

文章编号: 1671-251X(2009)02-0027-05

基于小波包能量分析的小电流接地故障选线的研究

陈芳婧, 陈忠仁, 桂存兵

(中山职业技术学院电子系, 广东 中山 528404)

摘要: 通过对配电网接地故障的稳态和暂态过程的深入分析并结合小波包理论, 文章提出了一种基于小波包和能量大小进行配电网单相接地选线的新方法, 介绍了该方法的选线基础、原理及步骤。Matlab仿真实验表明, 该选线方法提高了接地故障选线的准确性和可靠性, 具有较高的实用价值。

关键词: 小电流接地; 故障选线; 小波包; 能量分析

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A

Research of Fault Line Selection in Small Current Grounding System Based on Wavelet Packets and Energy Analysis

CHEN Fang-jing, CHEN Zhong-ren, GUI Cun-bing

(Dept. of Electronic Engineering of Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, China)

Abstract: Through deep analysis of stable state and transient state process of grounding fault in distribution network and combining with wavelet packets theory, the paper put forward a new method of single-phase grounding line selection in distribution network based on the wavelet packet and energy, introduced base, principle and procedure of line selection of the method. The simulation experiment of Matlab indicated that the line selection method enhanced accuracy and reliability of grounding fault line selection, which had good application worth.

Key words: small current grounding, fault line selection, wavelet packets, analysis of energy

0 引言

对于小电流接地系统故障选线的研究, 国内国外都有新的方法。目前, 国内对接地故障选线原理的研究取得了很大成果, 也开发了很多故障选线装置, 但这些装置仍然不具备在电力系统中推广应用

收稿日期: 2008-09-19

作者简介: 陈芳婧(1973-), 女, 硕士, 讲师, 2006年毕业于河南理工大学控制理论与控制工程专业, 现主要从事电力系统自动化技术的研究工作, 已发表文章近十篇。Tel: 0760-85225917; E-mail: fangjing2628@163.com

- [2] 王晓珠. 煤矿井下电子设备防电磁干扰的方法[J]. 煤炭科技, 2003(4): 25~27.
- [3] 成凌飞. 非理想空巷道中电磁波传播特性的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2005.
- [4] EM SLIE A G, LAGACE R L, STRONG P F. Theory of Propagation of UHF Radio Waves in Coal Mine Tunnels[J]. IEEE Transactions, 1975, 23(2).
- [5] 孙继平, 石庆冬. 矩形隧道中的列车对电磁波截止频率的影响[J]. 电波科学学报, 2001, 16(1): 100~102.
- [6] 孙继平, 魏占永. 矿井隧道中电磁场能量的损耗[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 31(6): 575~578.
- [7] 卢斌先, 王泽忠, 李成榕, 等. 500 kV 变电站开关

操作瞬态电场测量与研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 133~138.

- [8] 李清泉, 李彦明, 牛亚民. 变电站开关操作引起的瞬变电磁场及其防护[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 35~37.
- [9] WIGGINS C M, WRIGHT S E. Switching Transient Fields in Substations[J]. IEEE Trans. on P D, 1991, 6(2): 591.
- [10] 顾毅. 变频器高次谐波干扰的抑制[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(4): 460~462.
- [11] 王福增, 于富强, 王雪东, 等. 矿井隧道泄漏通信系统的改进[J]. 通信技术, 2007, 40(11): 123~124, 237.

的可靠性和准确性。

国外对接地故障选线的研究各不相同。目前,国外较先进的选线方法有 DESIR 选线法和 DDA 选线法,都取得了不错的选线效果。但该 2 种方法均需要精密的仪器对馈线进行长期的检测才能选线,这对于国内的大多数变电站来说是很困难的,因此其在国内没有推广价值。

