

原子分解快速算法在电能质量扰动分析中的应用

曲正伟,郝婉茹,王 宁

(燕山大学 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室,河北 秦皇岛 066004)

摘要: 提出一种原子分解的快速算法,并应用于电能质量扰动信号的分析中。该方法构建相关原子库,并将原子离散的参数连续化,能减少重构信号所需的原子数并使分解结果更准确;针对频率范围较大的谐波、衰减振荡等信号,采用快速傅里叶变换对最优原子频率进行预求解,从而降低原子库规模;采用粒子群优化的匹配追踪算法选出反映电能质量扰动信号特征的最优原子。仿真算例表明,该方法可快速准确地提取电能质量信号的扰动特征,且有较好的抗噪性能。

关键词: 电能质量; 扰动信号; 原子分解; 连续相关原子库; 快速傅里叶变换; 粒子群优化

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.022

0 引言

随着科学技术的迅猛发展,高智能化精密设备的大量使用,对供电质量要求越来越苛刻;同时由于大量扰动负荷(如非线性负荷、不对称负荷)接入电网或其他扰动源(如线路短路故障、感应电动机启动)存在,使得电能质量问题日益严重,极大地影响了公用电网的安全稳定运行^[1]。因此,对电能质量扰动信号进行分析具有重要的意义。

目前常用的电能质量扰动信号的分析方法主要有小波变换^[2-3]、S 变换^[4-5]、数学形态变换^[6]、希尔伯特-黄变换(HHT)^[7-8]和 Prony 算法^[9]等。小波变换是有力的时频分析方法,但小波函数的选择对分析结果的影响较大;S 变换虽有较好的时频性,但采样频率及采样频带的选择对其性能影响很大,且抗噪能力较弱;数学形态变换方法是在积分几何研究成果的基础上提出的,其性能易受结构元素的影响,针对复杂的信号难以选取合适的结构元素;HHT 方法和 Prony 算法虽能自适应地得到信号的频率、幅值和相角等局部信息,但这 2 种算法只能表达连续信号。

原子分解技术是近年来信号处理领域研究的热点。该方法源于 Mallat 及 Zhang 提出将信号在过完备的非正交基上分解的思想^[10]。文献[11-14]均将原子分解算法应用于电能质量扰动分析中:文献[11]以离散的 Gabor 原子库和传统的匹配追踪算法为基础,虽能从电能质量扰动信号中提取特征分量,但计算量相当大;文献[12-13]构造出适合电力系统扰动信号的离散相关原子库,相比文献[11],在一定程度上降低了计算量,但仍应用传统的匹配追踪算法进行迭代求解,不利于电能质量扰动信号的在线分析;文献[14]采用粒子群优化(PSO)算法对匹配追踪过程进行优化并将其应用于间谐波的检测分析中,但

并未对其他电能质量扰动信号进行分析。

本文为克服原子分解算法计算量大的缺点,在离散的相关原子库及传统匹配追踪算法的基础上,从多方面对原子分解算法进行优化,采用优化后的快速算法对电能质量扰动信号进行分析,结合算例验证了该方法的有效性和正确性。

1 原子稀疏分解

1.1 原子分解理论

原子分解理论中,为了达到信号稀疏分解的目的,首先需在信号空间中构建一个过完备的展开函数集合,这种过完备集合中的基称为原子,由原子组成的过完备集合称为原子库。信号可根据自身的特点在高度冗余的原子库中采取贪婪分解策略自适应地选出一组最佳匹配原子,这组最佳匹配原子即可用来表示该信号,此过程称之为原子稀疏分解。

原子稀疏分解有两大核心问题,即如何构建合理的原子库以及如何自适应地寻找最佳匹配原子。

1.2 匹配追踪算法

信号的原子稀疏分解过程通常采用一种贪婪自适应的分解策略——匹配追踪 MP(Matching Pursuit)算法。

定义原子库 $D=(g_\gamma)_{\gamma \in \tau}$,其中 γ 为原子参数组, τ 为原子参数组集合,且原子作归一化处理,即 $\|g_\gamma\|=1$ 。

