

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181170

# 基于蜂群算法的矩阵变换器 ADRC 参数优化

马星河, 张振东, 许丹, 王福忠

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 矩阵变换器由于其电力直接变换特性使得输出侧性能极易受扰动影响。针对间接空间矢量调制的矩阵变换器加入了一种与对象模型无关的自抗扰控制器对其进行闭环控制。由于自抗扰控制器在实际应用中参数多、调参困难等问题, 影响自抗扰控制器在矩阵变换器系统中的使用。为此, 在矩阵变换器闭环系统中对自抗扰控制器参数运用人工蜂群算法进行寻优调整。该算法在每次寻找适应度函数最优值时都进行全局和局部搜索, 避免局部最优, 且收敛速度快, 相对人工整定参数大大提高了效率和准确度。实验结果表明: 采用人工蜂群算法进行参数寻优, 不仅可以保证矩阵变换器输出侧电压质量, 而且提高了自抗扰控制器的参数整定效率, 保证自抗扰控制器运用到矩阵变换器闭环控制中。

**关键词:** 矩阵变换器; 自抗扰; 蜂群算法; 参数整定

## ADRC parameter optimization of matrix converter based on ABC

MA Xinghe, ZHANG Zhendong, XU Dan, WANG Fuzhong

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Due to the direct conversion characteristics of the matrix converter, the output side performance is very susceptible to disturbance. A model-independent Auto Disturbance Rejection Controller (ADRC) is added to the matrix converter with indirect space vector modulation for its closed-loop control. Because the ADRC controller has many parameters in practical application and difficult to adjust parameters, it will affect the use of ADRC rejection controller in matrix converter system. In this paper, an Artificial Bee Colony (ABC) algorithm is used to optimize the parameters of ADRC in the closed-loop system of matrix converter. The algorithm performs global and local search at every time when finding the optimal value of fitness function, which avoids local optimum and has fast convergence speed. The relative artificial tuning parameters greatly improve the efficiency and accuracy. Experimental results show that using artificial ABC to optimize parameters can not only ensure the output voltage quality of matrix converter, but also improve the parameter tuning efficiency of ADRC, guaranteeing the ADRC being applied to the closed loop control of matrix converter.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600906).

**Key words:** matrix converter; ADRC; ABC; parameter tuning

## 0 引言

矩阵变换器(Matrix Converter, MC)是基于双向开关技术并采用脉宽调制方法得到期望输出电压的电力变换装置, 由于其电力直接变换特性在开环控制当中输入电压的任一扰动都会对输出电压造成直接影响<sup>[1]</sup>, 并且 MC 内部耦合项以及其他不确定因素(比如器件性能、计算误差、随机扰动等)都会影

响输出电压的质量, 对于 MC 的研究主要以电机驱动为背景开展的, 输出电压的不理想直接影响电机驱动效果甚至缩短电机寿命<sup>[2]</sup>。因此寻找最优的矩阵变换器系统的控制方案有很重要的意义。自抗扰控制器 (Auto Disturbance Rejection Controller, ADRC)通过自动检测并补偿控制对象的内外扰, 使得被控系统对于外扰和不确定因素扰动均有很好的适应能力。利用自抗扰控制器对矩阵变换器进行闭环控制是一种很有效的控制方案<sup>[3]</sup>。

自抗扰控制器在应用中整定参数较多, 参数的

基金项目: 国家重点研发计划课题资助 (2016YFC0600906)

整定很大程度上影响着自抗扰控制器的性能,若采用试凑法对自抗扰控制器参数进行人工整定,整定过程时间长,工作量大,甚至所整定参数并非最优参数。文献[4]中运用自适应遗传算法对ADRC一阶参数整定进行了优化,文献[5]中运用自适应遗传算法对车辆悬架系统的二阶ADRC参数进行优化,使得被控系统有了明显改善。但是对于矩阵变换器控制量大,整定参数也和其他系统不同,并且遗传算法容易出现早期收敛。基于这些问题,本文在文献[6]的基础上,将矩阵变换器作为控制对象,选用比遗传算法更加进步的蜂群算法(Artificial Bee Colony Algorithm, ABC),对矩阵变换器闭环控制中一阶ADRC的参数进行优化。使得繁琐的整定参数工作变得简单,减少ADRC参数整定时间,提高矩阵变换器的性能与闭环系统运行的可靠性。

### 1 矩阵变换器的矢量调制策略

含有3×3个双向开关的矩阵变换器等效电路如图1所示。

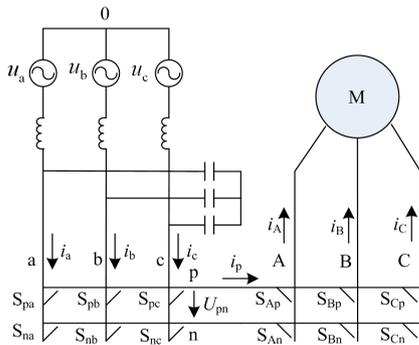


图1 间接矩阵变换器的等效电路图

Fig. 1 Equivalent topology of indirect matrix converter

矩阵变换器采用间接空间矢量调制策略是将间接传递函数法与空间矢量调制算法相结合,其作用上等同于对串联的“虚拟整流器”和“虚拟逆变器”的矩阵变换器进行调制。图1的左半部分为整流部分,右半部分为逆变部分[7]。

