

单相接地引起中性点间隙击穿后主变高压侧三相电流特点 初步研究

魏莉¹, 郑涛², 彭建宁¹, 齐蓬勃¹, 杨拯¹

(1. 固原供电局, 宁夏 固原 756000; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 收集了线路发生单相接地故障导致间隙击穿后, 变压器高压侧三相电流波形图, 从实际数据中分析间隙击穿变压器高压侧三相电流的特点以及负荷侧变压器中性点直接接地且空载条件下故障时电流特点, 揭示该条件下各相电流大小、相位关系及波形特征, 并与理论分析比较, 归纳出间隙大小与产生此类波形的内在联系, 最后指出间隙击穿对继电保护的影响, 说明了消除方法。

关键词: 单相接地; 间隙击穿; 三相电流特点; 滞后相电流; 光纤纵差保护

Pilot study of three-phase current characteristic on transformer high-voltage side when the clearance is breakdown caused by single-phase grounding fault

WEI Li¹, ZHENG Tao², PENG Jian-ning¹, QI Peng-bo¹, YANG Zheng¹

(1. Guyuan Power Supply Bureau, Ningxia 756000, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper contains the three-phase current waveforms on the transformer high-voltage side when the transformer neutral-point spark gap is breakdown caused by single-phase earth fault of transmission line A, B or C. Based on the actual data, this paper analyses the character of three-phase current on the transformer high voltage side when the spark gap is breakdown, and the character of the fault current of load-side transformer whose neutral-point direct grounded when it's no-load. And on the above condition, the current size, the phase relation and the characteristic of waveforms have been opened out. Compared with the theoretical analysis, it concludes the immanent relation of the spark gap length and the waveforms. At last, it points out the effect to the relay protection caused by the spark gap breakdown and gives the method of how to avoid it.

Key words: single-phase grounding; gap breakdown; three-phase current characteristic; hysteretic phase current; optical fibre longitudinal differential protection

中图分类号: TM71; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0140-04

0 引言

220 kV 和 110 kV 系统运行着大量中性点不接地或经放电间隙接地的变压器。系统中线路发生接地故障导致变压器中性点间隙击穿被迫切除主变的事例和文章很多, 但都集中在讨论间隙距离的整定(高电压专业)、间隙零序电流保护延时的整定(继电保护专业)方面, 为使间隙距离合理增大到不易被误击穿, 或者间隙击穿后零流保护因采用了躲过本系统零序 II 段的长延时而轻易动作两方面^[1-4]。

本文收集了线路发生 A、B、C 相别的单相接地故障导致间隙击穿后, 变压器高压侧 A、B、C 三相电流波形特点, 指出该情况下各相电流大小、

相位关系, 并与负荷侧变压器中性点直接接地, 即只有零序电源、没有正序(负序)电源时, 系统故障情况下三相电流特点做了比较。以一种新的视角观察和记录这种特殊的电流现象, 希望引起继电保护方面专家、学者的共同关注和研究, 以期作为对系统实际运行资料和继电保护专业理论书籍相关内容的补充。

1 间隙击穿变压器高压侧三相电流特点

线路发生接地故障, 相当于在故障点附加一零序电源, 故障点的零序过电压会全部加至中性点非直接接地变压器的中性点^[5], 引起放电间隙击穿提供变压器高压侧的零序电流通路。

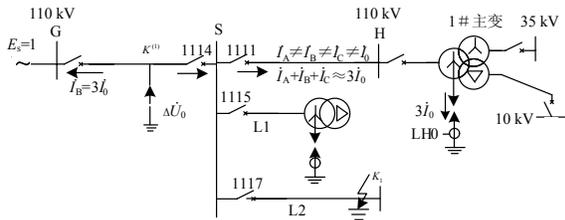


图1 系统接线及故障电流分布图

Fig.1 System connection and fault current distribution diagram

如图1所示的110 kV单侧电源供电系统,在 线路GS上K点分别发生A、B、C相别的单相接地故障,H站1#主变中性点间隙击穿,S变电站1114和1111处保护录得三相电流、电压波形分别如图2所示,(a)、(b)、(c)图分别为A相、B相、C相接地故障导致H站1#主变间隙击穿后高压侧波形图。注意观察就会发现这些波形与电源侧保护所得录波形不同。例如,线路发生A相故障时,电源侧保护通常表现为A相电压突变降低,A相电流突变增大,3U₀、3I₀由很微小的不平衡值突变增大为故障量。

