

Atom-RQEA 在短时闪变严重度计算中的应用

张 锐, 张恒煜, 周永阳, 丁 鹏

(哈尔滨理工大学 自动化学院 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 短时闪变严重度 P_{st} 是衡量电能质量的一个重要指标, 为提高 P_{st} 的计算精度, 提出了基于原子稀疏分解和实数编码量子进化算法 (Atom-RQEA) 相结合的短时闪变严重度计算方法。其核心是根据电压波动与闪变信号的特点构造了原子库, 由实数编码量子进化算法优化原子特征参数, 自适应选择最佳匹配原子重构电压波动信号, 进而计算短时闪变严重度 P_{st} 。仿真结果表明: 基于 Atom-RQEA 方法, 能够提高短时闪变严重度 P_{st} 计算精度, 验证了提出方法的有效性和适用性。

关键词: 电能质量; 短时闪变严重度; 原子分解

DOI: 10.15938/j.jhust.2017.06.009

中图分类号: TM866 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2017)06-0046-06

The Application of Atom-RQEA in Calculation of Short Term Flicker Severity

ZHANG Rui, ZHANG Heng-yu, ZHOU Yong-yang, DING Peng

(School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Short term flicker severity P_{st} is an important index of evaluating power quality. To improve precision of calculation Atom-RQEA is proposed. The core is to construct atom library in terms of characteristic of voltage fluctuation and flicker, using RQEA (Real-coded Quantum Evolutionary Algorithm) to optimize characteristic parameters of atom, choosing self-adaption optimal matching atom to reconstruct voltage signal, and calculate flicker severity P_{st} . Simulation results show the method proposed in this paper can improve the precise of calculating short term flicker severity P_{st} , and prove it is available and applicable.

Keywords: power quality; short term flicker severity; atomic decomposition

0 引 言

目前我国坚强智能电网的建设在不断的推进, 光伏发电、风力电源等再生能源的不断接入对现有配电网结构产生巨大的冲击, 电力系统正面临着新

的电能质量问题, 对电能质量进行实时监测、评估, 为及时获得现场数据, 采取合理的应对措施从而全面提高电网的安全性、经济性、适应性具有重要意义。

IEC 标准中短时闪变严重度 P_{st} 是衡量电压波动与闪变程度的主要综合指标^[1], 通常采用快速傅

收稿日期: 2017-09-07

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E2015062).

作者简介: 张恒煜(1990—), 男, 硕士研究生;

周永阳(1989—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 张 锐(1970—), 女, 博士, 教授, E-mail: zr_gh@sina.com.

里叶变换(FFT)提取电压波动信号的特征量,再计算 P_{st} 。然而,该方法存在频谱泄露和栅栏效应,导致计算精度较低,且实际应用效果差。文[2-4]提出采用修正FFT算法提取电压波动信号的特征量,用插值FFT克服FFT缺点。但是,该方法不能从根本上消除频谱泄露和栅栏效应的影响,很难改善计算精度,且插值FFT易于受到噪声的影响。

近年来,文[5-7]提出了原子分解方法,该方法是一种时频分析法,通过自适应选取过完备原子库中的原子分解信号,实现对信号的表示。被广泛地应用在信号处理领域。原子分解过程实质上是使用一系列的相关信号估计原始信号,且原始信号可以以更少的计算量重构原始信号。信号分解采用匹配跟踪(MP)算法^[8-9],也就是说,每一次迭代,从原子库选择原子匹配信号的剩余分量,与信号最匹配原子的线性组合来描述剩余分量。但面对离散空间的搜索问题,MP几乎无法找到全局最优解。文中提出原子稀疏分解与实数编码量子进化算法(atomic decomposition and real-coded quantum evolutionary algorithm, Atom-RQEA)相结合的短时闪变严重度计算方法,主要是利用实数编码量子进化算法自适应选择与信号最佳匹配的原子,再利用最佳匹配原子的线性组合重构电压波动与闪变信号的包络线,进而计算短时闪变严重度 P_{st} 。通过仿真试验表明:提出Atom-RQEA方法能够提高短时闪变严重度 P_{st} 的计算精度。

