

# 阶跃响应法在浮地交流系统绝缘故障定位中的应用初探

庄劲武, 张晓锋, 张超

(海军工程大学电气工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 针对交流系统绝缘故障定位现有方法存在的问题, 提出了一种新的解决方案——阶跃响应法。通过对阶跃信号注入电网后的负载支路漏电流及其传感器感应电流的理论分析, 得到了支路阻性电流与容性电流在时域上分离, 而与电网工频信号在频域分离, 从而易于提取的结论。并通过试验验证。

**关键词:** 阶跃响应法; 浮地交流系统; 绝缘故障定位

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)03-0021-05

## 0 引言

查找浮地交流系统对地绝缘故障最常用的方法是工频零序电流判据<sup>[1~3]</sup>, 但当出现三相绝缘同时降低或接地电阻较大时, 该方法将难以判断。为此, 低频信号注入法开始被用来解决该类问题, 通过对直流电网的应用分析, 发现该方法检测灵敏度随着电网对地电容的增大而降低<sup>[3]</sup>, 这一结论同样适用于交流电网。为了克服电网对地电容的影响, 笔者尝试采用了稳态直流信号注入方法, 通过霍尔传感器对负载支路漏电流的感应和直流成分的提取来判断绝缘故障支路, 理论上是优越的, 但在工程实现上较难。通过工业现场的应用, 发现霍尔传感器受空间杂散磁场的干扰大, 尤其是在穿心口径大且漏电流微弱的情况下; 当霍尔传感器数量多且较分散时, 其工作电源的提供在工程上复杂且电源品质难以保证; 霍尔传感器间的偏差校正较复杂, 这些问题影响了稳态直流信号注入方法在工程上的应用。基于此, 本文提出了一种能有效克服电网分布电容等参

数和工频变量影响, 且工程上易实现的方案——阶跃响应法, 其基本思想是向电网注入一直流阶跃信号, 利用负载支路暂态漏电流响应中阻性电流与容性电流在时域上分离, 而与电网工频信号在频域上分离的特性, 通过高精度传感器对暂态漏电流的感应, 并采用数字滤波手段, 将反映支路对地绝缘电阻大小的阻性电流提取出, 从而判断出绝缘故障支路。

## 1 阶跃响应法原理

阶跃响应法应用于浮地交流系统绝缘故障支路定位的原理如图 1(a) 所示, 三相电网母线给  $n$  条负载支路供电, 每条支路对地电容分别为  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , 交流漏流传感器环套在每条支路三相电缆上, 当电网出现低绝缘故障时, 假设第  $i$  条负载支路绝缘下降, 且绝缘电阻为  $R_f$ , 闭合开关  $K$ , 即向电网投入了直流阶跃信号, 直流电势为  $E$ , 限流内阻为  $R_0$ 。

### 1.1 故障支路对阶跃信号的电流响应

阶跃注入电网时, 负载支路暂态漏电流同时包含有阶跃响应成分和工频成分。为便于讨论, 首先

## Study on the multi-level fuzzy comprehensive evaluation method of the design scheme of relay

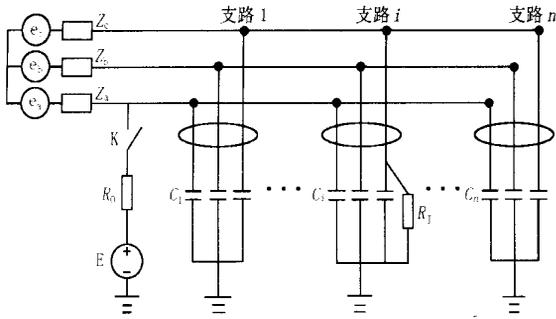
LI Ling-ling, LI Zhi-gang, MENG Yue-jin, MENG Qing-long

(Institute of Electrical Apparatus, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

