

滤除衰减直流分量的动态同步相量测量算法

麦瑞坤¹, 何文¹, 何正友¹, 薄志谦², 钱清泉¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 610031;

2. 阿海珐输配电自动化有限公司, 英国 斯塔福德 ST17 4LX)

Dynamic Phasor Estimator With Removing Decaying DC Component

MAI Ruikun¹, HE Wen¹, HE Zhengyou¹, BO Zhiqian², QIAN Qingquan¹

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China;

2. AREVA T&D Automation Co. Ltd, Stafford ST17 4LX, UK)

ABSTRACT: Decaying DC component and time variation of frequency and magnitude of fundamental component, which reduce the accuracy of phasor estimation of discrete Fourier transform (DFT), tend to exist in fault current when a fault occurs under dynamic conditions. A new dynamic signal model extended from a static signal model was introduced to express time variation and decaying DC component. Then two filters, one for fundamental phasor and another for DC component, were employed to estimate them. Finally, the accurate phasor estimation was attained by revising the phasor estimation of DFT. Ideal signals and PSCAD/EMTDC generated signals were adopted to verify the performance of proposed algorithm. The simulations show that the proposed algorithm can eliminate the impacts of time variation and decaying DC component and improve estimation accuracy compared to traditional algorithms though some additional computation is needed.

KEY WORDS: decaying DC component; discrete Fourier transform (DFT); dynamic phasor estimation; fault current; phasor estimation; power oscillation

摘要: 在动态条件下的故障电流不仅往往含有衰减直流分量, 而且其基波分量的幅值与频率也可能是随时间而变化的。正是这2个因素影响了由传统傅里叶变换得到的相量测量的精度。拓展了原来的静态信号模型, 使其能正确表示信号基波分量的时变性以及衰减直流分量, 再利用基波滤波器 and 直流滤波器来分别对基波分量的时变性以及衰减直流分

量进行估计, 并对短时傅里叶变换相量测量结果进行修正来提高相量测量精度。分别应用理想信号以及 PSCAD/EMTDC 仿真信号来检验算法的性能, 仿真结果表明, 虽然需要增加有限的运算量, 但与传统的算法相比, 所提出的算法能消除或减弱故障电流的基波分量时变性以及衰减直流分量对同步相量测量的影响, 并大大提高故障电流的相量测量精度。

关键词: 衰减直流分量; 离散傅里叶变换; 动态相量测量; 故障电流; 相量测量; 功率振荡

0 引言

在功率振荡条件下, 故障电流信号基波分量的幅值与频率也可能是随时间而变化的, 应用标准的余弦函数来近似表示故障电流信号将会引起模型误差; 再者, 在发生接地故障时, 电流信号可能包含衰减直流分量。故障信号基波分量的时变性以及衰减直流分量会使传统傅里叶相量测量算法的测量结果出现偏差, 因此, 研究能消除基波信号的时变性对测量精度的影响及衰减直流分量对同步相量测量结果的影响的算法是有必要的。

近来, 一些文献考虑基波分量时变性对相量测量的影响, 并提出了相应的相量测量算法。有学者提出用改进离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 算法^[1-3]来解决在非同步采样情况下测量所引起的频谱泄漏问题, 此方法不仅能精确地测量出信号的相角和幅值, 而且仅需要较少的计算量。在文献[4-6]中, Serna 提出了动态相量测量方法来提高在电力系统振荡过程中的相量测量精度。文献[7]提出一种基于动态信号模型的改进 DFT 算法, 可对信号的基波分量的时变性进行合理的表示, 并利用此信息来修正改进 DFT 算法的测量结果。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(50877068); 四川省杰出青年基金项目(06ZQ026-012); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0799)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877068); Excellent Youth Found of Sichuan Province (06ZQ026-012); Project Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-06-0799).