本文自抗扰控制器以虚拟逆变侧为控制模型,间接空间矢量矩阵变换器虚拟逆变器的数学模型如图2所示。

图2中,  $R$  是开关及其线路损耗的等效电阻;  $L$ 、 $C$  分别为滤波器电感和电容;  $u_x$  和  $i_x$  分别为虚拟逆变器的输入侧电压和电流;  $u_{ox}$ 、 $i_y$  分别为虚拟逆变器的三相输出电压和电流,其中  $x = A, B, C$ 。由图2可知,矩阵变换器虚拟逆变器在dq旋转坐标下的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_d}{L} + \omega i_q - \frac{R}{L} i_d - \frac{u_{od}}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_q}{L} - \omega i_d - \frac{R}{L} i_q - \frac{u_{oq}}{L} \\ \frac{du_{od}}{dt} = \frac{i_d}{C} + \omega u_{oq} - \frac{i_{yd}}{C} \\ \frac{du_{oq}}{dt} = \frac{i_q}{C} - \omega u_{od} - \frac{i_{yq}}{C} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,MC虚拟逆变器的数学模型含有耦合项和不确定项,由此分析输出电压质量可能受到以下干扰的影响:①耦合项造成的系统内部非线性;②非正常工况下的输入电压,如:电网侧三相输入电压不平衡。由于间接空间矢量矩阵变换器等效为“虚拟整流器”和“虚拟逆变器”的串联连接,因此直接对虚拟逆变侧进行控制即可改变矩阵变换器的输出电压性能[6]。

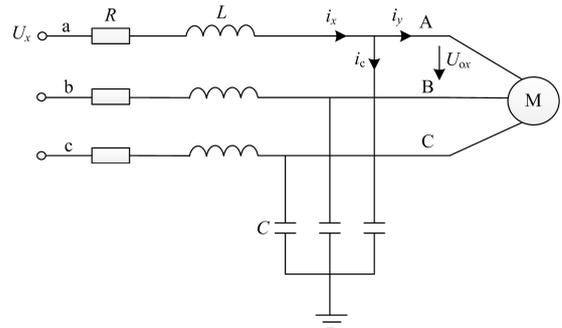


图2 “虚拟逆变器”等效电路结构图

Fig. 2 Equivalent circuit structure of virtual inverter

### 2 自抗扰控制器结构

$N$ 阶自抗扰控制器结构如图3所示。

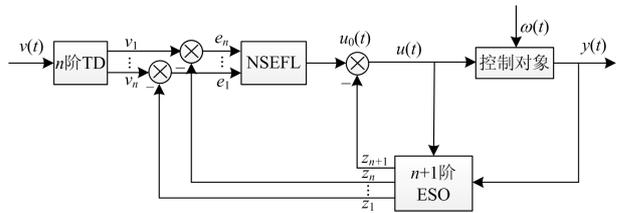


图3 自抗扰控制器结构图

Fig. 3 ADRC controller structure diagram

自抗扰控制器由三个重要组成部分:跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)、扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)和非线性状态误差反馈器(Nonlinear State Error Feedback, NLSEF)[8-9]。自抗扰控制器的三个重要组成模块可根据不确定非线性对象设计为如下形式:

$$(1) \text{ TD} \quad \begin{cases} \dot{v}_1(t) = v_2 \\ \dot{v}_2(t) = -rsat(v_1 - v, v_2, r_0, h) \end{cases} \quad (2)$$

$$(2) \text{ ESO} \quad \begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}fal(e, a_{01}, \delta_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fal(e, a_{02}, \delta_1) + b_0u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal(e, a_{03}, \delta_1) \end{cases} \quad (3)$$

$$(3) \text{ NLSEF} \quad \begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - v_1 \\ u_0 = \beta_1fal(e_1, a_1, \delta) + \beta_2fal(e_2, a_2, \delta) \\ u = u_0 - z_3 / b_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$fal(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} |x|^\alpha \operatorname{sgn}(x), & |x| \geq \delta \\ \frac{x}{\delta^{1-\alpha}}, & |x| < \delta \end{cases} \quad (5)$$

$$sat(x, \delta) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(x), & |x| \geq \delta \\ \frac{x}{\delta}, & |x| < \delta \end{cases}$$

上式: TD安排过渡过程  $v_1(t)$  用来跟踪输入信号  $v(t)$ ,  $v_2(t)$  是输入信号  $v(t)$  消除噪声后的微分, 参数  $r$  为跟踪速度的快慢因子; ESO是将被控输出系统受到的内外扰动扩张成为新的状态量, 再按照特定误差反馈机制补偿系统扰动,  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$  为扩张状态观测器ESO针对不同系统的可调参数; NLSE是将  $v(t)$ 、 $v_2(t)$ 、 $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$  形成的误差信号通过非线性函数进行组合, 产生系统的控制量  $u(t)$ ;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为非线性误差反馈控制器NLSEF针对不同系统的可调参数<sup>[10]</sup>。

