

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108216

改进天牛须算法优化自抗扰 APF 直流侧电压控制*

李 镇 潘若妍 朱 霄 周振雄

(北华大学电气与信息工程学院 吉林 132013)

摘要: 针对有源电力滤波器(APF)的直流侧电压控制问题,基于传统比例积分(PD)控制方法控制精度低,存在超调和快速性这一矛盾,自抗扰控制(ADRC)因引入干扰补偿,大大提高其抗干扰能力。但目前单一的优化算法整定ADRC参数不能提高控制精度及响应速度,现提出通过改进天牛须算法(BAS)来优化自抗扰控制器参数的方法,将变异环节引入天牛须算法,使其跳出局部搜索,更快搜索得到全局最优解,并提高精度的同时兼顾响应速度,搭建MATLAB/Simulink仿真以及充电桩谐波治理的APF实验平台进行验证,通过实验验证,该算法优化后能够减少超调,实现电流的精确跟踪,其谐波率从3.32%降低到1.34%,证实算法的有效性。

关键词: 有源滤波器;改进天牛须算法;自抗扰控制;电力系统;参数优化;谐波治理

中图分类号: TM721 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Dc side voltage control of APF based on improved bat algorithm optimized active disturbance rejection

Li Zhen Pan Ruoyan Zhu Xiao Zhou Zhenxiong

(College of Electrical and Information Engineering, Beihua University, Jilin 132013, China)

Abstract: Aiming at the DC side voltage control problem of APF of active power filter, the traditional PI control method has the contradiction of low control precision and high speed. Automatic disturbance rejection control (ADRC) greatly improves its anti-interference ability by introducing interference compensation. But at present a single setting ADRC parameter optimization algorithm can not improve the control precision. In order to solve the problem that the BAS algorithm is easy to fall into local optimum, the mutation link is introduced into the algorithm to make it jump out of local search and get the global optimal solution more rapidly. By building MATLAB/Simulink simulation and APF experimental platform to verify that the algorithm optimization can reduce overshoot, achieve accurate current tracking and reduce the harmonic rate that from 3.32% to 1.34%.

Keywords: active power filter; BAS; ADRC; power system; algorithm improvement; harmonic control

0 引言

随着新能源的发展,光伏发电等技术的推广使有源滤波器应用越来越广泛。现在主要光伏发电是并网发电,同时工业上大规模非线性负载的应用,直接导致大量的谐波电流在电网中产生,从而对电力系统造成污染,谐波治理已迫在眉睫。当前,滤波器为主要的谐波治理手段,其中有源滤波器(active power filter, APF)^[1-2] 比较于无源滤波器,对电网中各次谐波都能进行很好的补偿而被广泛使用与研究。

为获得好的补偿效果,需要对直流侧电压进行精确的

追踪^[3],传统的比例积分(proportional integral, PI)控制因超调和快速性的矛盾问题,很容易出现超调,抗干扰能力差,控制精度低等,不能很好地满足实际应用中的控制要求,自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)因引入扰动补偿,抗干扰能力更强,得到广泛应用。现阶段自抗扰控制参数整定方法很多^[4-9],文献[4]提出的改进粒子群算法整定ADRC参数,其收敛过早,优化精度不高;文献[5]提出萤火虫算法来整定ADRC参数,但求解速度慢;文献[6]提出的改进鲨鱼算法,容易陷入局部最优,且勘察能力不足。文献[7]提出改进灰狼算法在ADRC中的应用,但位置更新策略并不完善,使得灰狼狩猎时易陷入

收稿日期:2021-10-28

* 基金项目:国家自然科学基金(61179012)、吉林省发改委项目(2019C058-1)、吉林省教育厅项目(JJKH20200042KJ)、吉林省科技厅项目(20200404203YY)、吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20180342KJ)、北华大学研究生创新项目(2021010)资助