以上算法的主要改进在于基波信号频率或幅值变化时相量测量的准确性,然而,在系统发生接地故障后,衰减直流分量可能是影响相量测量精度最主要的因素之一。

一种基于一周波加1个^[8-10]或2个^[11-12]采样点的改进DFT算法能够在衰减时间常数以及初幅值未知的前提下正确地估计出衰减直流分量的参数,从而得到精确估计结果。滤除衰减直流分量的数字模拟滤波技术^[13]需要已知衰减时间常数才能得到满意的滤波效果。在文献[14]中作者提出一种自适应滤除衰减直流分量的算法,该算法可以很好地滤除直流分量。文献[15]所提出的一种新的衰减直流估计算法需要额外对一个基波周期的信号进行一次积分运算,然后根据积分的结果对衰减直流分量进行估计。

以上相量测量算法可分为2类:一类是不考虑衰减直流分量的影响,只针对电力系统的基波信号的时变性来进行的相量测量;另一类则是在静态条件(假定基波相量不变)下考虑消除故障电流中衰减直流分量影响的同步相量测量算法。实际上,电网在功率振荡下发生接地故障时,不仅故障电流信号的基波分量具有时变性,而且可能包含衰减直流分量。如果不能同时消除或减弱这2种因素对信号相量测量的影响,同步相量测量算法的精度将会受到一定的限制,以至影响高层应用的效果,如状态估计^[16]、自适应保护^[17]和故障测距^[18-19]等。

1 故障电流模型

在动态条件(如系统发生低频振荡)下,信号的频率和幅值会快速变化,传统的静态信号模型已经不能正确反映信号基波分量的时变性,因此,本文应用一个低频带限相量 $a(t)$ 以及旋转调制相量 $\sqrt{2}e^{j2\pi f_0 t}$ 的实部来表示电力信号的基波分量,而以一个衰减指数函数来表示其衰减直流分量。基波相量以及电力信号如式(1)和式(2)所示:

$$X(t) = a(t)\sqrt{2}e^{j2\pi f_0 t} \quad (1)$$

$$x(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re}[a(t)\sqrt{2}e^{j2\pi f_0 t}] + be^{-t/\tau} \quad (2)$$

式中: b 、 τ 分别为衰减直流分量的幅值初始值和衰减时间常数; f_0 为旋转调制相量的频率,Hz。在静态条件下, $a(t)$ 为一常量,利用传统的相量测量算法就能精确计算出其在 t 时刻的基波相量值;而在动态条件下, $a(t)$ 为一时变量,用传统的相量测量算法会带来一定的误差。通常情况下,信号的基频

分量变化相对缓慢,因此可以用泰勒级数来近似表示较短一段时间内的 $a(t)$:

$$a(t) = \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} a^{(k)} t^k + \Delta \approx \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} a^{(k)} t^k \quad (3)$$

式中: $a^{(k)}$ 为 $a(t)$ 的 k 阶导数; Δ 为泰勒级数的误差; K 为动态信号用泰勒级数表示的最高阶次, K 的取值越大, $a(t)$ 越接近于真实值,就越能准确地表示信号基波分量的时变性,但是, K 取值越大,运算量越大,算法所需时间越长,不利于算法对快速性的要求。

将式(3)代入式(2),可以得到泰勒级数形式的电力系统动态信号模型,即

$$x(t) = \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} a^{(k)} t^k e^{j2\pi f_0 t} + \left(\sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} a^{(k)} t^k \right)^* e^{-j2\pi f_0 t} + be^{-t/\tau} \quad (4)$$

以采样频率 $f_s(f_s = Mf_0, M$ 为一个基波周期的采样点数)对式(4)进行离散化处理,可得信号的离散序列:

$$x(n) = \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} \alpha^{(k)} n^k e^{j\omega_0 n} + \left(\sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} \alpha^{(k)} n^k \right)^* e^{-j\omega_0 n} + be^{-\beta n} \quad (5)$$

式中: $n = tf_s$; $\alpha^{(k)} = a^{(k)}/f_s$; $\omega_0 = 2\pi f_0/f_s$; $\beta = 1/\tau$ 。

2 滤除衰减直流分量的动态相量测量算法

2.1 基波分量滤波器

设 $h(n)$ 是一长为 M 的窗函数序列,用 $h(n)$ 对采样序列 $x(n)$ 进行加窗处理,再对得到的数据窗序列进行离散傅里叶变换。以 t_{ref} 为参考时刻,由基波分量滤波器得到的相量测量值为

$$X(t_m, t_{\text{ref}}) = \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} x(n+l)h(n)e^{-j(n+l)\omega_0} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)并整理,可得