我国 6~35 kV 的配电网中性点普遍采用不接地或经消弧线圈接地方式,属于小电流接地系统^[1~3]。当发生间歇性电弧接地时,可能引起弧光接地过电压,这将危及系统绝缘或造成相间短路而导致跳闸事故。为确保供电的可靠性、避免恶性事故的发生,应及时找出故障线路,并采取措施消除故障。因此,迅速、准确地实现故障选线,对于运行方式多变、结构日益复杂的配电网的安全、可靠运行、提高配电网自动化水平有着十分重要的意义。鉴于此,笔者认为仍然有必要对单相接地故障选线问题作进一步的分析研究,以期找出更有效的解决方案。基于此,本文提出了一种基于小波包和能量大小进行配电网单相接地选线的新方法。

1 小波包分析的基础理论

近年来,小波包作为一种新兴的时域分析方法在电力系统中得到了广泛的应用。小波包分析 (Wavelet Packet Analysis) 为信号提供一种更加精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,对多分辨率分析没有细分的高频部分作进一步分解,并能够根据被分析信号的特征自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时域分辨率,因此,具有广泛的应用价值。

1.1 小波包变换

定义子空间 U_j^n 为尺度函数 $u_n(t)$ 的闭包空间,而 U_j^{2n} 为正交小波函数 $u_{2n}(t)$ 的闭包空间, h_k 为滤波器系数,并令 $u_n(t)$ 满足下面的双尺度方程:

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_n(2t - k) \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_n(2t - k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $g(k) = (-1)^k h(1 - k)$, 即 2 个系数也具有正交关系。当 $n=0$ 时,式(1)可表示为

$$\begin{cases} u_0(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_0(2t - k) \\ u_1(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_0(2t - k) \end{cases} \quad (2)$$

对于 $n \in \mathbb{Z}_+$ 的情况,可推广得出 $U_{j+1}^n = U_j^n \oplus U_j^{2n+1}, j \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}_+$ 。

构造出的序列 $\{u_n(t)\}$ (其中 $n \in \mathbb{Z}_+$) 称为由基函数 $u_0(t) = u_{2n}(t)$ 确定的正交小波包。由于 $u_{2n}(t)$ 由 h_k 唯一确定,所以又称 $\{u_n(t)\}$ (其中 $n \in \mathbb{Z}_+$) 为关于序列 $\{h_k\}$ 的正交小波包。

考虑空间分解: $U_{j+1}^n = U_j^n \oplus U_j^{2n+1}, j \in \mathbb{Z}$, 设 $g_j^n(x) \in U_j^n$, 且 $g_j^k(x) = g_j^{2n}(x) + g_j^{2n+1}(x)$, 令 $g_j^k(x) = \sum_l d_l^{j,k} \Psi_k(2^j x - l)$, 则分解算法:

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \sum_k a_{k-2l} d_l^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_k b_{k-2l} d_l^{j+1,n} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\{a_l\}$ 、 $\{b_l\}$ 为多尺度分析的分解序列。

随着尺度 j 的增大,相应正交小波基函数的空间分解率愈高,而其频率分辨率愈低,这正是正交小波基的一大缺陷,而小波包却具有将随 j 增大而变宽的频谱窗口进一步分割变细的优良性质,从而克服了正交小波变换的不足。

小波包还可以对 W_j 进一步分解,从而提高频率分辨率,是一种比多分辨分析更加精细的分解方法,具有更好的时频特性^[4]。

1.2 信号的奇异性检测和模极大值原理

1.2.1 奇异性检测原理

若函数(信号) $f(t)$ 在某个局部点 t_0 处间断或导数间断,则称该函数在 t_0 处有奇异性,该点称为信号的奇异点,并用 Lipschitz 指数描述其奇异性,简称 Lip 指数^[5],记为 α 。若存在一常数 c ,则下式成立:

$$|f(t) - f(t_0)| \leq c |t - t_0|^\alpha \quad 0 < \alpha \leq 1, t \in B(t_0)$$

则称 $f(t) \in C_{t_0}^\alpha(B(t_0))$ 。

式中: C 为与 t 和 α 无关的有界常数; $B(t_0)$ 为以 t_0 为中心的某个邻域。

显然,当 $\alpha=1$ 时,函数(信号)是连续可导的;当 $0 < \alpha < 1$ 时,函数的光滑性降低,甚至不连续; α 越小, $f(t)$ 在 t_0 处的奇异性程度越高。因此, α 给出了信号 $f(t)$ 在 t_0 点的可微性,即光滑度的精确信息。