设待分析信号 $f=r_f^0$,在第 m 次迭代分解中,首先从原子库 D 中找出与残余信号 r_f^{m-1} 最佳匹配的原子 $g_{\gamma(m-1)}$, $g_{\gamma(m-1)}$ 满足:

$$|\langle r_f^{m-1}, g_{\gamma(m-1)} \rangle| = \max_{\gamma \in \tau} |\langle r_f^{m-1}, g_\gamma \rangle| \quad (1)$$

其中, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 为两者的内积。

将残余信号 r_f^{m-1} 分解为新的残余分量 r_f^m 和最佳匹配原子 $g_{\gamma(m-1)}$ 上的分量,即:

$$r_f^{m-1} = \langle r_f^{m-1}, g_{\gamma(m-1)} \rangle g_{\gamma(m-1)} + r_f^m \quad (2)$$

对每次分解出的残余分量重复按式(1)、式(2)

进行迭代分解。

n 次迭代分解后, 信号 f 表示为:

$$f = \sum_{m=0}^{n-1} \langle r_f^m, g_{\gamma(m)} \rangle g_{\gamma(m)} + r_f^n \quad (3)$$

对有限长度信号 f , 当 n 无限增大时, $\|r_f^n\|$ 以指数形式衰减为零。所以信号 f 可表示为:

$$f = \sum_{m=0}^{n-1} \langle r_f^m, g_{\gamma(m)} \rangle g_{\gamma(m)} \quad (4)$$

即将信号 f 表示为 n 个原子的线性组合。

由式(1)~(3)可知, 每次分解过完备原子库中的所有原子都要与待分析信号进行内积运算, 而且要进行多次分解, 从而使计算量相当大, 过大的计算量限制了原子分解算法的实用性。

1.3 电能质量扰动的连续相关原子库

为提高信号分解的精度与速度, 原子库中的原子可根据电能质量扰动信号的特点加以构造。这种针对特定信号构造的原子库称为相关原子库^[15]。

a. 基波原子库。

基波是电网信号中的主要成分, 为了对电网中的扰动信号进行更精确的分析, 需首先将基波分量提取出来。为此, 根据基波信号的特点构建基波原子为:

$$g_{\gamma_1}(t) = k_{\gamma_1} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) [u(t - t_{s1}) - u(t - t_{e1})] \quad (5)$$

其中, 原子包含 4 个参数($f_1, \varphi_1, t_{s1}, t_{e1}$), f_1 为基波频率, φ_1 为基波的相位, t_{s1} 与 t_{e1} 分别为基波的开始与终止时刻; $u(t)$ 为单位阶跃函数; k_{γ_1} 为原子的归一化系数。设待分析信号 $f(t)$ 采样数据长度为 N , 采样频率为 f_s , 则基波原子参数的取值范围为 $49 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 51 \text{ Hz}$, $1/f_s \leq t_{s1} < t_{e1} \leq N/f_s$, $0 \leq \varphi_1 \leq 2\pi$ 。

b. 类基波原子库。

电压暂升、电压暂降及电压中断等扰动信号的频率与基波频率相同, 统称这类扰动信号为类基波扰动^[12]。为此, 构建类基波原子为:

$$g_{\gamma_2}(t) = k_{\gamma_2} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_2) [u(t - t_{s2}) - u(t - t_{e2})] \quad (6)$$

其中, 原子包含 3 个参数($\varphi_2, t_{s2}, t_{e2}$), φ_2 为扰动的相位, t_{s2} 与 t_{e2} 分别为扰动的开始与终止时刻; $u(t)$ 为单位阶跃函数; k_{γ_2} 为原子的归一化系数。类基波原子的参数取值范围为 $0 \leq \varphi_2 \leq 2\pi$, $1/f_s \leq t_{s2} < t_{e2} \leq N/f_s$ 。

c. 脉冲原子库。

将持续时间非常短的电压尖峰、电压切痕等扰动统称为脉冲扰动。为此, 根据电网中该扰动信号的特点, 构造脉冲原子为:

$$g_{\gamma_3}(t) = k_{\gamma_3} [u(t - t_{s3}) - u(t - t_{e3})] \quad (7)$$

其中, 原子包含 2 个参数(t_{s3}, t_{e3}), t_{s3} 与 t_{e3} 分别为扰动的开始与终止时刻; $u(t)$ 为单位阶跃函数; k_{γ_3} 为原子的归一化系数。脉冲原子的参数取值范围为 $1/f_s \leq t_{s3} < t_{e3} \leq N/f_s$ 。

d. 振荡原子库。

将电网中衰减振荡、发散振荡、谐波及间谐波等扰动信号统称为振荡扰动, 根据电网中该信号的特点, 构造的振荡原子为:

$$g_{\gamma_4}(t) = k_{\gamma_4} \cos(2\pi f_4 t + \varphi_4) e^{-\rho(t-t_{s4})} \times [u(t - t_{s4}) - u(t - t_{e4})] \quad (8)$$

其中, 包含 5 个参数($f_4, \varphi_4, \rho, t_{s4}, t_{e4}$), f_4 为扰动频率, φ_4 为扰动的相位, ρ 为衰减系数, t_{s4} 与 t_{e4} 分别为扰动的开始与终止时刻; $u(t)$ 为单位阶跃函数; k_{γ_4} 为原子的归一化系数。振荡原子的参数取值范围为 $1/f_s \leq t_{s4} < t_{e4} \leq N/f_s$, $0 \leq \varphi_4 \leq 2\pi$, $1 \text{ Hz} \leq f_4 \leq 1600 \text{ Hz}$, 衰减系数的范围可根据振荡信号的类型来具体确定。

e. 闪变原子库。

根据电网中闪变信号的特点, 构造的闪变原子为:

$$g_{\gamma_5}(t) = k_{\gamma_5} \cos(2\pi f_5 t + \varphi_5) \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \times [u(t - t_{s5}) - u(t - t_{e5})] \quad (9)$$

其中, 包含 4 个参数($f_5, \varphi_5, t_{s5}, t_{e5}$), f_5 为扰动的频率, φ_5 为扰动的相位, t_{s5} 与 t_{e5} 分别为扰动的开始与终止时刻; $u(t)$ 为单位阶跃函数; k_{γ_5} 为原子的归一化系数。闪变原子的参数取值范围为 $0.05 \text{ Hz} \leq f_5 \leq 35 \text{ Hz}$, $1/f_s \leq t_{s5} < t_{e5} \leq N/f_s$, $0 \leq \varphi_5 \leq 2\pi$ 。

设电能质量扰动信号的幅值为 A , 若上述原子 $g_{\gamma}(t)$ 的参数能匹配扰动信号, 则有:

$$A = \langle f(t), g_{\gamma}(t) \rangle_{k_{\gamma}} \quad (10)$$

传统 MP 算法采用遍历的方法来寻找最匹配原子, 因此只能通过原子参数离散化来构造与传统 MP 算法相配合的冗余原子库, 而参数的离散值中可能不含设定值, 这样会导致分解结果不够准确, 在相同的逼近误差下, 重构目标信号所需的离散原子数目将远大于连续原子, 考虑到上述缺陷, 本文不再对每种原子的参数进行离散化处理。

2 原子分解算法的优化

2.1 降低原子库的规模

快速傅里叶变换(FFT)是数字信号处理领域一种很重要的算法, 可对信号进行频谱分析。由于衰减振荡、谐波等扰动信号的频率范围非常宽, 如果直接采用振荡原子库进行搜索提取, 计算量将很大。为了减少计算量, 可以在匹配追踪计算前, 采用 FFT 对最优原子的频率进行预求解, 目的是降低原子库的规模。该方法的具体步骤如下:

a. 采用 FFT 计算电能质量扰动信号的频谱;

b. 找寻与频谱极值相对的频率 f_i ;

c. 将频率 f_i 量化为原子的频率, 以该频率为中心, 采用 MP 算法在小范围内搜索最优原子的频率。

2.2 PSO 匹配追踪算法

PSO 算法是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作随机搜索的优化算法^[16]。采用

PSO 算法优化 MP 算法是将原子与信号或信号残差内积的绝对值 $|\langle r_f^m, g_{y(m)} \rangle|$ 作为适应度函数,每个原子看作为一个粒子,粒子中变量作为待寻优参数,例如,提取衰减振荡信号时,其待寻优参数为 $(f_4, \varphi_4, \rho, t_{s4}, t_{e4})$;提取闪变信号时,其待寻优参数为 $(f_5, \varphi_5, t_{s5}, t_{e5})$ 。

