U_f 为故障点电压。有源电压消弧方法将线路压降忽略,将故障点电压等效为故障相母线出口处电压。

因此使故障相电压从根本上使电弧达不到复燃的必要条件如式(7)所示。

$$U_A = E_A + U_N = 0 \quad (7)$$

为了将故障相电压控制为零,从而达到消弧目的,有源电压消弧装置需要将中性点电压控制为故障相电源电压的反相,即:

$$U_N = -E_A \quad (8)$$

因此有源电压消弧装置的控制对象为中性点电压 U_N , 控制目标为故障相电压 $U_N = -E_A$ 。其中 U_N 一般由有源电压消弧装置内部安装的中性点电压互感器得到, 不受消谐电阻影响。而故障相电源电压反相 $-E_A$ 的计算通过 $-E_A = U_N - U_A$ 得到, 由于而故障相电压的测量受到一次消谐电阻的影响, 当经消谐电阻测量得到的 U'_A 为零时, 实际故障相仍存在一定电压, 无法得到准确的故障相电源电压值。因此根据有源电压消弧装置的闭环控制装置无法将真正的故障相电压控制为零, 无法完全消弧。

1.2 一种避免一次消谐电阻影响的有源电压消弧计算方法

为了避免一次消谐电阻对有源电压消弧效果的影响, 消弧装置可采用线电压的计算方法。有源电压消弧装置采用中性点电压互感器测量中性点真实电压 U_N , 令其变比也为 n , 令中性点电压互感器测量的二次侧电压为 U_n 。

由于带消谐电阻的母线电压互感器中二次侧线电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 和一次侧相电压有如式(9)的关系。

$$\begin{aligned} U_{ab} &= (U_A - U_B)/n \\ U_{bc} &= (U_B - U_C)/n \\ U_{ca} &= (U_C - U_A)/n \end{aligned} \quad (9)$$

将式(1)、(9)联立变换得到式(10)

$$U_A = U_N - (U_{ca} - U_{ab}) \cdot n/3 = U_n \cdot n - (U_{ca} - U_{ab}) \cdot n/3 \quad (10)$$

同理可得其他两相, 因此 U_A 、 U_B 、 U_C 真实电压与电压互感器测量得到的线电压、中性点电压的关系为

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n/3 & 0 & -n/3 & \sqrt{3}n \\ -n/3 & n/3 & 0 & \sqrt{3}n \\ 0 & -n/3 & n/3 & \sqrt{3}n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \\ U_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此母线电压互感器二次侧相对地的电压和开口三角电压均受到消谐电阻影响, 而线电压不受消谐电阻的影响, 可根据线电压与中性点电压计算三相电压, 令有源电压消弧装置避免了一次消谐电阻的影响, 成功消弧。

2 仿真验证

为了验证含消谐电阻的电压互感器对电压消弧效果的影响, 本节通过在 Matlab/Simulink 建立中性点经消弧线圈接地的配电网线路模型、有源电压消弧模型及含消谐电阻的电压互感器模型, 仿真验证电压互感器的消弧效果, 仿真模型示意图见图 5。其中设置系统对地电容为 $18.39 \mu\text{F}$, 消弧线圈电感为 204.3 mH , 脱谐度为 10%。

