

小电流接地系统异名相 接地故障分析及跳闸策略研究

徐培栋,冯靖

(江苏省电力有限公司检修分公司无锡分部,江苏 无锡 214000)

摘要:城市低压电网一般采用小电流接地系统、电缆供电方式,单一馈供线路发生接地故障容易引起其他线路电缆击穿而多点接地。两条线路不同相别同时存在接地点时,由于中性点消弧线圈感性注入电流的影响,对两故障相合成故障电流产生不同助增与汲出作用,进一步可能导致保护装置无法正确动作。从小电流接地系统不同线路异名相两点接地故障差流故障电流入手,结合线性叠加原理,推导了故障电流偏差计算公式及产生原因,通过将过电流保护模块与接地距离保护模块配合使用,快速确定并跳开两条接地故障线路,防止进一步绝缘击穿引发的故障范围扩大。通过实际电网故障模型仿真证明了方法的正确性与可靠性,具有一定的理论与工程应用价值。

关键词:叠加原理;消弧线圈;过电流保护;接地距离保护

中图分类号:TM711 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)04-0014-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.04.004

Analysis of Ground Fault Occurred in Different Phases and Research on Tripping Strategy in Small Current Grounding System

Xu Peidong, Feng Jing

(Wuxi Segment of Overhaul Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd, Wuxi 214000, Jiangsu, China)

Abstract: There are a lot of problems of two-point ground fault occurred in different phases and different lines caused by single-phase ground fault in small current grounding systems. When two-point ground fault occurs in different phases in arc suppression coil grounding system, due to the influence of neutral point current injection, there is a deviation of different fault phases current in the two fault lines, and the protection can not trip accurately. Based on linear superposition principle, the deviation calculation formula and reasons are derived theoretically, and through using over-current protection module and grounding distance protection module, the two grounding fault lines are determined and tripped quickly, which prevents the expansion of fault scope caused by the further insulation breakdown. The simulation of actual grid fault model proves the correctness and reliability of the proposed method, which has certain theoretical and engineering application value.

Key words: superposition principle; arc suppression coil; over-current protection; grounding distance protection

0 引言

在中国3~66 kV城市配电网中大量采用电缆供电方式的小电流接地系统^[1-3]。小电流接地系统单相接地故障时,故障相电压降低,非故障相电压升高为线电压且相间电压保持不变,不影响系统正常供电。非故障相电压升高对电缆绝缘产生破坏,时常会造成新的接地点,形成不同线路异名相两点接地故障。此时,快速准确切除两条故障线路,防止绝缘击穿事件扩大化成为关键。

针对中性点非有效接地系统的故障选线,国内外学者开展了大量研究^[4-7]。选线方法集中针对故障的第一阶段,即未发生绝缘击穿导致异名相两点接地故障,长期保持在一点接地的情况。实际上,随着电缆运行年限增加,线缆的绝缘强度逐步下降。同时,单相接地故障时伴随的电弧现象,可能使非故障线路的最高暂态电压达到相电压的3~3.5倍左右,容易发生非故障相绝缘击穿或绝缘子闪络。因此,单相接地故障时常伴随有其他线路绝缘击穿,形成两点接地故障^[8]。文献[9]仅从供电可靠性角度出发,不考虑异名相故障电流差异,以过电流保护为

跳闸判据,通过改变动作时间,实现有选择性跳闸。文献[10]同样未考虑消弧线圈接地系统异名接地故障相电流的差异,并且仅从供电可靠性的角度考虑,提出了一种选择性切除故障线路的新方案。实际运行时,中性点不接地系统中,两点接地异名相故障电流始终相等,相当于线路异名相相间短路^[11];中性点经过消弧线圈接地系统中,由于中性点消弧线圈补偿电流的影响,且异名相电动势的相角差异,异名相故障电流始终不相等。

同一线路不同相别绝缘老化程度基本相同,单相故障引发其他线路异名相绝缘击穿时,该线路正常相绝缘基本也在破坏边缘。此时,应快速切除故障线路,如仅切一条继续维持单点接地状态,极有可能引发三相击穿或CT靠主变压器侧绝缘击穿,造成故障范围扩大。因此,从设备绝缘耐受的角度考虑,应快速切除两条故障线路。

考虑到这种差异,这里首先建立了消弧线圈接地电网不同线路异名相两点接地故障的数学分析模型,基于电路叠加原理,给出了不同故障线路故障相电流及电流差值的解析式。同时以过电流模块为启动元件,以接地距离模块为选相元件,实现异名相两点接地故障快速切除。