1.2.2 模极大值理论

由上述的分析可知,函数(信号)的奇异性可用 Lip 指数 α 来刻画,其数值可通过小波变换的模极大值在不同尺度下的数值计算出来。

如果对 t_0 的某一邻域内的任意点 t ,对于函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换满足如下关系:

$$|W_f(s, t)| \leq |W_f(s, t_0)| \quad (4)$$

则称 t_0 为小波变换在尺度 s 的模极大值点。

小波的模极大值与 Lip 指数 α 存在有如下关系:

$$|W_f(s, t)| \leq k s^\alpha \quad (5)$$

即 $\log |W_f(s, t)| \leq \log k + \alpha \log s$ 。

式中: k 为正整数。

当 $s = 2^j$, 则式(5)可变换为:

$$\log_2 |W_f(2^j, t)| \leq \log_2 k + j\alpha \quad (6)$$

这样就把小波变换的尺度因子同 Lip 指数 α 联系起来了。显然, 当 $\alpha > 0$ 时, 小波系数的模极大值随尺度因子增大而增大; 当 $\alpha < 0$ 时, 小波系数的模极大值随尺度因子的增大而减小; 当 $\alpha = 0$ 时, 小波系数的模极大值与尺度因子无关。

由上述可知, 如果 t_0 在信号 $f(t)$ 突变带内, 则在各尺度上 t_0 点附近的 $|W_f(2^j, t)|$ 都会产生 1 个局部极大值点, 并且随尺度的减小, 这些模的极大值点收敛于 t_0 。因此, 可利用小波变换模极大值检测出信号 $f(t)$ 上的所有突变点, 还可以根据小波变换模极大值随尺度的增加(或衰减)的变化规律测得突变点的局部 Lip 指数 α , 也可测得突变点奇异性的大小^[6]。

2 基于小波包能量分析的小电流故障选线新方法

2.1 小电流故障选线新方法的基础

当发生接地短路故障时, 定义线路的零序电压 $u_0(\tau)$ 与零序电流 $i_0(\tau)$ 乘积的积分为零序能量函数:

$$S_{0j}(t) = \int_0^t u_0(\tau) i_{0j}(\tau) d\tau \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

对于消弧线圈, 有:

$$S_{0L}(t) = \int_0^t u_0(\tau) i_{0L}(\tau) d\tau \quad (8)$$

显然, $S_{0j}(t) (j = 1, 2, \dots, n, L)$ 为故障后第 j 条线路上传输的能量。

故障线路的能量函数在中性点不接地和经消弧线圈接地电网中差别较大。通过中性点经消弧线圈并联电阻的选线方式, 既能充分发挥消弧线圈补偿电容电流的作用, 又能利用并联电阻抑制过电压和实现单相接地故障选线^[7~10]。当出现单相接地故障后, 待中性点的零序电压达到稳定值时投入并联电阻, 之后故障线路的零序电流将会明显地增大(主

要是有功分量), 可以将故障线路显著地区分开来。

系统在正常工作时, 若电源三相对称, 三相对地电容和相间电容对称, 则各线路上的电容电流之和为零; 当系统发生单相接地故障时, 则系统会出现零序电压和零序电流。在发生单相接地故障后, 在中性点短时接入 1 个和消弧线圈并联的小电阻。等值电路如图 1 所示。

