

# 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障暂态电流分析

王德江, 陈永衡, 马文阁

(辽宁工学院, 辽宁 锦州 121001)

**摘要:**通过对中性点经消弧线圈接地系统单相接地时零序暂态电流的频域分析和时域分析, 得出接地导线中零序暂态电流的峰值比健全线路中零序暂态电流的峰值大许多, 比较峰值的大小可以识别故障线路, 同时得出零序暂态电流的方向是不确定的, 不宜采用零序暂态电流的方向作为选线判据。

**关键词:**消弧线圈; 暂态电流; 选线

**中图分类号:** TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)11-0016-03

## 1 引言

中性点不接地或经消弧线圈接地称小电流接地。小电流接地系统单相接地选线长期以来研究不断。根据单相接地时出现的区别于正常运行时的物理现象, 人们提出各种各样的选线方法。有些方法已获得应用, 有些方法尚在研究之中。本文通过对中性点经消弧线圈接地系统单相接地时零序暂态电流的分析, 对零序暂态电流的性质给出明确的物理概念, 指出利用零序暂态电流识别故障线路的判据和应注意的问题。

## 2 中性点经消弧线圈接地系统单相接地时零序等效电路

中性点经消弧线圈接地系统单相接地时  $3I_0$  回路等效电路如图 1 所示。  $L$  为消弧线圈电感,  $C_n$  为第  $n$  条线路的相对地等效电容,  $R$  为接地过渡电阻。由于线路相对地等效电阻值远大于相对地等效容抗值, 故忽略不计, 消弧线圈电阻与感抗相比, 电阻也可忽略不计,  $u = U_m \sin(\omega t + a)$  是故障相电源电压。中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地时, 相当于图 1 等效电路的零状态响应。

经计算得接地导线和第  $n$  条线路电流的拉氏变换表达式  $I(s)$  和  $I_n(s)$  为:

$$I(s) = \frac{U_m}{R} \frac{(\sin \omega t) s^2 + (\cos \omega t) s^2 + \left( \frac{1}{LC} \sin \omega t \right) s + \frac{\cos \omega t}{LC}}{\left( s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC} \right) (s^2 + \omega^2)} \quad (1)$$

$$I_n(s) = \frac{C_n U_m}{CR} \frac{(\sin \omega t) s^2 + (\cos \omega t) s^2}{\left( s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC} \right) (s^2 + \omega^2)} \quad (2)$$

式中:  $C = \sum_{n=1}^N C_n$ ,  $N$  是线路的条数。

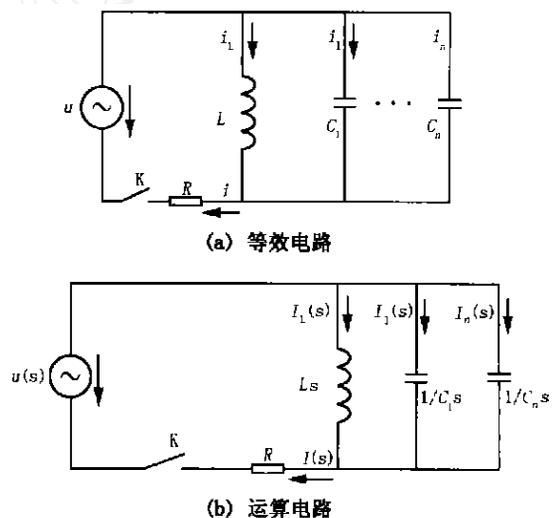


图 1 中性点经消弧线圈接地系统单相接地时  $3I_0$  回路等效电路

Fig. 1 The equivalent circuit of  $3I_0$  at the state of single-phase grounding in electric power system with neutral point grounding via arc-suppression coil