PSO 算法优化的 MP 算法的具体步骤如下。
a. 初始化粒子群,设最大迭代次数为 M ,种群大小为 N_m ,在既定范围内随机生成粒子中参变量的位置和速度。

b. 将粒子参变量的位置代入到适应度函数 $|\langle r_f^m, g_{y(m)} \rangle|$,计算适应度值。

c. 将个体极值 p_{bestnd} 与粒子的适应度值进行对比,若当前值更优,则用当前值更换 p_{bestnd} ,并用该粒子的位置更替个体最优位置。

d. 将全局极值 g_{bestd} 与粒子的适应度值进行对比,若比 g_{bestd} 更优,则用此值更替 g_{bestd} ,并用该粒子的位置更替全局最优位置。

e. 分别利用式(11)、式(12)更换粒子的速度和位置。

$$v_{nd}^{m+1} = w v_{nd}^m + c_1 r_1^m (p_{bestnd}^m - x_{nd}^m) + c_2 r_2^m (g_{bestd}^m - x_{nd}^m) \quad (11)$$
$$x_{nd}^{m+1} = x_{nd}^m + v_{nd}^m \quad (12)$$

其中, w 为惯性权重, c_1 与 c_2 为加速系数,本文采用文献[16]中的参数选取方法,选 $w = 0.7298, c_1 = c_2 = 1.4962$; r_1^m 与 r_2^m 为 $[0, 1]$ 间的随机数; v_{nd}^m 为第 m 次迭代时第 n 个粒子的第 d 维的速度; x_{nd}^m 为第 m 次迭代时第 n 个粒子的第 d 维的当前位置; p_{bestnd}^m 为第 m 次迭代时第 n 个粒子的第 d 维的个体极值点的位置; g_{bestd}^m 为整个粒子群在第 m 次迭代时第 d 维的全局极值点的位置。

f. 重复步骤 b—e,当达到最大迭代次数 M 时终止迭代。

在迭代分解过程中,采用连续变量作为中间变量,得到的结果也是连续值,这样在采用 PSO 算法优化 MP 算法的同时也完成了离散参数连续化的目的。

3 原子分解快速算法在扰动信号特征提取中的应用

采用原子分解的快速算法对扰动信号进行特征提取的具体步骤如下。

a. 采用基波原子库及 PSO 算法优化的 MP 算法,提取出基波分量,获取残余信号。

b. 根据扰动信号的不同,采用相应的连续相关原子库。

c. 如果采用振荡原子库提取衰减振荡、谐波等信号,则在匹配追踪计算前,采用 FFT 对最优原子的频率进行预先求解。

d. 采用 PSO 算法优化的 MP 算法,在连续的相

关原子库中搜寻与当前信号内积最大的原子,获得最匹配的原子,存储该原子并计算残余信号及残余能量值。

e. 当残余能量值小于设定的阈值或迭代次数达到设定值时,终止迭代。

f. 每次迭代产生的原子都包含电能质量扰动信号的实用参数,用这些原子来重构扰动信号,用相似度 C_m 来衡量其重构性能,其定义为:

$$C_m = \frac{\langle f, f_m \rangle}{\|f\| \cdot \|f_m\|} \quad (13)$$

其中, f 为原始信号; f_m 为 m 次的重构信号。

4 算例分析

4.1 原子分解快速算法性能分析

以谐波信号为例,对本文提出的原子分解快速算法的性能进行分析,取谐波信号的采样频率为 12800 Hz,采样数据长度为 0.2 s,每周期采样 256 个点,基波频率为 50 Hz,并在信号中加入 20 dB 的高斯白噪声。设定其仿真参数如表 1 所示,表中 A 为标么值,后同。谐波的分解信号及重构信号如图 1 所示,其

