

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108676

# 一种新型并网逆变器 LCL 滤波器参数优化策略<sup>\*</sup>

郑旭彬 李梦达 王 洋 梁智超 姚林萍

(上海电机学院电气学院 上海 201306)

**摘要:** 针对 LCL 滤波器参数选择较难且参数选择得如何会直接影响其滤波性能的问题,提出改进蝴蝶算法(SBOA)的并网逆变器 LCL 滤波器的参数优化策略。在 MATLAB 上搭建仿真模型,选择在电容端口串联阻尼电阻,并将纹波电流最小化、谐波衰减最大化、功率损耗低化作为优化目标,再运用线性加权法将其转化为单目标模型,并用熵值权重法来确定各目标的权重系数,最终运用 SBOA 对单目标函数进行求解。通过仿真,对比改进蝴蝶算法与蝴蝶算法(BOA)、遗传算法(GA)的函数收敛曲线,验证改进蝴蝶算法强大的寻优能力;实验表明,文中设计出的优化策略在确保一定滤波条件下其并网端口的 THD 和功率损耗  $P_{loss}$  相比于传统图解法与遗传算法的分别低了 1.14%、0.74% 以及 4.33 W、0.87 W。

**关键词:** LCL 滤波器;蝴蝶优化算法;线性加权法;参数设计

**中图分类号:** TM461 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## A novel parameter optimization strategy for LCL filters for grid-tied inverters

Zheng Xubin Li Mengda Wang Yang Liang Zhichao Yao Linping  
(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the parameter selection of LCL grid-connected filter is complicated and how the parameter selection can directly affect thyine filtering effect, a parameter optimization strategy of LCL grid-connected inverter based on improved butterfly algorithm is put forward. Modeling in MATLAB simulation, the choice in port series damping resistance capacitance, maximizing and minimizing ripple current, harmonic attenuation, low power loss into as the optimization goal, and using the linear weighted method is changed into single objective model, using the entropy weight method to determine the weight coefficient of each target, finally using the improved butterfly algorithm for solving the objective function. Simulation results show that the improved butterfly algorithm, butterfly algorithm and genetic algorithm are compared with the function convergence curve, and the improved butterfly algorithm has outstanding optimization ability. Experiments show that the optimization strategy designed in this paper is 1.14%, 0.74% and 4.33 W and 0.87 W lower than that of the traditional schematic method and the genetic algorithm under certain filtering conditions.

**Keywords:** LCL filter; butterfly optimization algorithm; linear weighting method; parameter optimization design

### 0 引 言

实现 2030 年前的二氧化碳排放量达到峰值且 2060 年达到碳中和的目标是要靠数代人坚持不懈地努力才能实现<sup>[1]</sup>。因此,为了实现“碳中和”目标,国内外学者对光能、风能等清洁能源深入研究。而 LCL 滤波器是光伏发电的一个承接也是逆变并网的一个关键部分,因此对 LCL 滤波器参数的研究尤为重要<sup>[2]</sup>。虽然传统的调试法能调到相对

较优的 LCL 参数值,但其需要调试的时间较长且调试过程比较复杂,为此需要运用智能算法来对 LCL 参数进行寻优<sup>[3]</sup>。

LCL 参数的优化方法有许多。文献[4-5]罗列与推导了 LCL 的约束条件,并通过反复试凑 LCL 参数来得到合适的 LCL 参数值,这样虽能调试出最佳参数值,但过程比较繁琐。文献[6]提出一种基于自适应权重 PSO 的 LCL 参数设计方法,虽然这能增强并网后的稳定裕度以及降低

收稿日期:2021-12-24

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(62003206)、上海市科学委员会科研项目(17DZ1201200)资助

电流谐波畸变率,但其设计方法比较复杂且运用到实际硬件的成本比较高。文献[7]提出了一种 LCL 参数设计方法,其只凭借阻抗损耗最小化的局部目标变量进行优化设计,并没有以全局的目标进行优化设计。文献[8]提出一种改进人工蜂群算法的 LCL 滤波器参数设计方法,虽然该方法具有一定实用价值,但其只以电流谐波衰减程度最小化进行建立单目标函数。

本研究是针对 LCL 逆变器在逆变并网过程中,其电流会有谐波畸变率以及产生谐振的问题,提出一种基于改进蝴蝶算法的并网逆变器 LCL 滤波器参数设计方法。主电路的拓扑结构采用电容串联电阻的有源阻尼的电流控制策略,并以纹波电流最小化、谐波衰减最大化、功率损耗小化作为优化目标,创建目标模型。运用改进蝴蝶优化算法对模型进行求解与寻优,从而得到最优的 LCL 参数值,降低逆变并网的电流谐波畸变率以及系统的功率损耗。