由于自抗扰控制器在实际应用中参数多、调参困难等问题, 影响自抗扰控制器在矩阵变换器系统中的应用。目前, 应用比较多的参数整定方法有经验公式法、时间尺度法以及众多的智能算法, 而其中经验公式法和时间尺度法仅对特定对象具有明显效果, 不具有广泛适用性<sup>[11]</sup>。不过从分析自抗扰控制器的结构和原理来看, ADRC 的各组成部分各自独立地实现相应功能, 这样可以按照“分离性原理”独立整定参数。基于这一点, 本文利用人工蜂群算法对 ADRC 参数进行了寻优研究。

### 3 基于蜂群算法的 ADRC 参数优化

Karaboga 于2005年提出了人工蜂群算法(Artificial

Bee Colony Algorithm, ABC)及其改进算法<sup>[12]</sup>。蜂群算法成功解决了函数极值优化问题, 而且还与其他智能群优化算法进行了对比, 证明人工蜂群算法更适合处理工程中的优化问题。

基于蜂群算法的自抗扰控制系统结构如图 4 所示。

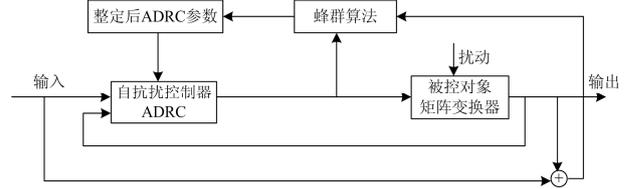


图 4 参数优化结构图

Fig. 4 Parameter optimization structure diagram

蜂群算法首先引入蜜源这个概念, 它代表空间内的各种所有可能解, 与函数值有关, 在多峰函数求最值中, 用适应度函数值来衡量蜜源量。再引入三种蜂, 分别是采蜜蜂、观察蜂、侦察蜂。采蜜蜂负责采集蜜源, 一个蜜源对应一个采蜜蜂, 采蜜蜂通过摇摆舞与其他蜜蜂分享信息。侦察蜂守候在摇摆舞区通过收到采蜜蜂分享的信息去选择蜜源, 采蜜蜂不断更新位置并选择更好的蜜源。侦察蜂的任务是在蜂巢附近随机发现一个新位置, 根据蜜源的收益度选择最优解<sup>[13-14]</sup>。

本文控制的矩阵变换器所选用的为一阶自抗扰控制器。根据研究, 跟踪微分器TD相对独立、参数整定比较简单, 参数  $r$  的改变不会对系统的动静特征产生影响, 原则是在保证精度的情况下尽量使  $r$  减小, 所以当  $r$  选取好以后就可以固定下来; 扩张观测器ESO的参数比较难调, 参数较多, 可以根据文献<sup>[15]</sup>中介绍的动态参数确定, 具有通用性; 误差反馈器NLSEF类似于用非线性PD控制器控制的一个线性“积分串联型”对象, 参数  $\beta_1$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\eta$ 、 $b_0$  中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\eta$  皆可根据控制精度决定,  $\beta_1$  是相应的比例和微分增益, 对控制器性能起着重要作用, 为可调参数,  $b_0$  不仅与所研究的受控对象有关, 而且还是ESO和NLSEF的共有参数, 不同的  $b_0$  值决定了扰动在不同范围内的变化。由此分析, 自抗扰控制器众多参数中只需将参数  $\beta_1$ 、 $b_0$  利用蜂群算法进行寻优整定<sup>[16-17]</sup>。

#### 3.1 适应度函数选择

在评价控制器性能时, 适应度函数起着评估个体性能指导搜索的作用, 为了使控制系统能对输入信号有好的响应, 能较好地跟踪控制器中安排的过渡过程, 引入一个控制系统瞬时误差  $e(t)$ , 选取绝对误差的时间积分作为目标函数评价系统动态性

能。适应度函数为

$$\begin{cases} F = \frac{1}{J} \\ e(t) = u_{(t)} - v_{1(t)} \\ J = \int_t^{t+T} |e(t)| dt \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $e(t)$  为系统的瞬时误差;  $u_{(t)}$  为系统的输出量, 在计算过程中会出现超调情况, 为此将超调量也当作是最优解的一种, 有

$$\begin{cases} \text{IF: } e(t) < 0 \\ J = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)|t + \omega_2 |e(t)|) dt \\ \omega_2 \gg \omega_1, \quad \omega_2, \omega_1 \text{ 为权值} \end{cases} \quad (7)$$

根据此适应度函数, 最优的控制参数是适应度函数  $F$  最大时所对应的控制器参数。

### 3.2 自抗扰控制器参数整定过程

在人工蜂群算法中, 蜜源位置对应优化问题的一个可能解, 蜜源的花蜜量对应着适应度的函数值, 采蜜蜂的数量或者观察蜂的数量等于解的数目。初始化之后, 所有的蜜蜂都是侦察蜂, 随机选择蜜源, 并且在蜜源附近产生一个限定区域, 如果发现新蜜源花蜜量比旧的蜜源蜜量高, 则由贪婪准则, 对新蜜源位置进行记忆<sup>[18-23]</sup>。所有采蜜蜂完成搜索之后与观察蜂分享蜜量信息, 蜜源收益度越高, 吸引蜜蜂概率越大。