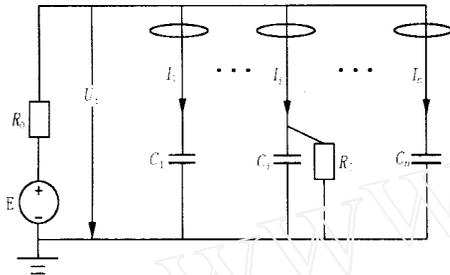
**Abstract:** Design-evaluation-redesign is the complete course of product design. So it is very necessary to make a study on the method of evaluating a design scheme. On the basis of determining the evaluation index system of relays, a comprehensive evaluation model with multi-objective and multi-level is set up based on fuzzy theory in this paper. This model is able to evaluate every subobjective and the root objective of the evaluation index system comprehensively, and to supply users with decision support for selecting the best one from several design schemes, as well as to give directions for revising the original design.

This project is supported by Natural Science Found of Heibei Province (No. 602069) and Natural Science Found of Tianjin (No. 023603111).

**Key words:** relay; design scheme; fuzzy theory; comprehensive evaluation



(a) 阶跃响应法原理示意图



(b) 等效电路图

图 1 阶跃响应法应用于电网的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of step-response method applied to power net

以故障支路  $i$  为例,分析直流阶跃信号单独作用时的暂态电流响应。由于交流电源内阻抗  $z$  远小于限流内阻和绝缘电阻,则图 1(a) 所示电路可等效成如图 1(b) 所示简化电路。

向电网注入直流阶跃信号时,故障支路的漏电流(传感器的穿心电流)为

$$i_G = \frac{E}{R_0 + R_f} + \left( \frac{E}{R_0} \times \frac{C_i}{C_{\Sigma}} - \frac{E}{R_0 + R_f} \right) e^{-t/\tau_1} \quad (1)$$

其中:  $\tau_1 = C (R_0 + R_f)$ ,  $C$  为电网对地电容。令

$I_R = \frac{E}{R_0 + R_f}$ , 称稳态阻性电流;  $I_C = \frac{E}{R_0} \times \frac{C_i}{C_{\Sigma}}$ , 称初始容性电流。于是,根据  $I_R$  和  $I_C$  的大小关系,将漏电流分为三种形式:

当  $I_R = I_C$  时,或电网对地无电容时,漏电流为阶跃形式,阶跃幅值为  $I_R$ ,见图 2 曲线  $b$ ;

当  $I_R > I_C$  时,漏电流阶跃上升至  $I_C$  后,按指数规律上升至  $I_R$ ,见图 2 曲线  $c$ ;

当  $I_R < I_C$  时,漏电流阶跃上升至  $I_C$  后,按指数规律下降至  $I_R$ ,见图 2 曲线  $a$ ;

由图 2 可知,阶跃信号作用于电网时,流过绝缘故障支路的漏电流同时包含了反映接地电阻和对地电容信息量,而反映电容大小的电流量会按指数规律迅速衰减,并收敛于仅反映电阻大小的电流量上。

因此,若能采用高导磁率材料制成的高精度交流电流传感器,使之能较准确地反映出故障电流的初始动态过程,则不难得到故障电流的波形,尤其是反映电阻大小的电流值,从而计算出故障支路接地电阻的大小。

1.2 穿心电流传感器的模型及其感应电流的计算

电流传感器电气线路和磁路示意图见图 3。原边电流为  $i_1$ ,副边电流为  $i_2$ ,副边匝数为  $w_2$ ,  $\Phi$  为互磁通,  $\Phi_{2s}$  为副漏磁通,副边接负载电阻  $R$ ,电流、电势和磁通的正方向如图 3 中所示。