停滞。文献[8]提出模糊布谷鸟算法,但收敛速度慢以及局部收敛等。其他研究人员采用各种智能算法进行研究,或提高了精度,或提高了响应速度,但两者兼得并不理想,针对此问题,现提出一种改进天牛须算法来优化整定自抗扰控制,与其他智能优化算法比较,因为天牛须搜索不需要一个群体,所用代码简略,降低了运行过程中的运算量。对于天牛须算法容易陷入局部搜索,本文将变异环节引入该算法中,使其有机率跳出局部搜索,得到全局最优解,参数调整更具优势。本研究希望更精确的控制直流侧电压使谐波跟踪更精确快速,治理效果更好。通过设计改进天牛须算法(beetle antennae search, BAS)来优化参数达到目的,并针对充电桩谐波搭建了实验平台来验证,结果看谐波率从 3.32% 降低到 1.34%,治理效果达到预期,验证方案的有效性,对后续谐波的更好治理提供了思路。

1 APF 系统结构及原理分析

图 1 为有源滤波器的原理,其中 e_k 和 i_{sk} ($k = a, b, c$) 分别为电网电压和电网电流, i_{Lk} ($k = a, b, c$) 代表非线性负载电流, i_{ck} ($k = a, b, c$) 表示系统输出的补偿的电流。工作原理首先采集三相电流及电压,通过电流运算电路获取指令信号,并将其作为电流跟踪控制电路的输入信号得到补偿电流,之后由驱动电路产生驱动信号波,去控制逆变器开关管的通断,输出跟踪好的补偿电流,进而消除电网谐波。

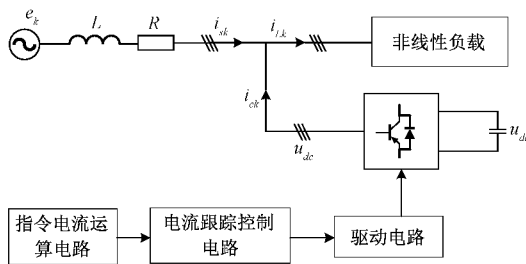


图 1 APF 原理

由基尔霍夫电流定理,可知:

$$i_s = i_L + i_c \quad (1)$$

将负载电流 i_{Lk} 分解为谐波分量 i_{Lh} 和基波分量 i_{Lf} , 即:

$$i_L = i_{Lh} + i_{Lf} \quad (2)$$

若理想补偿下,补偿电流 i_c 完美跟踪指令电流 i_{Lh} , 则满足:

$$i_c = -i_{Lh} \quad (3)$$

联立式(1)~(3)得出:

$$i_s = i_{Lf} \quad (4)$$

即负载电流中的基波分量与电网电流一致,故电网中并入有源电力滤波器后,其补偿电流抵消了电流中的谐波分量,从而抵消了电网中谐波部分的干扰,令电网中只含有正弦的基波电流,从而达到治理谐波的效果。

2 自抗扰控制器

自抗扰控制^[10]是韩京清教授研究 PI 后提出的一种效果更好的控制。通俗的讲,它就是 PI 的升级版,取其优,去其糟,提出将扰动补偿的思想加入其中。其主要组成有 3 部分。以二阶为例,其结构如图 2 所示。

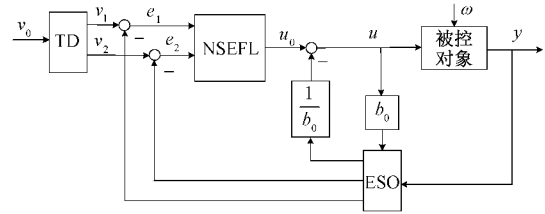


图 2 ADRC 结构

微分跟踪器 (tracking differentiator, TD) 主要为解决 PI 超调和快速性之间的矛盾而提出,通过对输入信号做平滑处理,以此得到平滑的跟踪信号及其微分信号;除此之外,该部分过滤高频噪声,用过滤后的信号进行后续计算能减少误差,益与精确控制。其中 v_0 为目标跟踪信号, v_1 为经过处理的跟踪信号, v_2 为 v_1 的微分。其数学公式如式(5)~(6)所示。

