



文章编号:1671-251X(2018)06-0057-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017070011

矿井供电系统单相接地故障零模特征仿真研究

罗超^{1,2}, 耿蒲龙^{1,2}, 曲兵妮^{1,2}, 宋建成^{1,2}, 刘聚财^{1,2}, 都志立³, 原磊明⁴

(1. 太原理工大学 矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司, 山西 晋城 048006;

4. 山西凌志达煤业有限公司, 山西 长治 046606)

摘要:针对现有基于单相接地故障特征量的选线方法实际保护效果不理想的问题,以某煤矿实际供电系统为研究对象,采用 RTDS/RSCAD 实时数字仿真系统搭建了矿井供电系统仿真模型,分析了中性点不接地和经消弧线圈接地 2 种运行方式下线路零模电流、零模电压的故障特征规律,以及不同故障位置、故障初相角、接地电阻对矿井供电系统单相接地故障下线路零模电流时域特征的影响。研究表明:① 中性点运行方式对非故障线路零模电流和母线零模电压的影响可忽略不计,对故障线路零模电流的影响较大;2 种运行方式下故障线路与非故障线路零模电流首半波极性相反。② 故障位置距离母线越远,线路暂态零模电流冲击值越小;线路稳态零模电流受故障位置影响较小。③ 故障初相角越大,线路暂态零模电流冲击值越大,冲击值增长速度越小,故障线路暂态零模电流达到稳态的时间越短;故障初相角不影响线路稳态零模电流幅值,只影响其初相角。④ 接地电阻越大,线路暂态零模电流冲击值及其衰减速度、稳态零模电流幅值越小。

关键词:矿井供电系统;单相接地故障;故障选线;中性点不接地;中性点经消弧线圈接地;相模变换;零模特征;时域分析

中图分类号:TD60 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180515.0913.001.html>

Simulation research on zero-module characteristics of single-phase grounding fault in mine power supply system

LUO Chao^{1,2}, GENG Pulong^{1,2}, QU Bingni^{1,2}, SONG Jiancheng^{1,2},
LIU Jucai^{1,2}, DU Zhili³, YUAN Leiming⁴

(1. National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group Co., Ltd., Jincheng 048006, China; 4. Shanxi Lingzhida Coal Co., Ltd., Changzhi 046606, China)

Abstract: For poor actual protection effect of existing line selection methods based on characteristic

收稿日期:2017-07-04;修回日期:2018-04-09;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377113,U1510112);山西省科技重大专项项目(20131101029)。

作者简介:罗超(1991—),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化,E-mail:626194654@qq.com。

引用格式:罗超,耿蒲龙,曲兵妮,等. 矿井供电系统单相接地故障零模特征仿真研究[J]. 工矿自动化,2018,44(6):57-63.

LUO Chao,GENG Pulong,QU Bingni,et al. Simulation research on zero-module characteristics of single-phase grounding fault in mine power supply system[J]. Industry and Mine Automation,2018,44(6):57-63.

quantity of single-phase grounding fault, a simulation model of mine power supply system was established in RTDS/RSCAD real-time digital simulation system taking an actual mine power supply system as research object. Fault characteristics laws of zero-module current and zero-module voltage of lines were analyzed under operation modes of ungrounded neutral and arc suppression coil grounded neutral. Influences of different fault location, initial phase angle of fault and grounding resistance on time domain characteristics of zero-module current were also researched under single-phase grounding fault of mine power supply system. The research results are as follows: ① Influences of neutral point operation mode on zero-module current of non-fault line and zero-module voltage of bus can be ignored, but influence on zero-module current of fault line is greater. Polarities of the first half wave of zero-module current in fault line and non-fault line are opposite under the two operation modes. ② The farther fault location away from the bus, the smaller impact value of transient zero-module current is. Fault location has less influence on steady-state zero-module current. ③ The larger of the initial phase angle of fault, the larger the impact value of transient zero-module current is, the slower the impact value grows, and the shorter time reaching steady-state of transient zero-module current of fault line is. The initial phase angle of fault has no influence on amplitude of steady-state zero-module current, which only affects initial phase angle. ④ The larger grounding resistance, the smaller impact value and its attenuation rate of transient zero-module current and amplitude of steady-state zero-module current are.