$$\begin{aligned} X(t_m, t_{\text{ref}}) &= \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} x(n+l)h(n)e^{-j(n+l)\omega_0} = \\ &= \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \left[\sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} \alpha^{(k)} (n+l)^k \right] e^{j(n+l)\omega_0} h(n)e^{-j(n+l)\omega_0} + \\ &+ \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \left[\sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} \alpha^{(k)} (n+l)^k \right]^* e^{-j(n+l)\omega_0} h(n)e^{-j(n+l)\omega_0} + \\ &+ \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} be^{-(n+l)\beta} h(n)e^{-j(n+l)\omega_0} = \\ &= \mathbf{D}_{K,l} \mathbf{A} + \mathbf{C}_{K,l} \mathbf{A}^* + B_{\beta,l} F_{\beta} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{A} = [\alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}, \dots, \alpha^{(K)}]^T$; $\mathbf{D}_{K,l} = [H(0, l, 0), \dots, H(K, l, 0)]$; $\mathbf{C}_{K,l} = [H(0, l, -2\omega_0), \dots, H(K, l, -2\omega_0)]$,

$$H(k, l, \omega) = \frac{1}{k!} \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} (n+l)^k h(n)e^{j(n+l)\omega}; \quad B_{\beta, l} =$$

$be^{-j\omega_0}e^{-\beta l}$; $F_\beta = \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} h(n)e^{-\beta n-jn\omega_0}$; * 为共轭运算符; t_m 为数据窗中心时刻; l 为数据窗中心与参考时刻之间的距离, 即 $l=(t_m-t_{\text{ref}})f_s$ 。

由于 DFT 算法的分析基础是周期信号, 所以对于式(5)中含有直流分量以及基波分量存在时变性的信号而言, 传统算法的计算结果会产生误差。由式(7)可见, 当采样信号存在衰减直流分量时, DFT 算法所得到的相量测量值存在误差项 $B_{\beta,l}F_\beta$ 。其次, 在动态条件下, $\alpha(t)$ 不再为常量, 信号基波分量的时变性引起相量测量的误差。

考虑到运算量、公式推导的可读性以及低频振荡的振荡频率范围^[20-21], 本文取 2 阶的泰勒级数 ($K=2$) 来近似表示信号基波分量的时变性。假设衰减直流分量的参数 b 和 β 已知, 则可以联合前 3 个连续报告时刻的数据窗的 DFT 相量测量值来构造一个矩阵方程, 即

$$EX=DA+CA^*+BF_\beta \quad (8)$$

式中: $E=\text{diag}(e^{-j\omega_0 l_{m-1}}, e^{-j\omega_0 l_m}, e^{-j\omega_0 l_{m+1}})$; $X=[X(t_{m-1}, t_{m-1}), X(t_m, t_m), X(t_{m+1}, t_{m+1})]^T$; $A=[\alpha^{(0)}, \alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}]^T$; $D=[(D_{K,l_{m-1}})^T, (D_{K,l_m})^T, (D_{K,l_{m+1}})^T]^T$; $C=[(C_{K,l_{m-1}})^T, (C_{K,l_m})^T, (C_{K,l_{m+1}})^T]^T$; $B=[B_{\beta,l_{m-1}}, B_{\beta,l_m}, B_{\beta,l_{m+1}}]^T$; t_{m-1} , t_m 和 t_{m+1} 分别为 3 个数据窗的中心时刻, $l_{m-1}=(t_{m-1}-t_m) \cdot f_s$, $l_m=0$, $l_{m+1}=(t_{m+1}-t_m)f_s$ 。在滤波器系数 $h(n)$ 确定的前提下, C 和 D 是以 l_{m-1} , l_m 和 l_{m+1} 为变量的函数, 因此, 能将 C 和 D 进行离线计算并存储为数据表。同样, B 与 F_β 亦可通过查表的方式得到。

令 $\hat{X}=EX-BF_\beta=DA+CA^*$, 当 $|D| \neq 0$ 且 $|D-C(D^{-1})^*C^*| \neq 0$ 时, 可得到式(8)的解:

$$A=[D-C(D^{-1})^*C^*]^{-1}[\hat{X}-C(D^{-1})^*C^*\hat{X}] \quad (9)$$

2.2 直流分量滤波器

由基波分量滤波器所得到的相量主要是由基波分量所组成的, 而衰减直流分量被看作谐波或噪声而加以滤除。利用此相量来求取衰减直流分量的参数会受到噪声与基波分量时变性的较大影响, 从而降低对衰减直流分量估计的精度。为了减弱噪声与基波分量时变性的影响, 提高对衰减直流分量参数的估计精度, 本文应用一个直流分量滤波器来对衰减直流分量进行估计。与式(7)的推导过程类似, 可以得到直流分量滤波器的相量测量值:

$$Y(t_m, t_{\text{ref}}) = \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} x(n+l)h(n) =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \left[\sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} \alpha^{(k)}(n+l)^k \right] e^{j(n+l)\omega_0} + \\ & \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \left[\sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} \alpha^{(k)}(n+l)^k \right]^* e^{-j(n+l)\omega_0} + \\ & \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} bh(n)e^{-(n+l)\beta} = \\ & D'_{K,l}A + C'_{K,l}A^* + B'_{\beta,l}F'_\beta \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $D'_{K,l}=[H(0,l,\omega_0), \dots, H(K,l,\omega_0)]$; $C'_{K,l}=[H(0,l,-\omega_0), \dots, H(K,l,-\omega_0)]$; $B'_{\beta,l}=be^{-\beta l}$; $F'_\beta = \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} h(n)e^{-\beta n}$ 。

在信号基波分量时变性已知的前提下, 利用 3 个连续报告时刻的数据窗的直流分量滤波器的估计值可获取衰减直流分量的参数:

$$\begin{cases} \beta = \ln[\hat{Y}(t_m, t_m)/\hat{Y}(t_{m-1}, t_m)]^{1/2l_{m-1}} + \\ \quad \ln[\hat{Y}(t_m, t_m)/\hat{Y}(t_{m+1}, t_m)]^{1/2l_{m+1}} \\ b = \hat{Y}(t_m, t_m)/[e^{-\beta l_m} \sum_{n=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} h(n)e^{-\beta n}] \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\hat{Y}(t_{m-1}, t_m)=Y(t_{m-1}, t_m)-D'_{K,l_{m-1}}A-C'_{K,l_{m-1}}A^*$; $\hat{Y}(t_m, t_m)=Y(t_m, t_m)-D'_{K,l_m}A-C'_{K,l_m}A^*$; $\hat{Y}(t_{m+1}, t_m)=Y(t_{m+1}, t_m)-D'_{K,l_{m+1}}A-C'_{K,l_{m+1}}A^*$ 。

2.3 相移运算

实际的应用中, 采样数据窗的中心时刻由采样系统决定, 而相量报告时刻, 即绝对时间, 来自全球定位系统(global positioning system, GPS)时间, 2 个时刻往往不会重合, 因此, 需要对窗中心相量测量值进行相移操作来表示报告时刻的相量测量值。在相移过程中, 本文利用低频带限信号相量的导数来表示采样信号基波相量的时变性, 再根据式(1)得到报告时刻 t_{rep} 的相量测量值:

$$\hat{X}(t_{\text{rep}}) = \sqrt{2}[\alpha^{(0)} + \tau_r \alpha^{(1)} + \tau_r^2 \alpha^{(2)}/2]e^{j\varphi} \quad (12)$$

式中: $\tau_r=(t_{\text{rep}}-t_m)f_s$; $\varphi=2\pi f\tau_r$, 为 t_m 与 t_{rep} 之间的相角差; f 为当前数据窗的基波频率。

2.4 迭代计算

由以上分析可知: 要想得到信号基波分量的时变性, 就必须先要知道衰减直流分量的参数, 而对衰减直流分量的精确估计的前提是信号基波分量的时变性已知; 又由于信号基波分量的时变性以及衰减直流分量是由系统的状态及其配置所决定的, 所以不太可能事先知道两者的真实值之一。因此本文利用一个迭代计算来同时求取两者的参数, 其实现流程如下:

1) 通过 2 个滤波器分别计算得到 t_{m+1} 时刻数据窗相量估计值 $X(t_{m+1}, t_{m+1})$ 和 $Y(t_{m+1}, t_{m+1})$;

2) 忽略基波分量的时变性对电力信号相量估计值的影响, 也就是说假设 $A = [X(t_m, t_m), 0, 0]^T$;

3) 以上一个数据窗的中心时刻 t_m 作为参考时刻, 计算 I_{m-1} 和 I_{m+1} ;

4) 联合 3 个直流滤波器的估计值 $Y(t_{m-1}, t_{m-1})$, $Y(t_m, t_m)$ 和 $Y(t_{m+1}, t_{m+1})$, 并按照式(11)计算得到衰减直流分量的参数 b 和 β ;

5) 将 b 和 β 代入式(9), 求出新的低频带限信号相量值 A ;

6) 判断迭代次数是否大于最大迭代次数, 如果是, 进入下一步; 否则, 重复步骤 4);

