关于 500kV 牡郑线的绝缘地线对零序参数影响的研究

张太升，鄢安河，何南强，杜凌

(河南电力调度通信中心，河南 郑州　450052)

摘要：高压线路的架空地线除了用于防雷保护输电线路外，还是线路零序参数的组成部分。架空地线绝缘之后，可以减少输电时的损耗。结合实际分析了分段绝缘地线对线路零序参数的影响以及在线路参数测量时要注意的问题。

关键词：分段绝缘地线；　零序阻抗

中图分类号：TM711　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003-4897(2001)03-0027-04

1　引言

河南省双回 500kV 线路牡郑线西起于洛阳市北郊牡丹变，东止于郑州市南郊小刘变(南边为 I牡郑，北边为 II牡郑)，全长 129.055 km，洛阳侧有 69.668km 是同塔架设，郑州侧有16.188km 为同塔架设，其余为单回平行线路，两线平行间距为 70～80m。全线采用一个全循环换位。导线采用 4 × LGJX-400/35 稀土钢芯铝绞线，最北边的地线是 OPGW 复合地线光缆，其它为 LXGJ-80 钢绞线(两端分流线除外)。

为避免地线上经常流过感应电流而产生的电能损失，牡郑线全线地线按分段绝缘一点接地设计：OPGW 全线接地；铝绞线分段绝缘，双回线部分限制在 6km 以下，单回线部分限制在 10km 以下。地线采用间隙绝缘，绝缘地线对地绝缘电压控制在 500V 左右。

2　要讨论的问题

在常规的线路设计中，地线在每一基杆塔上通过杆塔与大地相连，这样在电网中发生不对称接地故障时，地线和大地形成的并联回路对导线有去磁作用，因此地线对电网的零序参数有着很大的影响。采用绝缘地线后，在电网发生不对称接地故障时，绝缘地线能否起到和常规地线一样的作用呢？回答这个问题的关键在于电网故障时，地线的绝缘间隙能否被击穿。我们可以先假设此绝缘间隙不会被击穿，在这种前提下分析故障时绝缘间隙能感受到的电压，如果该电压大于设计的绝缘间隙耐受电压(500V)，那么认为间隙应该被击穿，否则就不能被击穿。

试验人员在第一次做试验时没分析清楚这个问题，直接按照常规的试验方法对线路参数进行了测量。实际上，在常规的试验方法中线路中流过的零序电流($3I_0$)一般只有几十安～一百多安，这和故障时流过线路的电流(一般为几百安～几千安，甚至上万安)相差较大，绝缘地线的工作状况是不一样的，下面做详细的分析。

3　绝缘地线的形式

3.1　常用的绝缘地线绝缘方式

绝缘地线的绝缘方式主要有两种：双避雷线全绝缘方式和节约能损的避雷线绝缘方式。双避雷线全绝缘方式主要在两根地线耦合作为载波通道时采用，在这里不予讨论。节约能损的地线绝缘方式有如图 1 所示两种情况。

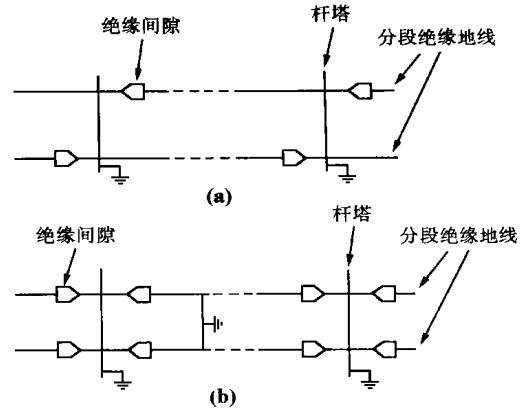

图 1　节约能损的地线分段绝缘方式

3.2　牡郑线的地线分段绝缘方式

牡郑线在不同线段，两种节约能损的绝缘方式都有采用。采用图 1 中(b)方式时，接地点的两边线段长度控制在 6km(同塔架设段)或 10km(单回线段)左右。

4 理论分析

4.1 双地线分段绝缘(Ⅰ牡郑单回部分)

图 2 是双地线都分段绝缘的卡松线路等值图,线路中流过的电流为 $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c$,有 $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_0$。