1 原子分解

与传统意义上的信号分解不同,原子分解属于非正交分解^[10-12],在信号空间中构造了足够密集的基:原子,这些原子构成的库是过完备的,足以自适应的选择最匹配的原子来表示任意信号,从而获得信号的稀疏表示,所选择的原子体现了信号的特征。

本文研究的是电压波动与闪变信号,相当于调制信号为正弦信号的调幅波,表达式如下所示^[13-14]:

$$f(t) = [1 + \sum_{n=1}^N a_n \sin(2\pi f_n t)] \cos(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中 f_n 为电压波动与闪变的频率; a_n 为 f_n 频率下的幅值; f_0 为电网频率。

根据电压波动与闪变的包络线,计算短时闪变严重度,根据电压波动与闪变信号的特点,构造原子

库,该原子的数学表达式如下:

$$g_\gamma(t) = K \sin(2\pi f(t - \tau) + \varphi) \quad (2)$$

式中 K 为幅度因子,表示了电压波动信号的幅值; f 为电压波动与闪变频率; τ 为时域参数,表示电压波动信号发生的时刻; φ 为相位因子,表示信号的频域特征;由式(2)可知 g_γ 由时频参数 $\gamma = (K, f, \tau, \varphi)$ 唯一确定。

原子分解过程通常采用匹配追踪算法(MP算法),待测信号与原子库中所有的原子做内积,选择内积最大的原子为最优原子,即为待测信号的原子分解的一个分量,数学表达式如下^[15]:

$$f(t) = \langle f(t) | g_{\gamma(0)}(t) \rangle g_{\gamma(0)}(t) + r(t) \quad (3)$$

式中, $r(t)$ 为信号 $f(t)$ 分解后的残余信号。再对残余信号 $r(t)$ 进行相同的分解,即从原子库中选出于其最为匹配的原子。通过类似不断的迭代,当满足精度要求时,停止分解,则信号可表示为

$$f(t) = \sum_{m=0}^{k-1} \langle r^m(t) | g_{\gamma(m)}(t) \rangle g_{\gamma(m)}(t) + r^m(t) \quad (4)$$

式中 $r^0(t) = f(t)$ 。 $\|r^m(t)\|$ 为一较小的常数,描述了信号分解后的误差大小。则可用已经选出的 k 个原子近似原信号 $f(t)$,即

$$f(t) = \sum_{m=0}^{k-1} \langle r^m(t) | g_{\gamma(m)}(t) \rangle g_{\gamma(m)}(t) \quad (5)$$

每次做内积的过程都遍历了整个原子库,具有庞大的计算量。MP算法在实际执行时需要从连续的时域空间转化的离散的时域空间,离散空间搜索的,限制了寻找最优原子的精度,本文采用RQEA优化原子参数 γ 形成Atom-RQEA,在实数空间内进行连续搜索,提高精度的同时也提高了效率。

2 Atom-RQEA 优化算法

本文构造的原子特征由参数 γ 确定,RQEA的一个染色体表示一个原子,其等位基因由原子的参数向量 γ_i 和一对概率幅 $(\alpha_i, \beta_i)^T$ 组成,即: $(\gamma_i, \alpha_i, \beta_i)^T$ 。RQEA的任意一个染色体可描述为:

$$\begin{pmatrix} K_i & f_i & \tau_i & \varphi_i \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中 α_i 和 β_i 满足归一化条件, $i = 1, 2, 3, 4$; $\gamma_i = (K_i, f_i, \tau_i, \varphi_i)$ 。

适应值函数取为原子与待测信号的内积,第二次迭代后适应值函数取为原子与本次迭代残余信号的内积,内积越大,说明所选择的原子与本次迭代信

号越相关。适应值的数学描述为:

$$f = | \langle r^{m-1}, g_{\gamma(m)} \rangle | = \sup_{\gamma \in \Gamma} | \langle r, g_{\gamma} \rangle | \quad (7)$$

式中: r^{m-1} 为第 m 次的残余信号; r^0 为待测信号。

设单个染色体为 c_j^t , 选择第 j 个染色体的第 i 基因位 $(\gamma_{j,i}^t, \alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t)^T$, 对原子参数进行高斯变异, 可得

$$\gamma_{j,i}^{t+1} = \gamma_{j,i}^t + (\gamma_{i,\max} - \gamma_{i,\min})N(0, (\sigma_{j,i}^t)^2) \quad (8)$$

