

中性点非直接接地系统零序网络的相频特性

张伟刚, 张保会

(西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 暂态零序分量是中性点非直接接地系统单相接地故障选线的主要研究对象。为了揭示暂态量分布的频域特性, 以线路分布参数模型为基础, 全面分析了发生单相接地故障后的零序网络相频特性。通过 PSCAD 仿真分析了单条线路的零序阻抗相频特性曲线, 研究了不同的线路参数、出线长度、线路结构和分支线路等因素对其的影响; 仿真分析了整个零序网络中各条出线的相频特性曲线, 研究了接地方式对其相频特性的影响。分析表明: 单相接地故障发生后, 故障线路测量到的是所有健全线路组成的零序网络的相频特性, 其特性取决于系统接地方式以及健全线路的相频特性; 线路首容性频带并不是一成不变的, 基于暂态零序信号的选线方法要能够自适应地寻找线路的首容性频带, 提取频带内的暂态信息。并且要依据频带内各条线路电流之间或电压与电流之间的关系形成选线判据。

关键词: 中性点非直接接地系统; 相频特性; 零序网络; 故障选线

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0071-05

0 引言

我国配电网大多采用中性点非直接接地的运行方式。基于故障产生的稳态信号的选线方法由于故障电流微弱、电弧不稳定等原因, 选线效果不理想。

基于故障暂态信号的选线方法灵敏度高且不受消弧线圈影响。近年来, 利用暂态信号, 尤其是零序暂态信号的选线方案已经成为研究的热点^[1-5]。文献[6-9]提出的基于零序暂态信号选线方法都涉及到了选定频带 SFB(Selected Frequency Band)的概念, 即在各条出线的零序阻抗都呈容性的频带内分别提取各条线路的暂态零序特征来实现选线判据。由此可见, SFB 是实现选线判据的前提, 其对选线准确与否是至关重要的, 如果 SFB 选择有误, 则必然会造成选线错误。但是, 目前大多数文献集中于选线判据的研究, 而缺乏对 SFB 以及决定 SFB 的零序网络相频特性的研究。

本文旨在揭示影响中性点非直接接地系统的零序网络相频特性的各种因素, 从配电网的线路模型入手, 分析了集中参数模型与分布参数模型的零序阻抗相频特性差异, 通过仿真分析了线路参数、长度、出线结构、分支等因素对单条线路零序阻抗相频特性的影响。并在配电系统仿真模型中分析了单相接地故障发生后零序网络的相频特性。为基于零序暂态信号的正确选线提供了基础。

1 线路零序阻抗相频特性理论分析

对于低频带的线路阻抗分析, 使用长线-均匀分

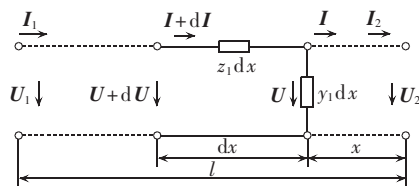


图 1 长线-均匀分布参数电路模型

Fig.1 Long line model with homogeneously distributed parameter

布参数模型(见图 1)可保证其精确性^[10]。

图 1 中, z_1 、 y_1 为单位长度线路的阻抗和导纳; U 、 I 为距线路末端 x 处的电压、电流; $U+dU$ 、 $I+dI$ 为距线路末端 $x+dx$ 处的电压、电流; dx 为长度微元。

此均匀分布参数输电线路模型的两端口网络的电压和电流方程可表示为

$$\begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma x & Z_c \sinh \gamma x \\ \frac{\sinh \gamma x}{Z_c} & \cosh \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, 线路特性阻抗 $Z_c = \sqrt{z_1/y_1}$, 线路传播系数 $\gamma = \sqrt{z_1 y_1}$, U_2 、 I_2 为单线路末端电压、电流。

以上的公式推导和分析过程依据的是图 1 所示的模型, 这一模型可以是任意模量下的线路模型。因关注的是零序网络, 而中性点非直接接地系统零序网络中线路末端负荷阻抗可看作无穷大, 因此认为末端开路。

经过推导可以得出从线路始端看入的线路零序输入阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{j\omega C_0}} \frac{\cosh(l\sqrt{(R_0 + j\omega L_0)j\omega C_0})}{\sinh(l\sqrt{(R_0 + j\omega L_0)j\omega C_0})} \quad (2)$$

