

基于对地参数测量的配电网故障选相与有源消弧方法研究

佟欣¹, 宋国兵², 张志华³, 汪俊锋⁴, 雷智荣⁴

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 4. 西安西瑞控制技术有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 由于在单相接地故障前后配电网对地参数发生变化, 传统有源消弧法以配电网正常运行状态下的对地参数为依据得到的补偿电流参考值与实际值存在偏差。针对故障点残流无法实现完全补偿导致熄弧困难的问题, 通过中性点接入的有源消弧装置向配电网注入特征频率电流信号, 消除系统频率对配电网对地等效参数测量精度的影响, 构建特征信号流通回路, 实现配电网在接地故障后的对地等效参数测量。然后根据实时测量的对地参数和零序电压, 动态计算补偿电流, 控制有源消弧装置向中性点注入电流实现故障消弧, 并提出通过注入零序电流的方法得到故障相电压的幅值及相位, 实现故障相辨识。最后, 在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中验证了所提方法能够实时反映配电网对地参数变化, 实现了故障支路电流全补偿, 达到配电网接地故障快速熄弧的目的。

关键词: 配电网; 单相接地故障; 对地参数测量; 有源消弧; 故障选相; 动态补偿

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24265

Study on Fault Phase Selection and Active Arc Suppression Method in Distribution Network Based on Measurement of Ground Parameters

TONG Xin¹, SONG Guobing², ZHANG Zhihua³, WANG Junfeng⁴, LEI Zhirong⁴

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 4. Xi'an Xirui Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China)

Abstract: Due to the change of the ground parameters of the distribution network after the single-phase grounding fault, the traditional active arc suppression method based on the ground parameters in the normal operation state has a deviation between the compensation current reference value and the actual value. In consideration of the problem that the fault residual current cannot be fully compensated, which leads to difficulty in arc extinguishing, the characteristic frequency current signal was injected into the distribution network through the active arc suppression device connected to the neutral point, to eliminate the influence of the system frequency on the measurement accuracy of the equivalent parameters to the ground of the distribution network. By constructing a characteristic signal circulation loop, the measurement of the equivalent parameters to the ground of the distribution network after ground fault was realized. Then, according to the real-time measured ground parameters and zero-sequence voltage, the compensation current was dynamically calculated, and the active arc suppression device was controlled to inject current into the neutral point to realize the fault arc suppression. And the method of injecting zero-sequence current was proposed to obtain the amplitude and phase of the faulted phase voltage which can be used to detect the faulted phase. Finally, it is verified in PSCAD/EMTDC that the proposed method can reflect the changes of ground parameters of the distribution network in real time, realize full compensation of fault branch

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLGY18-07); 国网陕西省电力公司科技项目(B626KY190001)

作者简介: 佟欣(1996—), 女, 硕士研究生, Email: 971827732@qq.com

通讯作者: 宋国兵(1972—), 男, 博士, 教授, Email: song.gb@163.com

current, and achieve the purpose of rapid arc extinguishing of ground faults in distribution network.

Key words: distribution network; single-phase grounding fault; measurement of ground parameters; active arc suppression; fault phase selection; dynamic compensation

配电网结构复杂,易出现各类随机故障,其中发生频率最高的为单相接地故障。中性点不接地、中性点经消弧线圈接地等非有效运行方式是我国配电网限制接地短路电流的常用方法^[1]。近年来,随着越来越多的电缆线路、非线性负载以及换流器等电力电子设备投入运行,故障残流显著增大,若故障点电弧不能及时熄灭将导致故障进一步发展,威胁系统对用户可靠持续的供电和自身的安全运行^[2-3]。

现有消弧方法根据是否含有有源补偿装置以及补偿对象的不同可分为有源电流、电压消弧及无源电流、电压消弧^[4]。谐振接地是典型无源电流消弧法,利用消弧线圈产生的电感电流与接地故障电流相互抵消,但只能抵消其中的基波无功分量,无法实现故障电流全补偿。因此,有源消弧技术的研究具有重要的现实意义^[5-6]。

文献[7-8]提出了配电网中性点连接有源逆变器,故障时注入能够使中性点电压等于负的故障相电源电压时的零序电流,即通过控制故障相恢复电压为零阻断电弧重燃的条件。文献[9]提出了以故障前、后系统对地零序导纳变化作为计算补偿电流的依据,并通过参数闭环控制策略保证补偿准确性;文献[10]讨论了线路阻抗和负荷对现有电压消弧法的影响,提出通过调整零序电压得到当故障点电压为零时的线路等效阻抗,根据故障线路阻抗再次调整零序电压,实现故障消弧。文献[11]提出将SVG挂接于配电网母线上,分别在系统正常运行和发生接地故障时用于完成无功补偿及故障消弧。

