

中性点不接地电网单相接地故障特征仿真研究与新结论

蔡 维,王华荣,刘承志,陈昌儒
(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 介绍了中性点不接地电网单相接地故障建模与仿真过程,研究并分析了单相接地时故障线路相电流、相电压,三序电压分量、电流分量,以及经凯伦贝尔变换后的模电流、模电压的特点。最后总结出一般性的结论,其中关于零序电流的分布与经典理论有较大的区别。

关键词: 小波分析; 相模变换; 电网仿真模型; 数学模型; 电容电流; 继电保护

中图分类号: TM 711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)02-0033-04

0 引言

小电流接地方式(包括中性点不接地及经消弧线圈接地两种),由于历史原因,我国 3~66 kV 配电网广泛采用。在小电流接地系统(又称中性点非直接接地电网)中发生单相接地时,故障点的电流很小,而且三相之间的线电压仍然对称,接地相电压为零,电源中性点对地电压升高为相电压,非故障相电压升高至线电压^[1-3](相电压的 $\sqrt{3}$ 倍),容易发展成短路故障,威胁电网安全运行。本文立足于对中性点不接地电网建模仿真,研究分析相分量(相电流、相电压),序分量(电流、电压的正负零序), $0, \alpha, \beta$ 模分量(电流、电压)的特征,旨在多层次多角度地认识小电流接地系统单相接地故障特征,给从事配电网继电保护与监控的研究人员和发变电运行人员提供多元化的分析资料。

1 研究对象与模型

1.1 电网与仿真建模

此系统单相接地时,三相负荷电流和线电压仍然

对称,建模时不考虑负荷,同时假设金属性接地。

用 Matlab/Simulink 作为仿真工具,以 35 kV 电压等级单机两回出线系统为例,构建仿真模型如图 1 所示。

从 Matlab/Simulink/PSB 库中选出模型图中的各电力元件模块,建立中性点不接地电网单相接地故障仿真模型,主要元件及其参数^[4]如下:使用理想三相电压源作电路的供电电源,线电压 35 kV, A 相相角为 0,频率 50 Hz,内部连接方式 Y,三相电源电阻 0.312 Ω ,三相电源电感 6.63 mH。高压输电线路使用分布参数输电线路,3 段线路 M(L1), N₁(L2_1), N₂(L_2),长度均为 70 km,40 km,30 km。线路单位长度正序电阻为 0.012 73 Ω ,零序电阻为 0.386 4 Ω ;线路单位长度正序电容为 12 740 pF,线路单位长度零序电容为 4.126 4 mF;线路单位长度正序电感为 0.937 7 mH,零序电感为 7.751 mH。从线路元件库中选三相电路短路故障发生器,转换状态设为 [1 0],转换时间设为 [0.01 0.04],其他项均为默认值。从测量库中选序分量分析器分析正负零