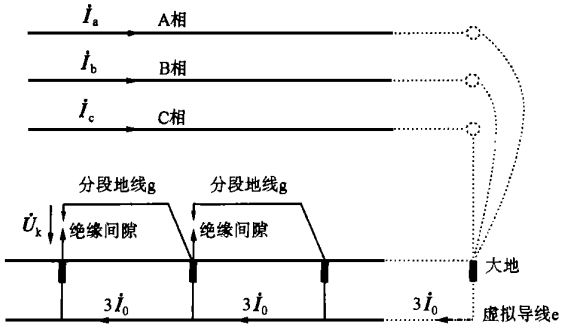

图 2 双地线都分段绝缘的卡松线路等值图

假设绝缘间隙不被击穿,那么间隙上感受到的电压为:

$$\dot{U}_k = \left\{ \begin{array}{ll} \dot{I}_a k(\ln\frac{21}{D_{sg}} - 1) & \text{a 相电流在分段地线 g 上产生的互感压降} \\ + \dot{I}_b k(\ln\frac{21}{D_{sg}} - 1) & \text{b 相电流在分段地线 g 上产生的互感压降} \\ + \dot{I}_c k(\ln\frac{21}{D_{sg}} - 1) & \text{c 相电流在分段地线 g 上产生的互感压降} \\ + 3\dot{I}_0[k(\ln\frac{21}{D_{ee}} - 1) + R_e] & \text{零序电流在虚拟导线自感上产生的压降} \\ - 3\dot{I}_0 k(\ln\frac{21}{D_{eg}} - 1) & \text{虚拟导线上的电流在分段地线 g 上产生的互感压降} \\ - \dot{I}_a k(\ln\frac{21}{D_{se}} - 1) & \text{a 相电流在虚拟导线上产生的互感压降} \\ - \dot{I}_b k(\ln\frac{21}{D_{se}} - 1) & \text{b 相电流在虚拟导线上产生的互感压降} \\ - \dot{I}_c k(\ln\frac{21}{D_{se}} - 1) & \text{c 相电流在虚拟导线上产生的互感压降} \end{array} \right\} \times L$$

式中: $k = 2 \times 10^{-7}\omega$

$D_{sg} = \sqrt[3]{D_{ag} D_{bg} D_{cg}}$ 三相导线与地线之间的互几何均距

$D_{se} = \sqrt[3]{D_{ae} D_{be} D_{ce}}$ 三相导线与虚拟导线之间的互几何均距

$D_{eg} = \sqrt[3]{D_{eg} D_{eg} D_{eg}}$ 地线与虚拟导线之间的互几何均距

D_{ee} :虚拟导线的自几何均距

L : 分段地线的分段长度

R_e :大地等值电阻

化简上式可得:

$$\dot{U}_k = 3\dot{I}_0 L\,(k\ln\frac{D_e}{D_{sg}} + R_e)$$

式中: $D_e = \frac{D_{eg} D_{se}}{D_{ee}}$ 在卡松公式中 D_e 称为地中虚拟导线的等值深度,它是大地电阻率 ρ_e (Ω·m) 和频率 f (Hz) 的函数: $D_e = 660\sqrt{\frac{\rho_e}{f}}$ m

4.2 双地线一条接地,一条分段绝缘(双回线同塔共架和Ⅱ牡郑单回部分)

地线 g1 全线接地,地线 g2 分段绝缘。图 3 是相应的卡松线路等值图。在计算中假设地线 g1 和大地电阻是均匀的,在每一段线路中,就可以认为地线和大地中的电流分配比例是固定的。

利用电工学原理可以推出:

$$\dot{I}_{g10} = \frac{R_e + k\ln\frac{D_{g1e} D_{se}}{D_{sg} D_{ee}}}{R_e + R_{g1} + k\ln\frac{D^2_{g1e}}{D_{g1} D_{ee}}} 3\dot{I}_0$$

$$\dot{I}_{e0} = \frac{R_{g1} + k\ln\frac{D_{g1e} D_{sg1}}{D_{g1} D_{se}}}{R_e + R_{g1} + k\ln\frac{D^2_{g1e}}{D_{g1} D_{ee}}} 3\dot{I}_0$$

