

基于增益阻抗理论的故障选线方法

朱 珂, 徐文远

(山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 基于增益阻抗概念, 提出了一种全新而有效的解决中性点非有效接地系统单相接地选线问题的方法: 即利用单相接地故障过程中产生的暂态扰动来寻求非故障侧的增益阻抗, 借助该阻抗和相应判据实现故障线路的判定。如果故障发生在测量点上游, 测得的增益阻抗为下游等效阻抗; 如果故障发生在下游, 则增益阻抗为上游等效阻抗的负值。借助等效序网论证了采用零序增益阻抗具有更强的可实施性, 进而针对中性点不接地系统和谐振接地系统分别推导出了基于基波和五次谐波零序增益阻抗的单相接地故障选线判据。大量仿真和动模实验结果都验证了该方法的有效性。该方法物理概念明确, 实施简单。

关键词: 增益阻抗; 非有效接地系统; 不接地系统; 谐振接地系统; 故障选线

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0018-04

我国大多数配电网均采用中性点非有效接地方式, 由于发生单相接地时, 供电仍能保持线电压的对称性, 且故障电流较小, 不影响对负荷连续供电, 故不必立即跳闸, 规程规定可继续运行 1~2 h。但随着馈线的增多, 以及电缆的广泛使用, 电容电流不断增大, 单相接地后长时间运行就易使故障扩大成 2 点或多点接地短路, 弧光接地还会引起全系统过电压, 进而损坏设备, 破坏系统安全运行, 所以必须及时找到故障线路予以切除^[1-13]。

根据增益阻抗理论^[14]提出了一种全新的故障选线方法, 即通过计算故障过程中每条出线端的零序增益阻抗, 并根据文中推导出的中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统的接地选线判据实现故障线路的选定。理论分析、仿真实验以及动模实验都验证了该方法的有效性。

1 原理依据

通常借助增益阻抗 Z_e 的相角判断故障发生的方向^[15], Z_e 的值可由下式求得:

$$Z_e = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{p,dur} - U_{p,pre}}{I_{p,dur} - I_{p,pre}} \quad (1)$$

式中 $U_{p,dur}$ 和 $I_{p,dur}$ 为故障发生时的相电压和电流; $U_{p,pre}$ 和 $I_{p,pre}$ 为故障发生前瞬间的相电压和电流。可借助图 1 对增益阻抗理论作进一步的了解。

故障发生前, M 点处满足:

$$U = E_U - IZ_U \quad (2)$$

如果在 M 点的下游方向发生故障, 则 M 点的电压电流分别变为 $U + \Delta U$ 和 $I + \Delta I$ 。如果假设故障发

生过程中 M 点上游侧的参数 (Z_U 和 E_U) 保持不变, 对 M 点可得出如下方程:

$$U + \Delta U = E_U - (I + \Delta I)Z_U \quad (3)$$

由于 M 点两侧同时发生故障的概率几乎为零, 所以认为非故障侧参数保持不变的假设是合理的。将式(2)与式(3)相减, 就可得到非故障侧即上游侧的阻抗 Z_U :

$$Z_U = -\Delta U / \Delta I \quad (4)$$

同理, 如果故障发生在 M 点的上游侧, 也可以得到下游侧的阻抗 Z_D :

$$Z_D = \Delta U / \Delta I \quad (5)$$

通过上述分析可以看到, $\Delta U / \Delta I$ 即所定义的增益阻抗 Z_e 的值, 因故障发生位置的不同而呈现不同的幅值和相角。所提出的选线原理就是借助增益阻抗 Z_e 来判断接地点的位置。实际上 Z_e 有其明确的物理概念, 如果上游侧发生接地故障, 它就是下游侧的等效阻抗; 如果下游侧发生接地故障, 它就是上游侧等效阻抗的负值。见图 2。

