

文章编号:0253-9993(2006)02-0268-05

# 消弧线圈短时并联小电阻的单相接地选线方案

孙 鸣, 王世勇

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 在简述现有消弧线圈接地系统单相接地故障选线原理和方案的基础上, 论证了在消弧线圈接地系统发生单相接地故障后在电网中性点短时投切并联小电阻的选线方案的可行性. 该方案采用双向晶闸管过零触发投切一个并联小电阻, 投切速度快且对系统冲击小, 同时增大了单相接地故障时的零序电流有功分量.

**关键词:** 消弧线圈; 并联电阻; 故障选线; 双向晶闸管

**中图分类号:** TM864 **文献标识码:** A

## Single-phase-to-earth fault line selection's scheme based on arc-suppression coil connecting with a parallel connection low resistor for a short time

SUN Ming, WANG Shi-yong

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Based on the existing theories on fault line selection in the resonant grounded system, analyzed the feasibility of single-phase-to-earth fault line selection scheme which switches on and switches off a low resistor for a short time when the single-phase-to-earth fault occurs. The element of Triac to switch on and switch off a neutral point parallel connection resistor was used. The resistor can be rapidly switched on and switched off when the voltage of the neutral point is zero. It reduces the impact on the power system when the resistor is switched on or switched off and increases the active part of the zero sequence current when the single-phase-to-earth fault occurs.

**Key words:** resonant grounded system; point parallel connection resistor; devices for fault line selection; Triac

我国大多数中压配电网均采用中性点非直接接地系统. 单相接地故障是中压配电网中最常见的故障. 在中性点非直接接地系统中, 单相接地故障电流较小, 系统线电压维持不变, 规程规定可以继续运行 1 ~ 2 h. 随着用户及用电设备容量的增加, 中压供、配电网增大, 尤其是电缆在供电网的使用量的增多, 使得单相接地故障时电容电流超过限定值, 因此系统中一些变压器采用中性点经消弧线圈接地方式运行, 但该方式运行使得单相接地故障选线的难度加大. 对于经消弧线圈接地系统, 目前主要的几种接地选线方案有: 利用故障线路有功分量比非故障线路有功量大且方向相反的特点的有功分量法; 利用高次谐波电容电流不会被消弧线圈产生的感性电流所抵消, 其谐波电容电流的分布规律基本上与中性点不接地系统中基波电容电流的分布规律相同的谐波分量法以及利用系统发生单相接地时, 人为地向系统注入一个特殊信号的注入信号选线法<sup>[1,2]</sup>. 对于消弧线圈接地系统, 现有故障选线方法采集的故障特征量均较小, 如何增强故障特征量是提高故障选线准确性的关键.

### 1 消弧线圈短时并联小电阻的接地选线原理

如图 1 所示，当系统发生永久性单相接地故障时，通过控制双向晶闸管短时投切与消弧线圈并联的小电阻，则可以大大增强单相接地故障时的零序电流有功分量。由于并联电阻产生的零序有功电流只流过故障线路，因此故障线路的零序有功功率比非故障线路要大得多，故以零序有功功率为选线判据，可以明显地提高单相接地故障选线的准确性。

采用双向晶闸管投切并联电阻器与普通机械开关相比，晶闸管的投切时刻可以精确控制，在中性点电压过零时，能快速无冲击地将电阻器接入电网。当出现单相接地故障后，待中性点的零序电压达到稳态值（延时 5 s 左右）时投入并联电阻，以躲过单相接地时的暂态过程和瞬时性接地故障。电阻的运行时间根据各条出线对零序电流的采样时间的需要，一般为 5 ~ 10 个工频周期即可。并联电阻值按线路出口发生单相金属性接地故障时短路电流小于电流限时速断定值选择。由于并联电阻的运行时间很短，且远小于线路过电流保护的出口时间，因此不会改变系统原有的运行方式。

### 2 消弧线圈短时并联电阻时接地选线方案的稳态分析

图 1 所示系统在正常运行时，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（设线路 3 上 a 相接地），则系统会出现零序电压和零序电流。在单相接地发生后，在中性点短时投入一个和消弧线圈并联的小电阻。图 1 的等值电路如图 2 所示。

图 2 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； $3C_0$  为线路在零序回路中的等值对地电容； $U_p(t)$  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

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

根据电路原理的节点电压法，有

$$U_0 = \frac{-U_p/R_f}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{j\omega L} + j3\omega C_0} = \frac{-U_p}{(R_f + R_0)/R_0 + R_f j(3\omega C_0 - 1/\omega L)} \quad (2)$$