实现有源消弧的前提是配电网对地参数的精确测量及故障相的准确辨识。文献[12]提出通过中性点接入信号源向系统注入变频恒流信号,求得系统谐振频率,进而得到对地参数;文献[13]提出向系统注入2次工频电流,实现对地参数测量,但工频电流与系统固有信号不易区分;文献[14]提出的消弧方法,其补偿电流参考值的计算采用系统正常运行时测量的对地参数,不能实时反映故障后接地电流水平和配电线路结构变化,影响消弧效果。

小电流接地系统中传统故障选相方法主要

根据母线三相电压的幅值及相位变化,在过渡电阻较大时选相不准。文献[15]通过分析不同接地方式下故障电压和中性点电压随过渡电阻变化的矢量图,提出根据中性点电压及相电压的幅值判断故障相;文献[16]提出根据故障相电压与故障前后中性点电压相位差之间的关系作为选相判据,并考虑三相不对称的情况。

为了实现配电网单相接地故障的处理,文中提出基于故障后配电网对地等效参数测量的有源消弧方法及故障选相。首先在中性点接入有源消弧装置,接地故障发生后向配电网注入特征频率电流信号,由零序电压互感器测量中性点电压并提取特征频率电压分量,通过对地支路构建等值零序网络,从原理上消除系统频率对参数测量精度的影响,然后根据实时测得的配电网对地等效参数和零序电压,动态计算注入补偿电流参考值,控制有源逆变器向中性点注入补偿电流,实现故障消弧。在测量对地参数的基础上,提出主动选相方法,由有源接地装置向中性点注入工频电流,准确辨识故障相电压。通过PSCAD/EMTDC仿真验证了所提方法的有效性。

1 配电网对地参数测量方法

配电网对地参数的准确测量是实现有源消弧、故障选相等的重要支撑,单相接地故障发生后,故障线路对地等效参数包括对地电容、对地泄漏电阻以及变化范围较大的故障点过渡电阻,即故障前、后的配电网零序导纳发生变化^[17]。

1.1 故障后配电网对地参数测量

含有源消弧装置的典型10 kV配电系统如图1所示。其中, E_A, E_B, E_C 为三相电源电动势; U_N 为中性点电压; C_A, C_B, C_C 为三相对地电容; R_A, R_B, R_C 为三相对地泄漏电阻; L_p, R_p 分别为消弧线圈电感及与之串联的阻尼电阻, R_p 用于保证正常运行时,电网中性点位移电压不超过相电压的15%,发生单相接地故障后迅速切除;假设C相发生接地故障, R_f 为接地点过渡电阻; P 为安装在消弧线圈内部的零序电压互感器,变比设为 k_1 ;T为升压变压器,变比设为 k_2 ;有源补偿装置经过升压变压器并联于消弧线圈两端,控制其注入特定频率、

幅值、相位的零序电流,可以起到参数测量、故障消弧及选相等方面的作用^[18]。

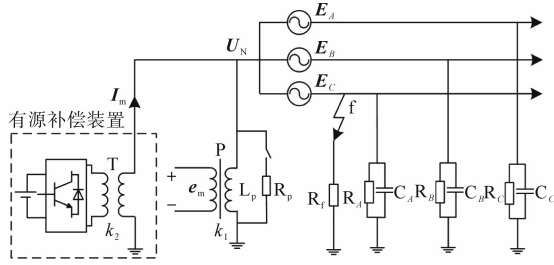


图1 配电网单相接地故障有源消弧结构图

Fig.1 Structural diagram of active arc suppression for single-phase grounding fault in distribution network

配电网发生单相接地故障后,有源补偿装置视作可控电流源向中性点注入特征频率电流信号 I_m ,从零序电压互感器开口三角形侧测量在电流作用下反馈的中性点特征电压信号,设为 e_m ,则归算到一次侧的值为 $E_m = k_1 e_m$ 。其中,由于电压互感器的励磁阻抗与测量回路中短路阻抗及线路对地阻抗相比非常大,励磁支路可视为断路状态,此时忽略电压互感器漏抗^[19]。则对地参数测量零序等效电路如图2所示。

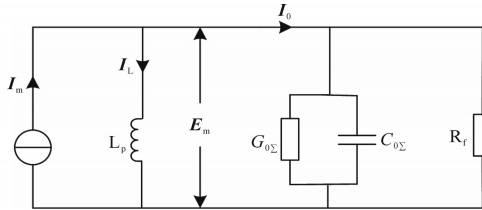


图2 对地参数测量零序等效电路图

Fig.2 Zero sequence equivalent circuit diagram for ground parameter measurement

图2中, $C_{0\Sigma}$ 为系统对地总电容,即 $C_{0\Sigma} = C_A + C_B + C_C$; $G_{0\Sigma}$ 为系统对地总泄漏电导,即 $G_{0\Sigma} = G_A + G_B + G_C$ 。

