

# 电铁负荷特性对微机距离保护测量元件的影响研究

蓝智晖, 徐永海

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 研究的是电铁负荷对三种常见的微机距离保护测量元件算法的影响。根据某区域电网实际参数, 利用 PSCAD 建立了典型电气化铁路牵引系统模型及微机距离保护中傅里叶算法、一阶差分算法与解微分方程算法三种常见测量元件的数学模型。在此基础上, 结合电铁负荷的特性, 从理论上分析了电铁负荷对三种常见的微机距离保护测量元件算法的影响, 并利用 PSCAD 进行了数字仿真验证, 为在电铁负荷较重的地区装设的微机距离保护装置采用何种测量元件算法提供了理论依据。

**关键词:** 电铁负荷; 谐波; 不平衡负荷; 微机距离保护; 测量元件; PSCAD 仿真

## Research of the influence to the measurement unit of digital distance protection from electric locomotive loads

LAN Zhi-hui, XU Yong-hai

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This paper studies the influence of electric locomotive loads to three kinds of measurement unit of digital protection. A model is constructed by EMTDC/PSCAD, containing typical power grid and three kinds of measurement units of digital protection. The influence degree by electric locomotive loads to the Fourier algorithm, solving differential equation algorithm and first-order difference algorithm is discussed, using theoretical analysis combined with EMTDC/PSCAD simulation. The theoretical basis for the choice of measurement element is provided in the area where electrified railway is the primary load.

**Key words:** electric locomotive loads; harmonic; unbalanced loads; digital distance protection; measurement unit; PSCAD simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0059-06

## 0 引言

电铁负荷的冲击特性及其所产生的谐波电流与负序电流, 对线路微机距离保护的不利影响体现在多个方面。目前国内所进行的谐波对继电保护影响的研究较少<sup>[1-3]</sup>, 且针对平衡的三相谐波进行的, 较少考虑电气化铁路谐波单相、具有冲击性, 在谐波含量上3次谐波最大, 还有较大的5、7次谐波的特点。因此, 由三相平衡系统所得出的结论并不能完全适用于电气化铁路谐波问题。此外, 有关电铁负荷产生的负序电流对继电保护影响的研究较少, 且较为笼统, 同时, 微机距离保护在我国已得到广泛应用, 但有关电气化铁路谐波和负序对其影响的研究也较少。

本文结合实测数据, 运用PSCAD建立了某地区

电网模型、机车模型及距离保护中常用的三种测量元件模型。对电铁负荷的冲击特性, 及其所产生的谐波电流与负序电流对线路微机距离保护的测量元件影响进行了理论分析, 并通过PSCAD建立数学模型对相关结论进行了验证。

## 1 微机距离保护测量元件的特点

微机距离保护装置<sup>[3-6]</sup>是反映  $U/II=Z$  的保护, 也称为阻抗保护, 当测量阻抗小于整定阻抗时, 则保护动作; 反之, 则保护不动作。微机距离保护根据数模转换器提供的输入电气量的采样数据进行分析、运算和判断, 构成保护的動作特性方程, 以实现其保护的功能。

微机距离保护的主要元件包括: 启动元件、测量元件、时限元件、出口执行元件。其中测量元件的作用是反应故障点到保护安装处的距离, 它是距离保护中的核心元件, 其算法种类较多。以下分别对三种常用的测量元件算法受电铁负荷特性的影

基金项目: 国家电网公司电铁供电关键技术研究项目 (SGKJ[2007]102)

响进行分析。

### 2 EMTDC/PSCAD 数字仿真模型的建立

本文根据某区域电网实际参数，运用 PSCAD 建立了该电网的数学模型<sup>[7-9]</sup>。该区域电网如图 1 所示，本文依据该电网某时刻的潮流，设置了一般负荷潮流（即不含谐波与负序电流）PF1，其有功功率 28 MW、无功功率 4.3 MW，在仿真过程中一直保持不变；PF2 为 4 台 SS6 型电力机车负荷，其有功功率 18 MW、无功功率 8 MW，在仿真过程中 0.8 s 时投入；F 点为线路故障点，在仿真过程中设定在 5.2 s 时线路 50% 距离处发生 A 相发生直接接地短路故障。P 点为仿真过程中保护的安装地点。