式 (1) 中第 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电流，即

$$I_{C_0} = U_0 j(3\omega C_0 - 1/\omega L), I_{R_0} = U_0/R_0 \quad (3)$$

故障线路所流过的零序电流  $I_{03}$  由 3 部分组成：通过故障点补偿后的总无功电流  $I_{C_0}$ （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故障线路零序电容电流  $I_{C_{03}} = j3\omega C_{03} U_0$  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电流  $I_{R_0}$ 。对于非故障线路来说，其流过的零序电流

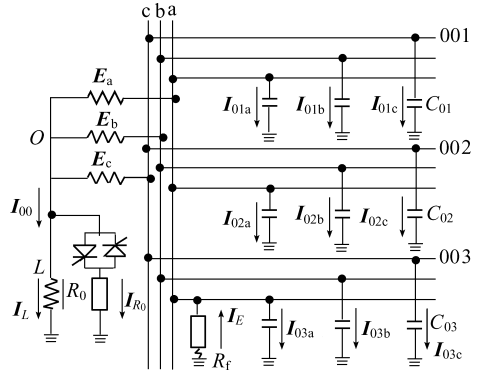


图 1 谐振接地系统单相接地零序电流分布

Fig. 1 The zero-sequence current distribution of the single-phase-to-earth fault in the resonant grounded system

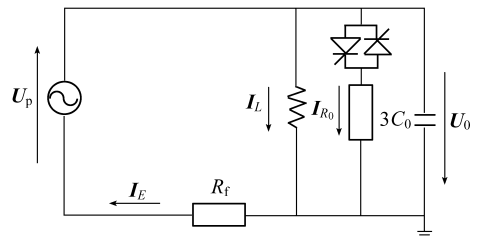


图 2 单相接地故障时的零序电流等值电路

Fig. 2 The zero-sequence current equivalent circuit of the single-phase-to-earth fault

仅为线路的零序电容电流. 图 3 给出了故障线路零序电流和非故障线路零序电流向量.

由图 3 可见, 系统发生单相接地时, 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, 并联电阻所产生的零序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.

### 3 中性点投切并联电阻的暂态电压分析

根据图 2 所示的单相接地零序等值回路, 对中性点投切并联电阻时的暂态电压分析, 可以用消弧线圈零序电流  $i_L$  和中性点零序电压  $U_0$  为变量, 列出状态方程组为

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = U_0, \\ 3C_0 \frac{dU_0}{dt} = -i_L - \frac{1}{R_f}U_0 - \frac{1}{R_0}U_0 - \frac{1}{R_f}U_p(t). \end{cases}$$

将上式写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dU_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{3C_0} & -\frac{1}{3C_0R'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ U_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{3C_0R_f} \end{bmatrix} U_p(t), \quad (4)$$

其中  $R' = R_0R_f/(R_0 + R_f)$ . 式 (4) 为非齐次线性状态方程, 可采用时域解法求解. 令

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{3C_0} & -\frac{1}{3C_0R'} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{3C_0R_f} \end{bmatrix}.$$

则  $\mathbf{A}$  的特征方程及解为

$$|\lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}| = \lambda \left( \lambda + \frac{1}{3C_0R'} \right) - \left( -\frac{1}{L} \right) \frac{1}{3C_0} = \lambda^2 + \frac{1}{3C_0R'}\lambda + \frac{1}{3LC_0} = 0,$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{6R'C_0} \pm \sqrt{\frac{1}{(6R'C_0)^2} - \frac{1}{3LC_0}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2},$$

式中,  $\delta$  为自由分量的衰减系数,  $\delta = 1/6R'C_0$ ;  $\omega_0$  为回路的共振频率,  $\omega_0 = \sqrt{1/3LC_0}$ .

当  $R' > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{3C_0}}$  时,  $\delta < \omega_0$ . 令  $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ,  $\omega'$  为回路的自由振荡频率. 可见, 当  $R' > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{3C_0}}$  时,

消弧线圈零序电流  $i_L$  和系统零序电压  $U_0$  的过渡过程呈衰减的周期特性; 当  $R' < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{3C_0}}$  时, 消弧线圈零

序电流  $i_L$  和系统零序电压  $U_0$  经非周期衰减而趋于其稳态值. 由于在  $R' < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{3C_0}}$  时,  $i_L$ ,  $U_0$  的暂态过渡

过程不存在振荡特性, 中性点电压  $U_0$  也就不会产生过电压的情况, 因此下面仅需讨论  $R' > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{3C_0}}$  的情况. 该状态方程的解为