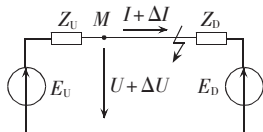


图 1 增益阻抗原理图
Fig.1 Incremental impedance theory

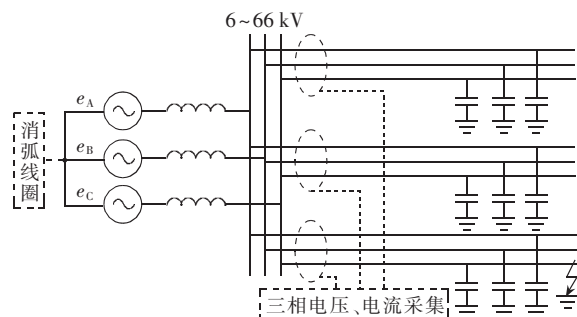


图 2 中性点非有效接地系统出线图
Fig.2 Outlets of system ineffectively grounded at neutral point

2 接地线路选择判据的建立

从理论上讲, 从各条出线出口处测得的各序分

量构成的增益阻抗都可对故障线路与非故障线路进行有效区分。但由于所述选线方案在具体实施过程中所遇到的问题,使得不同序分量构成的增益阻抗在选线效果上存在差异。下面通过理论分析推导出最佳的增益阻抗选线判据。

2.1 接地前后各序分量变化分析

中性点非有效接地系统发生单相接地后,各出线出口处算得的增益阻抗因所选取的序分量的不同而不同。对于图 2 中所示的中性点非有效接地系统,忽略线路自身阻抗,系统发生单相接地前后的近似序网如图 3、4 所示。图中, E 为接地相等效电源, Z_{S+} 、 Z_{S-} 分别为母线上游系统单相正、负序等效阻抗, Z_{C+} 、 Z_{C-} 和 Z_{C0} 分别为单相对地正序、负序和零序电容阻抗, Z_{L+} 、 Z_{L-} 为单相正、负序等效负荷, Z_X 为消弧线圈阻抗, R_f 为接地电阻, U_+ 为母线正序电压, U_- 为母线负序电压, U_0 为母线零序电压。

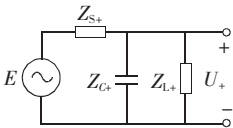


图 3 接地故障前近似等效正序网络
Fig.3 Equivalent positive sequence network before grounding fault

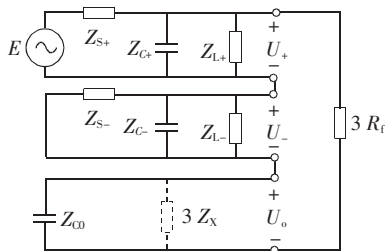


图 4 接地故障后近似等效复合序网
Fig.4 Equivalent compound sequence network after grounding fault

由图 3、4 可以看出,由于通常 Z_C 比母线上游系统阻抗和负荷等效阻抗大得多,造成了中性点非有效接地系统发生单相接地前后其正序和负序分量基本维持不变,而零序分量变化最大。考虑到实际系统中的众多干扰,所以难以通过故障前后正、负序电压电流的变化计算正、负序增益阻抗。应选择容易计算的零序增益阻抗来建立接地选线判据。

2.2 零序增益阻抗接地选线判据的建立

2.2.1 中性点不接地系统

对于中性点不接地系统,当出线发生单相接地时,假设每条出线一样长,忽略线路自身阻抗,在出线端根据基波测得的非故障线路与故障线路的零序增益阻抗 Z_{euf}^1 与 Z_{ef}^1 分别为

$$Z_{\text{euf}}^1 = \frac{1}{j\omega C_{\text{uf}}}, \quad Z_{\text{ef}}^1 = \frac{1}{j\omega(C_{\Sigma} - C_f)} \quad (6)$$