Key words: mine power supply system; single-phase grounding fault; fault line selection; ungrounded neutral; arc suppression coil grounded neutral; phase-mode transformation; zero-module characteristic; time domain analysis

0 引言

煤矿井下工作空间狭小,空气潮湿,工况复杂,供电电缆极易被砸、压、碰,使绝缘受到损坏甚至击穿^[1],进而发生单相接地故障。单相接地故障若不能及时排除,可造成电缆线路绝缘薄弱处发生击穿,导致多点接地或相间短路,此时会产生上千安培的故障电流,可直接烧毁附近的电动机,造成井下重要负荷设备停运,还可能造成人身触电,瓦斯、煤尘爆炸等事故,严重影响工矿企业安全生产。

近年来,已有不少学者对不同接地方式下单相接地故障特征进行仿真研究^[2-10],提出了一些利用故障特征量进行选线的方法^[11-15]。但由于井下电网结构复杂、出线数较多、接地故障随机性强、中性点运行方式多样、电磁干扰严重等,实际的保护效果并不理想。因此,研究不同故障因素、接地方式对矿井供电系统单相接地故障特征的影响是单相接地保护的理论基础,可为进一步完善和发展基于故障特征量的故障选线与故障测距提供理论依据,对保证矿井安全生产具有非常重要的现实意义。

本文以实际矿井供电系统为研究对象,利用RTDS/RSCAD实时数字仿真系统,搭建了矿井供

电系统仿真模型,仿真分析了中性点不接地与经消弧线圈接地2种运行方式下线路零模电流与母线零模电压故障特征规律,研究总结了不同故障位置、故障初相角、接地电阻对矿井供电系统单相接地故障时域特征的影响,进而为矿井供电系统单相接地保护提供理论依据。

1 卡伦鲍厄相模变换

当矿井供电系统发生单相接地故障时,电缆三相线路两两之间存在电磁耦合关系,供电电缆每相线路对地也存在耦合电容,各相暂态分量不相互独立,此时不适合采用对称分量法对单相接地故障暂态特性进行分析,可利用卡伦鲍厄相模变换对三相供电系统进行解耦,将具有耦合关系的三相供电系统分解成相互独立的模量,解耦之后各模电压和各模电流之间相互独立,有利于故障特征量的提取和分析。

将各相电流、电压进行卡伦鲍厄相模变换可得各模分量:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: i_0,i_1,i_2 分别为电缆线路相电流经过卡伦鲍厄相模变换后的 0 模、1 模、2 模分量; i_A,i_B,i_C 为电缆线路三相电流; u_0,u_1,u_2 分别为电缆线路相电压经过卡伦鲍厄相模变换后的 0 模、1 模、2 模分量; u_A,u_B,u_C 为电缆线路三相电压。

2 仿真模型及参数设置

以山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司某矿实际矿井供电系统为研究对象,基于 RTDS 实时数字仿真系统,在 RSCAD 中搭建了包含 6 条 6 kV 电缆高压馈线的中性点经消弧线圈接地的矿井供电系统仿真模型,如图 1 所示。

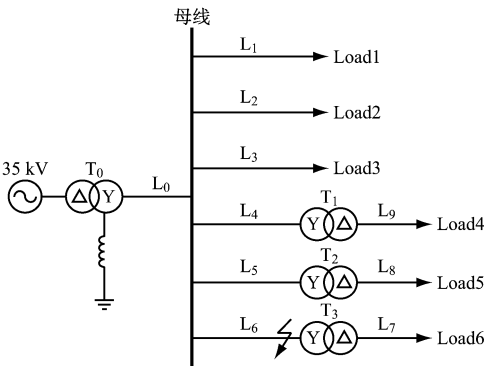


图 1 矿井供电系统仿真模型

Fig. 1 Simulation model of mine power supply system

参考实际矿井供电系统,线路 L_0-L_9 长度分别设定为 1.5,6,10,10,6,5,6,1,0.7,0.6 km。变压器 T_0-T_3 变比分别为 35 kV/6.3 kV,6 kV/0.69 kV,6 kV/1.141 5 kV,6 kV/3.45 kV。工矿企业消弧线圈补偿度一般为 5%~10%^[3],本文设定为 5%。通过查阅相关手册和《电力系统谐振接地》,可确定线路正序和零序参数,见表 1 和表 2。