式中, $(\sigma_{j,i}^t)^2$ 为高斯变异方差, 取值为

$$(\sigma_{j,i}^t)^2 = \begin{cases} |\alpha_{j,i}^t|^2 & n = \alpha \\ |\beta_{j,i}^t|^2/5 & n = \beta \end{cases} \quad (9)$$

若获得的新染色体适应值优于原染色体, 保留新染色体, 令 $\alpha_{j,i}^{t+1} = \alpha_{j,i}^t$, $\beta_{j,i}^{t+1} = \beta_{j,i}^t$, 否则由量子旋转门更新 $\alpha_{j,i}^t$ 和 $\beta_{j,i}^t$ [16-18], 即:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{j,i}^{t+1} \\ \beta_{j,i}^{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\theta_{j,i}^t) & -\sin(\Delta\theta_{j,i}^t) \\ \sin(\Delta\theta_{j,i}^t) & \cos(\Delta\theta_{j,i}^t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{j,i}^t \\ \beta_{j,i}^t \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中 $\Delta\theta_{j,i}^t$ 为量子旋转门旋转角。为

$$\Delta\theta_{j,i}^t = \text{sgn}(\alpha_{j,i}^t \beta_{j,i}^t) \theta_0 \exp\left(\frac{|\beta_{j,i}^t|}{|\alpha_{j,i}^t| + a}\right) \quad (11)$$

式中 θ_0 为初始旋转角, a 为进化尺度, α 和 γ 控制旋转角的变化, 以控制算法的收敛速度; 符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$ 控制旋转角方向, 用以保证算法收敛。

为提高群体的多样性, 加快收敛速度, 对染色体采用交叉策略, 指定染色体 c_u^t , $u = 1, \dots, N$, 与随机选择的另一染色体 c_v^t , $u \neq v$, 进行基因位的交换。具体表达式可描述为

$$(\gamma_{c,i}^t, \alpha_{c,i}^t, \beta_{c,i}^t)^T = \begin{cases} (\gamma_{u,i}^t, \alpha_{u,i}^t, \beta_{u,i}^t)^T & x < 0.5 \\ (\gamma_{v,i}^t, \alpha_{v,i}^t, \beta_{v,i}^t)^T & x \geq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

式中 $(\gamma_{c,i}^t, \alpha_{c,i}^t, \beta_{c,i}^t)^T$, $(\gamma_{u,i}^t, \alpha_{u,i}^t, \beta_{u,i}^t)^T$, $(\gamma_{v,i}^t, \alpha_{v,i}^t, \beta_{v,i}^t)^T$ 分别为染色体 c^t , c_u^t 和 c_v^t 的第 i 基因位, $x \in [0, 1]$ 均匀分布的随机数, 是否进行染色体基因位的交叉取决于 x , 概率为 0.5。

3 基于 Atom-RQEA 的短时闪变严重程度 P_{st} 计算步骤

本文经 Atom-RQEA 原子稀疏分解, 获得信号的时域和频域特征, 即提取出了电压波动的电气量, 结合 IEC 提供的计算 P_{st} 方法, 给出了基于 Atom-RQEA 计算 P_{st} 的具体步骤:

Step1: 计算均方根值序列 $U(n)$:

$$U_1 = \sqrt{\frac{2}{T} \sum_{n=1}^M u^2(n)} \quad (13)$$

式子 $U(n) = (U_1, U_2, \dots, U_n)$, $u(n)$ 为采样得到的电压波动值, 对该信号每半个周期进行一次均方根值的计算。

Step2: 对均方根值, 进行等时间分组, 每组可得到 K 个电压均方根值序列 $U_i(n)$, $i = 1, \dots, K$, 观测时间 T , 不少于 10 min。

Step3: 采用原子稀疏分解分析离散电压信号 $u_i(n)$, 原子的参数由 RQEA 进行寻优, RQEA 算法中的每一个染色体当作一个原子, 染色体进化的过程就是在原子库中自适应匹配最佳原子的过程。