式中 C_{uf} 为各条非故障线路的单相对地零序电容; C_f 为故障线路的单相对地零序电容; C_{Σ} 为所有出线单相对地零序电容之和。

即非故障线路端测得的零序增益阻抗由该条出线单相对地电容构成,呈容性;而故障线路端测得的零序增益阻抗由所有非故障线路单相对地电容的负值构成,呈感性。

Z_{euf}^1 与 Z_{ef}^1 在直角坐标系中的位置如图 5 所示

(考虑了线路电阻)。

如果母线发生单相接地,由于对所有出线的监测点(出线端口处)来说故障点均位于其上游,所以测得的基波零序增益阻抗都应落在图 5 中 Z_{euf}^1 所在的区域。

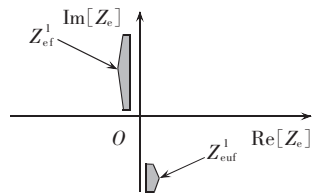


图 5 中性点不接地系统基波零序增益阻抗判据
Fig.5 Fundamental zero sequence incremental impedance criterion for system ungrounded at neutral point

2.2.2 中性点经消弧线圈接地系统

消弧线圈整定原则为流过消弧线圈的基波感性电流补偿所有对地基波电容电流。当中性点经消弧线圈接地系统某一出线发生单相金属性接地时,有

$$\frac{U}{j\omega L} + j3\omega C_{\Sigma}U = 0 \Rightarrow \omega L = \frac{1}{3\omega C_{\Sigma}} \quad (7)$$

设每条出线一样长,其中, U 为故障前接地相电压, L 为消弧线圈电感。

在故障线路出口处测得的零序增益阻抗 Z_{ef}^1 为

$$Z_{\text{ef}}^1 = - \left[j3\omega L // \frac{1}{j\omega(C_{\Sigma} - C_f)} \right] \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)得:

$$Z_{\text{ef}}^1 = 1 / (j\omega C_f)$$

而在非故障线路端口处有

$$Z_{\text{euf}}^1 = 1 / (j\omega C_{\text{uf}})$$

所以有

$$Z_{\text{euf}}^1 = 1 / (j\omega C_{\text{uf}}), \quad Z_{\text{ef}}^1 = 1 / (j\omega C_f) \quad (9)$$

对于中性点经消弧线圈接地系统,在未考虑线路电阻的情况下,利用基波算得的故障线路与非故障线路出口处的零序增益阻抗分别由各出线自身单相对地电容构成,均呈容性。由于其幅值的大小没有明确的关系,所以对于中性点经消弧线圈接地系统,无法利用基波算得的零序增益阻抗进行故障线路的选定。如果借助系统中含量较高的五次谐波计算零序增益阻抗,则有

$$\begin{aligned} Z_{\text{euf}}^5 &= \frac{1}{j5\omega C_{\text{uf}}} \\ Z_{\text{ef}}^5 &= - \left[j3 \cdot 5\omega L // \frac{1}{j5\omega(C_{\Sigma} - C_f)} \right] = \frac{j5}{\omega(24C_{\Sigma} - 25C_f)} \end{aligned} \quad (10)$$

通过式(10)可知,利用五次谐波算得的故障线路出口处的零序增益阻抗呈感性,而非故障线路的零序增益阻抗呈容性,所以完全可以用根据五次谐波算得的零序增益阻抗作为中性点经消弧线圈接地系统的故障选线依据。当中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地时,故障选线的五次谐波零序增益阻抗判据同中性点不接地系统的基波零序增益阻抗判据图 5 相类似。