### 1 弱电网下逆变并网系统

#### 1.1 弱电网下主电路的拓扑结构及数学模型

选择采用电容串联电阻的有 LCL 滤波器电压型并网逆变系统的电路拓扑结构如图 1 所示,其中  $C$  为直流侧电容;  $V_1$  为输入电压,  $S_1 \sim S_4$  是 4 个晶闸管;  $L_a$  为逆变器侧电感;  $L_b$  为并网侧电感、 $C_1$  为滤波电容;  $R$  是阻尼电阻;  $I_{L1}$  为逆变器侧电流;  $I_g$  为并网侧电流;  $I_{ref}$  为参考电流。

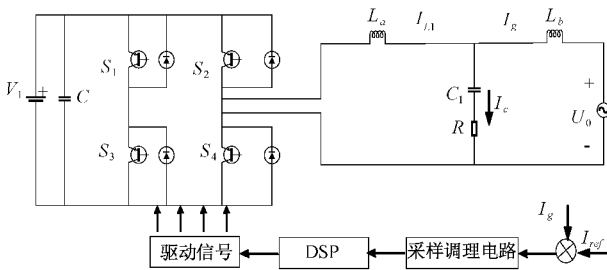


图 1 LCL 滤波器的并网逆变系统结构

为了更形象地描述图 1 的结构,接下来绘制 LCL 滤波器的并网逆变系统的系统框图,如图 2 所示。

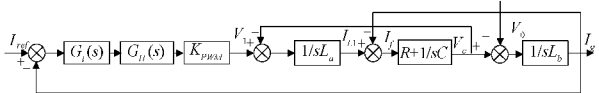


图 2 LCL 滤波器的并网逆变系统的系统框图

由图 2 可知,  $K_{pwm}$  是逆变器等效的传递函数,其值是输入端口的直流电压  $V_1$  的幅值与三角载波  $V_{tri}$  幅值之间的比值;在逆变器端,选择并网电流反馈的调节器  $G_i(s)$ ,其值等于  $K_p$  与  $K_i/s$  之和,且  $K_p$  与  $K_i$  分别为 PI 控制器的微分和比例系数;  $G_H(s)$  是 1.5 拍滞后的延迟部分,  $T_s$  代表为采样周期,且可把该延迟部分简化为式(1):

$$G_H(s) = e^{-1.5sT_s} \approx 1 - 1.5T_s s \quad (1)$$

#### 1.2 LCL 滤波器

如今普遍使用的滤波器类型包括 L、LCL 型滤波器,而 LCL 型滤波器的滤波性能会更好。为了进一步分析 LCL 滤波器的工作原理与性能,绘制了如图 3 所示的单相 LCL 滤波器的拓扑结构。其中  $V_1$  为输入电压;  $V_0$  为输出电压。

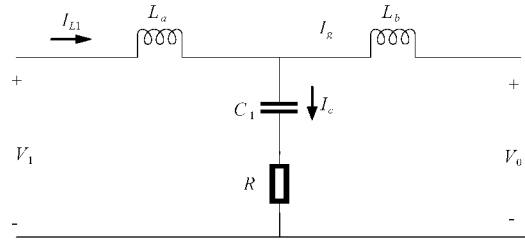


图 3 LCL 滤波器的单相拓扑结构

则 LCL 滤波器(不考虑电阻  $R$ )的输出电流和输出电压的传递函数如式(2)所示。

$$G_1(s) = \frac{I_g(s)}{V_1(s)} = \frac{1}{L_a L_b C_1 s^3 + (L_a + L_b)s} \quad (2)$$

由图 3 可知,有阻尼型 LCL 滤波器(考虑电阻  $R$ )的输出电流和输出电压的传递函数如式(3)所示。

$$G_{12}(s) = \frac{I_g(s)}{V_1(s)} = \frac{RC_1 s + 1}{L_a L_b C_1 s^3 + (L_a + L_b)R s^2 + (L_a + L_b)s} \quad (3)$$

而对于  $L_a + L_b$  型滤波器即 L 型滤波器而言,其输出电流与输出电压的传递函数如式(4)所示。

$$G_2(s) = \frac{I_g(s)}{V_1(s)} = \frac{1}{(L_a + L_b)s} \quad (4)$$

为此,可利用 MATLAB 依据式(2)~(4)的传递函数绘制出有阻尼 LCL 滤波器、无阻尼 LCL 滤波器、 $L_a + L_b$  型滤波器的伯德图,如图 4 所示。

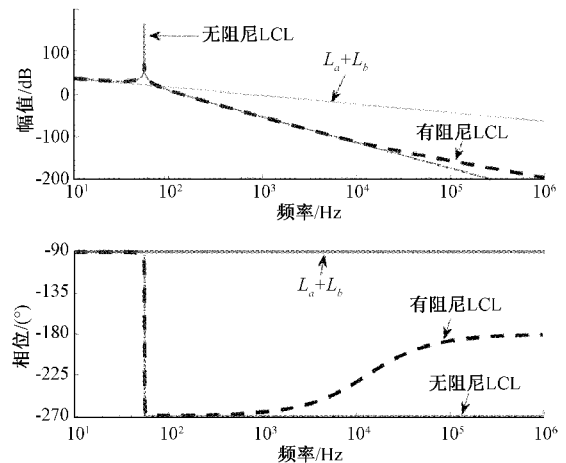


图 4 滤波器的伯德图

由图 4 可知,L 型滤波器的衰减程度与频率是成线性相关的,不过对于高频率段时的开关频率谐波,L 型滤波器的衰减程度有时不能达到 IEEE Std. 1547-2003 的标准。

