

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.007

# 基于隔离小生境粒子群算法的 APF 优化配置\*

张国荣 陈夏冉 颜丽花

(合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心 合肥 230009)

**摘要:**随着非线性负载的广泛应用,传统负荷端分散的谐波治理方式弊端渐显。以中小型电网中有源电力滤波器的集中补偿配置为目标,设计一种基于隔离小生境粒子群算法的 APF 优化配置方法。建立了有源电力滤波器的优化配置数学模型,以节点电压畸变率均方根为目标函数,并使用罚函数处理约束条件。改进后的粒子群算法兼顾全局与局部寻优能力,避免陷入局部最优。在阐述所提优化配置方法流程的基础上,IEEE 算例分析表明该配置方法可以同时进行 APF 位置和容量的寻优,治理后系统各节点总谐波电压畸变率小于 4%,谐波附加损耗降低 90% 以上,实现对单、多谐波源系统电能质量的有效治理。

**关键词:** 隔离小生境;粒子群算法;集中治理;有源电力滤波器;谐波附加损耗

**中图分类号:** TN713;TM727      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 470.4051

## APF optimization allocation based on isolated niche particle swarm algorithm

Zhang Guorong Chen Xiaran Yan Lihua

(Engineering Research Center of Photovoltaic System of Education Ministry,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** With the wide application of nonlinear loads, the disadvantages of the method of decentralized harmonic suppression at the terminal are gradually revealed. To achieve the configuration of active power filter in the middle-and-small sized grid, the isolated niche particle swarm optimization is adopted in this paper. Firstly, the configuration model of APF is built, the objective of which is to minimize the rms of node THD. Besides, the constraint conditions are executed by the penalty function. The modified algorithm has a better performance for global and local optimization and avoids the problem falling into local optima. The steps of allocation are elaborated, and the effectiveness of the proposed method is proved by the examples, the method can optimize the location and capacity of APF synchronously and achieve the power quality improvement for single or multi harmonics sources system. As a result, the THD of node voltage is less than 4% and the harmonic additional losses reduced by more than 90% after the improvement.

**Keywords:** isolated niche; particle swarm optimization (PSO); centralized improvement; active power filter (APF); harmonic addition losses

## 1 引言

近几十年来电力电子技术的蓬勃发展极大促进了人类社会的进步,同时非线性设备的大量应用也给公共电网带来了严重的谐波污染等电能质量问题<sup>[1-2]</sup>。有源电力滤波器(active power filter, APF)因其优良的滤波特性和日趋成熟的技术已成为主流的谐波治理手段,目前利

用有源电力滤波器进行谐波污染治理主要还是采用就地补偿方式,即在谐波的发出端加装 APF 装置,但分散的就地治理方式存在以下问题<sup>[3]</sup>:1) APF 的投入状况不同,易发生功率倒灌现象,可能导致 APF 的过载烧毁;2) 数量众多的小容量 APF,效率低,占地面积大;3) 若针对每个谐波源进行单独治理,装置的费用高,维护难度大,小用户难以承受。鉴于以上就地治理方式的弊端,加之大功率变流技术的日趋成熟<sup>[4-5]</sup>,多谐波源系统中有源电

力滤波器的集中补偿配置研究具有重要意义。

为获得理想的滤波效果,需对 APF 的安装位置及补偿容量进行科学配置。文献[6-8]介绍了解耦、非迭代等谐波分析算法并借助 ETAP、PSCAD 等仿真软件进行电网谐波分析,为有源电力滤波器优化配置建模提供基础;文献[9]在建立微电网离散和连续解析模型的基础上,推导出线路总谐波网损和电压畸变率最小的节点即为 APF 的最优安装位置;文献[10]通过对母线电流转移矩阵进行分析,获得电网母线电压相应灵敏度特性,从而确定混合型 APF 的最优安装位置;文献[11-13]将粒子群算法用于滤波器的优化配置,可以有效抑制电网中的谐波。由于 APF 的配置问题具有非线性、高维度、有约束的特点,寻优过程易发生收敛慢、陷入局部最优的情况,因此需对粒子群算法进行改进,采用混合粒子群算法<sup>[14-15]</sup>可以获得更好的优化结果。此外,遗传算法<sup>[16]</sup>、免疫算法<sup>[17]</sup>等也有应用于滤波器的优化配置研究。

本文采用隔离机制的小生境思想对粒子群算法进行改进,并将其应用于中小型电网中集中补偿模式下有源电力滤波器安装位置和容量的优化配置。利用牛顿拉夫逊解耦算法分析谐波潮流,在此基础上以各节点谐波畸变率均方根最小值为优化目标,利用改进粒子群算法进行优化配置,按照节点位置划分小生境,并引入淘汰机制减小冗余迭代。算例结果表明所提 APF 优化配置方法可以有效改善电网中电压的畸变,提高电能质量。