假设绝缘间隙不被击穿,地线 g2 绝缘间隙上感受到的电压为:

$$\dot{U}_k = \left\{ \begin{array}{ll} 3\dot{I}_0 k(\ln\frac{21}{D_{sg2}} - 1) & \text{三相零序电流在分段地线 g2 上产生的互感压降} \\ - \dot{I}_{g10} k(\ln\frac{21}{D_{g1g2}} - 1) & \text{地线 g1 的电流在地线 g2 上产生的互感压降} \\ - \dot{I}_{e0} k(\ln\frac{21}{D_{eg2}} - 1) & \text{虚拟导线的电流在地线 g2 上产生的互感压降} \\ + \dot{I}_{e0}[R_e + k(\ln\frac{21}{D_{ee}} - 1)] & \text{虚拟导线的电流在虚拟导线自感上产生的压降} \\ - 3\dot{I}_0 k(\ln\frac{21}{D_{se}} - 1) & \text{三相零序电流在虚拟导线上产生的互感压降} \\ + \dot{I}_{g10} k(\ln\frac{21}{D_{eg1}} - 1) & \text{地线 g1 的电流在虚拟导线上产生的互感压降} \end{array} \right\} \times L$$

化简上式可得:

$$\dot{U}_k = \left\{ \begin{array}{l} 3\dot{I}_0[R_e + k\ln\frac{D_e}{D_{sg2}}] - 3\dot{I}_0 \\ \frac{[R_e + k\ln\frac{D_e}{D_{g1g2}}][R_e + k\ln\frac{D_e}{D_{sg1}}]}{R_e + R_{g1} + k\ln\frac{D_e}{D_{g1}}} \end{array} \right\} \times L$$

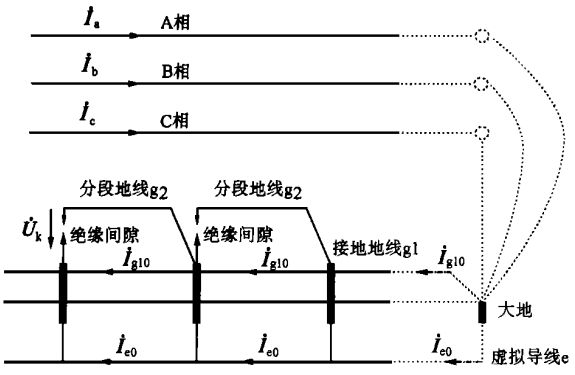

图 3　双地线一条接地,一条分段绝缘的卡松线路等值图

5　故障时牡郑线的地线绝缘间隙电压计算

5.1　线塔和导线的基本情况

绝缘子串平均长度为 5m,双回线塔以 SZT1(4)-36 为例,单回线塔以 ZB1(4)-36 为例。具体结构参数参见图 4。牡郑线导地线的基本情况见表 1。

表 1　牡郑线导地线基本情况

	型　号	外径(mm)
导线	4×LGJX-400/35	26.82
地线	LXGJ-80	11.5
	OPGW-85	13.49
	OPGW-145	15.4

5.2　故障情况下不同线段地线绝缘间隙电压计算

由于互感阻抗中电阻分量所占比例较小,它对互感电压的影响很小,因此为简便起见,在计算中忽略电阻分量。

5.2.1　同塔架设部分

地线 g1 为 OPGW,直接接地,以 OPGW-145 为例计算。地线 g2 为 LXGJ-80。

$$D_{sg2}=\sqrt[3]{D_{ag2}D_{bg2}D_{cg2}}=\sqrt[3]{20.44\times30.12\times37.97}=28.59$$

$$D_{g1g2}=20.6$$

$$D_{sg1}=\sqrt[3]{D_{ag1}D_{bg1}D_{cg1}}=\sqrt[3]{9.82\times21.31\times32.73}=18.99$$

$$D_{g1}=re^{-\frac{1}{4}}=7.7\times10^{-3}\times0.7788=6\times10^{-3}$$

D_e:郑州和洛阳地区基本上处于黄河冲积区,属于冲积土和软粘土层,平均年降雨量约为 500mm 左右,这种地质状况和天气条件下,大地电导率约为 200×10^{-3} s/m。

$$D_e=660\sqrt{\frac{\rho_e}{f}}=660\times\sqrt{\frac{1}{200\times10^{-3}\times50}}=208.7\text{m}$$