Step4: 从最佳原子中, 可知信号的频域信息, 电压波动与闪变包络线的峰峰值为 $\Delta U_{f_m}(m)$:

$$\Delta U_{f_m} = 2 |K_m| \quad (14)$$

式中: f_m 为电压波动与闪变信号频率; K_m 为在频率 f_m 时的幅值。

Step5: 利用每组 $U_i(n)$ 的频谱和相应单位瞬时闪变值可获得瞬时闪变值 p_i , 即

$$p_i = \sum_{m=1}^M \left[\frac{2 |U_{f_m}(m)|}{du_m} \right]^2, \quad i = 1, \dots, N \quad (15)$$

式中 du_m 是频率 f_m 所对应的单位瞬时闪变值时的正弦电压波动值。为得到任意频率下的 du_m , 需要对 IEC 提供的单位瞬时闪变值时频率与正弦波动电压值的离散映射关系进行拟合, 这里采用 BP 网络拟合。

Step6: 在观测时间内划分区间中, 将瞬时闪变值 p_i 分成 L 个等级, 并计算每个等级中 p_i 的数据分布概率。

Step7: 采用数据分布概率 $p(l)$ 做直方图, 形成 CPF^[19]。由于 CPF 是根据瞬时闪变值 p_i 得出的, 其反映了 p_i 超过一定限值的时间与观测时间的百分比。对于随机变化负荷的瞬时闪变值 CFP 曲线, 常用 5 个规定值计算短时闪变严重程度 P_{st} 。

$$P_{st} = (0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50})^{0.5} \quad (16)$$

式中 $P_{0.1}$, P_1 , P_3 , P_{10} 和 P_{50} 分别为观测时间内瞬时闪变值 p_i 超过 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% 时间的觉察单位值^[20]。

4 仿真实验

本文仿真实验数据采用的是 IEC 提供的标准数据, 分别是在单位瞬时闪变值时的正弦波波动电压波动值和矩形波波动电压波动值, 在一定的电压波动条件下, 即电压波形、波动的幅度、频率不变, 计算

得到的 P_{st} 为 0.714 4。采样频率为 1 600 Hz 采样长度为 1 s。为了比较文中方法的有效性,分别采用离散傅里叶分析方法和 RQEA-Atom 方法对波动电压进行频谱分析。

对 IEC 标准提供的不同频率下正弦波动电压、矩形波波动电压分别进行仿真实验。

单频闪变设定: $a_1 = 1.25 \text{ mV}$ $f_1 = 8.8 \text{ Hz}$

多频闪变设定: $a_1 = 4.41 \text{ mV}$ $f_1 = 2 \text{ Hz}$

$a_2 = 1.64 \text{ mV}$ $f_2 = 6 \text{ Hz}$

矩形波设定: $a_1 = 1.005 \text{ mV}$; 基频 $f = 8 \text{ Hz}$

图 1、图 2、图 3 分别给出了利用 RQEA-Atom 对频率为 8.8 Hz 正弦波、多频闪变和 8 Hz 矩形波波动电压的分解过程。电压闪变现象对频率为 8.8 Hz, 正弦电压波动为 0.25%, 8 Hz 矩形波电压波动 0.201% 时较敏感。图 4、图 5 对两种算法计算 P_{st} 的相对误差进行了对比。

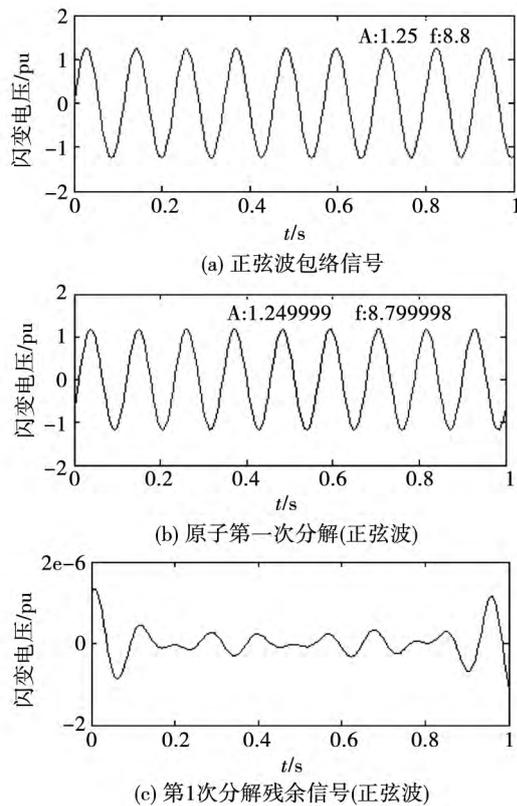


图 1 正弦波包络信号分解过程(8.8 Hz)