1 中性点非有效接地系统及故障分析

1.1 系统单一接地故障情况

系统中广泛应用的中性点非有效接地系统分为两类:中性点不接地系统、中性点经消弧线圈接地系统。如图1所示,当1G断开时,图示为中性点不接地系统,线路L1发生B相接地故障时,故障点故障电流为系统电容电流之和,图1中实心箭头表征此时的故障电流流向;当1G闭合时,图示为中性点经消弧线圈接地系统,图中空心箭头电流为消弧线圈提供的感性注入电流,该电流与系统电容电流共同构成了新的故障电流。

1.2 系统异名相异地两点接地故障情况

如图2所示,L1线B相单相接地运行过程中,非故障相A相与C相电压升高为线电压,实际运行过程中,存在A相与C相绝缘降低而击穿接地可能。以L2线C相绝缘降低而击穿情况分析,此时系统存在L1线B相与L2线C相两个接地点,因

此,中性点消弧线圈提供的感性注入电流会在两个接地点分流,并通过两条线路共同挂载母线构成故障电流通路(如图2空心箭头所示)。

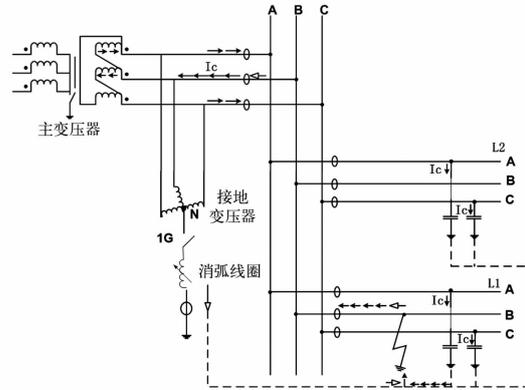


图1 中性点非有效接地系统及单相接地电流流向

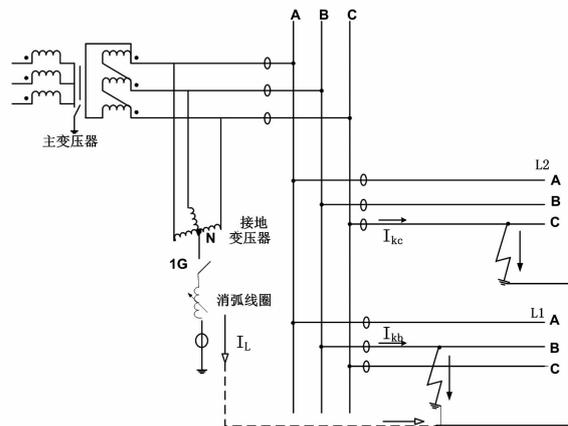


图2 不同线路异名相两点接地故障

以上分析可见,中性点不接地时,仅仅用过电流保护即可同时切除两条故障线路。中性点经消弧线圈接地时,由于中性点向共同的接地点注入了电感电流,这对于其中一条故障线为助增电流,对于另一条故障线为汲出电流,仅用过电流保护只能切除起着助增作用的那条故障线。因此,建立中性点消弧线圈接地系统异名相两点接地故障数学模型,求解并分析故障相电流及其差别,是进一步提出合理保护配置方案的重要基础。

2 异地非同名相两点接地故障量化分析数学模型(经消弧线圈接地系统)

2.1 异地非同名相两点接地量化分析数学模型

如图3所示,当L1线B相与L2线C相同时发

生接地故障时, L1 的零序计算电流为 $\frac{j_{KB}^{(1,1)}}{3}$, L2 的零序计算电流为 $\frac{j_{KC}^{(1,1)}}{3}$, 忽略过渡电阻压降的影响, 此时母线 B 相电压为 $(j_{KB}^{(1,1)} + 3K \frac{j_{KB}^{(1,1)}}{3}) Z_1 l_1$, 母线 C 相电压为 $(j_{KC}^{(1,1)} + 3K \frac{j_{KC}^{(1,1)}}{3}) Z_1 l_2$ 。