## 2 APF 优化配置数学模型

### 2.1 牛顿拉夫逊谐波解耦分析

电网中的谐波畸变情况通过各节点的谐波电压畸变率来衡量,为此,需要得到各节点各次谐波电压的幅值与相角。按照基波与谐波的相互作用关系,目前谐波潮流计算方法主要分为3种<sup>[18-19]</sup>,线性法、非线性法和解耦法。其中解耦法综合了前两者的优势,应用最为广泛。相对于基波分量,谐波分量比重很小,因此在运用牛顿拉夫逊算法进行基波潮流分析时忽略这个微小的影响。在得到基波节点电压后再进行谐波潮流分析,实现了基波与谐波的解耦。算法流程如下图1所示。

关键矩阵方程如下:

$$\mathbf{U}^h = [\mathbf{Y}^h]^{-1} \cdot \mathbf{I}^h \quad (1)$$

其中,节点谐波导纳矩阵  $\mathbf{Y}^h = \begin{pmatrix} Y_{1-1}^h & Y_{1-2}^h & \cdots & Y_{1-n}^h \\ Y_{2-1}^h & Y_{2-2}^h & \cdots & Y_{2-n}^h \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n-1}^h & Y_{n-2}^h & \cdots & Y_{n-n}^h \end{pmatrix}$  可由电网中输电线路、变压器、线性负荷等各电力元件的谐波阻抗参数确定<sup>[18]</sup>,式中下

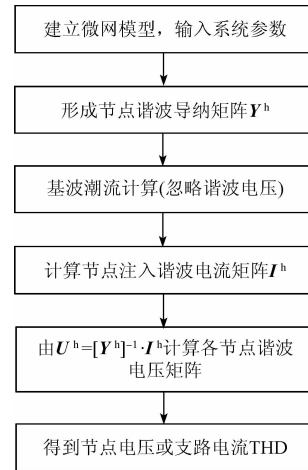


图1 牛顿拉夫逊谐波解耦分析算法流程

Fig. 1 Flow chart of harmonics decoupling analysis based on Newton-Raphson method

标为节点号,上标为谐波阶次;注入谐波电流矩阵  $\mathbf{I}^h = [I_1^h \ I_2^h \ \cdots \ I_n^h]$  由谐波电流实测值或谐波源模型求得<sup>[20-21]</sup>。由节点谐波电压矩阵  $\mathbf{U}^h = [U_1^h \ U_2^h \ \cdots \ U_n^h]$  结合基波电压即可求得各节点电压谐波畸变率;再由  $\mathbf{U}^h$  及各支路谐波阻抗参数即可求得各支路谐波电流及其畸变率。

### 2.2 有源电力滤波器配置模型

有源电力滤波器向系统中注入特定幅值及相位的补偿电流,抵消电网中的谐波分量,以达到改善电能质量的目的。在多谐波源系统的集中补偿模式下将 APF 挂载在母线上,相当于向节点注入了“反谐波”电流  $\mathbf{I}_{APF}^h = [I_{APF1}^h \ I_{APF2}^h \ \cdots \ I_{APFn}^h]$ ,若  $m$  节点没有配置 APF,则对应  $I_{APFm}^h$  值为0。与式(1)类似,加入有源电力滤波器后的系统节点谐波电压矩阵为:

$$\mathbf{U}^h = [\mathbf{Y}^h]^{-1} \cdot (\mathbf{I}^h + \mathbf{I}_{APF}^h) \quad (2)$$

### 2.3 目标函数及约束条件

为了达到最佳的滤波效果,以各节点总电压谐波畸变率均方根为目标函数,优化结果以该值最小为宜。以各节点总电压谐波畸变率和各节点各次谐波电压含量以及 APF 最大配置容量为约束条件。因此,该配置优化问题可用以下数学模型描述:

$$\min f = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (UTHD_n)^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \frac{\sum_{h=2}^H (U_n^h)^2}{(U_n^1)^2}}{N}} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} UTHD_n < UTHD_{\max} \\ UTHD_n^h < UTHD_{\max}^h \\ I_{\text{com}} < I_{APF\max} \end{cases}$$

其中,  $n$  为节点号,  $N$  为节点总数。  $h$  为谐波阶次,  $H$  为最高补偿谐波次数。  $UTHD_n$ 、 $UTHD_{max}$  为各节点总谐波电压畸变率及最大值,  $UTHD_n^h$ 、 $UTHD_{max}^h$  为各节点各次谐波含量及上限值,  $I_{com}$ 、 $I_{APFmax}$  分别为有源电力滤波器补偿电流值及容量上限。各节点基波及谐波电压  $U_n^1$ 、 $U_n^h$  以及各支路谐波电流  $I_n^h$  可由 2.1 节所述方法求得。

### 3 基于隔离小生境粒子群的 APF 配置方法

#### 3.1 隔离小生境粒子群优化算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法于 1995 年由 Kennedy 和 Eberhart 首次提出。基本粒子群算法模拟鸟群觅食行为, 问题的解被抽象为空间中飞行的粒子, 粒子的位置优劣通过目标函数的适应值评价, 其飞行速度和位置依据个体和群体的飞行经验实时调整, 通过群体中粒子之间的相互协作与信息共享寻找最佳位置即待优化问题的最优解。粒子的迭代更新遵循以下规律<sup>[22]</sup>:

