微机保护中滤除衰减直流分量的全周波傅氏算法的仿真比较分析

陈洁[1]，何志勤[2]，叶青[1]

（1. 九江供电公司，江西 九江 332000；2. 华东交通大学电气工程学院，江西 南昌 330013）

摘要：传统的全周波傅氏算法无法滤除故障信号中衰减的直流分量，从而对所需信号的幅值与相位计算造成误差。对近年来提出的几种改进傅氏算法进行分类研究，着重分析了其滤除衰减直流分量的方法。通过仿真，比较和评价改进傅氏算法的滤波性能。

关键词：衰减直流分量；全周波傅氏算法；Matlab

Simulation and analysis of full-cycle fourier algorithm for removing decaying DC component in microprocessor-based protection

CHEN Jie[1], HE Zhi-qin[2], YE Qing[1]

(1.Jiujiang Power Supply Company, Jiujiang 332000, China;
2.East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Traditional full-cycle algorithm can not filter decaying DC component in fault signals, it makes deviation in magnitude and phase calculation. This paper studies several sorts of improved Fourier algorithm in recent years, particularly analyzes the method of filtering decaying DC component. With the simulation result, the paper compares and evaluates the filtering capability of these improved algorithms.

Key words: decaying DC component; full-cycle Fourier algorithm; MATLAB

中图分类号：TM771　　文献标识码：A　　文章编号：1003-4897(2007)06-0016-05

0 引言

全周波傅氏算法是目前电力系统微机继电保护中被广泛采用的算法。用它可以精确计算信号基波和各次谐波的幅值与相位。但当电力系统发生故障时，故障信号中除了各次谐波分量外，还含有衰减的直流分量。由于传统傅氏算法无法滤除衰减直流分量，从而导致计算结果出现误差。

对如何滤除衰减直流分量，近年来已陆续有改进算法被提出。本文对这些改进算法进行了总结和归纳，选择8种典型的改进算法进行研究和仿真。分析各算法的优势与劣势，为在不同条件下选择所需算法提供指导。

1 全周波傅氏算法及衰减直流分量造成的误差分析

以故障电流为例，设故障电流的表达式为：

$$i(t)=I_0\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}+\sum_{k=1}^{N}I_k\sin(k\omega t+\varphi_k) \tag{1}$$

上式中，I_0为衰减直流分量的初始值，τ为衰减时间常数。I_k和φ_k分别为k次谐波的幅值和初相角。可以得出：$a_k=I_k\sin\varphi_k$、$b_k=I_k\cos\varphi_k$。而a_k和b_k为：

$$\begin{cases}a_k=\dfrac{2}{N}\displaystyle\sum_{n=0}^{N-1}i_n\cos\left(nk\dfrac{2\pi}{N}\right)\\ b_k=\dfrac{2}{N}\displaystyle\sum_{n=0}^{N-1}i_n\sin\left(nk\dfrac{2\pi}{N}\right)\end{cases} \tag{2}$$

其中：N为一个基频周期内的总采样点数，n为离散采样点序号。因此，各次波的幅值即为：$I_k=\sqrt{a_k^2+b_k^2}$。当式(1)中不含衰减直流分量时，

通过傅氏变换，可得到各次波幅值和初相角的准确值。而在电力系统中，实际故障输入信号包含衰减直流分量。对衰减直流分量进行频谱分析，可以得到一个连续的、包含基频分量的频谱。如果做周期延拓，可以分解为傅氏级数。因此，如果输入信号含有衰减直流分量，则必然给基波和各次谐波的幅值及初相角计算带来误差。

近年来针对如何滤除衰减直流分量而进行改进的傅氏算法很多。基本可分为以下 3 类：第一类为在原有数据窗的基础上，增加采样点数，对相邻的各数据窗进行傅氏变换，并以此为基础进行校正；第二类也是增加采样点数进行校正，但不用进行多次傅氏变换，而是直接将衰减直流分量计算出来进行滤除;第三类是不增加采样点数进行校正。