表 1 线路正序参数

Table 1 Positive sequence parameters of lines

线路编号	正序电阻/ (Ω·km ⁻¹)	正序电感/ (H·km ⁻¹)	正序电容/ (μF·km ⁻¹)
L ₀	0.091	2.55×10 ⁻⁴	0.718 5
L ₁ —L ₆	0.229	2.83×10 ⁻⁴	0.383 7
L ₇ ,L ₈ ,L ₉	0.247	2.39×10 ⁻⁴	0.383 7

3 仿真分析

当矿井供电系统发生单相接地故障时,单相接

表 2 线路零序参数

Table 2 Zero sequence parameters of lines

线路编号	零序电阻/ (Ω·km ⁻¹)	零序电感/ (H·km ⁻¹)	零序电容/ (μF·km ⁻¹)
L ₀	0.91	1.02×10 ⁻³	0.359 2
L ₁ —L ₆	2.29	1.13×10 ⁻³	0.191 9
L ₇ ,L ₈ ,L ₉	2.47	9.55×10 ⁻⁴	0.191 9

地故障特征会受中性点运行方式、故障位置、故障初相角、接地电阻的影响,因此研究这 4 种因素对矿井供电系统单相接地故障特征的影响。由于各非故障线路零模电流波形相似,为便于分析,假定线路 L_6 发生单相接地故障,对非故障线路 L_4 、故障线路 L_6 的首端零模电流及母线零模电压进行分析。

3.1 中性点运行方式对单相接地故障特征的影响

为研究中性点运行方式对单相接地故障特征的影响,设故障初相角分别为 90°,270°,金属性接地,故障发生在线路中点(接地点距离母线的长度占整条线路长度的比例 $\eta=50\%$),0 s 时发生单相接地故障。中性点不接地、经消弧线圈接地时各线路零模电流和母线零模电压波形如图 2 所示。中性点经消弧线圈接地时故障点电源侧与负荷侧零模电流波形如图 3 所示。

对图 2、图 3 进行分析,可得出如下结论:

- (1) 中性点运行方式对母线零模电压和非故障线路零模电流的影响可忽略不计,对故障线路零模电流影响较大,主要原因是消弧线圈电感电流只流经故障线路而不流经非故障线路。
- (2) 中性点不接地时,故障线路与非故障线路稳态零模电流幅值相差较大、相位相反,故障线路稳态零模电流相位滞后母线稳态零模电压 90°,非故障线路稳态零模电流相位超前母线稳态零模电压 90°。消弧线圈采用过补偿运行方式时,故障线路与非故障线路稳态零模电流幅值相差不大、相位相同,二者相位均超前母线稳态零模电压 90°。
- (3) 在首半波,故障线路零模电流极性与母线暂态零模电压极性相反,非故障线路零模电流极性与母线零模电压极性相同。母线暂态零模电压极性与接地时刻故障相电压极性有关,接地时刻母线零模电压与故障相电压相位相差 180°。
- (4) 过补偿时,故障点电源侧比负荷侧有一个较大的暂态零模电流冲击值,二者极性相反;电源侧和负荷侧稳态零模电流相位相同。