一个蜜源被选择的概率可用式(8)表示。

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^N fit_n} \quad (8)$$

式中:  $fit_i$  表示第  $i$  个蜜源对应的适应度值;  $N$  为蜜源的总数, 也是采蜜蜂的数量。

在 ABC 算法中, 蜜源位置的变更公式为

$$\text{new\_}X_i^j = X_i^j + \text{rand}() \cdot (X_i^j - X_k^j) \quad (9)$$

式中:  $j$  取值于  $\{1, 2, \dots, D\}$ ,  $k$  取值于  $\{1, 2, \dots, N_e\}$ , 且  $k$  不等于  $i$ ;  $k$  和  $j$  均随机生成;  $\text{rand}()$  为在  $(0, 1)$  之间随机产生的数;  $\text{new\_}X_i^j$  为新蜜源的位置;  $X_i^j$  为旧蜜源的位置。

基于人工蜂群算法的参数整定流程如图 5 所示。

适应度函数  $F$  的优化过程模仿了蜜蜂的采蜜行为, 蜂群在解空间中能找到最优的参数  $(\beta_1, b_0)$ 。定义参数  $(\beta_1, b_0)$  为 ABC 算法的蜜源位置, 设蜜蜂总数为  $N_s$ , 其中采蜜蜂数量为  $N_e$ , 观察蜂数量为  $N_u$ , 个体向量维度为  $D$ ,  $S = R^D$  为个体搜索空间。若  $X_i \in S (i \leq N_e)$  是  $N_e$  个个体, 则  $X = (X_1, X_2, \dots, X_{N_e})$

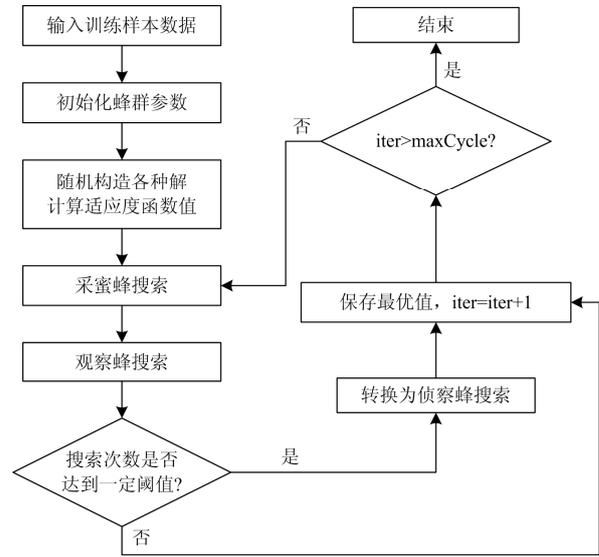


图 5 参数寻优流程图

Fig. 5 Flow chart of parameter optimization

代表一个采蜜蜂种群。则目标函数优化过程可描述如下。

(1) 初始时刻  $(n=0)$ , 按照参数  $(\beta_1, b_0)$  随机构造  $N_s$  条解  $X = (X_1, X_2, \dots, X_{N_s})$ , 根据  $(\beta_1, b_0)$  内的各种解得出的所有适应度值  $F$ , 将排名前一半的参数  $(\beta_1, b_0)$  作为初始采蜜蜂种群  $X(0)$ , 随机产生各种解  $X_i^j$  为

$$X_i^j = X_{\min}^j + \text{rand}(0, 1)(X_{\max}^j - X_{\min}^j) \quad (10)$$

式(10)中,  $j$  取值于  $\{1, 2, \dots, D\}$ ,  $\text{rand}(0, 1)$  为在  $(0, 1)$  之间随机产生的数。

(2) 第  $n$  只采蜜蜂  $X(n)$  在原来参数  $(\beta_1, b_0)$  领域内随机寻找新的参数  $(\beta_1, b_0)$ , 搜索方式可通过式(11)寻找。

$$\text{new\_}X_i^j = X_i^j + \text{rand}() \cdot (X_i^j - X_k^j) \quad (11)$$

式(11)中,  $j$  取值于  $\{1, 2, \dots, D\}$ ,  $k$  取值于  $\{1, 2, \dots, N_e\}$ , 且  $k$  不等于  $i$ 。  $k$  和  $j$  均随机生成, 必须保证搜索到的新参数属于  $S$ 。

(3) 计算每只采蜜蜂找到  $\text{new\_}X_i$  (新参数  $(\beta_1, b_0)$ ) 的适应度函数值  $F(\text{new\_}X_i)$  和原来的蜜源  $X_i$  (旧参数  $(\beta_1, b_0)$ ) 的适应度函数值  $F(X_i)$ , 若  $F(\text{new\_}X_i) > F(X_i)$ , 用新的新参数  $(\beta_1, b_0)$  代替原来的旧参数  $(\beta_1, b_0)$ , 否则保留旧参数  $(\beta_1, b_0)$ 。其概率分布为

$$P\{T_s(X_i, \text{new\_}X_i) = \text{new\_}X_i\} = \begin{cases} 1, & F(\text{new\_}X_i) \geq F(X_i) \\ 0, & F(\text{new\_}X_i) < F(X_i) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P\{T_s(X_i, \text{new\_}X_i) = \text{new\_}X_i\}$  为采蜜蜂寻找  $\text{new\_}X_i$  代替  $X_i$  的概率。

