

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211311

基于改进麻雀算法的多 APF 协调控制研究*

张涛^{1,2} 王清川¹ 陶然¹ 黄明娟¹ 刘伧¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 三峡大学智慧能源技术湖北省工程研究中心 宜昌 443002)

摘要: 有源电力滤波器(APF)因其具有快速追踪和消除谐波的功能而广泛应用于配电网中。其中,LCL型 APF 对高频谐波有更好的抑制能力。随着 APF 并网数目的日益增多,各 APF 间的交互影响问题变得不可忽视。针对多 APF 间的交互影响,首先基于诺顿定理推导了多 APF 并网等效模型,其次利用广义动态相对增益矩阵(GDRGA)对交互影响进行定量分析,最后将抑制交互影响转化为多目标优化问题。针对传统麻雀算法在搜索后期存在全局寻优能力差、易陷入局部最优的缺陷,引入 tent 混沌和动态随机柯西变异进行改进,并采用改进麻雀算法对 APF 各控制参数进行协调优化。结果表明,改进麻雀算法能得到分布更加良好的 pareto 解集,求解性能更优,多目标优化后能有效抑制 APF 间的交互影响,验证本文所提方法的有效性。

关键词: LCL 型 APF;交互影响;广义动态相对增益矩阵;动态随机柯西变异;改进麻雀优化算法

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Research on multi APF coordinated control based on improved sparrow search algorithm

Zhang Tao^{1,2} Wang Qingchuan¹ Tao Ran¹ Huang Mingjuan¹ Liu Kang¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Active power filter (APF) is widely used in distribution network because of its fast tracking and harmonic elimination function. Among them, LCL type APF has better ability to suppress high frequency harmonics. With the increasing number of APF connected to the grid, the interaction between the APFs can not be ignored. For the problem of interaction among multiple APFs, firstly, the equivalent model of multi APF grid connection is derived based on Norton theorem. Secondly, the interaction is quantitatively analyzed by using the generalized dynamic relative gain array (GDRGA). Finally, the suppression of interaction is transformed into a multi-objective optimization problem. In view of the defects of traditional sparrow algorithm, such as poor global optimization ability and easy to fall into local optimization, tent chaos and dynamic random Cauchy mutation are introduced to improve, and the improved sparrow algorithm is used to coordinate and optimize the control parameters of APF. The results show that the improved sparrow algorithm can get pareto solution sets with better distribution and better performance. After multi-objective optimization, the interaction between APFs can be effectively suppressed, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Keywords: LCL type APF; interaction; generalized dynamic relative gain matrix; dynamic random Cauchy variation; improved sparrow search algorithm

0 引言

作为柔性交流配电技术(distribution-flexible AC transmission system, DFACTS)的重要组成部分,有源电力滤波器(active power filter, APF)能实时检测谐波并输

出补偿电流,补偿电流与谐波电流相位相反但幅值相同,从而实现对谐波的补偿和消除^[1-4]。随着电力系统的电力电子化日益加快和风电等新能源渗透率的不断提升,APF 也越来越多的安装在配电网中。与此同时,APF 间的交互问题必须加以考虑,其交互影响轻则会使补偿效果变差,严重

收稿日期:2022-09-07

* 基金项目:国家自然科学基金(52007103)项目资助

时则会破坏电力系统的稳定运行^[5-7]。

目前,国内外对于柔性交流输电技术 (flexible AC transmission system, FACTS) 设备间的交互影响进行了深入的研究。文献[8]将 FACTS 设备间的协调控制转换为多目标优化问题,用量子遗传算法进行参数配置,优化配置后有效抑制了多 FACTS 间的交互影响。文献[9]将模型预测控制理论引入到静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 和静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 协调控制研究中,用模型预测控制器取代 PI 控制器,时域仿真表明,模型预测控制器不仅能保证响应速度,还有着较强的鲁棒性,同时还能很好地抑制多控制通道之间的交互影响。但由于 DFACTS 和 FACTS 之间的差异,已有的 FACTS 协调控制方法不能直接应用于 DFACTS 协调控制中。

对于 DFACTS 间交互影响的研究,文献[10]从电网强度、负载等方面研究 DSTATCOM 不同控制回路之间的相互作用程度。在 APF 研究方面,文献[11]分析了锁相环系统对逆变器工作状态的影响情况,提出扰动电压前馈补偿的改进策略以抑制锁相环所带来的不利影响。上述文献是对单台 APF 的控制策略进行研究,未考虑多台 APF 间的交互影响问题。文献[12]研究了 APF 各参数对交互影响的作用,通过对各参数进行合理的选择和组合实现对交互影响的抑制。但并未明确指出各参数选择和组合的方法。文献[13]和[14]应用动态相对增益矩阵 (dynamic relative gain array, DRGA) 对多个并网逆变器之间的交互影响进行了研究,分别从电网强度、频率和系统控制参数展开了分析。上述文献考虑了新的 APF 并网后对原有 APF 输出电流的影响,而设备间的交互影响会对整个系统造成危害,因此,需要对每台 APF 的输出进行控制,以降低电网电流的谐波畸变率,提升整体电能质量,同时需要研究多台 APF 有效的参数配对方案。

