

基于变电抗的接地选线新方法

何润华¹, 潘 靖², 霍春燕³

(1. 广州超高压局, 广东 广州 510000; 2. 汕头供电局, 广东 汕头 515041;

3. 河北省超高压局, 河北 石家庄 050000)

摘要: 针对中性点经可控消弧线圈接地电网单相接地故障选线困难的情况, 提出零序电流比幅接地选线新方法。分析了影响小电流接地选线的原因, 归纳出小电流接地选线主要要能够捕获暂态信息并作出正确判断。给出了零序电流比幅接地选线法理论推导, 得出了小电流接地系统在正常运行和发生单相接地故障时系统主要物理量的计算公式。利用 Matlab 仿真软件对所提方法的仿真结果表明, 该方法运算速度快、抗干扰能力强、选线准确; 特别是当单相接地故障发生在故障线路对地电压最小时所提方法也适用。

关键词: 可控消弧线圈; 故障选线; 零序电流比幅

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0048-05

0 引言

在中低压电网中, 通常采用小电流接地方式, 即中性点不接地、经高值阻抗接地或消弧线圈接地^[1]。由于消弧线圈的补偿, 接地残流过小, 接地故障辨识、故障选线困难^[2]。

目前, 国内外采用的新型故障选线方法有: 零序五次谐波电流选线法、零序暂态电流选线法、注入信号跟踪比较各出线零序信号电流幅值选线法^[3]及基于小波变换的接地选线法^[4-6]等。

前 2 种方法受系统运行方式及故障状态影响较大, 现场运行可靠性不高; 第 3 种方法采用外加信号, 在原理上有所改善; 第 4 种方法暂态过程持续时间较短, 而且无法重现, 因此必须能够捕获暂态信息并作出正确判断。但所有这些方法都需集中比较各条出线的零序测量电流大小或相位, 使得仪器接线复杂, 难以与馈线保护结合为一体并在开关柜上就地安装^[7]。

解决了小电流接地系统故障选线问题, 可以使保护装置在发生单相接地故障时及时选出故障馈线, 并根据实际决定是否跳闸, 从而避免中性点在高电位运行带来的安全隐患^[8], 大幅提高小电流接地系统运行水平, 提出零序电流比幅式接地选线法。

1 零序电流比幅式接地选线法

假定电网有 N 回馈线, 若第 J 回馈线的 A 相单接地, 故障点的弧道电阻用 R_J 表示。故障馈线零序电容 $C_{0J} = C_{aJ} + C_{bJ} + C_{cJ}$, 泄漏导纳为 $G_{0J} = G_{aJ} = G_{bJ} = G_{cJ}$; 非故障馈线零序电容 $C_{0k} = C_{ak} + C_{bk} + C_{ck}$, 泄漏导纳 $G_{0k} = G_{ak} = G_{bk} = G_{ck}$ ($k = 1, 2, \dots, N, k \neq J$)。同时令

$\sum_{k=1}^N G_{0k} = G_0, \sum_{k=1}^N C_{ak} = C_a, \sum_{k=1}^N C_{bk} = C_b, \sum_{k=1}^N C_{ck} = C_c, C_0 = C_a + C_b + C_c$, 配电网络等值电路图如图 1 所示^[9]。

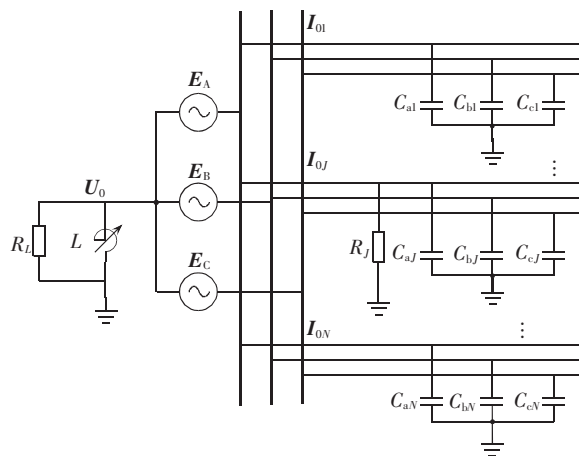


图 1 中性点经可控消弧线圈接地网络

Fig.1 Network with neutral point earthed via controllable arc suppression coil

假定三相线路对地电容相等, 即: $C_a = C_b = C_c, C_{aJ} = C_{bJ} = C_{cJ}$ 。

设通过消弧线圈支路的电流为 I_L , 则故障馈线的零序电流为

$$I_0 = E_A \frac{\sqrt{\left(3 \sum_{k=1, k \neq J}^N G_{0k} + \frac{1}{R_L}\right)^2 + \left(\omega \sum_{k=1, k \neq J}^N C_{0k} - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{R_J \sqrt{\left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_J} + 3G_0\right)^2 + \left(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (1)$$