$$\dot U_k=\left\{\frac{3\dot I_0\left[R_e+k\ln\frac{D_e}{D_{sg2}}\right]-3\dot I_0\left[R_e+k\ln\frac{D_e}{D_{g1g2}}\right]\left[R_e+k\ln\frac{D_e}{D_{sg1}}\right]}{R_e+R_{g1}+k\ln\frac{D_e}{D_{g1}}}\right\}\times L\ (\text{忽略电阻分量})$$

$$=3\dot I_0 kL\left[\ln\frac{D_e}{D_{sg2}}-\frac{\ln\frac{D_e}{D_{g1g2}}\ln\frac{D_e}{D_{sg1}}}{\ln\frac{D_e}{D_{g1}}}\right]$$

$$=j3\dot I_0\times2\pi f\times2\times10^{-7}\times6\times10^{3}\times\left[\ln\frac{208.7}{28.59}-\frac{\ln\frac{208.7}{20.6}\ln\frac{208.7}{18.99}}{\ln\frac{208.7}{6\times10^{-3}}}\right]$$

$$=j3\dot I_0\times0.55$$

按常用的 $D_e=1000$m 计算 $\dot U_k=j3\dot I_0\times0.8576$

5.2.2　单回线部分(一条地线分段绝缘,一条地线为 OPGW)

地线 g1 为 OPGW,直接接地,以 OPGW-145 为例计算。地线 g2 为 LXGJ-80。

$$D_{sg2}=\sqrt[3]{D_{ag2}D_{bg2}D_{cg2}}=\sqrt[3]{10.15\times14.18\times24.03}=15.12$$

$$D_{g1g2}=20.1$$

$$D_{sg1}=15.12$$

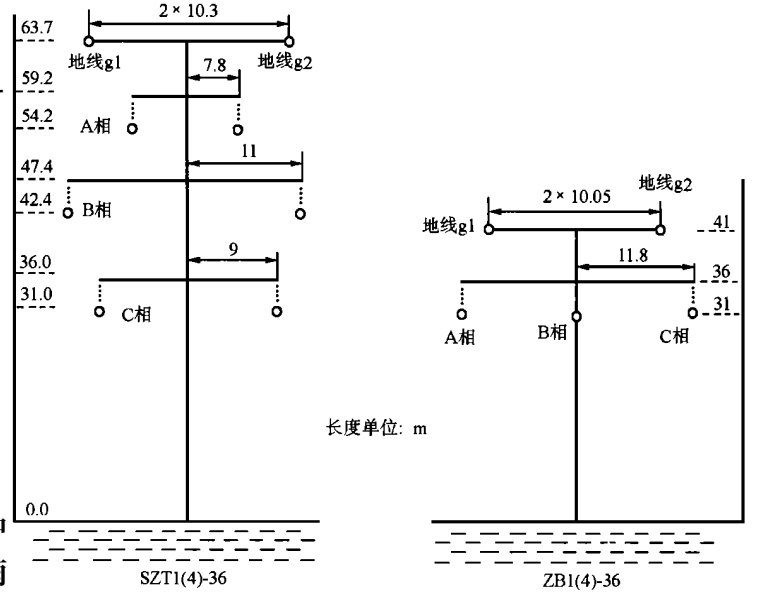

图 4　线塔和导线结构参数图

$D_{g1} = re^{-\frac{1}{4}} = 7.7 \times 10^{-3} \times 0.7788 = 6 \times 10^{-3}$

$D_e = 208.7$

$$\dot{U}_k = 3\dot{I}_0 kL\left[\ln\frac{D_e}{D_{sg2}} - \frac{\ln\frac{D_e}{D_{g1g2}}\ln\frac{D_e}{D_{sg1}}}{\ln\frac{D_e}{D_{g1}}}\right]$$ (忽略电阻分量)

$$= j3\dot{I}_0 \times 2\pi f \times 2 \times 10^{-7} \times 10 \times 10^3 \times \left[\ln\frac{208.7}{15.12} - \frac{\ln\frac{208.7}{20.1}\ln\frac{208.7}{15.12}}{\ln\frac{208.7}{6\times10^{-3}}}\right]$$

