

中性点采用两种接地方式的配电网单相接地故障的比较

李 林¹, 冯 勇^{1,2}, 郑剑飞¹

(1. 哈尔滨工业大学电气工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了更好地应用小电阻接地方式来提高配电网系统的安全性、可靠性, 笔者研究了中性点采用小电阻接地和消弧线圈接地的配电网在发生单相接地故障时的不同特点以及保护方式的差异。首先采用对称分量法对这两种配电网的单相接地故障进行分析, 并采用 MATLAB 进行了仿真。研究表明, 采用这两种接地方式的配电网在发生单相接地故障时的不同特点导致其继电保护措施也各不相同。因此, 随着中性点经小电阻接地的接地方式的推广, 其相应的单相接地故障继电保护措施需进一步完善。

关键词: 中性点接地方式; 单相接地故障; 对称分量法

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)03-0239-04

Comparison of Single-phase-to-ground Faults in Distribution Network with Two Kinds of Grounding Methods

LI Lin¹, FENG Yong^{1,2}, ZHENG Jian-fei¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. The Key Laboratory of High Voltage Engineering & Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to obtain a better application of low resistance grounding system to improve the safety and reliability of distribution network, the author investigated different characteristics of the power distribution network with neutral grounding through small resistors or petersen coil in the event of single-phase-to-ground fault, as well as the difference between the protecting methods. The symmetrical components method was used to analyze the single-phase-to-ground faults. Then a simulation via MATLAB was conducted. The results show that the different features of the two kinds of networks during single-phase-to-ground fault lead to adopting different relaying methods. With the spreading of low-resistance grounding method, the corresponding relaying methods should be improved.

Key words: neutral point grounding method; single-phase-to-ground fault; symmetrical components method

0 引言

传统的中性点采用消弧线圈接地的配电网暴露出以下弱点:①为适应不断增长的电容电流,需要不断增加消弧线圈数量以增加其补偿容量,很不经济;②运行中有许多线路的切合操作,消弧线圈往往不能及时随之调节。因此,我国北京、上海、广州等一些城市已逐步将中性点经消弧线圈接地改为经小电阻接地的方式。实践证明,配电网采用小电阻接地方式对提高系统运行的安全性、可靠性具有良好的效果^[1-3]。

中性点经小电阻接地的配电网(简称为小电阻接地配电网)发生单相接地故障时,表现出了与经消弧线圈接地的配电网(以下简称消弧线圈接地配

网)不同的特点,因此需要加以区别对待。为了说明这些不同特点,下面对采用这两种接地方式的配电网进行比较分析。

1 两种配电网单相接地故障理论分析

为求流过故障点的电流、故障相电压以及中性点电压等,对图 1 所示的简化网络接线进行分析。图中,系统中性点由 Z_n 接地, Z_n 为小电阻(阻值设为 R_n)或消弧线圈(电感设为 L)。单相接地时的过渡电阻为 R_f ,配电网的零序电容为 C_0 。

设发生单相接地故障时,配电网中性点的电压为 U_n ,电源每相电势为 E_A 、 E_B 和 E_C 。则在忽略线路阻抗的前提下,配电线上每相对地电压是 E_A+U_n 、 E_B+U_n 和 E_C+U_n 。

