

# 基于改进蚁群优化算法的电力谐波 和间谐波的检测与分析

王志川<sup>1</sup>, 刘丹莉<sup>1</sup>, 彭祥华<sup>2</sup>, 周群<sup>2</sup>

(1. 国网自贡供电公司, 四川 自贡 643000; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为了准确测量电力系统中的谐波和间谐波参数, 提高电能质量, 提出一种将 FFT 频谱区间连续细化算法与改进的蚁群优化相结合的混合算法。通过改进蚁群算法的适应度函数和转移概率, 降低了算法的复杂度, 提高了算法的速度。算法的原理是通过 FFT 频谱区间连续细化算法检测谐波和间谐波频率值, 根据频率检测值构建幅值和相位的适应度函数, 运用改进的蚁群算法对幅值和相位参数进行估计, 从而实现电力谐波和间谐波参数的检测与分析。通过对比仿真实验, 验证了该混合算法能够获得较高精度的谐波和间谐波参数值, 具备较强的抗噪声干扰能力。

**关键词:** 频谱区间细化; 改进蚁群优化; 混合算法; 谐波分析; 谐波检测

**Abstract:** In order to accurately measure the harmonic and inter-harmonic parameters in power system and to improve the power quality, a hybrid algorithm combining FFT spectrum interval continuous refinement algorithm and improved ant colony optimization (ACO) is proposed. By improving the fitness function of ACO algorithm and the transition probability, the complexity is reduced and the speed is improved. FFT spectrum interval continuous refinement algorithm is used to detect the frequency values of harmonics and inter-harmonics, then according to the frequency detection values the fitness function of the amplitude and phase parameters is established. And then the improved ACO algorithm is used to estimate the parameters of amplitude and phase so as to realize the detection and analysis of harmonic and inter-harmonic parameters. The comparison of computer simulation results verifies that the proposed hybrid algorithm can accurately estimate the parameters of harmonics and inter-harmonics, and have a stronger ability to resist noise.

**Key words:** frequency interval refinement; improved ant colony optimization; hybrid algorithm; harmonic analysis; harmonic detection

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0049-05

## 0 引言

在现代电力系统中, 由于接入了大量的电力电子装置和非线性负载, 使得系统中产生了大量的谐波和间谐波, 这给电力系统设备的安全经济运行带来严重的危害。因此, 对谐波和间谐波的精确检测和分析具有重要的工程实际意义。

谐波分析的主要任务是确定谐波的成分以及在有效精度范围内计算谐波或者间谐波的频率、幅值和相位。谐波分析方法主要有: 快速傅里叶变换法及其改进算法<sup>[1-4]</sup>、小波分析法<sup>[5-6]</sup>、神经网络法<sup>[7-8]</sup>、粒子群算法<sup>[9]</sup>等等。对谐波参数的检测和分析, 大多采用 FFT 及其改进算法<sup>[1-4]</sup>, 改进算法中大多采用加窗谱线插值, 谱线已由单谱线发展到三

谱线<sup>[2-4]</sup>。但随着谱线的增多, 算法的复杂程度也在增加, 另外, 窗函数的选取在很大程度上也影响算法的复杂性。小波变换相比于 FFT 具有优良的时频特性, 文献[5-6]验证了该方法的有效性, 但小波变换可能存在的混频现象和算法复杂的问题, 影响了算法的计算精度和速度。文献[7-8]通过神经网络算法实现谐波信号的并行处理和自学习能力, 获得较高精度的谐波参数, 但算法复杂, 对硬件要求高, 且自学习时间较长。文献[9]提出粒子群算法分析谐波, 在已知谐波频率的情况下, 能够有效估计幅值和相位, 但要获得较高精度的谐波参数, 需要进一步改进算法。

蚁群优化(ant colony optimization, ACO)<sup>[10]</sup>是由意大利学者 M. Dorigo 等人于 1991 年首先提出的一种基于种群寻优的启发式搜索算法。研究显示,

