衰减非周期分量新算法的研究

冯勇，刘世明，陈卫，张哲，陈德树

(华中理工大学电力工程系，湖北　武汉　430074)

【摘要】 介绍了一种计算衰减非周期分量的新算法，并进行了仿真计算，最后对算法的应用作了一些讨论。

【关键词】 信号波形分析；　衰减非周期分量；　算法

1　引言

在电力系统发生故障时，实际的信号中往往含有衰减的非周期分量和高频分量，这些分量的存在必然使计算结果产生误差。对于高频分量，人们已经找到了很好的解决办法(傅氏算法等方法)，而衰减非周期分量则一直以来都是一个很棘手的问题。为了克服衰减非周期分量的影响，许多学者都进行了大量的研究，提出了一些算法[1][2]，这些算法对于工程实际中克服衰减非周期分量的影响取得了较好的效果。但从分析的角度来看，这些算法主要以滤除衰减直流分量，以减小其对保护动作特性的影响，因而没有将衰减非周期分量计算出来，或者计算时作了比较粗糙的近似处理，因而仍然无法知道衰减非周期分量的准确描述。本文将从信号波形分析的角度出发，介绍一种比较精确的方法，来计算衰减非周期分量。

2　衰减非周期分量的计算

2.1　基本算法

电力系统短路时采用下述模型：

$$f(t) = I_{d0}e^{-t/T_d} + \sum_{n=1}^{M} I_n\cos(n\omega_0 t + \phi_n) \qquad (1)$$

即包含有基频分量、整倍次谐波分量和衰减直流分量。其中 I_{d0} 为衰减直流初始值，T_d 为衰减时间常数。

对(1)式连续两次进行一周波积分，并离散化，由于第二项积分为零，故可得：

$$F_0 = \sum_{i=0}^{N-1} f(i\cdot T_s) = I_{d0}\sum_{i=0}^{N-1} e^{-i\cdot T_s/T_d} = I'_{d0} \qquad (2)$$

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N} f(i\cdot T_s) = I_{d0}\sum_{i=1}^{N} e^{-i\cdot T_s/T_d} = I'_{d0}e^{-T_s/T_d} \qquad (3)$$

(2)比(3)可得：$F_0/F_1 = e^{T_s/T_d}$　(4)

取对数可得：$T_d = T_s/(\ln F_0 - \ln F_1)$，

$$I_{d0} = \frac{F_0}{\sum_{i=0}^{N-1} e^{-i\cdot T_s/T_d}} = F_0\cdot\frac{1-e^{-T_s/T_d}}{1-e^{-NT_s/T_d}} \qquad (5)$$

如果采用近似处理，由(4)可得：

$$\frac{F_0}{F_1} = 1 + \frac{T_s}{T_d} + \frac{1}{2!}\left(\frac{T_s}{T_d}\right)^2 + \cdots$$

取：$\frac{F_0}{F_1} = 1 + \frac{T_s}{T_d}$，则有：$T_d = \frac{T_s\cdot F_1}{F_0 - F_1} = \frac{T_s\cdot F_1}{f_0 - f_N}$

(6)

其中，f_0 为第0个采样值，f_N 为第 N 个采样值。

(6)同(5)相比，虽然作了近似处理，但仿真计算结果仍然相当精确，而它的计算量却小的多。

在这里，也许有人会问：电力系统中的实际信号并非如(1)式中的模型那么理想，会存在各种噪音干扰，本文将重点解决这方面的问题。干扰的存在，对(1)式模型的主要影响是：增加了非整倍次谐波分量，而其一周波积分不为零，因而上述算法在这种情况下就不能运用。上述算法实质上是两点拟合，对于形如(1)的模型，其计算是精确的。

2.2　改进算法

在存在干扰的情况下，我们采用最小二乘法来拟合实际信号，模型为：

$$f(t) = I_{d0}e^{-t/T_d} + \sum_{n=1}^{M} I_n\cos(n\omega_0 t + \phi_n) + W \qquad (7)$$

其中，各种噪音干扰用 W 表示，其数学描述为：$W = \sum_k x(k)\cos(p_k\omega_0 t + \phi_k)$，$P_k$ 可为非正整数。对(7)式连续 N 次进行一周波积分，并离散化，可得：

$$F_0 = \sum_{i=0}^{N-1} f(i\cdot T_s) = I_{d0}\sum_{i=0}^{N-1} e^{-i\cdot T_s/T_d} + W_0 = I'_{d0} + W_0$$