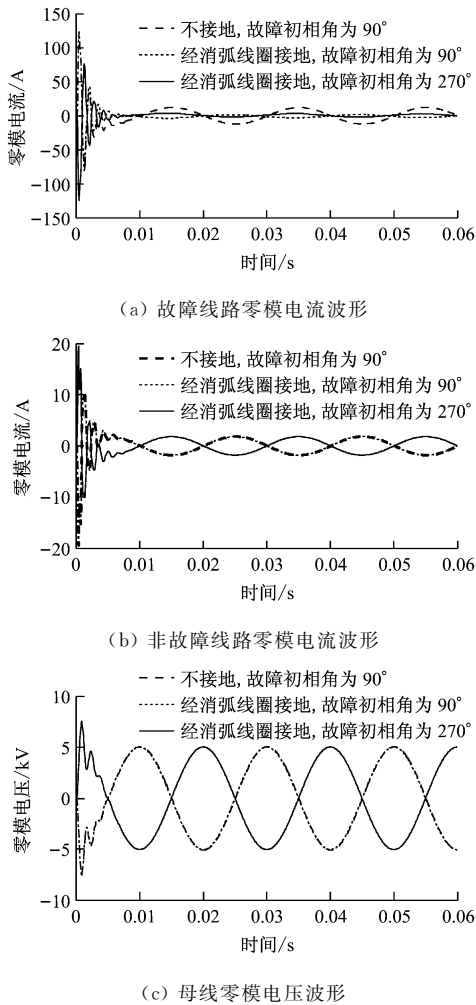


图 2 不同中性点运行方式下零模电流和零模电压波形

Fig.2 Waveform of zero-module current and zero-module voltage under different neutral point operation mode

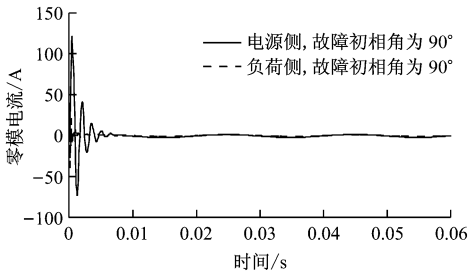


图 3 中性点经消弧线圈接地时故障点电源侧与负荷侧零模电流波形

Fig.3 Waveforms of zero-module currents at power supply side and load side under arc suppression coil grounded neutral

3.2 故障位置对线路零模电流的影响

为研究故障位置对线路零模电流的影响,设故障初相角为 90° ,金属性接地,故障发生在线路首端、中点、末端($\eta=10\%, 50\%, 90\%$),0 s 时发生单相接地故障。不同故障位置时各线路零模电流波形如图 4 所示。故障位置与暂态零模电流冲击值关系

曲线如图 5 所示。

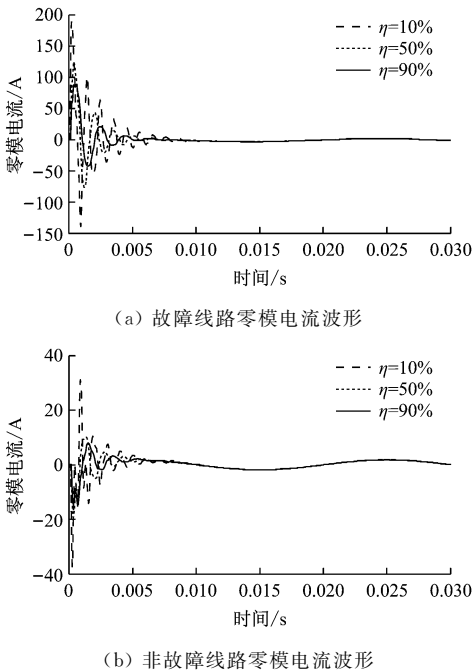


图 4 不同故障位置时零模电流波形

Fig.4 Waveform of zero-module current under different fault location

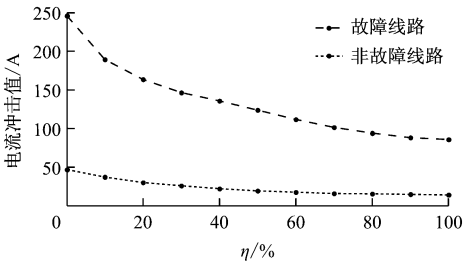


图 5 故障位置与暂态零模电流冲击值关系曲线

Fig.5 Relationship curve of fault location and impact value of transient zero-module current

对图 4、图 5 进行分析,可得出如下结论:

(1) 故障位置距离母线越远,故障线路与非故障线路暂态零模电流冲击值越小,自由振荡频率越低,达到稳态的时间越短。达到稳态时,故障线路与非故障线路稳态零模电流近似不变,说明故障位置对各线路零模电流暂态特性影响较大,对稳态特性影响较小。