3 仿真分析

3.1 仿真程序

利用零序增益阻抗进行故障选线方法的仿真程序有 3 点考虑。

a. 一旦发生接地故障,对每条出线故障前后所记录的电压、电流数据在每一周期内进行 Fourier 分析。对于中性点不接地系统,借助三相电压、电流的基波求得对应的零序分量;对于中性点经消弧线圈接地系统,借助三相电压、电流的五次谐波求得对应的零序分量。如果有零序电流互感器,直接采用采集到的零序电流即可。

b. 每一周期都对应着一个状态数据点。将故障发生过程中的零序电压、电流向量与故障发生前的零序电压、电流向量相减产生零序增益电压、电流向量,进而计算出零序增益阻抗。

c. 分析系统故障进入稳态后对应的零序增益阻抗向量所在象限,根据相应的判据判定接地线路。

3.2 仿真结果

设有 10 条出线,每条出线长 10 km,带负荷 1 MW, C 相接地,接地点距母线 10 km。对电压、电流数据进行 Fourier 分析时,每周期采 256 个点,故障前后各记录 10 个周期。图 6、7 为中性点不接地系统在发生单相接地时,在三相电压、电流采样数据中加入白噪声后的三相电压、电流和基波零序增益阻抗仿真图,图中箭头所指向的点为故障后系统进入稳态的运行点,箭头所在象限即为故障后稳态运行点所在象限。图 8、9 为针对中性点经消弧线圈接地系统得到的仿真结果。

实际应用中,所得原始数据可能是零序电压、电流在各周期内采样点。这样,只需根据中性点的运行方式(不接地还是经消弧线圈接地),通过 Fourier 分析,将每一周期内零序电压、电流的基波或五次谐波取出,进而求出相应增益阻抗,根据判据选定故障线路。

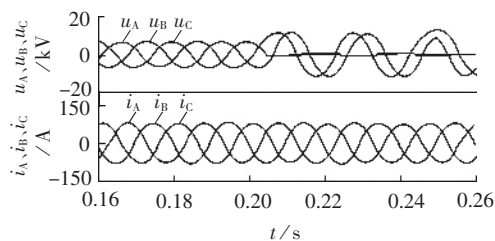


图 6 中性点不接地系统故障线路三相电压、电流

Fig.6 Three-phase voltages and currents of faulty system ungrounded at neutral point

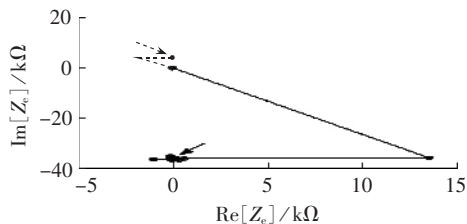


图 7 中性点不接地系统基波零序增益阻抗(加干扰)

Fig.7 Fundamental zero sequence incremental impedance of system ungrounded at neutral point(with noise)

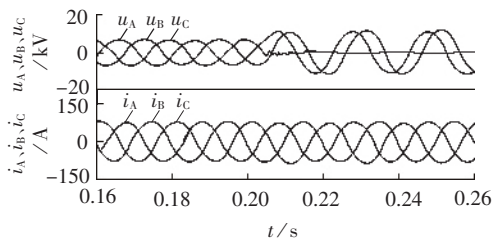


图 8 中性点经消弧线圈接地系统故障线路三相电压、电流

Fig.8 Three-phase voltages and currents of faulty system resonantly grounded at neutral point

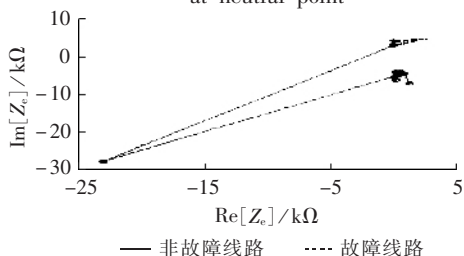


图 9 中性点经消弧线圈接地系统五次谐波零序增益阻抗(加干扰)

Fig.9 5th harmonic zero sequence incremental impedance of system resonantly grounded at neutral point(with noise)

4 动模实验结果

采用 NI DAQpad-6015 数据采集板和 LabView7.1 编写的数据采集程序对动模实验数据进行在线采集,实验结束后对数据进行处理,处理过程同 3.1 节。动模实验的电压等级为 220 V/380 V,线路参数按照 10 kV 系统设置。具体线路参数如表 1 所示(表中 λ 为负荷功率因数),所得到的实验结果如图 10、11 所示。

