

# The Analysis of the Performance of the Transient Current in the Single-Phase-Grounded 10 kV Distribution Network

Fanglin Deng, Ping Luo, Wei Zhang

The Limited Liability Company of State Grid Chongqing Hechuan Bureau of Power Company, Chongqing  
Email: [824074768@qq.com](mailto:824074768@qq.com)

Received: Apr. 15<sup>th</sup>, 2015; accepted: Apr. 27<sup>th</sup>, 2015; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

As one of the important composed parts of power system, the distribution network's stable and safe operation plays a pivotal role at the security and stability of the entire power system operation. Isolated neutral networks are mainly used in our distribution system. When the single-phase earth fault occurs in the isolated neutral networks, the fault current is relatively small. It makes no effects on the normal operation in a period of time. Although the faulted line does not need to be eliminated immediately after ground fault, long period of fault status is dangerous to the safety of the systems. Therefore, the fault line must be identified in time and removed. Recently, it is research hotspots using the transient information of fault line to realize fault circuit selection. First, this paper analyzes the cause and harmfulness of the single-phase-grounded fault of 10 kV distribution network system. Then, the performance of the transient current in the single-phase-grounded 10 kV distribution network is analyzed in this paper.

## Keywords

The Single-Phase-Grounded, Transient, Distribution Network

---

# 10 kV配电网单相接地故障暂态特征分析

邓方林, 罗平, 张炜

国网重庆合川区供电有限责任公司，重庆  
Email: [824074768@qq.com](mailto:824074768@qq.com)

收稿日期：2015年4月15日；录用日期：2015年4月27日；发布日期：2015年4月29日

## 摘要

配电网作为我国电力系统的重要组成部分，其安全稳定的运行对整个电力系统的安全稳定运行起着重要的作用。在我国，配电系统主要采用中性点不接地系统。在中性点不接地系统中发生单相接地故障后，故障电流比较小，系统可以继续正常运行一段时间，不影响对用户供电。但是，长时间的运行会引起其它更严重的故障，破坏系统的安全运行。因此，必须及时找到故障线路并且切除。而应用故障线路暂态信息进行选线是目前研究的热点，本文在分析国内外10 kV配网单相接地故障原因及危害的基础上，分析了10 kV配网发生单相接地故障时系统暂态电流的变化规律。

## 关键词

单相接地故障，暂态，配电网

## 1. 引言

在我国的电力系统中，中性点有效接地方式和中性点非有效接地方式是其两种常见的接地方式。其中，中性点有效接地方式主要适用于110 kV及以上电压等级的电网中。中性点非有效接地方式(俗称为小电流接地系统)是在低压配电系统中主要采用的一种接地方式。当电力系统中性点对地为完全的绝缘时，此时的中性点运行方式即为中性点不接地方式。由于在中性点不接地方式中对接地的电力设施的经济投入比例是非常的少，所以该种接地方式的造价成本比较低，因此它普遍适用于我国乡镇的10 kV配电网中[1]-[5]。

采用小电流接地系统的优点是：当系统发生单相接地故障时，由于系统与大地没有直接构成电气回路，接地点不会产生很大的短路电流，同时线电压仍然保持三相对称，系统连续供电不受影响，无需立即跳闸，系统可以继续运行一段时间，供电可靠性得到了一定的提高。但是若不及时处理，仍然会引起一系列危害：发生单相接地故障(尤其是间歇性电弧接地)时，非故障相对地电压升高，甚至可能产生高幅值过电压，破坏周围设备绝缘，导致放电击穿，造成相间短路或者多点短路，从而扩大事故。所以，当配电网发生接地故障时，必须准确而及时的确定故障点位置，以便采取相应的对策隔离故障，恢复系统正常运行。而本文研究明确单相接地故障暂态特征，分析单相接地故障时各电气参数特性对确定故障点位置至关重要[5]-[10]。

## 2. 单相接地故障原因及危害

### 2.1. 单相接地故障的原因

单相接地故障检测，由于种种原因所导致的农村10 kV配电线路发生单相接地故障，变电站10 kV母线上运行的电压互感器会接收到故障信号，10 kV母线绝缘检查装置在检测到接地故障并发出接地信号之后会提示值班员进行故障处理，在确定发生单相接地故障的相别和配电线路，即停止运行该配电线路，按照规程的规定，可以故障运行两小时，但我们通常都会立即停止故障运行，是因为考虑到在故障运行一段时间可能会引起其他事故。在汇报给上级单位之后，会有配电线路运行的维护人员进行故障处理。