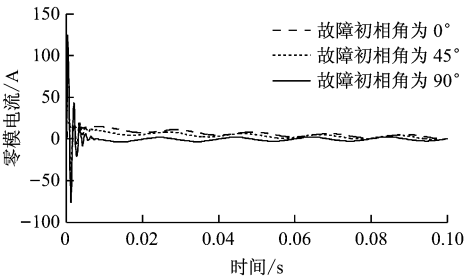
(2) 故障位置一定时,故障线路暂态零模电流冲击值大于非故障线路,二者极性相反。

(3) 非故障线路暂态零模电流冲击值衰减速度随故障点至母线距离的增大逐渐减小,故障线路暂态零模电流冲击值衰减速度比非故障线路快。

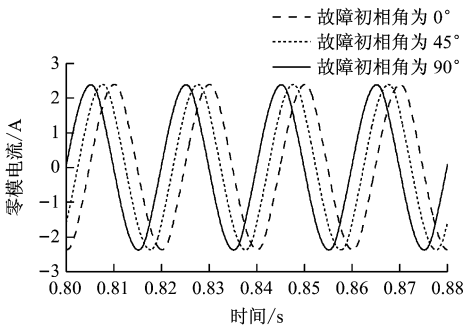
3.3 故障初相角对线路零模电流的影响

为研究故障初相角对线路零模电流的影响,设

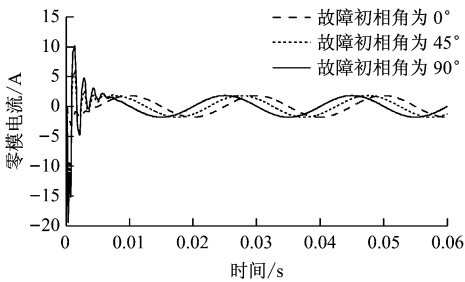
金属性接地,故障发生在线路中点($\eta=50\%$),0 s 时发生单相接地故障,故障初相角分别为 $0,45,90^\circ$ 。不同故障初相角时各线路零模电流波形如图 6 所示。故障初相角与暂态零模电流冲击值关系曲线如图 7 所示。



(a) 故障线路零模电流波形



(b) 故障线路稳态零模电流波形



(c) 非故障线路零模电流波形

图 6 不同故障初相角时零模电流波形

Fig. 6 Waveform of zero-module current under different initial phase angle of fault

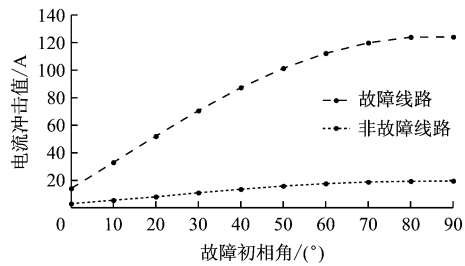


图 7 故障初相角与暂态零模电流冲击值关系曲线

Fig. 7 Relationship curve of initial phase angle of fault and impact value of transient zero-module current

对图 6、图 7 进行分析,可得出如下结论:

(1) 故障初相角为 0° 时,线路暂态零模电流高频成分所占比例较小,故障线路暂态零模电流经过数个工频周期达到稳态,非故障线路零模电流几乎没有暂态过程,很快进入稳态。

(2) 故障初相角越大,故障线路与非故障线路暂态零模电流冲击值越大,高频成分所占比例越大,暂态特征越明显,故障线路暂态零模电流达到稳态的时间越短。

(3) 以故障初相角为 0° 时各线路稳态零模电流为基准电流,当故障初相角增大时,各线路稳态零模电流超前于基准电流,超前角度为故障初相角。故障线路与非故障线路稳态零模电流幅值不受故障初相角影响。