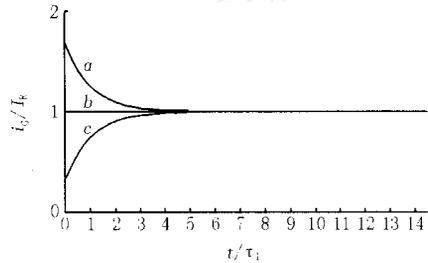


图 2 阶跃信号作用时故障支路漏电流波形

Fig. 2 Step-response current when insulation fault

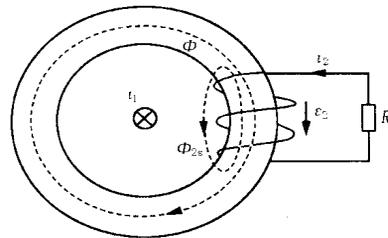


图 3 电流传感器电气线路和磁路示意图

Fig. 3 Electrical line and magnetic path of the sensor

由于对穿心式电流传感器,原边电流可认为不受副边电流的影响,因而以下仅对副边回路进行分析,副边的电压方程可表达为:

$$- w_2 \frac{d\Phi}{dt} = i_2 R \quad (2)$$

式中:  $\Phi$  表示键链副绕组的总磁通,亦即  $\Phi = \Phi_{12} + \Phi_{2s}$ 。其中  $\Phi_{12} = \mu_{12} (i_1 + w_2 i_2)$ ,  $\Phi_{2s} = \mu_{2s} w_2 i_2$ ,  $\mu_{12}$  和  $\mu_{2s}$  分别表示互磁路和副漏磁路的磁导<sup>[6]</sup>。则式(2)可表达为:

$$- w_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_{2s}}{dt} = i_2 R \quad (3)$$

若以电流变量表示,将有如下形式:

$$- \mu_{2s} w_2^2 \frac{di_2}{dt} - \mu_{12} w_2^2 \frac{di_2}{dt} - \mu_{12} w_2 \frac{di_1}{dt} = i_2 R \quad (4)$$

令  $S_2 = \mu_{2s} w_2^2$ , 称副绕组漏感,  $M = \mu_{12} w_2$ , 称原副绕组间的互感。则式(4)可改写为:

$$-S_2 \frac{di_2}{dt} - Mw_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} = i_2 R \quad (5)$$

如令  $L_2 = S_2 + Mw_2$  表示副绕组的总自感,则式(5)又可改写为:

$$-M \frac{di_1}{dt} = i_2 R + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (6)$$

对式(6)所表达的线形方程,可采用拉氏变换求解。因  $i_1(0_-) = 0, i_2(0_-) = 0$ ,则式(6)经拉氏变换可表达为:

$$-sMI_1(s) = (R + sL_2) I_2(s) \quad (7)$$

进而可得到:

$$I_2(s) = -\frac{sM}{(sL_2 + R)} I_1(s) \quad (8)$$

根据式(1),原边电流的拉氏变换为:

$$I_1(s) = \frac{I_R}{s} + \frac{(I_C - I_R)}{s + 1/\tau_1} \quad (9)$$

式(9)代入式(8)后,可得:

$$I_2(s) = -\frac{MI_R}{(sL_2 + R)} - \frac{sM}{(sL_2 + R)(s + 1/\tau_1)} (I_C - I_R) \quad (10)$$

令  $\tau_2 = \frac{L_2}{R}$ ,则式(10)经整理后得到传感器感应电流经拉氏变换后的表达式:

$$I_2(s) = -\frac{MI_R/L_2}{(s + 1/\tau_2)} - \left[ \frac{\sqrt{(\tau_1 - \tau_2)}}{(s + 1/\tau_2)} + \frac{\sqrt{(\tau_2 - \tau_1)}}{(s + 1/\tau_1)} \right] M(I_C - I_R)/L_2 \quad (11)$$

由于传感器在设计时,  $L_2$  很大,使得  $\tau_2 \gg \tau_1$ ,于是式(11)经拉氏反变换后,可得传感器感应电流  $i_2(t)$  的近似时域表达式:

$$i_2 = -\frac{MI_R}{L_2} e^{-t/\tau_2} - \frac{M(I_C - I_R)}{L_2} e^{-t/\tau_1} \quad (12)$$