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= \omega v_i^k + c_1 \text{rand}(pb_i^k - x_i^k) + c_2 \text{rand}(gb^k - x_i^k), \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $v_i^k$ 、 $x_i^k$  为粒子  $i$  在第  $k$  次迭代的速度和位置,  $pb_i^k$  为粒子  $i$  第  $k$  次迭代的个体最优值,  $gb^k$  为第  $k$  次迭代的全局最优值。  $\omega$  为惯性权重,  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子, 这 3 个参数决定了算法的性能。  $\text{rand}$  为  $[0, 1]$  的随机数。

为获得更佳的优化性能, 一般采用式 (5) 对惯性权重  $\omega$  进行调整:

$$\omega = \omega_1 - \frac{t \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{M} \quad (5)$$

式中:  $\omega_1$  和  $\omega_2$  为动态调整的上、下界,  $t$  为当前迭代次数,  $M$  为最大迭代次数。易知惯性权重  $\omega$  随进化线性减小, 这样可保证在算法初期粒子具有较强的全局搜索能力, 迅速缩小搜索范围, 而在后期具有较好的局部开发能力, 加快收敛。

式 (4) 右边 3 项分别对应粒子的飞行惯性、对自身飞行经验的思考与与群体的社交能力<sup>[23]</sup>, 具有典型的群智能算法特点。虽然标准粒子群算法具有算法概念易于理解、参数少、应用简单的特点, 但依然存在如下弊端<sup>[24]</sup>: 1) 算法早期搜索速度较快, 易出现不收敛现象, 或者即使收敛, 由于群体具有协作和共享的特点, 导致粒子趋向同一化, 算法搜索精度不高; 2) 在优化高维问题时, 算法易陷入局部最优值, 出现所谓的“早熟”现象, 即算法还未找到全局极值点便停滞不前, 无法得到理想的优化结果。因此, 有必要对标准粒子群算法进行改进。

小生境, 即特定的生存环境, 亦源于生物行为, 物种总是倾向与自己相同或相似的生物一起生活、繁衍后代,

即所谓的“人以类聚, 物以群分”。自 20 世纪 70 年代小生境概念提出以来就受到国内外学者的广泛关注, 小生境技术主要有以下 4 种<sup>[24-25]</sup>。

1) 基于预选择机制的小生境技术中, 只有子代个体适应度优于父代时, 新产生的子代个体才能取代父代进入下一代群体中, 否则父代个体将继续保留在种群中。

2) 基于排挤机制的小生境技术思想: 种群个体与其他个体在有限的生存空间中竞争生存资源, 以维持自身的发展与繁衍。种群中设置一定数量的排挤成员, 每次迭代更新依据相似性原则, 用新产生的个体替换排挤成员中最相似的个体。

3) 基于共享机制小生境通过反映个体之间的相似程度的共享函数来调节群体中个体的适应度, 此后的进化过程依据此原则进行, 以创造小生境的进化环境, 达到维护种群多样性的目的。

4) 在隔离小生境粒子群算法 (isolated niche particle swarm optimization, INPSO) 中, 初始种群被均分为几个小的子种群, 各个子种群独立进化。物种在进化的过程中会因地理上的隔离造成基因交流阻断, 导致物种的分化, 在日后漫长的进化过程中生存能力较弱的子种群会逐渐灭绝<sup>[24]</sup>。

鉴于隔离机制小生境技术对于求解高维优化问题具有良好的效果, 本文采用上述隔离小生境思想对标准粒子群算法进行改进, 将粒子群中每代个体划分为若干子种群, 按照一定规律迭代更新, 每经过若干次迭代比较各子种群中最优粒子的适应值, 淘汰适应度最差的粒子所在的子种群全体粒子, 直到达到预设最大迭代次数终止优化。本研究中粒子的更新受自身飞行惯性、个体最优解、子种群最优解和全局最优解综合作用, 其更新方程为:

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= \omega v_i^k + c_1 \text{rand}(pb_i^k - x_i^k) + c_2 \text{rand}(sb_i^k - x_i^k) + \\ &c_3 \text{rand}(gb^k - x_i^k), \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $sb_i^k$  为子种群  $i$  在第  $k$  次迭代的最优值,  $c_3$  也为学习因子。

由式 (6) 可知, 改进后的算法中既包含子种群内粒子的协作, 又引入不同子种群间的竞争, 即充分保证算法局部寻优能力, 又兼顾全局搜索性能, 粒子在进化过程中最大限度保持种群多样性, 避免算法陷入局部最优。

#### 3.2 有源电力滤波器配置过程

假设系统有  $N$  个节点, 需要补偿  $H$  次谐波, 有源电力滤波器配置流程如图 2 所示。为实现 APF 安装位置和容量的同步优化, 将粒子设置为  $H+1$  维向量, 即  $\mathbf{x} = [p_i \ i_1 \ i_2 \ \dots \ i_H]$ 。第 1 维表示有源电力滤波器的安装位置, 将所有粒子按照节点号划分为  $N$  个子种群 (小生境), 每个子种群粒子数相等。第 2 ~  $H+1$  维表示各次