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N} f(i\cdot T_s) = I_{d0}\sum_{i=1}^{N} e^{-i\cdot T_s/T_d} + W_1 = I'_{d0}e^{-T_s/T_d} + W_1$$

$$\cdots$$

$$F_{N-1}=\sum_{i=N-1}^{2N-2} f(i \cdot T_s)=I_{d0}\sum_{i=N-1}^{2N-2} e^{-i \cdot T_s/T_d}+W_{N-1}=I'_{d0}e^{-(N-1)T_s/T_d}+W_{N-1}$$

即：$F(t)=I'_{d0}e^{-t/T_d}+W'$ (8)

其中：$F(t)=F(k \cdot T_s)=\sum_{i=k}^{N-1+k} f(k \cdot T_s)$，$k=0$，1，2，…，$N-1$。

当令 w 为对 $F(t)$ 和 $I_{d0}e^{-t/T_d}$ 取对数意义下的噪音时，即：

$$w=\ln F(t)-\ln(I'_{d0}e^{-t/T_d})$$

并令 $y(t)=\ln F(t)$，$A=\ln I'_{d0}$，$B=-1/T_d$，则有：

$$y(t)=A+Bt+w \quad (9)$$

为了使干扰 w 的影响最小，我们采用最小二乘准则。即，求使

$w^T w=[y(t)-\overline{y(t)}]^T[y(t)-\overline{y(t)}]$ 为最小的拟合函数 $\overline{y(t)}$。

拟合函数的一般形式为：$\overline{y(t)}=\sum_{k=0}^{k}\alpha_k\phi_k(t)$，由(9)式，取：

$y(t)=A\phi_0(t)+B\phi_1(t)$，其中 $\phi_0(t)=1$，$\phi_1(t)=t$，则方程为：

$$\begin{bmatrix}(\phi_0,\phi_0) & (\phi_0,\phi_1)\\(\phi_1,\phi_0) & (\phi_1,\phi_1)\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}A\\B\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}d_0\\d_1\end{bmatrix} \quad (10)$$

其中：$(\phi_0,\phi_0)=\sum_{i=0}^{N-1}1\times 1=N$

$$(\phi_0,\phi_1)=\sum_{i=0}^{N-1}1\times t=\frac{N(N-1)}{2}T_s$$

$$(\phi_1,\phi_0)=\sum_{i=0}^{N-1}t\times 1=\frac{N(N-1)}{2}T_s$$

$$(\phi_1,\phi_1)=\sum_{i=0}^{N-1}t\times t=\frac{N(N-1)(2N-1)}{6}T_s^2$$

$$d_0=[\phi_0,\overline{y(t)}]=\sum_{i=0}^{N-1}1\times\overline{y(i \cdot T_s)},$$

$$d_1=[\phi_1,\overline{y(t)}]=\sum_{i=0}^{N-1}t\times\overline{y(i \cdot T_s)}$$

由方程(10)可解出 A 和 B，进而求出：

$$T_d=-1/B,\ I'_{d0}=e^A,$$

$$I_{d0}=\frac{I'_{d0}}{\sum_{i=0}^{N-1}e^{-i \cdot T_s/T_d}}=\frac{e^A(1-e^{-T_s/T_d})}{1-e^{-NT_s/T_d}}$$

若还考虑恒定直流的影响，即模型为：

$$f(t)=I_0+I_{d0}e^{-t/T_d}+\sum_{n=1}^{M}I_n\cos(n\omega_0 t+\phi_n)+W \quad (11)$$