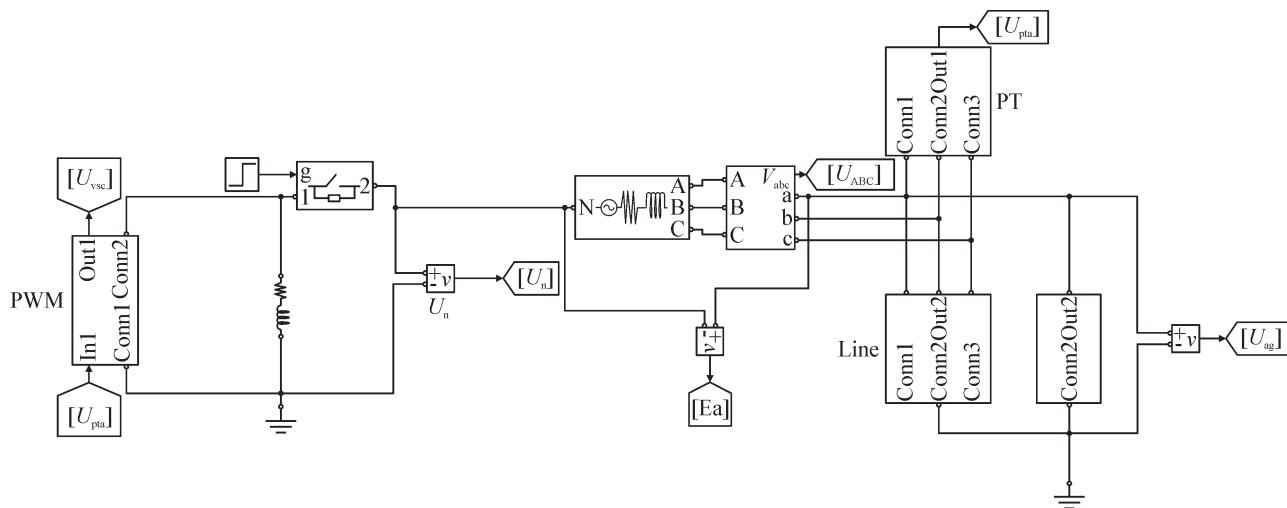


图5 仿真模型示意图
Fig. 5 Schematic diagram of simulation model

图 6 为无消谐电阻时母线三相电压、故障时电压与电压消弧补偿后的三相电压。由图可得, 配电网系统正常运行, 0.1 s 时发生过渡电阻为 500Ω 的 A 相接地故障, 0.2 s 时投入电压消弧装置补偿, 在

单相接地故障时, 故障相电压有效值为 5742 V , 而在有源电压消弧装置投入后, 故障相电压被降至仅为 10 V , 因此能够很好地将故障相电压抑制近乎为零, 达到消弧目的。

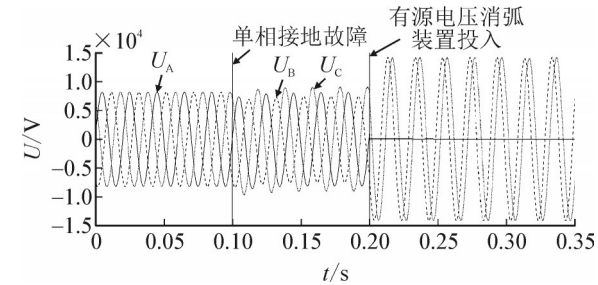
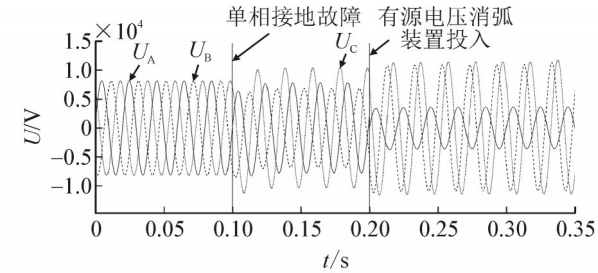
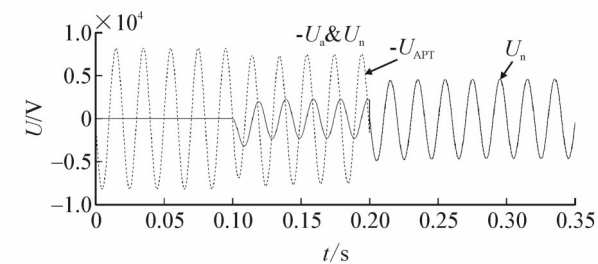


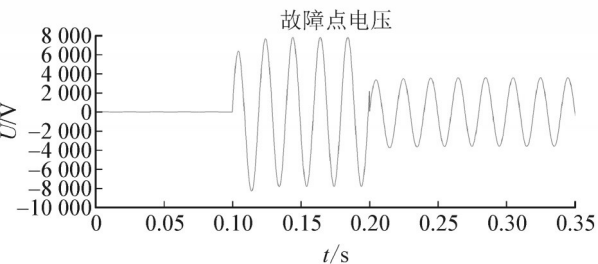
图6 使用系统真实三相电压数据的有源电压消弧效果
Fig. 6 Effect of active voltage arc suppression using real three-phase voltage data of the system