由图 1 可以发现,利用 RQEA-Atom 对 8.8 Hz 正弦波包络线信号进行分解,经过 1 次原子分解,得到包络线信号的幅值和频率估计值分别 1.249 999 mV 和 8.799 998 Hz,接近理论值。图 2 原子第一次分解可得到幅度 4.41 mV,频率 1.999 97 Hz 闪变信号,原子第 2 次分解时得到第二个频率分量,测量值

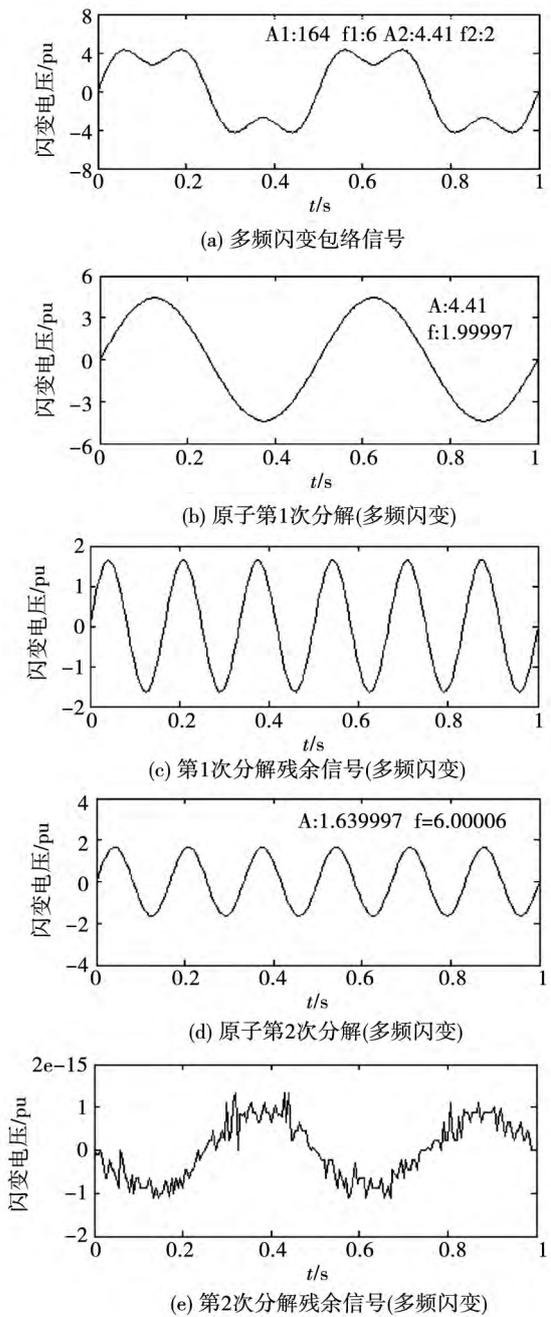


图 2 多频闪变信号分解过程

幅度 $A = 1.639 997$ 频率 $f = 6.000 06 \text{ Hz}$,很接近理论值。图 2(e) 经第 1 次和第 2 次分解后的残余信号,利用文中方法能够以很高的精度重构正弦波动闪变信号。

图 3 为矩形波闪变电压包络信号,矩形波信号包含了奇次谐波分量,由于引起闪变现象的电压波动频率范围是 0.5 - 35 Hz,这里提取了基波和 3 次谐波分量。由原子第一次分解获得的电压波动幅度 1.279 553,理论值为 1.279 605,相对误差为 0.004 063%;频率为 8 Hz 相对误差为 0%。第 2 次