谐波电流补偿量,考虑到电流包含幅值和相位信息,因此都设置为复数。 $x_{ij}$ 、 $v_{ij}$ 分别表示子种群  $i$  中粒子  $j$  的位置和速度。

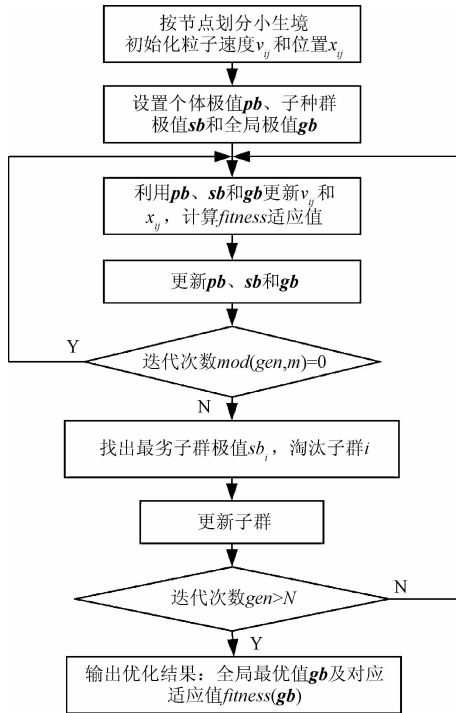


图2 有源电力滤波器配置流程

Fig. 2 Flow chart of configuration process of APF

适应度函数  $fitness$  由 1.2 节所述目标函数和节点电压畸变率、节点各次谐波电压含量及 APF 容量 3 个约束条件组成,引入罚函数构造如下适应度函数:

$$F = fitness(x) = f + C_1 \sum_{n=1}^N \max(0, UTHD_n - UTHD_{max}) + C_2 \sum_{n=1}^N \sum_{h=2}^H \max(0, UTHD_n^h - UTHD_{max}^h) + C_3 \sum_{n=1}^N \max(0, I_{com} - I_{APFmax}) \quad (7)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为惩罚系数,为一相当大的数,这样使得构造出的适应度函数在可行点处函数  $F$  值等于原目标函数  $f$  值,在不可行点  $F$  陡增为一个很大的数。

子种群最优粒子适应值在一定程度上反映该子群进化的总体状况,因此在粒子迭代优化过程中每隔  $m$  代找出各子种群最优粒子适应值  $fitness(s_{b_i})$  的最大值,及时淘汰该子群体,即不再对该节点进行寻优配置,减小冗余迭代,提高算法效率。

## 4 算例分析

利用上述基于 INPSO 算法对 IEEE 3 机 9 节点电网

系统进行有源电力滤波器位置和容量优化配置,其系统模型如图 3 所示,算法中基准容量为 100 MVA,基波潮流计算的迭代精度为  $\times 10^{-4}$ ,节点 1 设置为平衡节点,谐波源采用文献[11]所述模型,且只考虑 5、7、11、19 次谐波。电流电压谐波畸变约束遵循《GB14549-9 电能质量 公共电网谐波》标准。算法中取每个小生境粒子数目为 40,学习因子  $c_1 = c_2 = c_3 = 2$ ,惯性权重的上下限分别为 0.9 和 0.4。

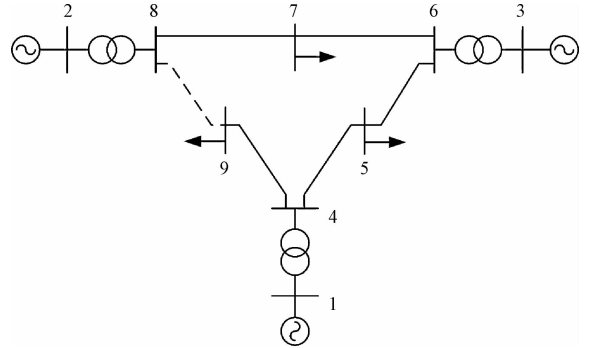


图3 IEEE 9 节点系统

Fig. 3 Schematic diagram of IEEE 9 nodes system

### 4.1 单谐波源系统 APF 优化配置

仅将 9 节点所带负载设置为非线性负载,其余负载均为线性。最大迭代次数为 200,设置 100 代后每进化 25 代进行一次淘汰选择。

图 4 所示为采用该算法基波潮流分析的各节点基波电压幅值与相位信息,其结果与电力系统潮流计算软件 MatPower 运行结果精确一致。该算法的优化配置结果为  $\mathbf{xm} = [9, -0.2578 + 0.1580i, -0.1841 + 0.1129i, -0.1172 + 0.0715i, -0.0992 + 0.0608i]$ ,即将 APF 挂载在 9 节点, $\mathbf{xm}$  的第 2~5 个元素分别为第 5、7、11、13 次谐波补偿电流值。

