高技术通讯 2022 年 第32卷 第6期:640-646

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2022.06.010

基于改进 PSO 算法的三相可控整流器控制策略研究①

李璐璐② 贾文超③ 王 蕾

(长春工业大学电气与电子工程学院 吉林 130000)

摘 要 双环控制的三相可控整流器具有优良的鲁棒性,但控制器参数选择会在很大程度上影响控制系统的动态性能和静态性能。本文提出了一种利用改进粒子群优化(PSO)算法实现控制器参数自整定,该算法结构简单、参数少、计算速度快、优化效果好。仿真结果表明,应用该算法整定的控制器参数,可使三相可控整流器的总谐波畸变率(THD)明显降低,并使其抗负载扰动能力有效增强。

关键词 三相可控整流器;双环控制;参数整定;改进粒子群优化(PSO)算法

0 引 言

基于全控型电力电子器件的整流系统拓扑结构趋于成熟,相关控制策略的研究也较多。双环控制策略能够实现无静差跟踪,使被控系统具有优良的动静态性能,而比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制器参数的选择直接决定了双环控制策略的性能。

传统方式整定控制器参数只能获得相对意义上的最佳参数组合,智能控制的发展为 PID 控制器的参数整定提供了新的途径。文献[1]提出了基于梯形隶属度函数的模糊控制算法及仿人智能思想的优化改进算法,其应用于 PCR 芯片控制系统后,控制效果优良,但模糊规则复杂、计算量大。文献[2]在传统遗传算法基础上做改进,增加了选择、交叉、变异过程,虽然提高了控制效果,但是解码过程复杂、计算量大。文献[3]通过 3 种不同的适应度函数来评估基于粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)的 PID 控制系统。文献[4]对比了 PSO 算法在迭代过程中间代数的 PID 参数结果,说明了 PSO 算法具有遗传算法和模糊控制算法所缺乏的快速性与简易性,适用于控制过程参数的快速整定优化。因此本文引入 PSO 算法来解决参数整定的问题。

鉴于 PSO 算法的优化性能主要取决于惯性权重的取值,本文引入一种改进的 PSO 算法,使得改进后的 PSO 算法具有较强的全局搜索能力,可快速收敛于控制器最佳参数组合。计算机仿真结果表明,采用本算法的脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)可控整流器,相较于传统的双闭环控制策略具有优良的动静态性能,且抗扰能力及谐波畸变率均得到有效提升。

1 电压型三相可控整流器建模与分析

电压型三相 PWM 整流器拓扑结构如图 1 所示。Usa、Usb、Usc 为电网电压,ia、ib、ic 为电网电流,La、Lb、Lc 为交流侧电感,可以滤除谐波,提高整流系统的动态性能,实现网侧电流正弦化运行,同时能够抑制网侧电流突变。C 为直流母线电容,利用电容元件储能,直流侧将呈现出低阻抗的电压源特性[5-6]。

由于电压型三相 PWM 整流器的开关桥臂互补导通,定义开关函数:

$$S_k = \begin{cases} 1 & k \text{ 相上桥臂导通,下桥臂关断} \\ 0 & k \text{ 相下桥臂导通,上桥臂关断} \end{cases} \tag{1}$$

其中 $k = a、b、c$。

① 吉林省科技发展计划(20100914)资助项目。
② 男,1995 年生,硕士生;研究方向:数字传动控制与电力节能技术;E-mail: l13613403937@163.com。
③ 通信作者,E-mail: 2534504647@qq.com。
(收稿日期:2021-06-07)