针对以上问题,本文以含有两台 APF 的弱电网系统为例,首先基于诺顿定理搭建多 APF 并网模型;其次引入广义动态相对增益矩阵 (generalized dynamic relative gain array, GDRGA) 对交互影响进行定量分析;最后,将抑制交互影响转化为多目标优化问题,针对传统麻雀算法在搜索后期存在种群多样性降低、易陷入局部最优等问题,采用 tent 混沌和动态随机柯西变异的改进麻雀算法对 APF 各控制参数进行协调优化。结果显示改进麻雀算法求解性能更好,时域仿真表明本文所提策略能有效抑制多 APF 间的交互影响。

1 多 APF 并网模型及协调控制描述

1.1 多 APF 等效并网模型

相较于结构简单的 L 型 APF, LCL 型 APF 能更加有效地抑制电流中的高频分量,但 LCL 型 APF 具有三阶特性,在弱电网条件下存在自身谐振问题,因此对其控制将会

更加复杂^[15-16]。由于常规的单并网电流控制方法很难克服 LCL 滤波器本身的固有谐振,为了确保电网的稳定,通常会在并网时外加一个电容电流控制回路^[17-18]。LCL 型 APF 闭环控制结构如图 1 所示。

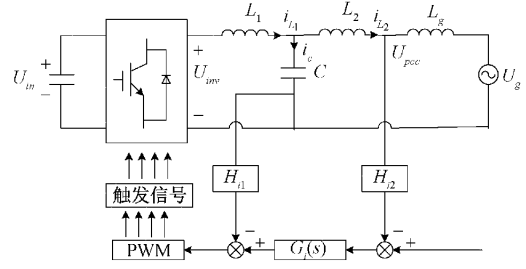


图 1 LCL 型 APF 结构

图 1 中 U_g 为系统电压, L_g 为弱电网等效电感, L_1 、 C 、 L_2 构成 LCL 型滤波器, H_{i1} 为内环电容电流反馈系数, H_{i2} 为外环并网电流反馈系数。 i_{ref} 为参考输入电流, $G_i(s)$ 为 PI 型外环电流控制器传递函数, 逆变器采用单极倍频正弦脉宽调制 (sine pulse width modulation, SPWM) 控制策略, $G_{inv}(s)$ 是从调制波侧到变流阀侧的电压传递函数。

由图 1 可得 LCL 型 APF 的双环控制框图如图 2 所示。

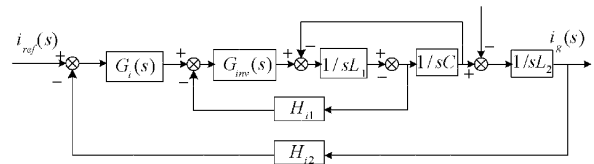


图 2 LCL 型 APF 控制框图

图 1 中, $G_i(s)$ 为 PI 控制器, 其表达式为:

$$G_i(s) = K_p + K_i/s \quad (1)$$

$G_{inv}(s)$ 表达式为:

$$G_{inv}(s) = U_{in}(s)/U_{tri}(s) \quad (2)$$

式中: $U_{in}(s)$ 为逆变电压值, $U_{tri}(s)$ 为三角载波幅值。

根据梅森公式, 可得 APF 简化控制框图如图 3 所示。

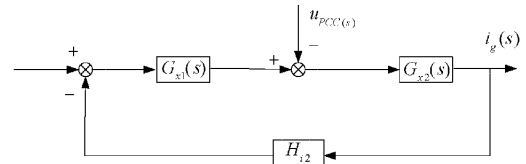


图 3 简化控制框图

其中:

$$G_{s1(s)} = \frac{G_{inv}(s)G_i(s)}{s^2L_1C + sCG_{inv}(s)H_{i1} + 1} \quad (3)$$

$$G_{s2(s)} = \frac{s^2L_1C + sCG_{inv}(s)H_{i1} + 1}{s^3L_1L_2C + s^2L_2CG_{inv}(s)H_{i1} + s(L_1 + L_2)} \quad (4)$$

则系统环路增益 $T(s)$ 为:

$$T(s) = \frac{G_{x1(s)}G_{x2(s)}H_{i2}}{G_{inv}(s)G_i(s)H_{i2} + s^3L_1L_2C + s^2L_2CG_{inv}(s)H_{i1} + s(L_1 + L_2)} \quad (5)$$