非故障馈线零序电流 I_{0k} ($k = 1, 2, \dots, N; k \neq J$) 为

$$I_{0k} = E_A \frac{\sqrt{(3G_{0k})^2 + (\omega C_{0k})^2}}{R_J \sqrt{\left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_J} + 3G_0\right)^2 + \left(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (2)$$

分析式(1)(2), 可知当系统正常运行时, $R_J = \infty$, 故障馈线零序电流和非故障馈线零序电流均为零;

若为金属性接地故障,对应 $R_f=0$,则故障馈线零序电流 $I_{0J}=E_A\sqrt{\left(3\sum_{k=1,k\neq J}^N G_{0k}+\frac{1}{R_L}\right)^2+\left(\omega\sum_{k=1,k\neq J}^N C_{0k}-\frac{1}{\omega L}\right)^2}$,非故障馈线零序电流 $I_{0k}=E_A\sqrt{(3G_{0k})^2+(\omega C_{0k})^2}$,显然,若无消弧线圈,则故障馈线零序电流要大于非故障馈线零序电流,并且与故障点弧道电阻 R_f 大小无关。投入消弧线圈后,由于故障馈线零序电流中的容性电流分量被消弧线圈感性电流所抵消,在此时“故障馈线零序电流要大于非故障馈线零序电流”的结论并不成立。

在电网发生单相接地故障时,由式(1)和(2),对 N 回馈线的零序电流两两进行比值:

故障馈线与非故障馈线两者的零序电流比值为

$$\frac{I_{0J}}{I_{0k}} = \frac{\sqrt{\left(3\sum_{k=1,k\neq J}^N G_{0k}+\frac{1}{R_L}\right)^2+\left(\omega\sum_{k=1,k\neq J}^N C_{0k}-\frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(3G_{0k})^2+(\omega C_{0k})^2}} \quad (3)$$

$k=1,2,\dots,N; k\neq J$

第 m 条非故障馈线与第 n 条非故障馈线的零序电流比值为

$$\frac{I_{0m}}{I_{0n}} = \frac{\sqrt{(3G_{0m})^2+(\omega C_{0m})^2}}{\sqrt{(3G_{0n})^2+(\omega C_{0n})^2}} \quad (4)$$

$$m,n=1,2,\dots,N; m\neq n; m,n\neq J$$

从式(3)和(4)可看出,式(3)即含故障馈线零序电流比值项会随着消弧线圈容量的变化而改变。当故障馈线零序电流在分子时,则当消弧线圈容量从补偿状态退到空载,对应电抗值变大,比值最终会从小变大;若故障馈线零序电流在分母时,则比值变化情况正好相反。式(4)即非故障馈线零序电流比值,与消弧线圈电抗值无关,在消弧线圈容量变化过程中维持不变。

利用式(3)和(4)随消弧线圈容量的调节变化趋势的不同,可以区别故障线路和非故障线路,这就是“零序电流比幅式接地选线法”。这一方法考虑了线路泄漏电导和消弧线圈有功损耗的影响。

2 选线方法仿真

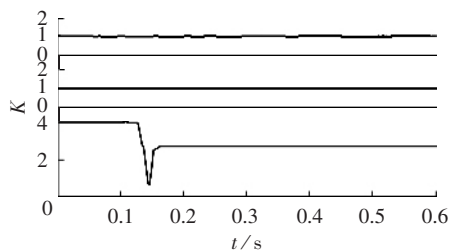
为验证式(3)(4)所提出的零序电流比幅选线新方法,用 Matlab 仿真软件进行了仿真计算和分析^[10]。电网电压等级为 10 kV,馈线 5 条。电网总零序电容为 36 μF ,阻尼率为 3%,消弧线圈额定补偿电流为 70 A,额定有功损耗为 2%。根据计算可知该电网在发生单相金属性接地时接地电流为 65 A。