该算法在求解复杂优化问题(特别是离散优化问题)等方面有一定的优势,是一种很有发展前景的优化算法<sup>[11]</sup>。将结合FFT频谱区间连续细化算法和改进的蚁群优化算法,利用FFT频谱区间连续细化算法检测谐波或间谐波频率,再利用改进的蚁群优化算法估计相应的谐波或间谐波的幅值和相位,实现对电力系统谐波和间谐波参数的高精度检测。通过仿真实验,验证了改进蚁群算法在电力间谐波分析中的正确性和有效性,为谐波治理提供了一种检测和分析的新方法。

## 1 算法原理

### 1.1 频率的FFT谱区间连续细化算法

首先通过FFT对间谐波信号进行全景谱分析,获得各谐波或间谐波频率的粗略范围,再对关注的频谱区间插入相应点数进行连续细化,利用改进的DFT算法进一步估计精确的频率值。其原理<sup>[12]</sup>为:对于采样频率为 $f_s$ ,采样点数为 $N$ 的间谐波时间序列 $f(t)$ ,其中 $t = k\Delta t$ ,  $\Delta t = 1/f_s$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。则离散的傅里叶级数为

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(t) \cos(2\pi kn/N) \\ b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(t) \sin(2\pi kn/N) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $n = 0, 1, 2, \dots, N/2$ 。此时 $n\Delta f$ 处幅值矢量表达式为 $a_n - ib_n$ ,经离散傅里叶变换后频率分辨率为 $\Delta f = f_s/N$ ,当采样点数固定时,频率分辨率无法再提高。

根据采样定理可知,间谐波时间序列 $f(t)$ 包含于从0到 $f_s/2$ 的频率信息,如果用连续傅里叶变换对频谱进行计算,把频谱线看成连续的,即把式(1)中的 $n$ 看成是一个在区间内 $0 \leq n \leq N/2$ 的连续实数,则式(1)变换为

$$\begin{cases} a(f) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(t) \cos(2\pi kf/f_s) \\ b(f) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(t) \sin(2\pi kf/f_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $0 \leq f \leq f_s/2$ ,此时的频率分辨率不再受采样点数的限制, $f$ 变成一个连续的频率。

对包含于全景谱 $[0, f_s/2]$ 内的频率子区间 $[f_1, f_2]$ ,利用式(2)进行 $M$ 点等间隔频谱分析,以获取该区间内频谱线最大峰值所对应的频率 $f_i$ ( $i$ 为谐波

和间谐波个数),其实现步骤如下。

- (1) 确定频率分辨率  $\Delta f = (f_2 - f_1) / M$ ;
- (2) 计算频率序列  $\{f_1, f_1 + \Delta f, f_1 + 2\Delta f, \dots, f_1 + M\Delta f = f_2\}$ ;
- (3) 根据式(2)计算 $M+1$ 点频率序列的幅值;
- (4) 搜索谱线最大幅值点对应的频率 $f_i$ ,即为细化后的频率。

### 1.2 幅值和相位检测的改进蚁群优化算法

#### 1.2.1 适应度函数的改进

ACO与其他进化算法相似,通过对候选解组成的群体进化来寻求最优解。对于给定的含间谐波的谐波信号

$$f(t) = \sum_{i=1}^H A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + n(t) \quad (3)$$

式中 $H$ 为谐波信号的个数; $\omega_i = 2\pi f_i$ ;  $A_i, \omega_i, \varphi_i$ 分别为谐波或间谐波信号的幅值、角频率和初相位,当 $i = 1$ 时 $A_1, \omega_1, \varphi_1$ 分别表示为基波的幅值、角频率和初相位; $n(t)$ 表示白噪声。