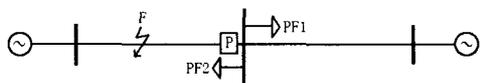


图 1 某区域电网接线图  
Fig.1 Electric primary system

本文建立的数字仿真模型在公用电网向电铁牵引变输出的馈线处测得电流波形如图 2(a)所示，与实测波形相似（见图 2(b)）。

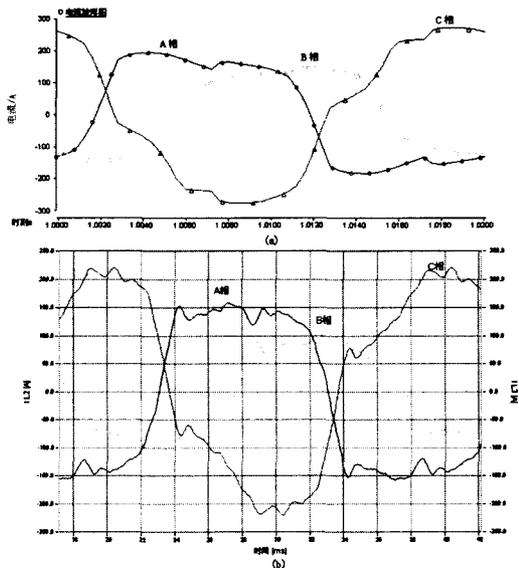


图 2 电流波形  
Fig.2 Waveform of current

为了分析电铁负荷谐波特性对测量元件的影响，本文设定了一个与电铁负荷功率及功率因数相等的普通负荷（即不含谐波电流）在仿真过程中替代电铁负荷，以便对比观察在没有谐波干扰下的电铁负荷的冲击性及产生的负序电流对测量元件的影响。

### 3 电铁负荷对测量元件的影响

测量元件是微机距离保护的核心元件，其主要作用是测量短路点到保护安装点之间的阻抗，并与整定值比较，以决定是否动作。阻抗计算采用公式：

$$Z_j = \frac{U_j}{I_j}$$

算法较多，一般微机距离保护采用的算法有：傅里叶算法、一阶差分算法、解微分方程算法。以下分别讨论电铁负荷对这三种测量算法的影响。

#### 3.1 对傅里叶算法的影响

当信号是周期函数时，它可以被分解为一个函数序列之和，或者说是一个级数。最常用到的就是傅里叶级数，它是将周期函数分解为正弦和余弦函数之和，最适合于计算机保护计算其基频分量或倍频分量。由于傅里叶算法具有很好的滤波能力，理论上能完全滤除一切谐波分量。利用傅里叶算法所得结果基本不受电铁负荷的谐波影响，PSCAD 仿真结果也证明了这一点。

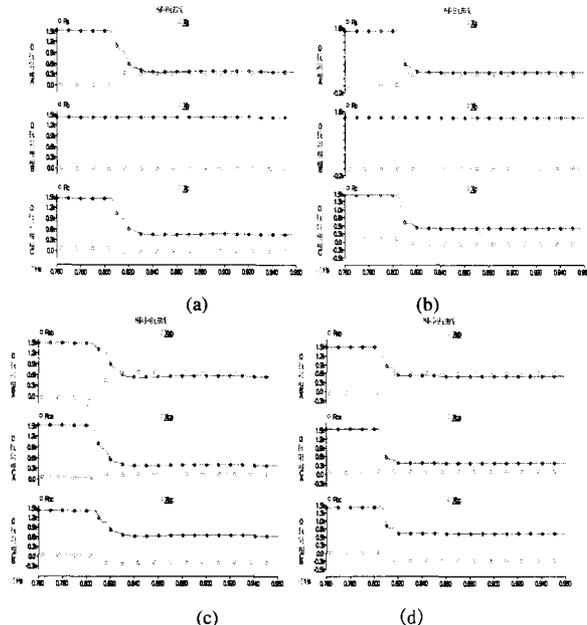


图 3 傅里叶算法测得的阻抗值

Fig.3 Waveform of impedance (by the Fourier algorithm)

