

电力系统频率的自适应跟踪算法

麦瑞坤¹, 何正友¹, 何文¹, 符玲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)

Adaptive Frequency Tracking Algorithm for Power Systems

MAI Rui-kun¹, HE Zheng-you¹, HE Wen¹, FU Ling¹, BO Zhi-qian², QIAN Qing-quan¹

(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: Severe noise may distort the response of traditional frequency tracking algorithm and dynamic characteristic of signals may lead tracking frequency to appear oscillation. Therefore, a new frequency tracking algorithm is proposed to improve the performance under variable conditions via adaptively changing its setting according to the estimations of noise density and dynamic characteristics. Three-phase voltage signals are transformed into a phasor by Clarke transformation and then a finite impulse response (FIR) filter is employed to suppress noise. Then, a phasor estimation of supplied signals is attained by applying a recursive least-square filter, which reduces the forgetting factor to get a fast tracking ability under dynamic conditions and increase it to have a good noise rejection performance under severe noise condition. Finally, the sample time interval is calculated via the angle difference between the last two estimations. The simulations' results demonstrated that proposed algorithm is superior to the traditional one under both steady conditions and dynamic conditions.

KEY WORDS: adaptive filtering; dynamic frequency tracking; forgetting factor; phasor measurement; power system; recursive algorithm

摘要: 在高噪声及动态条件下, 传统算法的跟踪性能受到一定的影响, 并可能出现振荡现象。为此, 设计一种利用在线估计信号的噪声含量和动态特性来调节跟踪特性的算法, 以提高频率跟踪性能。该算法通过克拉克变换将三相电压信号

转化成相量, 并利用有限冲击响应(finite impulse response, FIR)前置滤波器来抑制噪声影响。利用递归最小二乘滤波器来获得信号的相量估计值, 此滤波器能够在动态状态下通过减小遗忘因子来得到快速跟踪性能, 而在高噪声下通过增大遗忘因子来提高抗噪声性能。根据相邻两采样点的相角差来计算新的采样间隔。仿真结果表明, 该算法能在动态和静态条件下都具有比传统算法更为优越的估计性能。

关键词: 自适应滤波; 动态频率跟踪; 遗忘因子; 相量测量; 电力系统; 递归算法

0 引言

如果数据采集系统的采样频率不是系统频率的整数倍, 那么电流电压的相量估计结果就会由于频谱泄漏而引起误差。若将这些相量估计结果作为保护输入或同步相量测量的估计值^[1-3], 则可能引起保护的误动拒动或者系统状态估计的失效, 因此, 为了提高相量估计的精度, 频率跟踪技术已被作为一个内置的标准功能广泛地应用到商业采样系统中^[4-5], 目的是使得采样频率与系统的基波频率“同步”。然而, 在系统状态快速变化或高噪声等情况下, 传统频率跟踪算法的性能将大大下降并严重影响相量估计的精度。

目前国内外学者已提出多种频率跟踪算法^[6]来测量电力系统的瞬时频率, 大体上可归纳为硬件锁相环技术^[7]和基于软件计算的测频技术 2 类。硬件锁相环技术不但易受噪声影响, 而且其增益会在系统状态突变时出现振荡现象。基于软件计算的测频技术包括过零检测法^[8-10]、卡尔曼滤波法^[11-12]、自适应陷波法^[13-14]以及基于离散傅里叶变换的测频法^[15-17]。这些算法在电力系统频率测量或估算上都各

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); 教育部优秀新世纪人才支持计划项目(NCET-06-0799)。

National Natural Science Foundation of China (50877068); Excellent Youth Found of Sichuan Province (06ZQ026-012); New Century Excellent Talents of Education Ministry (NCET-06-0799).

有特点,并被广泛地应用到不同的领域当中,已取得较为满意的效果。基于数字傅里叶变换(digital Fourier transform, DFT)的测量算法虽然在继电保护设备中得到广泛应用,但在动态或高噪声条件下,其性能仍不能满足某些应用要求,改进的插值 DFT 测量算法^[18]能提供比较精确的频率估计,但其计算量限制了其应用。另外一些自适应算法^[19-20]也被应用到频率估计中,但它们只考虑到噪声的影响而忽略了系统的动态特性,以致不能得到精确的估计结果。