2　改进傅氏算法综述

2.1 第一类改进算法 1

文献[1]取相邻的三组数据窗，即 $t\in[0, T]$、$[\Delta T, \Delta T+T]$、$[2\Delta T, 2\Delta T+T]$，对采样信号进行傅氏变换，其中 ΔT 为两采样点之间的时间间隔。从而可以得到三组数据窗下各次波的实部和虚部数值，以及实部和虚部误差的理论分析值，即：$[a_k, b_k, \Delta k_c, \Delta k_s]$、$[a_k', b_k', \Delta k_c', \Delta k_s']$、$[a_k'', b_k'', \Delta k_c'', \Delta k_s'']$。设定中间变量 A、B、C、D，计算衰减直流分量的指数部分，并由此计算误差。在仿真中发现，如果按文献[2]计算中间变量及误差，可得到更高的精度。即有：$A=a_k'-a_k$；$B=b_k'-b_k$；$C=a_k''-a_k'$；$D=b_k''-b_k'$。从而推得：

$$\begin{cases} k_T=\dfrac{|C|}{|k_cA+k_sB|} \\ \Delta k_c=\dfrac{A(k_Tk_c-1)-Bk_sk_T}{1+k_T^2-2k_ck_T} \\ \Delta k_s=\dfrac{B(k_Tk_c-1)+Ak_sk_T}{1+k_T^2-2k_ck_T} \end{cases} \tag{3}$$

上式中：$k_c=\cos(k\omega\Delta T)$，$k_s=\sin(k\omega\Delta T)$。将 a_k、b_k 与 Δk_c、Δk_s 相减，即可得到校正后的各次波实部与虚部。

2.2 第一类改进算法 2

文献[3,4]取相邻的两组数据窗，即 $t\in[0, T]$、$[\Delta T, \Delta T+T]$，计算过程和算法 1 类似。设定 k_1、k_2 的表达式与 k_c、k_s 相同，可以推导出误差 Δk_c、Δk_s 的表达式：

$$\begin{cases} \Delta k_c=\dfrac{q(a_k'-a_k)-p(b_k'-b_k)}{pk\omega\tau-q} \\ \Delta k_s=k\omega\tau\Delta k_c \end{cases} \tag{4}$$

上式中：$p=k_1-k\omega\tau k_2$，$q=k_2+k\omega\tau k_1$。文献[3]中，利用两组相邻数据窗的离散采样值之和相除，计算中间量 r，得到 $\tau=-\Delta T/\ln r$。而在文献[4]中，则是利用泰勒级数的前两项，将时间常数 τ 的表达式简化为 $\tau=\Delta T/(1-r)$。两种算法的精度相差不大，文献[3]的方法略高一些。

2.3 第二类改进算法 1

第二类改进算法由于不用对采样值进行多次傅氏变换，因此运算时间比第一类算法要短。文献[5]直接对交流采样序列进行修正，剔除其中的衰减直流分量部分。在一个工频周期内，将衰减直流分量 $i_d(t)$ 用线性函数近似表示，对第 n 个采样点有：

$$i_d(n)=i_d(0)-\frac{i_d(0)-i_d(N)}{N}n=A-Bn \tag{5}$$

式中的中间变量 A、B 有如下表达：

$$\begin{cases} A=\dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=0}^{N-1}i(n)+\dfrac{N-1}{2N}[i(0)-i(N)] \\ B=\dfrac{i(0)-i(N)}{N} \end{cases} \tag{6}$$

这样，就可以把衰减直流分量在采样值中直接减去。也就是说，它不仅能够用于傅氏算法，对其它算法也有效。

2.4 第二类改进算法 2

文献[6]提出了 3 种改进算法，当中的第二种算法的精度较高。其处理衰减直流分量的思路和文献[4]类似，将衰减直流分量用泰勒级数展开，取前 3 项。即有：

$A_0e^{-\frac{t}{\tau}}\approx B_0+B_1t+B_2t^2$。这样，对信号可以进行两次修正，第 1 次在对离散信号进行傅氏变换之前：

$$\begin{cases} B_1\Delta T=\dfrac{1}{N}((PS_2-PS_0)-(PS_2-2PS_1+PS_0)) \\ B_2\Delta T^2=\dfrac{1}{N}(PS_2-2PS_1+PS_0) \\ i_{new}(n)=i(n)-B_1\Delta Tn-B_2\Delta T^2n^2 \end{cases} \tag{7}$$

式中：PS_0、PS_1、PS_2 分别为一个数据窗内奇数采样点之和、偶数采样点之和、平移一点后奇数采样点之和。在对离散信号进行傅氏变换后，进行第 2 次修正，可以得到各次波实部与虚部的修正值为：

$$\begin{cases} i_{\text{si\_new}} = i_{\text{si}} + \dfrac{1}{N}\coth\left(\dfrac{\pi k}{N}\right)(PS_2 - PS_0) \\ i_{\text{ci\_new}} = i_{\text{ci}} - \dfrac{1}{N}\csc^2\left(\dfrac{\pi k}{N}\right)(PS_2 - 2PS_1 + PS_0) \end{cases} \tag{8}$$