虽然无阻尼 LCL 型滤波器在低频率段的衰减程度与 L 型的一致,但在高频率段时的衰减程度显然比 L 型滤波器快得多,所以能够更好地将开关频率的谐波电流分量给滤除。不过无阻尼 LCL 型滤波器的频率响应在谐振频率点会有谐振尖峰的存在,且在谐振点的相位发生了  $-180^\circ$  变化,容易产生震荡现象,从而导致系统的不稳定;而有阻尼型 LCL 滤波器相对于无阻尼 LCL 滤波器而言,具有比较好的滤波器效果,能有效地抑制住谐振尖峰且在谐振点的相位并不像无阻尼 LCL 滤波器发生  $-180^\circ$  变化,而是高频  $10^3$  附近降低了相位角。

由上述可知,相比阻尼 LCL 滤波器与 L 型滤波器,有阻尼型 LCL 滤波器具有更好的抑制谐波性能。

### 1.3 电容串联的电阻对 LCL 滤波器优化设计的影响

由图 2 的系统框图可知,该系统包含了延迟环节、有阻尼 LCL 滤波电路、控制系统,且其系统的环路增益可表示为:

$$L_1(s) = \frac{e^{-1.5sT} G_i(s) K_{pwm} (C_1 R s + 1)}{L_a L_b C_1 s^3 + (s C_1 R + 1)(L_a s + L_b s)} \quad (5)$$

此时 LCL 型滤波器的谐振频率值可表示为:

$$\omega_r = \sqrt{(L_a + L_b) / L_a L_b C_1} \quad (6)$$

当电容  $C_1$  串联不同阻值的电阻时,分析 LCL 滤波器抑制谐振尖峰能力的影响。如图 5 所示,LCL 滤波器选择无源阻尼时的伯德图。

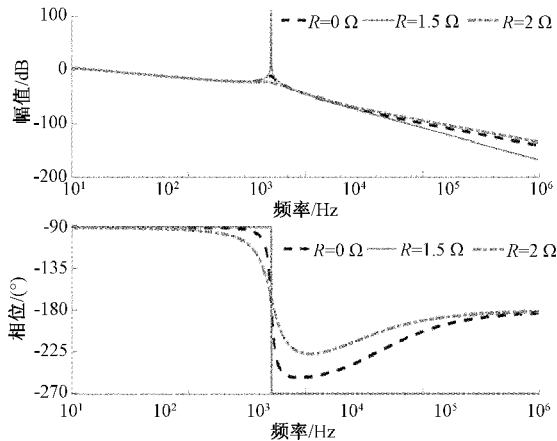


图 5 无源阻尼伯德图

由图 5 可知,在低于谐振频率时,其幅值与相频特性都基本一致;当高于谐振频率时,其相频特性跌落迅速,且电阻越小,其跌落的相位就越大;反之则跌落的相位就越小。

综上所述,电容串联电阻的目的就是为增大整个系统的阻尼,最终实现降低谐振尖峰的目的。

## 2 LCL 滤波器的参数优化与设计

在 LCL 滤波器参数的设计与优化中,需要考虑如下 3 个优化设计目标以及 3 个约束条件。其中设计目标主要为逆变端电感电流纹波最小化、谐波衰减最大化、功率损耗最

小化;约束条件主要为滤波电容的约束、谐振频率的约束、总电感的约束<sup>[9]</sup>。

### 2.1 逆变端电感电流纹波最小化

在整个逆变系统中,流过逆变端  $L_a$  的电流  $I_{L1}$  会受到电压波动的影响,即在开关电路上会间歇性地生成纹波。为此,有必要对  $\Delta i_{\max}$  对 LCL 滤波器性能影响进行分析,纹波电流  $\Delta i_{\max}$  可如下表示:

$$\min f_1 = \Delta i_{\max} = \frac{V_1}{4f_s L_a} \quad (7)$$

### 2.2 谐波衰减比最大化

由图 3 可等效地推出 LCL 滤波器的并网端口的电流  $i_g$  与逆变端口电流  $I_{L1}$  比值  $\eta$ , 即为衰减比。其表达式如下:

$$\min f_2 = \eta = \frac{I_g(s)}{I_{L1}(s)} = \frac{RC_1 s + 1}{CL_b s^2 + RC_1 s + 1} \quad (8)$$

### 2.3 功率损耗最低化

滤波器的功率损耗会对整个逆变并网系统造成比较大的影响,而降低 LCL 滤波器功率损耗的最有效方式是减少阻尼电阻的功率损失。其表达式如下:

$$\min f_3 = P_{\text{loss}} = 3R \frac{V_0^2}{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C_1^2}} \quad (9)$$