对式(3)谐波和间谐波项分解得

$$g(t) = \sum_{i=1}^H [a_i \sin(\omega_i t) + b_i \cos(\omega_i t)] \quad (4)$$

这样各谐波或间谐波幅值 $A_i$ 和初相位 $\varphi_i$ 的计算就转化为对参数 $a_i, b_i$ 的估计。由于受算法和噪声的影响,检测频率往往不完全等于实际频率。因此,要利用蚁群算法优化参数 $a_i, b_i$ ,式(4)应修改为 $g'(t) = \sum_{i=1}^H [a_i \sin(\omega'_i t) + b_i \cos(\omega'_i t)]$ ( $\omega'_i$ 为检测频率),此时只需设置蚁群的最终位置为 $\{(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_H, b_H)\}$ ,在一定的谐波分析时间 $T_A$ 下,使得适应度函数 $fitness$ 取得最小,即

$$\min fitness = \int_0^{T_A} [f(t) - g'(t)]^2 dt \quad (5)$$

考虑到谐波项数 $H$ 比较大时,式(5)的计算量较大,不利于对参数 $a_i, b_i$ 的快速检测,于是令 $\delta_i = A_i \sin(\omega'_i t + \varphi_i) - a_i \sin(\omega'_i t) - b_i \cos(\omega'_i t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, H$ ,则式(5)适应度函数变为

$$fitness = \int_0^{T_A} (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_H + n(t))^2 dt \quad (6)$$

对式(6)展开得

$$fitness = \int_0^{T_A} [(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_H^2 + n^2(t)) + 2(\delta_1 \sum_{i=2}^H \delta_i + \delta_2 \sum_{i=3}^H \delta_i + \dots + \delta_{H-1} \delta_H + n(t) \sum_{i=0}^H \delta_i)] dt \quad (7)$$

考察平方项和交叉项易知,平方项积分 $\int_0^{T_A} \delta_i^2 dt$ 的极值寻优决定了幅值和相角参数的最优解( $a_i,$

$b_i$ ), 即交叉项的极值包含于平方项, 因此可以提取平方项之和的积分作为新的适应度函数。此外,  $\mu^2(t)$  积分后为一常数, 不影响参数  $a_i, b_i$  的估计, 在一定程度上起到了消除噪声的作用, 同时提高了参数估计的运算速度。

综上所述, 关于幅值和相角参数  $a_i, b_i$  的改进适应度函数为

$$fitness(a_i, b_i) = \int_0^{T_A} \sum_{i=1}^H [A_i \sin(\omega'_i t + \varphi_i) - a_i \sin(\omega'_i t) - b_i \cos(\omega'_i t)]^2 dt \quad (8)$$

式中  $\omega_i, \omega'_i$  分别表示第  $i$  项谐波或简谐波的实际频率和检测频率, 经改进蚁群算法优化参数  $(a_i, b_i)$  后, 谐波和间谐波的幅值和相角可由式(9)估计

$$\begin{cases} A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \\ \arctan\left(\frac{b_i}{a_i}\right) \times 180 \\ \varphi_i = \frac{\quad}{\pi} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, H) \quad (9)$$

### 1.2.2 转移概率的改进

在蚁群算法中, 转移概率是指导算法进行全局寻优和局部寻优的参数, 在很大程度上决定了算法的收敛速度和寻优精度。为了提高算法的全局和局部寻优能力, 基于轮盘赌选择的原理, 结合文献[13], 通过评价最优蚂蚁与普通蚂蚁的适应度值来构建转移概率, 即

$$P_{ij} = (fitness(j) - fitness(i)) / fitness(j) \quad (10)$$

式中  $i, j$  分别表示普通蚂蚁个体和最优蚂蚁个体;  $fitness$  为适应度函数值。相比传统的转移概率  $P_{ij} =$

$$\begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{s \in allowed} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta} & j \in allowed \\ 0 & else \end{cases}$$