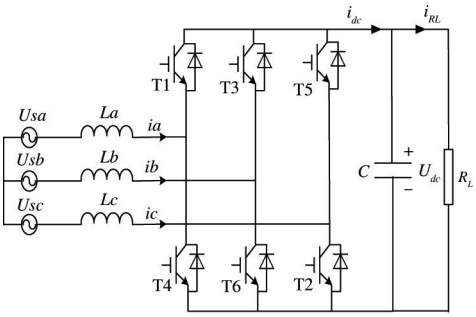


图 1　三相整流系统拓扑结构

在三相静止坐标系中,整流器的状态方程为

$$\begin{cases} L_s \dfrac{\mathrm{d}i_s}{\mathrm{d}t} = u_{sk} - u_{dc}\left(S_k - \dfrac{1}{3}\sum\limits_{k=a}^{c} S_k\right) \\ C\dfrac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t} = \sum\limits_{k=a}^{c} i_k S_k - \dfrac{u_{dc}}{R_L} \end{cases} \tag{2}$$

虽然上述状态方程物理意义清晰且明确,但输入为时变交流量,在控制过程中,无法达到无静差跟踪。因此,采用坐标变换,将三相静止坐标系中的基波交流量转化为两相旋转坐标中的直流量,其数学模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} L_s \dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} = u_{sd} - u_d + \omega L_s i_q \\ L_s \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} = u_{sq} - u_q - \omega L_s i_d \\ C\dfrac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{3}{2}(i_d S_d + i_q S_q) - \dfrac{u_{dc}}{R_L} \end{cases} \tag{3}$$

式(3)表明,d、q 轴电流之间存在耦合效应,所以本文电流内环采用前馈解耦的方式来实现对 d、q 轴电流的单独控制。依据 PI 控制思想,电流内环设计为

$$\begin{cases} u_{dref} = -\left(K_{pi} + \dfrac{K_{ii}}{s}\right)(i_{dref} - i_d) + u_{sd} + \omega L_s i_q \\ u_{qref} = -\left(K_{pi} + \dfrac{K_{ii}}{s}\right)(i_{qref} - i_q) + u_{sq} - \omega L_s i_d \end{cases} \tag{4}$$

2　双环控制策略数学建模

2.1　电流环的设计

d、q 轴电流解耦之后,可以实现单独控制,以 d 轴电流作为参考,考虑到数字控制过程中的采用、计算过程的滞后效应,将 PWM 增益等效为如图 2 所示的模型。

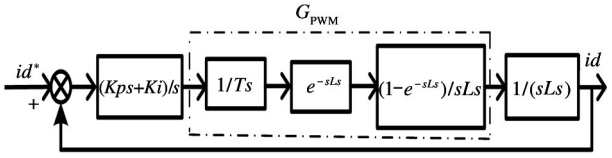


图 2　电流环控制模型

PWM 调制部分传递函数 G_{PWM} 为

$$G_{PWM} = \frac{1}{Ts} \cdot e^{-sTs} \cdot \frac{1 - e^{-sTs}}{s} \approx e^{-1.5sTs} \tag{5}$$

利用泰勒级数展开 G_{PWM} 可得:

$$G_{PWM} = e^{-1.5sTs} \approx \frac{1}{1 + 1.5sTs} \tag{6}$$

为了简化分析,电流内环采用比例控制器,电流内环的传递函数为

$$GI(s) = \frac{K_{pi}}{sLs} e^{-1.5sTs} \tag{7}$$

由于数字控制的延时、计算的影响,过高的 K_{pi} 会导致相位裕度降低,在截止频率处,系统的环路增益幅值为 1,即:

$$|GI(s)| = \frac{K_{pi}}{2\pi f_{ci} Ls} = 1 \tag{8}$$

考虑到采样频率足够高,略去高次项,简化后的电流内环闭环传递函数为

$$Wci(s) = \frac{1}{\dfrac{1}{2\pi f_{ci}} s} \tag{9}$$

2.2　电压环的设计

电压外环可以实现直流电压的稳态无误差跟踪,连续域模型如图 3 所示。

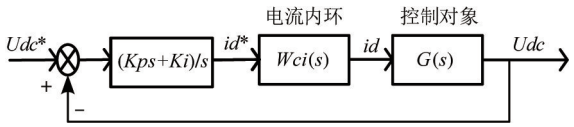


图 3　电压外环控制模型

由功率平衡关系,d-q 坐标系瞬时功率平衡方程为

$$\begin{cases} \dfrac{3}{2}(u_{sd} i_d + u_{sq} i_q) = \dfrac{3}{4} L_s \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(i_d^2 + i_q^2) \\ \qquad\qquad + \dfrac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \\ \dfrac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = u_{dc} C \dfrac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t} + \dfrac{u_{dc}^2}{R_L} \end{cases} \tag{10}$$

