

基于 VSS-CDFE 的三相非平衡电力系统频率无偏估计

姚军¹, 冯伟¹, 祁晖¹, 夏亦犁², 蒋玮²

(1. 国网泰州供电公司, 江苏 泰州 225300; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了实现含噪三相非平衡电力系统高精度频率无偏估计, 引入了复数域直接频率估计 (CDFE) 算法, 分析其原理并对其进行了改进。CDFE 算法基于正弦信号的线性预测, 求取误差函数的瞬时平方值关于频率的偏导数, 并以该值作为频率估计的更新值。在此基础上, 进一步提出变步长 CDFE (VSS-CDFE) 算法, 根据最速下降法则动态更新步长因子来代替 CDFE 算法的固定步长。仿真分析及实验结果表明, 在噪声干扰下, VSS-CDFE 算法可以准确地对基于复数建模的三相非平衡电力系统进行频率追踪, 其估计均方误差和理论值相吻合。相比 CDFE 算法, VSS-CDFE 算法在相同的收敛速度下, 估计均方误差更小, 在相同的估计均方误差下, 收敛速度更快。

关键词: 直接频率估计; 自适应估计算法; 时变步长因子; 三相非平衡电力系统

中图分类号: TM935

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)06-0130-07

0 引言

频率是电力系统运行的一个重要的质量参数^[1-3]; 精确的频率估计对于保持标称频率值至关重要, 是保证电网稳定性和电气设备正常运行的先决条件^[4-6]。频率估计偏差会引发频率调整机制的错误判断, 恶化电能供求的不平衡状态, 对电力系统的安全运行带来严重影响, 而较大的估计方差会导致电力系统频率调整过程不收敛^[7-8]。

为了从多相测量电压中估计电力系统频率, 可以利用 Clarke 变换将三相电压转换成复数域指数信号, 对变换后的信号进行频率估计^[9-10]。大部分的复数域频率估计算法在三相电力系统处于平衡状态时表现稳定^[11-12]。然而, 理论与实际均表明此平衡状态的假设条件极易被打破, 三相电压会出现不同程度的骤降、骤升与相位偏移^[13-14]。其中, 由单相负荷与三相负荷混用所造成的电压不平衡状态在系统末端长期存在且具有传播感染性^[15-16]。由于复数电压模型的失配, 电压的不平衡问题会造成频率估计算法的有偏及振荡问题^[17]。

因此, 在电压骤升与骤降等非平衡状态下对系统频率进行高精度无偏估计对于保障电力系统的正常运行具有重要意义。目前国内外提出了一些解决方案: 其中一类方法基于电压频谱分析, 文献[18]应用离散傅里叶变换算法, 文献[19]应用最小方差无失真算法, 文献[20-21]提出一种锁相环算法和自适应陷波器算法; 另一类利用识别理论的频

率估计算法则建立在连续纯净正弦/指数信号之间的时序关系基础之上, 文献[22]应用最小二乘算法及其变体, 文献[23]应用自适应滤波算法; 除此之外, 文献[24]提出基于人工神经网络的频率估计算法, 文献[25]应用耦合正交恒模算法, 文献[26]提出一种抗谐波的频率估计算法。然而, 目前国内外研究中, 大部分算法在建立各自电压观测模型时, 忽略了系统噪声的影响^[27], 缺乏对估计结果是否无偏的理论分析以及估计精度的理论量化^[28-29]。

因此, 在含噪三相非平衡系统复数电压模型基础上, 文中引入了复数域直接频率估计 (complex-valued direct frequency estimation, CDFE) 算法并进行改进, 提出了变步长 CDFE (variable step size CDFE, VSS-CDFE) 算法, 并通过理论计算与仿真实验验证了其在三相非平衡电力系统中的高精度频率无偏估计性能。

1 CDFE 算法

文中主要考虑非平衡电压信号的频率估计问题, 经过 Clarke 变换的复数含噪系统电压为:

$$x(n) = s(n) + q(n) = Ae^{j\omega n} + Be^{-j\omega n} + q(n) \quad (1)$$

式中: $A = |A|e^{j\varphi_A}$, $B = |B|e^{j\varphi_B}$, $|A|$ 和 $|B|$ 分别为正序列和负序列的幅度, φ_A 和 φ_B 为对应的初始相位; $\omega = 2\pi f_0$ 为系统角频率, 其中 f_0 为系统标准频率。 $q(n) = q_r(n) + jq_i(n)$ 是均值为 0 的复值双高斯白噪声, 方差为 σ_q^2 。