由图 3 可得 APF 输出电流 $i_g(s)$ 为:

$$i_{g_i}(s) = \frac{G_{x1(s)}G_{x2(s)}i_{grefi(s)}}{1 + T(s)} - \frac{G_{x2(s)}}{1 + T(s)}U_{PCC(s)} = G_i i_{grefi(s)} - Y_i U_{PCC(s)} \quad (6)$$

根据式(6),可得到 LCL 型 APF 的诺顿等效电路,如图 4 所示。

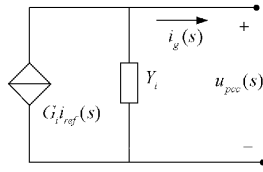


图 4 单台 LCL 型 APF 诺顿等效电路

图 4 中, G_i 为受控源的控制系数; Y_i 为等效导纳。将所有 LCL 型 APF 用图 4 电路代替,进而可得如下多 LCL 型 APF 并网模型如图 5 所示。

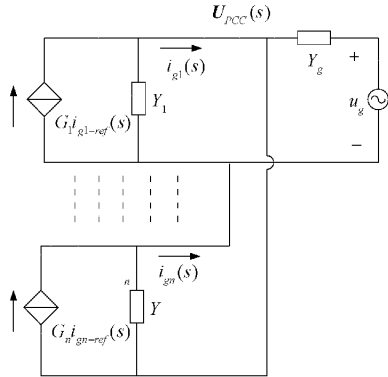


图 5 多 LCL 型 APF 并网模型

由 KCL 可得多 LCL 型 APF 并网系统中并网点电压 $U_{PCC}(s)$ 为:

$$U_{PCC(s)} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i i_{grefi(s)} + u_g Y_g}{\sum_{i=1}^n Y_i + Y_g} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得多 APF 并网系统中任意 APF 输出电流如式(8)所示。

$$i_{g_i}(s) = G_i i_{grefi(s)} - Y_i \frac{\sum_{i=1}^n G_i i_{grefi(s)} + u_g Y_g}{\sum_{i=1}^n Y_i + Y_g} \quad (8)$$

由式(8)可知,任意 APF 的输出电流不仅与本身的基准电流相关,还与其他并联 APF 的基准电流以及电网电压也相关,即各 APF 之间存在相互作用。因此,在多 APF 并网系统中,基于自身控制目标配置的 APF 间存在交互影响,此时需对各 APF 参数重新进行协调优化,以抑制交互影响。

1.2 多 APF 多目标优化设计描述

多目标规划通常被描述为在给定的区域内找到一组折衷的解决方案,使 N 个互相冲突的目标尽可能最佳。数学描述如下:

$$\begin{cases} \min f_n(X), n = 1, 2, \dots, N \\ \text{s. t. } g_i(X) = 0, i = 1, 2, \dots, I \\ y_j(X) \geq 0, j = 1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (9)$$

式中: X 为各待优化控制参数, $f_n(X)$ 为第 n 个目标函数, $g_i(X)$ 为等式约束, $y_j(X)$ 为不等式约束。

对于本文非线性优化设计问题,选取各采样时刻的系统响应构成适应度函数,即各 APF 输出电流与参考电流在仿真时间 t 内差值的积分作为目标函数。以两台 APF 的协调控制为例,其具体描述为:

$$\min \begin{cases} F_1(H_{i11}, H_{i21}, K_{p1}, K_{I1}) = \int_0^t |I_{out1} - I_{ref1}| dt \\ F_2(H_{i12}, H_{i22}, K_{p2}, K_{I2}) = \int_0^t |I_{out2} - I_{ref2}| dt \end{cases} \quad (10)$$

约束条件为:

$$\{H_{i11}, H_{i21}, K_{p1}, K_{I1}, H_{i12}, H_{i22}, K_{p2}, K_{I2}\} \subseteq [0, \max] \quad (11)$$

2 基于频率的广义动态相对增益矩阵

闭环多输入多输出系统中,输入端 u_j 和输出端 y_i 之间的相对增益可以用如下公式表示:

$$\lambda_{ij} = \frac{\partial y_i / \partial u_j | (\text{所有控制开环})}{\partial y_i / \partial u_j | (\text{除 } y_i - u_j \text{ 外,所有控制开环})} \quad (12)$$

式(12)量化说明了除 $y_i - u_j$ 外,其他控制环对 $y_i - u_j$ 环的交互作用。在整个多输入、多输出闭环控制系统中,各环路之间的相对增益组成 R_{RGA} , R_{RGA} 可以量化多输入、多输出闭环控制系统中各控制环路之间的相互作用程度,是用来分析多输入、多输出闭环控制系统中各控制回路间交互影响情况的有效方法。