图 3(a)是电力机车加入公用电网系统时，利用傅里叶算法所得的相阻抗波形图，图 3(b)是与电力机车负荷有功、无功功率相同的不含谐波的负荷加入公用电网系统时，利用傅里叶算法所得的相阻抗波形图。由于傅里叶算法具有良好的滤波效果，对比图 3(a)、图 3(b)可以看出在 0.8 s，负荷加入公用电网系统时，利用傅里叶算法所测阻抗值基本不受谐波干扰。

图 3(c)是电力机车加入公用电网系统时，利用

傅里叶算法所得的相间阻抗波形图, 图 3(d)是与电力机车负荷有功、无功功率相同的不含谐波的负荷加入公用电网系统时, 利用傅里叶算法所得的相间阻抗波形图。由于傅里叶算法具有良好的滤波效果, 对比图 3(c)、图 3(d)可以看出在 0.8 s, 负荷加入公用电网系统时, 相间阻抗值基本不受谐波干扰, 但由于 A、C 相带负荷较重, 三相电流不平衡, 所得 CA 相间阻抗值较 BC、AB 小。

通过上述分析可以得出傅里叶算法基本不受电力机车负荷产生的谐波的影响, 但受负荷电流不平衡的影响, 会导致所得各相、相间阻抗值产生差异。由于各相实际电流均低于额定电流, 与线路故障时导致的不平衡电流相比差别较大故不会引起保护误动。

### 3.2 对一阶差分算法的影响

一阶差分算法是基于输入信号为正弦量的算法的一种较常用的算法。一阶差分算法假定电流电压均为正弦波形, 即

$$\begin{cases} u = U_m \sin \omega t \\ i = I_m \sin(\omega t - \theta) \end{cases} \quad (1)$$

利用电流、电压的采样和倒数值的正交关系可以计算电流、电压的幅值、相位等。计算电流电压的一次微分, 有

$$\begin{cases} Z = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{\frac{\omega^2 u^2 + (u')^2}{\omega^2 i^2 + (i')^2}} \\ \varphi = \theta_u - \theta_i = \arctg \frac{\omega u}{u'} - \arctg \frac{\omega i}{i'} \end{cases} \quad (2)$$

容易求得电阻 R、电抗 X 值:

$$\begin{cases} R = \frac{u_k^2 + \left[ \frac{N(u_{k+1} - u_{k-1})}{4\pi} \right]^2}{i_k^2 + \left[ \frac{N(i_{k+1} - i_{k-1})}{4\pi} \right]^2} \cos\left(\arctg \frac{4\pi u_k}{N(u_{k+1} - u_{k-1})} - \arctg \frac{4\pi i_k}{N(i_{k+1} - i_{k-1})}\right) \\ X = \frac{u_k^2 + \left[ \frac{N(u_{k+1} - u_{k-1})}{4\pi} \right]^2}{i_k^2 + \left[ \frac{N(i_{k+1} - i_{k-1})}{4\pi} \right]^2} \sin\left(\arctg \frac{4\pi u_k}{N(u_{k+1} - u_{k-1})} - \arctg \frac{4\pi i_k}{N(i_{k+1} - i_{k-1})}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中:  $u_{k-1}$ ,  $u_k$ ,  $u_{k+1}$  和  $i_{k-1}$ ,  $i_k$ ,  $i_{k+1}$  分别为电压、电流的连续三个采样值。