设 $I_m = I_m \angle \alpha$, $E_m = E_m \angle \beta$,则流过消弧线圈的电流为

$$I_L = \frac{E_m}{j\omega_1 L_p} = \frac{E_m}{\omega_1 L_p} \angle (\beta - 90^\circ) \quad (1)$$

式中: ω_1 为注入特征电流信号的角频率。

图2中,流过对地电容和电阻的总电流 I_0 为

$$I_0 = I_m - I_L = I_m \angle \alpha - \frac{E_m}{\omega_1 L_p} \angle (\beta - 90^\circ) \quad (2)$$

故配电网对地导纳具体为

$$Y_{0\Sigma} = \frac{I_0}{E_m} = \frac{I_m}{E_m} \angle (\alpha - \beta) - \frac{1}{\omega_1 L_p} \angle (-90^\circ) \quad (3)$$

即

$$Y_{0\Sigma} = \frac{I_m}{E_m} \cos(\alpha - \beta) + j \left[\frac{I_m}{E_m} \sin(\alpha - \beta) + \frac{1}{\omega_1 L_p} \right] \quad (4)$$

由此可求得配电网对地等效电容及电导表达式分别为

$$C_{0\Sigma} = \text{Im}[Y_{0\Sigma}] / \omega_1 = \frac{I_m}{\omega_1 E_m} \sin(\alpha - \beta) + \frac{1}{\omega_1^2 L_p} \quad (5)$$

$$G_{0\Sigma} + \frac{1}{R_f} = \text{Re}[Y_{0\Sigma}] = \frac{I_m}{E_m} \cos(\alpha - \beta) \quad (6)$$

与传统对地参数测量方法相比,在故障后注入特征信号,测得对地等效参数中包括过渡电阻,实时反映了配电网结构的变化,更具实用性;只需向中性点注入一次弱电流信号即可求得对地等效参数,原理清晰、操作简单,且只需在低压侧注入信号,操作可靠;利用有源消弧装置注入特征信号,无需投入新的设备即可实现对地参数测量,具有更好的经济性。

1.2 正常运行时配电网对地参数测量

同样,在配电网正常运行时注入特征电流信号,可以求得正常状态下的配电网对地等效参数,由于单相接地故障前后只有故障相参数发生变化,因此可以进一步求得过渡电阻。

图1所示的配电网运行在正常状态时,向系统注入特征频率电流 I'_m ,在此注入电流的作用下,中性点电压不再为零,测量并提取中性点电压中的特征频率分量,设为 e'_m ,归算到一次侧的值为 $E'_m = k_1 e'_m$ 。此时,对地参数测量等效电路如图3所示。

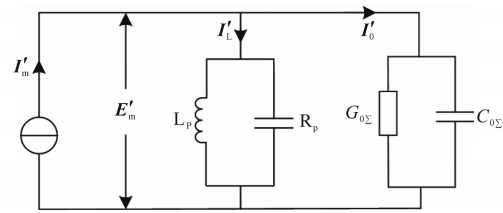


图3 对地参数测量等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram for ground parameter measurement

设 $I'_m = I'_m \angle \alpha'$, $E'_m = E'_m \angle \beta'$,则流过消弧线圈电感和阻尼电阻的电流为

$$I'_L = \frac{E'_m}{R_p + j\omega_1 L_p} \quad (7)$$

则流过对地电容和电阻的总电流为

$$I'_0 = I'_m - I'_L = I'_m \angle \alpha' - \frac{E'_m}{\omega_1 L_p} \angle (\beta' - 90^\circ) \quad (8)$$

因此,配电网对地导纳表达式为

$$Y_\Sigma = \frac{I'_m}{E'_m} \cos(\alpha' - \beta') - \frac{1}{R_p} + j \left[\frac{I'_m}{E'_m} \sin(\alpha' - \beta') + \frac{1}{\omega_1 L_p} \right] \quad (9)$$

2 配电网接地故障电流全补偿

2.1 有源补偿原理

谐振接地系统通过对地等效参数构成零序电流流通回路,有源注入前,系统接地电流包括在零序电压作用下对地电容产生的容性电流分量、消弧线圈提供的感性电流以及对地等效电阻决定的有功电流^[20]。结合实时测量的配电网对地等效参数,确定与系统接地电流大小相等、方向相反的补偿电流值,控制有源消弧装置注入,抑制故障支路电流为零。