任意频率下的 R_{RGA} 可由以下矩阵运算得到,称为动态相对增益矩阵。

$$R_{DRGA} [G(j\omega)] = G(j\omega) \odot [G(j\omega)^{-1}]^T \quad (13)$$

式中: $G(j\omega)$ 为传递函数矩阵 $G(s)$ 的频域值,取不同 ω 即可得到系统在任意频率下的 RGA。 \odot 表示矩阵的 Hadmard 积,为两个矩阵对应位置元素相乘。然而,由于系统的传递函数矩阵有时也为奇异阵,此时需求 $G(s)$ 的广义逆矩阵 $G(s)^+$ 。

$$G(s)^+ = G_1(s)^H (G_1(s)G_1(s)^H)^{-1} (G_2(s)^H G_2(s))^{-1} G_2(s)^H \quad (14)$$

式中: $G(s) = G_2(s)G_1(s)$ 为 $G(s)$ 的满秩分解, $G_1(s)^H$ 为矩阵 $G_1(s)$ 的共轭转置。由此可得系统 GDRGA 为:

$$R_{GDRGA} [G(j\omega)] = G(j\omega) \odot [G(j\omega)^+]^T \quad (15)$$

GDRGA 具有如下性质: 1) 任意行和任意列元素之和

为 $1; 2) \lambda_{ij} = 1$, 表明各控制环之间没有耦合, 不存在交互影响; λ_{ij} 越接近 1, 表明其交互影响愈弱; $\lambda_{ij} > 1$, 表明不同控制环间存在交互影响, 并会导致控制性能变差; 若 $\lambda_{ij} < 0$, 说明各个控制环之间有较强的耦合性, 严重时会导致系统无法保持稳定运行。

3 基于改进麻雀算法的多 APF 协调控制

3.1 麻雀优化算法

麻雀优化算法(sparrow search algorithm, SSA)是一种新颖的群体智能算法, 是由生物界中麻雀种群的捕食行为和反捕食行为启发而提出。基本 SSA 可描述为具有预警机制(预警者)的发现者和加入者模型^[19]。在整个麻雀种群中拥有较高能量储备的个体被定义为发现者, 发现者具有广泛的搜索范围, 引导整个麻雀种群觅食的区域和方向。

发现者所占比例常取为 20%, 发现者位置更新公式为:

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} x_{ij}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot \text{iter}_{\max}}\right), & R_2 < S_T \\ x_{ij}^t + Q \cdot L, & R_2 \geq S_T \end{cases} \quad (16)$$

式中: t 为算法当前迭代次数; α 为一个随机数, 介于 $(0, 1]$ 之间; iter_{\max} 为算法最大迭代次数; $R_2 \in [0, 1]$, 为种群的预警值; $S_T \in [0.5, 1]$, 为种群的安全值; Q 是服从正态分布的随机数; L 是所有元素均为 1 的 $1 \times d$ 的矩阵。

除发现者外, 其余个体作为加入者, 其位置更新公式为:

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{x_w^t - x_{ij}^t}{i^2}\right), & i > \frac{n}{2} \\ x_b^{t+1} + |x_{ij}^t - x_w^{t+1}| \cdot A \cdot L, & i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (17)$$

式中: x_w^t 为当前最差位置; x_b^{t+1} 为当前最优位置; A 是元素值随机赋为 1 或 -1 的 $1 \times d$ 的矩阵, $A^+ = A^T(AA^+)^{-1}$ 。

除加入者和发现者外, 在种群中随机选择 10%~20% 的麻雀作为预警者, 预警者位置更新描述如下:

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} x_b^t + \beta(x_{ij}^t - x_b^t), & f_i > f_b \\ x_{ij}^t + K \left(\frac{x_{ij}^t - x_b^t}{|f_i - f_w| + \sigma} \right), & f_i = f_b \end{cases} \quad (18)$$

式中: β 是步长控制参数, 服从均值为 0, 方差为 1 正态分布; K 为一个随机数, 其值介于 $[-1, 1]$ 之间; σ 是一个很小的常数, 用来确保分母不为 0; f_i 为第 i 只麻雀的适应度值; f_b 是当前最优适应度值, f_w 是当前最差适应度值。

3.2 tent 混沌初始化种群

混沌变量因其具有遍历性、规律性和随机性而常被广泛用于多目标优化搜索问题中, 在算法初始化时, 采用混沌变量初始化种群可以有效帮助算法跳出局部最优, 提升算法的全局搜索能力, 此外还能兼顾种群的多样性。相比于 logistic 映射, tent 映射的遍历均匀性更好、收敛速度更快,