由对称分量法知,线路的零序电压是 $U_0=[(E_A+$

收稿日期:2007-05-11; 修回日期:2007-10-17

基金项目:重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室访问学者项目资助。

作者简介:李 林(1983-),男,硕士研究生,研究方向为电力配电网高阻抗故障的检测。

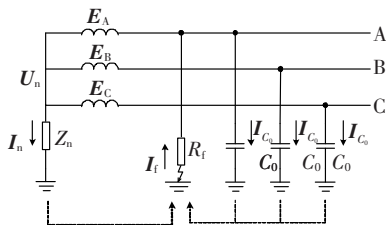


图1 简化的网络接线

$U_n) + (E_B + U_n) + (E_C + U_n)] / 3$ 由于 E_A 、 E_B 和 E_C 三相对称,和为零。因此从上式可以得到

$$U_0 = U_n \quad (1)$$

经电网零序电容 C_0 流入大地的电流为

$$3I_{C_0} = 3U_0 j\omega C_0 = 3U_n j\omega C_0 \quad (2)$$

经小电阻或消弧线圈流入大地的电流为

$$I_n = U_n / Z_n \quad (3)$$

由于经电网零序电容流入大地的电流和经小电阻或消弧线圈流入大地的电流都要从故障点流回电网,因此故障点的电流 I_f 为

$$I_f = 3I_{C_0} + I_n \quad (4)$$

由故障相对地电压 U_A 为 $E_A + U_n$ 得

$$E_A + U_n = U_A = -I_f R_f \quad (5)$$

将(2)、(3)式代入(4)、(5)式得

$$I_f = \frac{-E_A}{R_f + 1 / (3j\omega C_0 + 1/Z_n)} \quad (6)$$

$$U_n = \frac{-E_A}{[R_f(3j\omega C_0 + 1/Z_n) + 1]} \quad (7)$$

$$U_A = \frac{E_A}{1 + 1 / [R_f(3j\omega C_0 + 1/Z_n)]} \quad (8)$$

对于消弧线圈接地系统,消弧线圈的作用是补偿单相接地故障时的经电网零序电容电流,当完全补偿时有

$$3I_{C_0} = -I_n$$

将式(2)、(3)代入上式可以得到,此时

$$3j\omega C_0 + 1 / (j\omega L) = 0 \quad (9)$$

需要说明的是,以上结果均是假设系统是处于稳定状态计算得到的。而当故障发生后,各物理量需要经过一定的时间才能达到稳态。关于各物理量的过渡过程,在此不进行分析。

2 两种配电网单相接地故障仿真

2.1 配电网建模与参数设置

笔者采用 Matlab 对 10 kV 配电网进行仿真,中性点分别采用小电阻接地和消弧线圈接地。为研究问题方便,突出主要因素,系统的入端简化为无穷大容量的电压源,经一台 110kV/10.5kV 变压器(容量 31.5 MV·A)给 5 条支路上的负载供电。图 2 是配电网的结构图。

配电线路采用电缆和架空线混合线路,每条线路电缆和架空线的长度见表 1。电缆和架空线均选用分

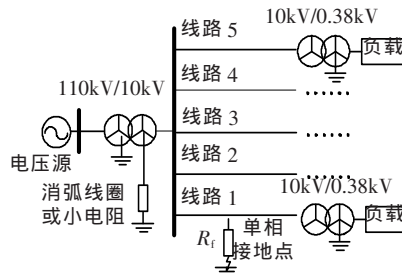


图2 10kV 配电网结构图

布参数模型,各参数见表 2。中性点采用消弧线圈接地时,电感值按 10%过补偿计算得 0.283 H;采用小电阻接地时,接地电阻按照文[2]给出的值选择 10 Ω 。

表 1 配电线路长度 km

线路编号	架空线	电缆
1	1	7
2	7	8
3	4	5
4	3	3
5	5	7

表 2 配电线路参数^[4]

参数名称	$R_0/R_f / (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$L_0/L_f / (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	$C_0/C_f / (\text{nF} \cdot \text{km}^{-1})$
架空线	0.230/0.170	5.480/1.210	6.0/9.7
电缆	0.106/0.078	1.223/0.270	358/695