2.5 第二类改进算法 3

文献[7]在计算衰减直流分量时，也利用了泰勒级数，不同的是，文献[7]只利用泰勒级数计算衰减直流分量的指数部分，不包括幅值。设定中间变量 B、C，有：$\sum_{n=0}^{N-1} i(n) = B$、$i(0) - i(N) = C$。由此，可以进一步推导出衰减直流分量幅值和指数部分 $e^{-\alpha t}$ 中 α 的表达式有：

$$\begin{cases} \alpha = 1/\tau = \dfrac{2NC/B}{T + T\sqrt{1 - 2C/B}} \\ I_0 = \dfrac{C}{1 - (1 - C/B)^N} \end{cases} \tag{9}$$

上式中：T 为基波周期。而衰减分量的指数部分，在用泰勒级数展开后可简化为：

$$D = e^{-\alpha\frac{T}{N}} = 1 - \left(\alpha\frac{T}{N}\right) + \frac{1}{2}\left(\alpha\frac{T}{N}\right)^2 \tag{10}$$

因此，各次波修正公式为：

$$\begin{cases} a_k = \dfrac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left[\left(i(n) - I_0 D^n\right)\cos\dfrac{2\pi}{N}nk\right] \\ b_k = \dfrac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left[\left(i(n) - I_0 D^n\right)\sin\dfrac{2\pi}{N}nk\right] \end{cases} \tag{11}$$

2.6 第二类改进算法 4

文献[8]采用牛顿法，通过递推公式，将指数函数近似为一系列线性函数进行计算。计算衰减分量幅值和时间常数的方法和上种算法类似：

$$\begin{cases} \tau = \dfrac{T\sum_{n=0}^{N-1} i(n)}{N\left(i(0) - i(N)\right)} \\ I_0 = \dfrac{i(0) - i(N)}{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}} \end{cases} \tag{12}$$

则不含衰减直流分量的信号可以表示为：$i_{\text{new}}(n) = i(n) - Ae^{-\frac{T_n}{\tau}}$。将指数函数设为 $f(T_n)$，则可推导出线性化递推公式：

$$f(T_{n+1}) = \left(1 - \frac{\Delta T}{\tau}\right) f(T_n) \tag{13}$$

其中：初值 $f(T_0)=1$。

2.7 第三类改进算法 1

和前面两类算法相比，第三类算法不需要增加采样点数，提高了算法的运算速度。文献[9]假设信号在基频周期下的采样点数 N 是 4 的整数倍。从而推导出各次波的实部和虚部误差为：

$$\begin{cases} \Delta a_k = \dfrac{2}{N}\dfrac{A\left(1 - B\cos\dfrac{2\pi k}{N}\right)}{1 - 2B\cos\dfrac{2\pi k}{N} + B^2} \\ \Delta b_k = \dfrac{2}{N}\dfrac{AB\sin\dfrac{2\pi k}{N}}{1 - 2B\cos\dfrac{2\pi k}{N} + B^2} \end{cases} \tag{14}$$

其中：A、B 为：

$$\begin{cases} A = (1 - B)\sum_{n=0}^{N-1} i(n) \\ B = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} i(2n+1) \Big/ \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} i(2n) \end{cases} \tag{15}$$

只需将误差与傅氏变换后的各次波实部、虚部值相减即可。

2.8 第三类改进算法 2

文献[10]引入正交滤波算子 $\beta_1 \sim \beta_m$ 计算衰减直流分量的幅值和时间常数。引入的滤波算子要使下式成立：

$$X = \sum_{n=1}^{m} \beta_n i_n^k = 0$$

式中：k 为谐波次数。当 k 从 1 取到 l 时，可以通过求解下述方程组，解出滤波算子：

$$\begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{N}\times1\times1\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{N}\times1\times2\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{N}\times1\times m\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{N}\times1\times1\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\times1\times2\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\times1\times m\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin\left(\frac{2\pi}{N}\times l\times1\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{N}\times l\times2\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{N}\times l\times m\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{N}\times1\times l\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\times l\times2\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\times l\times m\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{m-1} \\ \beta_m \end{bmatrix} = 0 \tag{16}$$