$$v_1(t+1) = v_1(t) + hv_2(t) \quad (5)$$

$$v_2(t+1) = v_2(t) + hfst(v_1(t) - v_0, v_2(t), r, h_0) \quad (6)$$

扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 核心在于将扰动补偿引入其中,综合评估系统内的扰动和系统外的扰动,将总扰动估计后通过反馈添加补偿给系统,借此消除扰动的干扰。其公式为式(7):

$$\begin{cases} \epsilon = z_1(t) - y(t) \\ z_1(t+1) = z_1(t) + h(z_2(t) - \beta_{01}\epsilon) \\ z_2(t+1) = z_2(t) + h(z_3(t) - \beta_{02}fal(\epsilon, \alpha_1, \delta) + bu(t)) \\ z_3(t+1) = z_3(t) - h\beta_{03}fal(\epsilon, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (7)$$

非线性状态误差反馈控制律 (nonlinear state error feedback law, NSEFL) 主要是对观测到的误差信号进行非线性加权组合,其作用类比于 PI 控制器的线性加权,从而影响后续对扰动的补偿和控制。其公式为式(8)~(9):

$$\begin{cases} e_1 = v_1(t) - z_1(t) \\ e_2 = v_2(t) - z_2(t) \\ u_0 = \beta_1 fal(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2 fal(e_2, \alpha_2, \delta) \\ u(t) = u_0(t) - z_3(t)/b \end{cases} \quad (8)$$

$$fal(\epsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\epsilon|^\alpha \operatorname{sgn}(\epsilon), & |\epsilon| > \delta \\ \epsilon/\delta^{1-\alpha}, & |\epsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (9)$$

在图 2 中,将 TD 输出 v_2 和 v_1 , 接着通过 NLSEF 模块对 e_1 和 e_2 进行非线性组合,以此输出控制信号 u_0 ; ESO 跟踪输出 y 并估计各阶段状态 z_1, z_2 和总扰动补偿 z_3 , 参与后续补偿, b 为放大系数。

3 改进 BAS 算法的自抗扰控制优化

3.1 天牛须算法介绍

天牛须搜索算法^[11-12],是智能优化算法的一种。类比其他优化算法,该搜索算法不但不需要了解待优化函数的具体形态,并且所用代码简略,降低了运行过程中的运算量,使其运用广泛。

不同于其他动物觅食,天牛不是靠眼睛发现食物的,相反它依靠嗅觉来感官食物气味,食物的位置由食物气味的强弱来确定。天牛主要依靠头上的两只长触角工作,俩触角接收的气味强度不同,天牛接下来的移动方向由感知到的气味强度比较大的触角决定,就这样依次整定自己的位置,慢慢接近食物。将其抽象化,将食物的气味类比于一个函数,天牛的两个触角可以采集自身附近的气味值,最终在全局中将最大气味值对应的点搜索出来。参考天牛的这种行为,在函数寻优问题的应用上可以更加高效的实现。

在应用该算法时,为了简化模型,假设天牛的步长与其两须间距比值为一个固定常数,为方便计算天牛须的位置,同样假设天牛两个须位于质心两端,且天牛移动时其头是随机朝向的。定义 x 为质心坐标, x_l 为左须坐标, x_r 为右须坐标,其算法步骤如下。

1) 归一化天牛须朝向的随机向量

$$\vec{dir} = \frac{rand(k, 1)}{\|rands(k, 1)\|} \quad (10)$$

2) 创建天牛左右须的空间坐标

$$\begin{cases} x_u = x_t - d_t * \vec{dir} / 2 \\ x_r = x_t + d_t * \vec{dir} / 2 \end{cases} \quad (11)$$

3) 对于待优化的适应度函数 $f(x)$, 分别求其 $f(x_u)$ 和 $f(x_r)$, 比较左右适应度后, 决定下一步走向, 并迭代更新位置信息。

$$x_{t+1} = x_t + \delta_t * \vec{dir} * \text{sign}(f(x_r) - f(x_u)) \quad (12)$$