7) 按照式(12)将窗中心的相量测量值相移到报告时刻并输出结果。

3 仿真结果

3.1 理想动态信号模型

在本文的仿真研究中, 建立了包含衰减直流分量的理想动态信号模型和 PSCAD/EMTDC 的仿真动态信号模型, 在 4 种情况下对比分析了滤除衰减直流分量的动态相量测量 (dynamic phasor measurement for removing DC component, DPMRDC) 算法、动态相量测量算法 (dynamic phasor measurement algorithm, DPMA)^[7] 和 DFT 算法 3 种算法的性能。仿真中, 以采样频率 $f_s = 2.4 \text{ kHz}$ 对信号进行采样, 采用矩形数据窗且其长度取为 $M = 48$, 报告频率为 50 Hz , 并设最大的迭代次数为 3 次。

相量测量算法性能的评价标准是总相量误差 (total vector error, TVE)^[22], 用以检查相量测量算法的时间同步性和向量计算误差。 e_{TVE} 的定义为

$$e_{\text{TVE}} = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r - X_r)^2 + (\hat{X}_i - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \quad (13)$$

式中: X_r, X_i 分别为相量真实值的实部、虚部; \hat{X}_r, \hat{X}_i 分别为相量测量值的实部、虚部。

1) 基波分量时变性的仿真测试。

由于发电机和负荷平衡关系的变化会引起系统频率的改变, 因此有必要分析相量估计算法在非额定频率下的性能表现。用于测试的故障电流信号模型可以表示为

$$x(t) = \begin{cases} 1.0 \cos(2\pi ft), & t < 0 \\ 1.5 \cos(2\pi ft), & t \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

分别取 f 为 48 和 49.6 Hz , 并将相量测量值与

相量理论真实值进行比较, 得到各时刻的 TVE 值, 如图 1 和图 2 所示。因为系统在 $t=0$ 发生突变, 3 种算法都不能正确表示这种突变状态, 因此, 在 $t=0$ 时刻附近, 3 种算法的 TVE 都比较大, 而又由于 DPMRDC 与 DPMA 算法应用了 3 个不同报告时刻的数据窗, 所以它们受突变状态所影响的时间区间为 $[-30, 30] \text{ ms}$, 而 DFT 的为 $[-10, 10] \text{ ms}$ 。在 30 ms 以后, 由于基波分量时变性的影响, DFT 的 TVE 明显高于 DPMRDC 和 DPMA, 且基波分量的时变性越显著, DFT 的 TVE 越大, 而 DPMRDC 和 DPMA 能够正确体现基波分量时变性, 在 2 个不同的基波频率下, 它们的 TVE 都能保持在 0 附近。

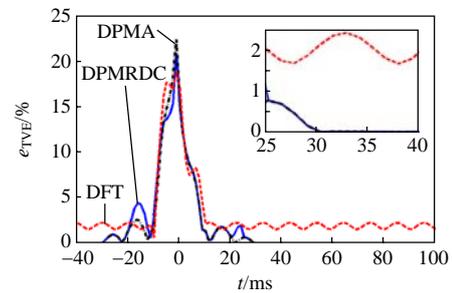


图 1 在基波频率为 48 Hz 时 DPMRDC、DPMA 和 DFT 三种算法的 TVE 值

Fig. 1 TVE of DPMRDC, DPMA and DFT when the fundamental frequency is 48 Hz

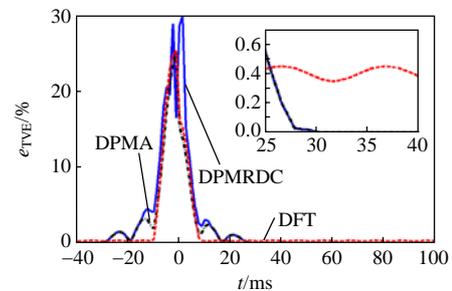


图 2 在基波频率为 49.6 Hz 时 DPMRDC、DPMA 和 DFT 三种算法的 TVE 值

Fig. 2 TVE of DPMRDC, DPMA and DFT when the fundamental frequency is 49.6 Hz

2) 衰减直流分量的仿真测试。

当电力系统发生接地故障后, 故障电流中通常含有呈指数衰减的直流分量, 而 b 和 τ 由电力系统的配置和状态决定。下文取不同的衰减时间常数 τ 对同步相量测量算法的性能进行评价。发生接地故障前后的电流信号模型为

$$x(t) = \begin{cases} 1.0 \cos(100\pi t), & t < 0 \\ be^{-t/\tau} + 1.5 \cos(100\pi t), & t \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