可见, R、X 值主要由  $u_k$ 、 $i_k$ 、 $u_{k+1}-u_{k-1}$ 、 $i_{k+1}-i_{k-1}$  这 4 个量来决定, 当电压、电流输入信号波形变化率很小时, 则有  $u_{k+1}-u_{k-1}$ 、 $i_{k+1}-i_{k-1}$  接近于 0, 由式 (2) 可知, 这将导致  $\arctg \frac{4\pi u_k}{N(u_{k+1} - u_{k-1})}$ 、

$\arctg \frac{4\pi i_k}{N(i_{k+1} - i_{k-1})}$  的值接近于  $\pm \frac{\pi}{2}$ ; 当电压、电流

输入信号波形变化率很大时, 则有  $u_{k+1}-u_{k-1}$ 、 $i_{k+1}-i_{k-1}$  很大, 此时  $\arctg \frac{4\pi u_k}{N(u_{k+1} - u_{k-1})}$ 、 $\arctg \frac{4\pi i_k}{N(i_{k+1} - i_{k-1})}$  所得值会很小甚至接近于 0。

当电流输入信号波形变化率很小而电压输入信号波形变化率很大, 或电流输入信号波形变化率很大而电压输入信号波形变化率很小时, 式 (2)

中  $\varphi$  的值将接近于  $\pm \frac{\pi}{2}$ 。当电压、电流输入信号波

形变化率都很小, 或电压、电流输入信号波形变化率都很大导致时而电压输入信号波形变化率很小时, 式 (2) 中  $\varphi$  的值将接近于 0。一般情况下出现

上述情况的可能性较小, 但当线路带有较重电力机车负荷时, 由图 2 可见, 电流波形发生了畸变, 其波形近似于梯形波, 电流波形在过零点处变化率很大在波峰处变化率很小, 且电流波形波峰维持的时间较长, 使得  $i_{k+1} \approx i_{k-1}$  的情形持续的时间较长。故如图 4 所示, 角度  $\varphi$  的值波动范围较大, 由式 (3) 可知所得 R、X 值误差较大。

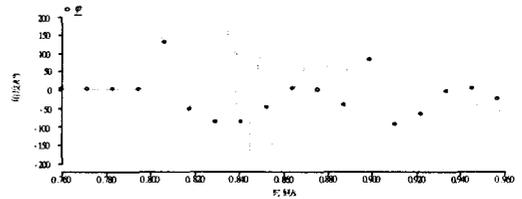


图 4  $\varphi$  值的波动图

Fig.4 Waveform of  $\varphi$

电力机车加入公用电网系统时, 利用一阶差分算法所得的相阻抗波形图如图 5(a), 电力机车负荷有功、无功功率相同的不含谐波的负荷加入公用电网系统时, 利用一阶差分算法所得的相阻抗波形图如图 5(b)。对比图 5(a)与图 5(b)可以看出, 在 0.8 s 负荷加入公用电网系统后, 利用一阶差分算法所得阻抗值受谐波影响严重。普通负荷因不产生谐波电流, 在加入后所得阻抗值基本与傅里叶算法所得结果一致, 但电力机车负荷加入后, 因受谐波干扰, 带负荷较大的 A、C 相阻抗值波动范围较大, 可见在线路发生高阻接地故障时容易发生保护越段误动。

图 5(c)是电力机车加入公用电网系统时, 利用一阶差分算法所得的相间阻抗波形图, 图 5(d)是与电力机车负荷有功、无功功率相同的不含谐波的负荷加入公用电网系统时, 利用一阶差分算法所得的

相间阻抗波形图。由图 5(d)可见在不计谐波干扰的情况下由于 A、C 相带负荷较重, 三相电流不平衡, 所得 CA 相间阻抗值较 BC、AB 小。由图 5(c)可见由于受谐波干扰, 所得相间阻抗值波动范围均较大, 波动的幅度仍受不平衡电流的影响, 如由于 A、C 相带载最重, 故 AC 相间阻抗波动幅度最小。