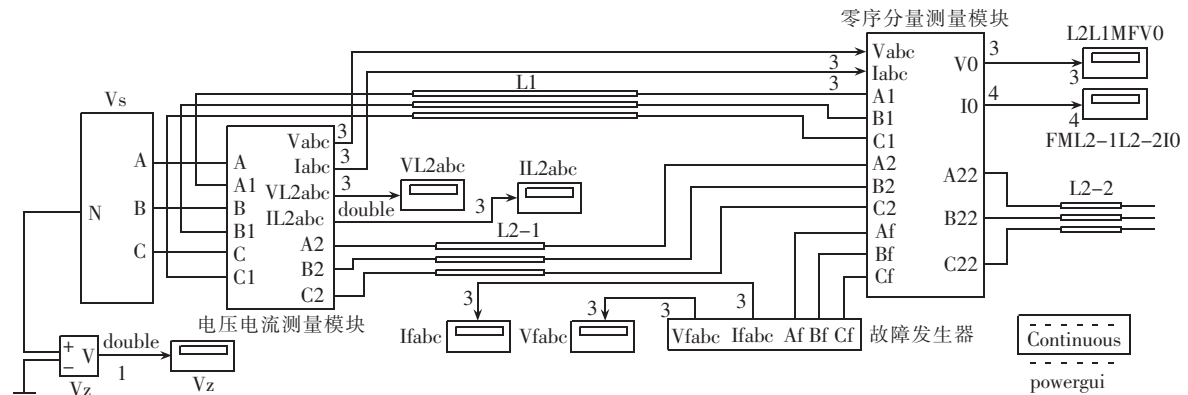


图 1 仿真模型

Fig.1 The simulation model

序电流与电压,基频 50 Hz,谐波次数为 1 次。从 Simulink 元件库中选取模型中的其余元件构建图示仿真模型。仿真参数设置:开始时间 0 s,停止时间 0.1 s;求解程序类型^[5-6]:可变步长,仿真求解器 ode23bt(stiff / NDF)。相对容差 10^{-5} ,其他参数全设自动(auto)。

1.2 相电压、相电流及其相模变换的数学模型

$$\begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{A2} \\ I_{A0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{A2} \\ U_{A0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(1)把三相电流变换为三序电流,式(2)把三相电压变换为三序电压,式(1)(2)是构成序量分析器的数学模型。凯伦贝尔相模变换^[1]矩阵式(3)(4),是实现三相电压和电流相模变换的数学模型。三相电流(电压)经过相模变换为 0 模、 α 模、 β 模 3 个电流(电压)分量后,被完全解耦。相间电磁相互影响被消除,有益于故障特征分析。因此,这类变换常用于基于小波分析的单相故障选线定位方法^[7]中。

2 系统仿真及其结果分析

以下仿真都假设 A 相接地,且只考虑金属性接地情况,A 相在 [0.01 0.04] s 时间内发生接地故障。

2.1 线路母线侧(电源端)三相电压分析

图 2 为 A 相接地时电压相量图,图 3 为线路母线侧(电源端)三相电压、电流波形。当 $t < 0.01$ s,系统正常运行,三相电压大小相等,相位相差 120° ;当 $t \in [0.01 \sim 0.04]$ s,系统发生单相接地故障,A 相电压接近于零,B,C 相电压升高为系统线电压,参见图 2 及电压相量表达式(5)。

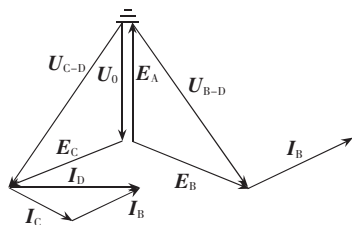
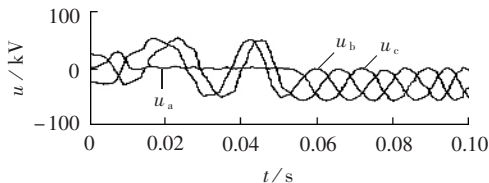


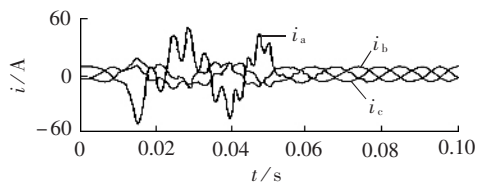
图 2 A 相接地时电压相量图

Fig.2 Voltage phasor diagram when phase A grounding fault happens

$$\begin{cases} U_{A-D}=0 \\ U_{B-D}=E_B-E_A=\sqrt{3} E_A e^{-j150^\circ} \\ U_{C-D}=E_C-E_A=\sqrt{3} E_A e^{j150^\circ} \end{cases} \quad (5)$$



(a) 三相电压



(b) 三相电流

图 3 线路母线侧三相电压、电流波形

Fig.3 Three phase voltage and current waveforms at bus side

当 $t > 0.04$ s 时,故障被排除,系统开始恢复正常,但是三相波形下移,大致以 -30 kV 为轴心上下波动,这是由于开关换路时线路中存在初始状态量和输入量^[4-8]的缘故;当 $t > 2$ s 以后,轴心上移至零(由仿真知,图略)。通过大量仿真,接地点的电压波形与电源母线侧一致,且 A 相电压为零。