单相接地故障发生的原因。通过农村 10 kV 配电线路在实际的运行的归纳和总结,发现单相接地故障主要有以下几种原因:1) 配电变压器高压引下线断线。2) 配电变压器台上的 10 kV 避雷器或 10 kV 熔断器绝缘击穿。3) 配电变压器高压绕组单项绝缘击穿或接地。4) 导线风偏过大,与建筑物距离过近。5) 绝缘子击穿。6) 同杆架设导线上层横担的拉带一段脱落,搭在下排导线上。7) 线路落雷。8) 数目短接。9) 漂浮物,例如塑料袋,树枝等[11] [12]。

以上原因只是诸多原因中的几种,但是在所有的原因当中,导线断线、绝缘子击穿和树木树枝等短接是发生最频繁的配电线路单相接地故障最主要的原因。

## 2.2. 单相接地故障的危害

1) 单相接地故障对变电设备的危害。10 kV 配电线路发生单相接地故障后,变电站 10 kV 母线上的电压互感器检测到零序电流。在开口三角形上产生零序电压,电压互感器铁心饱和、励磁电流增加,如果长时间运行互感器将被烧坏。近年来,10 kV 配电线路在实际运行中,所发生变电站电压互感器烧毁的情况都会造成设备损坏以及大面积停电事故,这对生活、工作都带来极大的不便利[13]。

2) 对配电设备的危害。在 10 kV 配电线路发生单相接地故障后,所引发的间歇性弧光接地能够造成谐振过电压,所产生的电压是正常电压的几倍。严重的是过电压会将线路上的绝缘子绝缘击穿造成短路,此种短路事故最为严重,与此同时被烧毁的部分配电变压器会使得整个线路上的避雷器和熔断器绝缘击穿并烧毁,最终引发情况严重的电气火灾,造成不可挽救的损失。

3) 对区域电网的危害。严重的单相接地故障最终会破坏区域电网系统稳定,造成更加严重的事故发生。

4) 对人畜的危害。对于导线落地这类的单相接地故障,在这种故障发生后没有及时的将接地配电线路停运,这样所造成的结果是对行人和夜间的线路巡检人员产生不安全影响,引发人身触电伤亡等事故,也有可能生导致生出触电伤亡事故。因此,对于导线落地这一类的单相接地故障应及时做到配电线路停运。

5) 对供电可靠性的影响。在发生单相接地故障之后,要进行人工选线,这样对未发生单相接地事故的配电线路进行停电,这样就必须中断正常的供电,因此对供电的可靠性就产生了侧面影响。同时,在发生单相接地的配电线路被停运,需要查找故障点,并消除故障,这个过程中,都不能保证用户正常用电。这在庄稼生长期间、大风、雨雪等天气条件恶劣的情况下以及山区、林区等复杂地区是不利于寻找故障点的,也不利于故障的维修,这就等同于会造成长时间停电,变相对供电可靠性产生了负面影响。

6) 对供电量的影响。在发生单相接地故障后,首先要做到的是停运发生单相接地故障的配电线路,这样是因为需要查找故障点并消除故障,进而会长时间或者大面积停电,供电量就会随之减少。根据统计,每年由于配电线路发生单相接地故障就能导致少供电十几万度,这就直接影响供电企业的供电量指标和经济效益。

7) 对线损的影响。发生单相接地故障时,因为配电线路接地相直接或者间接的对地放电,将造成较大的电能损耗,如果按照规程规定运行一段时间,将造成更大的电能损耗[14]。

## 3. 10 kV 配电线路故障分析模型建立

为了便于分析配电网单相接地故障时的暂态过程,建立单相接地故障时的等效电路,如图 1 所示。图 1 中, $U_0$  为单相接地故障时的等效零序电压源; $R_0$  为系统的零序等值电阻(包括接地电阻); $L_0$  为系统的线路与变压器在零序回路中等值电感; $C_0$  为系统的对地等值电容; $r_L$ 、 $L$  为消弧线圈的等值电阻电感参数;通过开关  $K$  可以控制系统的中性点接线方式。

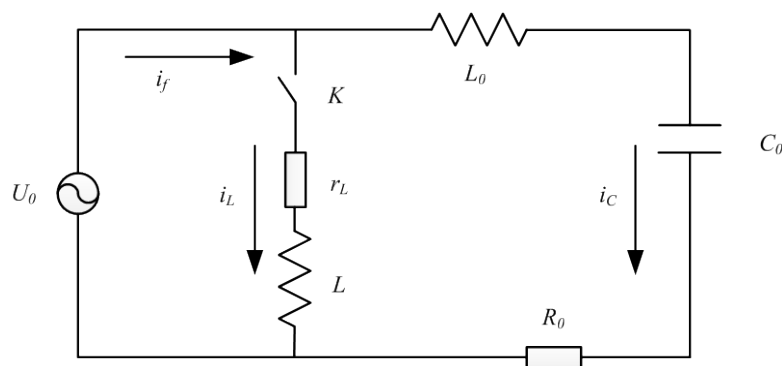


Figure 1. Transient state equivalent model on one-phase ground of 10 kV power distribution network