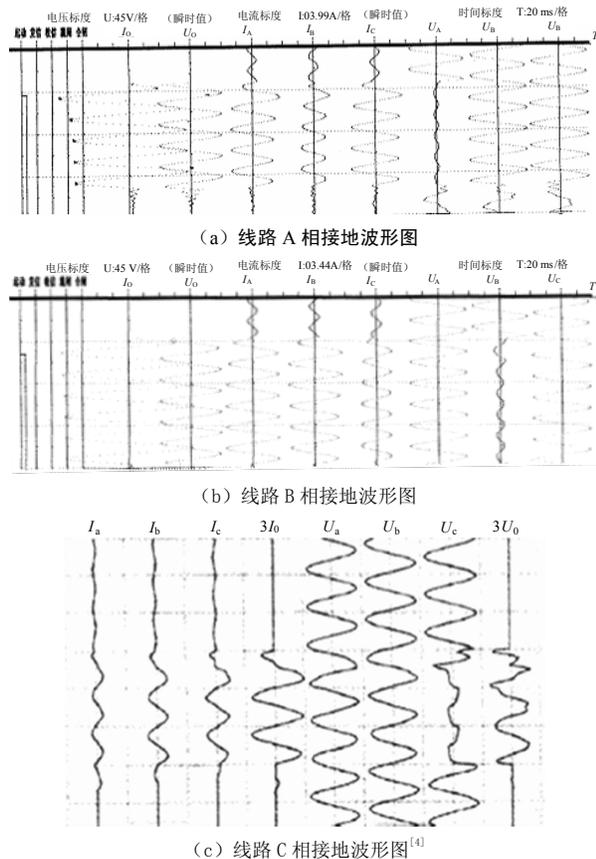


图2 中性点间隙击穿后变压器高压侧波形图

Fig.2 Wave of transformer high side after the neutral-point clearance is breakdown

但是分别观察图2(a)、(b)、(c)波形图发现:在H侧变压器正常负载情况下,线路GS上发生A相接地故障致使变压器放电间隙击穿后,滞后相B相电流幅值比较小,A、C两相电流幅值较大;线路发生B相接地故障致使变压器间隙击穿后,滞后相C相电流幅值比较小,A、B两相电流幅值较大;线路发生C相接地故障致使变压器间隙击穿后,滞后相A相电流幅值比较小,B、C两相电流幅值较大。

同时S变电站1114和1111处故障录波器还记录了具体的电流数值,审慎起见也分别列示于图3。图3(a)图为发生A相接地时1111处故障录波图,图3(b)为发生B相接地时1114处故障录波图。这些电流数值及波形特点与负荷侧变压器中性点直接接地且变压器又处于空载条件下,发生接地故障时的电气量特征 $I_A = I_B = I_C = I_0$ [6-7]又有所不同。