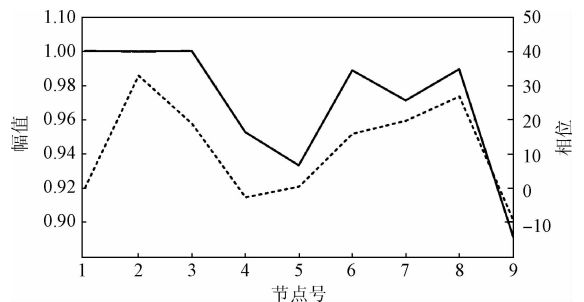


图4 基波电压幅值相位信息

Fig. 4 Information of fundamental voltages amplitude and phase

由表 1 可知,未配置 APF 时,由于谐波源的加入,电网各节点电压均存在不同程度的畸变。谐波源直接挂载在 9 节点上,因此该节点电压谐波畸变情况最严重,除发

电机节点外,其他节点基本遵循“离谐波源越远,畸变影响越小”的规律。寻优结果建议将 APF 配置在谐波源节点,符合 APF 配置规律。在 9 节点由于有源电力滤波器补偿了谐波源产生的谐波分量,各节点电压畸变基本得到消除,电网电能质量显著提高。

**表 1 单谐波源系统 APF 配置前后节点电压 THD**  
**Table 1 THD of node voltages before and after configuration in single-harmonic system**

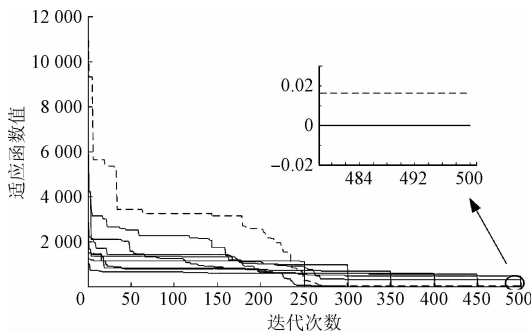
| 节点号 | 配置前 THD/% | 配置后 THD/%             |
|-----|-----------|-----------------------|
| 1   | 0.34      | $6.03 \times 10^{-5}$ |
| 2   | 0.32      | $5.32 \times 10^{-5}$ |
| 3   | 2.20      | $3.98 \times 10^{-4}$ |
| 4   | 29.29     | $1.14 \times 10^{-2}$ |
| 5   | 12.33     | $7.90 \times 10^{-3}$ |
| 6   | 16.84     | $1.31 \times 10^{-2}$ |
| 7   | 8.24      | $3.32 \times 10^{-3}$ |
| 8   | 8.07      | $5.82 \times 10^{-3}$ |
| 9   | 49.99     | $1.60 \times 10^{-4}$ |
| RMS | 20.90     | $4.76 \times 10^{-3}$ |

以上单谐波源 APF 配置只是初步证明该算法的有效性。根据以往工程经验,单谐波源系统遵循“谁污染谁治理”的配置原则,即将 APF 配置在谐波源节点。但若系统中存在多个谐波源,在此“一补多”的情况下就难以确定 APF 的安装位置及容量。实际中,非线性负载的广泛使用造成系统中多谐波源的情况普遍存在,因此研究多谐波源系统的 APF 优化配置具有更重要的意义。

**4.2 多谐波源系统 APF 优化配置**

分别将 5、7、9 节点所带负载容量的 40%、50%、30% 设置为非线性负载,最大迭代次数为 500,设置 200 代后每进化 50 代进行一次淘汰选择。

其优化配置结果为  $xm = [9, -0.0885 + 0.0675i, 0.0246 - 0.0475i, -0.0956 + 0.0295i, -0.0291 + 0.0180i]$ 。图 5 所示为多谐波源 APF 优化配置过程收敛曲线,其中实线为节点 1~8 节点寻优收敛曲线,虚线为



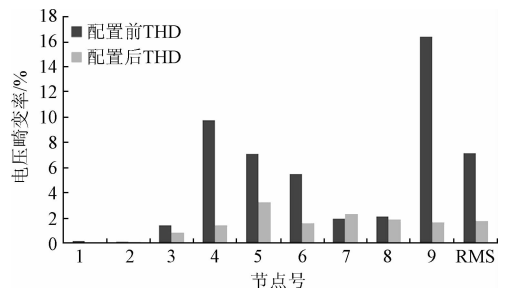
**图 5 基于 INPSO 算法的 APF 优化配置收敛曲线**  
**Fig. 5 Convergence curve of optimal configuration based on INPSO**

节点 9 收敛曲线。进化初期由于罚函数的作用,适应函数呈现较大数值;后期满足约束条件后罚函数不再起作用,其数值等于各节点电压谐波畸变率均方根。由图可知在优化过程的第 250、300、350、400、450 代灭绝了当前表现最差的子种群,之后不再对该子种群进行迭代寻优,减小冗余运算量。在 500 代后保留下来的子种群中,子种群 9 具有最佳的适应函数值,即将 APF 配置在节点 9,系统可得到最佳的整体补偿效果。

由表 2 和图 6 所示可知,利用本文所提优化算法对多谐波源系统进行 APF 优化配置后,节点电压总谐波畸变率均方根由 7.13% 减小为 1.77%,其中 4、5、6、9 节点电压畸变状况大幅改善,各节点电压 THD 均降低至 4% 以下,符合国家公用电网谐波标准。此外,2、7、8 节点电压 THD 出现轻微增大的现象,这是由于在本文研究的集中补偿模式下,APF 发出的补偿电流会在整个系统网络中流动,可能造成某些节点的过补偿,这是以牺牲个别节点的电能质量来换取系统补偿效果的整体均衡。