可以根据实际需要，确定要计算到多少次谐波的幅值和相角。计算出滤波算子后，再分别计算 X_1

和 X_2：

$$X_1=\sum_{n=1}^{m}\beta_n i_n=\sum_{n=1}^{m}\beta_n A_0 e^{-\frac{n\Delta T}{\tau}}$$

$$X_2=\sum_{n=1}^{m}\beta_n i_{n+1}=\sum_{n=1}^{m}\beta_n A_0 e^{-\frac{(n+1)\Delta T}{\tau}} \tag{17}$$

显然二者相除，即可求得衰减直流分量的指数函数。然后将指数函数回代，衰减分量的幅值也可求出。最终可将采样值与衰减直流分量相减，求得修正后的各次波幅值和相位。

3　算法的性能比较

3.1 仿真分析

为比较这 3 类共 8 种改进傅氏算法的精度，采用 Matlab6.5 对这 8 种算法进行仿真分析。设故障电流信号波形函数为：

$$i(t)=25e^{-40t}+25\sin\left(\omega t+60^0\right)+8\sin\left(2\omega t+45^0\right)+16\sin\left(3\omega t+30^0\right)+5\sin\left(4\omega t+60^0\right)+11\sin\left(5\omega t+45^0\right) \tag{18}$$

在此需要指出的是初相角的计算问题。这三类算法在推导过程中基于的函数模型是不一样的。按文献[11]的分析可知，第一类改进算法 1 和第二类改进算法 1 是采用余弦模型推导而来，即将故障信号设为：

$$i(t)=I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}+\sum_{k=1}^{N}I_k\cos\left(k\omega t+\varphi_k\right)=I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}+\sum_{k=1}^{N}\left(I_{Rk}\cos\left(k\omega t\right)-I_{Ik}\sin\left(k\omega t\right)\right) \tag{19}$$

余弦模型的相角计算公式应为：$\varphi_k=\arctan\left(-b_k/a_k\right)$。而其余 6 种算法则是采用正弦模型推导而来，是将故障信号设为：

$$i(t)=I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}+\sum_{k=1}^{N}I_k\sin\left(k\omega t+\varphi_k\right)=I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}+\sum_{k=1}^{N}\left(I_{Ik}\cos\left(k\omega t\right)+I_{Rk}\sin\left(k\omega t\right)\right) \tag{20}$$

其相角计算公式应为：$\varphi_k=\arctan\left(a_k/b_k\right)$。在计算各次谐波幅值的时候，如果将实部和虚部颠倒或虚部缺负号，不会造成影响。但是在相角计算时会出现问题，导致保护装置的误动作，因此在编程时值得注意。信号中各次谐波的幅值、相角仿真结果如表 1 和表 2 所示。

表 1　幅值计算结果

Tab.1 Results of magnitude calculation

算法	基波	二次谐波	三次谐波	四次谐波	五次谐波
传统全周波算法	28.1846	9.9897	17.4751	5.9603	11.8926
第一类改进算法 1	25.0000	8.0000	16.0000	5.0000	11.0000
第一类改进算法 2	25.3366	8.3347	16.3035	5.4559	11.4587
第二类改进算法 1	25.4443	8.0939	16.0297	5.0313	11.0167
第二类改进算法 2	25.2526	7.9724	15.9317	4.9847	10.9650
第二类改进算法 3	25.0742	8.0476	16.0364	5.0288	11.0220
第二类改进算法 4	24.9754	7.9842	15.9879	4.9924	10.9927
第三类改进算法 1	25.0000	8.0000	16.0000	5.0000	11.0000
第三类改进算法 2	24.9242	7.9513	15.9627	4.9767	10.9775

表 2　相角计算结果

Tab.2 Results of phase calculation

算法	基波	二次谐波	三次谐波	四次谐波	五次谐波
传统全周波算法	53.4158	38.5663	29.0818	53.5935	43.8079
第一类改进算法 1	60.0000	45.0000	30.0000	60.0000	45.0000
第一类改进算法 2	60.6109	46.9700	31.1679	60.9337	45.8180
第二类改进算法 1	60.7565	45.7487	30.2109	60.2198	45.0910
第二类改进算法 2	60.8361	45.8355	30.2133	60.2988	45.1047
第二类改进算法 3	59.8177	44.8032	29.9753	59.8127	44.9682
第二类改进算法 4	60.0608	45.0659	30.0082	60.0626	45.0106
第三类改进算法 1	60.0000	45.0000	30.0000	60.0000	45.0000
第三类改进算法 2	60.1881	45.2042	30.0254	60.1938	45.0327