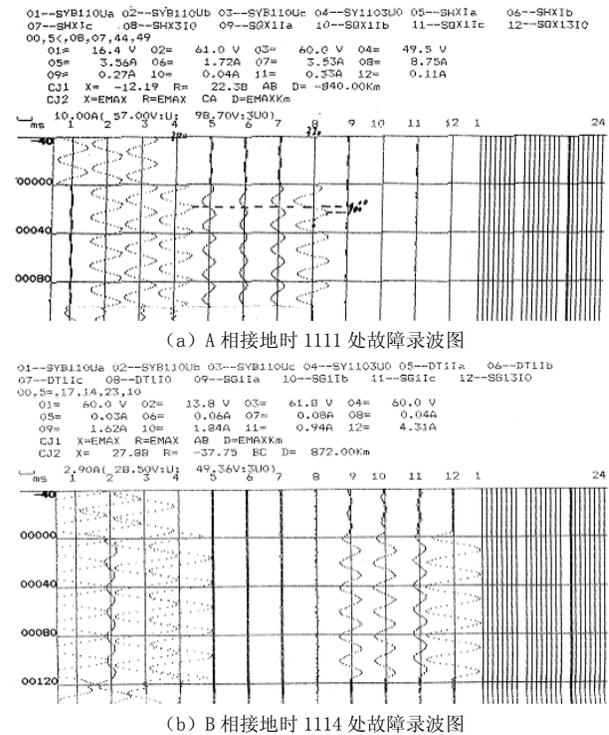


图3 单相接地时的故障录波图
Fig.3 Wave of single-phase ground fault

图1所示系统K点A相接地故障时,由S变电站1111处故障录波图图3(a)可见,A相电压有效值U_A降低到16.4V,3U₀升高到49.5V;A、B、C三相电流与零序电流有效值不相等,分别为I_A=3.56A,I_B=1.72A,I_C=3.53A,3I₀=8.75A。但仍符

合三相电流有效值之和等于 3 倍零序电流，即 $I_A + I_B + I_C = 8.81 \text{ A} \approx 3I_0 = 8.75 \text{ A}$ （1111CT 变比 200/5）。此时 B 相电流较小，不满足 $i_A = i_B = i_C = i_0$ ，但三相电流之和仍等于 3 倍零序电流，满足 $i_A + i_B + i_C = 3i_0$ 关系。

图 1 所示系统 K 点 B 相接地故障时，S 变电站 1114 处故障录波图 3 (b) 可知，B 相电压有效值 U_B 降低到 13.8 V， $3U_0$ 升高到 60 V；A、B、C 三相电流与零序电流有效值并不相等，分别为 $I_A = 1.62 \text{ A}, I_B = 1.84 \text{ A}, I_C = 0.94 \text{ A}, 3I_0 = 4.31 \text{ A}$ ，仍符合 $I_A + I_B + I_C = 4.4 \text{ A} \approx 3I_0 = 4.31 \text{ A}$ （1114CT 变比 400/5）。此时 C 相电流较小，不满足 $i_A = i_B = i_C = i_0$ ，但三相电流之和仍等于 3 倍零序电流，满足 $i_A + i_B + i_C = i_0$ 。

2 负荷侧变压器中性点直接接地且空载条件下故障时电流特点

由文献[6-7]知，在图 4 所示系统里，负荷侧（弱电源或无电源侧）有中性点直接接地要求的变压器，如 330 kV 自耦变及某些 220 kV、110 kV 因安全要求中性点必须直接接地运行的变压器，当线路发生接地故障时，不论故障相别如何，变压器同侧都会流过三相大小相等、方向相同的零序电流，即 $i_A = i_B = i_C = i_0$ ，故障点两侧电流分布特点如图 4 所示。因为在线路故障时，该侧没有系统大电源的支持，只有接地中性点引起的零序源，没有正、负序电源。故而本侧只有零序网络，不存在正、负序网络（正、负序网络处于开路状态，对应正、负序阻抗无穷大），故负荷侧三相及零序回路只能流通零序电流，故只能有 $i_A = i_B = i_C = i_0$ 。

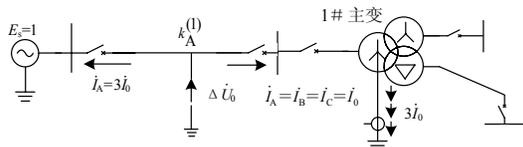


图 4 弱电侧直接接地，线路单相故障电流分布图

Fig.4 Distribution diagram of line single-phase fault current when weak-power source side solidly grounding