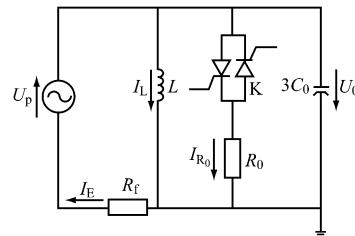


图 1 单相接地故障时的零序电流等值电路图

图 1 中, R_f 为零序回路中的等值电阻, 包括接地点的过渡电阻和线路的零序电阻; K 为晶闸管开关, 利用它可以很方便地对投切时间进行精确控制; $3C_0$ 为线路在零序回路中的等值对地电容; U_p 为 A 相电源等值电压; L 为消弧线圈的等值电感; R_0 为故障时短时投入的并联电阻。则:

$$\begin{aligned} I_E &= \frac{-U_p}{R_f + R_0[1 + jR_0(3\omega C_0 - 1/\omega L)]} \\ &= \frac{-U_p[1 + jR_0(3\omega C_0 - 1/\omega L)]}{R_f[1 + jR_0(3\omega C_0 - 1/\omega L)] + R_0} \\ &= \frac{-U_p j(3\omega C_0 - 1/\omega L)}{(R_f + R_0)/R_0 + R_f j(3\omega C_0 - 1/\omega L)} + \\ &\quad \frac{-U_p}{(R_f + R_0)/R_0 + R_f j(3\omega C_0 - 1/\omega L) R_0} \end{aligned} \quad (9)$$

根据电路原理的节点电压法, 有:

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{-U_p/R_f}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_f} + j3\omega C_0} \\ &= \frac{-U_p}{(R_f + R_0)/R_0 + R_f j(3\omega C_0 - 1/\omega L)} \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)结果的第 1 项为通过故障点补偿后的总无功电流, 第 2 项为通过故障点的接入电阻后的有功电流, 即:

$$I_{C_0} = U_0 j(3\omega C_0 - 1/\omega L) \quad (11)$$

$$I_{R_0} = U_0/R_0 \quad (12)$$

故障线路流过的零序电流 I_{03} 由 3 部分组成: 通过故障点的补偿电流 I_L (因为实际配电系统多为过补偿, 所以按过补偿考虑)、系统零序电压所引起的线路总零序电容电流 $I_{C_0} = j3\omega C_0 U_0$ 以及中性点

接入电阻在系统零序电压作用下所产生的零序有功电流 I_{R_0} 。对于非故障线路来说, 其流过的零序电流仅为该线路的零序电容电流。图 2 给出了故障线路零序电流和非故障线路零序电流向量图。

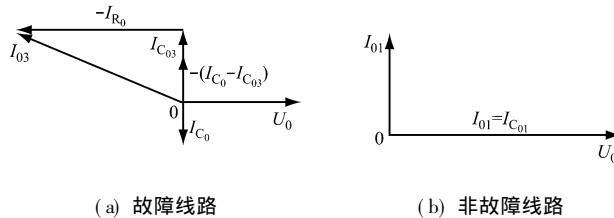


图 2 故障线路和非故障线路零序电流向量图

由图 2 可知, 系统发生单相接地故障时, 如果没有并联电阻 R_0 , 故障线路的零序电流不一定比非故障线路的零序电流大, 所以选线比较困难; 而中性点并联电阻后, 并联电阻所产生的有功电流只流经故障线路, 使得故障线路的零序电流特别是其有功分量明显增大, 为故障选线提供了方便。

2.2 选线原理

小电流接地系统发生单相接地后, 系统的零序电压的变化非常明显, 以此作为参考标准不存在因系统干扰导致测量不准而影响选线准确率的问题, 故本文的选线方法以零序电压作为参考标准。选线原理:

(1) 非故障线路的能量函数总是大于零, 故障线路的能量函数总是小于零(包括消弧线圈), 并且其绝对值等于其它线路能量函数的总和。

(2) 故障线路的模极大值点的极性和非故障线路模极大值点的极性相反, 而且故障线路的模极大值数值最大。

(3) 母线故障时, 所有线路(包括消弧线圈)的能量函数都大于零, 所有线路的模极大值点的极性相同。

2.3 选线步骤

(1) 对故障零序电流和零序电压进行采样, 求得接地后的各条线路能量大小和方向。

(2) 依据能量大小和方向初步选出可能的故障线路。

(3) 利用检测并联电阻瞬间所产生的二次奇异点极大值大小和方向的方法来确定故障线路。

3 小电流接地系统建模及其单相接地故障仿真分析

本文使用 Matlab/Simulink 进行系统建模, 仿

真。建立了一个小型的 10 kV 系统仿真模型, 这是一个有 1 条进线、3 条出线的 10 kV 变电站。中性点经消弧线圈接地, 消弧线圈采用 1 个 RLC 并联支路实现, 理想情况下可设定 R 为无穷大, C 为零, L 由计算确定, 消弧线圈过补偿度为 10%。电源可以等效为一个三相电源模块, 可以设置其内阻、电感、电压、相角和电源内部的接地方式。三相变压器采用 Δ / Y_n 接线的线性降压变压器, 可以选择可饱和铁芯是否被仿真, 在其参数对话框中应输入: 额定功率、频率、原副边额定电压有名值以及漏电阻、漏电抗、励磁电阻、励磁电抗标么值。输电线路的 R 、 L 、 C 是均匀分布在线路上的, 所以, 可以采用 π 型分布参数元件模型近似表示, 即用有限的状态量去近似无限的状态量。每条线路的终端负荷采用 RLC 负荷模块表示。系统的故障模块采用三相故障模块, 该模块是一个可由外部或内部信号控制断开和闭合时间的三相断路器, 完成相间和接地短路开关的模拟, 通过设置对话框, 可选择故障类型、故障阻抗、接地阻抗、控制信号、开关状态以及发生与切除的时序, 其中, 故障点电流要到故障切除之后的电流过零点才会消除, 故障阻抗和接地阻抗的值可选, 但必须大于零。

线路的具体参数如下:

变压器: 三相双绕组, 电压等级为 110 kV/10 kV, 容量为 110 MVA。

输电线路: (1) 线路 1: $l_1 = 7.30$ km, $R_1 = 0.21 \Omega/km$, $L_1 = 1.21$ mH/km, $C_1 = 10.6 \mu F/km$, 负荷 $S_1 = 500$ kVA; (2) 线路 2: $l_2 = 2.50$ km, $R_2 = 0.27/km$, $L_2 = 1.35$ mH/km, $C_2 = 8.9 \mu F/km$, 负荷 $S_2 = 1600$ kVA; (3) 线路 3: $l_3 = 5.56$ km, $R_3 = 0.17 \Omega/km$, $L_3 = 1.15$ mH/km, $C_3 = 11.5 \mu F/km$, 负荷 $S_3 = 2000$ kVA。

消弧线圈: 额定容量为 500 kVA, 电感 $L = 2.76$ H。

下面采用 Matlab 电力系统工具箱(PSB) 实现对上述小型变电站单相接地故障过程的仿真。

10 kV 系统过补偿运行, 线路 l_3 距母线 3 km 处、于相电压达到最大正值($t = 0.005$ s) 时发生单相金属性接地故障, 接地电阻 $R_d = 0 \Omega$, 由仿真分析可得各条线路的能量波形, 如图 3 所示。