### 2.4 滤波电容的约束

对于滤波电路的电容而言,如果滤波电容  $C_1$  越大,则流过滤波电容支路的高频谐波分量则越多,那么吸收的无功功率则越多,则系统的功率因数更低。为此滤波电容的选择需要满足如下约束条件:

$$C_1 \leq 5\% \cdot \frac{P_1}{3 \cdot \omega V_0^2} \quad (10)$$

其中,  $P_1$  为某一相的输出功率;  $V_0$  为相电压的有效值。

### 2.5 谐振频率的约束

从 LCL 滤波器性能角度出发,为了将高频谐波与低频谐波进行有效地抑制,则谐振频率  $f_{res}$  的设计应满足如下不等式:

$$10f_0 \leq f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_a + L_b}{L_a L_b C_1}} \leq \frac{1}{2} f_s \quad (11)$$

其中,  $f_0$  为电网基频;  $f_s$  为开关频率。

### 2.6 总电感的约束

为了能降低开关管的开关损耗,合理地选择电感值的大小是十分重要的。虽然电感值选取得过大会致使电流响应能力较低的现象,但 LCL 滤波器的滤波能力会更强,为此总电感值的选择需要满足如下不等式:

$$\frac{V_1}{4\sqrt{3} I_{Rip} f_s} \leq L \leq \frac{\sqrt{V_1^2/3 - V_{\text{max}}^2}}{\omega I_{\text{max}}} \quad (12)$$

其中,  $I_{Rip}$  为纹波电流;  $I_{\text{max}}$ 、 $V_{\text{max}}$  分别代表着相电流和相电压的峰值。

### 3 改进蝴蝶算法在滤波器参数设计的运用

传统选取滤波器参数的方式具有随机性、费时性、重复性，而如果在设计三阶 LCL 滤波器参数的时候，其实现的程序会变得复杂且参数难以调试。为此需要运用改进的蝴蝶算法来解决这个难点，其能高效且精确地寻优出每个参数值大小。

#### 3.1 蝴蝶优化算法

蝴蝶优化算法<sup>[10]</sup> (BOA) 是于 2019 年被国外的 Arora 所提出的新型智能算法，具有调节参数简单、较强全局搜索等优点，被广泛用于光伏、水利等领域上<sup>[11]</sup>。在飞行时，每只蝴蝶会产生一定浓度的香味。切换概率  $P$  控制局部搜索与全局搜索。当  $Rand1 < P$  则进行全局搜索；当  $Rand1 > P$  则进行局部搜索。

蝴蝶产生香味、全局搜索、局部开采的公式如下：

$$f = cI^a \quad (13)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 g^* - x_i^t) f_i \quad (14)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 x_j^t - x_i^t) f_i \quad (15)$$

其中， $I$  为刺激强度； $a$  是模态幂指数； $c$  是蝴蝶感官因子； $f$  为香味的感知强度； $t$  是在迭代了  $t$  次后第  $i$  只蝴蝶的空间位置； $j$  与  $k$  是随机的第  $j$  与第  $k$  只蝴蝶在迭代  $t$  次后的空间位置； $Rand1$  为  $[0, 1]$  内的任意数； $f_i$  表示为第  $i$  只蝴蝶香味浓度； $g^*$  属于第  $t$  次迭代的适应度最优蝴蝶位置。

#### 3.2 融入自适应权重

针对传统 BOA 算法在局部搜索时存在对局部范围内蝴蝶个体信息搜索不全且搜索慢的问题，融入自适应权重系数<sup>[12]</sup>  $w(t)$  到 BOA 的 MPPT 算法局部搜索的公式里。因为在寻优时，自适应权重系数会降低当前最佳蝴蝶个体对全局最佳个体搜索的影响，且当 BOA 算法进入局部搜索的过程中， $w(t)$  会根据迭代次数的增加而提高最佳蝴蝶个体的影响力，紧接着会辅助其他蝴蝶个体快速寻优到局部最大功率点所在的位置，从而提高 BOA 算法的寻优效率与收敛速度。自适应权重系数如下表示：

$$w(t) = 0.3 \cos\left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right)\right] \quad (16)$$

则此刻的全局搜索、局部搜索的公式可如下表示：

$$x_i^{t+1} = w(t)[x_i^t + (r^2 g^* - x_i^t) f_i] \quad (17)$$

$$x_i^{t+1} = w(t)[x_i^t + (r^2 x_j^t - x_i^t) f_i] \quad (18)$$

#### 3.3 算法的函数测试

为验证改进蝴蝶算法寻优优越性，运用改进的蝴蝶算法(SBOA)与传统蝴蝶优化算法(BOA)、遗传算法<sup>[13]</sup>(GA)来测试经典的 Sphere 函数、Ackely 函数，如表 1 所示。测试的函数的维度均为 30，且 3 种智能算法的种群都自定义设为 25 且迭代次数为 500。改进蝴蝶算法参数设计切换概率  $p = 0.8$ ，模态幂指数  $a = 0.1$ ，蝴蝶感官因子  $c = 0.01$ ；遗传算法参数设置：交叉因子  $pc = 0.3$ ，变异因子  $pm = 0.03$ 。