从表中可以看到，这 8 种改进傅氏算法都可以较为有效地滤除衰减直流分量对各次波的幅值和相位造成的误差。

3.2 性能比较结果

1）从运算速度上看，第一、二类改进算法都是在增加采样点的基础上消除衰减直流分量造成的

影响。第一类改进算法由于要进行 2～3 次傅氏变换，所需的时间更长。而第三类改进算法由于不用增加采样点数，提高了算法的实时性。

2) 从运行结果的精度上看，第一类改进算法 1 和第三类改进算法 1 的幅值和相角精度最高，其理论误差为零。

分类对比时，可知第一类改进算法中的算法 1 高于算法 2，因此被广为参考。第二类改进算法中的算法 2、3 都是用泰勒级数来计算衰减分量。算法 3 的表达式更简单，精度也比算法 2 高。算法 1、4 可以实现在傅氏变换前就将误差从交流采样序列中滤除，因此修正后的值可以用于任意算法。算法 1 在计算衰减分量幅值时没有用到指数运算，而算法 4 精度高于算法 1。第三类改进算法 1 的精度高于算法 2，但其受采样点数必须是 4 的整数倍限制。算法 2 的衰减直流分量计算所需采样点数较少，在本文仿真中，一周期采样点数为 32，而计算衰减分量只需 14 个采样点数即可。此外，和第二类算法 1、4 一样，也不受算法的限制。其复杂之处在于求解式 16。

4 结语

这三类算法对故障信号基波和各次谐波的幅值和相角计算都是比较精确的。可以根据已有条件和实际需要，对算法进行选择，而不存在一种算法完全优于另一种算法。因为伴随着微机保护装置在处理器性能上的不断提升，算法的速度差距已逐渐减小。而这 8 种算法基波幅值的最大误差也只有 1.78%，相角则为 1.39%，是可以接受的范围，如果增加基频周期内的采样点数，则误差将被进一步缩小。

参考文献

[1] 周大敏. 一种消除非周期分量对非递推傅氏算法影响的精确方法[J]. 继电器, 1998, 26(4):7-11.
ZHOU Da-min. An Accurate Algorithm to Eliminate Decaying Component from Nonrecursive Fourier Algorithm[J]. Relay, 1998, 26(4): 7-11.

[2] 周大敏. 递推富氏算法中衰减非周期分量的消除方法[J]. 继电器，1998，26(5):5-7.
ZHOU Da-min. The Accurate Algorithm to Eliminate Decaying DC Component from Recursive Fourier Algorithm[J]. Relay, 1998, 26(5): 5-7.

[3] 候有韬，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 You-tao, ZHANG Ju. A Fast Algorithm for Decaying DC Component Filtration[J]. Relay, 2004, 32(6): 6-9.

[4] 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 Zeng-ping, XU Yan. Study of Filtering Decaying DC Component Algorithm for Microprocessor-based Protection[J]. Relay, 2005, 33(17): 11-13.

[5] 黄纯，潘华，江亚群，等. 一种消除非周期分量的交流采样数据修正法[J]. 继电器，2001，29(8):10-12.
HUANG Chun, PAN Hua, JIANG Ya-qun, et al. A New Approach to Eliminate Non-period Components from Sampling Data[J]. Relay, 2001, 29(8): 10-12.

[6] GUO Yong, Kezunovic M, CHEN De-shu. Simplified Algorithms for Removal of the Effect of Exponentially Decaying DC-offset on the Fourier Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2003, 18(3): 711-717.

[7] 唐建辉，吴在军，胡敏强. 一种精确滤除衰减非周期分量的新算法[J]. 继电器，2005，33(11)：14-17.
TANG Jian-hui, WU Zai-jun, HU Min-qiang. A New Algorithm for Filtering Decaying DC Components Accurately[J]. Relay, 2005, 33(11): 14-17.

[8] 刘辉乐，陈皓，黄志华. 一种消除非周期分量的牛顿递推采样值修正法[J]. 继电器，2004，32(17)：28-30.
LIU Hui-le, CHEN Hao, HUANG Zhi-hua. An Improved Newton Iterative Algorithm to Eliminate Non-period Components from Sampling Data[J]. Relay, 2004, 32(17): 28-30.

[9] 齐先军，丁明，温阳东. 一种完全滤除衰减直流分量的短数据窗改进全波傅氏算法[J]. 继电器，2005，33(17)：14－16.
QI Xian-jun, DING Ming, WEN Yang-dong. An Improved Short Data Window Full-wave Fourier Algorithm for Completely Filtering Decaying DC Component[J]. Relay, 2005, 33(17):14-16.