容易证明 $s(n)$ 遵从如下的递推关系:

$$s(n) = 2\cos\omega \times s(n-1) - s(n-2) \quad (2)$$

$s(n)$ 可以通过 $x(n)$ 的测量值进行预测:

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51877041, 617711-24)

$$\tilde{s}(n) = 2\cos\hat{\omega}x(n-1) - x(n-2) \quad (3)$$

式中: $\hat{\omega}$ 是 ω 的估计值。

定义线性预测误差函数为 $e(n) = x(n) - \tilde{s}(n)$, 则其均方误差函数为:

$$E\{|e(n)|^2\} = 4\sigma_s^2(\cos\hat{\omega} - \cos\omega)^2 + 2\sigma_q^2(1 + 2\cos^2\hat{\omega}) \quad (4)$$

式中: $\sigma_s^2 = |A|^2 + |B|^2$ 为信号功率。在噪声功率未知的情况下, 通过最小化 $E\{|e(n)|^2\}$, 可获得 ω 的无偏估计, 此时必需满足 $1 + 2\cos^2(\hat{\omega})$ 为常量。这种带有限制条件的最优化问题相当于无限制条件的 $E\{|e(n)|^2\}$ 分式最小化问题。分式形式为:

$$E\{|\zeta(n)|^2\} = \frac{E\{|e(n)|^2\}}{2(1 + 2\cos^2\hat{\omega})} = \frac{2\sigma_s^2(\cos\hat{\omega} - \cos\omega)^2}{1 + 2\cos^2\hat{\omega}} + \sigma_q^2 \quad (5)$$

由上式可以得到, $E\{|\zeta(n)|^2\}$ 的瞬时值 $|\zeta(n)|^2$ 为:

$$|\zeta(n)|^2 = \frac{|e(n)|^2}{2(1 + 2\cos^2\hat{\omega}_n)} \quad (6)$$

式中: $\hat{\omega}_n$ 为频率 ω 在时间 n 处的估计值。

当 $\hat{\omega} \rightarrow \omega$ 时, $|\zeta(n)|^2$ 事实上是 σ_q^2 的估计值。将 $|\zeta(n)|^2$ 关于 $\hat{\omega}_n$ 求导, 可得:

$$\frac{\partial |\zeta(n)|^2}{\partial \hat{\omega}_n} = \frac{2\sin\hat{\omega}_n}{(1 + 2\cos^2\hat{\omega}_n)^2} \times \Re\{e(n)[(x^*(n) + x^*(n-2)) \times 6\cos\hat{\omega}_n + x^*(n-1)]\} \quad (7)$$

式中: $\Re(\cdot)$ 为复数的取实部运算。当 $\hat{\omega}_n \in (0, \pi)$ 时, 式 $2\sin\hat{\omega}_n/(1 + 2\cos^2\hat{\omega}_n)^2$ 的值总是为正, 所以不影响梯度估计值的正负号。因此复数直接频率估计 CDFE 算法的更新等式可简化为:

$$\hat{\omega}_{n+1} = \hat{\omega}_n - \mu \Re\{e(n)[(x^*(n) + x^*(n-2))\cos\hat{\omega}_n + x^*(n-1)]\} \quad (8)$$

式中: $(\cdot)^*$ 为取复数的共轭; μ 为自适应算法的步长因子。

式(8)中学习增量的期望值:

$$E\{\Re\{e(n)[(x^*(n) + x^*(n-2))\cos\hat{\omega}_n + x^*(n-1)]\}\} = E\{\Re\{[h(n) + f(n)] \times [h^*(n) + f^*(n)]\}\} = 2\sigma_s^2(\cos\hat{\omega}_n\cos 2\omega - \cos 2\hat{\omega}_n\cos\omega) \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} h(n) = s(n) - 2s(n-1)\cos\hat{\omega}_n + s(n-2) \\ f(n) = q(n) - 2q(n-1)\cos\hat{\omega}_n + q(n-2) \end{cases} \quad (10)$$

显然, $\hat{\omega}_n = \omega$ 是式(9)的一个稳定点。

根据前文的假设, $q(n)$ 是均值为 0、方差为 σ_q^2 的复数高斯白噪声, 利用式(8), ω_n 在稳态条件下的均方误差为:

$$\text{var}(\hat{\omega}) = \lim_{n \rightarrow \infty} E\{(\hat{\omega}_n - \omega)^2\} \approx \frac{\mu\sigma_q^2}{4S_{\text{NR}}\sin\omega} \left(\frac{\cos 4\omega}{2 + \cos 2\omega} + 1 \right) \quad (11)$$