(4) 每只观察蜂根据概率  $P_i$  选择要跟随的采蜜蜂, 且在其领域内同采蜜蜂一样寻找新的参数 ( $\beta_1$ 、 $b_0$ ), 计算其适应度函数值, 判断是否保留参数 ( $\beta_1$ 、 $b_0$ )。选择概率如式(13)。

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^N fit_n} \quad (13)$$

式中:  $fit_i$  是第  $i$  个参数 ( $\beta_1$ 、 $b_0$ ) 对应的适应度函数值;  $N$  为参数 ( $\beta_1$ 、 $b_0$ ) 的总数, 也是采蜜蜂的数量。

(5) 同第 2 步和第 3 步, 保存目前最好的蜜源, 并记下其适应度值以及相应的参数。

(6) 当某只采蜜蜂在当前参数 ( $\beta_1$ 、 $b_0$ ) 附近内搜索次数  $Bas$  超过一定  $Limit$  时(根据控制对象和适应度函数选择) 仍然没有找到更好的参数 ( $\beta_1$ 、 $b_0$ ), 放弃当前的参数 ( $\beta_1$ 、 $b_0$ ), 转换为侦察蜂, 重新开始选择随机参数 ( $\beta_1$ 、 $b_0$ )。

$$\begin{cases} X_i(n) = X_{\min} + \text{rand}(0,1)(X_{\max} - X_{\min}), \\ Bas_i \geq Limit \end{cases} \quad (14)$$

(7) 若迭代次数超过一定值时, 则循环结束并保存目前最优适应度值及相应的参数, 否则转向第 2 步。模拟仿真适应度函数(如图 6 所示), 确定在实验期间蜂群算法最大迭代次数可以选择 120 次。