2.2 线路母线侧(电源端)三相电流分析

图 3(b)中当 $t < 0.01$ s 时,系统正常运行,三相线路流过本导体元件的对地电容电流,值很小;当 $t \in [0.01 \sim 0.04]$ s 时,系统故障,三相电流都增大,故障相 A 相电流增加最多,幅值接近 58 A,而 B,C 两相都增加但较小,是因为 B,C 两相的对地电压都升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍,流过自身的电容电流也增加为原来的 $\sqrt{3}$ 倍,即 $I_B = I_C = \sqrt{3} U_\phi \omega C_0$ (U_ϕ 为相电压, ω 为角频率, C_0 为每相导体对地电容),而 A 相流过的是全系统非故障元件对地电容电流之和(但不包括故障线路本身);当 $t > 0.04$ s 时,系统从故障状态转入正常。

2.3 电源中性点电压及故障点各相电流波形分析

电源中性点电压波形图 4 表明,在 $t < 0.01$ s 时,系统对称中性点电压为零;在 $t \in [0.01 \sim 0.04]$ s 时,中性点电压变为相电压;在 $t > 0.04$ s 时,电压从负幅值开始回零,直到 3 s 后完全回零(仿真结果略)。

从故障点电流波形(图 5)可知:A 相接地时,电流发生较大变化,大小为全系统非故障元件对地电容电流之和,其他时间均为零。B,C 两相电流一直为零。

2.4 电网零序电流及零序电压分析

图 6 为电网零序电流和电压波形。图 6(a)中 4 条曲线(从上到下编号 1,2,3,4)分别代表 4 个不同的测量点显示的零序电流,曲线 1 表示从接地点测得的零序电流 $I_D = 3U_\phi \omega (C_{0N1} + C_{0N2} + C_{0M} + C_{0G})$ (C_{0M} ,

C_{0G}, C_{0N1}, C_{0N2}) 分别为线路 M、发电机 G、线路 N 的对地集中电容); 曲线 2 表示 N_1 段、M 线及电源(发电机)的零序电流之和; 曲线 3 表示 M 线及电源(发电机)的零序电流之和; 曲线 4 表示是 N_2 段的零序电流。

图 6(a)表明在故障时出现零序电流,故障结束由于电网的电感电容效应零序电流经短时持续后置零,在幅值大小上有曲线 1=曲线 2+曲线 4 的关系, N_1 段的零序电流=曲线 2-曲线 3。则网络零序电流分布如图 7 所示。

图 6(b)中曲线是 3 个不同测量点零序电压,它们几乎完全重合,并且模值大小近似为相电压。说

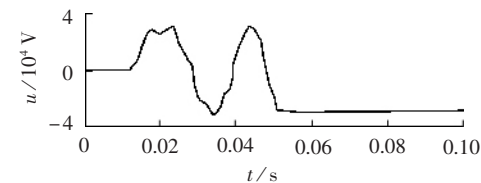


图 4 电源中性点电压波形
Fig.4 Voltage waveform at neutral point of power source

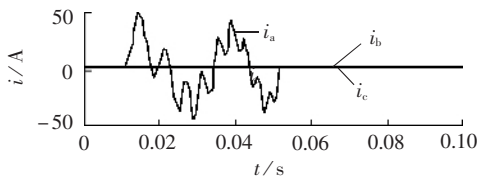
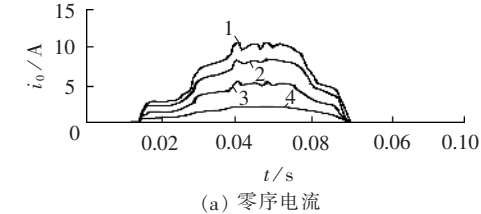
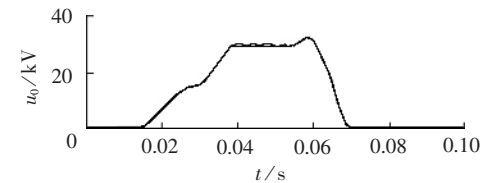