(4) 故障线路与非故障线路暂态零模电流冲击值增长速度随故障初相角的增大逐渐减小,故障线路暂态零模电流冲击值增长速度比非故障线路快。

3.4 接地电阻对线路零模电流的影响

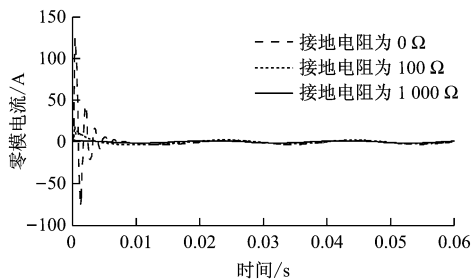
为研究接地电阻对线路零模电流的影响,设故障初相角为 90° ,故障发生在线路中点($\eta=50\%$),0 s 时发生单相接地故障,接地电阻分别为 0,100,1 000,5 000 Ω 。不同接地电阻时各线路零模电流波形如图 8 所示。接地电阻与暂态零模电流冲击值关系曲线如图 9 所示。

对图 8、图 9 进行分析,可得出如下结论:

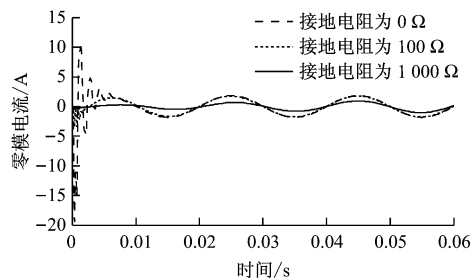
(1) 接地电阻较小时,系统处于欠阻尼状态,暂态零模电流围绕零值呈明显的周期振荡衰减特性;接地电阻增大,系统处于过阻尼状态,暂态零模电流呈不明显的非周期衰减特性,逐渐趋于稳态,暂态零模电流冲击值和稳态零模电流幅值减小;接地电阻进一步增大至 5 000 Ω 时,系统又处于欠阻尼状态^[8],零模电流暂态过程明显,暂态零模电流幅值缓慢上升,振荡频率接近于工频,可持续数个工频周期,暂态零模电流冲击值甚至小于稳态值。

(2) 故障线路与非故障线路零模电流首半波极性相反,但当接地电阻增大时,故障线路与非故障线路零模电流首半波极性不易判别。

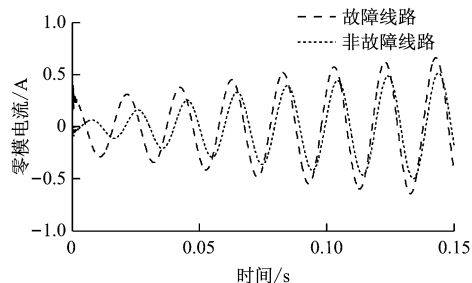
(3) 故障线路与非故障线路暂态零模电流冲击值衰减速度随接地电阻的增大逐渐减小,故障线路暂态零模电流冲击值衰减速度比非故障线路快。



(a) 故障线路零模电流波形



(b) 非故障线路零模电流波形



(c) 接地电阻为 5 000 Ω 时零模电流波形

图 8 不同接地电阻时零模电流波形

Fig. 8 Waveform of zero-modal current under different grounding resistance

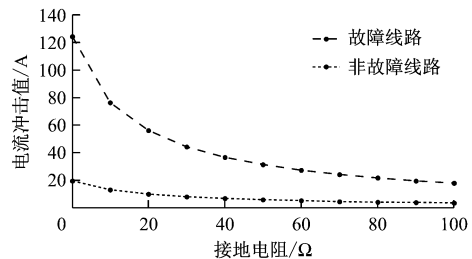


图 9 接地电阻与暂态零模电流冲击值关系曲线

Fig. 9 Relationship curve of grounding resistance and impact value of transient zero-modal current

4 结论

针对实际矿井供电系统,利用 RTDS/RSCAD 实时数字仿真系统,分析了中性点不接地与经消弧线圈接地 2 种运行方式下线路零模电流与母线零模电压的故障特征规律,研究了不同故障位置、故障初相角、接地电阻对单相接地故障零模电流时域特征

的影响,得出以下结论:

(1) 中性点运行方式对非故障线路零模电流和母线零模电压的影响可忽略不计,对故障线路零模电流影响较大;中性点不接地或经消弧线圈接地时故障线路与非故障线路零模电流首半波极性相反,可利用该暂态特性进行选线。