矩阵变换器闭环控制框图如图 7 所示。

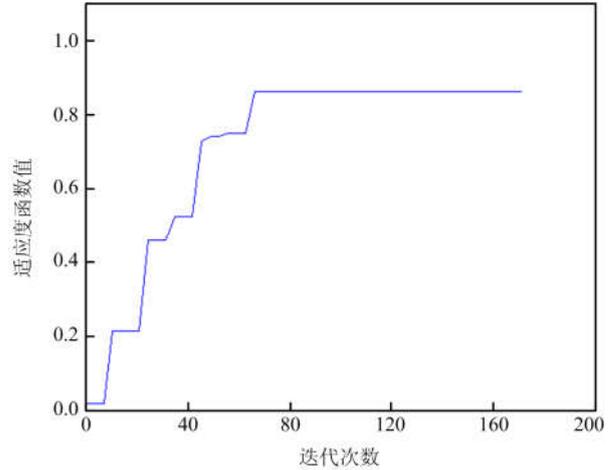


图 6 适应度函数蜂群算法迭代

Fig. 6 Fitness function ABC algorithm iteration

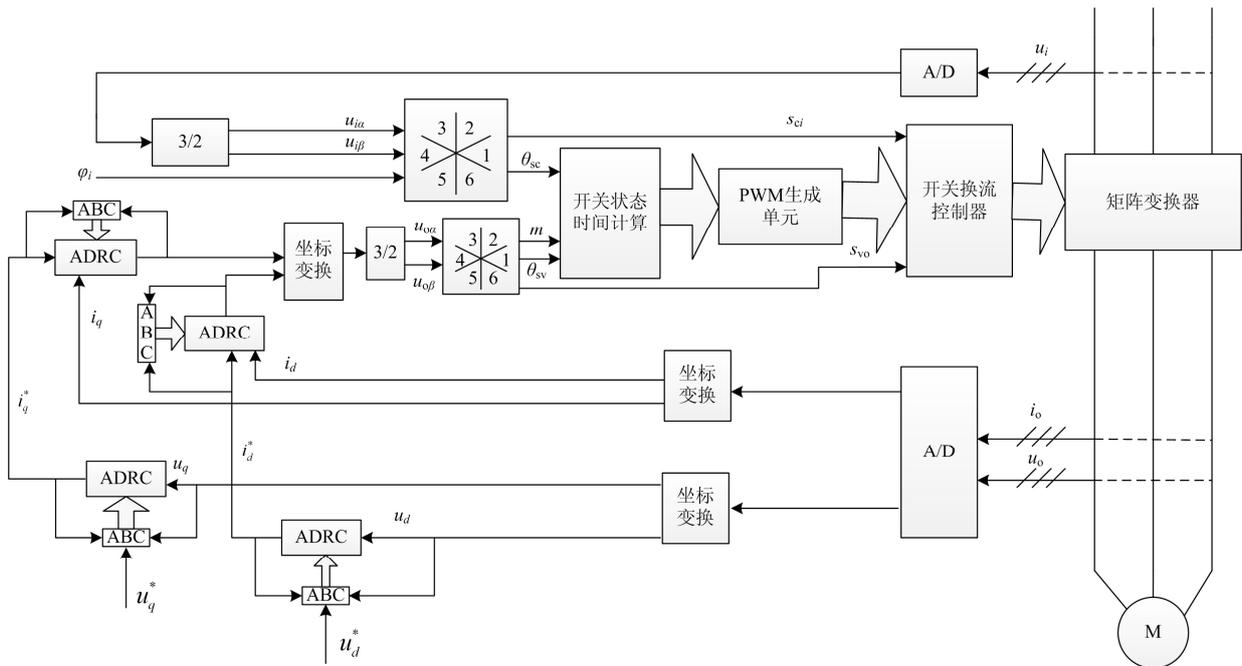


图 7 矩阵变换器闭环控制框图

Fig. 7 Closed loop control block diagram of matrix converter

采集输出端电压经过坐标变换得到反馈信号 ( $u_d, u_q$ ) 与期望输出电压 ( $u_d^*, u_q^*$ ) 送入两个一阶自抗扰控制器中, 运用人工蜂群算法对自抗扰控制器参数进行优化, 得到虚拟逆变级输出电流参考值

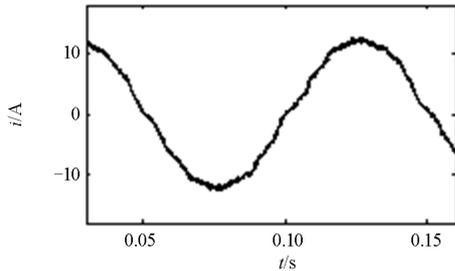
( $i_d^*, i_q^*$ ), 再与实际输出电流值 ( $i_d, i_q$ ) 送入经人工蜂群算法整定参数后的一阶自抗扰控制器, 得到的控制量再经过坐标变换, 形成虚拟逆变侧输出电压参考矢量, 根据间接空间矢量原理计算出开关状态时

间,以 PWM 形式传送给开关换流控制器实现对 MC 的闭环调制。

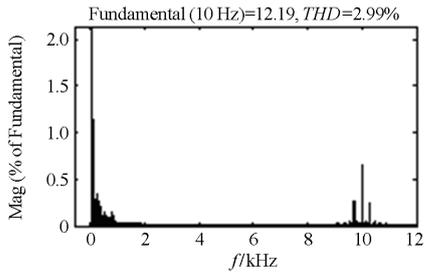
### 4 仿真与实验

#### 4.1 仿真实验与结果分析

本文以矩阵变换器的虚拟逆变级输出电流为对象设计闭环控制系统。运用 Matlab 软件对其进行仿真实验。仿真参数设置: 矩阵变换器输入电压为 110 V, 频率为 50 Hz, 期望输出的电压为 20 V(即  $u^* = 20\text{ V}$ ), 频率为 10 Hz; 输入侧滤波器  $L_f = 1\text{ mH}$ 、 $C_f = 10\text{ }\mu\text{F}$ ; 每项负载  $R = 2\text{ }\Omega$ 、 $L = 2.5\text{ mH}$ ; 自抗扰控制器参数设置  $r = 5 \times 10^6$ 、 $\beta_{01} = 3000$ 、 $\beta_{02} = 1200$ 、 $\alpha_1 = 0.2$ 、 $\eta_1 = 0.01$ 、 $\alpha_2 = 0.2$ 、 $\eta_2 = 0.01$ ; 人工蜂群参数: 蜂群总数为 30, 采蜜蜂规模为 15, 最大迭代次数为 120 次, 局部搜索优化值不变次数限制为 5 次。仿真结果如图 8 和图 9 所示。



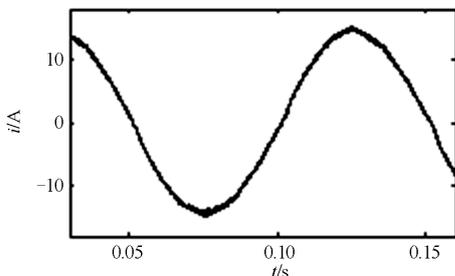
(a) 传统调参输出电流



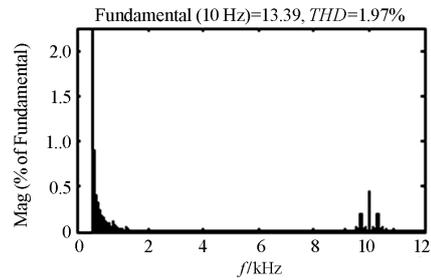
(b) 传统调参输出电流频谱分析

图 8 传统调参输出电流及其频谱分析

Fig. 8 Output current and its spectrum analysis of traditional parameter adjustment



(a) ABC 算法调参输出电流



(b) ABC 算法调参输出电流频谱分析

图 9 ABC 算法调参输出电流及其频谱分析

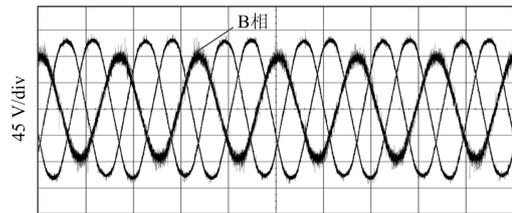
Fig. 9 Output current and its spectrum analysis of ABC algorithm parameter adjustment