3 间隙击穿对继电保护的影响及消除

影响：中性点放电间隙误击穿会造成变压器误被切除，虽然不算误动作，但也扩大了停电范围影响正常供电，同时可能造成变压器送电端线路保护误动作，应积极寻求解决办法予以消除。

消除措施：①增强线路保护配置，110 kV 线路加装全线速动保护，使线路故障快速切除，不致引

起变压器被误切；②合理计算、选择间隙设备，并正确整定间隙距离，使间隙不致被频繁误击穿；③适当延长间隙零序电流的动作延时，该延时独立整定，不与间隙零压保护共用时间元件，即必须保留住带 0.3~0.5 s 短延时的间隙零压保护。④对于处在图 1 所示系统 S 变电站 1111、1115 位置，可能因变压器中性点间隙击穿引起误动的保护，投入零序电流 I、II 段方向控制字，使方向指向线路，即可避免这种情况下的保护误动作。

220 kV 系统内母线保护双重配置，线路保护“双主双后”配置，接地故障由快速保护以毫秒级固有延时切除，来不及引起间隙击穿或者即便击穿，也来不及引起带延时的间隙零流保护动作，在很大程度上避免了变压器被误切除。

110 kV 线路保护多按阶段式原则配置，在 II 段范围内发生的接地故障将延时切除，通常该延时 $t_{II} \geq 0.3 \sim 0.5 \text{ s}$ 。类似于图 1 所示系统，若 S 变电站 110 kV 母线有多条配出线，所带变压器的中性点都经放电间隙接地，如果间隙距离普遍较小，则都可能在线路故障时被击穿产生放电电流，那么该母线配出的多条线路保护都可能动作切除多条线路（只要达到零序 I 段定值）^[4]。

2004 年 3 月 19 日和 4 月 27 日，分别在图 1 所示系统中 K 点故障时，线路 GS 两侧高频保护动作。H 变电站间隙击穿为 S 侧高频弱馈保护提供了零序电流。1# 变间隙虽然击穿但其零流保护来不及动作故障就已被切除，变压器得以保留继续运行。

2007 年 7 月 26 日，S 站配出线 L2 上 K1 点因雷击发生 BC 两相接地故障，1117 处零流 II 段以 0.3 s 跳闸切除，并使得 H 变电站另一台带 0.3 s 延时的变压器间隙零流保护动作跳开变压器，另一台带 0.5 s 延时的变压器间隙零流保护未动作。能够说明在 110 kV 系统所有线路加装全线速动保护的优越性，并可因此避免诸如此类的许多问题。

4 结语

(1) 无电源侧变压器中性点直接接地且变压器又处于空载条件下，系统内线路发生接地故障时，变压器高压侧三相电流量符合 $i_A = i_B = i_C = i_0$ 且 $i_A + i_B + i_C = 3i_0$ ，理论上三相电流相位完全相同。

(2) 无电源侧变压器正常负载情况下，系统内线路上发生接地故障致使变压器间隙击穿时，若 A 相故障则滞后相 B 相电流较小，A、C 两相电流数值较大且数值基本相等；B 相故障则滞后相 C 相电流较小，A、B 两相电流较大且数值基本相等；C 相故障滞后相 A 相电流较小，B、C 两相电流较大

且数值基本相等。三相电流不符合 $i_A = i_B = i_C = i_0$,但是满足 $i_A + i_B + i_C \approx 3i_0$ 关系,三相电流相位也不完全相同。为什么会产生这样的现象,是值得关注和探究的问题。而且随着间隙距离的调整,此类误击穿现象逐渐减少,取得此类波形的几率也将减小,因此这些波形及数据很值得保存、研究。