因此本文采用 tent 混沌映射产生初始种群。具体步骤为。

步骤 1) 由式(19)产生 tent 混沌序列 z :

$$z_{i+1} = \begin{cases} 2z_i + \text{rand}(0, 1) \cdot \frac{1}{N}, & 0 \leq z \leq \frac{1}{2} \\ 2(1 - z_i) + \text{rand}(0, 1) \cdot \frac{1}{N}, & \frac{1}{2} < z \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

步骤 2) 将混沌变量序列加载到解空间:

$$x = lb + (ub - lb) \cdot z \quad (20)$$

式中: lb 和 ub 分别为各变量最小值和最大值。

3.3 随机柯西变异

柯西变异源自标准柯西分布, 标准柯西分布的概率密度函数如下:

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{1+x^2}, x \in (-\infty, +\infty) \quad (21)$$

相比于高斯分布, 标准柯西分布趋近于 0 的速度更缓慢, 趋势更加平缓, 且在远点处的峰值更小, 因此柯西变异具有更强的扰动能力。在更新过程中引入柯西变异, 能使算法的全局寻优能力得到显著提升, 以避免算法陷入局部最优。变异公式为:

$$x^{t+1} = x^t(1 + \tan(\pi(u - 0.5))) \quad (22)$$

式中: x^t 和 x^{t+1} 分别为柯西变异前后的个体位置, u 为 $(0, 1)$ 内的随机数。

为兼顾算法前期全局搜索能力和后期的收敛能力, 定义了动态变异概率 P_e , 加入 P_e 后, 柯西变异具体过程为:

1) 计算当代变异概率 P_e 。其计算公式如下:

$$P_e = (1 - \frac{t}{\text{iter}})^{10} + \varepsilon \quad (23)$$

式中: ε 为调整参数, 可取 0.06。

2) 随机选择 $N \times P_e$ 个个体按式(22)进行变异。

3) 引入贪婪规则, 比较变异前后个体适应度, 确定是否要执行变异操作。贪婪规则为:

$$X_{\text{best}} = \begin{cases} X^{t+1}, & f(X^{t+1}) < f(X_{\text{best}}) \\ X_{\text{best}}, & f(X^{t+1}) \geq f(X_{\text{best}}) \end{cases} \quad (24)$$

4 仿真分析

短路比(short_circuit ratio, SCR)是衡量电网强度的指标, 短路比小于 3 时, 表明此时的区域电网强度较弱, 称为弱电网, 负交互影响在弱电网系统中更易发生。取电网电压为 220 V, 频率为 50 Hz, 根据电网等效阻抗与短路比之间的关系^[20], 将等效并网电感设为 1 mH。

单台 APF 的 PI 控制参数可由经验法试凑得到, 具体参数如表 1 所示。

由表 1 数据可得两台 APF 的开环传递函数波特图如图 6 所示。由图 6 可知, 两台 APF 均满足幅值裕度和相位裕度的动态稳定性要求。此外, 从图 6 可以看出, 在频率较低时, 各 APF 都能保持稳定运行, 随着频率上升, APF 间

表 1 LCL 型 APF 参数

参数	APF1	APF2
L_1/mH	0.5	2
$C/\mu\text{F}$	1.5	2.5
L_2/mH	2.7	5
K_p	1.6	0.2
K_i	3 740	3 714.8
H_{i1}	0.3	0.1
H_{i2}	1	1

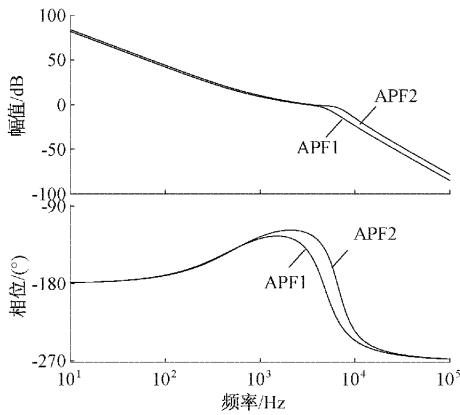


图 6 单 APF 开环传递函数波特图

的交互影响开始显现,当频率升至各 APF 谐振点附近时,交互影响将会使系统很难保持稳定运行。

在 Simulink 中搭建单个 APF 并网仿真模型以及含两台 APF 同时并网的仿真模型,各 APF 的各控制参数如表 1 所示,为简便分析,用谐波源代替谐波负载,两谐波源中谐波含量如表 2 所示。将表 2 数据代入式(8)和(13),可得两台 APF 同时并网时的 GDRGA 如表 3 所示。从表 3 可以看到,随着频率的增加,总体上 GDRGA 对角线元素偏离数值“1”愈远,且偏离程度愈大。根据 GDRGA 性质可得出结论:随着频率的增加,两台 APF 之间的交互影响程度越来越大,这与图 6 分析结果一致。