## 3 零序暂态电流分析

式(1)分母中的二次三项式  $s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}$  可化为三种可能情况: 有两个不相等的实数根可化为  $(s + A)(s + B)$ ; 有两个相等的实数根可分为  $(s + A)^2$ ; 有一对共轭虚数根可化为  $(s + A)^2 + B^2$ 。则

$$\frac{(\sin \omega t) s^2 + (\cos \omega t) s^2 + \left( \frac{1}{LC} \sin \omega t \right) s + \frac{\cos \omega t}{LC}}{\left( s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC} \right) (s^2 + \omega^2)} \quad \text{对}$$

应三种展开形式

$$\frac{P}{s + A} + \frac{Q}{s + B} + \frac{KS + H}{s^2 + \omega^2} = P \frac{1}{s + A} + Q \frac{1}{s + B} +$$

$$K \frac{S}{S^2 + \dots} + \frac{H}{S^2 + \dots}$$

反变换为:  $Pe^{-At} + Qe^{-Bt} + k \cos t + \frac{H}{S} \sin t =$

$$Pe^{-At} + Qe^{-Bt} + Y \sin(t + \dots)$$

$$\frac{P}{S+A} + \frac{Q}{(S+A)^2} + \frac{KS+H}{S^2 + \dots} = P \frac{1}{S+A} + Q \frac{1}{(S+A)^2} +$$

$$K \frac{S}{S^2 + \dots} + \frac{H}{(S^2 + \dots)}$$

反变换为:  $Pe^{-At} + Qte^{-At} + k \cos t + \frac{H}{S} \sin t =$

$$Pe^{-At} + Qte^{-At} + Y \sin(t + \dots)$$

$$\frac{PS+Q}{(S+A)^2 + B^2} + \frac{KS+H}{S^2 + \dots} = P \frac{S+A}{(S+A)^2 + B^2} +$$

$$\frac{Q-PA}{B} \cdot \frac{B}{(S+A)^2 + B^2} + K \frac{S}{S^2 + \dots} + \frac{H}{S^2 + \dots}$$

反变换为:  $Pe^{-At} \cdot \cos Bt + \frac{Q-PA}{B} e^{-At} \cdot \sin Bt +$

$k \cos t + \frac{H}{S} \sin t = Pe^{-At} \cdot \cos Bt + \frac{Q-PA}{B} e^{-At} \cdot$

$\sin Bt + Y \sin(t + \dots)$

用待定系数法确定  $P$ 、 $Q$ 、 $K$ 、 $H$  数值,便可获得式(1)的解。式(2)也用类似方法求解。

举例:某中性点经消弧线圈接地的 10 kV 系统,有 12 条电缆线路,系统对地等效电容  $C=48 \times 10^{-6}$  F,消弧线圈电感  $L=0.2$  H,分析上述三种情况的零序暂态电流。

### 3.1 二次三项式有两个不相等的实数根

取  $R=20$ ,代入  $C$  和  $L$  数据,则

$$S^2 + \frac{1}{RC}S + \frac{1}{LC} = S^2 + 1041.67S + 104167 = (S+929.6)(S+112)$$

式(1)、(2)按上述方法求解得

$$i(t) = 492.8 \sin(-18.67^\circ) e^{-929.6t} - 174.7 \sin(-70.37^\circ) e^{-112t} + 6.8 \sin(t + -89.04^\circ) \text{ A} \quad (3)$$

式(3)中的前两项是流过接地导线中的暂态分量;第三项是流过接地导线中的稳态分量,即补偿后的残流,“+”号表示属于电感性质(过补偿)。

$$i_n(t) = 440 \frac{C_n}{C} \sin(-18.67^\circ) e^{-929.6t} -$$

$$18.8 \frac{C_n}{C} \sin(-70.37^\circ) e^{-112t} -$$

$$123 \frac{C_n}{C} \sin(t + -89.04^\circ) \text{ A} \quad (4)$$

式(4)中的前两项是流过第  $n$  条线路的暂态分

量;第三项是流过第  $n$  条线路的稳态分量;“-”号表示属电容性质。每项数值与  $C_n/C$  有关,线路数目越多,线路长度相差越小, $n$  个  $C_n/C$  就越小,设本例满足这个条件,并且设  $C_n/C=0.15$ 。