由于突变的影响会造成比较大的 TVE, 从而影响对算法性能的分析, 所以图 3 只示出在 $b=0.5$ 、

$\tau=0.02$ 和额定频率下 20~100ms 时段内各算法的 TVE。由于信号中含有衰减直流分量，DPMA 和 DFT 两种算法的 TVE 值比较大，且两者的 TVE 值曲线随时间衰减，即随着直流分量的减小，TVE 值也会减小。与前者不同，DPMRDC 由于滤除了衰减直流分量的影响，它能得到精确的相量测量值。图 4 为在 $b=0.5$ 、 $\tau=0.02$ 和 $f=50\text{Hz}$ 情况下的 20~100ms 各算法的 TVE。比较图 3、4 可知，小衰减时间常数在振荡初期导致较大的测量误差，但随着时间的推移，其幅值也迅速减小，它对相量测量的影响也会减小。

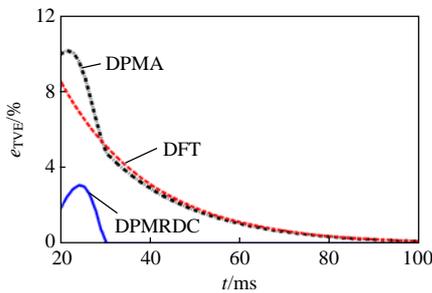


图 3 在 $b=0.5$ 、 $\tau=0.02$ 和额定频率下 DPMRDC、DPMA 和 DFT 三种算法的 TVE 值

Fig. 3 TVE of DPMRDC, DPMA and DFT when $b=0.5$, $\tau=0.02$ and nominal frequency

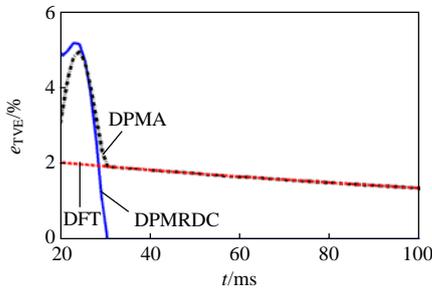


图 4 在 $b=0.5$ 、 $\tau=0.02$ 和额定频率下 DPMRDC、DPMA 和 DFT 三种算法的 TVE 值

Fig. 4 TVE of DPMRDC, DPMA and DFT when $b=0.5$, $\tau=0.02$ and nominal frequency

3) 动态条件下的衰减直流分量仿真测试。

实际中，电力系统发生接地故障时，电流信号包含衰减直流分量，且基波分量具有时变性。如果不消除这 2 种因素对信号相量测量的影响，会对相量测量精度造成一定的影响。发生接地故障前后的电流信号模型为

$$x(t) = \begin{cases} 1.0 \cos(2\pi ft), & t < 0 \\ be^{-t/\tau} + 1.5 \cos(2\pi ft), & t \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

取 $f=48\text{Hz}$ 、 $b=0.5$ 和 $\tau=0.02$ 进行同步相量测量算法性能的评价，3 种算法的 TVE 值如图 5 所示。当采样信号基波分量具有时变性、信号又包含直流

分量时，DPMRDC 算法同时考虑了 2 种因素对相量测量误差的影响，其 TVE 值在 30ms 后迅速减小；DPMA 算法因为只考虑了基波分量的时变性，其 TVE 值将受到衰减直流分量的影响，曲线呈指数衰减；而 DFT 算法不但受到衰减直流分量的影响，TVE 呈现指数误差，而且会受到基波分量时变性的影响，TVE 呈现波动变化。

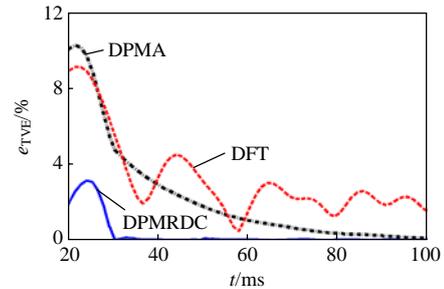


图 5 在 $b=0.5$ 、 $\tau=0.02$ 和 $f=48\text{Hz}$ 情况下 DPMRDC、DPMA 和 DFT 三种算法的 TVE 值
Fig. 5 TVE of DPMRDC, DPMA and DFT when $b=0.5$, $\tau=0.02$ and $f=48\text{Hz}$