当电网电压矢量定向时，$Usq=0$，当整流器运行于单位功率因数时，$iq=0$，对状态变量 id、iq、udc 在静态工作点附近做小信号扰动：

$$\begin{cases} i_d = I_d + \hat{i}_d \\ i_q = I_q + \hat{i}_q \\ u_{dc} = u_{dc} + \hat{u}_{dc} \end{cases} \tag{11}$$

分离直流分量和高阶微分项，进行拉氏变换，可得到有功电流与直流母线电压的传递函数，即电压外环的控制对象 $G(s)$：

$$G(s) = \frac{\frac{3R_L e_d}{4U^* dc}\left(1 - \frac{L_s I_d}{e_d}s\right)}{1 + 0.5R_L C_{dc}s} \tag{12}$$

3　基于 PSO 算法的控制器参数整定

现在智能化寻优算法有许多，如粒子群算法、遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法等，由于 PSO 算法具有计算效率高、收敛速度快、程序易实现等特点，在优化问题中得到了广泛应用。

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1 r_1 (P_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (G_{id}^t - x_{id}^t) \tag{13}$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \tag{14}$$

式(13)和式(14)为粒子速度与位置迭代公式，其中，x_{id}^t 表示第 i 个粒子在第 t 次迭代中第 d 维上的位置信息，v_{id}^t 表示第 i 个粒子在第 t 次迭代中第 d 维上的速度信息。C_1 和 C_2 为学习因子，w 表示惯性权重[7-9]。

3.1　惯性权重的改进设计

由上述的更新公式中可知，原始数据直接影响粒子群优化算法的迭代过程。惯性权重 w 能够使得粒子保持原有的运动趋势，如果惯性权重的取值为线性函数，将会导致优化过程容易陷入局部最优的情况；因此，理想的惯性权重 w 应满足：在迭代初期，w 取值大且变化率小，确保在优化过程刚始时，全局搜索能力强于局部搜索能力，避免陷入局部最优的麻烦；在迭代后期，w 取值小但是变化率大，局部搜索能力强于全局搜索能力，加快优化过程的收敛速度。依据上述变化规律，文献[10]提出了一种基于在第一象限椭圆方程的非线性惯性权重改进策略。用迭代次数代替 X 轴变量，w 代替 Y 轴变量，w 随着迭代次数变化的过程可以拟合上述规律：

$$w(k) = (w_{\max} - w_{\min})\sqrt{1 - \frac{t^2}{T_{\max}^2}} + w_{\min} \tag{15}$$

上述策略相比于传统的非线性惯性权重，其优化效果得到明显提升[10]，但是，在迭代后期，惯性权重的值会变得很小，整个寻优算法的学习率变小，陷入局部最优。

为了解决上述问题，本文设计了一种改进的非线性惯性权重衰减策略，该策略可以进一步增强 PSO 算法优化参数的能力和灵活性，描述如下：

$$w(t) = \frac{5}{9}\left(\frac{0.00225(400 - A^2)}{\sqrt{B}} + 0.72\right) \tag{16}$$

其中，

$$A = \frac{\mathrm{mod}(10t - 1, 200) + 1}{10},\ B = \left[\frac{10t - 1}{200} + 1\right],$$