$$= j3\dot{I}_0 \times 1.28$$

按常用的 $D_e = 1000m$ 计算 $\dot{U}_k = j3\dot{I}_0 \times 1.778$

5.2.3 单回线部分(双地线全部分段绝缘)地线 g1、g2 都是 LXGJ-80。

$D_{sg} = 15.12$

$D_e = 208.7$

$$\dot{U}_k = 3\dot{I}_0 L\left(k\ln\frac{D_e}{D_{sg}} + R_e\right)$$ (忽略电阻分量)

$$= 3\dot{I}_0 kL\ln\frac{D_e}{D_{sg}}$$

$$= j3\dot{I}_0 \times 2\pi f \times 2 \times 10^{-7} \times 10 \times 10^3 \times \ln\frac{208.7}{15.12}$$

$$= j3\dot{I}_0 \times 1.65$$

按常用的 $D_e = 1000m$ 计算 $\dot{U}_k = j3\dot{I}_0 \times 2.634$

表 2 是以上三种情况的总结。

表 2 牡郑线三种情况比较

	情况 1:牡郑线同塔架设段	情况 2:Ⅱ牡郑单回线段(北边)	情况 3:Ⅰ牡郑单回线段(南边)
故障时绝缘间隙感受到的电压(D_e = 208.7m)	$j3\dot{I}_0 \times 0.55$	$j3\dot{I}_0 \times 1.28$	$j3\dot{I}_0 \times 1.65$
故障时绝缘间隙感受到的电压(D_e = 1000m)	$j3\dot{I}_0 \times 0.8576$	$j3\dot{I}_0 \times 1.778$	$j3\dot{I}_0 \times 2.634$

在间隙绝缘电压为 500V 的情况下,绝缘间隙被击穿需要线路上流过的零序电流如表 3 所示。

发生故障时,牡郑线上流过的零序电流如表 4 所示。

可以看出,在大方式的情况下,绝缘地线的绝缘间隙毫无疑问地会被击穿。但是在小方式下,考虑到线路经过地区的实际情况,以及计算中各种误差的影响,绝缘间隙很有可能不会被击穿。这就是说故障时,随着运行方式的变化,牡郑线表现出来的零序阻抗是不固定的。

表 3 牡郑线绝缘间隙被击穿所需的零序电流

	情况 1:牡郑线同塔架设段	情况 2:Ⅱ牡郑单回线段(北边)	情况 3:Ⅰ牡郑单回线段(南边)
击穿绝缘间隙所需零序电流 $3\dot{I}_0$(D_e = 208.7m)	≥909A	≥391A	≥303A
击穿绝缘间隙所需零序电流 $3\dot{I}_0$(D_e = 1000m)	≥583A	≥281A	≥190A

表 4 故障时牡郑线实际流过的零序电流

		牡丹 500kV 母线故障	郑州 500kV 母线故障
牡郑线流过的零序电流	最大电流	2956A	3263A
	最小电流	736A	923A

注:以上数据是计算值,(牡郑线参数按地线绝缘间隙击穿计算)

6 结论和建议

由以上分析,可以得出结论:(1)随着系统运行方式的变化以及故障点的远近,接地故障时,分段绝缘地线的间隙可能被击穿也可能不被击穿,从而使牡郑线的零序阻抗呈现不同的值,并且在一定范围内影响到系统零序电流的分布;(2)在保护定值计算的过程中(特别是牡郑线附近的保护),应该充分考虑到因牡郑线零序参数变化带来的影响。适当地调整保护的灵敏度和可靠系数,以防系统发生故障时保护拒动或误动;(3)在实测线路零序参数过程中,不但应该测出绝缘间隙不击穿时的线路零序阻抗,也应该测出绝缘间隙击穿时的线路零序阻抗,为电网计算提供可靠的参数;(4)设计线路绝缘间隙过程中,在可靠满足正常运行时绝缘间隙不被击穿的情况下,尽量降低绝缘间隙的击穿电压,使得在任何运行方式下近处发生接地故障,绝缘间隙都能被击穿。这样,线路的零序阻抗就可认为是一个固定的值,不仅有利于计算出可靠的保护定值,更重要的是为电网安全运行奠定了基础。

参考文献:

[1] 何仰赞,等. 电力系统分析,武汉:华中理工大学,1984.

[2] 能源部东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册. 北京:水利电力出版社,1991.