考虑到上述算法的弱点,本文设计了一种在静态与动态条件下均能得到最优估计值的自适应频率跟踪算法(adaptive frequency tracking algorithm, AFTA)。该算法利用在线估计的三相电压信号的噪声含量以及动态特性来自适应地调节算法的参数设置,从而使得算法在静态条件下具有较好的抗噪声能力及在动态条件下具有快速跟踪等特性,最终能够满足相量测量的实际应用需要。

1 自适应动态频率跟踪算法

1.1 电压信号观测模型

无噪声影响的三相电压信号可表示为

$$\mathbf{x}_{abc}(n) = \begin{bmatrix} x_a(n) \\ x_b(n) \\ x_c(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a \cos(n\omega T + \varphi_a) \\ A_b \cos(n\omega T + \varphi_b) \\ A_c \cos(n\omega T + \varphi_c) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: A_a , A_b , A_c 与 φ_a , φ_b , φ_c 分别为三相电压信号的幅值与初相角; ω 为信号的角速度, rad/s; T 为采样时间间隔。

为充分利用三相系统的全部信息,应用克拉克变换^[21]将三相系统变换为一个两相的正交系统:

$$\mathbf{x}_{\alpha\beta}(n) = \begin{bmatrix} x_\alpha(n) \\ x_\beta(n) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(-\frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\frac{2\pi}{3}) & \sin(-\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(n) \\ x_b(n) \\ x_c(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

暂时考虑电力系统为一无噪声的三相平衡系统,即三相电压幅值相等且相角互差 120° , 即

$$\begin{cases} A_a = A_b = A_c = A \\ \varphi_a = \varphi_b + 2\pi/3 = \varphi_c - 2\pi/3 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中,可以得到克拉克变换的 α 模分量以及 β 模分量:

$$\mathbf{x}_{\alpha\beta}(n) = \begin{bmatrix} A \cos(n\omega T + \varphi_a) \\ -A \sin(n\omega T + \varphi_a) \end{bmatrix} \quad (4)$$

α 模分量和 β 模分量的相角差为 90° , 即这 2 个模分量是正交的。利用这 2 个模分量以及旋转因子 $e^{-jn\omega T}$ 可构造一个新向量:

$$\tilde{\mathbf{x}}(n) = [x_\alpha(n) - jx_\beta(n)]e^{-jn\omega T} = e^{j\varphi_a} \quad (5)$$

然后,利用前置有限冲击响应(finite impulse response, FIR)滤波器(设数据窗长度为 M)对信号进行滤波,来减弱噪声与谐波的影响。滤波后的向量可通过递归计算来得到:

$$\tilde{\mathbf{x}}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{\mathbf{x}}(n-m) = [\tilde{\mathbf{x}}(n) - \tilde{\mathbf{x}}(n-M)]/M + \tilde{\mathbf{x}}(n-1) \quad (6)$$

通常前置滤波器还不能完全抑制谐波与噪声的影响,故这里定义包含噪声($\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$)影响的观测模型:

$$\tilde{\mathbf{z}}(n) = \tilde{\mathbf{x}}(n) + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(n) \quad (7)$$

1.2 递归最小二乘滤波频率跟踪算法

由于电力系统为一时变系统,通常认为新的采样数据含有的信息量要比之前的数据多。本文利用无限冲击响应(infinite impulse response, IIR)滤波器的遗忘因子序列 λ 来体现不同采样数据的重要性,第 $k(0 \leq k \leq n)$ 个元素的系统模型为

$$(1 - \lambda_k) \prod_{i=k+1}^n \lambda_i \tilde{\mathbf{z}}(k) = (1 - \lambda_k) \prod_{i=k+1}^n \lambda_i [\tilde{\mathbf{y}}(n) + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(k)] \quad (8)$$

以矩阵形式来表示观察窗口的 $n+1$ 个元素模型:

$$\mathbf{L}_n \mathbf{Z}_n = \mathbf{L}_n \mathbf{I}_n \tilde{\mathbf{y}}(n) + \boldsymbol{\varepsilon}_n \quad (9)$$