表 1 测试的函数

函数	范围	维数	特征	理论最优值
Sphere	$[-100, 100]$	30	单峰	0
Ackley	$[-30, 30]$	30	多峰	0

由函数收敛图 6 与表 2 可知，在固定的 500 迭代次数中，无论在测试单峰函数还是多峰值函数，SBOA 算法在收敛速度与收敛精度比 BOA 算法、GA 算法都要更快且更高。SBOA 在测试单峰函数 Sphere 时，SBOA 寻优平均值的精度分别比 BOA、GA 算法的寻优平均值高 15、1 个精度；在测试多峰函数 Ackely 时，寻优精度比 BOA、GA 算法平均高了 43、34 个精度。

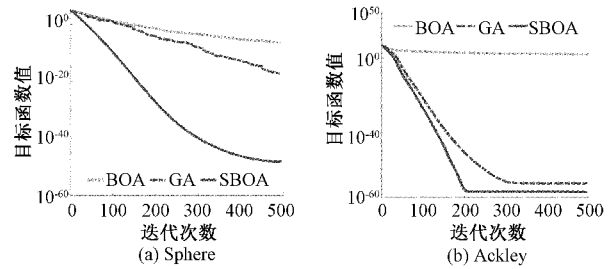


图 6 函数收敛曲线图

表 2 函数测试结果

函数	算法	最优值	平均值	标准差
Sphere	SBOA	$6.29 \times 10^{-49}$	$8.13 \times 10^{-48}$	$3.75 \times 10^{-48}$
	BOA	$1.92 \times 10^{-7}$	$2.64 \times 10^{-5}$	$1.31 \times 10^{-6}$
	GA	$3.69 \times 10^{-18}$	$7.23 \times 10^{-14}$	$3.61 \times 10^{-14}$
Ackley	SBOA	$8.88 \times 10^{-16}$	$3.26 \times 10^{-15}$	$1.67 \times 10^{-15}$
	BOA	$1.69 \times 10^0$	$2.13 \times 10^0$	$3.38 \times 10^{-1}$
	GA	$3.29 \times 10^{-14}$	$3.52 \times 10^{-11}$	$3.35 \times 10^{-15}$

#### 3.4 目标函数的构建

目标函数的构建考虑了如下 3 个优化目标，即逆变端电流纹波最小化、谐波衰减比最大化、功率损耗最低化。运用线性加权法来构建多目标函数并进行求解<sup>[14]</sup>：

$$\min f(X) = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 \quad (19)$$

其中， $\min f_1$  函数代表逆变端电感电流纹波最小化，如式(7)所示； $\min f_2$  函数代表最小纹波衰减比  $\eta$ ，如式(8)所示； $\min f_3$  函数代表 LCL 滤波器功率损耗最小化，如式(9)所示。

因为权重系数  $w_i$  代表了各个上述目标函数的重要程度，因此可依据熵值权重法<sup>[15]</sup>来确定式(19)中的权重系数  $w_i$ ，其中  $i$  为 1, 2, 3。此时目标函数由式(20)表示：

$$\min f(X) = 0.2064 f_1 + 0.6219 f_2 + 0.1717 f_3 \quad (20)$$

#### 3.5 算法实现流程

如图 7 所示为 LCL 滤波器参数寻优的实现流程，具体

实现流程如下。

1)初始化。首先赋予变量  $X = [L_a, L_b, C_1, R]$ , 依据第 2 章 LCL 滤波器的设计目标以及约束条件, 以此来初步确定滤波器参数的取值范围。接着蝴蝶个体数量设置为  $S$ 、最大的迭代次数设置为  $N$ , 并初始化蝴蝶种群并录入 LCL 滤波参数。

2)计算。依据目标函数求解蝴蝶个体的适应度值, 并假设当前适应度最好的蝴蝶个体为  $x_j^t$ 。

3)对比。通过比较当前蝴蝶的适应度值  $x_i^t$  与最优的蝴蝶个体  $x_j^t$ , 若  $x_i^t$  的低于  $x_j^t$  的则将蝴蝶个体  $x_i^t$  筛选掉, 继续保持当前的蝴蝶个体位置; 反之, 则将  $x_j^t$  蝴蝶个体筛选掉, 输出当前最佳蝴蝶个体位置。判断代数条件是否符合, 若是, 则输出最优的滤波器参数值, 否则执行下一个操作, 判断是否局部飞行还是全局飞行。

4)更新。从  $[0, 1]$  产生随机数字  $Rand1$ , 若  $Rand1$  小于切换概率  $p$  为全局飞行, 则按式(17)进行局部位置更新; 反之, 则按式(18)进行位置更新。