(2) 故障位置距离母线越远,线路暂态零模电流冲击值越小,自由振荡频率越低,非故障线路暂态零模电流冲击值衰减速度越小;线路稳态零模电流受故障位置影响较小。

(3) 故障初相角越大,线路暂态零模电流冲击值越大,冲击值增长速度越小,暂态特征越明显,故障线路暂态零模电流达到稳态的时间越短;故障初相角对线路稳态零模电流幅值不产生影响,只影响稳态零模电流初相角。

(4) 接地电阻越大,线路暂态零模电流冲击值与稳态零模电流幅值越小,冲击值衰减速度越小,故障线路暂态零模电流冲击值衰减速度比非故障线路快。

(5) 故障初相角越大、故障点越靠近母线、接地电阻越小,则暂态零模电流冲击值越大,高频成分所占比例越大,暂态特征越明显。

参考文献(References):

- [1] 王清亮. 单相接地故障分析与选线技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 蔡维, 王华荣, 刘承志, 等. 中性点不接地电网单相接地故障特征仿真研究与新结论[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(2): 33-36.
CAI Wei, WANG Huarong, LIU Chengzhi, et al. Simulation of single-phase grounding fault on non-grounding neutral power system and new conclusions [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 33-36.
- [3] 王清亮. 单相漏电的故障暂态特性[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 160-164.
WANG Qingliang. Transient characteristics of single-phase to earth leakage [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 160-164.
- [4] 张新慧, 薛永端, 潘贞存, 等. 单相接地故障零模暂态特征的仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 39-43.
ZHANG Xinhui, XUE Yongduan, PAN Zhengcun, et al. Simulative analysis of zero modal transient

- characteristics for single-phase grounding fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 39-43.
- [5] 田书,王晓卫,王娟娟. 配电网单相接地仿真分析研究[J]. 工矿自动化, 2010, 36(7): 42-45.
- TIAN Shu, WANG Xiaowei, WANG Juanjuan. Simulation and analysis of single-phase grounding in distribution network [J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(7): 42-45.
- [6] 刘淑琴,宋建成. 矿井 10 kV 供电系统单相接地故障的仿真研究[J]. 工矿自动化, 2008, 34(6): 9-12.
- LIU Shuqin, SONG Jiancheng. Simulation research of single phase to ground fault of 10 kV power supply system of mine[J]. Industry and Mine Automation, 2008, 34(6): 9-12.
- [7] 薛永端,李娟,徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
- XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [8] 张海申,何正友,张钧. 谐振接地系统单相接地故障频谱特征分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 79-84.
- ZHANG Haishen, HE Zhengyou, ZHANG Jun. Frequency spectrum characteristic analysis of single-phase grounding fault in resonant grounded systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 79-84.
- [9] 周羽生,彭琢,韦肖燕,等. 小电流接地系统单相故障的 Matlab 仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 50-52.
- ZHOU Yusheng, PENG Zhuo, WEI Xiaoyan, et al. Matlab simulation on single-phase-to-ground fault of small current grounding power system [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2009, 21(4): 50-52.
- [10] 王艳松,解飞. 配电网单相接地故障的仿真分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 123-127.
- WANG Yansong, XIE Fei. Simulation and analysis of single-phase to ground fault in distribution networks [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 123-127.
- [11] 张新慧,潘馨雨,何柏娜,等. 基于暂态主频零模电流的故障选线仿真研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(10): 157-161.
- ZHANG Xinhui, PAN Xinyu, HE Baina, et al. Single-phase-to-earth fault detection simulation for non-effectively earthed network based on dominant transient frequency current[J]. Computer Simulation, 2013, 30(10): 157-161.
- [12] 孙波,徐丙垠,孙同景,等. 基于暂态零模电流近似熵的小电流接地故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 83-87.
- SUN Bo, XU Bingyin, SUN Tongjing, et al. New fault locating method based on approximate entropy of transient zero-module current in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 83-87.
- [13] 戴剑锋,张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.
- DAI Jianfeng, ZHANG Yanxia. Study on adaptively choosing fault line under single-phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.
- [14] 赖平,周想凌,邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 51-57.
- LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method indirectly grounding power system [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
- [15] 张艳霞,王清亮. 应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 76-80.
- ZHANG Yanxia, WANG Qingliang. New method for single-phase to ground fault feeder selection based on analysis of fault transient characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 76-80.