**表 2 多谐波源系统 APF 配置前后节点电压 THD**  
**Table 2 THD of node voltages before and after configuration in multi-harmonics system**

| 节点号 | 配置前 THD/% | 配置后 THD/% |
|-----|-----------|-----------|
| 1   | 0.17      | 0.02      |
| 2   | 0.12      | 0.16      |
| 3   | 1.47      | 0.87      |
| 4   | 9.81      | 1.45      |
| 5   | 7.12      | 3.26      |
| 6   | 5.52      | 1.64      |
| 7   | 1.98      | 2.38      |
| 8   | 2.16      | 1.88      |
| 9   | 16.40     | 1.69      |
| RMS | 7.13      | 1.77      |



**图 6 多谐波源系统 APF 配置前后节点电压 THD**  
**Fig. 6 THD of node voltages before and after configuration in multi-harmonics system**

投入 APF 治理前后各节点各次谐波含有量如表 3 所示,表中数据显示治理后各次谐波含有量均维持在较低的水平,其中 4、5、6、9 节点各次谐波电压含有量在有源电力滤波器配置后大幅下降。系统中各节点各次谐波畸变率都小于 3%,符合标准。

表3 APF 配置后各节点各次谐波电压 THD  
Table 3 Voltage distortion for each harmonic order

| 节点号 | 各次谐波电压畸变率/% |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | 5           |      | 7    |      | 11   |      | 13   |      |
|     | 前           | 后    | 前    | 后    | 前    | 后    | 前    | 后    |
| 1   | 0.16        | 0.02 | 0.04 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 2   | 0.12        | 0.15 | 0.04 | 0.06 | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 3   | 1.42        | 0.87 | 0.39 | 0.04 | 0.05 | 0    | 0    | 0    |
| 4   | 5.84        | 0.70 | 7.3  | 1.26 | 2.56 | 0.14 | 1.43 | 0.06 |
| 5   | 6.55        | 2.80 | 1.80 | 1.66 | 2.09 | 0.12 | 0.38 | 0.01 |
| 6   | 2.53        | 1.56 | 2.92 | 0.32 | 2.77 | 0.13 | 2.80 | 0.39 |
| 7   | 1.25        | 1.61 | 1.19 | 1.74 | 0.93 | 0.19 | 0.20 | 0.11 |
| 8   | 0.63        | 0.81 | 1.13 | 1.65 | 1.69 | 0.34 | 0.39 | 0.21 |
| 9   | 12.79       | 1.26 | 8.79 | 1.09 | 2.58 | 0.05 | 4.65 | 0.29 |

为对比说明,本文亦采用标准粒子群算法对上述算例进行优化。由于优化对象涉及离散的位置和连续的容量信息,因此采用离散粒子群优化算法<sup>[26]</sup>(discrete particle swarm optimization, DPSO) + PSO 的组合算法进行优化配置。由图7所示可知,在相同算例模型相同迭代次数的情况下,该算法寻优效果远不如本文所提算法,甚至没有找到满足约束条件的结果,这是由于优化过程中粒子易陷入局部最优点并难以逃脱,无法得到理想的寻优结果。本文所提配置方法可以克服此缺点,实现位置和容量的同时寻优。

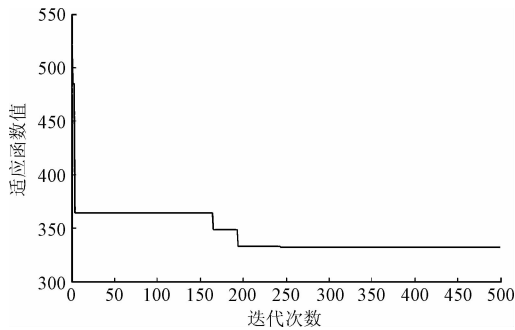


图7 基于 DPSO + PSO 组合算法的 APF 优化配置收敛曲线  
Fig. 7 Convergence curve of optimal configuration based on DPSO + PSO

### 4.3 谐波损耗分析

现实中配电网中的电流电压存在不同程度的畸变,可以看作是基波分量与各次谐波分量的叠加。处于电力网络中的诸如电缆、变压器、发电机等元器件在此作用下产生的电能损耗可以分为基波损耗与谐波附加损耗两部分。其中,基波损耗反映了设备固有的性能优劣,而谐波附加损耗则由系统内电流电压的畸变情况决定。由文献[27]对于各类电力设备,谐波造成的附加损耗具有相同的形式:

$$\Delta P = P_1 \sum_{n=2}^{\infty} n^{c_1} HRI_n^{c_2} \quad (8)$$

式中: $\Delta P$  为谐波附加损耗, $P_1$  为基波损耗, $n$  为谐波次数, $HRI_n$  为支路各次谐波电流含有量, $c_1, c_2$  为不同设备的特征指数。