其中, R_0 、 L_0 、 C_0 分别为线路单位长度的零序电阻、电感和电容; l 为线路长度。

对于 π 模型集中参数线路模型, 有如下入端等

效阻抗表达式:

$$Z_0 = \frac{\left(R_0 l + j\omega L_0 l + \frac{1}{j\omega C_0 l / 2} \right) \left(\frac{1}{j\omega C_0 l / 2} \right)}{R_0 l + j\omega L_0 l + \frac{1}{j\omega C_0 l / 2} + \frac{1}{j\omega C_0 l / 2}} \quad (3)$$

以图 3 中仿真模型的线路参数^[11]为例,按照公式(2)(3),计算出 20 km 架空线路零序阻抗相频特性曲线如图 2 所示(图中,虚线为分布参数,实线为集中参数)。

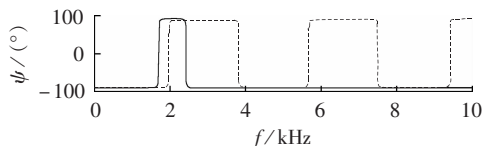


图 2 20 km 架空线路 2 种参数模型的零序相频特性对比

Fig.2 Comparison of zero sequence phase-frequency characteristics between two parameter models of 20 km overhead line

可见,分布参数模型线路零序阻抗的相频特性是在 $\pm 90^\circ$ 上交替变化的周期性曲线,随着频率升高,线路零序阻抗的容性、感性频带交替出现,且容性频带和感性频带长度相同。以第 1 个交变频带为首的奇数次频带都是阻抗角为 -90° 的容性频带,以第 2 个交变频带为首的偶数次频带都是阻抗角为 90° 的感性频带。线路零序阻抗的频率特性自然也影响到线路零序电流的性质,所以线路零序电流在零序阻抗的容性频带内的频率分量呈容性,在感性频带内的频率分量呈感性。阻抗角由负变正时,发生一次串联谐振;阻抗角由正变负时,发生一次并联谐振。

观察图 2 可知,在首段容性频带内,集中参数与分布参数模型的相频特性非常接近,集中参数模型的首容性频带宽度要比分布参数模型略窄一些,当频率上升至 1600 Hz 以上时两者的相频特性产生差异。集中参数的零序相频特性曲线仅产生一次串联谐振和并联谐振,并不具备分布参数模型的周期性。因此,如果利用低频的首容性频带选线,则 2 种模型都可以适用;但如果利用高频段选线,则集中参数模型将不适用。

以上是对单条线路的零序阻抗相频特性进行的理论分析,对于具有多条不同参数的中性点非直接接地配电系统,当某条出线上发生单相接地故障后,故障线路和非故障线路的零序网络相频特性与单条线路的零序阻抗相频特性差异用数字仿真的方法研究更简单。

2 仿真结果分析

2.1 配电网仿真模型

仿真系统如图 3 所示。该模型是一个 10 kV 的配电网馈线系统,共有 6 条出线,线路末端均空载。 L_1 为混联线路,由 10 km 架空线和 10 km 电缆线组成, L_2 、 L_3 为架空线, L_4 、 L_5 为电缆线, L_6 为中点处有 10 km 分支线路的架空线。下面对具体电气参数进行说明。

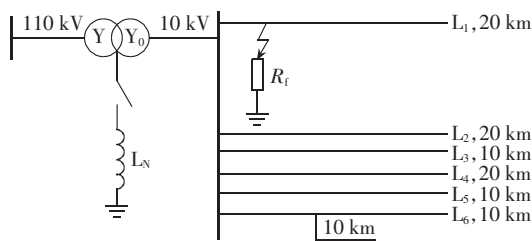


图 3 PSCAD 仿真用配电系统

Fig.3 Distribution network for PSCAD simulation

a. 线路:架空线零序参数 $R_0 = 0.23 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 5.478 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 0.008 \mu\text{F}/\text{km}$;架空线正序参数 $R_1 = 0.17 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 1.21 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 0.00969 \mu\text{F}/\text{km}$;电缆线零序参数 $R_0 = 2.7 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 1.019 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 0.28 \mu\text{F}/\text{km}$;电缆线正序参数 $R_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.255 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 0.339 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