式中: $S_{\text{NR}} = \sigma_s^2/\sigma_q^2$ 。可以看到, $\text{var}(\hat{\omega})$ 与 μ 和 σ_q^2 成正比, 与 S_{NR} 成反比。由式(8)和式(11)可以看出, μ 的选择应该兼顾快速收敛性能和较小的方差。

2 VSS-CDFE 算法

根据式(8)以及(11)可知, CDFE 算法的快速收敛性能和较小方差之间存在矛盾, 当步长因子 μ 的取值较大时, 算法收敛速度较快, 但是方差也随之增大; μ 的取值较小时, 则相反。由此可以看到, μ 是两者之间的一个折中。本节提出的 VSS-CDFE 算法可用于解决此类问题。

用变步长参数 μ_n 代替固定步长因子 μ , 式(8)可以修改为:

$$\hat{\omega}_{n+1} = \hat{\omega}_n - \mu_n \Im(n) \quad (12)$$

其中:

$$\Im(n) = \Re\{e(n)[(x^*(n) + x^*(n-2))\cos\hat{\omega}_n + x^*(n-1)]\} \quad (13)$$

为了调整步长, 提出一种如下的迭代方式:

$$\mu_n = a\mu_{n-1} - b \nabla_{\mu} J \quad (14)$$

式中: a 和 b 为控制因子, $0 < a < 1$ 且 $b > 0$ 。通常, a 的值接近 1, b 的值则很小。式(14)是梯度下降法的一种修正方案, 参数 a 的加入是为了分析和设计的方便。令代价函数 $J = (1/4) |e(n)|^2$ 。因此, 步长动态地变化使 J 最小化。 J 函数关于 μ_{n-1} 的梯度如下所示:

$$\begin{aligned} \nabla_{\mu} J &= \frac{\partial J}{\partial \mu_{n-1}} = \frac{\partial J}{\partial e(n)} \frac{\partial e(n)}{\partial \hat{\omega}_n} \frac{\partial \hat{\omega}_n}{\partial \mu_{n-1}} + \\ &\frac{\partial J}{\partial e^*(n)} \frac{\partial e^*(n)}{\partial \hat{\omega}_n} \frac{\partial \hat{\omega}_n}{\partial \mu_{n-1}} = \\ &\frac{1}{4} e^*(n) \cdot 2\sin\hat{\omega}_n x(n-1) (-\Im(n-1)) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4}e(n) \cdot 2\sin\hat{\omega}_n \times x^*(n-1) (-\Im(n-1)) = \\ & -\sin\hat{\omega}_n \Im(n-1) \Re[e(n)x^*(n-1)] \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(12)一式(15),文中提出的 VSS-CDFE 算法可以总结如下:

$$\mu_{\text{temp}} = a\mu_{n-1} + bz_n \quad (16)$$

式中: μ_{temp} 为临时中间变量; $z_n = \sin\hat{\omega}_n \Im(n-1) \Re[e(n)x^*(n-1)]$,

$$\mu_n = \begin{cases} \mu_{\max} & \mu_{\max} < \mu_{\text{temp}} \\ \mu_{\min} & \mu_{\min} > \mu_{\text{temp}} \\ \mu_{\text{temp}} & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

$$\hat{\omega}_{n+1} = \hat{\omega}_n - \mu_n \Im(n) \quad (18)$$

式中: μ_{\max} 为 μ_n 所允许的最大值; μ_{\min} 为 μ_n 所允许的最小值。

通过计算式(18)中学习增量的期望值,可以得到估计频率的收敛轨迹。当 b 的值足够小时, μ_n 将会缓慢地沿其均值起伏变化。因此, $E(\mu_n \Im(n))$ 可以近似地等于 $E(\mu_n)E(\Im(n))$ 。故而所估计频率的平均收敛轨迹是:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_{n+1} & \approx \hat{\omega}_n - E(\mu_n)E(\Im(n)) = \\ & \hat{\omega}_n - 2\sigma_s^2 E(\mu_n) (\cos\hat{\omega}_n \cos 2\omega + \\ & \cos 2\hat{\omega}_n \cos \omega) = \hat{\omega}_n - 2\sigma_s^2 E(\mu_n) p(\hat{\omega}_n) \end{aligned} \quad (19)$$