结合3.2节中算例,考虑线路、变压器、电机等设备谐波损耗影响,谐波治理前后电网中各支路谐波附加损耗如图8所示,其中虚线、点划线、实线3种折线围成的面积分别反映支路基波总损耗、APF 配置前后谐波损耗。由图可知,治理前谐波附加损耗占有较大比重,在某些节点甚至与基波损耗量相差无几;投入 APF 进行治理后,谐波附加损耗量大大减小,由数值计算可知,治理后谐波附加损耗量相较治理前降低 92.94%,降损节能效果显著。

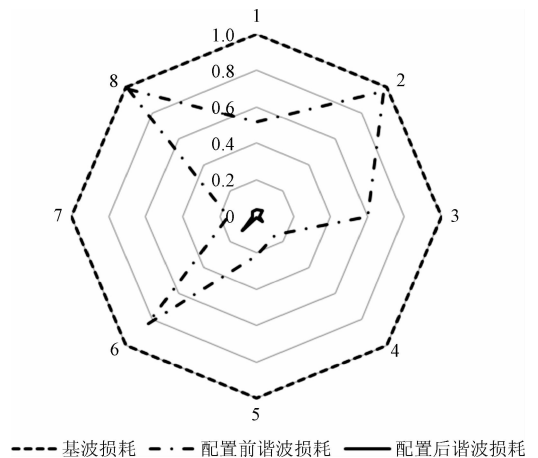


图8 治理前后谐波附加损耗分析  
Fig. 8 Harmonic analysis of additional losses before and after configuration

## 5 结论

目前针对有源电力滤波器的研究主要集中在拓扑结

构、控制策略等方面,有关 APF 优化配置的研究还很不成熟。本文以中小型电网中有源电力滤波器的集中电能质量治理为研究背景,结合有源电力滤波器选址定容优化问题的特点,首次将隔离小生境技术改进的粒子群算法应用于 APF 的优化配置,按照节点号划分小生境,巧妙解决选址的离散问题。建立了优化目标函数并选取约束条件,通过算例证明了所提算法对于 APF 位置和容量优化配置的有效性,由以上研究可以得到如下结论。

1) 牛顿拉夫逊谐波解耦算法权衡了算法的复杂度与计算精度,基于此建立的有源电力滤波器优化配置模型具有一定的工程意义。

2) 采用隔离小生境思想对标准粒子群算法进行改进后,保证了粒子进化过程中的多样性,避免粒子陷入局部最优,兼顾算法的全局开发与局部搜索能力。

3) 本文所提算法可以实现对有源电力滤波器位置和容量配置的同时寻优,寻优效果优于离散粒子群算法,能够大幅降低系统谐波损耗,并且对于多谐波源系统的 APF 配置更具优势和意义。

## 参考文献

- [ 1 ] 刘小林, 扈罗全. 基于最小二乘法的电力系统谐波与间谐波检测方法 [J]. 中国测试, 2016, 42(9): 31-35.
- LIU X L, HU L Q. Method for power system harmonic and interharmonic detection based on least square method [J]. China Measurement Technology, 2016, 42(9): 31-35.
- [ 2 ] 魏学良, 程婷. 谐波治理设备在供电系统中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 73-76.
- WEI X L, CHENG T. Application of harmonic-eliminating device in power supply system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(3): 73-76.
- [ 3 ] 杨骁. 多谐波源配电网中滤波器的优化配置 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- YANG X. Optimal configuration of power filter in distribution network with multi-harmonic source [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [ 4 ] JIAO Y, LU S, LEE F C. Switching performance optimization of a high power high frequency three-level active neutral point clamped phase leg [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3255-3266.
- [ 5 ] IMAN-EINI H, SCHANEN J L, FARHANGI S, et al. A modular strategy for control and voltage balancing of cascaded H-bridge rectifiers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2428-2442.
- [ 6 ] 孙媛媛, 王小宇, 尹志明. 多谐波源系统的非迭代式谐波潮流分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 83-90.
- SUN Y Y, WANG X Y, YIN ZH M. Non-iterative harmonic power flow analysis for power systems with multiple harmonic sources [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 83-90.
- [ 7 ] 林涛, 王思源, 郑杰. 基于 ETAP 的电力系统电能质量问题研究与分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(1): 27-34.
- LIN T, WANG S Y, ZHENG J. Power quality analysis based on ETAP software [J]. Journal of Electric Power Science & Technology, 2010, 25(1): 27-34.
- [ 8 ] ULINUHA A, MASOUM M A S, ISLAM S M. Harmonic power flow calculations for a large power system with multiple nonlinear loads using decoupled approach [C]. Power Engineering Conference, IEEE, 2007: 1-6.
- [ 9 ] 侯桂兵, 涂春鸣, 罗安, 等. 微电网中 APF 接入位置与容量优化配置方案 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 29-33.
- HOU G B, TU CH M, LUO AN, et al. Optimal configuration of APF in microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 29-34.
- [ 10 ] 帅智康, 罗安, 涂春鸣, 等. 并联混合型有源电力滤波器的最优安装点 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 48-55.
- SHUAI ZH K, LUO AN, TU CH M, et al. Optimal placement of hybrid active power filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 48-55.
- [ 11 ] 姚建红, 刘继承. 微粒子群算法在有源电力滤波器优化配置中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2009, 36(1): 35-38.
- YAO J H, LIU J CH. Application of particle swarm algorithm in optimal configuration of active power filter [J]. Control & Instruments in Chemical Industry, 2009, 36(1): 35-38.
- [ 12 ] ZIARI I, JALILIAN A. Optimal placement and sizing of multiple APLCs using a modified discrete PSO [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 630-639.
- [ 13 ] HE N, XU D, HUANG L. The application of particle swarm optimization to passive and hybrid active power filter design [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 2841-2851.
- [ 14 ] 付光杰, 林冬雪. 基于混合粒子群算法的配电网滤波器优化配置研究 [J]. 电气自动化, 2015(1): 75-77.
- FU G J, LIN D X. A Research on optimal filter configuration for the distribution network based on hybrid particle swarm algorithm [J]. Electrical Automation, 2015(1): 75-77.
- [ 15 ] 罗时武, 敬勇, 夏向阳, 等. 一种电网滤波器优化配置新算法 [J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2):