(a) 使用含消谐电阻的电压互感器测量得到的系统三相电压



(b) 中性点电压控制效果



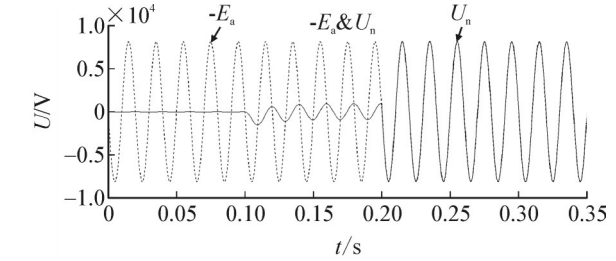
(c) 故障相电压消弧效果

图7 使用含消谐电阻电压互感器测量数据计算的有源电压消弧效果
Fig. 7 Effect of active voltage arc elimination calculated by the voltage transformer measurement data with a harmonic resistance

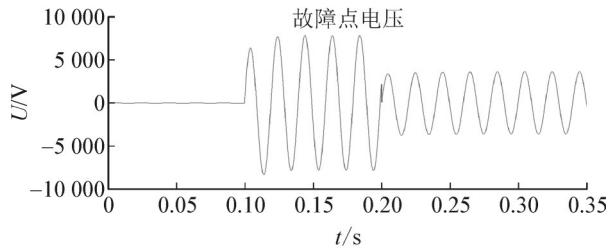
加消谐电阻后电压互感器测量的三相电压幅值见图7,由图7可知,单相接地故障时故障相电压有效值为5 600 V,在经有源电压消弧装置补偿后,其测量得到的故障相电压为2 260 V,因此,故障相电压无法降为零。图7为此时有源电压消弧的消弧效果。可以看出,有源电压消弧装置将中性点控制为具有消谐电阻的电压互感器测量所得的故障相电源电压的反相,会使补偿后故障点仍存在1 820 V的电压,无法被降为300 V以下。

采用含消谐电阻的母线电压互感器测量所得

线电压见图8,为通过计算达到的有源电压消弧效果,由图可得,故障相电压被控制为0,此方法可消除一次消谐电阻的影响。



(a) 中性点控制效果



(b) 故障点电压消弧效果

图8 使用线电压计算方法的有源电压消弧效果
Fig. 8 Effect of active voltage arc suppression using line voltage calculation method

表1展示了不同过渡电阻下有源电压消弧装置使用含消谐电阻的电压互感器测量的消弧效果和使用线电压计算得到的消弧效果。

表1 不同过渡电阻下有源消弧装置的消弧效果 Table 1 Effect of arc suppression of active arc suppression device under different transition resistances				
过渡电阻/ Ω	200	500	1 000	2 000
故障时 U_A/V (测量值)	5 240	5 600	5 689	5 732
故障时 U_A/V (真实值)	5 506	5 706	5 725	5 752
注入后 U_A/V (测量值)	3 579	3 582	3 580	3 580
注入后 U_A/V (真实值)	2 266	2 260	2 277	2 261
线电压消弧方法				
注入后 U_A/V (测量值)	1 475	1 476	1 473	1 474
注入后 U_A/V (真实值)	5.3	5.0	4.7	3.8

因此由表1可得出,在单相接地故障时,当采用包含消谐电阻的电压互感器时测量得到的母线相电压与真实值有较大偏差,当电压消弧装置使用含消谐电阻的故障相电压作为采集量控制中性点电压时,有源电压消弧装置注入后,不能将故障相母线出口处电压降为0,无法实现故障消弧。但如果采用线电压计算的注入方法,尽管测量得到的故障相电压仍然较大,但故障点电压被控制到100 V以下,消弧效果较好。

3 现场试验

为了验证本文提出的一种新的有源电压消弧计算方法,在已安装有源电压消弧装置的某110 kV变电站10 kV侧进行试验,在单相接地故障前母线

电压互感器测得配电网 A、B、C 三相电压分别为 6.2 kV、6.0 kV、5.8 kV，中性点偏移不大，系统为中性点经消弧线圈接地方式，消弧线圈脱谐度为-4.6%，现场接线示意图见图 9。