图 8 是手动设置参数时的矩阵变换器输出电流, 图 9 是利用人工蜂群算法寻优参数时的矩阵变换器输出电流。通过两图对比, 谐波畸变率由 2.99% 降低到 1.97%, 从仿真结果可以看出, 使用人工蜂群算法寻优后的矩阵变换器输出电流波形的质量有了一定的改善, 并且在仿真过程中, 人工蜂群寻优更加方便快捷。

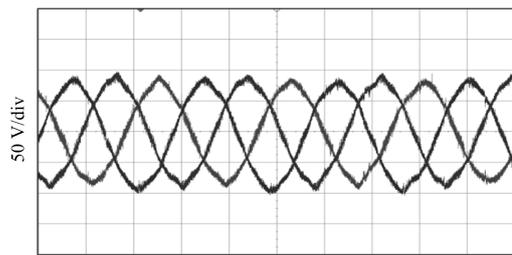
#### 4.2 实验与结果分析

为了进一步验证算法的可行性, 搭建了以 DSP+FPGA 为核心的矩阵变换器 ADRC 控制系统的实验装置。在同等的实验条件下对自抗扰控制下的矩阵变换器分别进行了人工调参和人工蜂群算法寻优参数的实验。实验参数设置为: 输入侧三相对称电压为 120 V/50 Hz, 滤波器  $L_f = 5\text{ mH}$ ,  $C_f = 4\text{ }\mu\text{F}$ , 等效电阻  $R = 13\text{ }\Omega$ , 期望输出电压为 80 V/30 Hz。

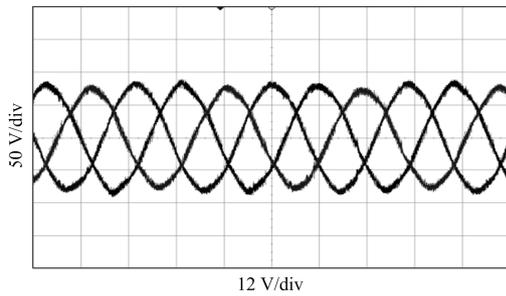
三相输入电压不平衡时(B 相为不平衡相, 不平衡度为 15%), 实验波形如图 10 所示。



(a) 三相输入不平衡电压



(b) 传统调参输出电压



(c) ABC算法调参输出电压

图 10 实验电压波形

Fig. 10 Experimental voltage waveform

对比图 10(b)、图 10(c)输出电压波形图可以看出, 当电网输入侧三相电压不平衡时, 自抗扰控制器控制下的矩阵变换器都可以很好地抑制三相电压不平衡, 得到对称的正弦三相输出电压, 但是采用人工蜂群算法优化后的输出电压波形较之传统调参波形更加平滑, 输出电压波形的失真度很小, 波形质量要优于手动调参的矩阵变换器, 并且在实验过程中, 人工蜂群算法优化的矩阵变换器更加便捷。说明使用人工蜂群算法选优参数不仅能保证矩阵变换器的输出电压质量, 而且还可以使调参工作更加便捷。

## 5 结论

本文在自抗扰控制下的矩阵变换器闭环系统的基础上, 利用人工蜂群算法对一阶自抗扰控制器的扩张状态观测器和非线性状态误差反馈器  $\beta_1$ 、 $b_0$  两个参数进行寻优调整, 能够快速、高效地完成对 ADRC 参数的整定。实验结果证明: 采用人工蜂群算法对矩阵变换器的 ADRC 参数寻优的闭环系统中, 在电网输入侧电压波动以及其他影响输出电压质量等干扰的情况下仍能保证系统的稳定输出性能。验证了算法对矩阵变换器闭环系统参数优化的有效性和便捷性。

## 参考文献

- [1] 黄一, 薛文超, 赵春哲. 自抗扰控制纵横谈[J]. 系统科学与数学, 2011, 31(9): 1111-1129.  
HUANG Yi, XUE Wenchao, ZHAO Chunzhe. An overview of ADRC[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2011, 31(9): 1111-1129.
- [2] 胡风革, 吴旭升, 聂子玲. 矩阵变换器自抗扰控制策略研究[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(3): 14-18.  
HU Fengge, WU Xusheng, NIE Ziling. Control strategy for matrix converter based on auto disturbance rejection controller[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2015, 27(3): 14-18.
- [3] 马星河, 谭国俊, 汪旭东, 等. 一种改进的矩阵变换器双电压合成控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 126-132, 138.  
MA Xinghe, TAN Guojun, WANG Xudong, et al. An improved two line voltage synthesis control strategy of matrix converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 126-132, 138.
- [4] 刘丁, 刘晓丽, 杨延西. 基于 AGA 的 ADRC 及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1909-1911.  
LIU Ding, LIU Xiaoli, YANG Yanxi. Research on ADRC and its application based on AGA[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(7): 1909-1911.
- [5] 王凯. 基于自适应遗传算法的整车主动悬架自抗扰控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
WANG Kai. Active disturbance rejection control of vehicle active suspension based on adaptive genetic algorithm[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [6] 马星河, 张少辉, 李自强, 等. 一种用于矩阵变换器的简化非线性自抗扰控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 48-60.  
MA Xinghe, ZHANG Shaohui, LI Ziqiang, et al. A simplified nonlinear auto disturbance rejection control strategy for matrix converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 48-60.
- [7] 张晓峰, 夏益辉, 乔鸣忠, 等. 矩阵变换器间接空间矢量逆级过调制策略优化设计[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 40-44, 77.  
ZHANG Xiaofeng, XIA Yihui, QIAO Mingzhong, et al. Optimal design of indirect space-vector over-modulation strategy for inverter stage of matrix converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 40-44, 77.
- [8] GUO Q L, TAN W. Load frequency control of hybrid power systems via active disturbance rejection control (ADRC)[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 325-326: 1145-1151.
- [9] JIAO Leiming, LUO Yanhong, JIA Hong. Vector control strategy of PMSM servo system based on auto-disturbances rejection controller [C] // 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC 2017), December 15, 2017, Chengdu, China., 1332-1336.
- [10] GARRAN P T, GARCIA G. Design of an optimal PID controller for a coupled tanks system employing ADRC[J]. IEEE Latin America Transactions, 2017, 15(2): 189-196.
- [11] 孙凯, 黄立培, 梅杨. 矩阵式变换器驱动异步电机调速系统的非线性自抗扰控制[J]. 电工技术学报, 2007,