仿真所用的消弧线圈采用了磁阀式消弧线圈,根据可控饱和电抗器的理论,搭建了磁阀式消弧线圈子模块^[11-13]。

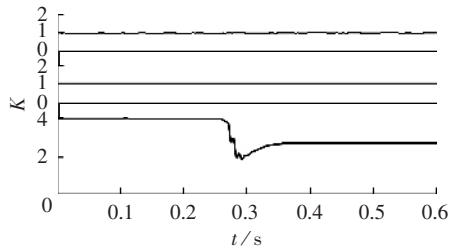
2.1 仿真试验 1

第 1 条馈线至第 5 条馈线零序电容均为 7.2 μF 。第 5 条馈线 A 相在 0.105 s 发生单相接地故障,0.6 s 时故障结束。图 2 为各条馈线零序电流比幅 K 的波形,图 2(a)弧道电阻 $R=0$,即发生金属性接地,

图 2(b)弧道电阻 $R=500 \Omega$ 。



(a) $R=0$



(b) $R=500 \Omega$

图 2 各馈线零序电流比幅波形

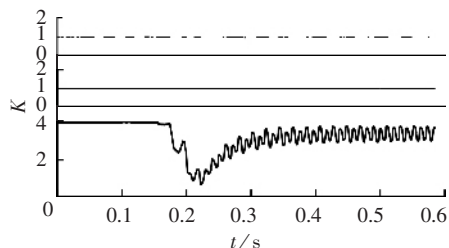
Fig.2 Waveforms of feeder ZSCR

图 2(a)(b) 3 条曲线分别表示 I_{02}/I_{01} 、 I_{04}/I_{03} 、 I_{05}/I_{04} 的变化(后面的仿真试验 2~4 相同),可看出不论弧道电阻为 0 或 500 Ω ,非故障馈线零序电流之间的比值在发生单相接地故障前后总是保持不变,而故障线路零序电流与非故障线路零序电流在发生单相接地故障前后有明显的变化趋势,这可以作为区分故障线与非故障线的标准。

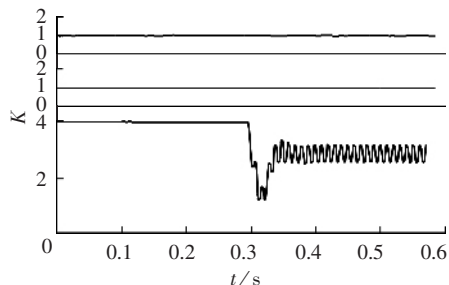
仿真试验 2~4 结论与此类似,不重复叙述。

2.2 仿真试验 2

第 5 条馈线零序电容占整个电网零序电容的 40%,为 14.4 μF 。第 5 条馈线 A 相在 0.2 s 发生单相接地故障,0.6 s 时故障结束。图 3 为各馈线零序电流比幅 K 波形,(a)(b)弧道电阻分别为 0、500 Ω 。



(a) $R=0$



(b) $R=500 \Omega$

图 3 各馈线零序电流比幅波形

Fig.3 Waveforms of feeder ZSCR

2.3 仿真试验 3

第 5 条馈线零序电容占整个电网零序电容的 5%，为 $1.8 \mu\text{F}$ 。第 5 条馈线 A 相在 0.105 s 发生单相接地故障， 0.6 s 时故障结束。图 4 各馈线零序电流比幅 K 波形，(a)(b)弧道电阻分别为 $0, 500 \Omega$ 。