mod(,)为取余函数，[ ]为取整函数。

惯性权重的值变化如图 4 所示，可以看出，在某些特定的时刻，惯性权重的值会变大，有助于跳出局部最优的位置，可以提高改进 PSO 算法的寻优能力。

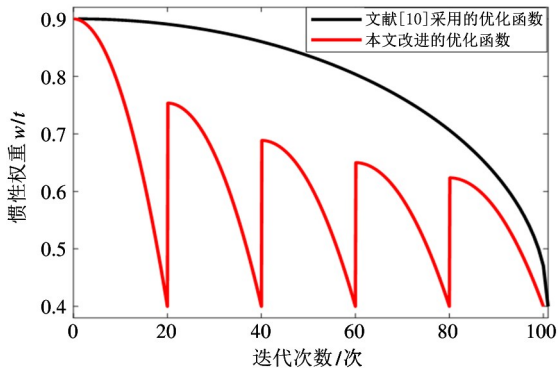


图 4　两种非线性改进函数惯性权重变化

3.2　适应度函数的设计

控制器性能的优劣程度通常借助一些性能指标来进行评价。为了使得系统输出不出现较大的波动，本文采用时间乘以误差绝对值积分指标(integral time absolute error, ITAE)作为 PSO 粒子的适应度函数。第 i 个粒子的适应度函数为

$$fitness = \int_0^{\infty} |e(t)|\, t\mathrm{d}t \tag{17}$$

其中 $e(t)$ 为系统 t 时刻的误差。

4 改进 PSO 算法参数优化性能分析

为了验证改进 PSO 算法对双环控制器参数的优化能力,利用模拟软件对上述电压外环简化模型建立控制系统,采用时间 ITAE 做适应度函数,运行结果如表 1 所示。

系统输出响应曲线见图 5,采用 PSO 算法的系统输出曲线相比于采用传统方式整定控制器参数的系统输出曲线,无超调量产生而且系统动态调整时间更短;采用本文改进 PSO 算法的系统输出响应相比于文献[10]中 PSO 算法的系统具有更快的响应速度。上述论述验证了本文提出的改进 PSO 算法应用于控制器参数优化的科学性与可行性,有利于提高控制系统的动静态性能。

表 1 PSO 算法优化控制器参数结果

算法类型	惯性权重	迭代次数	最小适应度值	控制器参数最优组合		
				Kp	*Ki*	*Kd*
标准 PSO	0.8	20	0.0012	0.2941	3.1626	0
改进 PSO	$w(k)$	20	0.00053608	0.4128	4.3755	0

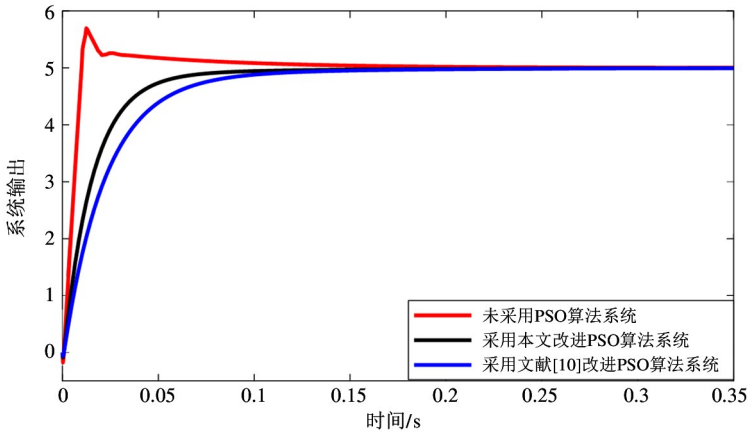


图 5 系统输出响应曲线

5 整机仿真验证及分析

由于三相 PWM 整流器的输入始终为时变的交流量,同时整流器又是互相耦合的多阶非线性时变系统,设计控制系统时,需要利用坐标变换将三相时变交流量转换为 *dq* 同步旋转坐标系中的两相直流量 *Id* 和 *Iq*,这样在降低模型阶次的同时也能实现简化控制系统设计[11]。在三相 PWM 整流装置的控制系统中,采用前馈解耦的控制方式[12]。

图 6 为基于改进 PSO 算法的反环控制策略原理图,其中改进 PSO 控制策略就是采用 PSO 算法使电压外环控制器的参数实现优化整定。将输出直流电压的 ITAE 指标作为改进 PSO 算法的适应度函数,在优化过程中,将 ITAE 指标实时返回改进 PSO 的优化程序。控制器参数在预定的范围内,进行自动寻优,设定迭代次数及迭代指标。在迭代完成后,改进 PSO 算法将寻找到的最优参数组合赋值给电压外环控制器,整个三相可控整流系统将会在改进参数的控制器下运行。