假定副边漏感系数  $S_2 \ll L_2$ ,则可得到近似关系  $\frac{M}{L_2} = \frac{1}{w_2}$ ,其中  $w_2$  体现了原副边的变比关系,代入式(12)后,得:

$$i_2 = -\frac{I_R}{w_2} e^{-t/\tau_2} - \frac{(I_C - I_R)}{w_2} e^{-t/\tau_1} \quad (13)$$

为分析  $i_2$ ,同原边电流一样,分三种情况进行讨论:

当  $I_R = I_C$  时,副边感应电流阶跃上升至  $I_R/w_2$  后,按指数规律(时间常数为  $\tau_2$ )衰减至零,见图4曲线  $b$ ;

当  $I_R > I_C$  时,副边感应电流阶跃上升至  $I_C/w_2$  后,先按指数规律(时间常数为  $\tau_1$ )上升,而后按

指数规律(时间常数为  $\tau_2$ )衰减至零,见图4曲线  $c$ ;

当  $I_R < I_C$  时,副边感应电流阶跃上升至  $I_C/w_2$  后,先按指数规律(时间常数为  $\tau_1$ )迅速下降,而后按指数规律(时间常数为  $\tau_2$ )衰减至零,见图4曲线  $a$ 。

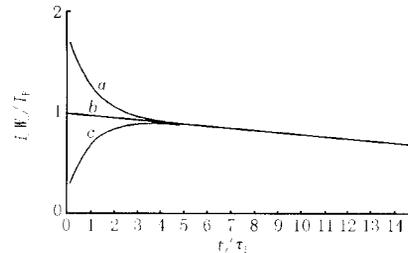


图4 传感器对故障支路漏电流的感应电流波形

Fig. 4 Induced secondary current of sensor when insulation fault

从图4中,可以发现:

副边感应电流波形变化包含了两个指数变化规律,分别对应于时间常数  $\tau_1$  和  $\tau_2$ ,且  $\tau_2 \gg \tau_1$ ;

在波形初期,容性电流变化部分能较充分地反映在副边感应电流中,体现了传感器的互感应过程,且容性电流在很短的时间内迅速衰减并收敛至阻性电流上,时间常数为  $\tau_1$ ;

初期过后,原边穿心电流稳定不变,阻性电流以较慢的速度衰减,时间常数为  $\tau_2$ ,体现了副边大电感对电流(线圈磁通)变化的抑制过程。

基于上述分析,交流电流传感器为满足阶跃响应的要求,应能较好地感应原边电流微小的动态变化,且当原边电流稳定不变时,副边线圈中剩余磁链(电流)能以较大的时间常数缓慢衰减。为此,应采用极高导磁率的铁心材料及合理的结构形式,使其具有较大的互磁路的磁导  $\mu_{12}$ (互感  $M$ )和尽可能小的副漏磁路的磁导  $\mu_{2s}$ (副边漏感  $S_2$ ),同时通过副边绕组匝数的增加,保证传感器的变比尽量趋近于原副边匝数之比,以满足传感器对微小动态变化的感应;自感  $L$  大,以满足剩余磁链(电流)以较慢的速度衰减的要求。

### 1.3 考虑到工频零序电流作用时的传感器副边感应电流

当故障漏电流(传感器原边电流)同时有直流和工频交流信号时,对传感器副边感应电流的计算可采用叠加原理。对工频漏电流信号在传感器副边感应电流的计算,可采用副边参数变量归算至原边的方法。假定原副边漏感系数远远小于互感系数,可得到原副边电流的近似对应关系:

$$i_2 = -i_1/w_2 = -\frac{I_0}{w_2} \sin(2ft + \theta_0) \quad (14)$$

其中,  $I_0$  和  $\theta_0$  分别为工频零序电流的幅值和起始相位角,  $f$  为工频电流频率。利用叠加原理可以得到有工频零序电流作用时的传感器副边感应电流:

$$i_2 = -\frac{I_R}{w_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} - \frac{(I_C - I_R)}{w_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{I_0}{w_2} \sin(2ft + \theta_0) \quad (15)$$