- 107-112.  
LUO SH W, JING Y, XIA X Y, et al. A novel optimal power filter configuration algorithm [J]. Journal of Electric Power Science & Technology, 2011, 26(2): 107-112.
- [16] 宋微浪, 蔡金锭, 孙轶群, 等. 改进型遗传算法在滤波器优化设计中的应用[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6):83-86.  
SONG W L, CAI J D, SUN Y Q, et al. Application of improved genetic algorithm in optimal filter allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6):83-86.
- [17] 李习武, 赵宏伟, 李娜, 等. 基于人工免疫算法的配电网滤波器优化配置方法[J]. 电网技术, 2010, 34(5):104-108.  
LI X W, ZHAO H W, LI N, et al. Optimal filter configuration for distribution network based on artificial immune algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(5):104-108.
- [18] 林海雪, 范明天, 薛惠. 电力系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.  
LIN H X, FANG M T, XUE H. Power System Harmonics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [19] 巩翔宇. 含分布式电源的配电网谐波潮流计算分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.  
GONG X Y. Analysis of distributed power distribution network harmonic power flow calculation [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.
- [20] 钟斌斌, 李妍, 张永芳, 等. 基于 H 参数的换流器谐波全耦合模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 45-50.  
ZHONG B B, LI Y, ZHANG Y F, et al. Fully-coupled harmonic model of converter based on H parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 45-50.
- [21] 郑连清, 吴萍, 李鹏. 电力系统中谐波源的建模方法[J]. 电网技术, 2010(8):41-45.  
ZHENG L Q, WU P, LI K. Modeling approaches of harmonic sources in power system [J]. Power System Technology, 2010(8):41-45.
- [22] 李裕, 郭子彦, 朱会柱, 等. 基于混沌多目标粒子群算法的测点优选方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1052-1061.  
LI Y, GUO Z Y, ZHU H ZH, et al. Test point selection based on chaotic multi-objective DPSO algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2016, 30(7): 1052-1061.
- [23] 钱锋. 粒子群算法及其工业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
QIAN F. Particle Swarm Optimization Algorithm and Application in Industry [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [24] 李荣钧, 刘小龙. 基于微生物行为机制的粒子群优化算法[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015.  
LI R J, LIU X L. Particle swarm optimization algorithm based on microbial behavior mechanism [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2015.
- [25] 刘云龙, 林宝军. 一种基于小生境技术的群智能粒子滤波算法[J]. 控制与决策, 2010(2):316-320.  
LIU Y L, LIN B J. Swarm intelligence particle filtering based on niching technique [J]. Control & Decision, 2010, 25(2):316-320.
- [26] 吴小珊, 张步涵, 袁小明, 等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4):45-52.  
WU X SH, ZHANG B H, YUAN X M, et al. Solutions to unit commitment problems in power systems with wind farms using advanced quantum-inspired binary PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4):45-52.
- [27] 汪彦良, 岳智顺, 王金全, 等. 谐波附加损耗及其降损节能分析[J]. 电气技术, 2009(2):22-26.  
WANG Y L, YUE ZH S, WANG J Q. Analyzing the addition loss of harmonic and how to reducing it for energy-saving [J]. Electrical Engineering, 2009(2): 22-26.

## 作者简介



张国荣, 2008 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为电能质量控制技术、计算机控制技术、光伏系统技术等。

Email: zhanggrcao@163.com

**Zhang Guorong** received Ph. D. from Hefei University of Technology in 2008.

Currently, he is a professor in HFUT. His research interests include power quality control, computer control technology, and photovoltaic systems and so on.



陈夏冉, 2014 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士在读研究生, 研究方向为电力变换技术。

Email: chenxiaran@126.com

**Chen Xiaran** received B. Sc. from Hefei University of Technology in 2014. He is current a M. Sc. candidate in Hefei University

of Technology. His research interest focuses on power conversion technology.