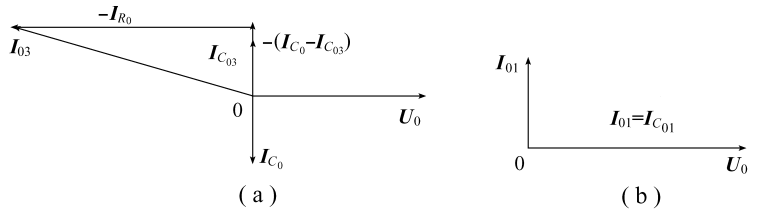


图 3 故障和非故障线路零序电流

Fig. 3 Zero-sequence current of the faulty line and the healthy line

$$\begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_0(t) \end{bmatrix} = e^{At} \begin{bmatrix} i_L(0_-) \\ U_0(0_-) \end{bmatrix} + \int_{0_-}^t e^{A(t-\tau)} B U_p(\tau) d\tau. \quad (5)$$

当接地时的接地电阻较小时, 根据式(2)求得并联电阻投入前零序电压值的相量形式为  $U_0 = U_p / [1 + R_f j(3\omega C_0 - 1/\omega L)]$ . 因为脱谐度  $\nu = 1 - 1/3\omega^2 LC_0$  较小, 故可将零序电压时域形式简化为  $U_0(t) = -U_p(t) = -U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi)$ . 由于  $i_L(t) = \frac{1}{L} \int U_0(t) dt$ , 则可得  $i_L(t) = \frac{1}{\omega L} U_{\phi m} \cos(\omega t + \varphi)$ , 其中,  $U_{\phi m}$  为正常运行时的相电压幅值;  $\varphi$  为相电压的初相角. 则有  $i_L(0_-) = \frac{1}{\omega L} U_{\phi m} \cos \varphi$ ,  $U_0(0_-) = -U_{\phi m} \sin \varphi$ . 根据式(5)可解得

$$\begin{aligned} U_0(t) = & -U_{\phi m} e^{-\delta t} \left[ \left( \frac{\omega_0^2}{\omega' \omega} \cos \varphi - \frac{\delta}{\omega'} \sin \varphi \right) \sin \omega' t + \sin \varphi \cos \omega' t \right] + \\ & \frac{R_0}{R_f + R_0} U_{\phi m} \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \varphi) - \frac{R_0}{R_f + R_0} U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (6)$$

由于产生振荡过渡过程的条件是  $R' > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{3C_0}}$ , 而此时  $\delta = 1/6R' C_0$  较小, 故可近似认为  $\omega' \approx \omega_0$ . 由于消弧线圈接地系统的脱谐度  $\nu = 1 - 1/3\omega^2 LC_0$  一般很小, 而  $\omega \approx \omega_0$ , 则式(6)可简化为

$$\begin{aligned} U_0(t) = & -U_{\phi m} e^{-\delta t} [\cos \varphi \sin \omega' t + \sin \varphi \cos \omega' t] + \\ & \frac{R_0}{R_f + R_0} U_{\phi m} e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \varphi) - \frac{R_0}{R_f + R_0} U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi) = \\ & -\frac{R_f}{R_f + R_0} U_{\phi m} e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \varphi) - \frac{R_0}{R_f + R_0} U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)反映过渡过程的第1项存在的原因就是并联电阻不是在中性点零序电压过零时投入的. 若采用双向晶闸管在中性点零序电压过零时投入并联电阻, 则式(5)中的  $i_L(0_-) = \frac{1}{\omega L} U_{\phi m}$ ,  $U_0(0_-) = 0$ , 带入式(5)可得

$$U_0(t) = -\frac{R_0}{R_f + R_0} U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

式(8)不存在任何暂态分量, 这样就不会对系统产生任何冲击. 同理在中性点零序电压过零时, 即并联电阻回路电流过零时, 双向晶闸管关断切除并联电阻, 也不会对系统产生冲击. 这也是用双向晶闸管投切电阻比普通机械开关投切电阻的一个重要优点.

## 4 双向晶闸管的选用原则

现代双向晶闸管额定电流已达到 kA 级, 只要并联电阻值不太小, 发生单相接地时双向晶闸管的相关参数很容易满足. 所以主要考虑晶闸管的反相重复峰值电压和断态重复峰值电压, 这两个电压的较小值即额定电压. 而对于中性点装设消弧线圈的配电网, 当过补偿运行时, 各种内部过电压中以弧光接地过电压最高<sup>[3]</sup>, 而单相电弧接地时中性点的最高过电压小于两倍的相电压<sup>[4]</sup>. 由于单个双向晶闸管元件的额定电压有限, 因此需将  $N$  个双向晶闸管单元串联构成阀. 故可按 2 倍的相电压选择双向晶闸管阀的额定电压. 至于外部过电压则可以用避雷器加以保护.