电力机车负荷加入后发生 A 相短路故障时 A 相阻抗值如图 5(e)所示, 普通负荷加入后发生 A 相短路故障时 A 相阻抗值如图 5(f)所示。可见在 5.2s 发生 A 相短路故障后由于短路电流较大, 谐波电流所占比重较小, 故利用一阶差分算法所得 A 相阻抗值基本不受谐波的干扰。

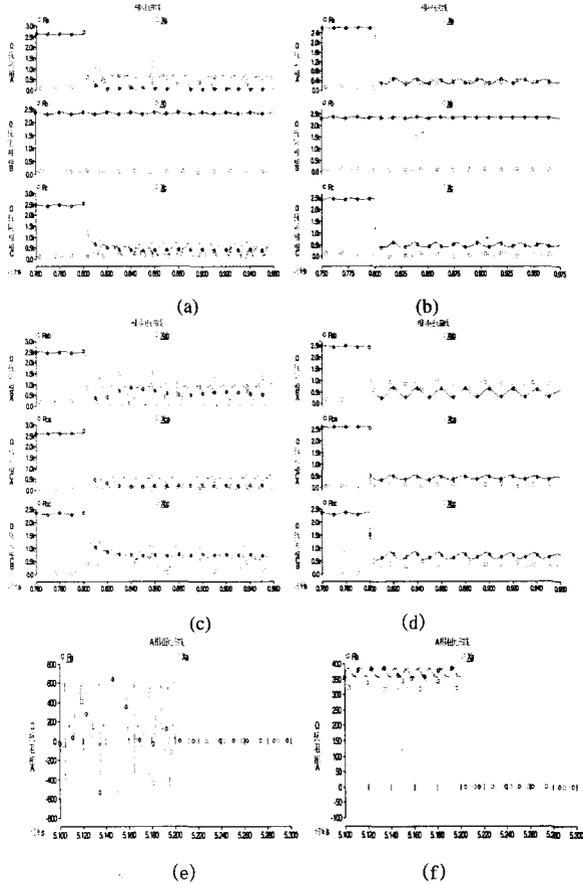


图 5 一阶差分算法测得的阻抗值

Fig.5 Waveform of impedance (by the first-order difference algorithm)

通过上述分析可以得出一阶差分算法受电力机车负荷产生的谐波的影响严重, 在电力机车负荷产生谐波干扰时所得相、相间阻抗值, 同时受负荷不平衡电流的影响, 导致所得相、相间阻抗值产生差异较大。当发生短路故障时, 因故障电流较大, 谐波电流所占比重较小, 故此时谐波对阻抗测量的影响基本可以忽略。

### 3.3 对解微分方程算法的影响

微分方程算法是假设系统是简单的 RL 串联电路, 因而可以写出如式(4)的微分方程

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

式中:  $u(t)$ 和  $i(t)$ 为保护测量到的电压和电流的瞬时值,  $R$ 、 $L$ 为假想系统模型的串联电阻和电感。

然后通过电压和电流的采样值计算  $R$  和  $L$ ,  $Z = R + j\omega L$  是继电器的视在阻抗。式(4)中的  $u(t)$ 、 $i(t)$ 和  $\frac{di(t)}{dt}$  都是可以测量、计算的, 未知数为  $R$  和  $L$ , 如果在两个不同的时刻分别测量  $u(t)$ 、 $i(t)$ 和  $\frac{di(t)}{dt}$ , 就可以得到两个独立的方程:

$$u_1 = Ri_1 + LD_1 \quad (5)$$

$$u_2 = Ri_2 + LD_2 \quad (6)$$

以上两式中  $D$  表示  $\frac{di(t)}{dt}$ , 下标“1”和“2”

分别表示测量时刻为  $t_1$  和  $t_2$ 。

联立式(5)、式(6)即可求得两个未知数  $R$  和  $L$ , 表示式分别为:

$$\begin{cases} L = \frac{u_1 i_2 - u_2 i_1}{i_2 D_1 - i_1 D_2} \\ R = \frac{u_2 D_1 - u_1 D_2}{i_2 D_1 - i_1 D_2} \end{cases} \quad (7)$$