图 5 故障点各相电流波形
Fig.5 Phase current waveforms at fault point



(a) 零序电流



(b) 零序电压

图 6 电网零序电流、电压波形
Fig.6 Zero sequence current and voltage waveforms

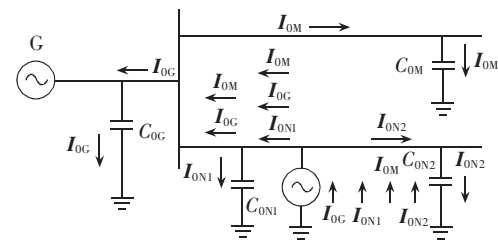


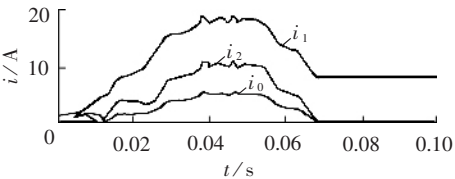
图 7 零序电流分布图

Fig.7 Distribution diagram of zero sequence current

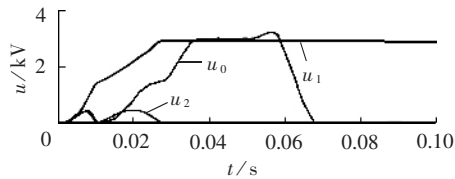
明中性点不接地系统发生单相接地故障时,全系统出现零序电压处处近似相等,且等于系统的相电压。

2.5 三序电流、电压分析

图 8(a)为电源侧故障线路的三序电流波形图,图中从上到下依次为正序、负序、零序。由图可见,接地期间正序、负序、零序三序电流都增加,正序最大,负序次之,零序最小,故障结束后只剩下正序电流分量。从图 8(b)中发现,发生单相接地时正、零序分量较大,而负序分量几乎为零,故障后只有正序电压。



(a) 三序电流



(b) 三序电压

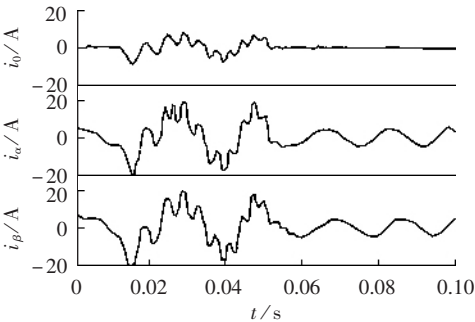
图 8 故障线路的电源侧三序电流和电压波形

Fig.8 Positive,negative and zero sequence currents and voltages at power side of fault line

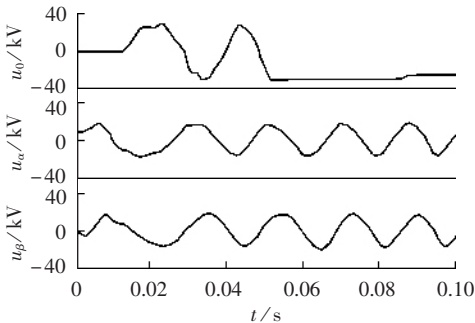
2.6 三相电压、电流经相模变换后的波形分析

图 9 为故障线路母线侧经相模变换后的三相电流、电压波形。

从图 9(a)可见:小电流接地电网单相接地时,模



(a) 三相电流



(b) 三相电压

图 9 经相模变换后的三相电流和三相电压

Fig.9 Three phase currents and voltages after Karenbauer conversion

电流发生较大的波动并伴有高频分量,故障结束后,0模量变为零,而 α 模、 β 模分量仍然存在,但只有低频分量,以零轴为中心波动。0模电压只有故障时出现,幅值几乎为 α 模、 β 模分量的两倍,故障结束后,波轴心下移,经3s回到零轴为中心波动。 β 模电流分量是由A、C两相电流差表示的(见数学模型式(3)),当A、C两相之一发生单相接地时,可用 β 模电流分量的突变量确定故障相,当B相接地时,可用A或C相电流突变量确定故障相。图9(b)显示:0模电压在故障时出现,幅值几乎为 α 模、 β 模分量的2倍,故障结束后,波轴心下移,经3s后恢复正常。因此,完全解耦0模、 α 模、 β 模分量是进行故障选线和测距的优先考查对象,有必要充分认识。