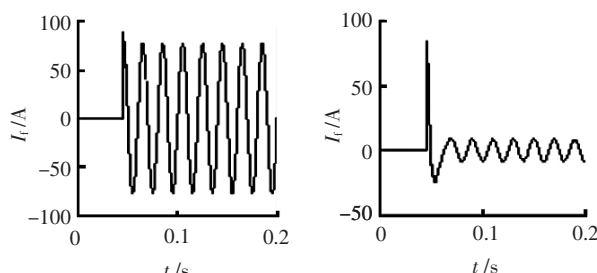
仿真时,设定单相接地故障发生在线路 1 的 A 相上,接地故障采用开关和电阻串联来模拟,开关控制接地故障发生的时间,电阻值代表单相接地时的过渡电阻。为便于比较,过渡电阻 R_f 分别设定为 0.1、10、50、100、500、1 000、10 000 Ω 。

2.2 仿真结果

发生单相接地故障时,接地点故障电流 I_f 波形、中性点电压 U_n 波形以及故障相电压的波形分别见图 3~5。限于篇幅的限制,仅给出 R_f 为 100 Ω 时的波形。表 3 中列出了发生单相接地故障时故障电流、中性点电压以及故障相电压达到稳态值时的有效值,为了验证前一小节的推导,将按照式(6)~(8)得到的理论值也列于表中。

2.3 仿真结果分析

(1)对于小电阻接地系统,除了当过渡电阻 R_f 为 0.1 Ω 时得到仿真结果与计算值差别较大外,其



(a)小电阻接地配电网 (b)消弧线圈接地配电网
图3 两种配电网接地点故障电流的波形($R_f=100 \Omega$)

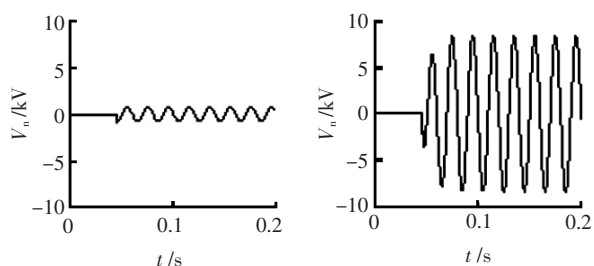
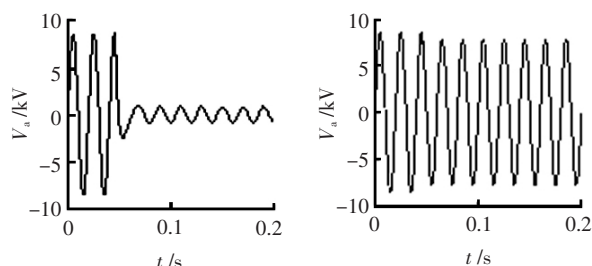
图4 两种配电网中性点电压波形($R_f=100\Omega$)图5 两种配电网三相电压波形($R_f=100\Omega$)

表3 故障电流、中性点电压、故障相相电压有效值的仿真值与计算值

R_f/Ω	小电阻接地配电网/A						消弧线圈接地配电网/A					
	故障电流		中性点电压		故障相相电压		故障电流		中性点电压		故障相相电压	
	仿真值	计算值	仿真值	计算值	仿真值	计算值	仿真值	计算值	仿真值	计算值	仿真值	计算值
0.1	560.6	603.4	5.590 4	6.002 2	0.866 2	0.060 3	6.5	6.1	5.979 3	6.062 2	0.048 0	0.000 6
10	291.5	304.3	2.906 2	3.027 1	3.152 3	3.042 9	5.8	6.1	5.977 2	6.061 9	0.068 3	0.061 4
50	99.1	101.2	0.987 8	1.006 7	5.050 9	5.059 8	5.9	6.1	5.970 8	6.054 4	0.294 4	0.306 5
100	54.3	55.2	0.541 4	0.548 7	5.496 3	5.516 0	5.9	6.1	5.947 4	6.031 3	0.586 7	0.610 6
500	11.7	11.9	0.117 2	0.118 3	5.919 9	5.944 5	5.3	5.5	5.354 9	5.408 7	2.656 7	2.737 9
1 k	6.0	6.0	0.059 4	0.059 7	5.977 9	6.002 8	4.2	4.3	4.251 1	4.260 1	4.243 3	4.312 9
10 k	0.6	0.6	0.006 0	0.006 0	6.031 6	6.056 2	0.6	0.6	0.601 9	0.595 9	5.947 5	6.032 8