改进的转移概率减少了算

法的参数, 在一定程度上也提高了算法的稳定性。

于是, 谐波和间谐波幅值和相角的优化流程可表述如下。

(1) 初始化蚁群。主要包括设置蚁群的数量、迭代次数、搜索范围、局部搜索阈值以及信息素挥发系数等。

(2) 随机生成蚂蚁在解空间中的初始位置并根据适应度函数构造信息素矩阵  $\tau_{ij}(t)$ 。

(3) 每只蚂蚁执行由城市  $i$  到城市  $j$  的转移。当前蚂蚁根据前面蚂蚁所留下的信息素, 修改自己的解结构, 完成一次循环。

(4) 蚂蚁集体循环移动。将转移概率  $P_{ij}$  与设置

的局部搜索阈值比较, 指导蚂蚁执行局部搜索或全局搜索。

(5) 评价蚁群。对每只蚂蚁的适应度值  $fitness(a_i, b_i)$  做出评价, 并记录蚁群最优解位置  $(a_i, b_i)$ 。

(6) 更新信息素矩阵。信息素更新的具体方式为  $\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + fitness(a_i, b_i)$ , 其中,  $fitness(a_i, b_i)$  为适应度函数, 也称信息素更新算子,  $\rho$  为信息素挥发系数。

(7) 判断是否满足终止条件。若满足, 输出最优解  $(a_i, b_i)$ , 由式(9)计算谐波和间谐波的幅值和相位; 否则, 信息素挥发, 算法返回继续进行步骤(3)。

## 2 仿真实验

### 2.1 无噪声干扰下的谐波和间谐波参数检测

为了验证所提算法设计检测的谐波和间谐波信号为

$$f(t) = \sum_{i=1}^9 A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (11)$$

式中, 各谐波、间谐波的频率、幅值和相角如表1所示。

表1 谐波、间谐波参数

频率/Hz	幅值/p. u.	相角/°
50	1	0
75	0.18	0
250	0.097	30
275	0.1	30
350	0.02	45
450	0.03	45
550	0.04	45
560	0.01	0
650	0.024	0

采样频率为 2 000 Hz, 采样点数为 1 024, 频率细化插入点数为 100; 经过多次尝试, 蚁群优化参数设置为: 蚁群数目为 80, 迭代步数为 500, 搜索范围为  $a_i, b_i \in [-1, 1]$  ( $i=1, 2, \dots, 9$ ), 局部搜索阈值为 0.1, 信息素挥发系数为 0.5, 仿真结果如表2所示。

由表2的仿真结果可知, 当谐波或间谐波频率检测精度较低时, 相角的估计精度相对较低, 但绝对误差都低于 1.1; 而幅值的估计精度保持在较高水

平,其相对误差均低于 0.056%。

表 2 谐波和间谐波参数的仿真结果

频率/Hz	$a_i/p.u.$	$b_i/p.u.$	幅值/p.u.	相角/ $^\circ$
50.0	1.000 0	0.010 0	1.000 0	0.000 0
75.1	0.180 1	-0.001 1	0.180 1	-0.362 1
249.9	0.083 7	0.044 1	0.097 0	30.369 5
275.0	0.086 6	0.050 0	1.000 0	30.005 4
349.9	0.014 1	0.014 2	0.020 0	45.271 5
450.0	0.021 2	0.021 2	0.030 0	45.004 5
550.0	0.028 3	0.028 3	0.040 0	45.007 5
560.3	0.010 0	-0.000 2	0.010 0	-1.056 1
650.0	0.024 0	0.000 0	0.024 0	0.013 4

在蚁群算法中,参数初值的设定对算法性能的影响很大,合适的参数设定有利于提高算法收敛能力和快速寻找到最优解。下面就上述算例在不同参数下进行对比分析,经过多次尝试,对比分析分为两组,一组保持信息素挥发系数和局部搜索阈值为定值,讨论蚁群数目和迭代次数对算法的影响;另一组设置蚁群数目和迭代次数为定值,讨论信息素挥发系数和局部搜索阈值对算法的影响,根据式(10)转移概率,局部搜索阈值取为宜。定义综合误差为

$$C_{error} = \sum_{i=1}^H (|A_i \cos \varphi_i - a_i| + |A_i \sin \varphi_i - b_i|) \quad (12)$$