式中: $\mathbf{Z}_n = [\tilde{\mathbf{z}}(0) \ \cdots \ \tilde{\mathbf{z}}(n)]^T$; $\mathbf{I}_n = [1 \ \cdots \ 1]^T$; $\mathbf{L}_n = \text{diag}\{(1 - \lambda_0) \prod_{i=1}^n \lambda_i, \dots, (1 - \lambda_n)\}$; $\tilde{\mathbf{y}}(n)$ 为系统相量的估计值,并近似认为在观测窗口中该估计值为一固定值。同时,噪声的方差可被看作一个代价函数,即

$$\mathbf{R}(n) = [\mathbf{L}_n \mathbf{Z}_n - \mathbf{L}_n \mathbf{I}_n \tilde{\mathbf{y}}(n)]^H [\mathbf{L}_n \mathbf{Z}_n - \mathbf{L}_n \mathbf{I}_n \tilde{\mathbf{y}}(n)] \quad (10)$$

式中 \mathbf{H} 为共轭转置运算符。通过对 $\mathbf{R}(n)$ 求导并令其导数为 0 来获得使 $\mathbf{R}(n)$ 最小的相量估计值:

$$\frac{d\mathbf{R}(n)}{d\tilde{\mathbf{y}}(n)} = 0 \quad (11)$$

求解式(11)并整理,可得信号的相量估计值 $\tilde{\mathbf{y}}(n)$:

$$\tilde{\mathbf{y}}(n) = \mathbf{N}_n / \mathbf{D}_n \quad (12)$$

式中:

$$\mathbf{N}_n = (\mathbf{L}_n \mathbf{I}_n)^H \mathbf{L}_n \mathbf{Z}_n \quad (13)$$

$$\mathbf{D}_n = (\mathbf{L}_n \mathbf{I}_n)^H (\mathbf{L}_n \mathbf{I}_n) \quad (14)$$

由式(13)、(14)可知,观测窗口的数据点越多,需要的计算负荷也越多。在实际应用中,数字信号处理器(digital signal processor, DSP)的计算能力是有限的,且被不同的应用程序所共用,这就要求控制算法的运算负荷。因此,本文通过递归计算的形式来求取 $\tilde{\mathbf{y}}(n+1)$, 以减轻计算负荷,即

$$\tilde{\mathbf{y}}(n+1) = \mathbf{N}_{n+1} / \mathbf{D}_{n+1} \quad (15)$$

式中

$$N_{n+1} = (\mathbf{L}_{n+1}\mathbf{I}_{n+1})^H \mathbf{L}_{n+1} \mathbf{Z}_{n+1} = \lambda_{n+1}^2 N_n + (1 - \lambda_{n+1})^2 \bar{\mathbf{z}}(n+1) \quad (16)$$

$$\mathbf{D}_{n+1} = (\mathbf{L}_{n+1}\mathbf{I}_{n+1})^H (\mathbf{L}_{n+1}\mathbf{I}_{n+1}) = \lambda_{n+1}^2 \mathbf{D}_n + (1 - \lambda_{n+1})^2 \quad (17)$$

$$\text{同时: } \mathbf{L}_{n+1} = \begin{bmatrix} \lambda_{n+1} \mathbf{L}_n & 0 \\ 0 & 1 - \lambda_{n+1} \end{bmatrix}; \mathbf{I}_{n+1} = [\mathbf{I}_n^T \quad 1]^T;$$

$$\mathbf{Z}_{n+1} = [\mathbf{Z}_n^T \quad \bar{\mathbf{z}}(n+1)]^T; \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} = \mathbf{L}_{n+1} [\boldsymbol{\varepsilon}_n^T \quad \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(n+1)]^T.$$

比较式(13)、(14)与式(16)、(17)可知, 后者的运算量明显小于前者的运算量。因为前者运算量与数据长度有关, 数据越长则计算量越大; 而后者通过利用前一数据点的计算结果来达到减小运算量的目的, 使得其运算量与数据长度无关。

新的跟踪频率可以通过最后 2 个数据点的相量估计值的相互关系计算得到:

$$f_{\text{track}}(n+1) = f_{\text{track}}(n) \left\{ 1 + \frac{\arg[\bar{\mathbf{y}}(n+1)(\bar{\mathbf{y}}(n))^*]}{2\pi} \right\} \quad (18)$$

新的采样间隔则由跟踪频率的倒数来表示:

$$T(n+1) = 1 / f_{\text{track}}(n+1) \quad (19)$$

1.3 自适应调整遗忘因子算法

假设遗忘因子 $\{\lambda_n\}$ 为一常数序列, 若将 $\{\lambda_n\}$ 设置为一相对大的值, 则可提高对噪声的抑制性能, 但会降低频率的跟踪速度, 从而导致动态条件下跟踪频率的振荡现象; 反之, 若将 $\{\lambda_n\}$ 设置为一相对小的值, 在得到较快的跟踪速度的同时却降低了其抗噪声能力。为了解决这种矛盾, 本文引入 2 个变量, 噪声方差和动态特性方差, 来分别量化系统的噪声含量和动态特性, 并利用这 2 个量来计算新的遗忘因子 λ_{n+1} 。