图4为有源消弧零序等效电路图,故障支路由过渡电阻和等效零序电压源串联组成, I_{in} 为注入的工频补偿电流。

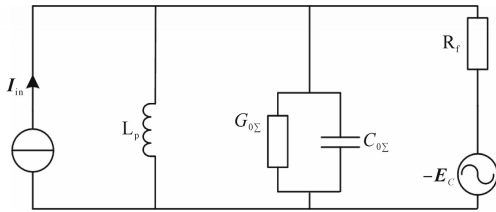


图4 有源消弧零序等效电路图

Fig. 4 Zero sequence equivalent circuit diagram of active arc suppression

依据叠加定理可将图4所示零序网络等效为图5和图6进行求解。当系统故障点电源单独起作用时,各电流分布如图5所示。

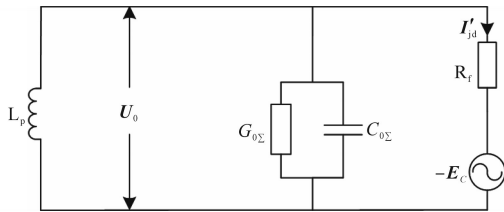


图5 单相接地故障零序等效电路图

Fig.5 Zero sequence equivalent circuit diagram of single-phase grounding fault

流经故障支路的电流 I'_{jd} 为

$$I'_{jd} = \frac{U_0 + E_c}{R_f} \quad (10)$$

式中: U_0 为此时的系统中性点电压。

当柔性接地装置单独作用时,零序等效电路如图6所示。

流经过渡电阻的接地故障电流为

$$I''_{jd} = \frac{1/Y_{\Sigma}}{1/Y_{\Sigma} + R_f} I_{in} = \frac{1}{1 + Y_{\Sigma} R_f} I_{in} \quad (11)$$

因此,注入补偿电流后的接地故障电流为

$$I_{jd} = I'_{jd} + I''_{jd} = \frac{U_0 + E_c}{R_f} + \frac{1}{1 + Y_{\Sigma} R_f} I_{in} \quad (12)$$

令 $I_{jd}=0$,可求得此时逆变器指令电流为

$$\begin{aligned} I_{in} &= -(U_0 + E_c)(Y_{\Sigma} + \frac{1}{R_f}) \\ &= -(U_0 + E_c)(j\omega C_{0\Sigma} + G_{0\Sigma} + \frac{1}{j\omega L_p} + \frac{1}{R_f}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ω 为工频角频率。

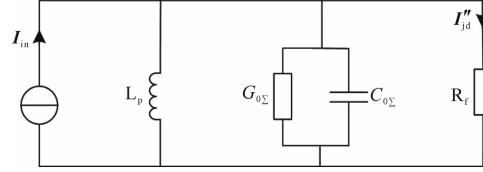


图6 注入电源单独作用的零序等效电路图

Fig.6 Zero sequence equivalent circuit diagram of injection power supply acting alone

与传统消弧方法相比,采用故障后实时测量的对地参数和零序电压计算补偿电流,可以精确补偿故障残流中的全部无功、有功分量,达到动态补偿的效果。

2.2 有源消弧法可行性分析

针对图1所示配电网,由戴维南定理得等效电路如图7所示。

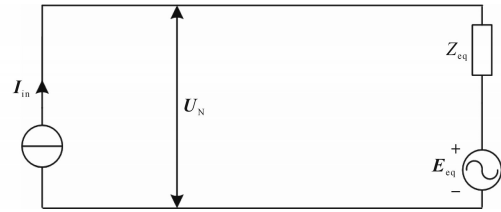


图7 配电网等效示意图

Fig.7 Equivalent diagram of distribution network

图7中, $E_{eq} = -\frac{1/Y_{\Sigma}}{1/Y_{\Sigma} + R_f} E_c$; $Z_{eq} = \frac{1}{Y_{\Sigma} + 1/R_f}$ 。

对注入补偿电流前的配电网列写基尔霍夫电流方程为

$$\begin{aligned} (E_A + U_0)(j\omega C_A + \frac{1}{R_A}) + (E_B + U_0)(j\omega C_B + \frac{1}{R_B}) + \\ (E_C + U_0)(j\omega C_C + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_f}) + \frac{U_0}{j\omega L_p} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

假设系统三相电源对称且对地阻抗参数平衡,则有 $E_A + E_B + E_C = 0$, $C_A = C_B = C_C$, $R_A = R_B = R_C$,解得此时中性点电压为

$$U_0 = -\frac{1/Y_{\Sigma}}{1/Y_{\Sigma} + R_f} E_c \quad (15)$$

由以上可知 $E_{eq} = U_0$,即戴维南等效电压等于故障后配电网未投入有源消弧装置时的中性点位移电压,等效电阻为配电网对地参数,在第1节测量得出。对图7,由基尔霍夫定律可知:

$$\mathbf{E}_{eq} + \mathbf{Z}_{eq} \mathbf{I}_{in} = \mathbf{U}_N \quad (16)$$

代入 $\mathbf{I}_{in}$ 的表达式可得:

$$\mathbf{U}_N = -\mathbf{E}_C \quad (17)$$

又 $\mathbf{U}_C = \mathbf{U}_N + \mathbf{E}_C$, 则有:

$$\mathbf{U}_C = 0 \quad (18)$$

式中: $\mathbf{U}_C$ 为故障相电压。

由上述推导可知,有源消弧装置可将接地故障电流与故障相电压同时减小至零,破坏了电弧的重燃条件,实现电流、电压双重消弧。因此,通过对有源逆变器进行控制,使其实时、精确地跟踪目标电流,即可完成向系统注入补偿电流,实现故障消弧的目的。