5)输出。如果达到最大迭代此次数, 则输出最优的滤波器参数解, 否则返回步骤 2)。

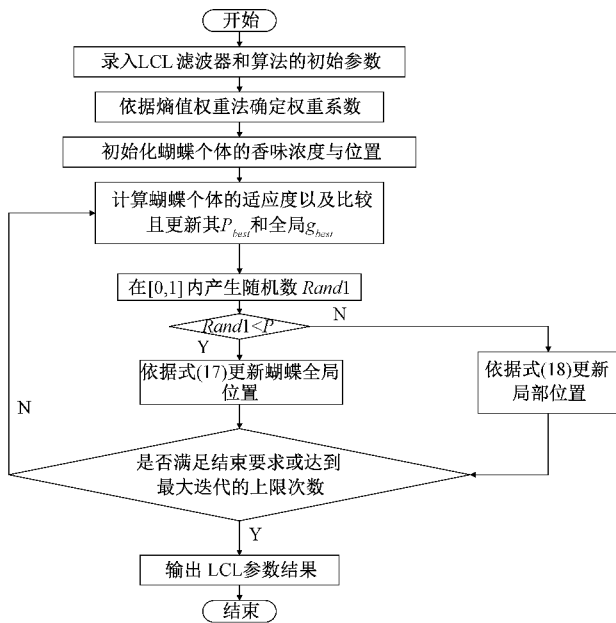


图 7 LCL 滤波器参数寻优的实现流程

3.6 算法寻优结果

运用改进的蝴蝶算法与遗传算法寻优和传统图解法去求解参数。为了降低算法易收敛可能, 种群不均匀的情况, 取蝴蝶与遗传个体  $S = 100$  且最大迭代次数  $N = 100$ 。而  $L_a, L_b, C_1$  和  $R$  为待寻优的参数, 所以蝴蝶维度  $D = 4$ 。蝴蝶算法与遗传算法的参数设置与 3.3 节一样。改进蝴蝶算法寻优的参数图如图 8 所示。

如表 3 所示, 其为在相同条件下改进蝴蝶算法、传统图解法与遗传算法设计的 LCL 滤波器参数结果。

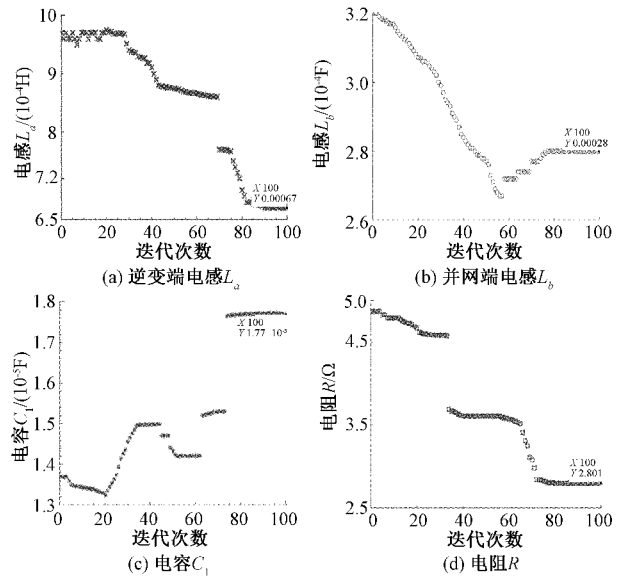


图 8 LCL 滤波器参数的寻优结果

表 3 寻优结果

参数	改进蝴蝶算法	遗传算法	传统图解法
$L_a / \text{mH}$	0.67	0.58	0.88
$L_b / \text{mH}$	0.28	0.36	0.37
$C_1 / \mu\text{F}$	17.71	16.23	18.15
$R / \Omega$	2.80	2.69	2.02

为了证实改进蝴蝶算法在 LCL 滤波器参数寻优的优越性, 将上述各类算法寻优的参数结果代入到滤波器传递特性的式(8)中, 变绘制出本系统的伯德图如图 9 所示。

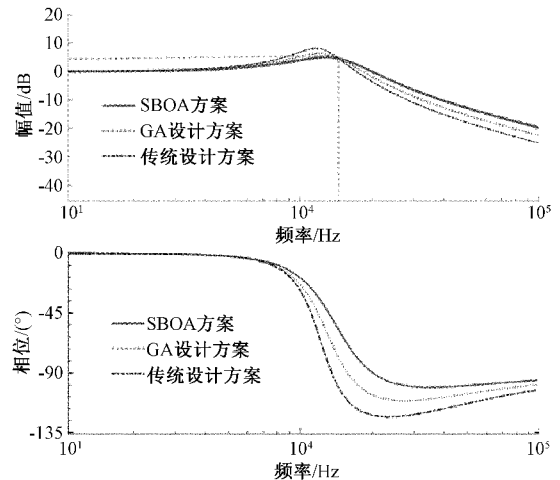


图 9 系统的伯德图

由图 9 可知, 相比于传统设计方法、GA 设计方案, SBOA 的设计方案在谐波衰减、抑制谐振尖峰的等方面表现得出色。传统的设计方案虽然出现了一点谐振尖峰, 但也处于相对稳定的状态。