在两组仿真实验中,通过计算综合误差来评价不同参数对算法影响的差异。综合误差仿真结果如图 1、图 2 所示。

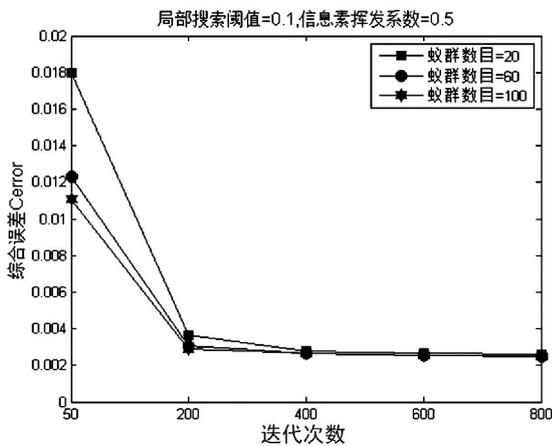


图 1 蚁群数目和迭代次数变化时的综合误差

如图 1、图 2 所示,蚁群数目和迭代次数决定了算法的整体性能,迭代次数尤为显著。在图 1 中,当蚁群数目从 60 增加到 100 时,估计精度的提高明显减缓(60 时综合误差为 0.012 左右,100 时综合误差

为 0.012 5 左右);迭代次数从 400 增加到 600 时,综合误差基本收敛于某一值,继续增加迭代次数(增加到 800 时)综合误差基本没有变化。但无论是增加蚁群数目或者迭代次数都会增加优化时间,因此应合理地选取蚁群数目和迭代次数。在图 2 中,当蚁群数目和迭代次数选定时,信息素挥发系数和局部搜索阈值的变化对降低综合误差的影响不大(综合误差在 0.002 5 ~ 0.002 7 之间波动)。

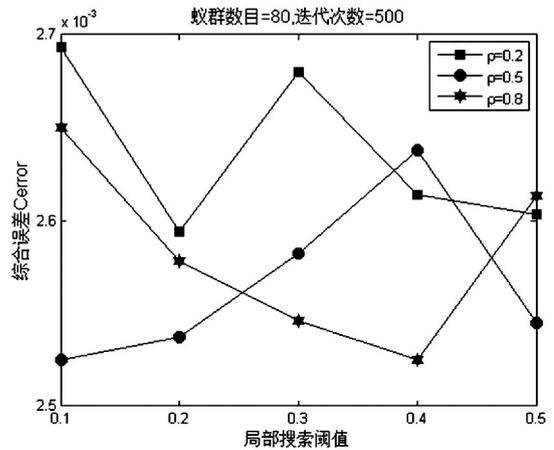


图 2 信息素挥发系数和局部搜索阈值变化时的综合误差

## 2.2 噪声干扰下的谐波和间谐波检测

对比分析文献[14]算法的谐波与间谐波检测精度,文献[14]算法是在快速独立分量分析(FastICA)的基础上,针对分离后信号的畸变问题,改进该算法以提高分量估计的稳定性和有效性。待测信号为

$$f(t) = 0.08 \sin(80\pi t + \pi/6) + \sin(100\pi t) + 0.6 \sin(300\pi t) + 0.04 \sin(420\pi t/\pi/4) + 0.4 \sin(500\pi t + \pi/3) + n(t) \quad (13)$$

式中,基波频率为 50 Hz,  $n(t)$  为高斯白噪声。设采样频率为 1 000 Hz,采样点数为 512,频率细化插入点数为 100,蚁群算法参数设置与 2.1 节相同,仿真结果如图 3 和表 3 所示。

如表 3 所示,谐波信号中混有较强的高斯白噪声时,文献[14]算法估计的频率值精度均高于 FFT 频谱区间连续细化算法,但频率的检测精度不是此处的重点,对比幅值和相角的估计精度,在频率检测精度相对较低的情况下,所提算法除了基波相角估计精度低于文献[14]的算法外,其余幅值和相角的精度都要比该文献的算法高出许多,尤其是幅值的估计精度,相对误差均低于 0.25%,相角的估计精度波动也比较平缓,其绝对误差均保持在 2.1 以下。