b. 变压器:110/10.5 kV;高压侧单相对中性点线圈电阻 0.40Ω ,电感 12.2Ω ;低压侧单相线圈电阻 0.006Ω ,电感 0.183Ω ;励磁电流 0.672 A ,励磁磁通 202.2 Wb ,磁路电阻 $400 \text{ k}\Omega$ 。变压器额定容量为 $40000 \text{ kV}\cdot\text{A}$,空载损耗 35.63 kW 。

c. 消弧线圈:在消弧线圈接地系统仿真时,系统设为 8% 过补偿,根据线路参数及长度可计算出,消弧线圈电感为 $L_N = 0.21 \text{ H}$ 。

2.2 仿真方法

为了研究线路及配电网的零序阻抗相频特性曲线,在仿真软件 PSCAD 中,不断地改变系统电源频率,在每个频率下仿真模型其中一条出线发生单相接地故障,测量母线稳态零序电压相角和各条出线首端的稳态零序电流相角,并计算其二者的差值得到各条出线首端所测量到的相应频率下的相角,这样就可以绘制出不同频率范围的相频特性曲线。

此外,对于单条线路也可以利用仿真软件 PSCAD 中自带的谐波阻抗测量元件直接测量得到线路的零序阻抗相角与频率的对应关系,进而可以在 Matlab 中绘制出相频曲线。经过仿真数据的对比,2 种方法得到的相频特性曲线是一致的。

2.3 单条线路的零序阻抗相频特性

2.3.1 架空线和电缆线

架空线与电缆线结构的不同导致其二者的单位距离参数相差很大。与架空线相比,电缆线的单位零序电感有所减小,但单位对地电容大幅度增大(通常为 25~50 倍)。以图 3 中仿真模型的线路参数为例,在仿真软件 PSCAD 中仿真分别得到不同长度的架空线和电缆入端零序阻抗的相频特性对比见图 4。

观察图 4 可以发现电缆线路零序阻抗的相频特性与架空线路大为不同,其没有一个明显的阻抗角为 -90° 的容性频带和阻抗角为 90° 的感性频带。并且由于单位零序电阻和电容的明显差异,对于同长度出线,电缆零序阻抗相频特性的容性频带和感性频带宽度明显小于架空线。

通过比较可发现对于单位长度参数相同的出

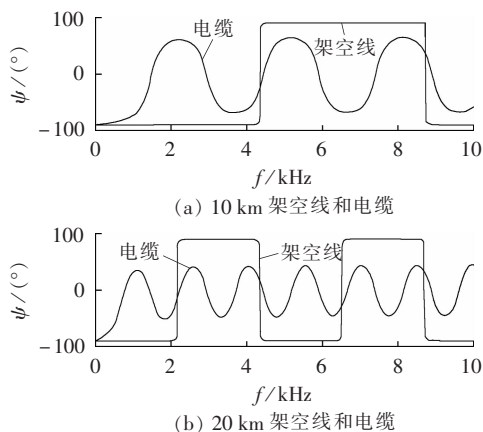


图 4 架空线与电缆线零序阻抗相频特性对比

Fig.4 Comparison of zero sequence impedance phase-frequency characteristics between overhead line and power cable

线,阻抗角的变化周期(即容性频带或感性频带的长度)只与线路长度有关。线路长度越长,阻抗角的变化周期越短,即首容性频带越短。

2.3.2 架空线-电缆混联线路的相频特性

架空线与电缆混联组成出线的零序阻抗相频特性与纯架空线或电缆线路相比同样有较大的差异。通过仿真分析,做出 10 km 架空线与 10 km 电缆混联线路的零序阻抗相频特性曲线如图 5 所示。

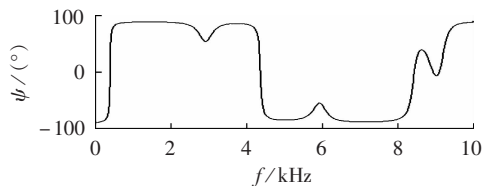


图 5 10 km 架空线与 10 km 电缆混联线路零序阻抗相频特性

Fig.5 Zero sequence impedance phase-frequency characteristics of hybrid line with 10 km overhead line and 10 km power cable

比较图 4(b)和图 5,可以发现 20 km 混联线路相对于相同长度的架空线和电缆出线而言,其首容性频带要大为减小,只有 400 Hz。并且其零序阻抗的相频特性呈现出不规律性。这说明不同的出线结构也会对零序相频特性,特别对首容性频带产生较大的影响。