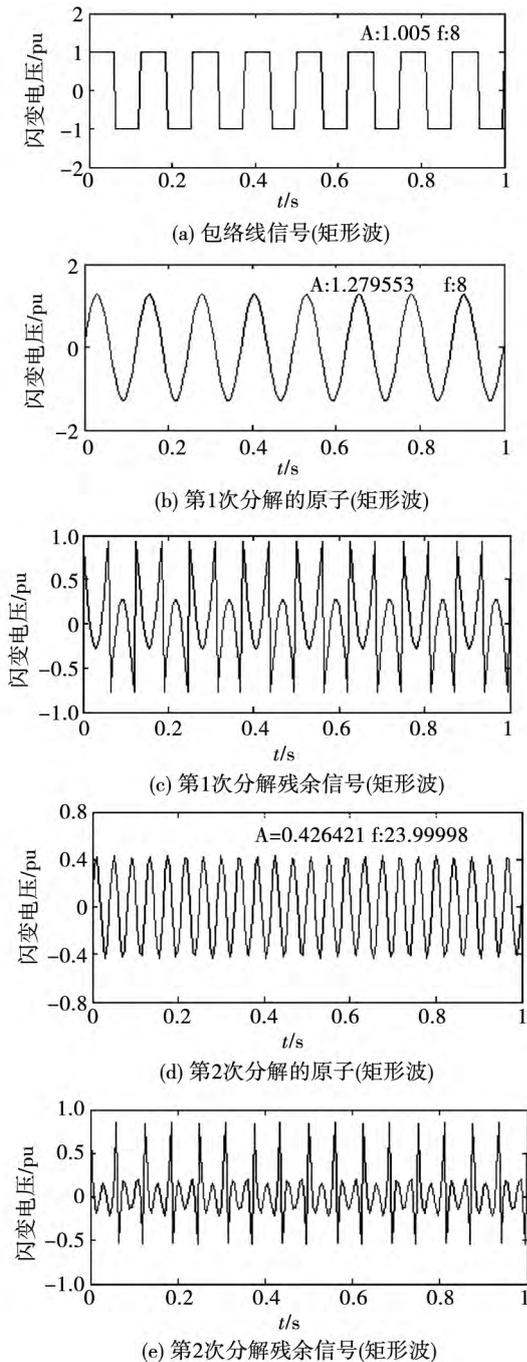


图3 矩形波包络线信号分解过程(8 Hz)

原子分解得到了3次谐波分量幅值为0.426421,理论值为0.426535,相对误差0.026726%;频率为23.99998 Hz,理论值为24 Hz,相对误差 $8.3 \times 10^{-5}\%$ 。通过确定闪变信号的频域信息,计算 P_{st} ,与DFT算法相比较,计算 P_{st} 的结果如图4、图5所示,给出了计算 P_{st} 相对误差曲线。

从图4、图5可以看出文中采用的Atom-RQEA方法提高了频域的分析能力,从而使计算 P_{st} 的相对误差较小,且在对不同的频率下计算的 P_{st} 相对误差

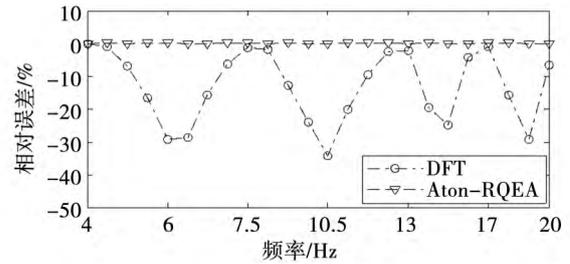


图4 电压波动为正弦波时两种算法的比较

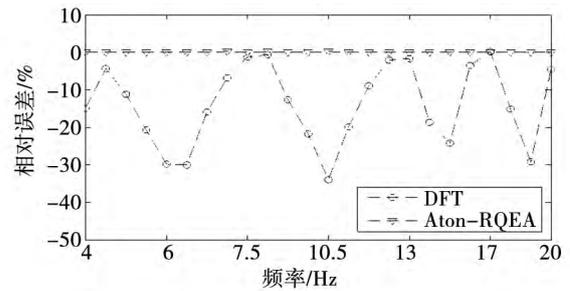


图5 电压波动为方波时两种算法的比较

结果相差不大,而DFT方法在计算 P_{st} 时在不同的频率下,相对误差出现较大的振荡。可见,文中提出方法具有很好的性能。今后工作主要集中在实数编码量子进化算法和原子分解原理研究,更好的结合二者的优点,扩大基于原子分解和实数编码量子进化算法在电力系统中应用的广度和深度。