由于最小二乘法利用了历史数据与当前测量数据进行相量估计, 因此它的相量估计值对理论值的表示有相对时延。在动态条件下(理论值在变化时), 估计值 $\bar{\mathbf{y}}(n)$ 相对于测量值 $\bar{\mathbf{z}}(n)$ 有一定的偏移, 本文正是利用这一偏移量来表征信号的动态特性:

$$\bar{\mathbf{d}}(n+1) = \lambda_n \bar{\mathbf{d}}(n) + (1 - \lambda_n) [\bar{\mathbf{z}}(n) - \bar{\mathbf{y}}(n)] \quad (20)$$

而其动态特性方差通过式(21)来求得:

$$\mathbf{D}(n) = (\mathbf{L}_n \mathbf{D}_n)^H (\mathbf{L}_n \mathbf{D}_n) \quad (21)$$

其递归计算形式可表示为

$$\mathbf{D}(n+1) = (\mathbf{L}_{n+1} \mathbf{D}_{n+1})^H (\mathbf{L}_{n+1} \mathbf{D}_{n+1}) = \lambda_{n+1}^2 \mathbf{D}(n) + (1 - \lambda_{n+1})^2 [\bar{\mathbf{d}}(n+1)]^T \bar{\mathbf{d}}(n+1) \quad (22)$$

式中: $\mathbf{D}_n = [\bar{\mathbf{d}}(0) \quad \dots \quad \bar{\mathbf{d}}(n)]^T$; $\mathbf{D}_{n+1} = [\mathbf{D}_n^T \quad \bar{\mathbf{d}}(n+1)]^T$ 。

随机噪声可表示为

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(n) = \bar{\mathbf{z}}(n) - \bar{\mathbf{y}}(n) - \bar{\mathbf{d}}(n) \quad (23)$$

仿照式(10)的推导原理, 考虑动态特性的噪声

方差可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(n+1) &= [\mathbf{L}_{n+1} \mathbf{Z}_{n+1} - \mathbf{L}_{n+1} \mathbf{I}_{n+1} \bar{\mathbf{y}}(n+1) - \mathbf{L}_{n+1} \mathbf{D}_{n+1}]^H \cdot \\ &[\mathbf{L}_{n+1} \mathbf{Z}_{n+1} - \mathbf{L}_{n+1} \mathbf{I}_{n+1} \bar{\mathbf{y}}(n+1) - \mathbf{L}_{n+1} \mathbf{D}_{n+1}] = \\ &\lambda_{n+1}^2 \mathbf{R}(n) + (1 - \lambda_{n+1})^2 [\bar{\mathbf{z}}(n+1) - \bar{\mathbf{y}}(n+1)] - \\ &\bar{\mathbf{d}}(n+1)]^H [\bar{\mathbf{z}}(n+1) - \bar{\mathbf{y}}(n+1) - \bar{\mathbf{d}}(n+1)] \quad (24) \end{aligned}$$

而遗忘因子 λ_{n+1} 则由 $\mathbf{D}(n+1)$ 与 $\mathbf{R}(n+1)$ 共同决定:

$$\lambda_{n+1} = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) e^{-\frac{\gamma \mathbf{D}(n+1)}{\eta + \rho \mathbf{R}(n+1)}} \quad (25)$$

式中: λ_{\min} , λ_{\max} 分别为由用户设定的遗忘因子的最小值、最大值; γ , ρ 分别为控制 $\mathbf{D}(n+1)$, $\mathbf{R}(n+1)$ 影响的变量; 常数 η 用以避免当 $\mathbf{D}(n+1)$ 和 $\mathbf{R}(n+1)$ 过小时所造成的遗忘因子的不正常变化。

1.4 算法的一般设置及其应用流程

研究表明, 在线应用的一般设置为: $\lambda_{\min} = 0.90$; $\lambda_{\max} = 0.99$; $\lambda = \lambda_{\max}$; $\rho = 0$; $\gamma = 3$; $\eta = 0.0005^2$; $f_{\text{rank}} = 50 \times 48 \text{ Hz}$ 。