其中, δ_t 为步长, sign 为符号函数。

4) d_t 和 δ_t 随时间变化。变化原则如下:

$$d_t = \eta_d * d_{t-1} + 0.01 \quad (13)$$

$$\delta_t = \eta_\delta * \delta_{t-1} \quad (14)$$

其中, η_d 和 η_δ 为衰减系数, 一般取 0.95。

5) 最后判断是否满足迭代次数或精度等结束条件, 若不满足条件, 继续重复以上步骤, 直到满足。

3.2 BAS 的改进策略

针对天牛须算法容易陷入局部最优问题, 在 BAS 环节中加入变异环节, 让其容易跳出局部搜索, 获得全局最优解。具体考虑步长值减小到一定长度 h 时, 随机产生一随机数作为概率, 其小于定值 p 时, d_t 按照式(15)计算:

$$d_t = rand(1) \quad (15)$$

其次, BAS 算法中步长采用固定的衰减系数来进行迭代, 这样会导致前期衰减太快使搜索精度低, 找不到最优解, 而后期因衰减太慢, 拖慢其搜索速度, 并且会大大降低

搜索效率。为此, 采用动态衰减, 则:

$$\delta_t = \delta_{start} - \sqrt{\sin\left(\frac{t}{t_{max}} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \delta_{start} \quad (16)$$

其中, δ_t 为时刻 t 的步长, δ_{start} 为最初的步长, t_{max} 为最大迭代次数。

其改进的 BAS 流程如图 3 所示。

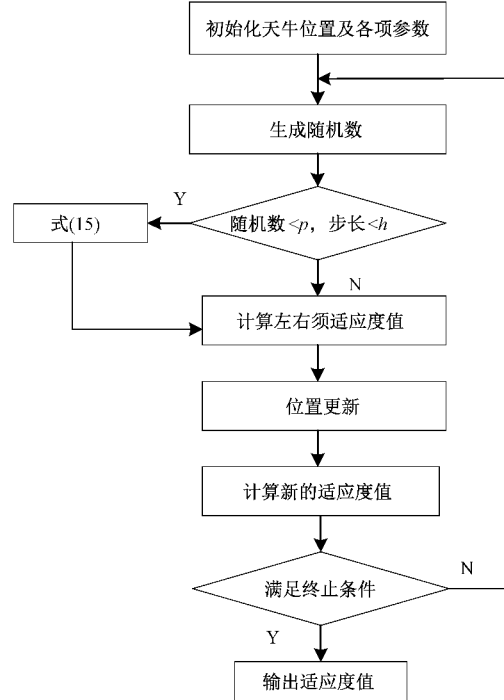


图 3 改进 BAS 的流程

3.3 天牛须优化自抗扰控制

因自抗扰参数整定困难, 采用改进天牛须算法来整定自抗扰参数。其主要整定参数有 ESO 中的 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 和 NSEFL 中的 β_1 、 β_2 、 b 。故设计 BAS 的维度为 6, 将天牛位置信息在这 6 个维度的分解量分别赋值 ADRC 中待优化的 6 个参数, 通过天牛的更新迭代, 从而逐渐逼近最优目标。算法寻优主要是通过多次迭代找到目标函数 ITAE 最小值时的 6 个对应参数值, 这就是 BAS-ADRC 的流程, 其系统框图如图 4 所示。

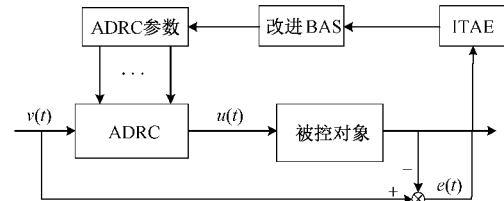


图 4 BAS-ADRC 系统框图

其具体算法流程为:

- 1) 对天牛位置及朝向等信息进行初始化, 计算左右须适应度值, 确定运动方向。
- 2) 更新天牛位置信息, 计算左右须适应度值, 确定下一

步运动方向。

3) 将 BAS 迭代的位置信息在 6 个维度上分解并赋值给待优化的 6 个参数, 并运行其模型, 计算适应度值。

4) 将 Simulink 获取的适应度值传递到 BAS 算法中, 将其与设置好的最小阈值进行比较, 若达到终止条件, 执行下一操作; 否则返回步骤 2)。

5) 最后得到 ADRC 中最优的 6 个参数, 结束仿真。其系统流程如图 5 所示

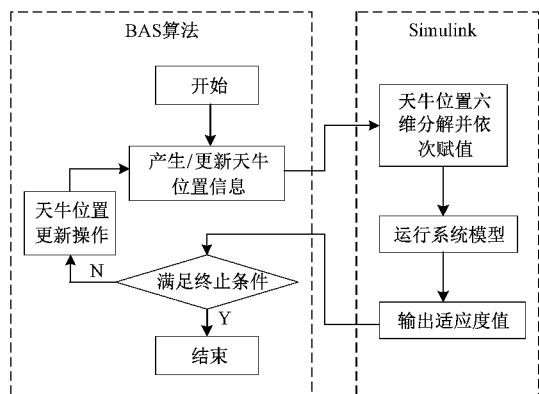


图 5 BAS-ADRC 系统流程

4 仿真结果与分析

根据谐波检测和补偿方法^[13-15], 有源滤波器仿真结构如图 6 所示。

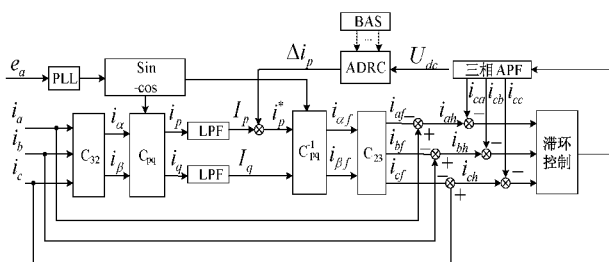


图 6 APF 系统图

经程序运行得出 β_{01} 取 10, β_{02} 取 200, β_{03} 取 0.1; NLSEF 中的 β_1 取 150, β_2 取 10, b 取 30。为了验证所提方案的可行性情况, 依照图 6 在 MATLAB/Simulink 模型中搭建仿真, 并且对仿真的波形结果进行分析, 证实其有效性。仿真中所使用的数据如表 1 所示。

表 1 参数设计

参数	数值
三相电源有效值/V	220
电网频率/Hz	50
交流侧滤波电感/mH	3
开关频率/kHz	10
直流侧电容值/mF	10
直流侧电压值/V	1 000
不控整流桥负载/ Ω	8