- 22(12): 39-45.
- SUN Kai, HUANG Lipei, MEI Yang. A nonlinear auto-disturbance rejection control for matrix converter fed induction motor drive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 39-45.
- [12] 国海, 葛红娟, 许宇翔. 不平衡输入 3-1 矩阵变换器输入电流谐波抑制研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6511-6517.
- GUO Hai, GE Hongjuan, XU Yuxiang. Research and implementation of the input current harmonic suppression of the input current for the 3-1 matrix converter under unbalanced input[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6511-6517.
- [13] 丁晓慧, 刘俊杰, 邢强. 基于自适应局部均值的 EMD 方法及其在谐波检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 17-25.
- DING Xiaohui, LIU Junjie, XING Qiang. Adaptive local mean based empirical mode decomposition and its application in harmonic detections[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 17-25.
- [14] 于佐军, 秦欢. 基于改进蜂群算法的 K-means 算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(1): 181-185.
- YU Zuojun, QIN Huan. K-means algorithm based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Control and Decision, 2018, 33(1): 181-185.
- [15] 康忠健, 陈学允. 非线性扩张状态观测器的一种设计方法[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(3): 199-203.
- KANG Zhongjian, CHEN Xueyun. A design method of nonlinear extension state observer[J]. Electric Machines and Control, 2001, 5(3): 199-203.
- [16] 秦全德, 程适, 李丽, 等. 人工蜂群算法研究综述[J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 127-135.
- QIN Quande, CHENG Shi, LI Li, et al. Artificial bee colony algorithm: a survey[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(2): 127-135.
- [17] 刘三阳, 张平, 朱明敏. 基于局部搜索的人工蜂群算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 123-128.
- LIU Sanyang, ZHANG Ping, ZHU Mingmin. Artificial bee colony algorithm based on local search[J]. Control and Decision, 2014, 29(1): 123-128.
- [18] 程辉, 杨克立, 王克军, 等. PMSG 风力发电系统转速估计算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 24-29.
- CHENG Hui, YANG Keli, WANG Kejun, et al. Study on a rotor speed estimation algorithm of PMSG wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 24-29.
- [19] KARAMAN E, FARASAT M, TRZYNADLOWSKI A M. A comparative study of series and cascaded Z-source matrix converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5164-5173.
- [20] 刘宇凯, 胡志坚, 索江镭, 等. 基于果蝇优化算法的广域阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 25-29.
- LIU Yukai, HU Zhijian, SUO Jianglei, et al. Design method of wide-area damping controller based on FOA algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 25-29.
- [21] 吕志鹏, 蒋雯倩, 单杨, 等. 基于负荷虚拟同步机的三相电压型 PWM 整流器[J]. 供用电, 2017, 34(4): 47-51.
- LÜ Zhipeng, JIANG Wenqian, SHAN Yang, et al. Three phase boost type pwm rectifier based on virtual synchronous machine technology[J]. Distribution and Utilization, 2017, 34(4): 47-51.
- [22] 崔屹, 周建萍, 王涛, 等. 基于模糊 PI 算法的微电网主从控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(6): 36-39.
- CUI Yi, ZHOU Jianping, WANG Tao, et al. Master-slave control strategy for micro-grid based on fuzzy PI algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(6): 36-39.
- [23] 唐酿, 朱以顺, 盛超, 等. 基于自抗扰控制技术的虚拟同步机无频差控制方法[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 61-66, 73.
- TANG Niang, ZHU Yishun, SHENG Chao, et al. Non-frequency difference control of virtual synchronizer based on ADRC technology[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 61-66, 73.

---

收稿日期: 2018-08-12

作者简介:

马星河(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型变频器; E-mail: maxinghe@hpu.edu.cn

张振东(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电气传动。E-mail: 18236617222@163.com

(编辑 魏小丽)