在工程实际应用时, 电流的导数可用差分来近似计算, 最简单的方法是取  $t_1$  和  $t_2$  分别为两个相邻的采样瞬间的中间值, 近似有:

$$D_1 = \frac{i_{k+1} - i_k}{T_s}, \quad D_2 = \frac{i_{k+2} - i_{k+1}}{T_s}$$

邻采样点的平均值, 有:  $i_1 = \frac{i_n + i_{n+1}}{2}$ ,  $i_2 = \frac{i_{n+1} + i_{n+2}}{2}$ ;

$$u_1 = \frac{u_n + u_{n+1}}{2}, \quad u_2 = \frac{u_{n+1} + u_{n+2}}{2}$$

可见当电流输入信号波形变化率很小时, 则有  $i_{k+2} \approx i_{k+1} \approx i_k$ , 即  $D_1 \approx 0$ 、 $D_2 \approx 0$ , 由式(7)可知所得  $R$  和  $L$  的值将误差严重。一般情况下出现上述情况的可能性较小, 但当线路带有较重电力机车负荷时, 由图 2 可见, 电流波形发生了畸变, 其波形近似于梯形波, 电流波形在过零点处变化率很大在波峰处变化率很小, 且电流波形波峰维持的时间较长, 使得  $i_{k+2} \approx i_{k+1} \approx i_k$  的情形持续时间较长, 由式(7)可知当某时刻采样点同时在电压及电流波形峰处时, 由于  $u_1$  可能与  $u_2$

值接近、 $i_1$ 可能与 $i_2$ 值接近, 导致 $L$ 、 $R$ 值接近于0; 而当采样点在电流波峰处, 不在电压波峰处时, 由于 $D_1 \approx 0$ 、 $D_2 \approx 0$ , 可见此时 $L$ 、 $R$ 所得值均波动较大。

图 6(a)是电力机车加入公用电网系统时, 利用解微分方程算法所得的相阻抗波形图, 图 6(b)是与电力机车负荷有功、无功功率相同的不含谐波的负荷加入公用电网系统时, 利用解微分方程算法所得的相阻抗波形图。对比图 6(a)与图 6(b), 可以看出在 0.8 s, 负荷加入公用电网系统时, 利用解微分方程算法所得阻抗值受谐波干扰严重, 普通负荷加入后所得阻抗值基本与傅里叶算法所得结果一致, 但电力机车负荷加入后, 由于 A、C 相带负荷较重, 受谐波干扰所得 A、C 相阻抗值波动范围较大。

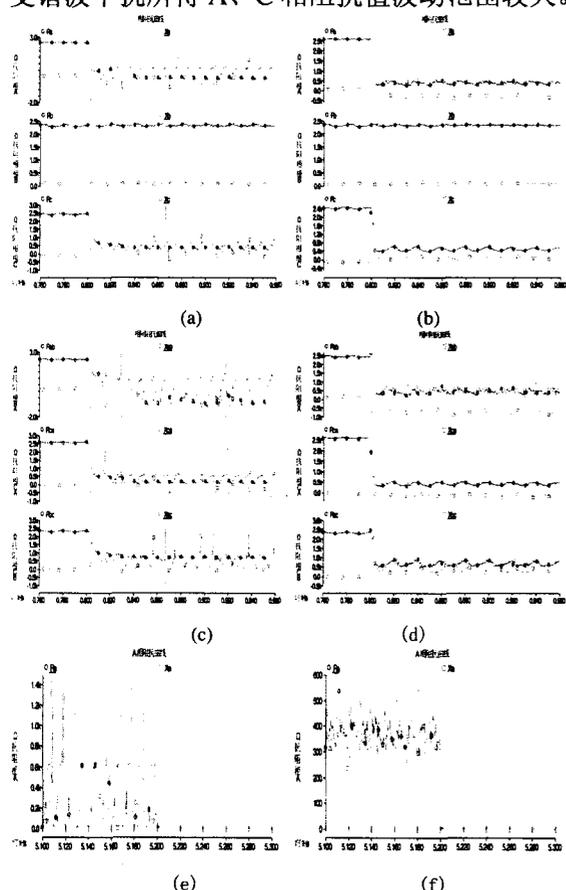


图 6 解微分方程算法测得的阻抗值

Fig.6 Waveform of impedance (by the solving differential equation algorithm)