表 2 谐波源中各次谐波含有量

滤波器	250 Hz	650 Hz	750 Hz	850 Hz
APF1	3 A	5 A	7 A	0
APF2	3 A	0	7 A	4 A

表 3 优化前 GDGRA 主对角线元素

频率/Hz	λ_{11}	λ_{22}
250	1.000 4-j0.037 2	1.001 1+j0.000 8
650	0.944 3-j0.507 3	1.071 4-j0.033 0
750	0.817 4-j0.828 8	1.155 8-j0.139 2
850	0.128 2-j1.309 7	1.148 6-j0.642 7

APF1、APF2 单独并网和两 APF 同时并网时各 APF 输出电流中各次谐波含有量如图 7~10 所示。从图 7~8 可以看到,APF 单独并网时,各 APF 输出电流能准确跟随所连接谐波源负载中的各次谐波。在两台 APF 同时并网后,对比图 7 和 9、图 8 和 10 可发现,两台 APF 输出电流的谐波含有量都发生了明显的变化。对于 APF1,随着 APF2 的加入,除了 5 次谐波含有量变化不大外,APF1 输出 13 次谐波含量升高 6%,15 次谐波含量升高 15.6%,除此之外,受 APF2 参考电流影响还产生了含量较高的 17 次谐波。对于 APF2,在 APF1 并网后,APF2 输出电流中 5 次谐波含量变化不大,但 15 次谐波含量增长 13.89%,17 次谐波含量增长 19.52%,同样还产生了 APF1 参考电流中包含的 13 次谐波。

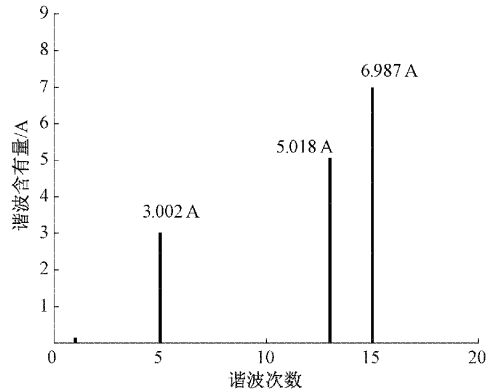


图 7 APF1 单独并网输出电流谐波含有率

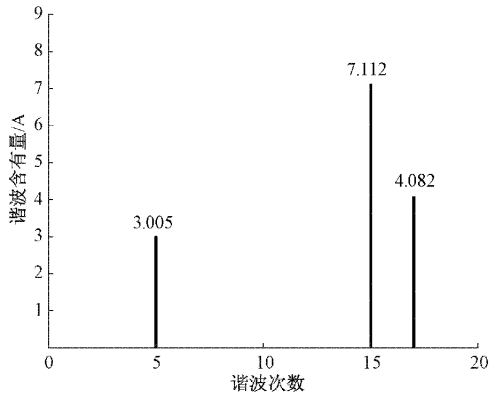


图 8 APF2 单独并网输出电流谐波含有率

从时域仿真结果可直观看到,各台 APF 输出电流中谐波含量增长量随着频率的上升而上升,与前文理论分析结果一致。综上所述,基于自身控制目标进行整定的 APF 在多设备同时并网运行时会产生交互影响,APF 间的交互影响使得用于补偿谐波的补偿电流不能跟随参考值,将会使得 APF 补偿谐波的功能降低,不能起到改善电能质量的作用。因此当有多台 APF 并网时,需对各 APF 参数重新整定,以削弱设备间的交互影响。