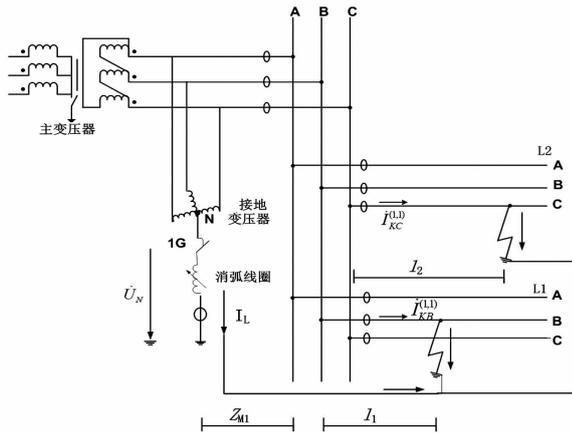


图3 双线不同相别同时单点接地故障

根据图3中不同电气量之间的关系, 可列以下4个求解方程式:

$$\begin{cases} j_{KB}^{(1,1)} + j_{KC}^{(1,1)} + I_L = 0 \\ \dot{U}_N + \dot{E}_B = j_{KB}^{(1,1)} Z_{M1} + j_{KB}^{(1,1)} (1+K) Z_1 l_1 \\ \dot{U}_N + \dot{E}_C = j_{KC}^{(1,1)} Z_{M1} + j_{KC}^{(1,1)} (1+K) Z_1 l_2 \\ \dot{U}_N = I_L X_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_N 为故障时系统中性点偏移电压; I_L 为消弧线圈提供的感性故障电流; Z_{M1} 为从母线向系统的等值阻抗; \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为系统通过主变压器的 B、C 相提供的稳定电动势。

2.2 线性电路叠加求解

将图3故障电路图等效为图4, 将式(1)求解方程转化为对两个单电源回路故障电流求解, 即以系

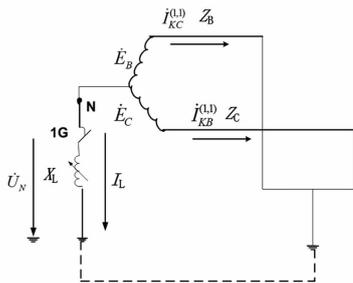


图4 故障系统等效图

统仅有 B 相或 C 相单一电源求解故障电流。

假定 $Z_B = Z_{M1} + (1+K) Z_1 l_1$, $Z_C = Z_{M1} + (1+K) Z_1 l_2$, 则方程求解如下:

$$\begin{cases} j_{KB}^{(1,1)} - j_{KC}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_B Z_C - \dot{E}_C Z_B}{Z_B Z_C + Z_B X_L + Z_C X_L} \\ j_{KB}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_B Z_C - \dot{E}_A X_L}{Z_B Z_C + Z_B X_L + Z_C X_L} \\ j_{KC}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_C Z_B - \dot{E}_A X_L}{Z_B Z_C + Z_B X_L + Z_C X_L} \end{cases} \quad (2)$$

进一步, 由于 $\dot{E}_C = \dot{E}_B e^{j240^\circ}$, 因此 B、C 相故障电流必然存在差异且可以量化为式(3):

$$j_{KB}^{(1,1)} - j_{KC}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_B (Z_C - Z_B e^{j240^\circ})}{Z_B Z_C + Z_B X_L + Z_C X_L} \quad (3)$$

Z_C 、 Z_B 表示线路阻抗, 一般其复数角度为 $70^\circ \sim 80^\circ$, 由于 Z_B 旋转了 240° , Z_C 与 $Z_B e^{j240^\circ}$ 必然存在相量角度差, 两者的矢量差也必然不为 0。可见, 两故障相故障电流必然存在差异, 表征为一者因助增而增大, 一者因汲出而减小。现有的 35 kV 及以下中压配电网均只装设过电流保护, 此时, 如果均以电流阈值为动作标准, 必然会导致增强作用的故障线更容易动作, 而减小作用的故障线极大可能会不动作。因此, 必须寻找到一种保护配置方案, 可以可靠切除故障电流被减小的线路。

3 故障双线跳闸方案

3.1 保护安装处电压电流关系

对于线路来说, 相当于发生了单相接地短路。接地点为零电位点, 保护安装处母线电压满足式(4):

$$\begin{cases} \dot{U}_{MB} = j_{KB}^{(1,1)} (1+K) Z_1 l_1 \\ \dot{U}_{MC} = j_{KC}^{(1,1)} (1+K) Z_1 l_2 \end{cases} \quad (4)$$

因此, 可以直接用线路保护中成熟的接地距离保护模块来选择故障线路。

3.2 保护配置方案

国家电网公司现有 35 kV 及以下供电线路, 基本配置国电南自的 PSL641 系列或南瑞继保的 RCS9611 系列保护, 这些保护均只有电流判别模块, 无法选出异名相接地时故障电流较小的故障线路。同时考虑到成本优化, 采用集中分析选择故障线路的方式比较合理。