考虑到局部收敛接近于 ω , 式(19)可以近似于 $\hat{\omega}_n - \sigma_s^2 E(\mu_n) g(\hat{\omega}_n)$ 。因此,平均收敛轨迹最终被估计为:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_{n+1} & \approx \hat{\omega}_n [1 - \sigma_s^2 E(\mu_n) g(\hat{\omega}_n)] + \\ & \omega \sigma_s^2 E(\mu_n) g(\hat{\omega}_n) \end{aligned} \quad (20)$$

根据式(20),我们可以确定,估计值在其稳态条件下可以达到 ω , 此估计为无偏估计。

$E(\mu_n)$ 推导如下:

$$E(\mu_n) = aE(\mu_{n-1}) + bE(z_n) \quad (21)$$

其中 $\mu_{\min} \leq \mu_n \leq \mu_{\max}$ 。并且:

$$\begin{aligned} E(z_n) & = E(\sin\hat{\omega}_n \Re\{e(n)x^*(n-1)\} \Im(n-1)) = \\ & \sin 2\hat{\omega}_n (A \cos \hat{\omega}_{n-1} - B \cos 2\hat{\omega}_{n-1}) + \\ & \sin \hat{\omega}_n (C \cos \hat{\omega}_{n-1} - D \cos 2\hat{\omega}_{n-1}) \end{aligned} \quad (22)$$

其中(为简洁起见,令 x_{n-1} 代表 $x(n-1)$, 其他类似):

$$\begin{aligned} A & = E\{-|x_{n-1}|^4 - 2\Re\{|x_{n-1}|^2 \times x_{n-1}x_{n-3}^*\} \\ & - |x_{n-1}|^2 |x_{n-3}|^2 + 2|x_{n-1}|^2 |x_{n-1}|^2\} \end{aligned} \quad (23)$$

$$B = -E\{\Re\{|x_{n-1}|^2 x_{n-1}x_{n-2}^* + |x_{n-1}|^2 x_{n-3}x_{n-2}^*\}\} \quad (24)$$

$$C = E\{|x_{n-1}|^2 + |x_{n-3}|^2 - 2|x_{n-2}|^2 + 2\Re(x_{n-1}x_{n-3}^*)\} \Re[(x_n + x_{n+2})x_{n-1}^*] \quad (25)$$

$$D = E\{\Re[(x_{n-1} + x_{n-2})x_{n-2}^*] \times \Re[(x_n + x_{n-2})x_{n-1}^*]\} \quad (26)$$

各均值计算如下:

$$\begin{aligned} A & \approx -2\sigma_s^4 \cos 2\omega - 2|A|^2 |B|^2 \times \\ & (1 + \cos 4\omega) - 2\sigma_s^2 \sigma_q^2 (1 + 2\cos 2\omega) - \sigma_q^4 \end{aligned} \quad (27)$$

$$B \approx -2\sigma_s^4 \cos \omega - 2|A|^2 |B|^2 \times (\cos \omega + \cos 3\omega) - 3\sigma_s^2 \sigma_q^2 \cos \omega \quad (28)$$

$$\begin{aligned} C & \approx 4\sigma_s^4 \cos \omega \cos 2\omega + 2|A|^2 |B|^2 \times \\ & (2\cos \omega + \cos 3\omega + \cos 5\omega) + \\ & \sigma_s^2 \sigma_q^2 (\cos \omega + \cos 3\omega) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} D & \approx 4\sigma_s^4 \cos^2 \omega + 2|A|^2 |B|^2 \times \\ & (1 + 2\cos 2\omega + \cos 4\omega) + \\ & \sigma_s^2 \sigma_q^2 (1 + \cos 2\omega) + \frac{1}{2}\sigma_q^4 \end{aligned} \quad (30)$$

因此,可通过式(20)和(21)得到算法收敛行为的理论表达式。为了确保收敛,式(20)中 $[1 - \sigma_s^2 E(\mu_n) g(\hat{\omega}_n)]$ 的绝对值应该小于 1, 由于 $0 < g(\hat{\omega}_n) < 4$, 可得:

$$0 < E(\mu_n) < \frac{1}{2\sigma_s^2} \quad (31)$$

在实际中使用的是 $E(\mu_n)$ 的瞬时值,因此有必要选择 μ_n 的最小值和最大值来满足条件 $0 < \mu_{\min} \leq E(\mu_n) \leq \mu_{\max} < 1/(2\sigma_s^2)$ 。

式(18)两边同时减去 ω , 然后两边进行平方, 取其期望, 并考虑 $n \rightarrow \infty$, 等式变为:

$$2 \lim_{n \rightarrow \infty} E[\mu_n \Im(n) (\hat{\omega}_n - \omega)] = \lim_{n \rightarrow \infty} E[(\mu_n \Im(n))^2] \quad (32)$$