在模拟软件中搭建模型。参数设置为 PSO 学习因子 $C_1 = C_2 = 1.5$,初始惯性权重为 0.9,终止惯性权重为 0.4,粒子群规模为 100,粒子的维度为 3,进化代数为 5 代,*Kp* 的范围为[0,4];*Ki* 的范围为[0,4]。三相整流系统的输入为平衡三相 220 V 交流电压,交流侧滤波电路电感 *L* 为 0.008 H,电阻 *R* 为 0.2 Ω,直流侧电容 *C* 为 0.001 F。采用 IGBT 可控元件与续流二极管并联作为开关器件。

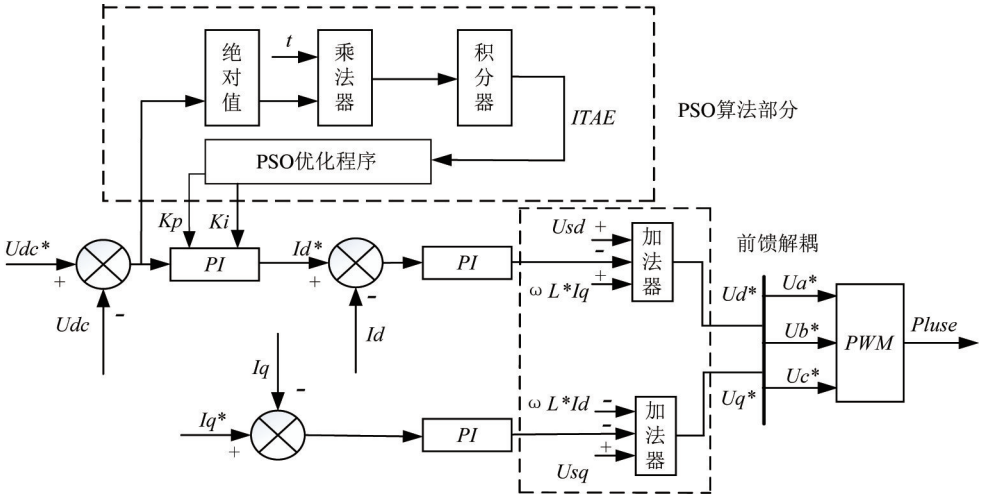


图 6　基于改进 PSO 算法的双环控制策略原理图

运行粒子群优化程序，得到如表 2 所示的控制器组合参数。

表 2　不同控制策略下控制器参数

电压外环控制策略类型	比例系数 *Kp*	积分系数 *Ki*
未采用 PSO 算法	1.8	3.0
采用改进 PSO 算法	3.1822	3.0239

在上述控制器参数组合的作用下得到系统的输出响应，如图 7 和图 8 所示。

图 7 和图 8 为三相可控整流器的直流端负载电压与电流，可以看出，采用改进 PSO 算法的系统（改进系统）的动静态性能要优于未采用 PSO 算法的系统（传统系统）。为了更加清晰地看到系统动静态性能的改善，选取[0,0.05] s、[0.1,0.2] s 时间段进行快速傅里叶变换（fast Fourier transform，FFT）分析结果如图 9 和图 10 所示。