仿真结果的波形如图 7~14 所示。

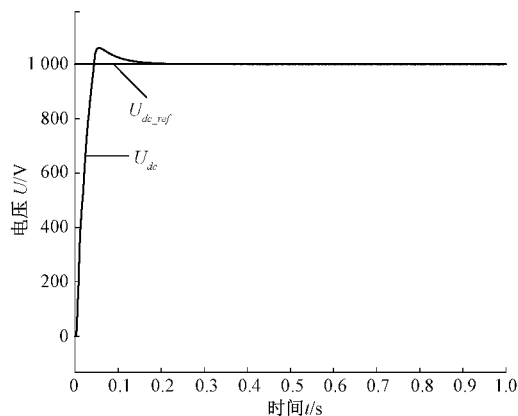


图 7 直流侧电压 PI 控制波形

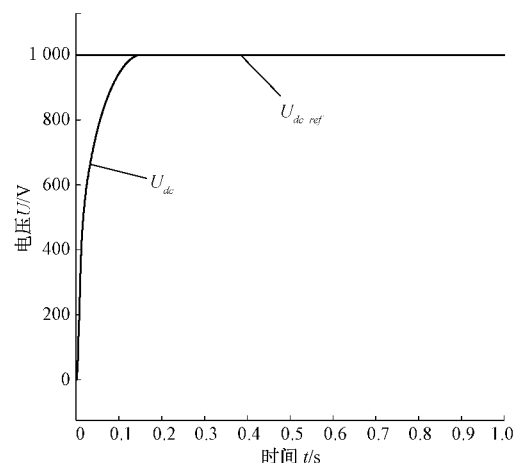


图 8 直流侧电压 ADRC 控制波形

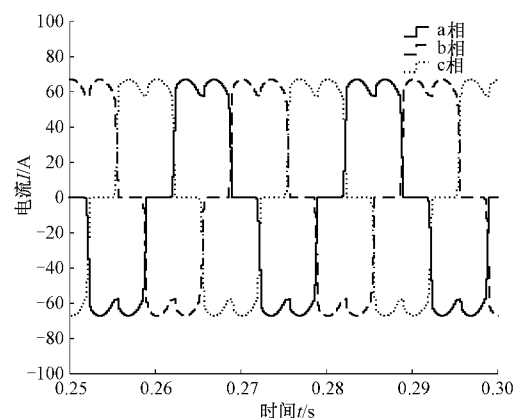


图 9 APF 补偿前电网电流

图 7 和 8 分别为采用传统 PI 控制和本文所提算法优化自抗扰控制下直流侧电压的给定波形及稳态运行时的波形对比图。分析发现, PI 控制有明显的超调现象, 响应时间在大约 0.2 s 时趋于稳定; 而天牛须算法优化的自抗扰控制不仅没有超调, 相比于 PI 控制, 在大约 0.15 s 趋于稳定, 比 PI 控制响应更快, 兼顾了超调和快速性。同样的其