总结起来, 该算法的具体实现流程为:

- 1) 设置 $\bar{\mathbf{d}}(n) = 0$, 并利用式(10)、(12)、(21)和(25)来初始化 $\mathbf{R}(n)$, $\bar{\mathbf{y}}(n)$, $\mathbf{D}(n)$ 和 λ_n ;
- 2) 利用式(2)和(5)对新采样数据点进行处理, 按照式(6)实现 FIR 滤波;
- 3) 利用式(22)和式(24)分别计算动态特性方差 $\mathbf{D}(n+1)$ 和噪声方差 $\mathbf{R}(n+1)$, 同时利用式(25)计算遗忘因子 λ_{n+1} ;
- 4) 利用式(18)和式(19)分别计算采样频率和数据点的采样间隔, 并回到步骤 2)。

2 仿真实证

2.1 数字测试

2.1.1 相位突变测试

大量的仿真实证了本文所设计的算法在静态和动态条件下对系统基波频率跟踪的优良性能, 但限于篇幅, 此处仅给出几个有代表性的仿真结果; 同时为了验证该算法的改进之处, 基于 DFT 的频率跟踪算法(digital Fourier transform based method, DFTBM)^[5]、最大遗忘因子算法(large forgetting factor method, LFFM)($\lambda = 0.99$)和最小遗忘因子算法(small forgetting factor method, SFFM)($\lambda = 0.90$)被用作对比算法。在所有的测试中, 系统额定频率设为 50 Hz, 并设置每周波采样 48 点, 且 $M = 24$ 。本文应用 2 种不同的测试方法来验证算法的性能:

- 1) 数字测试。在理想三相电压信号中添加噪声和不同的动态状态来进行测试。
- 2) 仿真测试。利用 PSCAD/EMTDC 产生带噪

声的动态电压信号,并通过 Matlab 来实现测试^[22]。

以下所测试的信号均添加信噪比(signal noise ratio, SNR)为 60 dB 的噪声,信号参数如表 1 所示。

表 1 谐波频率、幅值及初相角

Tab. 1 Frequency, amplitude and angle of harmonic

序号	谐波频率/Hz	幅值/%	初相角/(°)
1	150	0.1	0
2	150	0.1	10
3	350	1.0	20
4	450	3.0	30
5	550	5.0	40
6	780	10.0	50

电力系统中存在多种动态情况,本节只选择了相位突变及频率跳变这 2 种较为常见的动态情况来对算法进行评估。

电力系统中电压信号的相位会在电感或电容的突然投切后发生突变。为模拟这种工况,本文在 $t=0$ 时刻对工频三相信号作增加 10° 的相移操作。图 1 所示为 4 种频率跟踪算法在相位跳变前后对基波频率进行估计的结果(图中 $f_{\text{est}}=f_{\text{track}}/48$)。由图 1 可知,ADFTA 和 SFFM 都能快速跟踪到信号频率的变化,并能在相移后 60 ms 内提供误差小于 0.01 Hz 的频率估计值,而 LFFM 和 DFTBM 不但出现了较大的跟踪频率振荡而且需要在 260 ms 之后才能提供同样精度的测量估计值。

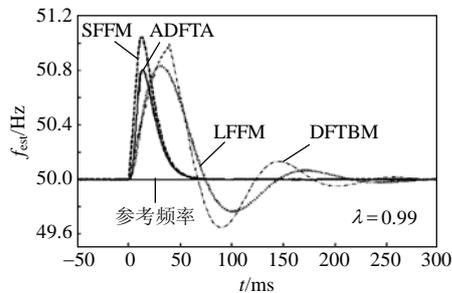


图 1 在 $t=0$ 时刻对工频三相信号作增加 10° 的相移操作的情况下各频率跟踪算法的性能比较

Fig. 1 Comparison of the frequency-tracking performance of different algorithms when 10 degree phase shift is added to three-phase signals at $t=0$

2.1.2 频率跳变测试

电网中重负荷的投切会引起系统频率的变化,利用一个分段频变信号来模拟这一过程:

$$f = \begin{cases} 50\text{Hz}, & t < 0 \\ 49\text{Hz}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (26)$$