2.3.3 分支线路对相频特性的影响

在 10 km 架空线中点处引入 10 km 的架空线作为分支线路,由仿真数据绘制的零序阻抗相频特性如图 6 所示。

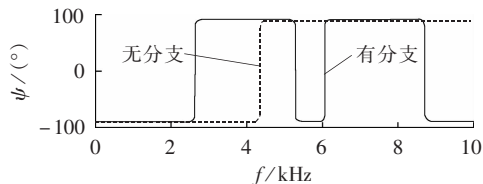


图 6 引入分支线路后的零序阻抗相频特性

Fig.6 Zero sequence impedance phase-frequency characteristics of line with branch

观察图 6 可以发现,引入分支线路后出线的零序相频特性的首容性频带有所减小,容性频带和感性频带的宽度不一致。

2.4 中性点非直接接地系统零序网络相频特性

2.4.1 不接地系统的零序网络相频特性

在图 3 的仿真模型中,分别仿真中性点不接地系统线路 3、4 发生单相接地故障后,各条出线的零序网络相频曲线如图 7、8 所示。

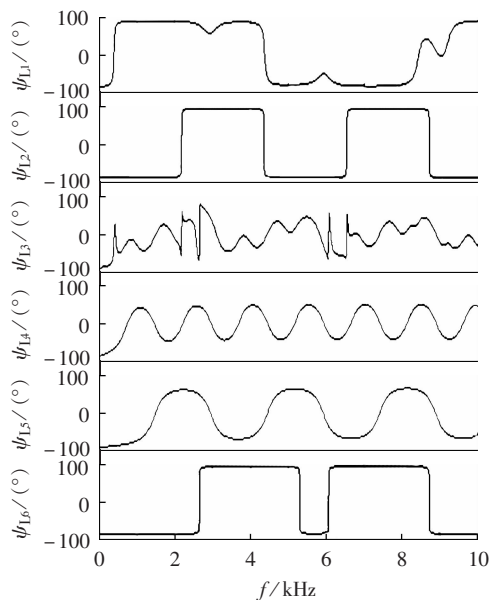


图 7 线路 3 故障后零序网络的相频特性

Fig.7 Phase-frequency characteristics of zero sequence network with fault at line 3

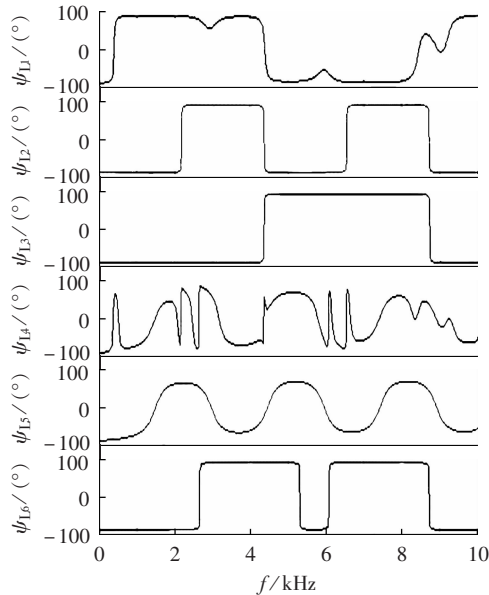


图 8 线路 4 故障后零序网络的相频特性

Fig.8 Phase-frequency characteristics of zero sequence network with fault at line 4

观察图 7、8 可以发现,在中性点不接地系统中发生单相接地故障后,由于健全线路检测到的是本线路的零序阻抗,其相频特性只与本线路的单位距离参数、出线长度和拓扑结构有关。故健全线路的零序相频特性与 2.3 节中分析的单条线路相频特性曲线

一致。故障线路检测到的背后阻抗是所有健全线路并联的网络,该网络在高频段上呈现不规则的容性和感性,这是健全线路自身的串联谐振和健全线路之间的并联谐振而引起的。因此故障线路的相频特性取决于其他健全线路。观察可知,健全线路每次的串联谐振都会导致故障线路发生串联谐振,故障线路首次发生串联谐振的频率也就等于所有健全线路中首次发生串联谐振的最小频率,即故障线路的首容性频带取决于所有健全线路中最短的首容性频带。