3 基于对地参数测量的故障相辨识

3.1 故障选相原理分析

由上文有源消弧原理可知,准确辨识故障相是实现有源消弧的前提,故提出一种注入零序电流的故障选相方法。

如图1所示的10 kV 配电网发生C相接地故障后,利用有源接地装置向中性点注入电流 $\mathbf{I}_s$,在 $\mathbf{I}_s$ 的作用下,中性点位移电压为 $\mathbf{U}_s$,根据节点电压方程可得:

$$\mathbf{I}_s = \frac{\mathbf{U}_s}{j\omega L_p} + (\mathbf{U}_s + \mathbf{E}_A)Y_A + (\mathbf{U}_s + \mathbf{E}_B)Y_B + (\mathbf{U}_s + \mathbf{E}_C)(Y_C + Y_f) \quad (19)$$

其中

$$Y_A = j\omega C_A + \frac{1}{R_A}$$

$$Y_B = j\omega C_B + \frac{1}{R_B}$$

$$Y_C = j\omega C_C + \frac{1}{R_C}$$

$$Y_f = 1/R_f$$

式中: Y_A, Y_B, Y_C, Y_f 为对地导纳。

化简得到:

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{U}_s(Y_A + Y_B + Y_C + Y_f + \frac{1}{j\omega L_p}) + \mathbf{E}_C Y_f \quad (20)$$

将 $\mathbf{U}_C = \mathbf{U}_s + \mathbf{E}_C$ 代入式(19),有:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_s &= \mathbf{U}_s(Y_A + Y_B + Y_C + \frac{1}{j\omega L_p}) + \mathbf{U}_C Y_f \\ &= \mathbf{U}_s Y_\Sigma + \mathbf{U}_C Y_f \end{aligned} \quad (21)$$

化简得:

$$\mathbf{U}_C = \frac{\mathbf{I}_s - \mathbf{U}_s Y_\Sigma}{Y_f} \quad (22)$$

根据式(22)可知,故障相电压根据向电网注入的电流、中性点电压以及配电网对地参数可以计算得到确定的值。由前文配电网正常运行时

与故障后的对地参数差值求得过渡电阻:

$$Y_f = Y_{0\Sigma} - Y_\Sigma \quad (23)$$

因此,式(22)右边均为已知量,理想情况下可以通过测量系统各相电压,分别与预测所得的故障相电压作对比,幅值及相位相同的即为故障相。实际中由于配电网对地参数的测量等过程存在一定误差,考虑一定的测量裕度,当测量的相电压幅值与相位角均与预测值接近时即可视作满足选相判据。

3.2 配电系统接地故障处理流程

基于故障后对地参数测量的有源消弧方法流程图如图8所示。具体流程为:实时测量系统零序电压和三相电压,检测接地故障的发生;通过有源消弧装置向系统注入一固定幅值和相位的非工频电流信号,实时计算配电网对地等效电容及电阻;进行故障选相;结合测得参数确定补偿电流参考值,控制逆变器向中性点注入补偿电流;延时将补偿电流逐渐减小至零,若零序电压呈比例减小,故障点熄弧,配电网恢复正常运行。

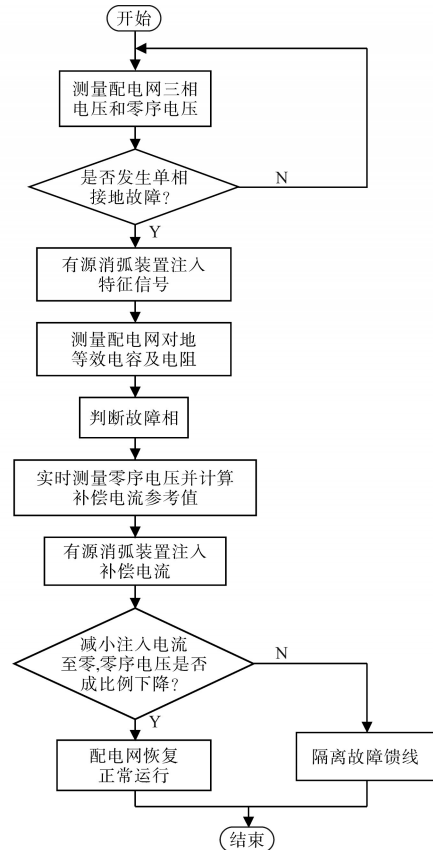


图8 故障消弧流程图

Fig.8 Flow chart of fault arc suppression

4 仿真分析

基于PSCAD/EMTDC仿真软件搭建以图1为

例的 10 kV 配电网模型,验证本文所提对地等效参数测量方法及有源消弧理论的正确性,系统参数如下: $k_1=100, k_2=10, R_0=6\ 000\ \Omega, C_0=10\ \text{mF}, L_p=293\ \text{mH}$ 。设置 0.1 s 时发生单相接地故障,仿真时长共 0.45 s。 C_0, R_0 分别代表配电网单相对地电容、单相对地泄漏电阻,即 $C_A=C_B=C_C=C_0, R_A=R_B=R_C=R_0$ 。