[10] 幸晋渝，刘念，郝江涛，等. 故障电流中衰减直流分量的滤波算法研究[J]. 继电器，2005，33(13)：10-12.
XING Jin-yu, LIU Nian, HAO Jiang-tao, et al. Research of Decaying DC Removal Algorithms in Fault Current[J]. Relay, 2005, 33(13):10-12.

[11] 朱桂英，龚乐年. 傅氏算法在微机保护应用中的探讨[J]. 电力系统自动化学报，2005，17(4)：41-43.
ZHU Gui-ying, GONG Le-nian. Discussion on Application of Fourier Algorithm in Microcomputer Protection[J]. Proceedings of the EPSA, 2005, 17(4):41-43.

（下转第 29 页 continued on page 29）

由于本文的辅助问题原理中结合了“Δ－变量”来处理多平衡节点问题，所得节点电压相角与方法一的未分区算法相比，精度上基本在误差范围之内。

方法三中，不仅采用分区算法节省了总的计算时间，而且由于二次罚函数的引入，优化后的网损也有所下降，而总迭代次数却无显著变化，同时避免了离散变量简单归整法易出现不可行解的情况。

6 结论

本文提出了一种基于电网分区的并行最优潮流算法，各子分区单独优化，大大降低了求解问题的复杂度。“Δ－变量”的运用，改进了以往的辅助问题原理模型，在解决分区问题的同时，也解决了分区引起的多平衡节点协调问题。由于中间变量与子分区变量在全网的相角是分别迭代的，故未增加子分区优化的求解复杂度。另外，在子分区优化中采用二次罚函数机制处理离散变量，避免了出现不可行解，提高了算法的收敛可靠性。

通过 IEEE 118 节点算例进行对比测试，本文的方法在求解精度、优化结果以及计算时间上均令人满意，非常适合求解大规模电力系统的无功优化问题，具有较强的实用价值。

参考文献

[1] 程新功，厉吉文，曹立霞. 电力系统最优潮流的分布式并行算法[J]. 电力系统自动化，2003，27(24):23-27.
CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia. Distribute and Parallel Optimal Power Flow Solution of Electronic Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2003, 27(24): 23-27.

[2] Losi A, Russo M. On the Application of Auxiliary Problem Principle[J]. Journal of Optimization Theory and Application, 2003,117(2):377-396.

[3] Cohen G. Auxiliary Problem Principle and Decomposition of Optimization Problems[J].Journal of Optimization Theory and Application, 1980, 32(3):277-305.

[4] 程新功，厉吉文，曹立霞. 基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究[J]. 中国电机工程学报，2003, 23(10): 109-113.
CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia. Multi-objective Distributed Parallel Power Optimization Based on Subarea Division of the Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23 (10): 109-113.

[5] 赵晋泉, 侯志俭, 吴际舜. 牛顿最优潮流算法中离散控制量的新处理方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23):37-40.
ZHAO Jin-quan, HOU Zhi-jian, WU Ji-shun. A Novel Quadratic Penalty Function Based Discretization Algorithm for Newton Optimal Power Flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (23) : 37-40.

[6] Santos J R, Lora A T, Exposito A G. Finding Improved Local Minima of Power System Optimization Problems by Interior-point Methods [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (1) : 238-244.

[7] Crisan O, Mohtadi M A. Efficient Identification of Binding Inequality Constraints for the Optimal Power Flow Newton Approach[J]. IEE Proceedings-C 1992, 139(5) : 365-370.

[8] 程莹，刘明波. 含离散控制变量的大规模电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报，2002, 22(5):54-60.
CHENG Ying, LIU Ming-bo. Reactive Power Optimization of Large-scale Power Systems with Discrete Control Variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 54-60.

收稿日期：2006-10-21；　修回日期：2006-11-26

作者简介：
朱小军（1981- ），男，硕士研究生，主要研究方向为电力系统无功优化计算及电力市场；E-mail:zhuxj811005@sina.com
陈　刚（1964- ），男，重庆大学副研究员，博士，主要研究方向为电力系统运行与控制、微机在电力系统中的应用以及电力市场。

（上接第 20 页　continued from page 20）

收稿日期：2006-09-30；　修回日期：2006-11-30

作者简介：
陈　洁（1971－），女，工程师，长期从事继电保护运行管理工作；
何志勤（1982-），男，硕士研究生，从事牵引供电系统微机继电保护研究；E－mail: hzq@ecjtu.jx.cn
叶　青（1976－），男，工程师，长期从事继电保护运行管理及整定计算工作。