

单相接地故障零模暂态特征的仿真分析

张新慧^{1,2}, 薛永端³, 潘贞存¹, 徐丙垠², 魏佩瑜²

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 3. 济南科汇自动化系统工程有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 提出了一种基于线路分布参数的小电流接地系统的高精度故障模型, 用于分析单相接地故障产生的暂态信号特征及进一步完善基于暂态信息的小电流接地故障选线判据。该模型采用一帶有 6 回 10 kV 架空出线的 110 kV 变电所, 利用电磁暂态程序 EMTP 对不同的故障情况进行了全面的仿真和分析。通过分析仿真数据, 得到了如下主要故障暂态特征: 特征频带(SFB)内, 所有健全线路阻抗和故障线路检测的背后阻抗均呈容性; 暂态零模电流频率较为集中, 主谐振频率位于 SFB 内; 特征频带内, 故障线路零模电流幅值比健全线路大, 且极性相反。对由于中性点装设消弧线圈、过渡电阻不同、故障点位置不同以及故障初始角不同对故障暂态的幅值特征和相位特征产生的影响也一并做了讨论。

关键词: 小电流接地系统; 单相接地故障; EMTP 仿真; 零模暂态特征

中图分类号: TM 771

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0039-05

0 引言

单相接地故障是小电流接地系统中最常见的故障, 由于故障电流很小, 因此其故障检测问题一直是电力系统亟待解决的难题之一。国内外虽然已研究出了众多故障检测技术, 但实际应用效果并不理想。总而言之, 利用故障后的稳态分量进行故障检测^[1-2], 存在的主要问题是接地稳态分量太小, 常导致选线装置不能正确动作, 而且该方法要求短路时必须有一个持续的稳态短路过程, 因此在发生间歇性电弧接地时便不再适用^[3-4]; 而在中性点经消弧线圈接地

电网中, 由于消弧线圈的电感电流补偿故障产生的电容电流, 使得故障线路中的故障电流甚至小于非故障线路, 因而传统的基于故障稳态信息的检测方法也不适用于中性点经消弧线圈接地系统^[4-5]。而利用故障后的暂态分量进行故障检测, 与利用稳态信号相比有很大的优越性: 一是暂态信号幅值远远大于稳态信号, 是稳态电容电流信号的数倍到十几倍, 故障检测灵敏度高; 二是不受消弧线圈的影响; 三是不受故障点电弧不稳定的影响, 实际上故障点的间歇性击穿, 会不断地产生暂态零序电流信号, 有利于检测故障。它存在的主要问题是暂态过程非常迅速, 暂态信号难以捕捉, 且受外界干扰影响大, 使得实际应用中遇到很多困难。但随着现代微电子技

收稿日期: 2007-05-14; 修回日期: 2007-08-03

术的发展,可以很容易地记录并用复杂的数字算法处理接地故障产生的暂态信号,因此暂态分量法具有强大的生命力^[6-7]。

利用小电流接地系统单相接地故障过程中暂态电压、电流信号的变化特征实现接地选线,在近几年得到了广泛的关注和深入的研究,已经提出了多种方案和判据,有的还做出了实验样机投入到系统中试运行,取得了一些运行数据和经验。但总体而言,这种技术还不是十分完善,仍有许多问题有待进一步的深入研究^[8-9]。

提出了一种基于线路分布参数的小电流接地系统的高精度故障模型,用于分析单相接地故障产生的暂态信号特征及进一步完善基于暂态信息的小电流接地故障选线判据。该模型采用一带有 6 回 10 kV 架空线路的 110 kV 变电所,利用电磁暂态程序^[10]EMTP 及其改进后的 ATP^[11],对中性点不接地和经消弧线圈接地系统的单相接地故障的不同故障情况进行了全面的仿真计算。通过对仿真数据的深入分析,导出了暂态零模电压、电流信号的时域和频域特征,以及零模网络的幅频特性和相频特性,讨论了消弧线圈、过渡电阻、故障点位置和故障初始角等因素对故障特征的影响。为进一步发展和完善基于暂态电气量特征的接地选线原理和判据,打下了良好的基础。