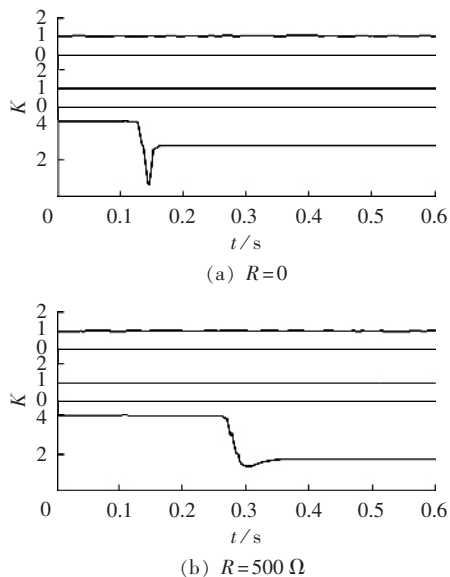


图 4 各馈线零序电流比幅波形

Fig.4 Waveforms of feeder ZSCR

2.4 仿真试验 4

1 号馈线至 5 号馈线零序电容分别为 $4.2 \mu\text{F}$ 、 $10.2 \mu\text{F}$ 、 $7.2 \mu\text{F}$ 、 $10.2 \mu\text{F}$ 、 $4.2 \mu\text{F}$ 。第 5 条馈线 A 相在 0.105 s (对地电压为峰值时发生单相接地故障) 发生单相接地故障。图 5 为各馈线零序电流比幅 K 的波形，(a)(b)弧道电阻分别为 $0, 500 \Omega$ ，图 5(c)弧道电阻为 500Ω ，发生单相接地故障时间为 0.1 s ，即对地电压为零时发生单相接地故障。

3 零序电流比幅式选线法的适用范围

从文章第 1 节可看出，零序电流比幅式选线法虽然考虑了配电网零序网络中诸多影响因素，但是式 (3) 和 (4) 却忽略了对地电容的不平衡性，该方法在线路对地电容不平衡度较大情况下可能失去判据。图 6 是对这一情形所做的仿真结果。假定第 5 条馈线 A 相在 0.105 s 发生单相接地故障，具体线路参数如表 1 所示 (表中， $C_{A,g}$ 、 $C_{B,g}$ 、 $C_{C,g}$ 分别表示 A、B、C 相的对地电容)。

图 6(b)(d) 表明线路对地电容不平衡较大的情况下，非故障相零序电流比幅波形 (I_{02}/I_{01} 、 I_{04}/I_{03}) 在单相接地故障发生前后有了较大变化，其中 I_{04}/I_{03} 变化幅度较大，与 I_{05}/I_{04} 的变化幅度差不多，此时仍用前文所采用的判断方法，将无法选出故障线路。

当然，实际运行中的电力配电网络是不允许线路对地电容不平衡度过大的，因为此时中性点电位有较大位移，对运行不利，这点从图 6(a)(c) 可看出，正常运行时中性点电位达到 1 kV 。

还有一点是必须考虑的，这就是单相接地故障发生的时间。一般情形下，默认单相接地故障发生

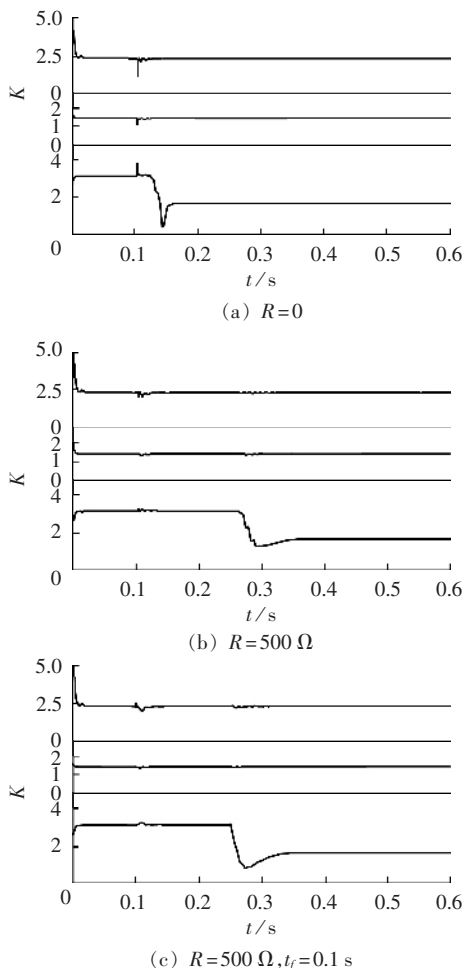
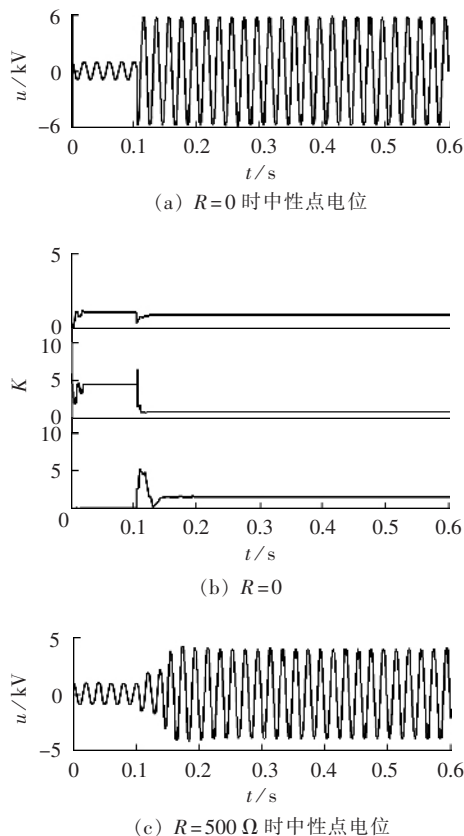