4.1 对地参数测量仿真分析

故障发生时刻通过柔性接地装置向配电网注入非工频电流信号 $I_m=10\angle 0^\circ\ \text{A}$,测量此时反馈的中性点电压信号并提取该特征频率下的电压分量,根据等效电路计算配电网对地等效电容及电阻。

为保证参数测量过程不会对故障消弧造成延时性影响,选取注入信号的频率高于 50 Hz,同时为保证电压互感器具有良好的传变特性,且与系统固有信号频率相区分,本文选取注入的特征电流为频率在 60~100 Hz 以内的间谐波。改变特征电流的频率,在不同故障点过渡电阻下对配电网对地参数进行测量,测量结果如表 1 所示。

表 1 对地等效参数测量结果

Tab.1 Measurement results of ground equivalent parameters

注入 信号频率/ Hz	过渡 电阻/ Ω	对地电容 测量值/ μF	相对 误差/%	对地电导 测量值/S	相对 误差/%
60	50	30.18	0.60	0.020 52	0.09
	200	30.11	0.37	0.005 51	0.18
	1 000	30.08	0.27	0.001 51	0.67
75	50	30.11	0.37	0.020 49	-0.05
	200	30.13	0.43	0.005 51	0.18
	1 000	30.11	0.37	0.001 49	-0.67
85	50	30.11	0.37	0.020 47	-0.15
	200	30.11	0.37	0.005 49	-0.18
	1 000	30.19	0.63	0.001 51	0.67

从表 1 可以看到,对地分布电容和对地等效电阻的测量误差绝对值均低于 0.7%,具有较好的准确性。由此可知,向中性点注入特征信号并对中性点返回电压进行测取,可在原理上消除故障点等效零序电源的作用,构建单一频率、单一电源的对地参数测量回路。

4.2 故障消弧仿真分析

选取表 1 中 $f=75\ \text{Hz}$ 的测量结果验证故障消弧。图 9 为故障点接地电流,过渡电阻为 $50\ \Omega$,结合表 1 中测得的对地零序导纳值,由式(13)确定补偿电流。可以看出,0.1 s 接地故障发生后故障电流峰值可达 12.03 A,0.14 s 注入消弧电流,故障残流被抑制到 0.024 A,电流抑制率达 99.8%。

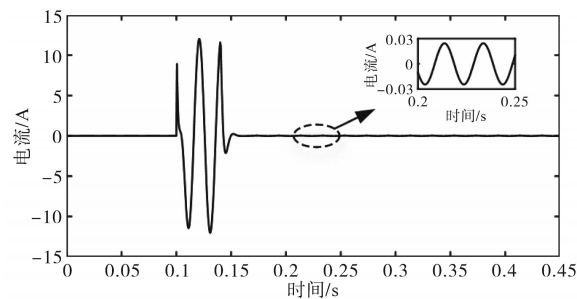


图 9 故障电流仿真波形图($R_f=50\ \Omega$)

Fig.9 Simulation waveform of fault current($R_f=50\ \Omega$)

图 10 为三相电压变化情况,系统稳定运行时三相电压对称,0.1 s 后的系统故障相电压下降,非故障的 A、B 两相电压升高。经注入电流补偿后,故障相电压接近于零,有效抑制电弧重燃。

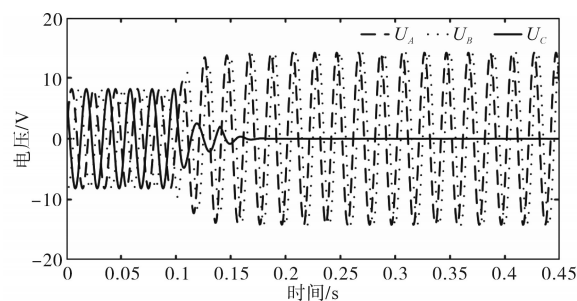


图 10 三相电压仿真波形图($R_f=50\ \Omega$)

Fig.10 Simulation waveforms of three phase voltage($R_f=50\ \Omega$)

图 11~图 14 分别给出了过渡电阻在 200 Ω 和 1 000 Ω 下的故障点电流及三相电压波形图。由图 11 和图 13 可知,故障电流在 0.1 s 后分别增大到 10.65 A 和 7.91 A,0.14 s 向中性点注入零序补偿电流,在较短的时间内可以将故障点电流分别降低到 0.014 A 和 0.008 A。