### 4 仿真分析

为了更好地验证所提优化设计方案的优越性与合理性,运用 MATLAB/Simulink 进行仿真验证。将上述 3 种方法寻优到的参数结果使用在搭建好的仿真模型中。模型的参数设置如下:直流端口输入电压  $V_1=700\text{ V}$ ;并网侧相电压有效值  $V_0=220\text{ V}$ ;电网的基波频率  $f_0=50\text{ Hz}$ ;开关频率  $f_s=3.2\text{ kHz}$ 。

改进蝴蝶算法设计的 LCL 滤波器相应的逆变端口电流  $I_{L1}$  与并网端口电流  $I_g$  的波形和相应傅里叶分析如图 10(a)、(b)所示;遗传算法设计的 LCL 滤波器相应的逆变端口电流  $I_{L1}$  与并网端口电流  $I_g$  的波形和相应傅里叶分析如图 11(a)、(b)所示;改进蝴蝶算法设计的 LCL 滤波器相应的逆变端口电流  $I_{L1}$  与并网端口电流  $I_g$  的波形和相应傅里叶分析如图 12(a)、(b)所示;本设计方案输出的电压和电流波形如图 13 所示。

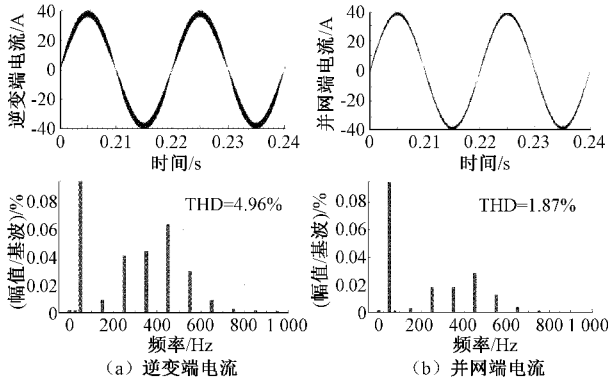


图 10 传统图解法的电流波形与频谱分析图

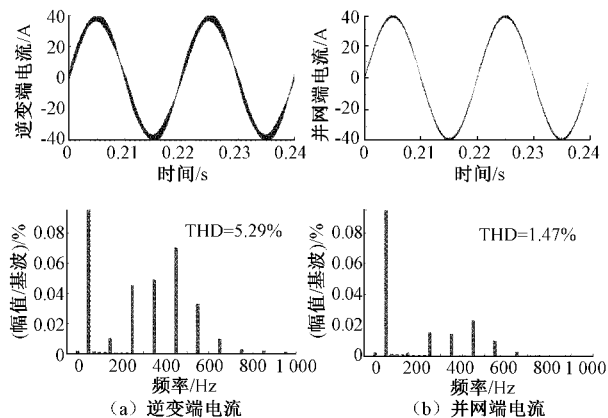


图 11 遗传算法的电流波形与频谱分析图

由图 10、12 和 13 以及表 4 可知,运用传统图解法来求得 LCL 滤波器参数时,其并网端口的 THD 为 1.87%,相比逆变端的 THD 下降了 3.11%且功率损耗  $P_{loss}$  为 9.72 W;运用遗传算法来求 LCL 滤波器参数时,其并网端口的 THD 为 1.47%,相比于逆变端的 THD 下降了 3.82%且功率损耗  $P_{loss}$  为 3.82 W;而运用改进蝴蝶算法寻

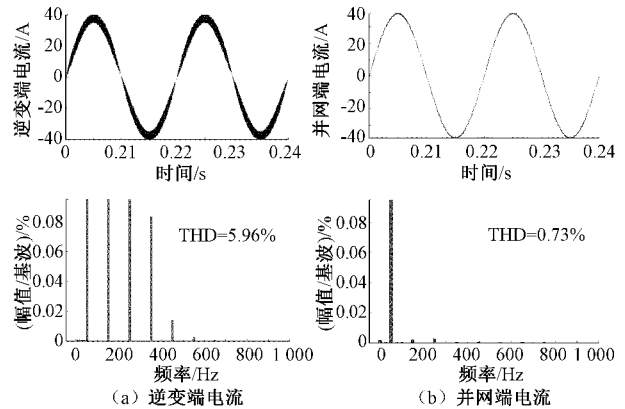


图 12 改进蝴蝶算法的电流波形与频谱分析图

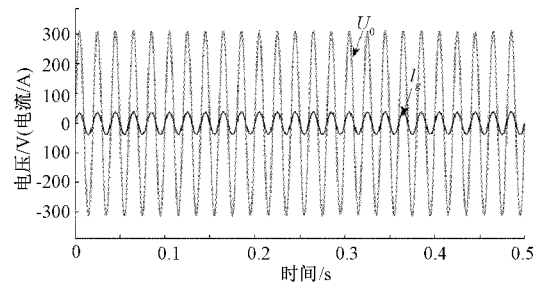


图 13 本设计方案输出的电压和电流波形

优 LCL 滤波器参数时,其并网端口的 THD 和功率损耗  $P_{loss}$  相比于传统图解法与遗传算法的分别低了 1.14%、0.74%以及 4.33 W、0.87 W。