由图 3 的能量波形、结合前面的能量分析法可

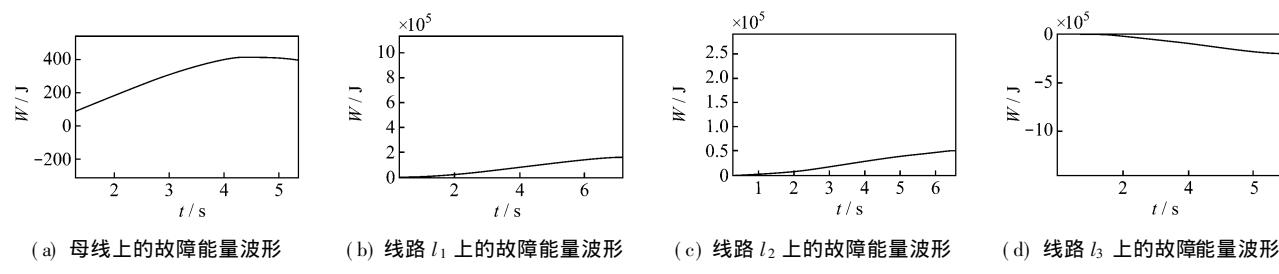


图3 各条线路上的能量波形

以初步确定出线路 l_3 为可能的故障线路。此时并联电阻投入时间为 0.06 s, 切除时间为 0.16 s, 进一

步地仿真出此时各条线路上的零序电流奇异性检测波形, 如图 4 所示。

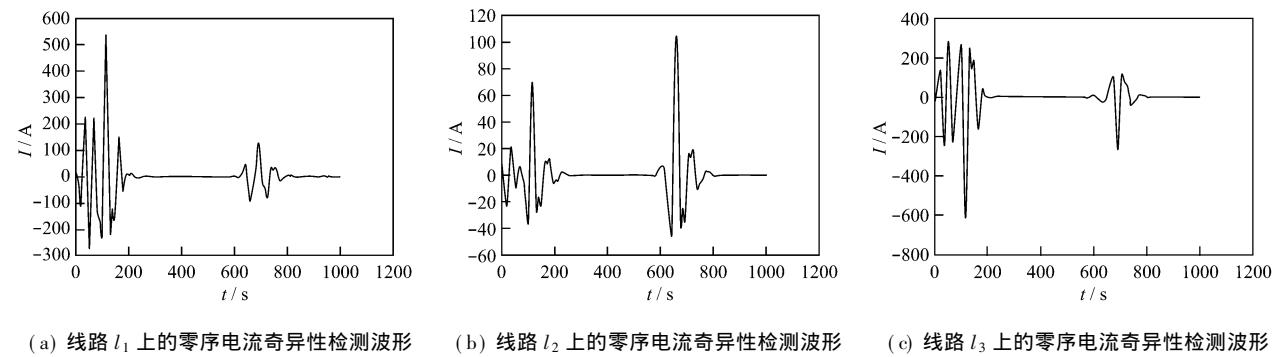


图4 各条线路的零序电流奇异性检测波形

由图 4 可知, 此时线路 l_3 上的波形奇异值最大, 且其极性与其它线路相反, 因此, 结合能量法分析可知此时线路 l_3 为故障线路。

4 结论

本文利用小波包变换对暂态零序电流进行分析, 并以金属性接地建立了仿真模型, 得出如下结论:

(1) 提出了以能量法进行初步判断, 并利用中性点并联中值电阻进而结合二次奇异值进行复合判断的选线手段, 建立了一种新的选线方法。

(2) 仿真结果表明, 本选线方法可以提高故障选线的准确率, 有较好的实用性。同时还具有较强的躲过过渡电阻的能力, 且不受故障初始角、故障位置、不同故障线路、不同负荷容量等因素的影响, 能有效识别母线故障和馈线故障, 既适用于中性点不接地系统, 也适用于中性点经消弧线圈接地系统, 具有较高的灵活性和可靠性。

参考文献:

[1] 龚 静, 周有庆, 王 娜, 等. 小电流接地系统单相

接地故障选线诸方法原理及利弊探讨 [J]. 电站系统工程, 2004, 20(1): 31~ 33.

[2] 李冬辉, 史临潼. 非直接接地系统单相接地故障选线方法综述 [J]. 继电器, 2004, 32(18): 74~ 78.

[3] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 小电流接地故障选线技术综述 [J]. 电力设备, 2005, 6(4): 1~ 7.

[4] 崔锦泰. 小波分析导论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.

[5] 徐丙莲, 弥旭明. 基于小波变换的信号奇异性分析 [J]. 数学杂志, 2000, 24(6): 661~ 664.

[6] 董小刚, 许 林. 奇异信号的小波分析 [J]. 长春工业大学学报, 2003, 24(2): 38~ 40.

[7] 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(7): 451~ 457.

[8] 郁憔镛, 吴小建. 基于暂态分量的小电流接地系统故障定位新方案 [J]. 中国电力, 1998, 31(2): 13~ 16.

[9] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号的小波分析方法及其应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 1~ 5.

[10] 孙 鸣, 王世勇. 消弧线圈短时并联小电阻的单相接地选线方案 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 268~ 272.