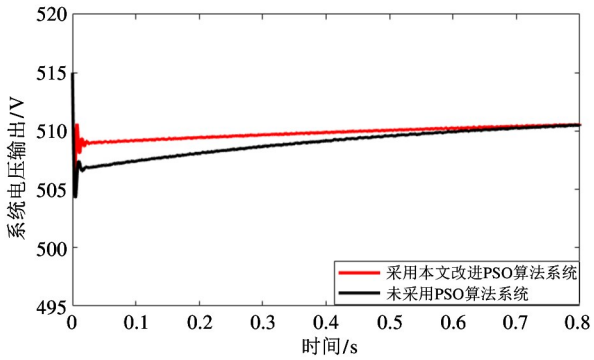


图 7　阻性负载电压输出曲线

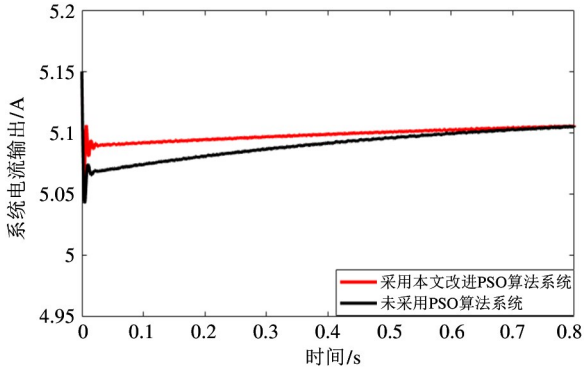
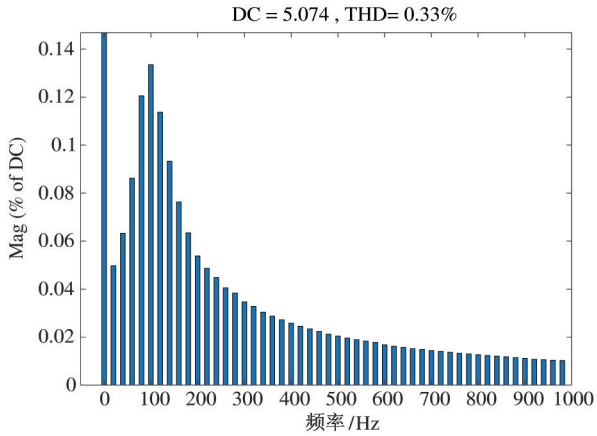


图 8　阻性负载电流输出曲线

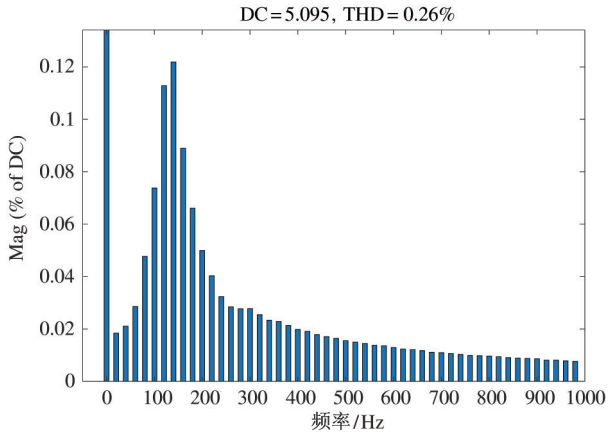
从 FFT 分析结果可以看出：传统系统在调整初期负载直流电流的有效值为 5.074 A，THD = 0.33%；在达到稳态时，负载电流有效值为 5.083 A，THD = 0.05%；改进系统在调整初期负载直流电流的有效值为 5.095 A，THD = 0.26%；在达到稳态时，负载电流有效值为 5.098 A，THD = 0.02%。对于参考直流电压 510 V 而言，传统系统稳态时电压为 507.8 V，改进系统稳态时电压为 509.3 V，由上述数据可以看出，改进系统在动静态性能上均优于传统系统。