## 5 消弧线圈短时并联电阻的接地选线判据

(1) 当连续出现 3 次  $|U_{0i} - U_{0(i-n)}| \geq 15\% U_\phi$  时, 选线装置起动. 其中  $U_{0i}$  为中性点零序电压采样值;  $n$  为选线装置的每个工频周期的采样点数;  $U_\phi$  为相电压.

(2) 经短延时后, 同时进行两项判别: ① 采样值若连续 3 次以上出现  $U_{\max i} - U_{\max(i-1)} > KU_{\phi m} / (n/4)$

( $K$  为可靠系数,  $K > 1$ ;  $U_{\phi m}$  为相电压幅值), 则判断为连续间歇性电弧接地. ② 若连续 3 个周波  $|U_0| \geq U_{set}$  ( $U_{set} = 15\% U_{\phi}$ ), 则判定为单相永久性接地故障.

(3) 令  $M = \max \{P_{0i}\}$  若  $M \leq P_{0set}$ , 则母线接地故障; 若  $M > P_{0set}$ , 则线路接地故障且  $M$  为故障线路, 其中  $P_{0i}$  为各条线路的零序有功功率.

当选线装置启动后, 根据图 2, 令  $I_{0set} = U_{0set}/R_0$ , 其中  $U_{0set}$  为并联小电阻投入后的中性点电压, 接地故障发生后并联电阻  $R_0$  所产生的零序有功功率  $P_{R0} \geq U_{0set} I_{0set}$ , 而  $P_{0set} = K P_{R0}$  为零序功率整定值.  $U_{0set}$  的选取应考虑互感器的误差及采样计算的误差等. 当母线故障时, 接地电流中的有功分量不是经某条故障线路流回, 所以任何一条线路的零序有功功率都很小, 故可以用这个特点来判定母线接地故障. 判据① 是考虑当电网发生连续间歇性电弧接地时, 中性点对地电压采样值的连续差分将出现畸变, 判据  $U_{maxi} = \max(U_i - U_{i-1})$  中  $U_{maxi}$  为一个周波内每个采样点与前一个采样点差值的最大值, 若连续 3 个工频周波出现  $U_{maxi} > K U_{\phi m} / (n/4)$ , 即可判定为电网发生连续间歇性电弧接地. 选线装置的出口有仅报警和报警同时出口跳闸两种选择, 当判定为连续间歇性电弧接地时, 建议选择报警同时出口跳闸的方式.

## 6 结 语

在分析中性点消弧线圈接地系统中发生单相接地时系统零序电流、电压的特点的基础上, 论证了采用双向晶闸管短时投切与消弧线圈并联小电阻进行故障选线方法的可行性. 采用双向晶闸管过零触发投切并联电阻, 投切速度快且对系统冲击小, 同时增大了单相接地故障时的零序电流有功分量, 使得故障选线更加准确、可靠. 由于并联电阻运行时间非常短暂, 对系统的影响并不大. 故中性点经消弧线圈接地系统, 用双向晶闸管短时投切与消弧线圈并联小电阻进行故障选线是一个可供选择的方案.

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 桑在中, 张慧芬, 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.
- [3] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000. 58~59.
- [4] 靳孝东, 李 谦, 王晓瑜, 等. 配电网弧光接地过电压的仿真及分析 [J]. 高压技术, 1994, 20 (3): 71~73.

## 我国煤层气开发钻井技术在山西省沁水县取得新突破

中国中煤能源集团公司均股企业中联煤层气公司承担的国土资源部 2005 年全国油气资源战略选区与评价重点项目——山西省沁水县端氏煤层气开发示范工程第一口水平羽状井 DS-01 井获得成功. 该水平井于 2005-12-26 开钻, 历时 33 d, 2006-01-28 完成生产井和羽状水平井 10 个分支的全部钻井工程, 累计完成进尺 6 526 m, 其中煤层段进尺为 5 430 m. 预计煤层气单产将达到 3~4 万  $m^3/d$ , 将成为我国日单产量最高的煤层气井.

煤层气羽状水平井开发技术是近几年国际煤层气领域应用的一种新技术、新工艺, 可以大大提高煤层气(瓦斯)产收率, 对治理煤矿瓦斯灾害, 提高煤层气资源利用率作用突出. 我国已成功实施的煤层气羽状水平井数量很少, DS-01 井是中联煤层气公司成功实施的第一口羽状水平井, 日产量相当于 10 余口煤层气直井或竖井的产量. 它的成功实施标志着我国煤层气开发钻井技术和工艺迈上了一个新的台阶.

摘自“中国煤炭数字图书馆”