图 2 所示为 4 种频率跟踪算法在频率跳变前后对基波频率进行估计的结果。可见,在频率跳变后 ADFTA 通过自适应调整遗忘因子来获得与 SFFM 近似的跟踪速度。图 3 所示为频率跳变后 250~

300 ms 内,即当信号在只受谐波及噪声影响的静态情况下时,各种算法的跟踪性能比较。由图可知:此时 DFTBM 和 LFFM 依然存在较大的跟踪频率振荡;同时谐波与噪声对 ADFTA 的影响明显要比对 SFFM 的影响小很多。在这段时间内 4 种算法 DFTBM, ADFTA, SFFM, LFFM 跟踪频率最大误差的绝对值分别是 0.029 13, 0.001 83, 0.007 71 和 0.006 90 Hz。

从相位突变和频率跳变的测试可知,SDFTA 不但具有快速跟踪频率的特性,而且还具有较好的抗噪声特性。这是由于 SDFTA 算法能够自适应地修正遗忘因子的值,如图 4 所示,在静态条件下,遗忘因子的数值较大以获取较好的抗噪声特性;而当系统状态发生变化时,遗忘因子被修正为较小数值

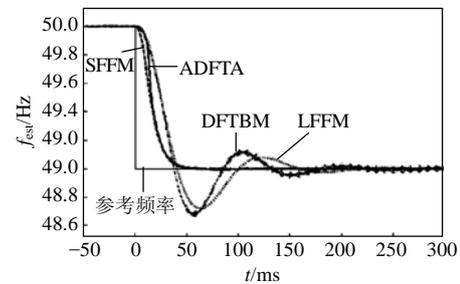


图 2 在 $t=0$ 时刻信号基波频率从 50 Hz 到 49 Hz 跳变的工况下各跟踪算法的频率估计值

Fig. 2 Estimations of different algorithms under fundamental frequency step change from 50 Hz to 49 Hz at $t=0$

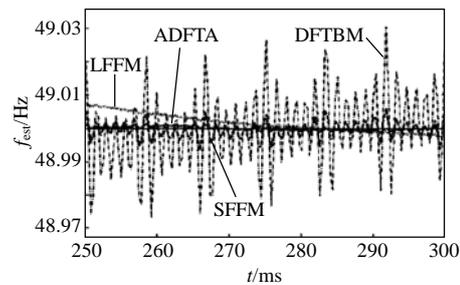


图 3 跳变后 250~300 ms 时各算法的性能比较

Fig. 3 Performance comparison of algorithms from 250 ms to 300 ms under fundamental frequency step change

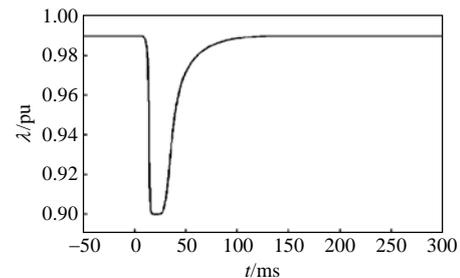


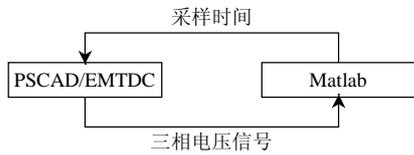
图 4 频率跳变过程中遗忘因子值的响应

Fig. 4 Response of forgetting factor during fundamental frequency step change procedure

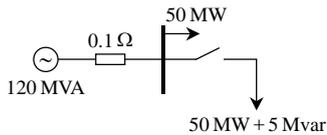
以提高频率的跟踪速度，随着动态特性的消失及状态的正确表示，遗忘因子的数值也逐步增大。

2.2 PSCAD/EMTDC 仿真

PSCAD/EMTDC 与 Matlab 的联合仿真结构如图 5(a)所示。EMTDC 产生的三相电压信号作为参数输入到 Matlab 中，然后 Matlab 通过频率跟踪算法计算出新的采样时间并传回 EMTDC 中进行新数据点的采样。图 5(b)所示为 2 个不同负荷与同步电机所组成的一个简单电力系统。负荷(50 MW)始终联接在母线上，而负荷(50 MW + 5 Mvar)在 $t=0$ ms 时刻突然联接到母线上来产生一个动态干扰，在此过程中系统频率由于负荷的突然增加而快速下降；在 $t=200$ ms 后，负荷(50 MW + 5 Mvar)切除，系统的频率又逐步回升，各算法的频率响应如图 6 所示。在整个动态过程中，ADFTA 与 SFFM 能快速跟踪系统频率，而其他 2 种算法则在比较长的一段时间内呈现出较大的跟踪振荡。以发电机的转子频率为系统的参考频率 f_{real} ，则各算法跟踪频率估计的相对误差($e=f_{track}-f_{real}$)如图 7 所示。图 8 为图 7 在 600~630 ms 之间的局部放大图。在噪声与弱动态条件下，各算法最大误差及方差示于表 2 中，可见 ADFTA 与 LFFM 比其他 2 种算法具有更好的抗噪