为抑制多 LCL 型 APF 间的交互影响,以各 APF 输出

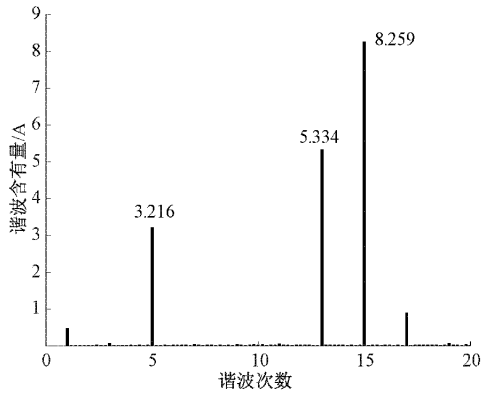


图 9 同时并网时 APF1 输出电流谐波含有率

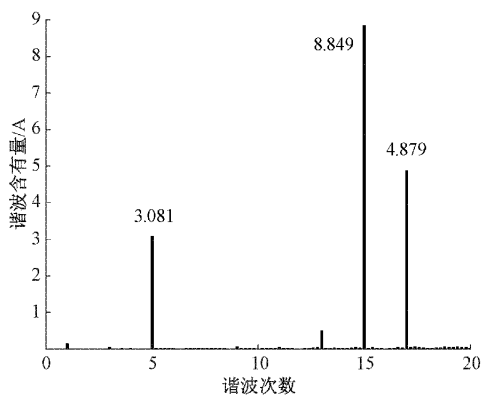


图 10 同时并网时 APF2 输出电流谐波含有率

电流与各自参考值差值的积分为目标,采用本文所提出改进麻雀优化算法优化两 APF 中各参数。种群规模设为 100,算法迭代次数设为 100,安全值设为 0.8,发现者占种群比例为 20%,预警者占种群比例为 20%。运用改进后的麻雀算法对本模型进行求解,将求解得到的 pareto 前沿与传统的麻雀算法的求解结果进行对比,结果如图 11 所示。从对比图中可以看出,算法引入 tent 混沌扰动和动态随机柯西变异后,pareto 前沿面广泛而均匀地分布在求解域中,并且前沿面更接近理想解,表明改进后算法的求解性能得到提升。

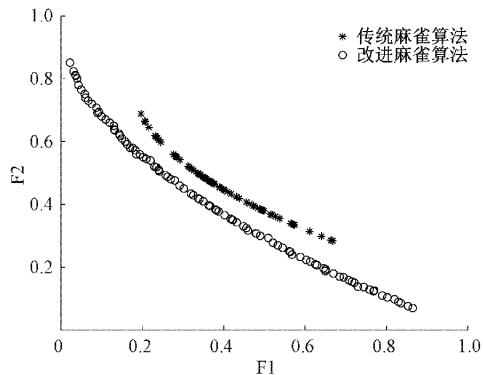


图 11 算法改进前后 pareto 前沿对比

采用改进麻雀算法所得最优折衷解解如表 4 所示。

表 4 协调控制后各参数配置结果

滤波器	H_{i1}	H_{i2}	K_p	K_i
APF1	0.472 8	1.172 8	0.319 1	3 740.2
APF2	0.204 2	1.118 1	0.622 2	2 640.7

应用表 4 数据可得协调控制后系统的 GDRGA 主对角线元素如表 5 所示。从表 5 可以看到,相较于协调控制前,协调控制后各次谐波的 GDGRA 对角线元素极为接近数值“1”,从理论层面上表明协调优化后 APF 间的交互影响得到抑制。

表 5 优化后各频率下 GDGRA 主对角线元素

频率/Hz	λ_{11}	λ_{22}
250	$1-j0.001 7$	$0.999 8+j0.018 1$
650	$1.000 7-j0.036 3$	$0.978 9-j0.210 7$
750	$1.000 3-j0.059 7$	$0.960 1-j0.287 2$
850	$0.998 6-j0.094 0$	$0.932 1-j0.370 4$

在协调配置后再次对两台 APF 输出电流进行谐波分析,仿真结果如图 12 和 13 所示。可以看到,在进行协调配置后,各 APF 输出电流中各次谐波含量较好的跟随谐波源

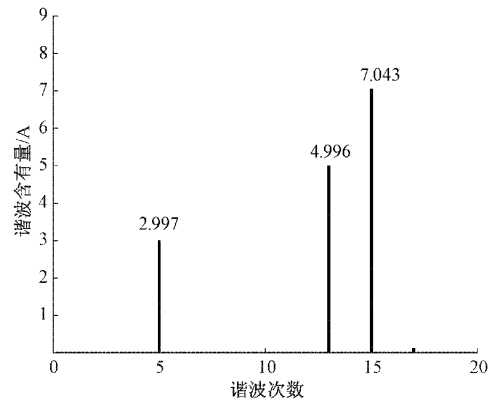


图 12 协调控制后 APF1 输出电流谐波含有率

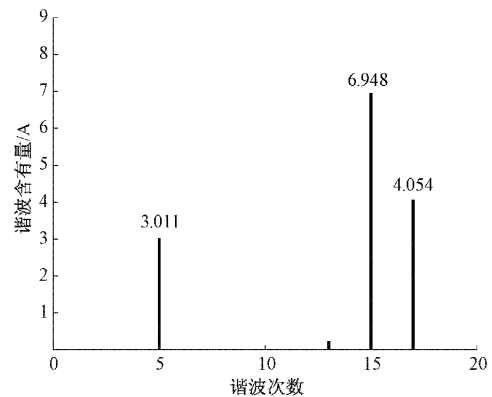


图 13 协调控制后 APF2 输出电流谐波含有率

负载中各次谐波含量,仿真结果表明,协调优化后各控制器间的交互影响得到抑制,同时验证了 GDRGA 用于定量分析 APF 间交互影响程度的正确性。

5 结 论

本文基于诺顿等效电路搭建了多 LCL 型 APF 并网模型,利用广义逆阵理论推导了系统广义动态相对增益矩阵,对 APF 间的交互影响程度进行定量分析;将抑制交互影响转换为多目标优化问题,采用加入 tent 混沌和动态随机柯西变异的改进麻雀算法对控制参数协调优化。所得结论如下:

基于自身控制目标整定的 APF 在同时运行时存在交互影响,且随着频率上升,交互影响程度加强。

基于广义逆阵的广义动态相对增益矩阵能定量表征 APF 间的交互影响程度,能作为衡量交互影响有效指标。

改进麻雀算法扩大了种群的搜索空间,pareto 前沿面能更加均匀的分布在求解域中,提升了算法的求解能力。

对多 APF 并网系统进行多目标协调控制,能有效抑制各 APF 间的交互影响,提升电能质量。

参考文献

- [1] 唐圣学,王维威,马强,等.三电平逆变器 IGBT 器件接线故障在线诊断方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(11):19-30.
- [2] 张茂松,池帮秀,李家旺,等.有源电力滤波器基于准比例谐振的电流协调控制策略研究[J].电网技术,2019,43(5):1614-1623.
- [3] 李文杰,陈超波,冯添枝,等.NPC 型三电平逆变器的数学建模方法研究[J].国外电子测量技术,2021,40(11):72-78.
- [4] 吉云飞,吴雷.基于重复控制的 APF 优化控制策略研究[J].电子测量技术,2020,43(15):13-18.
- [5] 刘鸿鹏,边新新,张伟,等.扩大有效阻尼区的改进型电容电流反馈有源阻尼策略[J].高电压技术,2022,48(1):114-124.
- [6] 孙刚,殷志锋,胡冠中.一种基于改进广义积分控制的有源滤波器谐波补偿方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(23):96-105.
- [7] 邓玮璋,周江林.孤岛微网 DC/AC 逆变器电压 H_{∞} 鲁棒控制[J].电子测量与仪器学报,2020,34(3):195-200.
- [8] 黄柳强,郭剑波,孙华东,等.基于智能计算的多 FACTS 协调配置[J].电网技术,2013,37(4):942-946.
- [9] 李帅虎,向振宇,彭寒梅,等.基于模型预测控制的 SVC 与 STATCOM 协调控制器[J].电网技术,2019,43(11):4218-4224.
- [10] 贾东强,韦统振,霍群海.DSTATCOM 交直流控制回路交互影响分析[J].电工技术学报,2013,28(S2):324-330.
- [11] 刘人志,陈卓,唐文博,等.弱电网下计及锁相环影响的 LCL 型并网逆变器控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(5):178-187.
- [12] 冯兴田,孙添添,马文忠.应用诺顿等效模型的 APF 并网交互影响分析[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(2):8-14.
- [13] 王奔赫,张佰富,韩肖清,等.基于频域 RGA 原理的多并联三相逆变器间交互影响分析[J].高电压技术,2021,47(10):3766-3778.
- [14] 王何,李雨佳,尹忠东,等.弱电网条件下多 APF 并网交互影响分析[J].中国电力,2020,53(11):23-30,88.
- [15] YANG J, QI R, LIU Y, et al. Coordinated control strategy for harmonic compensation of multiple active power filters[J]. Energy Engineering, 2022, 119(2): 609-620.
- [16] 黄耀俊,马立新,白刚屹.基于 APF 的粒子群优化变论域模糊 PID 控制研究[J].电子测量技术,2019,42(16):111-115.
- [17] 宋绍剑,阳喜,刘斌,等.基于电网阻抗的并网逆变器准比例谐振控制[J].中国电力,2019,52(12):90-96.
- [18] YANG X, LIU X, CHEN W, et al. Research on distributed networked unbalanced harmonic control combined with APF[J]. Electrical Engineering, 2021, 103(5): 1-9.
- [19] 薛建凯.一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D].上海:东华大学,2020.
- [20] YUAN B, XU J, ZHAO C. Steady-state analysis of voltage source converter(VSC) connected to weak AC system and optimal control strategies [J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 46(4): 445-455.

作者简介

张涛,博士,教授,主要研究方向为电力系统优化运行、高电压绝缘及测试技术、电力系统过电压与接地技术。

E-mail: unifzhang@hotmail.com

王清川(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行。

E-mail:2781270470@qq.com

陶然,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行。

E-mail:1336818066@qq.com

黄明娟,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化调度。

E-mail:1132934946@qq.com

刘伉,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化调度。

E-mail:1500943318@qq.com