在此首容性频带内,各条健全线路的零序电流方向一致,而故障线路的零序电流与其方向相反。可以利用这个特点形成基于暂态零序电流方向比较的选线判据。

故障线路的零序电流是所有健全线路零序电流之和。在首容性频带内,各条健全线路电流方向一致,故障线路零序电流的幅值就为各条健全线路零序电流幅值之和,故障线路电流幅值也就大于任一健全线路电流幅值,可以利用这个特点形成基于暂态零序电流幅值比较的选线判据。

2.4.2 经消弧线圈接地系统零序网络相频特性

在图 3 的仿真模型中,分别仿真中性点经消弧线圈接地系统中线路 3、4 发生单相接地故障后,各条出线的零序网络相频特性曲线如图 9、10 所示。

对比图 7 和图 9 以及图 8 和图 10,由于消弧线圈的补偿作用,故障线路测量的零序网络相频特性在低频段呈感性,即首个频段为感性频段。若定义补偿频率为 f_0 ,首次发生串联谐振的频率 f_1 为则首容性频带的宽度为 $f_0 \sim f_1$ 。在此频带内同样有以上不接地系统中零序分量的特点。

2.4.3 零序网络的相频特性不受故障条件的影响

因为不论故障点处的故障条件(如故障点位置、过渡电阻、故障初相角等)如何,配电网络中健全线

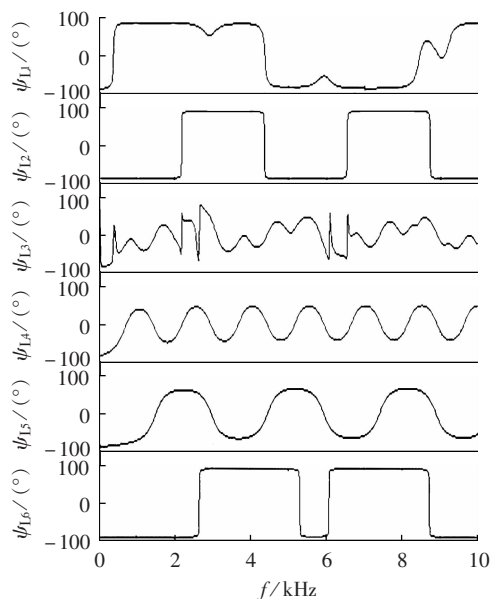


图 9 线路 3 故障后零序网络的相频特性

Fig.9 Phase-frequency characteristics of zero sequence network with fault at line 3

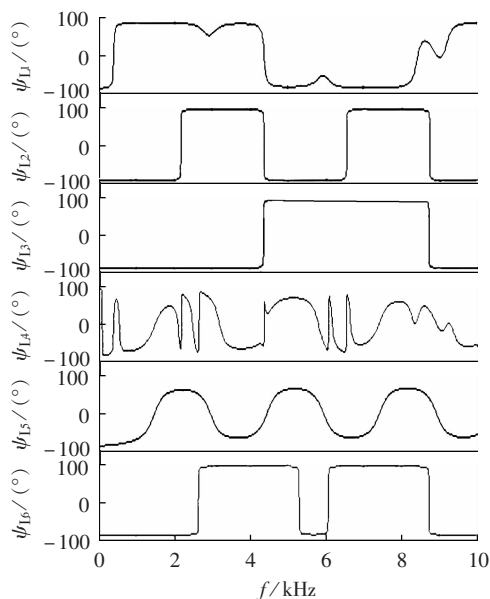


图 10 线路 4 故障后零序网络的相频特性

Fig.10 Phase-frequency characteristics of zero sequence network with fault at line 4

路首端测量的都是本线路的零序阻抗特性,故障线路首端测量的都是所有健全线路并联网络的零序阻抗特性,所以故障线路以及健全线路的零序网络的相频特性都不受故障条件的影响。

3 结论

在中性点非直接接地系统中发生单相接地故障后,健全线路的零序阻抗相频特性主要受线路参数、出线长度、线路结构(架空线或电缆)等线路自身因素影响;故障线路测量到的是所有健全线路组成的零序网络的相频特性,其取决于接地方式以及健全线路的零序阻抗相频特性,不受故障条件的影响,并且其首容性频带取决于其他健全线路中最短的首容性频带。