表 4 仿真结果对比

方法	THD/%	$\Delta\text{THD}/\%$	$P_{loss}/\text{W}$
传统图解法	1.87	3.11	9.72
遗传算法	1.47	3.82	6.26
改进蝴蝶算法	0.73	5.23	5.39

综上所述,运用改进蝴蝶算法设计的 LCL 滤波器的滤波性能会比用遗传算法、传统图解法的要好,且相比于其他两种方法,改进蝴蝶算法设计的 LCL 滤波器的并网系统的  $P_{loss}$  要更小,输出的正弦电流波形更加平滑。

### 5 结论

本文提出了一种基于改进的蝴蝶算法的 LCL 滤波器参数的设计与优化方法,目的是为了提高 LCL 滤波器的滤波性能以及减少功率损耗。将逆变端电感电流纹波最小化、谐波衰减比最大化、功率损耗最低化作为优化的目标,并运用线性加权法将多目标函数转化为单目标函数进行求解,从而得到 LCL 滤波器参数。通过仿真实验可得如下结论。

1)相比于 BOA、GA 算法,SBOA 算法在测试经典函数时,其追踪精度会更高,从而验证了 SBOA 寻优能力的优越性。

2)相比于传统图解法和遗传算法的 LCL 滤波器参数优化设计方法,改进蝴蝶算法的 LCL 滤波器参数优化设计方法具有更低的 THD 值以及更加地的功率损耗,能避免重复的设计。从而进一步验证 SBOA 在 LCL 滤波器参数设计中展现了出色的寻优能力。

### 参考文献

- [1] 苏健,梁英波,丁麟,等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊,2021,36(9):1001-1009.
- [2] 李惠庸,张宏,张海平,等. 基于 LCL 滤波器优化的微电网多逆变器稳定运行控制系统[J/OL]. 电源学报,2022:1-14[2022-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20210817.1756.013.html>.
- [3] 黄亦欣,汤亚芳,于森,等. 并网逆变器 LCL 滤波器的参数优化设计[J]. 电测与仪表,2019,56(12):85-89.
- [4] 金建东,金丽娜. 三相光伏并网逆变器的建模与仿真[J]. 国外电子测量技术,2018,37(5):51-55.
- [5] 钟庆,童晋方,马新华,等. 电压源型换流器 LCL 滤波器确定性设计[J]. 高电压技术,2016,42(10):3068-3074.
- [6] 岳惠,杨洪耕. 计及并网电流控制影响的弱电网下 LCL 滤波器参数优化设计[J]. 电测与仪表,2019,56(23):132-138,145.
- [7] 王要强,吴凤江,孙力,等. 阻尼损耗最小化的 LCL 滤波器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报,2010,30(27):90-95.
- [8] 朱晓琳,庞科旺. 并网逆变器 LCL 滤波器参数优化设计[J]. 电气自动化,2022,44(1):111-114.
- [9] WU Z, ALDEEN M. Optimal design method of passive LCL filters for grid-connected inverters[C]. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference(APPEEC), IEEE, 2016:237-242.
- [10] AROARA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: A novel approach for global optimization [J]. Soft Comptuing,2019,23(3):715-734.
- [11] LONG W, WU T, XU M, et al. Parameters identification of photovoltaic models by using an enhanced adaptive butterfly optimization algorithm[J]. Energy, 2021, 229: 120750.
- [12] 马学森,谈杰,陈树友,等. 云计算多目标任务调度的优化粒子群算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(8):133-143.
- [13] 方文辉,胡竹林,朱欣娟. 基于遗传算法的用户行为数据生成[J]. 国外电子测量技术,2021,40(9):154-159.
- [14] 王苏戎,马登成,任泽,等. 悬臂式掘进机断面成型轨迹多目标优化方法研究[J]. 仪器仪表学报,2021,41(8):183-192.
- [15] 时统宇,王大志,李召. 基于多种群遗传算法的永磁涡流驱动器的多目标优化设计[J]. 电工技术学报,2016,31(S2):262-268.

### 作者简介

**郑旭彬**, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电与逆变并网技术。

E-mail:1226102618@qq.com

**李梦达**(通信作者), 工学博士, 副教授, 主要研究方向为可再生能源与分布式发电中的电力电子技术。

E-mail:limd@sdju.edu.cn

**王洋**, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能与数据挖掘。

E-mail:wangyang@sdju.edu.cn

**梁智超**, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术在新能源中的应用。

E-mail:1172133804@qq.com

**姚林萍**, 硕士研究生, 主要研究方向为虚拟同步发电机与微电网技术。

E-mail:1148745131@qq.com