(a) 仿真系统的结构图



(b) 由发电机及动态负载组成的电路

$$H=3.117\text{ s}; x_d=1.014; x_q=0.770; x'_d=0.314; x'_q=0.228; x''_d=0.280; x''_q=0.375.$$

图 5 PSCAD/EMTDC 和 Matlab 组成的联合仿真系统

Fig. 5 PSCAD/EMTDC and Matlab test system

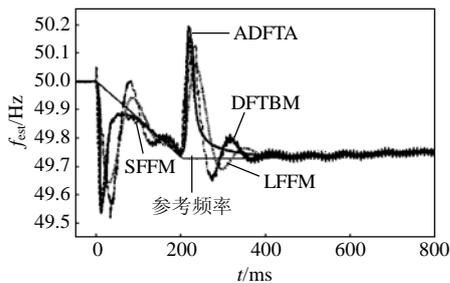


图 6 动态负载投切过程中各算法的跟踪频率响应
Fig. 6 Tracking frequency estimations of algorithms under load switch dynamic condition

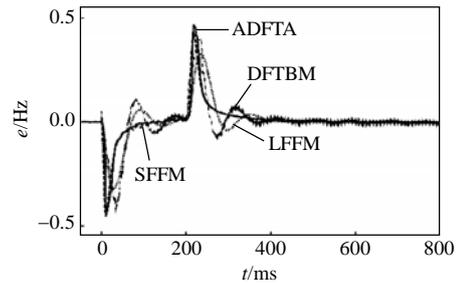


图 7 在负载投切动态过程中各频率估计值的相对误差
Fig. 7 Relative error of tracking frequency estimation under load switch dynamic condition

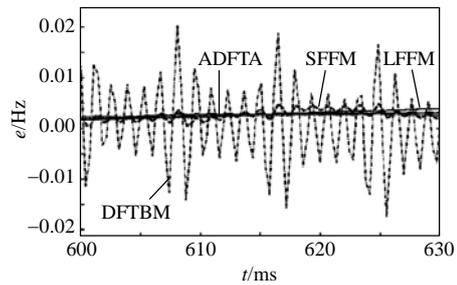


图 8 在切负荷后 600~630 ms 间各算法的性能比较
Fig. 8 Performance comparison of algorithms from 600 ms to 630 ms after load switch

表 2 600~630 ms 时各算法性能的统计比较

Tab. 2 Statistics performance under load switch condition from 600 ms to 630 ms

算法	e_{mean}/mHz	e_{max}/mHz	e_{var}
DFTBM	6.500	18.962	62.552
ADFTA	0.836	1.745	0.830
SFFM	1.640	4.529	2.998
LFFM	0.320	0.975	0.165

注： e_{mean} 、 e_{max} 为 $|e|$ 的平均值以及最大值； e_{var} 为 e 的方差。

特性，这是由于它们具有较大遗忘因子的原故。根据以上的讨论可知，ADFTA 算法能够根据系统的不同状态来调整遗忘因子的值，如图 9 所示，从而使得算法在动态条件下能快速跟踪系统频率以及在静态条件下具有较好的抗噪能力。

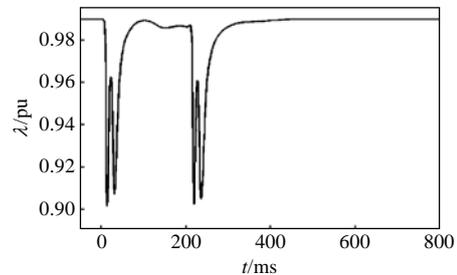


图 9 在负载投切过程中遗忘因子的变化情况
Fig. 9 Value of forgetting factor during load switch procedure