上式可以近似为:

$$\begin{aligned} 2E(\mu_\infty) \lim_{n \rightarrow \infty} E[(\hat{\omega}_n - \omega) \Im(n)] = \\ E(\mu_\infty^2) \lim_{n \rightarrow \infty} E[\Im^2(n)] \end{aligned} \quad (33)$$

式中: $E(\mu_\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} E(\mu_n)$ 。

当 n 趋近于正无穷, 由式(21)可得:

$$E(z_\infty) = \frac{1-a}{b} E(\mu_\infty) \quad (34)$$

此外,由式(16)可知:

$$\mu_n = a\mu_{n-1} + bz_n \quad (35)$$

对上式等号两边取平方并取其期望, 可得:

$$E(\mu_n^2) = a^2 E(\mu_{n-1}^2) + 2ab E(\mu_{n-1}) E(z_n) + b^2 E(z_n^2) \quad (36)$$

由于 b 的值很小, 忽略上式 b^2 项, 近似可得:

$$E(\mu_\infty^2) \approx \frac{2ab}{1-a^2} E(z_\infty) E(\mu_\infty) = \frac{2a}{1+a} E(\mu_\infty)^2 \approx E(\mu_\infty)^2 \quad (37)$$

根据式(34)以及 a 的值接近 1, 可得: $E(\mu_\infty^2) \approx E^2(\mu_\infty)$ 。因此, 式(33)可表示为:

$$2 \lim_{n \rightarrow \infty} E[(\hat{\omega}_n - \omega) \mathfrak{S}(n)] = E(\mu_\infty) \lim_{n \rightarrow \infty} E[\mathfrak{S}^2(n)] \quad (38)$$

因此, 频率方差 $\text{var}(\omega)$ 为:

$$\text{var}(\omega) \approx \frac{E(\mu_\infty) \sigma_q^4}{4\sigma_s^2 \sin \omega} \left(\frac{\cos 4\omega}{\cos 2\omega + 2} + 1 \right) \quad (39)$$

考虑到稳态时 $E(\mu_n)$ 可达到 μ_{\min} 。此时, VSS-CDFE 算法的频率估计方差为:

$$\text{var}(\omega) \approx \frac{\mu_{\min} \sigma_q^4}{4\sigma_s^2 \sin \omega} \left(\frac{\cos 4\omega}{\cos 2\omega + 2} + 1 \right) \quad (40)$$

3 仿真与分析

在 MATLAB 中进行仿真实验来验证在高斯白噪声环境下 CDFE 以及 VSS-CDFE 算法在频率估计中的有效性和可靠性, 并且验证上文推导的理论方差公式。各参数设置如表 1 所示。

表 1 CDFE 算法参数设置

Table 1 The parameters of CDFE algorithm

参数	数值	参数	数值
取样频率 f_s / Hz	1 000	φ_B	0.1π
$ A $	1.5	μ	0.01
$ B $	0.1	$S_{\text{NR}} / \text{dB}$	20
φ_A	0.4π		

第一组实验中, 设置系统角频率 ω 为一个分段函数, 实际频率在前 150 次迭代过程为 $0.8\pi \text{ rad/s}$, 在第 150 次迭代时立刻变为 $0.55\pi \text{ rad/s}$, 在第 300 次迭代时立刻变为 $0.3\pi \text{ rad/s}$, 仿真中采用 CDFE 算法进行频率估计, 并与理论计算结果进行比较。图 1 为 CDFE 算法的频率估计轨迹曲线。可以看出, $\hat{\omega}_n$ 大概在第 90 次, 240 次以及 380 次迭代运算时收敛于实际频率值。

修正后的代价函数 $E\{|\zeta(n)|^2\}$ 有 2 个极值, 分别在 $(0, \pi/3)$ 以及 $(2\pi/3, \pi)$, 表明算法在频率发生剧烈变化的时候无法获取全局的收敛。此外, 在这种情况下, 频率估计可能会超过 $(0, \pi)$ 的可容忍误差范围。一种简单的解决方案是当 $\omega_n < 0$ 或者 $\omega_n > \pi$ 时, 设置估计值为 $\omega_n = \pi/2$, 或者任何 $(\pi/3, 2\pi/3)$ 中的适当值。