图 5 各馈线零序电流比幅波形

Fig.5 Waveforms of feeder ZSCR



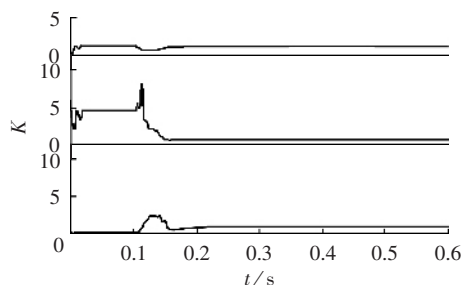
(d) $R=500\ \Omega$

图 6 三相对地电容不平衡时零序电流比幅及中性点电位波形

Fig.6 ZSCR and neutral point voltage waveforms of system with unbalanced three phase-earth capacitances

表 1 仿真线路参数

Tab.1 Simulative line parameters μF

馈线序号	$C_{A,g}$	$C_{B,g}$	$C_{C,g}$
1	3.85	2.85	1.85
2	4.85	1.85	1.85
3	3.85	1.85	2.85
4	2.85	1.85	3.85
5	0.60	0.60	0.60
总和	16.0	9.0	11.0

在故障线路对地电压最大时,实际上,在极端情况下,单相接地故障发生在故障线路对地电压最小时,这一情形也存在一定概率。有些选线方法对于这 2 种情况不能有效区分,但是所提出的零序电流比幅选线法在 2 种情况下均可以有效选线。图 6(c)是单相接地故障发生在故障线路对地电压最小时的各馈线零序电流比幅波形图。

总而言之,若考虑实际的电网运行情况,零序电流比幅式选线法有极强的适应能力,可以说是一种不存在“死角”的选线方法。

4 结论

零序电流比幅选线法的核心在于能够通过改变消弧线圈容量实现故障线路与非故障线路的比值发生变化,特别适合配合具有跟踪补偿特点的消弧线圈使用。目前,自动调谐消弧线圈应用日益广泛^[14-15],零序电流比幅选线法由于运算量较小、抗干扰能力强、选线准确,并且装置实现也不复杂,具有良好的实用前景。

参考文献:

[1] 蔡旭,刘勇,胡春强,等. 新型偏磁式谐振接地与保护[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):44-49.
CAI Xu,LIU Yong,HU Chun-qiang,et al. New resonance earth system with magnetic bias and its protection[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(6):44-49.

[2] 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:自然科学版,1998,32(4):451-457.
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:

Natural Science,1998,32(4):451-457.

[3] 桑在中,张惠芬,潘贞存,等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化,1996,20(2):11-12.
SANG Zai-zhong,ZHANG Hui-fen,PAN Zhen-cun,et al. Protection for single phase to earth fault line selection for ungrounded power system by injecting signal[J]. Automation of Electric Power Systems,1996,20(2):11-12.

[4] 齐郑,陈炯聪,杨奇逊. 基于小波变换和 LMS 自适应滤波器的单相接地选线方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(9):58-61.
QI Zheng,CHEN Jiong-cong,YANG Qi-xun. Selection of single-phase to ground fault line based on wavelet transform and LMS adaptive filter[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(9):58-61.