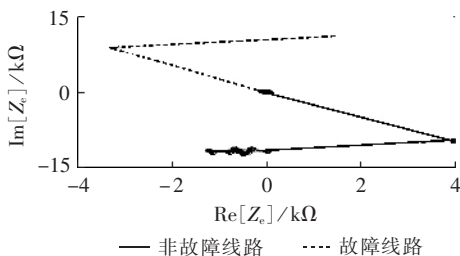


图 10 接地电阻 $R_f=100\ \Omega$ 时的基波零序增益阻抗

Fig.10 Fundamental zero sequence incremental impedance when R_f is 100 Ω

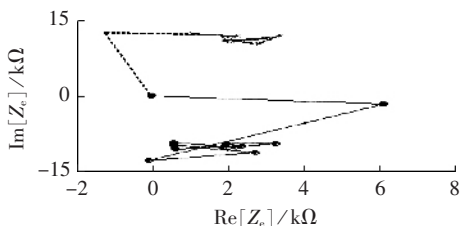


图 11 接地电阻 $R_f=4000\ \Omega$ 时的基波零序增益阻抗

Fig.11 Fundamental zero sequence incremental impedance when R_f is 4000 Ω

表 1 动模实验参数
Tab.1 Lab experiment parameters

中性点 运行方式	出线 条数	出线 $R_0/$ [$\Omega \cdot (\text{km})^{-1}$]	出线 $L_0/$ [$\text{H} \cdot (\text{km})^{-1}$]	出线 $C_0/$ [$\text{F} \cdot (\text{km})^{-1}$]	长度/km	负荷/MW	λ	接地 线路	接地 相	接地点 位置
不接地	2	0.6	1.27×10^{-3}	9×10^{-9}	23/11	3/1.5	0.8/0.8	出线 2	B	出线 2 末端

注:表中长度、负荷及负荷功率因数数据格式为:出线 1 数据/出线 2 数据。

从上述动模实验结果可以看出,对于中性点不接地系统,即使在接地电阻很大时,接地线路与非接地线路出口处的基波零序增益阻抗的差异仍十分明显,其虚部的值与理论分析的结果一致。

5 结论

针对多年来一直困扰电力系统的配电网单相接地故障选线问题,根据增益阻抗理论,提出了一种全新的故障选线方法,即通过计算故障过程中每条出线端的零序增益阻抗,并根据相应的判据实现故障线路的判定。理论分析、仿真实验及动模实验都验证了该方法的有效性。该方法所依据的理论新颖,物理概念明确,现场实现简单,为国内小电流接地系统单相接地选线问题的解决提供了一种全新而有效的方案。

参考文献:

[1] 齐郑,杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(14):1-5.
QI Zheng,YANG Yi-han. Analysis of technology of fault line selection for single-phase-to-earth faults in neutral point non-effectively grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(14):1-5.

[2] 曾祥军,尹项根,张哲,等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(6):37-42.
ZENG Xiang-jun,YIN Xiang-gen,ZHANG Zhe,et al. Study for negative sequence current distributing and ground fault protection in middle voltage power system[J]. Proceeding of the CSEE,2001,21(6):37-42.

[3] 张兰,龚静,周有庆. 小电流接地系统单相接地暂态保护判据研究[J]. 湖南大学学报,2004,31(2):70-73.
ZHANG Lan,GONG Jing,ZHOU You-qing. A study of the protection of single phase faulted transient current in small current grounding power systems[J]. Journal of Hunan University,2004,31(2):70-73.

[4] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J].中国电机工程学报,2001,21(10):78-82.
JIA Qing-quan,LIU Lian-guang,YANG Yi-han,et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(10):78-82.