参考文献

- [1] 张文峰. 110 kV 分级绝缘变压器中性点过电压保护探讨[J]. 广东电力, 2000, 13 (1) : 5-7.
ZHANG Wen-feng. A Research of Neutral-point Over-voltage Protecting for 110 kV Stepped Insulator Transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2000, 13 (1) : 5-7.
- [2] 李谦, 彭向阳. 广东省变压器 110 kV 及 220 kV 中性点保护故障分析[J]. 广东电力, 2000, 13 (3) : 42-45.
LI Qian, PENG Xiang-yang. A Failure Analysis of Neutral-point Protecting of 110 kV and 220 kV Transformer in Guangdong Province[J]. Guangdong Electric Power, 2000, 13 (3) : 42-45.
- [3] 彭向阳, 钟定珠, 等. 变压器中性点间隙保护问题分析与建议[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1 (2) : 39-43.
PENG Xiang-yang, ZHONG Ding-zhu, et al. An Analysis and Research of Transformer Neutral-point Discharge Spark Gap Protecting[J]. Southland Network Technique Research, 2005, 1(2):39-43.
- [4] 石健, 戴和彩, 王珩. 线路故障引起的主变中性点放电间隙击穿[J]. 农村电气化, 2006, 26(3).
SHI Jian, DAI He-cai, WANG Heng. The Disruption of Transformer Neutral-point Lighting Gap Aisen by Transmission Line Fault[J]. Country Electrization, 2006, 26(3).
- [5] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
XIE Guang-run. The Over-voltage of Electric Power System[M]. Beijing: Water Conservancy and Electricity Press, 1985.
- [6] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(增订版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principles of Protective Relaying of Electric Power System, Revised and Enlarged Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [7] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第 3 版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHU Sheng-shi. Principles and Techniques of Protective Relaying of High-voltage Power Electric Network, The Third Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
-
- 收稿日期: 2009-05-21; 修回日期: 2009-09-09
- 作者简介:
魏莉 (1971-), 女, 本科, 工程师, 长期从事电力系统继电保护整定计算及动作分析; E-mail: gygdweili@tom.com
郑涛 (1975-), 男, 博士, 副教授, 从事继电保护教学和科研工作;
彭建宁 (1967-), 男, 硕士, 高工, 从事高压试验、系统分析管理等工作。
-
- (上接第 139 页 continued from page 139)
- [2] 杨晓东, 房大中, 刘长胜, 等. 阻尼联络线低频振荡的 SVC 自适应模糊控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (1): 55-59.
YANG Xiao-dong, FANG Da-zhong, LIU Chang-sheng, et al. An Adaptive SVC Fuzzy Controller for Damping Tie-link Low Frequency Oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (1): 55-59(in Chinese).
- [3] 唐忠健, 陈学允. SVC 与发电机励磁的非线性状态 PI 协控制[J]. 电网技术, 2001, 23 (2): 30-34.
TANG Zhong-jian, CHEN Xue-yun. Nonlinear State PI Control for Var Compensator (SVC) Cooperating with Excitation System of Generator[J]. Power System Technology, 2001, 23 (2): 30-34(in Chinese).
- [4] 蔡超豪. 无功补偿器的非线性 H^∞ 控制[J]. 电网技术, 2002, 26 (6) : 36-38.
CAI Chao-hao. Non-linear H^∞ Control of Static Reactive Power Compensation[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 36-38(in Chinese).
- [5] 邱宇, 陈学允. 用于静止无功补偿器的非线性 PID 控制器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (11) : 41-44.
QIU Yu, CHEN Xue-yun. The New Nonlinear PID Controller for SVC[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (11) : 41-44(in Chinese).
- [6] Mathur R M, Varma R K. Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [7] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York(USA): McGraw-Hill Inc, 1994.
-
- 收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-07-14
- 作者简介:
卢志良 (1979-), 男, 本科, 工程师, 主要从事高压直流输电控制保护、电能质量分析、静止型无功补偿装置等研究; E-mail: Luzl@ehv.csg.cn
张尧 (1948-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划。