[5] 陈炯聪,齐郑,杨奇逊. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化,2004,28(8):88-91.
CHEN Jiong-cong,QI Zheng,YANG Qi-xun. A fault line detection device for the non-solidly grounded system based on fuzzy sets theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(8):88-91.

[6] 戴剑锋,张艳霞,侯喆. 小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J]. 电网技术,2004,28(3):43-47.
DAI Jian-feng,ZHANG Yan-xia,HOU Zhe. Application of wavelet reconstruction algorithm in phase-to-ground fault detection of distribution networks[J]. Power System Technology,2004,28(3):43-47.

[7] 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):29-32.
ZENG Xiang-jun,YIN Xiang-gen,YU Yong-yuan,et al. New methods for control and protection relay in a compensated medium voltage distribution network based on injecting various frequency current[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(1):29-32.

[8] DALSTEIN T,KULICKE B. Neural network approach to fault classification for high speed protective relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1995,10(2):1002-1011.

[9] 潘永刚. 小电流接地选线模拟实验系统的研制[D]. 北京:华北电力大学,2002.
PAN Yong-gang. Research and constitution of simulative experimental systems for small current fault detection[D]. Beijing:North China Electric Power University,2002.

[10] The Math Works Inc. Power system blockset user's guide. Version 2[M]. Natick,Massachusetts:The Math Works Inc,2001.

[11] 田铭兴,励庆孚. 磁饱和式可控电抗器的等效电路及仿真分析[J]. 电工技术学报,2003,18(6):64-67.
TIAN Ming-xing,LI Qing-fu. An equivalent circuit and simulation analysis of magnetically-saturated controllable reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2003,18(6):64-67.

[12] 田铭兴,励庆孚,王曙鸿. 磁饱和式可控电抗器的等效物理模型及其数学模型[J]. 电工技术学报,2002,17(4):18-21.
TIAN Ming-xing,LI Qing-fu,WANG Shu-hong. An equivalent physical model and a mathematical model of the controlled saturated reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2002,17(4):18-21.

[13] 尹忠东,刘虹,陈柏超,等. 磁阀式可控电抗器的研究[J]. 变压器,1998,35(7):1-4.
YIN Zhong-dong,LIU Hong,CHEN Bai-chao,et al. A study on magnetic valve controllable reactor[J]. Transformer,1998,35(7):1-4.

[14] ASSEF Y,BASTARD P,MEUNIER M. Artificial neural net-

works for single phase fault detection in resonant grounded power distribution systems[C]//Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference. Los Angeles, California: [s.n.], 1996:566-572.

[15] 陈柏超,陈维贤,尹忠东. 10 kV 电网新型自动调谐消弧线圈及控制装置[J]. 中国电力,1997,30(9):70-71.

CHEN Bai - chao, CHEN Wei - xian, YIN Zhong - dong, et al. A new controllable arc - extinguishing reactor for 10 kV networks and its control system[J]. Electric Power, 1997, 30(9): 70-71.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

何润华(1977-),男,湖北黄石人,硕士,研究方向为电力电子与 FACTS 技术(E-mail:wh_hrh@126.com);

潘 靖(1981-),男,湖北荆州人,硕士,研究方向为电力系统过电压及抑制;

霍春燕(1980-),女,河北石家庄人,硕士,研究方向为电力系统过电压及抑制。

Faulty line selection based on variable reactance

HE Run - hua¹, PAN Jing², HUO Chun - yan³

(1. CSG EHV Transmission Company, Guangzhou Bureau, Guangzhou 510000, China;

2. Shantou Power Supply Bureau, Shantou 515041, China;

3. Hebei EHV Transmission Bureau, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of faulty line selection for the single phase grounding of the network with neutral point earthed via controllable arc suppression coil, the ZSCR (Zero - Sequence - Current - Ratio) method is presented. Factors influencing the faulty line selection for small - current earthing power system are analyzed. The key techniques are the transient information acquisition and the correct judgment. The theoretical deduction of ZSCR is given and the calculation formulas for the main parameters of small - current earthing system are presented for both normal and single - phase grounding conditions. Simulations with Matlab show that the proposed method has fast calculation speed, good performance and high correctness, even when faulty - line - ground voltage is the smallest.

Key words: controllable arc extinction coil; faulty line selection; zero - sequence - current - comparison