图 6(c)是电力机车加入公用电网系统时, 利用解微分方程算法所得的相阻抗波形图, 图 6(d)是与电力机车负荷有功、无功功率相同的不含谐波的负荷加入公用电网系统时, 利用解微分方程算法所得的相阻抗波形图。由图 6(d)可见在不计谐波干扰的情况下由于 A、C 相带负荷较重, 三相电流不

平衡, 所得 CA 相间阻抗值较 BC、AB 小。由图 6(c)可见由于受谐波干扰, 所得相间阻抗值波动范围均较大, 波动的幅度仍受不平衡电流的影响, 如由于 A、C 相带载最重, 故 AC 相间阻抗波动幅度最小。

电力机车负荷加入后发生 A 相短路故障时 A 相阻抗值如图 6(e)所示, 普通负荷加入后发生 A 相短路故障时 A 相阻抗值如图 6(f)所示。可见在 5.2s 发生 A 相短路故障后由于短路电流较大, 谐波电流所占比重较小, 利用解微分方程算法所得 A 相阻抗值基本不受谐波的干扰。

通过上述分析可以得出解微分方程算法受电力机车负荷产生的谐波的影响严重, 在电力机车负荷产生谐波干扰时所得相、相间阻抗值, 同时受负荷不平衡电流的影响, 导致所得相、相间阻抗值产生差异。当发生短路故障时, 因谐波电流所占比重较小, 故此时谐波对阻抗测量的影响基本可以忽略。

#### 4 结论

通过对比分析可见, 傅里叶算法基本不受电力机车负荷产生的谐波的影响, 同时受不平衡负荷电流的影响, 导致所得各相、相间阻抗值产生差异, 由于各相实际电流均低于额定电流, 与线路故障时导致的不平衡电流相比差别较大故不会引起保护误动。

解微分方程算法同一阶差分算法比较, 虽然这两种算法均严重受谐波影响, 但解微分方程算法受谐波的影响比一阶差分算法更大(见图 5 与图 6), 其所得的阻抗不仅波动范围比一阶差分算法大, 而且测得的电抗值  $X$  接近 0 的时刻较多, 极易在发生高阻接地故障时, 由于本文所根据的某区域电网实际参数是一双侧电源的线路, 由于对侧电源的助增, 过渡电阻的影响呈容抗性, 可能使保护的测量阻抗减小<sup>[11]</sup>, 同时由于解微分方程算法所得的电阻值  $R$  进一步减小, 从而更容易导致距离保护发生保护 I 段误动的情况。

表 1 FIR 型滤波算法  
Tab.1 FIR filter algorithm

	沃尔什算法	余弦滤波	全周傅氏滤波	最小二乘法
频率特性	差	好	好	较好
延迟时间	1 个周波	$1\frac{1}{4}$ 个周波	1 个周波	时间窗可变
计算量	少	较少	较少	多

在实际保护装置中, 解微分方程算法与一阶差分算法计算时所用数据都会经过 FIR 型数字滤波器

加工处理,但数字滤波器的滤波效果差别较大<sup>[10]</sup>,如表1所示。其中沃尔什算法和余弦滤波算法滤除电铁负荷所产生的谐波效果较差,不能在电铁负荷较重的地区配合解微分方程算法与一阶差分算法使用。全波傅里叶算法理论上能完全滤去谐波分量,实际滤波效果也很好,在电铁负荷较重的地区配合解微分方程算法与一阶差分算法使用能避免谐波对这两种算法的干扰。而最小二乘法滤除效果也较好,只是计算量较大,如果保护硬件条件允许,可根据电铁负荷所产生的谐波以3、5、7次谐波为主的情况,设计一种以滤除3、5、7次谐波为主的最小二乘法数字滤波器,也可满足安装在电铁负荷较重地区的微机距离保护使用解微分方程算法与一阶差分算法的计算需求。

参考文献

[1] 张直平. 城市电网谐波手册[M].北京:中国电力出版社,2001.