表 3 信噪比为 10 dB 下的谐波和间谐波参数的仿真结果

所提算法			文献[14]算法		
频率/Hz	幅值/V	相角/°	频率/Hz	幅值/V	相角/°
39.404 0	0.079 8	32.097 6	39.924 7	0.080 6	36.595 0
49.989 9	0.999 9	0.034 5	50.016 2	1.026 2	-0.006 5
150.040 4	0.600 1	-0.146 2	150.001 5	0.604 0	-5.323 5
210.146 5	0.040 0	44.486 6	210.044 1	0.044 5	260.147 4
249.888 9	0.400 0	60.411 3	250.034 1	0.398 5	55.647 0

由图 3 可知,不同信噪比条件下,各次谐波和间谐波的幅值和相位误差都在较小的范围内波动,除了信噪比为 5 dB 时 210 Hz 间谐波相位误差较大以外,其余谐波和间谐波的幅值和相位误差都较小。其中,谐波(基波、3 次谐波和 5 次谐波)的幅值和相位误差要明显低于间谐波(40 Hz 和 210 Hz 间谐波)的误差,这主要是由于谐波频率的检测精度较高所致。另外,注意到 40 Hz 间谐波的幅值相对误差与其他谐波和间谐波的变化相反,这也是由于信噪比 5 dB 时频率(检测值为 39.555 6 Hz)的估计精度要高于信噪比 15 dB、30 dB 时的频率(均为 39.454 5 Hz)。

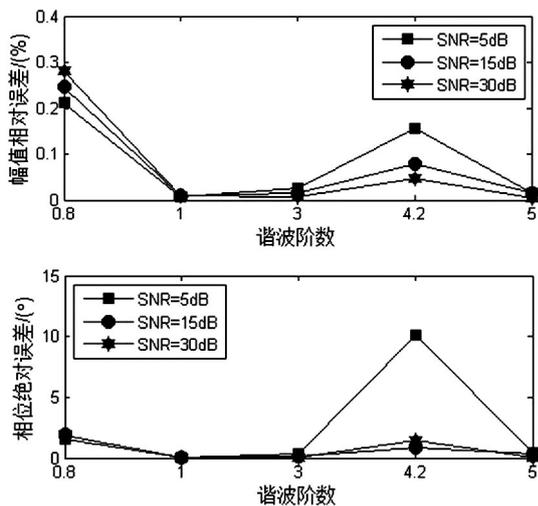


图 3 不同信噪比下的幅值和相位误差

### 3 结 论

采用 FFT 频谱区间连续细化算法和改进蚁群优化算法进行电力谐波和间谐波的分析与检测,在无噪声干扰下,分析了蚁群算法参数对算法检测谐波和间谐波幅值和相角精度的影响,也在噪声干扰下与文献[14]的算法进行了对比分析。通过两个

仿真实验,结果表明:在改进蚁群优化算法的适应度函数和转移概率的基础上,降低了算法的复杂性,在一定程度上提高了算法的速度。仿真试验验证了该算法的正确性和有效性,并且在谐波和间谐波频率估计精度不高的情况下,也能获得较高精度的幅值和相角。由于所提算法在计算蚁群适应度函数时比较耗时,因此该算法适用于离线检测。

#### 参考文献

- [1] 张伏生,耿中行,葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63 - 66.
- [2] 肖先勇,王楠,刘亚梅. 基于多项式逼近的单峰谱线插值算法在间谐波分析中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 57 - 61.
- [3] 卿柏元,滕召胜,高云鹏,等. 基于 Nuttall 窗双谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 153 - 158.
- [4] 牛胜锁,梁志瑞,张建华,等. 基于三谱线插值 FFT 的电力谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 130 - 136.
- [5] 薛蕙,杨仁刚,罗红. 利用小波包变换实现电力系统谐波分析[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 41 - 45.
- [6] 张鹏,李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252 - 259.
- [7] 向东阳,王公宝,马伟明,等. 基于 FFT 和神经网络的非整数次谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 35 - 39.
- [8] 汤胜清,程小华. 一种基于多层前向神经网络的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 90 - 94.
- [9] 吕干云,方奇品,蔡秀珊. 一种基于粒子群优化算法的间谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 156 - 161.