他情况下仿真结果与计算值均较为接近。笔者认为,这是由于当 R_f 为 0.1Ω 时,故障电流较大,此时线路阻抗不能忽略造成的。

对于消弧线圈接地系统,可以看到计算值与仿真值均较为接近。

(2)从表3中可以看到:对于小电阻接地系统,接地点故障电流和中性点电压随着过渡电阻 R_f 的变化而有很大的变化;而对于消弧线圈接地系统,当 R_f 小于 $1\text{k}\Omega$,以上这两个量随着过渡电阻的变化没有很大的变化。从式(6)、(7)可以解释以上的现象:
①对于小电阻接地系统,当 R_n (即 Z_n)阻值为几欧到几十欧时(一般接地电阻的取值范围), $|1/(3j\omega C_0+1/Z_n)|$ 的值也在几欧到几十欧,因此随着 R_f 的变化,式(6)的分母有很大的变化,故接地点故障电流随着 R_f 的变化有很大的变化,中性点电压也是这样;
②对于消弧线圈接地系统,当接近完全补偿时,式(9)中 $(3j\omega C_0+1/Z_n)$ 的值接近于零,则式(7)分母中 $R_f \times (3j\omega C_0+1/Z_n)$ 相对于1可以忽略,因此中性点电压随着过渡电阻 R_f 的变化而变化不大,该仿真按照10%过补偿计算得到的消弧线圈参数,即属于该情况。

3 两种配电网单相接地故障的特点

3.1 小电阻接地配电网单相接地故障特点

从前边的仿真可以知道,小电阻接地配电网在发生单相接地故障时,可以分为以下3种情况:

(1)故障点电流有效值大于 100A 。此时过渡电阻小 50Ω ,属于金属性接地。线路中的零序电流保

护装置就能迅速将故障线路切除,防止事故扩大。

(2)故障点电流有效值在几安到几十安之间,此时过渡电阻阻值较大。当架空线与周围物体(例如树枝等)搭接、电缆对地绝缘降低或是架空线断线落在地面而过渡电阻较大时,均属于这一类的情形。

在电网运行时,由于单相重合闸时的两相运行、三相重合闸或手动合闸时的断路器不同期或是空投变压器时产生的不平衡励磁涌流,都会产生较大的零序电流。零序电流保护装置就无法将这些正常情况与这些单相接地故障区别开来。若保护值设定的太低,则线路投切频繁,降低了供电质量。因此这类单相接地故障的检测比较困难。

关于此类故障的检测,研究者称为高阻抗故障检测^[4]。高阻抗是相对于金属性接地来说的,金属性接地所产生的故障电流能够使零序保护装置产生保护动作,而高阻抗故障则无法使零序电流保护装置产生动作。在中性点经小电阻接地或直接接地的中压配电系统,高阻抗故障检测一直是一个困扰人们的问题。如何快速、准确的将高阻抗故障与配电网中正常的瞬态事件区别开来,是人们关注的焦点^[5,6]。

(3)故障点电流有效值小于 1A 。此时从表3中可以看到,配电网各物理量没有明显变化。只有等过渡电阻的阻值进一步降低、各电气量有明显变化时才能对其进行检测。

3.2 消弧线圈接地配电网单相接地故障特点

对于消弧线圈接地配电网来说,当 R_f 小于 $10\text{k}\Omega$ 时,由(1)式知,零序电压等于中性点电压,又由表3

可以看到,此时线路中性点电压(也即零序电压)十分明显,因此易于判断配电网发生了单相接地故障。因此,对于消弧线圈接地配电网的此类故障,人们的着眼点在于选线,因为困难的是如何从众多支路中选择出发生故障的线路,进而快速到故障线路进行排查,解除故障。当 R_f 大于10 k Ω 时,此时与小电阻接地配电网类似,需要等过渡电阻进一步降低才能判断配电网发生了故障并进行选线。