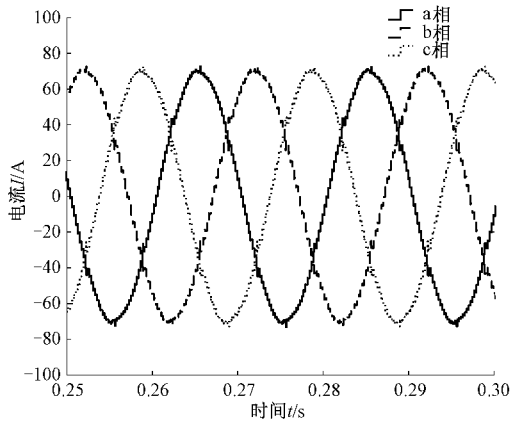


图 10 PI 控制的 APF 补偿后电网电流

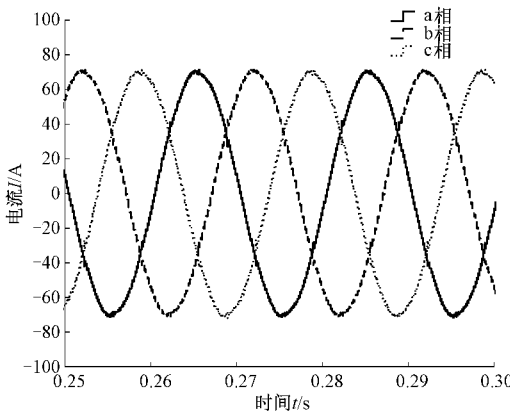


图 11 ADRC 控制的 APF 补偿后电网电流

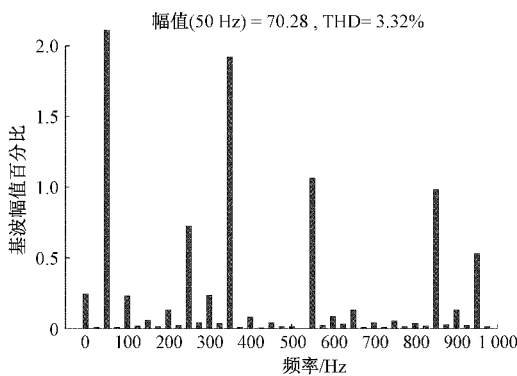


图 12 PI 控制 a 相电网电流 FFT 分析

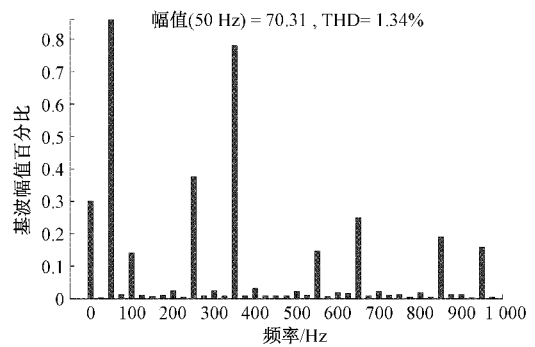


图 13 ADRC 控制 a 相电网电流 FFT 分析

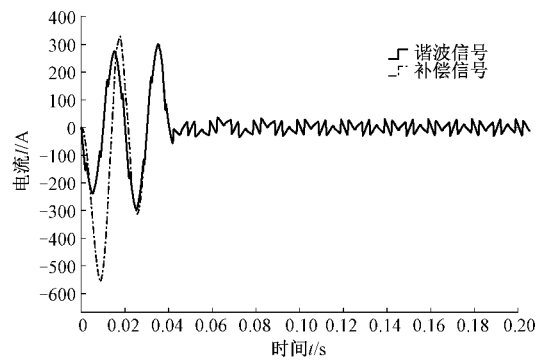


图 14 ADRC 控制的补偿电流跟踪波形

制下的电流傅里叶分析,图 13 为 ADRC 控制下的 a 相电网电流的傅里叶分析。通过图 10 和 11 的波形对比,运用整定的 ADRC 控制的 APF 系统电网侧的电流补偿明显比运用 PI 的补偿效果好。当然,图 12 可知 PI 控制下 a 相电流 THD 为 2.46%,相比于 PI 控制,图 13 中天牛须优化 ADRC 控制下 a 相电流 THD 为 1.34%,补偿效果更加显著。图 14 为 ADRC 的补偿电流跟踪波形,其补偿电流能很好的跟踪谐波电流,跟踪效果很好。

5 实验验证

为验证上述所提方案效果,针对市面上 14 kW 电动汽车充电桩的谐波治理,其电压 220 V,其最大充电电流为 60 A,设计搭建 APF 实验平台,其参数与仿真参数保持一致。其中控制芯片采用 TMS320F28335 型 DSP 芯片,IGBT 采用 FF400R12KE3 型号模块,驱动模块采用 2SD315A。采样频率设为 20 kHz。

实验波形如图 15 所示。图 15(a)为传统 PI 控制下的 a 相补偿后的电流波形图,图 15(b)为本文所提改进天牛须算法控制下的 a 相补偿后的电流波形图。从波形知后者电流波形更趋于正弦波,毛刺少,补偿效果更好,电流亦达到指定值,谐波率满足规定要求,验证了所提算法的有效性。

控制效果相对于 PI 更加显著,局部观察波形,本文所采用的该控制方法的静态误差比之 PI 控制更小。

图 9 所示波形为 APF 系统补偿以前的电网侧的电流值,显然因谐波的存在,其并非是我们所期望的正弦波,而是呈现马鞍波形。图 10 和 11 表示添加 APF 补偿系统后的电网侧的电流图,其中图 10 采用 PI 控制,而图 11 采用本文所提出的改进的自抗扰控制。补偿后的电网侧的 a 相电流其 FFT 分析如图 12 和 13 所示,其中图 12 表示 PI 控