以  $I_R > I_C$  情况为例,可以得到如图 5 所示的传感器感应电流。

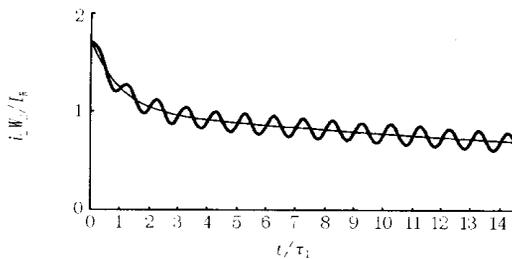


图 5 工频零序电流作用时的传感器感应电流波形

Fig. 5 Induced secondary current of sensor when power-frequency zero sequence current occurs

由图 5 可见,考虑到工频零序电流作用时的传感器副边感应电流在图 5 所示的波形基础上叠加了一工频交流信号。图中细线为无工频信号作用时的感应电流,粗线为考虑工频信号作用时的感应电流。

#### 1.4 阻性电流的提取

由上述分析可知,接地故障电阻大小反映在阻性电流中,而阻性电流由于具有在时域上与容性电流分离,在频域上又与工频零序电流分离的特点,因而为其提取提供了方便。其方法为:在阶跃信号注入时间  $3\tau_1 \sim 4\tau_1$  后(假定  $\tau_1$  已知),容性电流已基本衰减完毕,由于  $\tau_2 \gg \tau_1$ ,阻性电流几乎未衰减,感应电流仅包含阻性电流和工频零序电流,而后对其进行软件滤波,滤除工频成分,由于  $\tau_2 \gg 1/f$ ,则可以得到阻性电流衰减初期的值。

## 2 试验研究

### 2.1 试验条件

试验电路如图 1,电路参数设定为:  $E = 110 \text{ V}$ ,  $R_0 = 2 \text{ k}$ ,  $R_f = 30 \text{ k}$ ,  $C = 10 \mu\text{F}$ 。设计了环形穿心式电流传感器及其微弱感应信号的精密放大电路,实现对漏电流的检测。传感器铁心以磁导率极高的铁磁材料环形绕制而成,通过其有效截面尺寸和原副边匝数比等参数的有效设计,使传感器具有

准确感应微小变化电流的能力,且在  $1 \sim 100 \text{ mA}$  范围内变比有着良好的一致性,副边电感大,配以适当的负载电阻,可以使时间常数大于  $1 \text{ s}$ 。

### 2.2 传感器原副边电流波形对照

暂且不考虑交流工频量的影响,即假定交流电源电势为零。通过改变对地电容,分别得到了在  $I_R < I_C$ 、 $I_R = I_C$  和  $I_R > I_C$  条件下,当阶跃信号作用时,故障支路的漏电流及其穿心电流传感器的感应电流的波形,如图 6 所示。图中上半部分和下半部分分别为传感器的原边漏电流和副边感应电流。

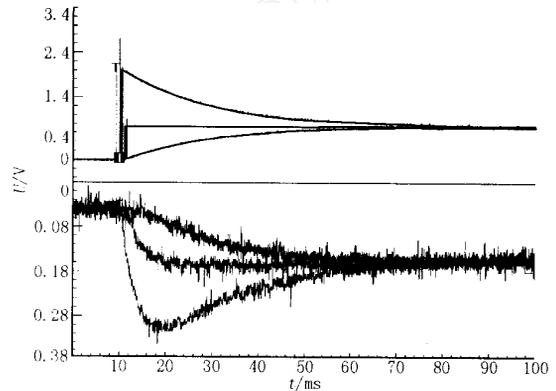


图 6 故障支路漏电流及传感器感应电流的实测波形

Fig. 6 Recorded secondary waveform for primary current and induced current of sensor

实测波形中反映出的电流变化规律与前面的理论分析结果基本一致。值得注意的是,实测中感应电流并未随传感器原边的阶跃变化而发生阶跃跳变,这是由于副边漏感系数作用的结果。