第二组实验中, 设置 ω 的范围为 $0.05\pi \sim 0.95\pi$

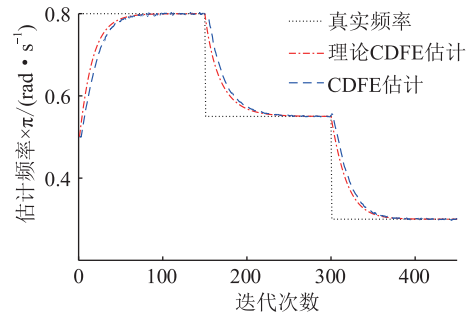


图 1 CDFE 算法的频率追踪效果

Fig.1 Frequency track of CDFE algorithm

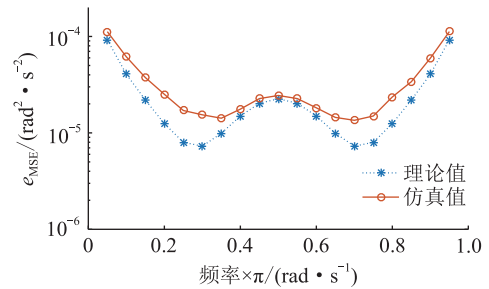


图 2 CDFE 算法估计的频率估计方差性能

Fig.2 Frequency variance performance estimated by the CDFE algorithm

rad/s, 使用 CDFE 算法进行频率估计, 并计算理论方差及均方误差, 用于测试频率估计的方差性能。由图 2 可知, 推导出的理论方差公式符合真实计算出的均方误差, 尤其在 ω 接近 $0.5\pi \text{ rad/s}$ 时。

第三组实验为了验证 VSS-CDFE 算法在频率估计方面的性能, 分别使用 CDFE 算法和 VSS-CDFE 算法进行频率估计, 并比较了相关参数。实验中默认情况下的参数设置如表 1, 此外, VSS-CDFE 算法的相关参数设置如表 2 所示。

表 2 VSS-CDFE 算法相关参数设置

Table 2 The parameters of VSS-CDFE algorithm

参数	数值	参数	数值
μ_{\min}	0.01	a	0.999 9
μ_{\max}	0.000 1	b	0.000 05

图 3 展示了非稳态条件下两种算法的均方误差。在前 100 000 次迭代过程中, 真实角频率为 $0.9\pi \text{ rad/s}$, 后半过程则变化到 $0.4\pi \text{ rad/s}$ 。为了便于比较, CDFE 的步长因子设置为 μ_{\max} 或者 μ_{\min} 。

图 4 展示了 2 种算法在不同频率下的估计方差。很明显可以看到, 所提出算法的估计方差仿真结果和基于式(40)的理论值非常接近, 由此验证了理论方差公式的准确性。同时, 在不同步长因子下, CDFE 算法所产生的方差也不同: 步长越大, 即收敛越快, 方差越大, 反之亦然。

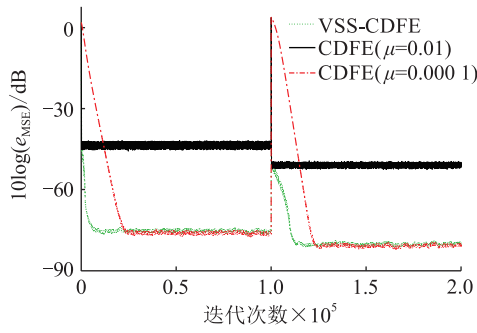


图3 不同迭代次数下各算法的均方误差
Fig.3 Mean square error of each algorithm under different iterations

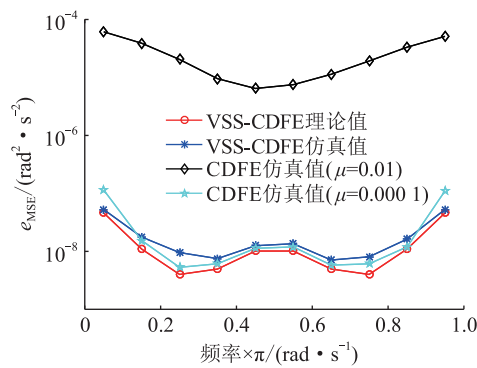


图4 不同归一化频率下各算法的均方误差
Fig.4 Variances of algorithms at different frequencies

文中考虑的三相非平衡电压实测信号如图5所示。此三相电压信号来自于某110/20/10 kV变电站,通过高速远程保护终端采集,采样频率为1 000 Hz,此处电压幅度被归一化为1。在0~0.05 s之间,三相电压处于平衡状态;紧接着,b相电压出现接地故障,电压幅度跌落至正常值的25%,同时,a相和c相电压幅度出现了超过100%的骤升现象。2种算法的性能对比如图6所示。