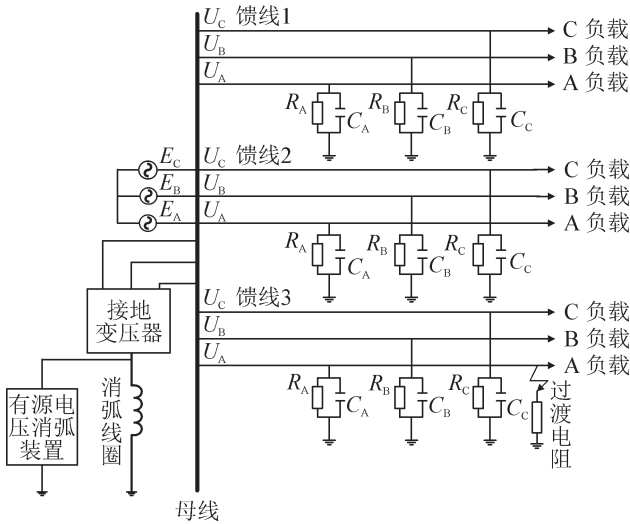


图9 现场接线示意图
Fig. 9 Wiring schematic diagram at site

试验通过单相接地试验设备在站外 10 kV 配电

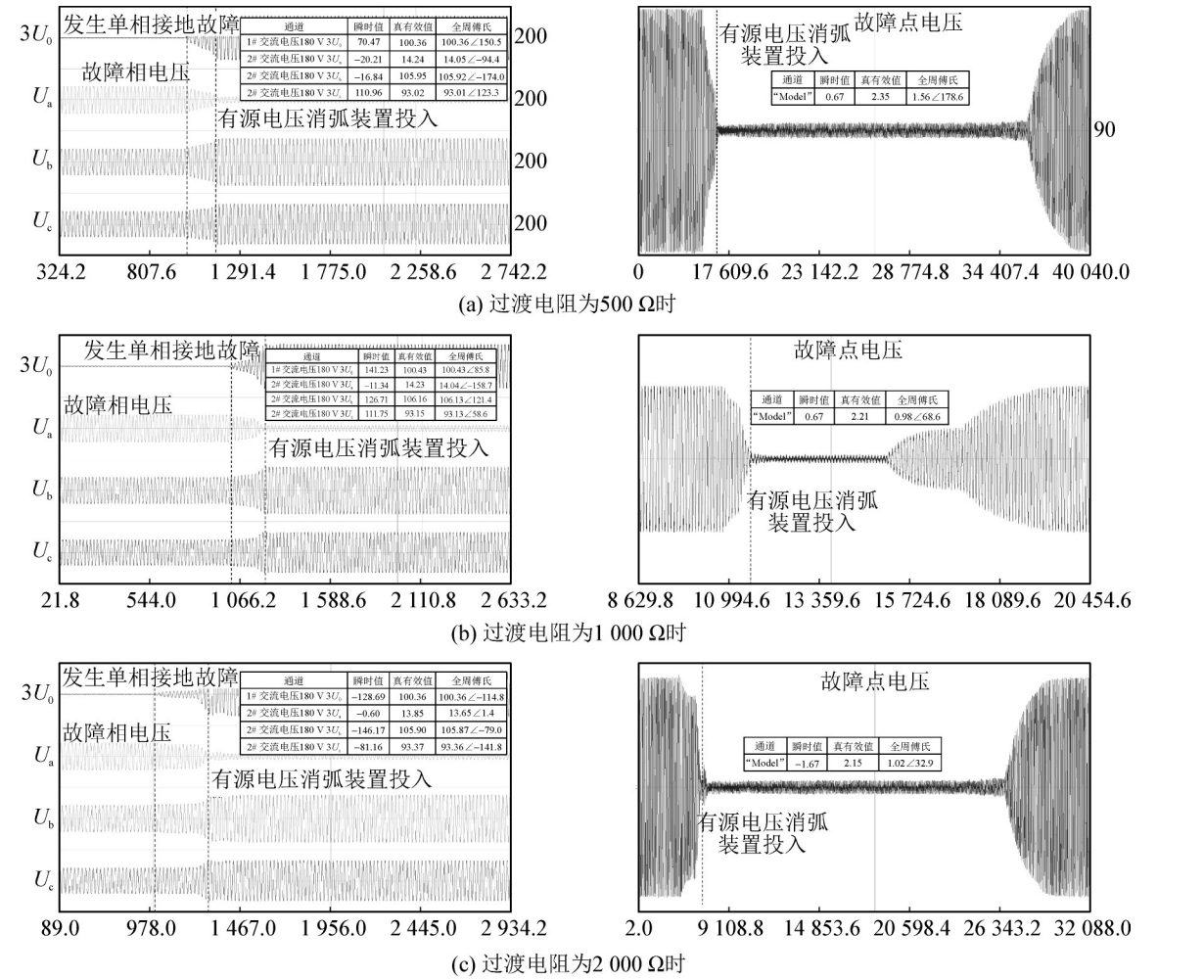


图10 不同过渡电阻下有源电压消弧波形图
Fig. 10 Active voltage arc suppression waveform under different transition resistances