## 3 结论

(1) 阶跃响应法使暂态漏电流信号中反映接地电阻的阻性电流与反映对地电容的容性电流在时域上呈现分离性,而与电网工频漏电流在频域呈现分离性,易于提取,从而有效地克服了电网对地电容等系统参数和工频电流等系统变量对绝缘故障支路定位的影响。

(2) 通过对传感器的合理设计,使之既能有效地响应原边电流的动态变化,又能使阻性响应电流缓慢地衰减,避免了稳态直流注入法必须依赖霍尔元件所带来的附加电源及电磁兼容性差的问题,从而保证了阶跃响应法在工程中实现的可能性。

(3) 通过试验研究,发现实测结果与理论分析基本吻合,进一步验证了阶跃响应法的有效性。

## 参考文献:

- [1] Wester C G. High Impedance Fault Detection on Distribution Systems [A]. Conf Rec IEEE Rural Electric Power Conf, 1998. C5-1-5.
- [2] 沈中耀 (SHEN Zhong-yao). 小电流接地系统对地绝缘监测探讨 (Detection on Insulation of Floating Neutral Point Power System to earth) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 1999, 19(5): 57-58.
- [3] 曾克娥, 王少荣, 余文辉, 等 (ZENG Ke-e, WANG Shao-rong, YU Wen-hui, et al). 中性点不接地电网中的高阻接地故障 (High-resistance Single-phase Earth Fault in a Neutral Point Earth Free Power System) [J]. 水电能源科学 (International Journal Hydroelectric Energy), 2000, 18(3): 41-43.
- [4] 贾秀芳, 赵成勇, 李宝树, 等 (JIA Xiu-fang, ZHAO Cheng-yong, LI Bao-shu, et al). 变频探测直流系统接地故障装置存在的问题 (The Existing Questions of Frequency Conversion Detection Earth Fault Apparatus for DC System) [J]. 继电器 (Relay), 1999, 27(3): 51-52.
- [5] Baldwin T, Renovich F, Saunders L, Lubkeman D. Fault Locating in Ungrounded and High-resistance Grounded Systems [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2001, 37: 1152-1159.
- [6] 吴大榕 (WU Da-rong). 电机学 (Electromechanics) [M]. 北京: 水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1978.

收稿日期: 2003-01-06; 修回日期: 2003-09-28

作者简介:

庄劲武 (1967-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统及其安全运行;

张晓锋 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统及其安全运行、电力推进技术、控制理论。

### Application of step-response method in the insulation fault location of earth-floating AC system

ZHUANG Jiu-wu, ZHANG Xiao-feng, ZHANG Chao

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Power network ground capacitance can influence the correctness of fault location, which is hard to be overcome with existing fault location method. To solve this problem, a new method—step-response method is developed and presented in this paper. The method can achieve separation between the characteristic value reflecting the ground resistance and the value reflecting the ground capacitance in time domain. Moreover, the characteristic value is also separated from the power-frequency signals of power network in frequency domain and can be picked up easily. The paper reaches the conclusions based on both theoretical analysis and experimental research.

**Key words:** step-response method; earth-floating AC system; insulation fault location

(上接第 13 页 continued from page 13)

### Determination and analysis of TOU power price based on DSM when load shifting optimized

WU Qiu-wei<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, CHENG Hao-zhong<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** As one of power prices to consumers, TOU power price is widely used in the world. It is an important method in DSM. With the popularization of TOU power price, the power consuming modes of consumers could optimize, the power loads condition could be stable, and the efficiency and stability of power systems could be improved. In this paper, a new mathematical model of TOU power price is developed when load shifting is optimized based on DSM. Digital simulation is set up using MATLAB. It is verified that using TOU power price can achieve the goal of load shifting. Merits and defects of TOU power price are obtained by comparing simulation results of Ref. [5] with that of Ref. [6]. The effects of TOU power price is satisfactory.

This project is supported by the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teacher in Higher Education Institutions of MOE, P. R. China.

**Key words:** time-of-use (TOU) power price; DSM; load shifting; digital simulation