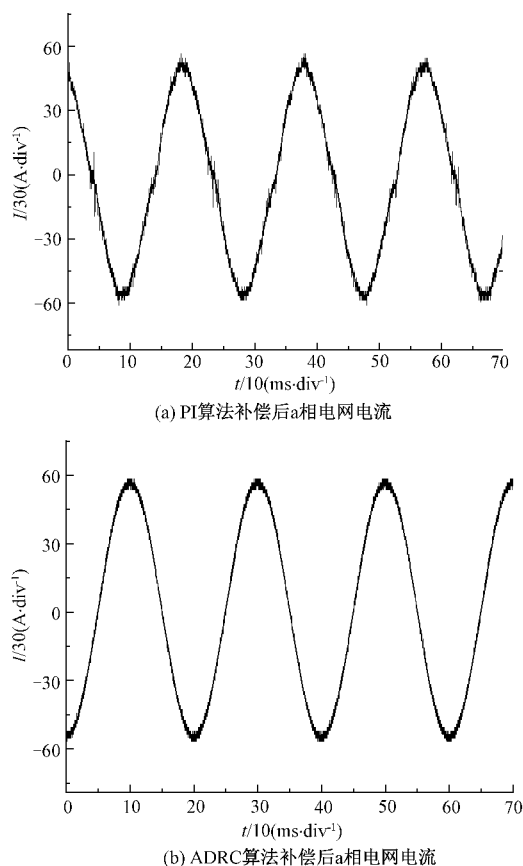


图 15 电压电流实验波形图

6 结 论

本文针对直流侧电压控制,提出了改进天牛须算法来整定优化 ADRC 参数的控制策略,研究发现该算法位置更新不完善,易延长搜寻时间及使算法陷入局部最优,本文研究将动态衰减、变异环节引入,来改善天牛须算法的速度和精度,得到最优参数。并搭建 MATLAB 仿真和实验平台,验证了其抗干扰能力强,无超调,响应速度快,达到预期结果,在谐波治理有一定的使用价值。为后续研究提供了参考。

参考文献

- [1] 刘少军,王瑜瑜.基于 DSP 的有源滤波控制系统的设计[J].国外电子测量技术,2019,38(10):97-101.
- [2] 杨剑锋,丁宇,刘洋,等.带有过渡过程的一阶自抗扰 SAPF 并网启动策略研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(7):140-147.
- [3] 黄海宏,韦伟,沈治萍,等.并联型有源电力滤波器电压环优化设计[J].电子测量与仪器学报,2015,29(10):1529-1535.

- [4] 蔡改贫,周小云,刘鑫.改进 PSO 算法优化的电液位置伺服系统自抗扰跟踪控制[J/OL].机械科学与技术,2021:1-8[2021-06-18].
- [5] 陈路伟.萤火虫算法在自抗扰控制器参数整定中方法研究[J].舰船电子工程,2019,39(2):32-34,37.
- [6] 魏立新,赵默林,范锐,等.基于改进鲨鱼优化算法的自抗扰控制参数整定[J].控制与决策,2019,34(4):816-820.
- [7] 宋文静,谢源,黄文君,等.改进灰狼优化算法在变桨距自抗扰控制中的应用[J].可再生能源,2020,38(7):905-910.
- [8] 田黄田,谢源,施铃丽,等.模糊布谷鸟算法在风电机组变桨自抗扰控制中的应用[J].太阳能学报,2021,42(1):222-229.
- [9] 刘欣,罗晓曙.附加惯性项神经网络云台自抗扰控制研究[J].现代电子技术,2020,43(3):154-157.
- [10] 白杰,朱日兴,王伟,等.基于线性自抗扰控制技术控制器设计的控制方法[J].科学技术与工程,2020,20(10):4149-4153.
- [11] 山石姣,马吉明,苏日建,等.基于天牛须和蝙蝠算法融合的 PID 参数整定仿真与研究[J].湖北民族大学学报(自然科学版),2020,38(4):390-396.
- [12] 陈荣,刘超. APF 电压空间矢量滞环控制方法研究[J].自动化仪表,2020,41(11):82-88.
- [13] 蔡星月,高云鹏,李云峰,等.基于自适应 TLS-ESPRIT 和改进全相位多密集谱间谐波检测[J].仪器仪表学报,2020,41(12):199-207.
- [14] 刘广朋,马星河.煤矿单相混合型有源电力滤波器复合控制策略研究[J].电子测量技术,2019,42(16):52-55.
- [15] 张森,石响,黄李泽.一种新型有源电力滤波器及其控制策略研究[J].电力电子技术,2021,55(8):82-84.

作者简介

李镇,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail:2578105934@qq.com

潘若妍,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail:550939227@qq.com

朱霄,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail:3327322659@qq.com

周振雄(通信作者),博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为电力电子技术及精密伺服驱动控制。

E-mail:742884852@qq.com