收稿日期: 2000-10-27

作者简介: 张太升(1969 -),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护的研究;鄢安河(1952 -),男,本科,高级工程师,从事电力系统继电保护的研究;何南强(1944-),男,硕士,教授级高工,从事电力系统方面的研究。

220～500kV 电网继电保护整定计算专家系统

赖业宁[1] ,韦　化[1] ,文　杰[2] ,刘东平[2] ,孟菊芳[2] ,尹志民[3]

(1. 广西大学电气工程学院 ,广西 南宁 530004;　2. 广西电网调度中心 ,广西 南宁 530023;

3. 广西钦州供电局 ,广西 钦州 535000)

摘要: 以广西电网为研究对象 ,将专家系统技术引入电力系统继电保护整定计算 ,开发了一个实用型的专家系统。在常规知识表示方法的基础上 ,提出了两种新的知识表示方法 ,即基于 MS - ACCESS 产生式系统和基于 MS-ACCESS 的框架表示法 ,这使得知识库在算法实现上十分简便。文中还提出了一种"规则驱动"的整定计算思想 ,并使用这一思想开发系统的推理机和整定计算模块。本系统能提供详尽的推理计算过程 ,解释并自动生成满足电力行业标准的定值通知单 ,已成功地运行于广西 220～500kV 电网。

关键词: 电力系统;　专家系统;　继电保护;　整定计算

中图分类号: TM77　　**文献标识码**:B　　**文章编号**:1003-4897(2001)03-0031-04

1　引言

近年来我国电网发展很快 ,继电保护新装置的投入和老设备的更新改造频繁 ,保护配置国产与进口共存 ,种类多 ,数量大。省级电网调度中心每年都有大量的定值单发往下属的各厂站。目前 ,各省调(更不用说地调及以下各级调度所)进行电网继电保护整定计算的手段还相对滞后 ,基本上是沿用传统的手工整定与人工校核方法。这势必造成工作效率和管理水平的低下。为了将专业人员从繁重的日常工作中解放出来 ,提高电网运行管理水平 ,人们一直在寻求合适的解决方法。专家系统技术的出现提供了一种可行的途径。文[1]报道了一个输电线路保护整定专家系统。该专家系统仅限于整定 TOSHIBA 和 GE 公司的保护产品 ,其协调继电器配合的能力并非在全范围内有效 ,一些功能还不完善。进一步的工作是将故障计算软件包与专家系统连接起来 ,以实现自动的数据输入。文[2]在文[1]的基础上就规则表示方式、规则库的编写与管理、冲突协调原则等方面作了改进 ,使系统的运行速度大大提高。文[3]对继电保护整定计算专家系统工具的选择、开发和运用进行了简要地介绍并推荐在总体结构上采用黑板模块。文[4]介绍了一个高压电网零序电流保护整定计算的专家系统。该系统针对零序保护中的一些问题 ,应用专家系统理论及智能化程序设计方法 ,并结合常规的零序电流保护整定计算思想来研制与开发的 ,具有较大的可维护性与适应性。文[5]介绍了一个电力网继电保护整定计算专家系统。该系统主要针对 220～500kV 电网零序电流保护、相间距离保护、接地距离保护的整定计算进行设计 ,已在四川省电力工业局试运行 ,但定值管理方面尚待进一步完善。

从目前已开发的保护整定专家系统来看 ,在解决逻辑推理与数值计算问题上效果不甚理想 ,均为面向某一保护类型而非面向装置开发 ,不能很好处理辅助元件的整定 ,因而与实用还有一定距离。本文提出了"规则驱动"的整定思想并面向保护装置开发 ,较好地完成了电网继电保护整定计算的任务。

2　系统概况

保护整定的基本任务是计算出各种保护装置的整定值。它需按照一定的整定原则 , 以电网故障分

Study on the effect of insulation to earth on zero sequence parameters in 500kV Mudan to Zhengzhou line , China

ZHANG Tai - sheng , YAN An - he , HE Nan - qiang , DU Ling

(Henan Power Dispatch & Communication Center , Zhengzhou450052 , China)

Abstract : Sectional insulation earth wire can reduce transmission line loss , but it also has influence on the zero sequence parameters of transmission line. In this paper , the influence of the sectional insulation earth wire on the zero sequence parameters is analyzed in theory.

Keywords : sectional insulation earth wire ;　zero sequence impedance