线路 A 相母线上产生一个真实的单相接地故障，分别开展 500 Ω、1 000 Ω、2 000 Ω电阻接地 3 种类型试验，单相接地故障时间为 5 s，其中有源电压消弧装置注入 300 ms。开展单相接地试验时，站内试验人员操作录波仪记录母线电压互感器测量的三相母线及中性点电压互感器测量的中性点电压数据，同时在故障处也使用一台录波仪记录故障点电压数据，检测消弧效果。

站内及故障点处两台录波仪试验波形见图 10，各通道波形名称见表 2，其中通道 1 至 4 为站内录波仪检测的母线及中性点电压，通道 5 为故障处录波仪检测的故障点电压。

表2 图中通道名称说明表
Table 2 Channel name description in the figure

通道	名称	备注
1	中性点电压 U_N	
2	母线电压 U_A	故障相电压
3	母线电压 U_B	
4	母线电压 U_C	
5	故障点电压 U_f	

图10清晰地展示了采用线电压计算方法的有源电压消弧效果。当配电网系统分别发生过渡电阻为500 Ω、1 000 Ω、2 000 Ω的单相接地故障时,当有源电压消弧装置投入后,虽然母线电压互感器测量得到的故障相仍存在一定电压,分别为1 405 V、1 404 V、1 365 V,但根据故障点处的录波,此时消弧效果较好,故障点电压分别为156 V、98 V与109 V。因此可知使用这种线电压计算方法的有源电压消弧装置可以成功将故障点电压控制在100 V左右,消弧效果较好。

4 结语

文章在研究有源电压消弧原理和含一次消谐电阻的母线电压互感器工作原理后,通过理论分析、仿真验证,说明了一次消谐电阻对有源电压消弧效果的影响,研究结论如下。

1)在配电网系统正常运行时,一次消谐电阻对母线电压互感器测量得到的三相电压不平衡度影响较小;

2)含一次消谐电阻的母线电压互感器容易导致电压消弧装置无法将真正的故障相电压控制为零,因此会使有源电压消弧效果降低;

3)经仿真与试验证明,采用本文给出的线电压计算的有源电压消弧方法消弧后,尽管含一次消谐电阻的母线电压互感器测量得到的故障相仍有一定电压,但实际上故障点电压被控制在100 V左右,消弧效果较好,能够快速准确消弧。

参考文献

- [1] 赵融. 电压互感器引起的谐振过电压及防范措施[J]. 上海铁道科技, 2012(1): 161-162.
ZHAO Rong. Resonance overvoltage caused by voltage transformer and preventive measures[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2012(1): 161-162.
- [2] 董张卓, 白翰林, 李晓娟, 等. 用于仿真的非线性消谐电阻模型建立[J]. 计算机仿真, 2022, 39(3): 91-95.
DONG Zhanghuo, BAI Hanlin, LI Xiaojuan et al. Establishment of model about nonlinear harmonic elimination resistance for simulation[J]. Computer Simulation, 2022, 39(3): 91-95.
- [3] 吕鲜艳. 35 kV 系统铁磁谐振过电压的分析及抑制[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [4] 陈欣刚. PT中性点加装间隙与电阻串联组合的配电网消谐方法[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [5] 王恒山, 王铮, 王门鸿, 等. TV中性点经消谐电阻接地使二次电压异常的分析[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 320-323.
WANG Hengshan, WANG Zheng, WANG Menhong, et al. Analysis of unusual secondary voltage with TV neutral grounding via harmonic elimination resistor[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 320-323.
- [6] 李云阁, 王倩, 蒲路, 等. 中性点绝缘系统电压互感器三角形绕组短路问题分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(7): 6-10.
LI Yunge, WANG Qian, PU Lu, et al. Analysis of short-circuit fault occurring at PT delta windings in neutral-isolated systems[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7): 6-10.
- [7] 刘振伶, 李建平, 王勇焕, 等. 小电流接地系统电磁式TV谐振故障探源与消除[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 151-154.
LIU Zhenling, LI Jianping, WANG Yonghuan, et al. Fault detection and elimination of electromagnetic TV resonance in low current grounding system[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(1): 151-154.
- [8] 刘占荣, 王宏伟, 刘振伶. 一种根除小电流接地系统TV谐振的方法[J]. 华中电力, 2009, 22(2): 25-27.
LIU Zhanrong, WANG Hongwei, LIU Zhenling. An eradicating TV resonance method applied in small current grounding system[J]. Central China Electric Power, 2009, 22(2): 25-27.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘宝稳, 曾祥君, 张慧芬, 等. 不平衡零序电压快速精准抑制与电压消弧全补偿优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 645-654.
LIU Baowen, ZENG Xiangjun, ZHANG Huifen, et al. Optimal control method for accurate and fast suppression of unbalanced zero-sequence voltage and voltage arc suppression full compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 645-654.
- [12] 潘姝慧, 白浩, 周长城, 等. 配电网新型消弧技术综述[J]. 供用电, 2022, 39(2): 42-47.
PAN Shuhui, BAI Hao, ZHOU Changcheng, et al. Review of novel arc-suppression technology in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 42-47.
- [13] 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.