5 结语

文中将原子稀疏分解方法与实数编码量子进化算法相结合用于分析电压波动与闪变信号,从而计算电力系统短时闪变严重度 P_{st} 。仿真试验表明,采用所提方法计算 P_{st} 具有很高的计算精度,且非常稳定。基于原子分解和实数编码量子进化算法不仅能够为电力系统 P_{st} 计算提供了新途径,也为相关领域类似问题的解决提供了一个工具。

参考文献:

- [1] 赵刚,施围,林海雪. 闪变值计算方法的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 15-18.
- [2] 李志刚,汪涛,何怡刚,等. 基于改进余弦窗的加窗插值FFT谐波分析[J]. 电气工程学报, 2016, 11(4): 15-21.
- [3] 陈子珍,夏冰冰,阎威武. 基于改进加窗插值FFT的高精度谐波与间谐波检测算法[J]. 中国电力, 2015, 48(9): 73-79.
- [4] 郝柱,顾伟,褚建新,等. 基于四谱线插值FFT的电网谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 107-113.
- [5] 张磊,黄纯,江亚群,等. 应用HS改进原子分解的电能质量扰动辨识分析[J]. 电网技术, 2015, (01): 194-201.

- [6] JIA Q. Q , YAO R. , WANG N. , MENG R. L. An Approach to Detect Harmonics/Inter-harmonics with Closing Frequencies Using Atomic Decomposition and Windowed Frequency Shifting Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE , 2014 , 34 (27) : 4605 - 4612.
- [7] 于浩明 ,黄纯 ,江亚群等. 采用快速原子分解的电能质量扰动信号参数辨识[J]. 电网技术 , 2014 , 38(8) : 2237 - 2243.
- [8] ZHANG Jun ZENG Pingping MA Jianhua. Classification of Power Quality Disturbances Using PSO-MP and Parametric Dictionaries [C]// 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things , 2015: 21 - 25.
- [9] YU FENG QIN , CHEN YING. Musical Instrument Classification Based on Improved Matching Pursuit with Instrument-Specific Atoms [C]// 2015 HAI 4th International Congress on Advanced Applied Informatics , 2015: 506 - 510.
- [10] SUNIL BELUR NAGARAJ , NATHAN J. STEVENSON , WILLIAM P. MARNANE , et al. Neonatal Seizure Detection Using Atomic Decomposition with a Novel Dictionary [J]. IEEE Transactions on Biomedical engineering , 2014 , 61 (11) : 2724 - 2732.
- [11] 曲正伟 郝婉茹 ,王宁. 原子分解快速算法在电能质量扰动分析中的应用[J]. 电力自动化设备 , 2015 , 35(10) : 145 - 150.
- [12] HE Qingbo , SONG Haiyue , DING Xiaoxi. Sparse Signal Reconstruction Based on Time - frequency Manifold for Rolling Element Bearing Fault Signature Enhancement [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement , 2016 , 65(2) : 482 - 491.
- [13] 贾秀芳 ,岳娜 ,安海清. 基于间谐波电压的闪变传递计算方法[J]. 华北电力大学学报 , 2015 , 42(4) : 15 - 21.
- [14] 李兰芳 ,马明 ,盛超 ,等. 基于旋转因子变换插值的电压闪变检测算法[J]. 电工技术学报 , 2016 , 31 (22) : 178 - 185.
- [15] 杨烁 ,曹思扬 ,戴朝华 ,等. 电能质量扰动信号时频原子分解的进化匹配追踪算法[J]. 电力系统保护与控制 , 2015 , 43(16) : 80 - 86.
- [16] LI MING. An Adaptive Quantum Evolutionary Algorithm and its Application to Path Planning [J]. 2015 IEEE International Conference on System , Man , and Cybernetics , 2015 : 2067 - 2071.
- [17] CHE ADA , WU PENG , CHU FENG , ZHOU MENG CHU. Improved Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for Large-Size Lane Reservation [J]. IEEE Transactions on System , Man , and Cybernetics: System , 2015 , 45 (12) : 1535 - 1548.
- [18] 刘振 ,胡云安 ,彭军 ,协同进化扩展紧致量子进化算法[J]. 控制与决策 , 2014 , 29(2) : 320 - 326.
- [19] Flicker Meter-Functional and Design Specifications [S]. EN61000 - 4 - 15 2003 - 01. 120
- [20] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版 , 1999: 41 - 55.

(编辑: 王 萍)