1 仿真模型及参数

1.1 系统仿真模型

系统仿真模型如图 1 所示。该系统为有 6 条架空出线的 110 kV 变电站,变压器为 Y_0/Y 形接线,低压侧中性点通过开关 S 和消弧线圈相连。S 打开时为不接地系统,闭合时为经消弧线圈接地系统。

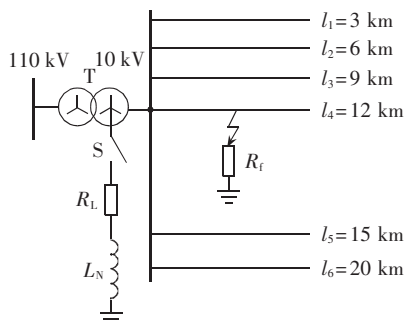


图 1 中性点不接地和经消弧线圈接地系统仿真模型

Fig.1 Simulation model of non-solidly grounded system with Petersen coil

1.2 模型参数确定

a. 线路参数。仿真模型采用文献^[12]提供的架空线路标准参数,即:线路正序阻抗为 $Z_1=(0.17+j0.38)\Omega/\text{km}$,零序阻抗为 $Z_0=(0.23+j1.72)\Omega/\text{km}$,正序对地导纳为 $Y_1=(j3.045)\mu\text{S}/\text{km}$,零序对地导纳为 $Y_0=(j1.884)\mu\text{S}/\text{km}$ 。各线路长度如图 1 中所示。

b. 变压器参数。原边电压 110 kV,副边电压

10.5 kV;高压侧的单相对中性点线圈电阻 0.40Ω ,感抗 12.2Ω ;低压侧的单相线圈电阻 0.006Ω ,感抗 0.183Ω ;励磁电流 0.672A ,励磁磁通 202.2Wb ,磁路电阻 $400\text{k}\Omega$ 。变压器的额定容量为 $40\,000\text{kV}\cdot\text{A}$,空载损耗为 35.63kW 。

c. 负荷参数。实际系统负荷千差万别,同一线路各相之间负荷也不相同,为简便起见,这里各条线路等效负荷阻抗统一采用 $Z_L=(400+j20)\Omega$ 。

d. 消弧线圈参数。在仿真消弧线圈接地系统时,系统设为过补偿,补偿度为 8% 。根据线路参数及长度可以计算出消弧线圈电感为 $L_N=8.02\text{H}$ 。其串联电阻的阻值按消弧线圈感抗值的 10% 考虑,即 $R_L=252\Omega$ 。

1.3 仿真条件

a. 计算步长。为提高暂态分量仿真的准确程度,要求仿真软件的计算步长越小越好。这里采用 $1\mu\text{s}$ 计算步长。

b. 采样频率。这里采样频率取为 100kHz 。

c. 故障初相角。故障初相角分别取为 90° 、 45° 、 15° 、 0° 4 种情况进行仿真。

d. 接地点过渡电阻。接地点过渡电阻分别取为 5Ω 、 50Ω 、 500Ω 、 $5\text{k}\Omega$ 、 $50\text{k}\Omega$ 5 种情况进行仿真。

e. 故障线路及位置。设故障点分别位于每条线路的首端(距母线距离为本线路长度 10%)、中间(距母线距离为本线路长度 50%)和末端(距母线距离为本线路长度 90%)以及母线等不同位置。

1.4 坐标变换

对于三相系统,由于各相线路间存在电磁耦合即互感和分布电容影响,直接在相域分析单相接地故障的暂态过程十分困难。这里通过坐标变换,将相域系统变换为没有电磁耦合的模域系统。采用卡伦鲍厄(Karrenbauer)变换,将三相系统变换为 0 模、1 模、2 模系统^[13-14],主要对零模系统进行分析。

2 利用仿真数据的零模暂态特征分析

2.1 零模网络相频、幅频及暂态信号的特性^[6]