3.2 基于 PSCAD/EMTDC 的动态信号模型

本文利用 PSCAD/EMTDC 建立一条 500kV 输电线路仿真模型来产生包含衰减直流分量的动态电流信号，如图 6 所示。输电线路的参数为： $R_1=1.96 \times 10^{-2} \Omega/\text{km}$ ； $C_1=1.35 \times 10^{-2} \mu\text{F}/\text{km}$ ； $L_1=0.8917 \text{mH}/\text{km}$ ； $R_0=1.828 \times 10^{-3} \Omega/\text{km}$ ； $C_0=0.92 \times 10^{-2} \mu\text{F}/\text{km}$ ； $L_0=2.739 \text{mH}/\text{km}$ 。



图 6 500kV 输电线路仿真模型
Fig. 6 A 500kV transmission line system

为了模拟包含衰减直流分量的动态信号，系统基波频率取 49Hz，设置在 0s 时刻线路中点发生 A 相接地短路故障。

当接地电阻 $R_f=0\Omega$ 时，A 相电流信号以及 3 种算法的有效值测量 ($X_{\text{mag}} = \sqrt{\hat{X}_r^2 + \hat{X}_i^2}$) 如图 7 所示。DPMRDC 算法的幅值测量结果明显较其他 2 种算法光滑、稳定，这得益于 DPMRDC 算法能对基波分量的时变性和直流分量进行精确估计，这与前文的理想信号测试研究中得出的结论一致。当电流信号中的直流分量随时间衰减一段时间后，DPMA 算法测量的有效值与 DPMRDC 算法的测量结果几近相等，而 DFT 算法的计算结果却由于基波分量时变性的影响呈现出较大的振荡。

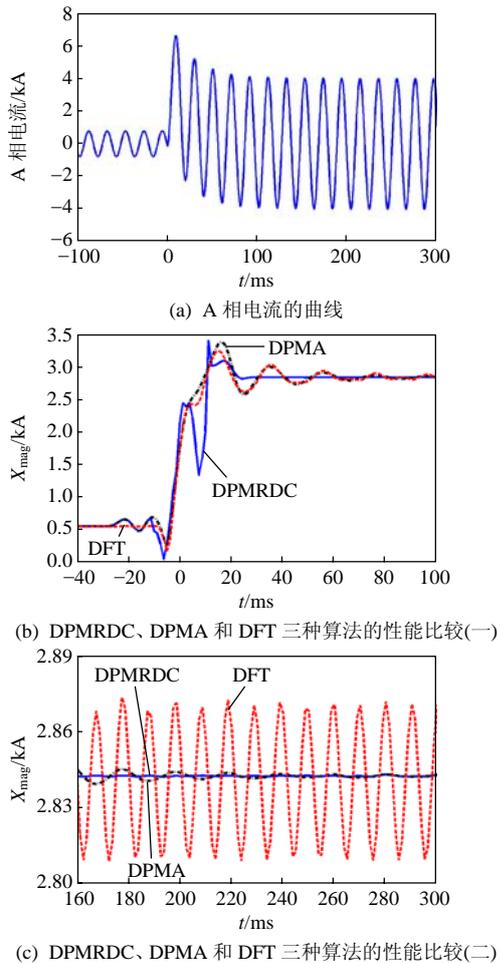


图7 当 $R_f=0\Omega$ 和 $f=49\text{Hz}$ 时对仿真动态电流信号的有效值测量结果

Fig. 7 RMS of phasor estimation of various algorithms for dynamic fault current test when $R_f=0\Omega$ and $f=49\text{Hz}$

4 结论

本文提出了一种同时考虑信号基波分量的时变性以及衰减直流分量的同步相量测量新算法,通过基波滤波器来对基波分量的时变性进行测量,通过直流滤波器对衰减直流分量进行估计,然后对2个滤波器的结果进行迭代运算以获得精确的同步相量测量结果。大量的仿真结果表明,虽然增加了有限的运算量,但本算法能大大地提高故障电流的相量测量精度。