为此,提出按母线单位配置选线装置的方式。母线电压直接通过屏顶小母线采集,各个间隔电流通过以太网从总控交换机采集,选线配置 CPU1 过电流模块与 CPU2 接地距离模块。CPU1 以原有间隔的过电流一段定值为判据,当某一间隔电流突破定值,跳开故障线路一,并启动 CPU2 接地距离模块。CPU2 以 CPU1 动作时刻所有间隔的采样数据为分析数据,通过接地距离选相元件,选出故障线路并出口跳开故障线路二。

4 仿真实例

江苏某地区电网累计发生多起不同线路异名相两点接地故障。以其中一起故障的实际故障录波数据来仿真分析。变电站保护配置及接线见图 1。

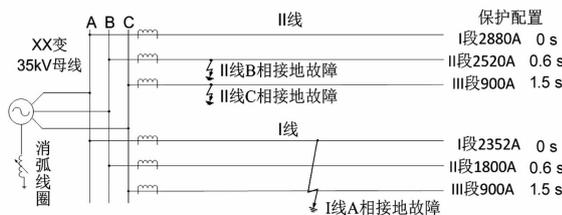


图5 变电站保护配置及接线

故障过程:初期 I 线 A 相接地故障,此时可运行 2 h。由于 B、C 相电压的升高, II 线绝缘水平下降,发生 C 相接地故障。此时发生不同线路异名相两点接地故障,第 1 次只有 I 线保护动作跳闸。此过程结束后,系统又转化为 II 线的 C 相单相接地状态,故障电流骤减。1 min 后, II 线的 B 相被击穿造成 II 线 BC 相间故障(两相接地故障)引发 II 线开关保护跳闸。

保护动作情况:

第 1 次故障,05:14 时,35 kV I、II 两线异名相故障。I 开关保护动作跳闸,但 II 开关保护仅启动未动作跳闸;

第 2 次故障,05:15 时,35 kV II 线相间故障,保护动作跳闸。

故障录波记录图见图 6 至图 8。

从图 6、图 7 分析,05:14 时, I 线与 II 线开关动作行为正确(前者保护动作跳开开关、后者未动作),具体计算分析如下:

I 线过电流 I 段设定动作值为 2352 A,动作时间 0 s。I 线故障波形中 A 相故障电流计算为

$40 \times 120 / 1.414 = 3400 \text{ A}$,大于保护过流 I 段设定动作值,符合保护动作逻辑。

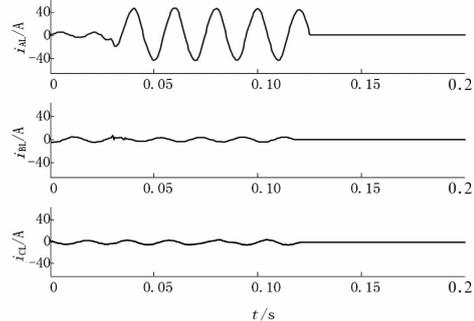


图6 I线的故障波形

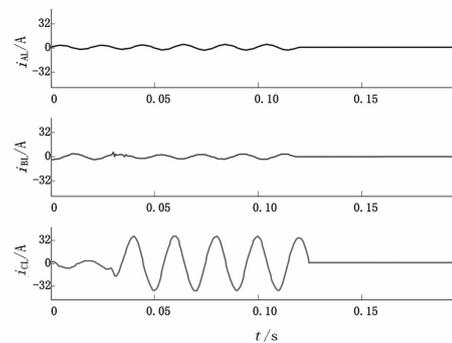


图7 II线的故障波形

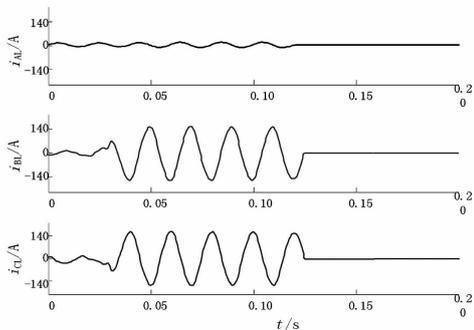


图8 II线的再次故障波形

II 线过电流 I 段设定动作值为 2880 A,动作时间 0 s。II 线故障波形中 C 相故障电流计算为 $32 \times 120 / 1.414 = 2710 \text{ A}$,小于保护过流 I 段设定动作值,符合保护不动作逻辑。