### 3.2 二次三项式有两个相等的实数根

若  $S^2 + \frac{1}{RC}S + \frac{1}{LC}$  有两个相等的实数根,则根为

$$-\frac{1}{2RC}。由 \left(\frac{1}{RC}\right)^2 - \frac{4}{LC} = 0 \text{ 得 } R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} =$$

$$32.27486122, \text{ 则 } S^2 + \frac{1}{RC}S + \frac{1}{LC} = \left(S + \frac{1}{2RC}\right)^2 =$$

$(S+322.7)^2$ ,式(1)、(2)按上述方法求解得接地导线和第  $n$  条线路中电流分别为:

$$i(t) = 253 \sin(+1.545^\circ) e^{-322.7t} - 117017 \sin(-44.23^\circ) \cdot te^{-322.7t} + 6.8 \sin(t + -88.45^\circ) \text{ A} \quad (5)$$

$$i_n(t) = 284 \frac{C_n}{C} \sin(-25.64^\circ) e^{-322.7t} -$$

$$58515 \frac{C_n}{C} \sin(-44.24^\circ) \cdot te^{-322.7t} -$$

$$123 \frac{C_n}{C} \sin(t + -88.45^\circ) \text{ A} \quad (6)$$

### 3.3 二次三项式有一对共轭虚数根

取  $R=80$

$$\text{则 } S^2 + \frac{1}{RC}S + \frac{1}{LC} = \left(S + \frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2RC}\right)^2 = (S+130.2)^2 + 295.3^2$$

式(1)、(2)按上述方法求解得接地导线和第  $n$  条线路中电流分别为:

$$i(t) = 102 \sin(+3.83^\circ) e^{-130.2t} \cos(295.3t) - 123 \sin(-64.74^\circ) e^{-130.2t} \sin(295.3t) + 6.8 \sin(t + -86.17^\circ) \text{ A} \quad (7)$$

$$i_n(t) = 165 \frac{C_n}{C} \sin(-48.03^\circ) e^{-130.2t} \cos(295.3t) +$$

$$109 \frac{C_n}{C} \sin(+35.4^\circ) e^{-130.2t} \sin(295.3t) -$$

$$123 \frac{C_n}{C} \sin(t + -86.17^\circ) \text{ A}$$

## 4 零序暂态电流的性质

在补偿电网中,当发生单相接地故障瞬间, $L$ 、 $C$ 、 $R$ 、有确定的数值,式(3)~(8)中零序暂态电流是时间  $t$  的函数,具有以下性质。

### 4.1 零序暂态电流的方向

零序暂态电流为两个暂态分量的叠加,在衰减

过程中,其代数和可能始终为正,也可能始终为负,还可能改变符号,其方向是不确定的。例如,当  $\alpha = 0, t = 0$  时,式(3)中两个暂态分量代数和为  $6.8 A$ ,表示接地导线中零序暂态电流方向与图1中正方向一致,从母线流向线路;式(4)中两个暂态分量代数和为  $(-123 C_n / C) A$ ,表示第  $n$  条线路中零序暂态电流方向与图1中正方向相反,从线路流向母线。又例如,当  $\alpha = 0, t = 0.01 s$  时,式(3)中两个暂态分量代数和为  $53.7 A$ ,接地导线中零序暂态电流从母线流向线路;式(4)中两个暂态分量代数和为  $(5.77 C_n / C) A$ ,第  $n$  条线路中零序暂态电流从母线流向线路。上述现象的物理解释是电路中有两种不同的储能元件,暂态过程由两者共同决定,还与单相接地瞬间电源电压的初相角  $\alpha$  有关。因此,不能用零序暂态电流的方向做判据来识别故障线路。