参考文献

- [1] 王茂海, 孙元章. 基于 DFT 的电力系统相量及功率测量新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 20-24.
Wang Maohai Sun Yuanzhang. A DFT-based method for phasor and power measurement in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 20-24(in Chinese).
- [2] Wang Maohai, Sun Yuanzhang. A practical method to improve phasor and power measurement accuracy of DFT algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1054-1062.
- [3] Wang Maohai, Sun Yuanzhang. A practical, precise method for frequency tracking and phasor estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1547-1552.
- [4] Muoz A T, Serna J A O. Shanks' method for dynamic phasor estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(4): 813-819.
- [5] Serna J A O. Dynamic phasor estimates for power system oscillations [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 1648-1657.
- [6] Serna J A O. Dynamic phasor estimates for power system oscillations and transient detection[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, Montreal, QC, Canada: IEEE, 2006: 7PP.
- [7] 麦瑞坤, 何正友, 薄志谦, 等. 动态条件下的同步相量测量算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 52-58.
Mai Ruikun, He Zhengyou, Bo Zhiqian, et al. Research on synchronized phasor measurement algorithm under dynamic conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 52-58(in Chinese).
- [8] 侯有韬, 张举. 一种滤除衰减直流分量的快速算法[J]. 继电器, 2004, 32(6): 6-9.
Hou Youtao, Zhang Ju. A fast algorithm for decaying DC component filtration[J]. Relay, 2004, 32(6): 6-9(in Chinese).
- [9] 李晨, 张杭, 张爱民, 等. 一种能滤除衰减直流分量的新递推离散傅氏算法[J]. 继电器, 2005, 33(17): 17-20.
Li Chen, Zhang Hang, Zhang Aimin, et al. A recursive discrete Fourier algorithm for filtering decaying DC component[J]. Relay, 2005, 33(17): 17-20(in Chinese).
- [10] 马磊, 王增平, 徐岩. 微机继电保护中滤除衰减直流分量的算法研究[J]. 继电器, 2005, 33(17): 11-13.
Ma Lei, Wang Zengping, Xu Yan. Study of filtering decaying DC component algorithm for microprocessor-based protection[J]. Relay, 2005, 33(17): 11-13(in Chinese).
- [11] 高婧, 郑建勇. 一种快速滤除衰减直流分量的新型递推傅氏算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 54-57.
Gao Jing, Zheng Jianyong. A novel recursive Fourier algorithm for filtering decaying DC component[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 15(1): 54-57(in Chinese).
- [12] 苏文辉, 李刚. 一种能滤去衰减直流分量的改进全波傅氏算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 42-44.
Su Wenhui, Li Gang. An improved full-wave Fourier algorithm for filtrating decaying DC component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 42-44(in Chinese).
- [13] Jyh-Cherng G, Sun-Li Y. Removal of DC offset in current and voltage signals using a novel Fourier filter algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 73-79.
- [14] Rosolowski E, Izykowski J, Kasztenny B. Adaptive measuring algorithm suppressing a decaying DC component for digital protective relays[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 60(2): 99-105.
- [15] Yoon-Sung C, Chul-Kyun L, Gilsoo J, et al. An innovative decaying DC component estimation algorithm for digital relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 73-78.
- [16] Weiqing J, Vittal V, Heydt G T. Diakoptic state estimation using phasor measurement units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1580-1589.
- [17] Thorp J S, Phadke A G, Horowitz S H, et al. Some applications of phasor measurements to adaptive protection[J]. IEEE Transactions on

- Power Systems, 1988, 3(2): 791-798.
- [18] Ying-Hong L, Chih-Wen L, Ching-Shan C. A new PMU-based fault detection/location technique for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination, part I: theory and algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1587-1593.
- [19] Ying-Hong L, Chih-Wen L, Ching-Shan C. A new PMU-based fault detection/location technique for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination, part II: performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1594-1601.
- [20] 徐衍会, 贺仁睦, 韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 83-87.
Xu Yanhui, He Renmu, Han Zhiyong, et al. The cause analysis of turbine power disturbance inducing power system low frequency oscillation of resonance mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 83-87(in Chinese).
- [21] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.
Wang Tieqiang, He Renmu, Wang Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25(in Chinese).
- [22] Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, USA. IEEE Standard for Synchrophasors for Power

Systems[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2006.



麦瑞坤

收稿日期: 2010-09-06。

作者简介:

麦瑞坤(1980), 男, 博士研究生, 主要研究方向为信号处理及其在电力系统中的应用, Mairk@live.com;

何文(1986), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护、故障诊断;

何正友(1970), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等方向的研究工作;

薄志谦(1955), 男, 博士, 主要研究方向为输电线路的无通道保护和暂态保护;

钱清泉(1936), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 牵引动力国家重点实验室主任, 研究领域为信息理论与信号处理、监控及综合自动化。

(责任编辑 刘浩芳)