3 结论

本文所述 ADFTA 算法根据全部三相电压信号

的信息来估计电压信号的噪声含量以及动态特性,并通过动态特性方差和噪声方差2个参数来量化系统实时状态,从而调整 IIR 滤波器的遗忘因子来使其频率跟踪算法不但在动态条件下具有快速跟踪的特性,而且在静态条件下也具有较好的抗噪特性;同时,递归算法的应用又有效地减少对计算量的要求。

虽然相对于传统算法,实现本算法会对 DSP 增加一定的计算量,但仍然满足实时应用的要求,而且无论在动态及静态条件下,都具有比传统算法更优越的性能。

参考文献

- [1] Phadke A G. Synchronized phasor measurements in power systems [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10-15.
- [2] 麦瑞坤,何正友,薄志谦,等. 动态条件下的同步测量算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 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, 2008, 29(10): 52-58(in Chinese).
- [3] Khorashadi-Zadeh H, Li Z. A novel PMU-based transmission line protection scheme design[C]. Power Symposium, Chicago, 2007.
- [4] Hart D, Novosel D, Yi H, et al. A new frequency tracking and phasor estimation algorithm for generator protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1064-1073.
- [5] 闵勇,丁仁杰,韩英铎,等. 自适应调整采样率的相量在线测量算法研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 10-13.
Min Yong, Ding Renjie, Han Yingduo, et al. Research on a new on-line phasor measurement approach based on the adaptive sampling interval technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 10-13(in Chinese).
- [6] 谢小荣,韩英铎. 电力系统频率测量综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 54-58.
Xie Xiaorong, Han Yingduo. An overview on power system frequency measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 54-58(in Chinese).
- [7] Best R. Phase locked loops: design, simulation, and applications[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2007: 9-36.
- [8] Nguyen C T, Srinivasan K. A new technique for rapid tracking of frequency deviations based on level crossings[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(8): 2230-2236.
- [9] Vainio O, Ovaska S. Digital filtering for robust 50/60 Hz zero-crossing detectors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 426-430.
- [10] 曾院辉,李延新. 一种软件频率跟踪方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 92-94.
Zeng Yuanhui, Li Yanxin. Method of software frequency tracking[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 92-94(in Chinese).
- [11] Aghazadeh R, Lesani H, Sanaye-Pasand M, et al. New technique for frequency and amplitude estimation of power system signals[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(3): 435-440.
- [12] Routray A, Pradhan A K, Rao K P. A novel Kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3): 469-479.
- [13] Mojiri M, Karimi-Ghartemani M, Bakhshai A. Estimation of power system frequency using an adaptive notch filter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2470-2477.
- [14] 张世平,赵永平,张绍卿,等. 一种基于自适应陷波器的电网频率测量新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 81-83.
Zhang Shiping, Zhao Yongping, Zhang Shaoqing, et al. A novel approach to measurement of power system frequency using adaptive notch filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 81-83(in Chinese).
- [15] Djurovic I. Estimation of the sinusoidal signal frequency based on the marginal median DFT[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 2043-2051.
- [16] Maohai W, Yuanzhang S. A practical method to improve phasor and power measurement accuracy of DFT algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1054-1062.
- [17] 吴笃贵,贺春,易永辉. 一种新颖的频率跟踪算法[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 39-43.
Wu Dugui, He Chun, Yi Yonghui. A novel frequency tracking algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 39-43(in Chinese).
- [18] Belega D, Dallet D. Frequency estimation via weighted multipoint interpolated DFT[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2008, 2(1): 1-8.
- [19] Canteli M M, Fernandez A O, Eguiluz L I. Three-phase adaptive frequency measurement based on Clarke's transformation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1101-1105.
- [20] Kusljevic M D. A simple recursive algorithm for frequency estimation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(2): 335-340.
- [21] Clarke E. Circuit analysis of AC power systems[M]. New York: John Wiley, 1943: 308-363.
- [22] 杨健维,麦瑞坤,何正友. PSCAD/EMTDC 与 Matlab 接口研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 83-86.
Yang Jianwei, Mai Ruikun, He Zhengyou. Interface between PSCAD/EMTDC and Matlab[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 83-86(in Chinese).



麦瑞坤

收稿日期: 2009-12-06。

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,并从事 PMU 动态算法的研究, Mairk@live.com;

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, Hezy@swjtu.cn;

符玲(1981—),女,博士研究生,主要研究方向为信息理论相关理论在电力系统故障信号分析中的应用, Lingfu@live.com;

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)