此时可先对(11)式进行差分处理，化成(7)式，再依次算出 T_d，I_{d0}，I_0。

改进算法实质上是 N 点拟合，比基本算法的两点拟合要精确许多。

3 仿真计算结果

我们对基本算法以及改进算法在无干扰和有干扰的四种情况进行了仿真计算，仿真结果分别见附表 1，2，3，4。

附表 1：基本算法的无干扰算例

$I_{dm}=1.650$	$T_{dm}=0.100$	$I_{dc}=1.650754$	$T_{dc}=0.099504$
$I_m(1)=20.0$	$I_c(1)=20.000$	$Q_m(1)=120.0$	$Q_c(1)=120.000$
$I_m(2)=6.0$	$I_c(2)=6.000$	$Q_m(2)=90.0$	$Q_c(2)=90.001$
$I_m(3)=10.0$	$I_c(3)=10.000$	$Q_m(3)=60.0$	$Q_c(3)=60.001$
$I_m(4)=3.0$	$I_c(4)=3.000$	$Q_m(4)=45.5$	$Q_c(4)=45.502$
$I_m(5)=6.0$	$I_c(5)=6.000$	$Q_m(5)=30.0$	$Q_c(5)=30.001$
$I_m(6)=0.0$	$I_c(6)=0.000$	$Q_m(6)=0.0$	$Q_c(6)=145.494$

其中：I_{dm} 为模型中给定衰减直流初值，I_{dc} 为衰减直流分量计算值

T_{dm} 为模型中给定衰减时间常数，T_{dc} 为衰减时间常数计算值

$I_m(k)$ 为模型中给定 k 次谐波幅值，$I_c(k)$ 为 k 次谐波幅值计算值

$Q_m(k)$ 为模型中给定 k 次谐波相位，$Q_c(k)$ 为 k 次谐波相位计算值，下同。

附表 2：基本算法的有干扰算例

$I_m(2.5)=1.00$	$I_m(3.5)=1.00$	$I_m(4.5)=1.00$	$I_m(5.5)=1.00$
$I_{dm}=1.650$	$T_{dm}=0.100$	$I_{dc}=1.245704$	$T_{dc}=-0.015913$
$I_m(1)=20.0$	$I_c(1)=15.976$	$Q_m(1)=120.0$	$Q_c(1)=114.892$
$I_m(2)=6.0$	$I_c(2)=8.130$	$Q_m(2)=90.0$	$Q_c(2)=102.642$
$I_m(3)=10.0$	$I_c(3)=11.306$	$Q_m(3)=60.0$	$Q_c(3)=69.259$
$I_m(4)=3.0$	$I_c(4)=3.456$	$Q_m(4)=45.0$	$Q_c(4)=55.258$
$I_m(5)=6.0$	$I_c(5)=5.066$	$Q_m(5)=30.0$	$Q_c(5)=25.676$
$I_m(6)=0.0$	$I_c(6)=0.388$	$Q_m(6)=0.0$	$Q_c(6)=149.516$

附表 3：改进算法的无干扰算例

$I_{dm}=1.650$	$T_{dm}=0.100$	$I_{dc}=1.650001$	$T_{dc}=0.100000$
$I_m(1)=20.0$	$I_c(1)=20.000$	$Q_m(1)=120.0$	$Q_c(1)=120.000$
$I_m(2)=6.0$	$I_c(2)=6.000$	$Q_m(2)=90.0$	$Q_c(2)=90.000$
$I_m(3)=10.0$	$I_c(3)=10.000$	$Q_m(3)=60.0$	$Q_c(3)=60.000$
$I_m(4)=3.0$	$I_c(4)=3.000$	$Q_m(4)=45.0$	$Q_c(4)=45.000$
$I_m(5)=6.0$	$I_c(5)=6.000$	$Q_m(5)=30.0$	$Q_c(5)=30.000$
$I_m(6)=0.0$	$I_c(6)=0.000$	$Q_m(6)=0.0$	$Q_c(6)=-127.455$

附表 4：改进算法的有干扰算例

$I_m(2.5)=1.00$	$I_m(3.5)=1.00$	$I_m(5.5)=1.00$	$I_m(6.5)=1.00$
$I_{dcm}=1.650$	$T_{dm}=0.100$	$I_{dc}=1.667596$	$T_{dc}=0.102435$
$I_m(1)=20.0$	$I_c(1)=20.368$	$Q_m(1)=30.0$	$Q_c(1)=29.220$
$I_m(2)=6.0$	$I_c(2)=5.729$	$Q_m(2)=90.0$	$Q_c(2)=81.727$
$I_m(3)=10.0$	$I_c(3)=10.213$	$Q_m(3)=120.0$	$Q_c(3)=118.244$
$I_m(4)=3.0$	$I_c(4)=3.737$	$Q_m(4)=180.0$	$Q_c(4)=158.158$
$I_m(5)=6.0$	$I_c(5)=5.805$	$Q_m(5)=240.0$	$Q_c(5)=-120.490$
$I_m(6)=0.0$	$I_c(6)=0.715$	$Q_m(6)=0.0$	$Q_c(6)=-114.675$