表 1 谐波的仿真参数及匹配参数

Table 1 Simulation and matching parameters of harmonics							
信号	参数	f_i/Hz	φ/rad	A	t_s/s	t_e/s	ρ
基波分量	仿真值	50	$\pi/3$	1.0	0	0.2	—
	匹配值	50.0487	1.0526	0.9840	0	0.2000	—
75 Hz 谐波	仿真值	75	$\pi/2$	0.5	0	0.15	0
	匹配值	74.9974	1.5644	0.4917	0	0.1507	0
3 次谐波	仿真值	150	$\pi/6$	0.5	0.05	0.2	0
	匹配值	150.077	0.5263	0.5143	0.0505	0.2000	0
5 次谐波	仿真值	250	0	0.3	0.1	0.2	0
	匹配值	250.056	0	0.2898	0.0999	0.2000	0

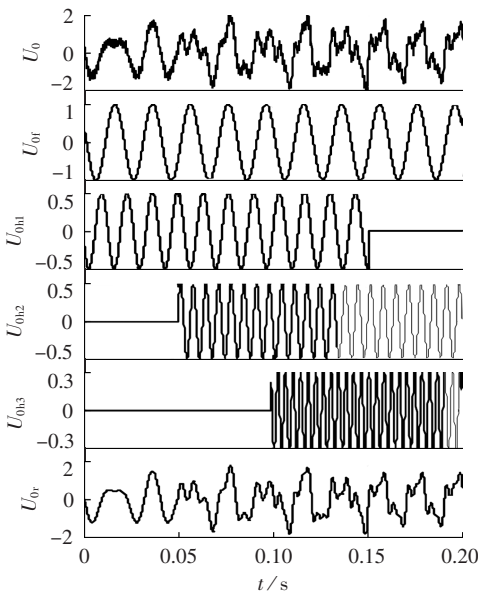


图 1 谐波信号的原子快速分解和重构波形
Fig.1 Waveforms of atom rapid decomposition and reconstruction for harmonics

中 U_0 为原始波形, U_{0f} 为提取的基波分量, U_{0h1} 为提取的 75 Hz 间谐波分量, U_{0h2} 为提取的 3 次谐波分量, U_{0h3} 为提取的 5 次谐波分量, U_{0r} 为其重构波形。由重构波形可以看出该算法有很好的抗噪性能。获取的匹配参数如表 1 所示,该谐波信号的表达式为:

$$u(t)=\cos(100\pi t+\pi/3)+A_1\cos(150\pi t+\pi/2)+A_2\cos(300\pi t+\pi/6)+A_3\cos(500\pi t)\quad(14)$$

当 $0\leq t\leq 0.15\text{ s}$ 时,式中 $A_1=0.5$, t 为其他值时 A_1 为 0;当 $0.05\text{ s}\leq t\leq 0.2\text{ s}$ 时,式中 $A_2=0.5$, t 为其他值时 A_2 为 0;当 $0.1\text{ s}\leq t\leq 0.2\text{ s}$ 时,式中 $A_3=0.3$, t 为其他值时 A_3 为 0。

由表 1 的匹配参数可知,频率、相位的误差都很小,幅值的误差略大,主要是提取基波幅值时误差较大,导致在后续迭代中误差累积,使得在提取其他分量的幅值时误差越来越大;但仍符合谐波分析的精度要求,而且可较精确地给出频率的突变时刻,可实现谐波的实时跟踪功能。

为验证原子分解快速算法的稳定性,对该信号重复进行 20 次试验,得到各分量参数的最大相对误差如表 2 所示,由表中数据可知该算法是比较稳定。

表 2 谐波各参数的最大相对误差
Table 2 Largest relative error of harmonic parameters

参数	最大相对误差/%			
	基波分量	75 Hz 谐波	3 次谐波	5 次谐波
f_r	0.1542	0.0035	0.4162	0.0226
t_s	0	0	3.2000	0.1000
t_e	0	0.4667	0	0
φ	0.9841	1.5567	0.5933	0
A	1.9500	1.6600	2.9600	3.4000