图 12 和图 14 反映了电压变化情况,故障发生后,向中性点注入零序补偿电流,在较短时间内可以将故障相电压限制到接近于零。

以上仿真结果表明,本文所提方法可有效实现故障消弧,使接地残余电流和故障相电压趋近于零,并且在不同过渡电阻下,都有显著的消弧效果。

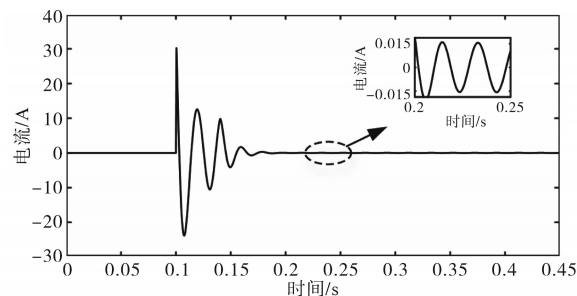


图 11 故障电流仿真波形图($R_f=200\ \Omega$)

Fig.11 Simulation waveform of fault current($R_f=200\ \Omega$)

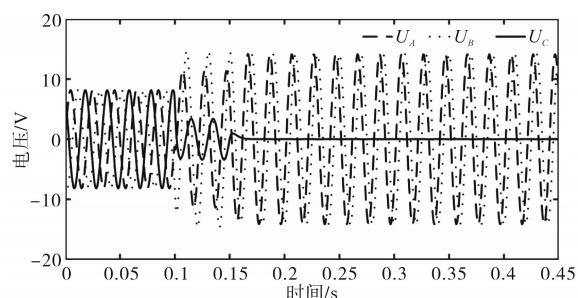


图 12 三相电压仿真波形图($R_f=200\ \Omega$)

Fig.12 Simulation waveforms of three phase voltage($R_f=200\ \Omega$)

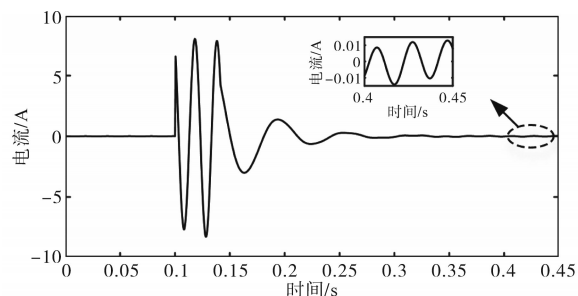


图 13 故障电流仿真波形图($R_f=1\ 000\ \Omega$)

Fig.13 Simulation waveform of fault current($R_f=1\ 000\ \Omega$)

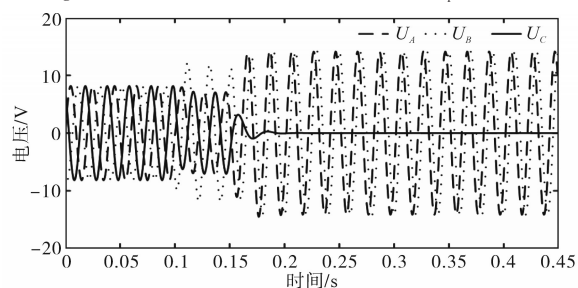


图 14 三相电压仿真波形图($R_f=1\ 000\ \Omega$)

Fig.14 Simulation waveforms of three phase voltage($R_f=1\ 000\ \Omega$)

传统有源电压消弧法如文献[7]所提,采用相同配电网结构及对地参数,改变过渡电阻的大小验证本文所提方法与传统电压消弧法的消弧效果,结果如表 2 所示。

表 2 测量结果对比

Tab.2 Comparison of measurement results

过渡电阻/ Ω	补偿前故障点电流/A	文献[7]方法		本文方法	
		补偿后故障点电流/A	抑制率/%	补偿后故障点电流/A	抑制率/%
5	8.712	0.155 944	98.21	0.003 043	99.96
30	8.597	0.106 602	98.76	0.005 192	99.93
100	8.242	0.079 128	99.04	0.010 539	99.87
500	6.067	0.053 995	99.10	0.014 561	99.76
800	4.833	0.042 046	99.13	0.017 882	99.63
2 000	2.504	0.018 282	99.27	0.011 518	99.54
5 000	1.098	0.007 638	99.30	0.006 039	99.45

从表 2 可以看出,本文在不同过渡电阻下,故障电流抑制率均高于传统电压消弧法。

5 结论

1)通过向中性点注入特定频率电流信号,构建该频率下的零序等效回路,实现配电网对地参数测量。实时反映了故障发生后配电网结构和对地支路参数的变化,不受配电网网架结构、参数、过渡电阻的影响;

2)利用有源接地装置向中性点注入零序电流,得到故障相电压表达式,实现故障选相;

3)以故障后实时测量的对地等效参数和零序电压为依据计算补偿电流,实现接地故障电流的动态全补偿;