为了验证系统在负载突变情形下的动态性能，在原有参数保持不变的情形下，在 0.3 s 时给原负载并联 1200 Ω 电阻，系统输出电流波形如图 11 所示。

在 0.3 s 时刻，由于负载阻值的变化，负载电流发生突变，系统瞬时出现动态，系统能否在最短的时间内达到新的稳态对系统至关重要。由图 11所示

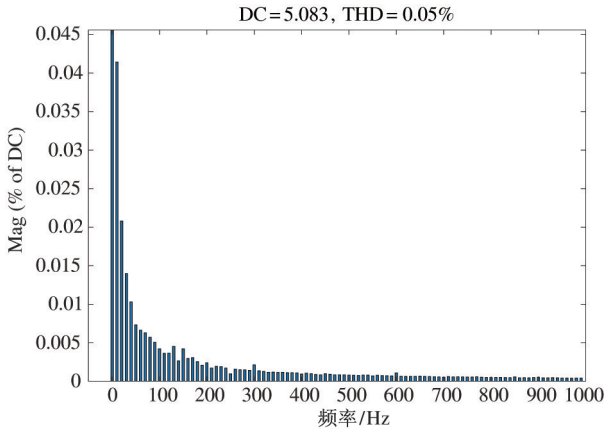


(a) 未采用 PSO 算法系统

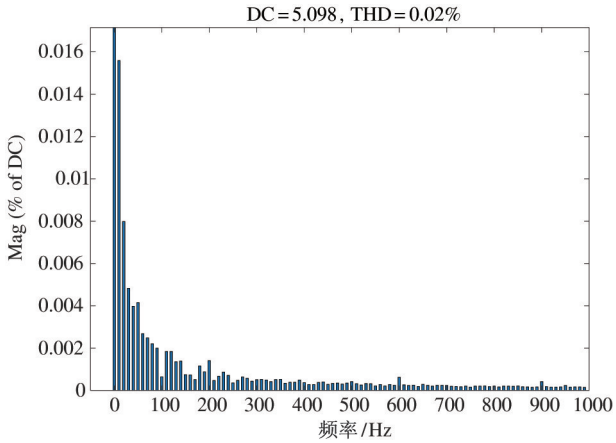


(b) 采用本文改进 PSO 算法系统

图 9 [0, 0.05] s FFT 分析



(a) 未采用 PSO 算法系统



(b) 采用本文改进 PSO 算法系统

图 10 [0.1,0.2] s FFT 分析

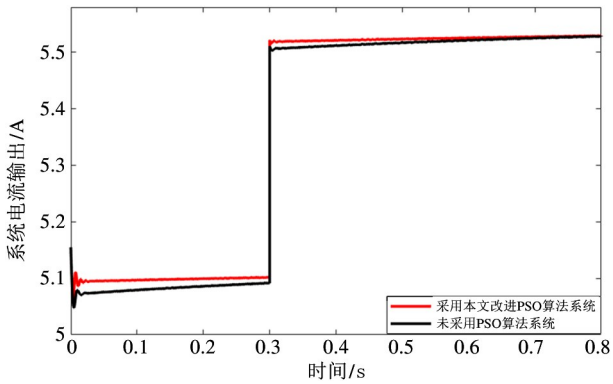


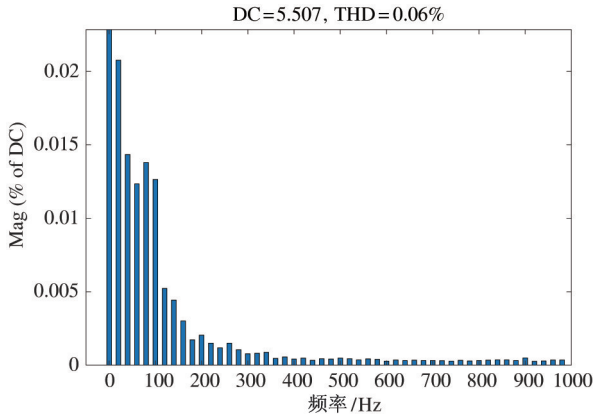
图 11 负载扰动情形下系统电流输出波形

的系统电流的输出波形可以看出,改进系统能够以更小电流脉动、更短调节时间使得系统再次达到稳态。为了更加清晰地分析突变时刻两个系统的差异,进行[0.3,0.35] s 时间段的 FFT 分析,结果如图 12所示。