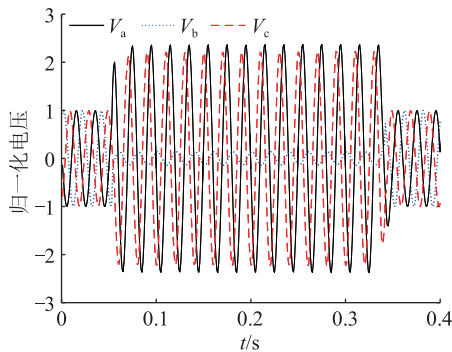


图5 三相非平衡电压波形
Fig.5 Unbalanced three-phase voltages

从图中可以看出,2种算法都可以较为准确地对频率进行跟踪,且VSS-CDFE频率估计算法的稳态均方误差更小。

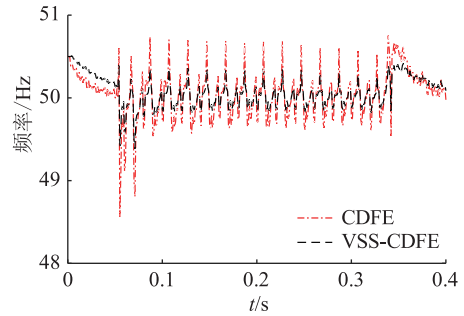


图6 2种算法对图5所示信号的估计效果
Fig.6 The estimation effect of the two algorithms on the signal shown in Fig.5

4 结论

为了实现三相非平衡电力系统高精度频率无偏估计,在分析CDFE算法原理的基础上,提出了一种改进的VSS-CDFE算法。基于三相非平衡电力系统的仿真及实际工程数据的实验结果表明,CDFE算法能够给出无偏频率估计,而VSS-CDFE算法利用最速下降法,推导出了时变步长因子,解决了CDFE算法步长的协调问题。实验结果表明,在高斯白噪声干扰下,CDFE算法可以准确地对基于复数建模的三相非平衡电力系统进行频率追踪,估计值的MSE也和推导出的理论方差相吻合。因此,与CDFE算法相比,VSS-CDFE算法在相同的收敛速度下,估计方差较小;在相同的估计方差下,收敛速度更快。

参考文献:

- [1] SACHDEV M S, GIRAY MM. A Least error squares technique for determining power system frequency[J]. IEEE Power Engineering Review, 2010, 5(2):45-45.
- [2] SIDHU T S. Accurate measurement of power system frequency using a digital signal processing technique[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(1):75-81.
- [3] 罗剑波,郁琛,谢云云,等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(6):158-170.
LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6):158-170.
- [4] SZAFRAN J, REBIZANT W. Power system frequency estimation[J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 1998, 145(5):578-582.
- [5] SHARMA D, MISHRA S. A novel power system frequency stabilizer (PSFS) for modern power systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(9):1961-1969.
- [6] 陈刚,丁理杰,李旻,等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(7):76-82.

- CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 76-82.
- [7] JAFARPISHEH B, MADANI S M, PARVARESH F, et al. Power system frequency estimation using adaptive accelerated music[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(11): 2592-2602.
- [8] 郭兆成, 车建涛, 郭启栋, 等. 基于低压配网功率和用电量信息的三相不平衡负荷调整[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 86-95.
- GUO Zhaocheng, CHE Jiantao, GUO Qidong, et al. Adjustment of three-phase unbalanced load in distribution network based on its historical power data and power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 86-95.
- [9] 张政, 温和, 黎福海, 等. 多水平集单周期电力系统频率测量方法及应用[J]. 电工技术学报, 2017(7), 32(7): 119-127.
- ZHANG Zheng, WEN He, LI Fuhai, et al. Multi-level set single-cycle power system frequency measurement method and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 119-127.
- [10] TEKA T, SUMATHI P. Power system frequency estimation based on spectral peak location techniques[C] // Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s), 2013 International Multi-Conference on, IEEE, 2013.
- [11] 鲁尔洁, 陈峦, 李坚, 等. 基于改进模糊控制的发电系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 46-52.
- LU Erjie, CHEN Luan, LI Jian, et al. Research on power system frequency regulation based on improved fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 46-52.
- [12] JIANG C, SU Y, ZHANG H, et al. Power system frequency estimation based on adaptive notch filter[C] // International Conference on Industrial Informatics-computing Technology, IEEE, 2017.
- [13] NANDA S, HASAN S, SAIN B K, et al. Improved ADALINE based algorithm for power system frequency estimation[C] // International Conference on Swarm. Springer, Cham, 2014.
- [14] RAY P K, BENGANI S, PANDA G. Estimation of power system frequency using a modified non-linear least square technique[C] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015.
- [15] BELEGA D, MACII D, PETRI D. Power system frequency estimation accuracy of improved DFT-based algorithms over short intervals[C] // 2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS). IEEE, 2016.
- [16] 李东辉, 臧晓明, 鞠平, 等. 电力系统频率响应的改进模型与参数估计[J]. 电力工程技术, 2019, 38(05): 85-90.
- LI Donghui, ZANG Xiaoming, JU Ping, et al. The improved model and parameter estimation for frequency response of power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 85-90.
- [17] 李春, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑风力发电波动引起频率偏差的电力系统状态估计[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1301-1306.
- LI Chun, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. State estimation of power system considering frequency deviation caused by fluctuation of wind power generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1301-1306.
- [18] XIA Y, HE Y, WANG K, et al. A complex least squares enhanced smart DFT technique for power system frequency estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015: 1-1.
- [19] XIA Y, MANDIC D P. Augmented MVDR spectrum-based frequency estimation for unbalanced power systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(7): 1917-1926.
- [20] CATALIOTTI A, COSENTINO V, NUCCIO S. A phase-locked loop for the synchronization of power quality instruments in the presence of stationary and transient disturbances[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2232-2239.
- [21] 屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 等. 孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 8-14.
- QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 8-14.
- [22] ZHANG J, ZHAO X, SUN J, et al. Sinewave fit algorithm based on total least-squares method[C] // IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference, IEEE, 1996.
- [23] PRADHAN A K, ROUTRAY A, BASAK A. Power system frequency estimation using least mean square technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1812-1816.
- [24] KARTIK K D, PRABHU E, NITHIN S. Frequency estimation of power system using CMAC artificial neural network[C] // 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), IEEE, 2016.
- [25] ZECEVIC Z, KRSTAJIC B, POPOVIC T. Improved frequency estimation in unbalanced three-phase power system using coupled orthogonal constant modulus algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(4): 1809-1816.
- [26] XUE H, WANG M, YANG R, et al. Power system frequency estimation method in the presence of harmonics[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(1): 56-69.
- [27] 胥峥, 周洪益, 沈甜甜, 等. 改进的零注入约束双线性WLAV状态估计[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 106-111.
- XU Zheng, ZHOU Hongyi, SHEN Tiantian, et al. Modified bilinear WLAV state estimation with zero injections[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 106-111.
- [28] 田笑. 面向负荷快速响应的频率测量算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

- TIAN Xiao. Research on frequency measurement algorithm for load fast response[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [29] 晏小兰. 电网稳态数据频率跟踪与在线压缩算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- Yan Xiaolan. Research on steady power system frequency tracking and online data compression algorithm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

作者简介:



姚军

姚军(1970),女,硕士,高级工程师,从事电网规划、电力市场营销工作(E-mail: yaojun@js.sgcc.com.cn);

祁晖(1981),男,学士,高级工程师,从事电网规划及公司战略规划研究工作;

冯伟(1982),男,学士,高级工程师,从事电网规划工作。

Unbalanced three-phase power systems frequency estimation based on CDFE algorithm

YAO Jun¹, QI Hui¹, FENG Wei¹, XIA Yili², JIANG Wei²

(1. State Grid Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to solve the frequency estimation problem in unbalanced three-phase power systems, the Complex-valued DFE (CDFE) algorithm is analyzed and improved. The CDFE algorithm is based on the linear prediction of sinusoidal signal, in which the instantaneous squared value of the error function is first defined, and its first derivative is used to track the frequency of the unbalanced three-phase power system. Furthermore, variable step-size CDFE (VSS-CDFE) algorithm is also derived based on the CDFE algorithm by using the steepest descent method. The experimental results show that CDFE algorithm is able to accurately track the frequency in the unbalanced power systems that based on complex-model under white Gaussian measurement noise, and the estimated mean square error (MSE) is also consistent with that obtained by the theoretical analysis. Compared with the traditional CDFE algorithm, the VSS-CDFE algorithm has smaller estimated variance at the same convergence rate. On the other hand, its convergence rate is faster than the conventional CDFE algorithm for a predefined variance requirement. Both algorithms provide unbiased and robust frequency estimates and the VSS-CDFE algorithm is more superior in terms of estimation variances.

Keywords: direct frequency estimation; adaptive algorithm; variable step-size; unbalanced three-phase power systems

(编辑 胡昊明)