(下转第 68 页)

生较大的影响。实际复杂电力系统中,对保护影响较大的环网开断线路绝大部分仍然分布于保护所在线路两侧母线以及配合保护所在线路两侧母线连接的线路中。

若同时将主保护以及配合保护两侧母线上连接的线路加入到开断的线路范围中,必须考虑到大部分环网开断对保护定值的影响。

为此,可以采用自动扩大搜索和确定环网涉及的保护相结合的方法来解决环网的在线校核问题。其基本思想是:以电力系统拓扑结构变化部分为中心,自动搜索其外层三层元件和确定与其构成环路的元件,校核以上阐述所涉及的保护。此研究可以避免搜索全网所有范围,避免对满足灵敏性和选择性的保护定值进行校核,这样大大减少计算时间,并且能够满足实时性的要求。

#### 4 结 语

通过对继电保护在线校核系统的软件功能分析,给出了其系统的结构设计和各模块的实现功能设计,并就其中的关键技术进行了研究。该方案结合了许多工程实际,能够为在线校核软件的应用提供很大的参考价值。

#### 参考文献

[1] 李志. 电网继电保护定值仿真校验系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.

(上接第 53 页)

[10] Dorigo, M, Maniezzo, V and Colomi, A. The Ant System: An Auto Calytic Optimizing Process [R]. Technical Report No. 91 - 016 Revised, Politecnico di Milano, Italy, 1991.

[11] 杨淑莹, 张桦. 群体智能与仿生计算——Matlab 技术实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 225.

[12] 刘进明, 应怀樵. FFT 谱连续细化分析的富里叶变换法 [J]. 振动工程学报, 1995, 8(2): 162 - 166.

[13] 马卫, 朱庆保. 求解函数优化问题的快速连续蚁群算法 [J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2120 - 2124.

[14] 何川, 舒勤, 李旻. 基于改进单通道 FastICA 的谐波与

[2] 迟福建. 地区电网继保定值在线校验分析系统的深入研究与实现 [D]. 保定: 华北电力大学, 2004.

[3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规程汇编 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[4] 马丽萍, 焦彦军. 电力系统继电保护在线校验系统的研究 [J]. 陕西电力, 2011, 39(1): 41 - 44.

[5] 吕颖, 吴文传, 张伯明, 等. 电网保护定值在线整定系统的开发与实现 [J]. 电网技术, 2008, 32(8): 15 - 20.

[6] 曹国臣, 蔡国伟, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 51 - 56.

[7] 朱文东, 刘广一, 于尔铿, 等. 电力网络局部拓扑的快速算法 [J]. 电网技术, 1996, 20(3): 30 - 33.

[8] 陈建民, 倪腊琴, 韩学军, 等. 继电保护整定在线评估及预警系统研究 [J]. 华东电力, 2012, 40(4): 608 - 612.

[9] 郑太一. 故障信息系统构建及继电保护专家系统的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2006.

[10] 马丽萍. 基于广域测量系统的后备保护在线校验 [D]. 保定: 华北电力大学, 2010.

[11] 罗栋梁. 新型配电网继电保护的研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.

[12] 高虹霞. 电网继电保护整定计算软件的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2009.

[13] 任龙. 继电保护定值在线校验系统的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.

#### 作者简介:

王 佼(1987), 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。 (收稿日期: 2014 - 06 - 30)

间谐波检测 [J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2959 - 2964.

#### 作者简介:

王志川(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事变电运维检修工作;

刘丹莉(1974), 大学本科, 高级工程师, 主要从事变电动维检修工作;

彭祥华(1985), 硕士研究生, 研究方向为智能检测与计算机网络技术;

周 群(1966), 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电工理论与新技术、智能检测、电能质量。

(收稿日期: 2014 - 07 - 08)