- [14]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.
- [15]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.
- [16]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.
- [17]游建章,郭谋发,蔡文强,等. 配电网单相接地故障柔性自适应消弧新方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):146-153.
- YOU Jianzhang, GUO Moufa, CAI Wenqiang, et al. Novel flexible and adaptive arc suppression method for single-phase grounding fault in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(4):146-153.
- [18]曾祥君,王福恒,李理,等. 中压配电网接地故障快速安全处置技术[J]. 供用电,2021,38(12):1-8.
- ZENG Xiangjun, WANG Fuheng, LI Li, et al. Fast and safe disposal technology of grounding fault in medium voltage distribution network[J]. Distribution & Utilization,2021,38(12):1-8.
- [19]喻泉,曾祥君,喻琨,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.
- [20]彭沙沙,曾祥君,喻琨,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.
- [21]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.
- [22]曲铁龙. 全补偿消弧线圈及其控制方法的研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
- [23]喻小婷,袁兆强,陈文婕,等. 10 kV电压互感器铁磁谐振与消谐措施研究[J]. 陕西电力,2011,39(2):30-34.
- YU Xiaoting, YUAN Zhaoqiang, CHEN Wenjie, et al. Research on TV ferroresonance and resonance elimination measures in 10 kV system[J]. Shaanxi Electric Power,2011,39(2):30-34.
- [24]李涛,黄宗彬,魏春明,等. 10 kV母线电压不平衡分析[J]. 广西电力,2016,39(3):60-62.
- LI Tao, HUANG Zongbin, WEI Chunming, et al. Analysis of unbalanced 10 kV bus voltage[J]. Guangxi Electric Power,2016,39(3):60-62.
- [25]赵镠,麦俊华. 煤化工10 kV电气系统接地选线消弧技术特点分析[J]. 化工管理,2018(32):239.
- ZHAO E, MAI Junhua. 10 kV electrical system for coal chemical industry characteristic analysis of arc suppression technology for grounding line selection[J]. Chemical Enterprise Management,2018(32):239.
- [26]邵文权,刘欢,李宁,等. 配电网谐振接地系统故障选线方法[J]. 西安工程大学学报,2020,34(3):32-40.
- SHAO Wenquan, LIU Huan, LI Ning, et al. The methods of fault line selection for resonant grounded distribution network[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University,2020,34(3):32-40.
- [27]周万鹏,郭彦宏,罗嘉良,等. 基于相电流稳态突变量的单相接地故障定位研究[J]. 电器与能效管理技术,2022(11):54-58.
- ZHOU Wanpeng, GUO Yanhong, LUO Jialiang, et al. Research of single-phase grounding fault location based on steady-state abrupt change of phase current[J]. Electrical & Energy Management Technology,2022(11):54-58.

作者简介:

郭润生(1969—),男,正高级工程师,主要从事电网故障诊断和继电保护工作。E-mail:grs2283@163.com。

牛维(1981—)女,高级工程师,主要从事电网运行计算分析技术工作。E-mail:13994203681@139.com。

李梁(1991—),男,工程师,主要从事配电网继电保护工作。E-mail:1217916875@qq.com。

王焕明(1979—)男,高级工程师,主要从事电力系统运行工作。E-mail:18903492418@189.cn。

李银平(1972—),男,高级工程师,主要从事电力系统运行与保护工作。E-mail:1286258957@qq.com。