2.1.1 中性点不接地系统^[14]

设中性点不接地仿真系统中线路 4 中段发生接地故障,过渡电阻为 5Ω ,故障初相角为 45° 。图 2 显示了其零模电压 u_0 和各出线零模电流 i_0 的原始波形;图 3 放大显示了其中的暂态部分(实线为健全线路,虚线为故障线路;下同);图 4 显示了在故障后一个工频周期内,各出线零模电流的幅频特性,及零模电压和各出线零模电流相位差即阻抗的相频特性;图 5 显示了零模电压、电流信号经过滤波后的特征分量(u_c 、 i_c 为特征电压和特征电流,下同)。

通过综合分析仿真数据及波形可以得到如下结论:

a. 不接地系统中故障线路的工频零模电流比健全线路幅值大且极性相反;

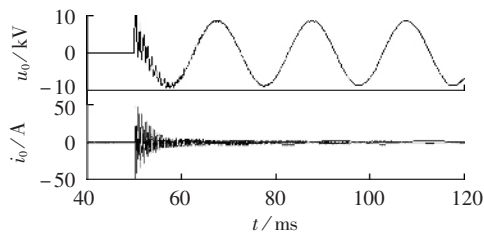


图 2 不接地系统故障时零模电压和各条出线零模电流

Fig.2 Zero modal voltage and current of faulty non-solidly grounded system

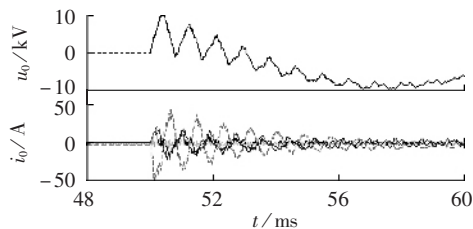


图 3 零模电压和各出线零模电流的暂态放大图

Fig.3 Amplified transient zero modal voltage and current

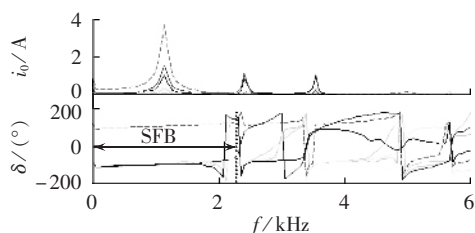


图 4 各出线零模电流的幅频特性和阻抗的相频特性

Fig.4 Amplitude-frequency curves of zero modal currents and phase-frequency curves of impedance

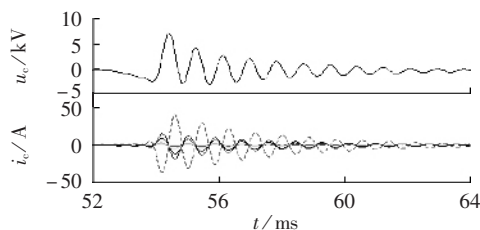


图 5 零模电压和各出线零模电流的特征分量

Fig.5 Characteristic components of zero modal voltage and current

b. 各条出线零模电流的暂态最大值均远远大于其稳态值;

c. 暂态过程存在多个谐振过程,过渡电阻较小时最低频率的谐振(主谐振)幅值最大;

d. 特征频带 SFB(Special Frequency Band)内,所有健全线路的阻抗和故障线路检测的背后阻抗均呈容性;

e. 主谐振频率位于 SFB 内,即特征分量包含暂态零模电流主要能量;

f. SFB 内,暂态零模电流能量主要集中在主谐振频率附近,即暂态零模电流频率较为集中;

g. SFB 内,故障线路检测阻抗相角约为 80° ,健全线路检测阻抗相角约为 -100° ,说明暂态零模

电流中无功分量占主要成分,无功功率因数(无功功率与视在功率之比)约为 0.985;

h. SFB 内,故障线路零模电流幅值比健全线路大,且极性相反;

i. SFB 外,故障线路零模电流可能比健全线路小,且极性关系不确定。

2.1.2 中性点经消弧线圈接地系统^[14]