结合图 6、图 7 的波形中两条线路电流和同一时间的母线电压看: I 线 A 相接地,引起 35 kV 系统两非故障相电压升高,结果导致 II 线 C 相因电压升高而引起电缆绝缘水平降低,长时间运行后恶化为接地故障,此时 35 kV 系统存在 A 相与 C 相两个接地点,形成两点接地故障情况。两点接地故障会在 I 线与 II 线的 A 相与 C 相中产生较大的故障电流,但由于实际故障电流的差异造成 I 线保护能正确跳

闸、Ⅱ线保护启动而无法跳闸。

图8显示Ⅱ线C相由于达不到保护动作电流而长期接地,同样非故障相电压会升高为线电压,Ⅱ线B相由于长时间承受高电压而击穿接地。从图8故障电流可见,Ⅱ线B相击穿后在本线形成BC相间故障,同一条线路故障电流会极剧增加而动作切除故障,但第1次故障的情况则不同。

本次故障如果在故障的第1阶段就切除两条故障线路,就不会导致第2阶段的绝缘击穿事件。同时二次绝缘击穿仅仅发生在一次击穿事件后1 min,说明设备绝缘水平在一次击穿时已到击穿边缘,一次击穿时就应快速切除两条故障线路。幸好Ⅱ线的绝缘击穿点在CT内侧,第2次故障仅造成一次设备电缆成本的损失。实际由于二次绝缘击穿点随机,该电网亦发生过在开关触点的绝缘击穿(CT外侧),造成主变压器低后备保护动作,跳开35 kV低压侧母线,所有用户负荷均被甩掉,经济损失及社会影响巨大。

异名相两点接地时,正常均靠原有过电流保护装置就可动作切除。但本次由于消弧线圈的不均横补偿作用,出现线路Ⅱ线故障电流偏小,导致线路未被切除的情况。为此,采用所提出的保护配置方案,以大故障电流线路的电流判据为启动量,进一步采用接地距离保护模块选出小故障电流线路,在故障第1阶段准确切除两条故障线路,证明了所提方法的正确性及有效性。

5 结 语

消弧线圈接地系统不同线路异名相两点接地时,两条故障线路电流存在差异。研究表明,这种差异会导致两条线路不同时动作,由于单一故障的切除使系统转换为单相接地故障状态,而一次设备处于绝缘破坏边界,重复的单相接地故障过电压极易导致一次设备损坏及故障范围扩大。

建立了异名相接地故障一般数学模型,并结合电路叠加原理,求得两条故障线路故障电流及其差值解析式。从理论上说明了故障电流差异产生原因,并以此为依据,提出了针对异名相两点接地故障的保护配

置方案。实际电网故障录波分析证明了理论分析的正确性。如何设计出通用算法及装置,并在实际配电网中逐步推广应用是值得深入研究的问题。

参考文献

- [1] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.
- [2] 要焕年, 曹梅月. 电缆网络的中性点接地方式问题[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 84-89.
- [3] 赵冉, 谭伟璞, 杨以涵. 配电网中性点接地方式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(4): 22-26.
- [4] 束洪春, 彭仕欣, 李斌, 等. 利用测后模拟的谐振接地系统故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 59-64.
- [5] Nagy I. Elkalashy, Abdelsalam M. Elhaffar, Tamer A. Kawady, et al. Bayesian Selectivity Technique for Earth Fault Protection in Medium-voltage Networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2010, 25(4): 2234-2245.
- [6] 倪广魁, 鲍海, 张利, 等. 基于零序电流突变量的配电网单相故障带电定位判据[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 118-122.
- [7] Arzola-Castrojm, Baltazar-Lopez M E, Colin-Ocanpo J, et al. Dynamic Response of Antifriction Bearings via Minimum Shannon Entropy[C]. Proceedings of the SEM 11th International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Orlando, FL, USA: 388-396.
- [8] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [9] 王苏, 曾铁军, 郑茂然. 中性点非有效接地电力系统异名相两点接地短路时的选择性跳闸决策[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 195-199.
- [10] 钟岷秀, 刘天寿, 曾毅, 等. 小电流接地系统距离保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34(2): 10-12.
- [11] 江苏省电力公司. 电力系统继电保护原理与实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 116-119.

作者简介:

徐培栋(1986), 工学硕士、工程师, 主要从事电力系统继电保护、智能变电站方面的研究工作;

冯靖(1987), 工学硕士, 主要从事电力系统变电运维、可靠性方面的研究工作。

(收稿日期: 2018-05-03)