图 1. 10 kV 配电网单相接地时暂态等效模型

图 1 中, 开关闭合, 即系统为中性点经消弧线圈接地方式, 发生单相接地故障之后很短时间内(半个到一个工频周期), 故障点的接地点电流  $i_f$  由图 1 中的电容电流  $i_C$  与电感电流  $i_L$  构成; 但是电容电流与电感电流的衰减速度不同, 导致暂态过程中叠加后不能相互补偿使得暂态接地电流很大, 为单相接地故障定位提供了有利条件。以下分别分析中性点经消弧线圈接地系统接地故障暂态过程中的电容电流与电感电流, 以及暂态过程中的故障接地电流的特点。

#### 4. 单相接地故障暂态电容电流分析

接地故障暂态过程中, 自由振荡频率一般较高, 而且消弧线圈电感值  $L \gg L_0$ , 所以在图 1 中可以将  $r_L$ 、 $L$  的支路断开, 不考虑电感电流。于是, 图 1 中的等效电流可以化简为零序正弦电源  $U_0$  与  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$  组成的串联电路, 可以做出下列的微分方程式:

$$R_0 i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中, 当  $R_0 \geq 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$  时, 故障暂态过程为非周期性的振荡衰减, 都会逐渐趋于稳定状态; 当  $R_0 < 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$  时, 故障暂态过程为周期性的振荡衰减。

暂态电容电流可分为自由振荡分量  $i_c'$  和工频分量  $i_c''$  两部分, 自由振荡分量的振荡频率一般为 300~1500 Hz。加之初始条件为  $i_c' + i_c'' = 0$  且  $I_{cm} = U_m \omega C$ , 可将式(1)经过拉普拉斯变换化简运算可以得出:

$$i_c = i_c' + i_c'' = I_{cm} \left[ \left( \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (2)$$

式(1)与(2)中,  $U_{cm}$  为相电压幅值;  $I_{cm}$  为电容电流幅值;  $\omega t$  为自由振荡分量的角频率,  $\tau_c$  为等效电路的时间常数,  $\delta$  为自由振荡的衰减系数, 且  $\delta = 1/\tau_c = R_0/2L_0$ 。

分析式(2)可以得知,  $\delta$  较大时, 自由振荡衰减较慢;  $\delta$  较小时, 衰减较慢。可以观察到,  $\varphi$  为任意故障初相角时, 故障接地电流中均有自由振荡分量存在; 并且  $\varphi = 0$  时, 自由分量最小,  $\varphi = \pi/2$  时, 自由分量最大;

在相电压过零点附近发生接地故障时, 即为  $\varphi = 0$  时, 电容电流的自由振荡分量最小, 且  $t = T_f/2$  时有最小幅值  $I'_{Cmin}$  :

$$I'_{Cmin} = I'_{Cm} e^{-\delta \frac{T_f}{2}} \quad (3)$$

由式(3)可知,此时自由振荡分量与工频分量幅值相等,信号较微弱,这便导致许多暂态定位方法失效甚至误判。

在相电压峰值附近发生接地故障时,即为 $\varphi = \pi/2$ 时,电容电流的自由振荡分量最大,且 $t = T_f/4$ 时有最大幅值 $I'_{C\max}$ :

$$I'_{C\max} = I'_{Cm} \frac{\omega_f}{\omega} e^{-\delta \frac{T_f}{4}} \quad (4)$$

由式(4)可知,此时自由振荡分量的最大幅值与角频率比值 $\omega_f/\omega$ 成正比,比值越大,幅值也高。

根据以上分析可以知道,配电网的结构、大小以及运行方式均会影响暂态电容电流;线路的长度越长,自由振荡频率(一般300~3000 Hz内)越低,暂态电容电流中自由振荡分量的幅值也越小。

## 5. 单相接地故障暂态电感电流分析

若图1中开关闭合,考虑消弧线圈影响,可以做出下列微分方程:

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) = r_L i_L + N \frac{d\phi_L}{dt} \quad (5)$$

假设消弧线圈的磁化曲线保持线性即 $i_L = \frac{N}{L} \phi_L$ ;假设故障前消弧线圈磁通为零即 $\phi_L = 0$ 可以将化简(5)式求解得出磁通:

$$\phi_L = \phi_m \frac{\omega L}{Z} \left[ \cos(\varphi + \xi) e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi + \xi) \right] \quad (6)$$

式(5)和(6)中, $N$ 为消弧线圈匝数; $\phi_L$ 为消弧线圈磁通; $\phi_m$ 为稳态时消弧线圈的磁通,即 $\phi_m = \frac{U_{\varphi m}}{\omega N}$ ; $Z$ 为消弧线圈的阻抗,即 $Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$ ; $\xi$ 为补偿电流相角,即 $\xi = \arctan r_L/\omega L$ ; $\tau_L$ 为时间常数。