为比较离散相关原子库和连续相关原子库对算法性能的影响,采用文献[13]提出的离散化方法,对振荡原子库中原子参变量($f_4,\varphi_4,\rho,t_{s4},t_{e4}$)进行离散化处理,再采用 PSO 算法优化 MP 算法对其进行迭代分解,迭代 26 次(即需 26 个原子)后,其相似度才达到 0.9818,耗时 59.58 s。而采用连续相关原子库只需迭代 4 次,相似度就达到 0.9909,耗时 7.182 s。可见原子参数连续化可以显著地提高分解结果的准确度并降低计算量。

4.2 电能质量扰动信号的特征提取

(1) 电压暂降。

电压暂降信号的仿真参数及匹配参数如表 3 所示。

重构信号的相似度 C_m 达 0.9902。由表 3 得出,基波幅值、电压暂降幅值、电压暂降相位的相对误差分别为 1.2100%、6.9000%、2.1403%,而其他匹配参数的相对误差都很小,基本可以忽略。基波幅值相对误差较大的主要原因是电压暂降与基波具有相

表 3 电压暂降仿真参数及匹配参数
Table 3 Simulation and matching parameters of voltage sag

信号	参数	f_r/Hz	φ/rad	A	t_s/s	t_e/s
基波分量	仿真值	50	$\pi/6$	1.0	0	0.2
	匹配值	50.0239	0.5222	0.9879	0	0.2000
电压暂降	仿真值	50	$-5\pi/6$	0.1	0.0531	0.0781
	匹配值	50.0239	3.6521	0.0931	0.0533	0.0784

同的频率,这样暂降信号会使基波的能量变小。在匹配追踪的过程中,获取的最大内积也对应地减小,根据式(10)求取的幅值就会比设定值小。由于在采用基波原子库提取基波时存在误差,导致在提取基波分量后的残余信号仍含有少量的基波成分。使得采用类基波原子库提取暂降信号时出现误差。虽然暂降信号幅值的相对误差较大,但由于暂降信号的幅值较小,故该误差在可接受的范围内。

(2) 闪变。

闪变的仿真参数及匹配参数如表 4 所示。

表 4 闪变的仿真参数及匹配参数
Table 4 Simulation and matching parameters of flicker

信号	参数	f_r/Hz	φ/rad	A	t_s/s	t_e/s
基波分量	仿真值	50	$\pi/3$	1.0	0	0.2
	匹配值	50.0347	1.0474	1.0006	0	0.2000
电压闪变	仿真值	10	$\pi/6$	0.1	0	0.2
	匹配值	10.0805	0.5052	0.1015	0	0.2000

重构信号的相似度 C_m 达 0.9907。由表 4 得出,闪变幅值、闪变相位的相对误差分别为 1.500%、3.7709%,造成这 2 个参数误差较大的原因有 2 个:一是受残余基波分量的影响,二是闪变在起始时刻的值比较小,导致在强噪声条件下不易分辨。

(3) 衰减振荡。

衰减振荡的仿真参数及匹配参数如表 5 所示。

表 5 衰减振荡的仿真参数及匹配参数
Table 5 Simulation and matching parameters of damping oscillation

信号	参数	f_r/Hz	φ/rad	A	t_s/s	t_e/s	ρ
基波分量	仿真值	50	$\pi/6$	1	0	0.2	—
	匹配值	49.9939	0.5238	1	0	0.2000	—
衰减振荡	仿真值	450	0	0.5	0.0235	—	100
	匹配值	450.570	0.0040	0.51	0.0234	0.0777	101

重构信号相似度为 0.9910。由表 5 得出,衰减系数、衰减振荡幅值的误差分别为 1%、3.04%,造成这 2 个参数误差较大的原因可能是受到了强噪声和残余基波分量的影响。

提取衰减振荡的结束时间不稳定,这主要是因为随着时间的推移衰减振荡逐渐变小,到某一时间后,衰减的特征不再明显,导致无法准确匹配,所以提取的结束时刻会不稳定。

(4) 电压尖峰。
电压尖峰的仿真参数及匹配参数如表 6 所示。

表 6 电压尖峰的仿真及匹配参数
Table 6 Simulation and matching parameters
of voltage spike

信号	参数	f_r/Hz	φ/rad	A	t_s/s	t_e/s
基波分量	仿真值	50	0	1.0	0	0.2
	匹配值	50.0024	0	1.0049	0	0.2000
尖峰(1)	仿真值	—	—	1.0	0.0414	0.0422
	匹配值	—	—	0.9934	0.0413	0.0422
尖峰(2)	仿真值	—	—	1.0	0.1578	0.1586
	匹配值	—	—	1.0019	0.1578	0.1586