#### 4.2 零序暂态电流的峰值

单相接地瞬间电源电压的初相角  $\alpha$  有确定值,零序暂态电流是时间  $t$  的函数,其极值和端点 ( $t = 0$ ) 值是可求的,它们中绝对值最大的定义为零序暂态电流的峰值。为了比较接地导线与线路中零序暂态电流峰值的大小,在  $0 \sim 360^\circ$  之间每隔  $1^\circ$  取一个值,分别代入(3)~(8)式中求峰值并作比较。通过计算机大量的数值计算发现,接地导线中零序暂态电流的峰值比线路中零序暂态电流的峰值大许多,至少2.5倍以上。比较峰值的大小可以识别故障线路。

#### 4.3 零序暂态电流的衰减速度

零序暂态电流衰减速度由  $e$  指数幂决定, $e$  指数幂与  $S^2 + S/(RC) + 1/(LC)$  的根有关。为讨论方便,设  $L = 1/(C)$  (全补偿),则  $1/(LC) = S^2 = 314^2$ 。若  $S^2 + S/(RC) + 1/(LC)$  有两个不相等的实数根,则两个根之积等于  $1/(LC) = S^2$ ,因此, $e$  指数幂一个大于  $-314t$ ,另一个小于  $-314t$ , $R$  越小,相差越大;若  $S^2 + S/(RC) + 1/(LC)$  有两个相等的实数根,则  $[1/(RC)]^2 - 4/(LC) = 0$  即  $1/(2RC) =$

$\sqrt{1/(LC)}$ ,因此, $e$  指数幂为  $-t/(2RC) = -314t$ ;若  $S^2 + S/(RC) + 1/(LC)$  有一对共轭虚数根,则  $[1/(RC)]^2 - 4/(LC) < 0$ ,即  $1/(2RC) < \sqrt{1/(LC)}$ 。因此, $e$  指数幂为  $-t/2RC > -314t$ , $R$  越大,衰减越慢。

本文举例为过补偿方式,过补偿度为  $5.6\%$ , $L = 62.8$ , $1/(C) = 66.3$ , $L$  与  $1/(C)$  相差不大,在  $3.1 \sim 3.3$  条分析中, $e$  指数幂与上述全补偿的分析结果很接近。

## 5 结论

(1) 由于系统中有消弧线圈和等效电容两种储能元件,零序暂态电流总是存在的,并且在单相接地初期峰值很大。

(2) 接地导线中零序暂态电流峰值比线路中零序暂态电流峰值大许多,比较峰值的大小,适合作为选线的判据。

(3) 零序暂态电流衰减较快,为了提高采集暂态峰值的速度,可采用 DSP(数字信号处理)技术。

(4) 由于零序暂态电流的方向不确定,因此,不宜采用零序暂态电流的方向作为选线判据。

## 参考文献:

- [1] 华北电业管理局. 电力工程电工手册第二分册[M]. 北京:水利电力出版社,1991. 523.
- [2] 曾祥君,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):84~85.
- [3] 南京工学院数学教研组. 积分变换(第三版)[M]. 北京:高等教育出版社,1989. 106~110.

收稿日期: 2002-03-06; 修回日期: 2002-05-27

作者简介:

王德江(1948-),男,教授,主要研究方向为小电流接地系统的故障识别与配电自动化。

### Analysis of transient current when single-phase grounding in electric power system whose neutral point connects to the ground via arc-suppression coil

WANG De-jiang, CHEN Yong-heng, MA Werr-ge  
(Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** By analysis of zero sequence transient current when single-phase grounding in electric power system whose neutral point connects to the ground via arc-suppression coil, that maximum of zero sequence transient current in grounding wire is much greater than in well-condition circuit is concluded. By comparing the size of maximum the malfunction circuit can be found out. At the same time it is concluded that the direction of zero sequence transient current is unknown and should not be used for the basis of line-selection.

**Key words:** arc-suppression coil; transient current; line-selection