线路的首容性频带不是一成不变的。因此,无论实现判据的方式如何,基于暂态零序信号的选线方法要能够自适应地寻找线路的首容性频带,提取频带内的暂态信息。并且要依据频带内各条线路电流的方向、幅值或者电压与电流之间的相位等关系形成选线判据。本文的主要工作为这些基于零序暂态信号选线方法所利用的频域特性建立了一个研究的基础。

参考文献:

- [1] 赵慧梅,张保会,段建东,等. 一种自适应捕捉特征频带的配电网单相接地故障选线新方案[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2): 41-46.
- ZHAO Huimei,ZHANG Baohui,DUAN Jiandong,et al. A new scheme of faulty line selection with adaptively capturing the feature band for power distribution networks[J]. Proceeding of the CSEE,2006,26(2):41-46.
- [2] 马珂. 中性点非直接接地系统中暂态谐波故障选线新原理的研究[D]. 西安:西安交通大学电气工程学院,2003.
- MA Ke. Transient harmonic methods for ground-fault detecting in the non-effectively grounded neutral systems[D]. Xi'an:Xi'an

- Jiaotong University, 2003.
- [3] 潘露,吕艳萍,于芳,等. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 76-79.
PAN Lu, LÜ Yanping, YU Fang, et al. Fault line selection in non-solidly earthed network based on phase-frequency characteristic and multi-frequency band analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 76-79.
- [4] 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 Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin. Transient characteristics analysis of single-phase earthed fault in non-solidly grounded systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2): 195-199.
- [5] 王伟,焦彦军. 暂态信号特征分量在配网小电流接地选线中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 96-100.
WANG Wei, JIAO Yanjun. Application of characteristic components of transient signal in grounded wire detection of ineffectively earthed distribution systems[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 96-100.
- [6] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁. 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 Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [7] 薛晓辉. 不接地系统单相接地故障选线的研究[D]. 西安: 西安交通大学电气工程学院, 2008.
XUE Xiaohui. Fault line selection in non-solid earthed network [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008.
- [8] 赵惠梅. 基于暂态特征信息的中性点非直接接地系统单相接地故障选线研究[D]. 西安: 西安交通大学电气工程学院, 2005.
ZHAO Huimei. The research on fault line selection in non-solid earthed networks based on transient signals[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005.
- [9] 张保会,赵慧梅,张文豪,等. 基于特征频带内暂态零序电流特点的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 5-10.
ZHANG Baohui, ZHAO Huimei, ZHANG Wenhao, et al. Faulty line selection by comparing the amplitudes of transient zero sequence current in the special frequency band for power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 5-10.
- [10] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [11] 李森. 基于相关分析法的小电流接地系统单相接地故障选线研究[D]. 西安: 西安交通大学电气工程学院, 2008.
LI Sen. The research on fault line selection in neutral indirectly grounding power system based on correlation analysis [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

张伟刚(1984-),男,辽宁朝阳人,硕士研究生,主要研究方向为小电流接地系统故障选线(E-mail: zwg.song@stu.xjtu.edu.cn);

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护、安全稳定控制和电力系统通信等(E-mail: bh Zhang@mail.xjtu.edu.cn)。

Phase-frequency characteristics of zero sequence network in neutral indirectly grounding power system

ZHANG Weigang, ZHANG Baohui

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Transient zero sequence current is the focus of faulty line selection in neutral indirectly grounding system. In order to study the frequency-domain characteristics of transient signal distribution, the phase-frequency characteristics of zero sequence network with single-phase grounding fault is analyzed based on the distributed parameter line model. The phase-frequency characteristics of single feeder zero sequence impedance are analyzed by PSCAD simulation and its influencing factors are studied, such as transmission line parameter, length, structure, branch, etc. The phase-frequency characteristics of zero sequence network are also analyzed by PSCAD simulation and the influence of grounding mode on it is studied. Analysis shows that, what is measured on the faulty line is actually the phase-frequency characteristics of zero-sequence network composed of all healthy lines, depending on the neutral grounding mode and the phase-frequency characteristics of all healthy lines. The first capacitive band of lines is changeable, which should be adaptively found by the faulty line selection method based on transient zero sequence current to extract the transient information and set selection criteria according to the relationship between zero sequence current and voltage or between zero sequence currents.

This work is supported by the National Basic Research Program of China(2009CB219704).

Key words: neutral indirectly grounding power system; phase-frequency characteristics; zero sequence network; faulty line selection