重构信号的相似度为 0.9904,获得的匹配参数都比较理想。

(5) 多重扰动。
多重扰动的仿真参数及获取的匹配参数如表 7 所示。

表 7 多重扰动的仿真参数及匹配参数
Table 7 Simulation and matching parameters
of multiple disturbances

信号	参数	f_r/Hz	φ/rad	A	t_s/s	t_e/s	ρ
基波分量	仿真值	50	$\pi/3$	1.0	0	0.2	—
	匹配值	50.0134	1.0412	0.9958	0	0.2000	—
3 次谐波	仿真值	150	$\pi/2$	0.5	0	0.1	0
	匹配值	150.083	1.5573	0.4931	0	0.1007	0
75 Hz 谐波	仿真值	75	$\pi/6$	0.3	0.1	0.2	0
	匹配值	75.0481	0.5167	0.3053	0.1035	0.2000	0
衰减振荡	仿真值	450	$\pi/3$	0.5	0.1016	—	100
	匹配值	449.969	1.0324	0.4996	0.1016	0.1689	99.52

重构信号的相似度为 0.9909,由表 7 可知,匹配参数与理论设定值的误差都较小,可以较准确地提取多重扰动中的各个分量。

5 结论

本文提出一种电能质量扰动分析的原子分解快速算法,为电能质量扰动信号的分析提供了一种新的途径。理论分析和仿真算例表明,本文提出的算法可快速有效地建立电能质量扰动信号的参量化解析表示,克服了传统原子分解算法因计算量大而导致计算时间过长的缺点。采用原子分解快速算法提取的扰动信号特征量(如幅值、相位、频率、起止时间、衰减系数等)可作为神经网络、支持向量机等分类器的输入量,便于对扰动信号进行分类识别。

参考文献:

[1] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一)——电能质量的一般概念[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):1-4.
YANG Honggeng,XIAO Xianyong,LIU Junyong. Issues and technology assessment on power quality part 1:general concept of power quality[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(10):1-4.

[2] 陈长升,黄险峰. 基于小波变换抗混叠谐波检测的一种新方法[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(23):23-26.
CHEN Changsheng,HUANG Xianfeng. A novel method for anti-aliasing harmonic detection based on wavelet transform [J]. Power System Protection and Control,2008,36(23):23-26.

[3] 张宇辉,陈晓东,王鸿懿. 基于连续小波变换电能质量测量与分类[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):17-21.
ZHANG Yuhui,CHEN Xiaodong,WANG Hongyi. Continuous wavelet-based measuring and classification of short duration power quality disturbances[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(3):17-21.

[4] ZHAO F Z,YANG R G. Power-quality disturbance recognition using S-transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(2):944-950.

[5] 任祖华,王柏林. 基于多分辨率 S 变换的电压闪变检测[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):27-31.
REN Zuhua,WANG Bolin. Voltage flicker detection based on multi-resolution S-transform[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):27-31.

[6] 李天云,郭跃霞,王静,等. 基于数学形态学和短窗功率算法的电能质量扰动检测方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(7):37-40.
LI Tianyun,GUO Yuexia,WANG Jing,et al. Power quality disturbance detection based on mathematical morphology and power algorithm of short data window[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(7):37-40.

[7] SENROY N,SURYANARAYANAN S,RIBEIRO P F. An improved Hilbert-Huang method for analysis of time-varying waveforms in power quality[J]. IEEE Trans on Power Systems,2007,22(4):1843-1850.

[8] 苏玉香,刘志刚,李东敏,等. 一种改善 HHT 端点效应的新方法及其在电能质量中的应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):40-45.
SHU Yuxiang,LIU Zhigang,LI Dongmin,et al. End effect restraint of Hilbert-Huang transform and its application in power quality monitoring[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(11):40-45.