[2] 吴竞昌. 供电系统谐波[M].北京:中国电力出版社,1998.

[3] 胡玉峰,尹项根,陈德树,等.TCSC的继电保护数字仿真研究[J].电力系统自动化,2002,26(16):39-44. HU Yu-feng,YIN Xiang-gen,CHEN De-shu,et al.Digital Simulation of Protective Relaying based on TCSC[J].Automation of Electric Power Systems,2002,26(16):39-44.

[4] 杨奇迹,黄少锋,微型机继电保护基础(第二版)[M].北京:水利电力出版社,2005.

[5] 王梅义. 电网继电保护应用[M].北京:中国电力出版社,1999.

[6] 杨奇迹,刘建飞,张涛,等. 现代微机保护技术的发

展于分析[J].电力设备,2003,4(5):10-14.

YANG Qi-xun,LIU Jian-fei,ZHANG Tao, et al.Technical Development and Analysis on Modern Microprocessor-based Protection[J].Electrical Equipment,2003,4(5):10-14.

[7] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M].北京:中国水利水电出版社,2002.

[8] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真[M].北京:中国电力出版社,2007.

[9] 郭征,贺家李,扬洪平,等. 电力系统故障时继电保护装置动态特性的数字仿真[J].电力系统自动化,2003,27(11):38-40. GUO Zheng, HE Jia-li, YANG Hong-ping,et al.Digital Simulation of Dynamic Performance of Protective Relaying Devices During Faults[J].Automation of Electric Power Systems,2003,27(11):38-40.

[10] 胡剑琛. 微机继电保护数据预处理的研究(硕士学位论文)[D].北京:华北电力大学,2004.

[11] 张晶晶,曹锐. 距离保护特性元件躲过渡电阻能力分析与研究[J].继电器,2004,32(6):17-19,26. ZHANG Jing-jing, CAO Rui. Analysis and Research on the Ability of Distance Protection Element Standing the Influence of Transition Resistanc [J].Relay,2004,32(6):17-19,26.

收稿日期:2008-08-22; 修回日期:2008-10-13

作者简介:

蓝智晖(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: lanzhihui81@yahoo.com.cn

徐永海(1966-),男,教授,主要从事电力系统谐波、电能质量等方面的研究工作。

(上接第58页 continued from page 58)

[11] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术,2006,30(2):1-5. QI Xu, ZENG De-wen, SHI Da-jun, et al. Study on Impacts of UHVDC Transmission on Power System Stability[J]. Power System Technology, 2006,30(2):1-5.

[12] Scherer H N,Vassell G S.Transmission of Electric Power at Ultra-high Voltages: Current Status and Future Prospects[J].Proceedings of the IEEE,1985,73(8):1252-1278.

[13] 李立成. 特高压直流输电的技术特点与工程应用[J]. 电力设备,2006,7(3):1-4. LI Li-cheng. Technical Characteristics and Engineering Applications of UHVDC Power Transmission[J]. Electrical Equipment,2006,7(3):1-4.

[14] Hammad A E.Stability and Control of HVDC and AC Transmission in Parallel[J].IEEE Trans on Power Delivery,1999,14(4):1545-1554.

[15] Johnson B K.HVDC Models Used in Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1989,4(2):1153-1163.

收稿日期:2008-09-06; 修回日期:2008-09-29

作者简介:

王 蓁(1984-),女,硕士生,主要从事电力系统及其自动化方向的研究。E-mail:mimi19840223@163.com