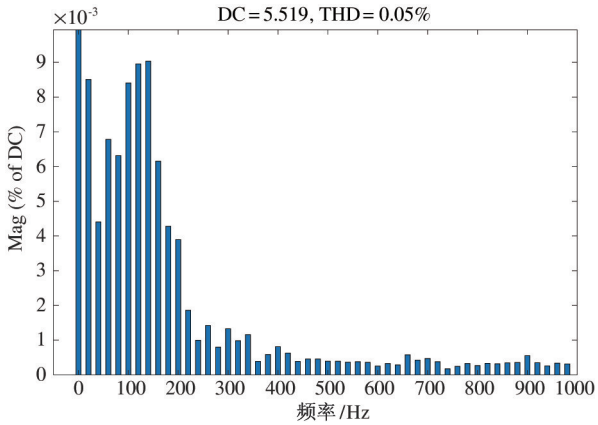
上述的 2 组实验结果表明,相比于传统系统,改进系统在负载电流输出的有效值和总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)参数两方面性能更加优越,证明了本文设计的改进 PSO 算法应用于三相可控整流器的控制策略是有效的。

6 结 论

本文在分析传统双环控制参数整定费时耗力的问题上,研究了具有参数优化能力的 PSO 算法。针对标准 PSO 算法惯性权重影响优化效果的问题,采用改进惯性权重的 PSO 算法并将其应用于传统双环控制策略中。对实验结果对比分析表明,采用本文改进PSO算法的三相可控整流系统输出有效值



（a）未采用 PSO 算法系统



（b）采用改进 PSO 算法系统

图 12　负载扰动情形下系统电流输出波形 FFT 分析

提高、总谐波畸变率降低、抗负载扰动能力增加，具有更优秀的动静态性能，同时也验证了本文提出的基于改进 PSO 算法的三相可控整流器控制策略的科学性与可行性。

参考文献

[1] 马小雨. 模糊 PID 复合控制算法的有效改进[J]. 现代电子技术, 2016, 39(4):153-155

[2] 刘亚洲,齐言强,张志毅. 基于遗传算法的 PID 控制参数研究分析[J]. 新技术新工艺, 2018(3):18-21

[3] 唐玉兰,徐明亮,梅娟,等. 粒子群算法在 PID 控制器参数整定中的研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(34):221-224,236

[4] 王玮. 基于 PSO 粒子群算法的 PID 参数整定优化[J]. 科技信息, 2011(13):509-510

[5] 贺诗明,熊健,代大一,等. 三相电压型 PWM 整流器建模、控制及稳定性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(6):2049-2057

[6] 姬军鹏,华志广,胡雪利,等. 基于 PSO 的无源电力滤波器支路拓扑的优化设计[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(2):231-237

[7] 闫敏. 基于多样性控制策略的粒子群算法研究及应用[D]. 无锡:江南大学物联网工程学院, 2020

[8] STIMAC G, BRAUT S, ZIGULIC R. Comparative analysis of PSO algorithms for PID controller tuning[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(5):928-936

[9] 彭子舜,戴瑜兴,毕大强,等. 基于改进 PSO 的变流器控制参数优化方法[J]. 现代电子技术, 2016, 39(22):9-13

[10] 余潇. 改进粒子群 PI 控制在三相 PWM 整流器中的应用[D]. 湘潭:湘潭大学信息工程学院, 2017

[11] 靳小宁. 单相逆变器双闭环控制策略对比研究[J]. 科技创新与应用, 2020(9):130-131

[12] 郭强,刘和平,彭东林,等. 电流型 PWM 整流器多环控制策略及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5):1193-1202

Research on control strategy of three-phase controlled rectifier based on improved PSO algorithm

LI Lulu, JIA Wenchao, WANG Lei

(School of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130000)

Abstract

The dual-loop control three-phase controllable rectifier has excellent robustness, still, the choice of controller parameters will affect the dynamic and static performance of the control system to a great extent. In this paper, an improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed to realize the controller parameter self-tuning. The algorithm has a simple structure and fewer parameters, its calculation speed and optimization effects are suitable. The simulation results show that the practical values of load voltage and current of the three-phase controllable rectifier are increased. The total harmonic distortion (THD) of the three-phase controlled rectifier is small, and the ability to resist load disturbance is enhanced.

Key words: three-phase controllable rectifier, dual-loop control, parameter setting, improved particle swarm optimization (PSO) algorithm