[5] 张慧芬,潘贞存,桑在中,等. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):64-66.
ZHANG Hui-fen,PAN Zhen-cun,SANG Zai-zhong,et al. Injecting current based method for fault location in neutral isolated power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(3):64-66.

[6] 杜永忠,李红霞,石永宁. 基于零序电流有功分量选择接地线路的方法[J]. 煤炭技术,2001,10(4):42-43.
DU Yong-zhong,LI Hong-xia,SHI Yong-ning. Fault line detection based on zero power component[J]. Coal Technology,2001,10(4):42-43.

[7] 唐秩,陈奎,陈庆,等. 导纳互差之绝对值和的极大值法小电流接

地选线研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(6),49-54.
TANG Zhi,CHEN Kui,CHEN Qing,et al. Study on earthed fault location method in indirectly grounding power system using maximum value of absolute value summation of measurement admittance mutual difference[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(6):49-54.

[8] 房鑫炎,郁惟镡,庄伟. 模糊神经网络在小电流接地系统选线中的应用[J]. 电网技术,2002,26(5):15-19.
FANG Xin-yan,YU Wei-yong,ZHUANG Wei. Application of fuzzy neural network to grounded line detection in neutral point indirectly grounded power system[J]. Power System Technology,2002,26(5):15-19.

[9] 何奔腾,胡为进. 能量法小电流接地选线原理[J]. 浙江大学学报,1998,32(4):451-456.
HE Ben-teng,HU Wei-jin. A new principle to detect the grounded line in a neutral point indirectly grounded power system based on the energy function[J]. Journal of Zhejiang University,1998,32(4):451-456.

[10] 曾祥君,尹项根,于永源,等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(1):29-36.
ZENG Xiang-jun,YIN Xiang-gen,YU Yong-yuan,et al. New method for control and protection rely in a compensated medium voltage distribution network based on injection various frequency current[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(1):29-36.

[11] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠,等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):48-53.
XUE Yong-duan,FENG Zu-ren,XU Bing-yin,et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(9):48-53.

[12] 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 Ren-zu,et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in no-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(7):51-56.

[13] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2001.

[14] MCLAREN P G,SWIFT G W,ZHANG Z,et al. A new directional element for numerical distance relays[J]. IEEE Trans Power Delivery,1995,10(2):666-675.

[15] BENMOUYAL G,CHANO S,Characterization of phase and amplitude comparators in UHS directional relays[J]. IEEE Trans on Power Systems,1997,10(2):646-653.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

朱 珂(1977-),男,山东兖州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统电能质量与电力电子技术应用(E-mail: sduzhuke@tom.com);

徐文远(1962-),男,四川乐山人,教授,博士研究生导师,IEEE fellow,教育部长江学者奖励计划特聘教授,主要研究方向为电能质量和谐波分析。

Faulty line detection based on incremental impedance theory

ZHU Ke,XU Wen-yuan

(School of Electrical Engineering,Shandong University,jinan 250061,China)

Abstract: Based on incremental impedance theory,a method of single-phase grounding line detection for power systems ineffectively grounded at neutral point is proposed,which applies the incremental impedance as criterion. The transient disturbance produced by the single-phase grounding fault is used to estimate the incremental impedance of normal side. If the grounding point is at upstream side of measuring point,the measured incremental impedance is the equivalent impedance of downstream side;if it is at down side,the measured incremental impedance is the negative of the equivalent impedance of upstream side. Equivalent sequence network is used to demonstrate that the zero - sequence incremental impedance is more sensitive for faulty line detection. The detection criteria of systems ungrounded and resonantly grounded at neutral point are set based on fundamental and 5th hamonic zero-sequence incremental impedances respectively. Simulation and lab experiments prove that,the proposed method is effective with clear physical concept and easy implementation.

Key words: incremental impedance; ineffectively grounded system; ungrounded system; resonantly grounded system; faulty line detection