考虑到 $r_L \ll \omega L$ ,取 $Z \approx \omega L$ , $\xi = 0$ 。可以化简6式得出:

$$\phi_L = \phi_m \left[ \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (7)$$

故由 $I_{Lm} = \frac{U_{\varphi m}}{\omega L} = \frac{N \phi_m}{L}$ 可以得出暂态电感电流:

$$i_L = I_{Lm} \left[ \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (8)$$

分析式(8)可知,暂态电感电流也可分为直流衰减分量和工频稳态分量两部分,振荡周期为工频,振荡幅值与接地故障发生时的相电压角度有关。并且 $\varphi = 0$ 时,直流分量最大, $\varphi = \pi/2$ 时,直流分量最小。当 $\varphi = \pi/2$ 时发生单相接地故障,在经过半个工频周期后即 $t = T/2 = \pi/\omega$ 时,电感电流到达峰值:

$$i_{L\max} = I_{Lm} \left( e^{-\frac{\tau_L}{\omega L} \pi} + 1 \right) \quad (9)$$

## 6. 单相接地故障暂态故障接地电流分析

暂态过程中故障接地电流由图1中的电容电流 $i_C$ 与电感电流 $i_L$ 共同构成,暂态接地电流的数学表达式可以由式(2)和式(8)叠加导出,即为:



$$i_f = i_C + i_L = (I_{cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{cm} \left( \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,暂态过程中接地电流可分为稳态工频分量和暂态直流衰减分量。稳态工频分量为  $(I_{cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi)$ ,即电容电流与电感电流的工频稳态分量之差,系统通过调节消弧线圈的参数即  $I_{Lm}$  便可大幅减小这部分电流。暂态直流衰减分量是故障接地电流主要组成部分,分别由电容电流的自由振荡分量与电感电流的直流衰减分量构成,与稳态工频分量不同,两构成部分求和之后彼此相互叠加,增大了暂态直流信号的幅值,导致暂态电流信号的增强。

由于消弧线圈的电感值很大,电感电流的直流分量衰减相对于电容电流而言较为缓慢,因此暂态过程中流过故障点接地电流特征主要反应的是暂态电容电流的特征,其幅值与频率也都主要由暂态电容电流决定。由于暂态电感电流的频率与工频相同,暂态电感电流的直流分量只增大暂态接地电流的幅值,同时接地电流幅值与故障电压初相角有关。

## 7. 结论

综合上述分析可知:中性点经消弧线圈接地的系统发生单相接地故障时,暂态接地电流相对于稳态电流而言,持续周期虽然很短,但幅值很大;因此采用暂态信号进行故障定位的话,有利于克服接入消弧线圈后导致故障信号微弱的缺陷。

## 参考文献 (References)

- [1] 谷万明 (2002) 农村 10 kV 配电网单相接地故障. *电力自动化设备*, **10**, 76-77.
- [2] 郭清滔, 吴田 (2010) 小电流接地系统故障选线方法综述. *电力系统保护与控制*, **2**, 146-152.
- [3] 王铭 (2005) 小电流接地系统单相接地故障选线新方法的研究. 华北电力大学, 保定.
- [4] Griffel, D. and Leitloff, V. (1997) A new deal for safety and quality on MV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **12**, 1428-1433.
- [5] 程路, 陈乔夫 (2009) 小电流接地系统单相接地选线技术综述. *电网技术*, **18**, 219-224.
- [6] 孙波, 孙同景, 薛永端等 (2009) 利用空间电磁场感应检测小电流接地故障. *电力自动化设备*, **7**, 45-47.
- [7] 陈生贵, 卢继平等 (2003) 电力系统继电保护. 重庆大学出版社, 重庆.
- [8] 曾祥君, 尹项根等 (2000) 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法. *中国电机工程学报*, **1**, 29-32.
- [9] 徐丙垠, 薛永端, 李天友等 (2005) 小电流接地故障选线技术综述. *中国电力*, **4**, 1-7.
- [10] 苗友忠, 孙雅明, 杨华 (2004) 中性点不接地配电系统馈线单相接地故障的暂态电流保护新原理. *中国电机工程学报*, **2**, 28-32.
- [11] 孙雅明, 苗友忠 (2004) 谐振接地配电系统馈线单相接地故障的暂态电流保护新原理. *中国电机工程学报*, **3**, 62-66.
- [12] 朱丹, 贾雅君, 蔡旭 (2004) 暂态能量法原理选线. *电力自动化设备*, **3**, 75-78.
- [13] 陈祥训 (2000) 正交紧支复小波的生成及其在电力系统中的应用. *中国电机工程学报*, **7**, 83-88.
- [14] 罗志勇 (2011) 10 kV 千伏配电网常见故障原因及预防. *中国电力企业管理*, **12**, 134-135.