在仿真系统中加入补偿度为 8% 的消弧线圈,其他故障条件与上节不接地系统完全相同。

类似于图 2~5,图 6~9 也显示了其各种暂态信号及其分析结果,但由于消弧线圈对零模电压的影响较小,故只显示了各出线零模电流信号,从中可得到如下结论:

a. 经消弧线圈接地系统中故障线路稳态零模电流可能比健全线路小,且极性相同;

b. 消弧线圈对暂态过程没有产生决定性的影响;

c. 与不接地系统相比,SFB 必须重新确定,其低端截止频率约为 2~3 次谐波,即 100~150 Hz;其他特性与不接地系统相同。

2.1.3 零模网络相频特性和暂态信号特征的综合分析

通过对不同故障条件下故障暂态零模电压、电

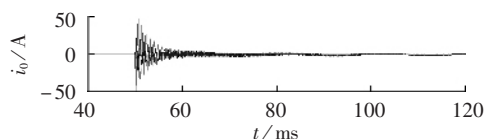


图 6 经消弧线圈接地系统故障时各出线零模电流

Fig.6 Zero modal current of faulty non-solidly grounded system with Petersen coil

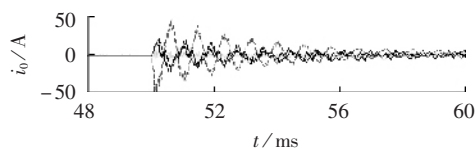


图 7 各出线零模电流的暂态放大图

Fig.7 Amplified transient zero modal current

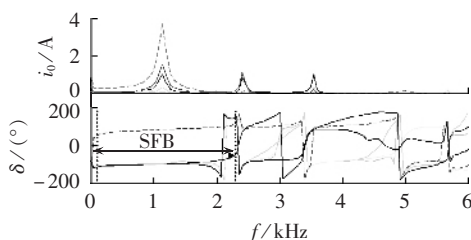


图 8 各出线零模电流的幅频特性和阻抗的相频特性

Fig.8 Amplitude-frequency curves of zero modal currents and phase-frequency curves of impedance

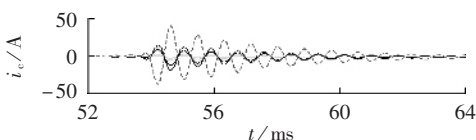


图 9 各出线零模电流的特征分量

Fig.9 Characteristic components of zero modal current

流数据的详细分析,可得出如下结论:

a. 虽然暂态零模电压和电流的幅值、主谐振频率等随故障条件有所变化,但上述零模网络相频、幅频特征和暂态信号的大部分特征都是普遍成立的,即不因为故障条件的改变而发生变化;

b. 暂态过程存在多个谐振过程,其频率分布随故障条件的不同而变化,但只有主谐振频率位于特征频带内,其他谐振频率均位于特征频带外;

c. 故障瞬间,故障线路的零模电压、电流呈反极性,而健全线路呈同极性,该关系持续到暂态零模电流第一次过零点结束,持续时间长短主要取决于主谐振频率和故障初相角。

2.2 影响暂态零模特征电流幅值的因素

根据理论分析,暂态零模电流幅值与故障初相角、过渡电阻、主谐振频率、线路和变压器阻抗、负荷等多项因素有关。由于不同故障条件下,故障暂态过程的持续时间并不相同,所以真有效值并不具有可比性。因此,以下采用暂态零模特征电流的最大值进行电流幅值比较。

2.2.1 与故障初相角的关系

同等条件下,故障初相角越接近 90° 或 270° ,故障暂态越明显,暂态零模特征电流幅值越大。反之,故障初相角越接近 0° 或 180° ,暂态零模特征电流越小。表 1 显示了不同故障条件下故障线路暂态零模特征电流幅值与故障初相角的关系,表中故障点位于线路中间,过渡电阻为 $5\ \Omega$,中性点为经消弧线圈接地方式; Φ 为故障初相角, i_{cmax} 为零模特征电流最大值,表 2 同。