可以看到，此算法的计算结果非常精确。

(下转第 26 页)

从计算结果可以看出:随着线路输送功率的增大,瞬时性与永久性故障时的 $\nabla\phi$ 都增大,这是由于线路输送功率增大时,电磁感应电压增大,而两端电磁感应电压是反相的;随着线路补偿度的增大,瞬时性与永久性故障时的 $\nabla\phi$ 都增大,这是由于随着线路补偿度的增大,断开相电压的电容耦合分量减小,电磁感应电压的作用增大;对于四种线路电抗器联结方式,当发生永久性故障时,$\nabla\phi$ 的值均大于发生瞬时性故障时的 $\nabla\phi$ 的值,由于接地电阻及健全相首末两端电流的相位差影响,永久性故障时 $\nabla\phi$ 的值小于 180°,这在线路输送功率较小时比较明显。

4 结论

超高压输电线路发生单相接地故障断开时,断开相两端的电压相角差与故障的类型有关。当发生瞬时性故障时,由于线路电压变化范围有限,断开相两端的电压角位差与线路的补偿度、输送电流及长度有关;而在永久性故障情况下,当接地电阻较小时,电容耦合电压较小,因而断开相两端的电压相角差远大于瞬时性故障时断开相两端的电角相位差。可通过计算整定一个角度,故障发生时,断开相两端的电压相角差大于此值判定为永久性故障,断开相两端的电压相角差小于此值判定为瞬时性故障。

[参考文献]

[1] 周玉兰,王玉玲. 1996 年全国继电保护与安全自动装置运行情况分析. 电网技术,1997(7).

[2] 西北电力设计院. 电机工程设计手册(电气一次部分). 水利电力出版社.

[3] 葛耀中. 在单相重合闸过程中判别瞬时性和永久性故障的方法. 西安交通大学学报,1984,18(2):23～31.

[4] Ge Yaozhong, Sui Fenghai, Xiao Yuan. Prediction Methods for Prevention Single - phase Reclosing on Permanent Fault. IEEE Trans on Power Delivery, 1989,4(1):114～121.

[5] 陈维贤. 超高压电网稳态计算. 水利电力出版社,1993,10.

收稿日期:1998—10—20

作者简介:范越(1970 -),男,博士在读,研究方向为电力系统数字仿真; 施围(1941 -),男,教授,博导,研究方向为电力系统暂态计算。

IDENTIFICATION THE TYPE OF SINGLE - PHASE - TO - GROUND FAULT IN EHV LINES

FAN Yue, SHI Wei

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract There are two types of single - phase - to ground faults in EHV lines, one is temporay, the other is permanent. The voltage angel of faulty phase was chosen to study, after the faulty phase was isolated from both terminals. Through the EMTP calculation, an example is used to explain how to find the way to identify the two types of single - phase - to - ground faults.

Keywords single phase earthing; permanent fault; instantaneous fault; electromagnetic transient; phase angle

(上接第 15 页)

4 结束语

这种算法的缺点是计算量比较大,目前还不适用于保护,但由于其计算结果非常精确,作为信号波形的一种分析算法(如用于故障录波中的波形分析),其优点是明显的。随着计算机硬件技术的飞速发展,微处理器速度的大幅度提高,这种算法将有可能在保护装置中得到运用。

[参考文献]

[1] 尹项根,陈德树. 数字保护常用算法的研究. 电力系统及其自动化学报,1991,6.

[2] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 水利电力出版社,1991.

收稿日期:1998—09—22

作者简介:冯勇(1972 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护与自动化。

STUDY ON THE NEW ALGORITHM OF DECAYING DC COMPONENTS

FENG Yong, LIU Shi-ming, CHEN Wei, ZHANG Zhe, CHEN De-shu

(Huazhang University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A new algorithm for calculating decaying DC components is presented in this paper. The simulation results are given.

Keywords waveform analysis; decaying DC components; alogorithm