4)仿真结果表明了本文提出的对地参数测量和全补偿故障消弧方法的正确性、有效性。

参考文献

- [1] 梁洪湘,曾祥君,喻锐,等.基于有源逆变分相注入的电压消弧与位移电压抑制方法[J].电测与仪表,2022,59(1):51-60.
LIANG Hongxiang, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Voltage arc-suppression and displacement voltage suppression method based on active inverter separate phase injection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 51-60.
- [2] 张毅,薛永端,宋华茂,等.低阻接地故障有源电压消弧算法性能分析和改进[J].电网技术,2017,41(1):314-321.
ZHANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Performance analysis and improvement of active voltage arc-suppression algorithm about low resistance grounding fault[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 314-321.
- [3] 范松海,陈坤斌,肖先勇,等.配电网单相接地故障残余电流转移消弧方法[J].电测与仪表,2019,56(11):20-25.
FAN Songhai, CHEN Kunyi, XIAO Xianyong, et al. Arc-suppression method based on transferring the residual current of single phase grounding fault in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 20-25.
- [4] 卫晓辉,邵文权,程远,等.配电网单相接地故障有源消弧技术综述[J].电力工程技术,2020,39(6):58-65.
WEI Xiaohui, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Review of single-phase grounding fault active arc-suppression technologies in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 58-65.
- [5] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2009.
YAO Huannian, CAO Meiyue. Resonant grounded of power system[M]. Beijing: China Power Press, 2009.
- [6] 杨廷胜,苗厚利,李志军.基于电力电子开关的快速调匝式消弧线圈研究[J].电测与仪表,2021,58(5):62-69.
YANG Tingsheng, MIAO Houli, LI Zhijun. Research of fast adjustable arc suppression coil based on power electronic switch[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 62-69.

- [7] 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.
- [8] WANG Wen, ZENG Xiangjun, YAN Lingjie, et al. Principle and control design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6):4561-4570.
- [9] 周江华,万山明,张勇. 基于参数闭环控制的配电网柔性接地消弧方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(4):1189-1197.
ZHOU Jianghua, WAN Shanming, ZHANG Yong. Flexible-grounding arc-suppression method for distribution network based on parameter closed-loop control[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4):1189-1197.
- [10] 郭谋发,蔡文强,郑泽胤,等. 计及线路阻抗及负荷影响的配电网柔性电压消弧法[J]. 电网技术, 2022, 46(3):1117-1126.
GUO Moufa, CAI Wenqiang, ZHENG Zeyin, et al. Flexible voltage arc-suppression method for distribution networks considering the influence of line impedance and load[J]. Power System Technology, 2022, 46(3):1117-1126.
- [11] 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.
- [12] 曾祥君,刘玉玲,喻锴等. 改进的配电网对地参数谐振测量方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3):3-11.
ZENG Xiangjun, LIU Yuling, YU Kun, et al. An improved resonance measurement method of grounded parameters for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3):3-11.
- [13] 杨帆. 基于有源工频电流注入的配电网对地参数精确测量[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1):81-87.
YANG Fan. Ground parameters accuracy measurement in distribution network based on active current injection with power frequency[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):81-87.
- [14] 喻泉,曾祥君,喻锴,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-ended measurement of ground parameters and closed-loop control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3):1011-1021.
- [15] 叶远波,蔡翔,谢民,等. 配电网单相接地故障快速选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3):96-103.
YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3):96-103.
- [16] 向国杰,曾祥君,喻锴,等. 基于相位差的不对称配电网接地故障选相方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22):70-76, 83.
XIANG Guojie, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Phase selection method for grounding faults of asymmetric distribution network based on phase difference[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22):70-76, 83.
- [17] 薛永端,李娟,陈筱菁,等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17):5037-5048, 5223.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17):5037-5048, 5223.
- [18] 喻锴,邹豪,曾祥君,等. 谐振接地配电网对地绝缘参数双端谐振测量新方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12):154-161.
YU Kun, ZOU Hao, ZENG Xiangjun, et al. A novel double-terminal resonant measurement method of insulation-to-ground parameters for resonant grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12):154-161.
- [19] 卓超,曾祥君,喻锴,等. 基于双电压互感器的中性点不接地配电网对地参数实时测量新技术[J]. 电网技术, 2020, 44(7):2657-2664.
ZHUO Chao, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A novel real-time measurement technique of grounded parameters of dual voltage transformers in neutral point ungrounded distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(7):2657-2664.
- [20] 邱伟强,郭谋发,郑泽胤. 基于单一直流源级联H桥变流器的配电网接地故障柔性消弧方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10):3848-3858.
QIU Weiqiang, GUO Moufa, ZHENG Zeyin. Flexible arc-suppression method based on single-DC-source cascaded H-bridge converter for earth fault in distribution networks[J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3848-3858.

收稿日期:2022-03-28

修改稿日期:2022-04-15