由表 1 可见,当故障初相角为 0° 或 180° 时,仍有一定暂态过程。图 10 和图 11 显示了故障位于线路 4 中间、初相角为 0° 时故障零模电压、电流信号及其特征分量。

表 1 故障线路暂态零模特征电流幅值与故障初相角关系

Tab.1 Relationship between transient zero modal current amplitude of faulty line and fault initial phase

$\Phi/(^\circ)$	i_{cmax}/A	
	线路 1	线路 4
0	3.6	3.7
15	21.4	16.4
45	53.7	39.6
90	73.6	53.5

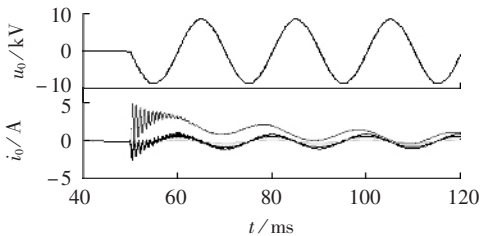


图 10 相电压过零故障时零模电压、电流信号
Fig.10 Zero modal voltage and current when fault occurs at phase-voltage-crossing-zero point

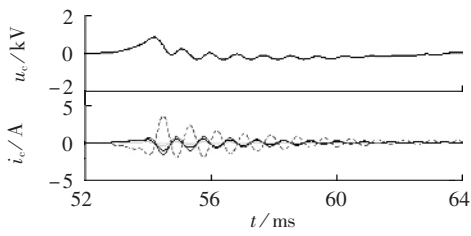


图 11 图 10 所示零模电压、电流信号的特征分量
Fig.11 Characteristic components of zero modal voltage and current in Fig.10

2.2.2 与过渡电阻关系

同等条件下,过渡电阻越大,暂态过程越不明显,暂态电流越小。表 2 列出了不同故障条件下故障线路暂态零模特征电流幅值与过渡电阻的关系,表中故障初相角为 45° ,故障点位于线路中间,中性点为经消弧线圈接地方式; R_t 为故障点过渡电阻。

表 2 故障线路暂态零模特征电流幅值与过渡电阻关系

Tab.2 Relationship between transient zero modal current amplitude of faulty line and transition resistance

R_t/Ω	i_{cmax}/A	
	线路 1	线路 4
5	53.7	41.0
50	34.9	29.1
500	8.0	7.8
5 000	0.8	0.8
50 000	0.1	0.1

2.2.3 与暂态主谐振频率关系

暂态主谐振频率和暂态信号幅值都与过渡电阻、系统结构和参数、故障位置等有关,二者是相关的。同等条件下,暂态主谐振频率越高,暂态过程越明显,暂态电流越大。当故障初相角接近 90° 或 270° 、过渡电阻接近 0 时,暂态零模电流最大值与未补偿的工频零模电流之比近似等于主谐振频率与工频之比。

可见,一般条件下,消弧线圈对健全线路零模特征电流的影响很小,对故障线路稍大,但均可忽略不计,即均可认为故障线路暂态零模特征电流幅值等于所有健全线路之和。

3 结论

建立了基于线路分布参数的小电流接地系统的高精度故障模型,利用电磁暂态程序 EMTP 及其改进后的 ATP 针对不同故障条件下中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统零模网络中,各线路检测阻抗的相频特性、幅频特性以及零模电压、电流信号的暂态特征进行了较为全面的仿真分析。通过分析得到了如下主要结论:SFB 内,所有健全线路阻抗和故障线路检测的背后阻抗均呈容性;暂态零模电流频率较为集中;故障线路零模电流幅值比健全线路大,且极性相反;SFB 外,故障线路零模电流可能比健全线路小,且极性关系不确定。同时,分析了故障

暂态零模特征电流幅值与故障位置、过渡电阻、故障初相角等参数的关系。

参考文献:

- [1] 肖白,束洪春,高峰.小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J].继电器,2001,29(4):16-20.
XIAO Bai,SHU Hong - chun,GAO Feng. Faulty line selection methods summarization of single - phase earthed fault in non - solidly grounded systems[J]. Relay,2001,29(4):16-20.
- [2] 马柯,张保会.中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J].继电器,2003,31(5):65-70.
MA Ke,ZHANG Bao-hui. Develop and view on faulty line selection principle in non - solidly grounded systems [J]. Relay, 2003, 31(5):65-70.
- [3] 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):58-61.
SHU Hong-chun,XIAO Bai. Transient analysis method of single - phase arcing earthed faulty line selection in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(21):58-61.
- [4] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [5] 王德江,陈永衡,马文阁.中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障暂态电流分析[J].继电器,2002,30(11):16-18.
WANG De - jiang,CHEN Yong - heng,MA Wen - ge. Transient current analysis of single-phase earthed fault in Peterson coiled system[J]. Relay,2002,30(11):16-18.
- [6] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等.小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):51-56.
XUE Yong-duan,XU Bing-yin,FENG Zu-ren,et al. Study on transient direction protection principle of single-phase earthed

- fault[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(7):51-56.
- [7] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠.中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J].西安交通大学学报,2004,38(2):195-199.
XUE Yong-duan,FENG Zu-ren,XU Bing-yin. Transient characteristics analysis of single - phase earthed fault in non - solidly grounded systems [J]. Xi'an Jiaotong University Journal, 2004,38(2):195-199.
- [8] 薛永端.基于暂态特征信息的配电网单相接地故障检测研究[D].西安:西安交通大学,2003.
XUE Yong - duan. Earth fault detection based on characteristic transient information in non-solidly earthed network[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University,2003.
- [9] XUE Yong - duan,XU Bing - yin,CHEN Yu,et al. Earth fault protection using transient signals in non - solid earthed network [C]//IEEE / CSEE International Conference on Power System Technology Proceedings,2002. Kunming, China: [s.n.],2002: 1763-1767.
- [10] DOMMEL H W. Electromagnetic transients program reference manual (EMTP Theory Book) [M]. Portland: Bonneville Power Administration,1986.
- [11] PRIKLER L. Main characteristics of plotting programs for ATP [J]. EEUG News,2000,6(3-4):28-33.
- [12] 李福寿.中性点非有效接地电网的运行[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [13] 吴维韩,张芳榴.电力系统过电压数值计算[M].北京:科学出版社,1989.
- [14] 刘万顺.电力系统故障分析[M].北京:水利电力出版社,1992.
(责任编辑:李玲)

作者简介:

张新慧(1971-),女,山东莱阳人,副教授,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:zhxh626@126.com)。

Simulative analysis of zero modal transient characteristics for single-phase grounding fault

ZHANG Xin-hui^{1,2},XUE Yong-duan³,PAN Zhen-cun¹,XU Bing-yin²,WEI Pei-yu²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

(2. School of Electrical & Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049,

China;3. Ji'nan Kehui Automation System Engineering Co.,Ltd., Ji'nan 250100, China)

Abstract: A more accurate fault model based on the distributed parameters of non-solidly grounded system is presented to analyze the transient characteristics of single-phase grounding fault and to improve the faulty feeder selection criterion based on transient signals. A 110 kV-substation with six 10 kV overhead lines is modeled, based on which the transient characteristics of different faults are simulated with Electro - Magnetic Transient Program. The analysis of simulative results shows the following characteristics of transient signals: in the SFB (Special Frequency Band), the impedance of all healthy lines and the detected backside impedance of faulty line are all capacitive; the frequencies of transient zero modal currents are concentrated and the main resonant frequency is within the SFB; in the SFB, the magnitude of zero modal current of faulty line is larger than that of healthy line while the polarity is opposite. The influence of Petersen coil, transition resistance, location of fault and initial fault phase angle on the transient characteristics of fault current amplitude and phase are also discussed.

Key words: non - solidly grounded system; single - phase grounding fault; EMTP simulation; zero modal transient characteristics