3 结语

通过对中性点不接地电网单相接地故障进行大量仿真分析,得出了一般性结论,与文献[1,9-10]有别,其差异在于以下两点。

在故障线路上,故障点(接地点)流过的零序电流为全系统非故障元件对地电容电流之和,数值一般较大。故障点与母线间的故障线路 N_1 段电容性无功功率方向为线路流向母线,其值并不等于全系统非故障元件对地电容电流之和,而等于全系统非故障元件对地电容电流之和减去故障线路上故障点至末端部分 N_2 段非故障元件电容电流, N_2 电容性无功功率方向为故障点流向线路(末端)。故障线路与母线交汇处的零序电流等于全系统非故障元件对地电容电流之和减去故障线路两相非故障元件的电容电流(如图7所示)。

参考文献:

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 李光骑. 电力系统暂态分析[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,1995.
- [3] 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.
- [4] 吴天明,谢小竹,彭彬. Matlab 电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

- [5] 王宏. Matlab 6.5 及其在信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [6] 张志勇. 精通 Matlab 6.5 版[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [7] 蔡玉梅,何正友,王志兵,等. 行波法在10 kV 铁路自闭/贯通线故障测距中的应用[J]. 电网技术,2005,29(1):15-19.
CAI Yu-mei, HE Zheng-you, WANG Zhi-bing, et al. Application of traveling wave based fault location in 10 kV railway automatic blocking and continuous power transmission lines[J]. Power System Technology, 2005, 29(1):15-19.
- [8] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [9] 葛耀中,窦秉国. 非直接接地系统中检出单相接地线路的新方法[J]. 继电器,2001,29(9):1-5.
GE Yao-zhong, DOU Cheng-guo. A new method for detecting single phase to ground fault line in non solidly grounded[J]. Relay, 2001, 29(9):1-5.
- [10] 毛鹏,段玉倩,姜娜. 基于相关分析的故障选线方法[J]. 电网技术,2004,28(2):36-39.
MAO Peng, DUAN Yu-qian, JIANG Na. A correlation analysis based method to detect faulty line under single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(2):36-39.
- [11] 贾清泉,杨奇逊,杨以涵. 基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判断融合[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):6-11.
JIA Qing-quan, YANG Qi-xun, YANG Yi-han. Fusion strategy for single phase to ground fault detection implemented through fault measures and evidence theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12):6-11.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

蔡维(1968-),男,土家族,湖南龙山人,硕士研究生,工程师,研究方向为继电保护及电力系统监控(E-mail:caiwei_68@163.com);

王华荣(1982-),男,湖南衡阳人,硕士研究生,研究方向为继电保护及电力系统监控;

刘承志(1963-),男,四川成都人,副教授,研究方向为继电保护及电力系统监控;

陈昌儒(1950-2005),男,湖南龙山人,工程师,从事电力系统生产方面的工作。

Simulation of single-phase grounding fault on non-grounding neutral power system and new conclusions

CAI Wei, WANG Hua-rong, LIU Cheng-zhi, CHEN Chang-ru

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The modeling and simulation of single-phase grounding fault on non-ground neutral power system are introduced. The three-phase currents and voltages are converted to positive, negative and zero sequence currents and voltages respectively, then to $0\alpha\beta$ amplitudes with Karenbauer conversion for further analysis. General conclusions are extracted and the difference of zero sequence current distribution from classical theory is found.

Key words: wavelet analysis; Karenbauer conversion; power system simulation model; mathematical model; capacitance current; relay protection