4 两种配电网单相接地故障保护的比较

两种配电网发生单相接地故障的特点,决定了其保护方式也是有区别和联系的:

(1)小电阻接地配电网中必须放置零序电流保护装置,这样在零序电流超出保护整定值时能够迅速将故障线路切除。

对于消弧线圈接地系统,一条线路出现单相接地故障,整个系统都会出现明显的零序电压。母线PT二次开口三角绕组的电压为三倍零序电压,测量此处的零序电压即可在系统中构成绝缘监视装置。

(2)小电阻接地配电网中,对于高阻抗故障的检测,每条线路的监控装置只需对该线路进行监控,而不需要考虑其他线路的情况。

在消弧线圈接地系统中,往往需要将各条线路信息汇总到一起,经过比较后确定故障线路。

(3)研究者经过现场实验指出高阻抗故障有很多特点,比如过渡电阻非线性、故障电流波形不对称等^[7-9],这些特点导致电流的波形发生畸变。许多研究者基于其稳态特征进行了检测方法的研究。

消弧线圈接地的配电网发生单相接地故障时,许多研究者利用稳态分量提出了选线方法。但由于故障电流的暂态分量要比稳态分量明显的多,这一点从图3(b)中可以看出,研究者提出了许多基于暂态分量的选线方法,如首半波、1/6波、暂态零序电流比较法等。实践表明,利用暂态电流的选线方法能够提高选线精度^[10,11]。

(4)无论是小电阻接地系统的高阻抗故障检测,还是消弧线圈接地系统的单相接地故障选线,由于受到测量仪器的精度、电网干扰等影响,都存在单一的算法有其局限性这一问题^[6,12]。如何提高算法的适应性或将各种算法进行综合,是需要进一步解决的问题。

5 结语

笔者从简化的配电线路模型入手,对发生单相接地故障时的物理量进行了分析。仿真结果验证了分析的正确性。

通过比较仿真结果发现,中性点经小电阻接地的配电网在发生单相接地故障时,表现出与中性点经消弧线圈接地的配电网有许多不同特点。这些不同点使其单相接地故障的保护方式也不尽相同。因此笔者认为,随着中性点经小电阻接地的接地方式在许多城市中使用,针对小电阻接地配电网的单相接地故障尤其是高阻抗故障的继电保护措施也需要进一步完善,以保障配电系统安全、可靠的运行。

参考文献:

- [1] 平绍勋,石健. 10 kV 配网小电阻接地运行分析[J]. 高电压技术, 2002, 28(9): 49.
- [2] 高亚栋,杜斌. 中性点经小电阻接地配电网中弧光接地过电压的研究[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 345-348.
- [3] 于立涛. 35 kV 配电网中性点经小电阻接地的改造方案分析[J]. 继电器, 2004, 32(16): 57-59.
- [4] 毛玲. 小波变换在小电流接地系统单相接地故障选线方面的应用与研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [5] KIM C J, RUSSELL B D. High-impedance Fault Detection System Using an Adaptive Element Model [J]. IEE PROCEEDINGS-C. 1993, 140(2): 153-154.
- [6] WAITAT D C, XIA Yi-bin. A Novel Technique for High Impedance Fault Identification [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(3): 738-743.
- [7] DONALD J, JOHN R L. Ground Resistance Revisited [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(2): 949-953.
- [8] NAM S R, PARK J K, KANG Y C, et al. A Modeling Method of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Two Series Time-varying Resistances in EMTP [C]// Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver BC, 2001: 1 175-1 180.
- [9] EMANUEL A E. High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15 kV Distribution Feeders: Contributions to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990, 5(2): 676-686.
- [10] 束洪春,肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 58-59.
- [11] 陈奎,唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究[J]. 继电器, 2005, 33(16): 5-9.
- [12] 齐郑,杨以涵. 中心点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.