[9] QI Li,QIAN Lewei,WOODRUFF S,et al. Prony analysis for power system transient harmonics[EB/OL]. (2006-12-18). <http://downloads.Hindawi.com/journals/asp/2007/048406.Pdf>.

[10] MALLAT S,ZHANG Z. Matching pursuits with time frequency dictionaries[J]. IEEE Trans on Signal Processing,1993,41(12):3397-3415.

[11] 贾清泉,于连富,董海艳,等. 应用原子分解的电能质量扰动信号特征提取方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):61-64.
JIA Qingquan,YU Lianfu,DONG Haiyan,et al. Power quality disturbance features extraction based on atomic decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(24):61-64.

[12] 贾清泉,于连富,王宁,等. 原子稀疏分解算法在电力系统扰动信号分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):40-45.
JIA Qingquan,YU Lianfu,WANG Ning,et al. Application of atomic sparse decomposition to power systems disturbance analysis[J]. Power System Protection and Control,2010,38(19):40-45.

[13] 王宁,李林川,贾清泉,等. 应用原子分解的电能质量扰动信号分类方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):51-58.

WANG Ning,LI Linchuan,JIA Qingquan,et al. Classification of power quality disturbance signals using atomic decomposition method[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):51-58.

- [14] 张英杰,龚庆武,李勋,等. 基于 PSO 的原子分解法在谐波分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(15):41-48.

ZHANG Yingjie,GONG Qingwu,LI Xun,et al. Application of atomic decomposition based on PSO in inter-harmonics analysis [J]. Power System Protection and Control,2013,41(15):41-48.

- [15] LOVISOLO L,da SILVA E A B,RODRIGUES M A M,et al. Efficient coherent adaptive representation of monitored electric signals in power systems using damped sinusoids[J]. IEEE Trans on Signal Processing,2005,53(10):3831-3846.

- [16] 杨维,李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学,2004,6(5):87-93.

YANG Wei,LI Qiqiang. Survey on particle swarm optimization algorithm[J]. Engineering Science,2004,6(5):87-93.

作者简介:



曲正伟

曲正伟(1979—),男,吉林德惠人,副教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统经济调度与电能质量(E-mail:ysu_qzw@163.com);

郝婉茹(1989—),女,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量扰动分析(E-mail:969900752@qq.com);

王宁(1981—),男,河北辛集人,讲师,博士,主要研究方向为电能质量扰动分析。

Application of atomic rapid decomposition algorithm in power quality disturbance analysis

QU Zhengwei,HAO Wanru,WANG Ning

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province,
Yanshan University,Qinhuangdao 066004,China)

Abstract: An atomic rapid decomposition method is proposed for the analysis of power quality disturbance signal,which constructs the relative atom dictionary and serializes the discrete parameters of atoms to reduce the atom quantity of the reconstructed signal and make the result more accurate. The fast Fourier transform is adopted to obtain the optimal atom frequency in advance for the signals with wide frequency spans,such as harmonics,damping oscillation,etc.,to reduce the dictionary scale. The matching pursuit algorithm based on the particle swarm optimization is adopted to choose the optimal atom reflecting the characteristics of power quality disturbance signal. Simulative case shows that,with better anti-noise ability,the proposed method can quickly extract the disturbance characteristics of power quality signals.

Key words: power quality; disturbance signal; atomic decomposition; continuous coherent dictionary; fast Fourier transforms; particle swarm optimization

(上接第 144 页 continued from page 144)

Torque ripple minimization of direct torque control system for induction motor

ZHANG Xinghua,SHI Wan

(College of Automation and Electrical Engineering,Nanjing Tech University,Nanjing 211816,China)

Abstract: Aiming at the large torque ripple of the direct torque control system for induction motor during the steady-state operation,a torque ripple suppression method is proposed. The mechanism of the torque ripple of direct torque control system is analyzed based on the discrete model of induction motor. With the minimum RMS torque error as the objective,a formula for calculating the optimal voltage vector switching moment is deduced by dividing the sampling period into the non-zero voltage vector section and the zero voltage vector section. Simulative and experimental results show that the proposed method significantly reduces the torque ripple of the direct torque control system.

Key words: induction motors; direct torque control; torque ripple analysis; torque ripple suppression