

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407896

基于输出电流自适应的最优控制参数自整定方法 *

袁硕^{1,2} 张小平^{1,2} 谈宜雯^{1,2} 李庆³

(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室 湘潭 411201; 3. 湖南湘电动力有限公司 湘潭 411101)

摘要: 针对基于比例积分-矢量比例积分复合控制的新型低纹波可调直流稳压电源在变负载工况下也即其输出电流变化时其输出电压纹波系数及稳态精度受其输出电流影响大的问题, 提出一种基于输出电流自适应的最优控制参数自整定方法。文中介绍了该直流稳压电源的拓扑结构及所采用的比例积分-矢量比例积分复合控制方法, 并以该控制方法各控制参数为优化对象, 以该直流稳压电源输出电压纹波系数和稳态精度为优化目标, 通过建立其优化对象与优化目标间的数学模型及其多目标优化适应度函数, 提出采用多目标人工蜂鸟优化算法对其控制参数进行优化, 并在此基础上研究确定了各最优控制参数随电源输出电流变化的函数关系式, 最后对其效果进行了仿真与实验验证, 同时与传统控制方法进行了对比分析。结果表明, 针对基于比例积分-矢量比例积分复合控制的新型低纹波可调直流稳压电源所提出的最优控制参数自整定方法, 能根据电源实际输出电流大小实时调整其最优控制参数, 从而使其在变负载工况下均能获得最佳的输出电压纹波系数和稳态精度, 如在该电源额定输出电流范围内任取 1.8、3.4 A 两组输出电流值, 采用所提方法相较于传统固定控制参数法, 所得输出电压纹波系数分别下降了 22.5% 及 19.0%, 而稳态精度则分别提高了 21.4% 及 19.1%, 可见采用所提方法使电源技术性能得到了明显提升, 因而具有较好的实际应用价值。

关键词: 新型低纹波可调直流稳压电源; 控制参数优化; 多目标人工蜂鸟优化算法; 参数自整定方法

中图分类号: TN911 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Self-tuning method for optimal control parameters based on adaptive output current

Yuan Shuo^{1,2} Zhang Xiaoping^{1,2} Tan Yiwen^{1,2} Li Qing³

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology Department, Xiangtan 411201, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Hunan Xiangtan Electric Power Co., Ltd., Xiangtan 411101, China)

Abstract: A novel low-ripple adjustable DC-regulated power supply based on proportional-integral-vector proportional-integral composite control suffers from significant output voltage ripple coefficient and steady-state accuracy fluctuations under varying load conditions, particularly when its output current changes. This paper proposes an optimal control parameter self-tuning method based on adaptive output current. The paper introduces the topology of the DC-regulated power supply and the proportional-integral-vector proportional-integral composite control method employed. The control parameters of this method are treated as optimization objects, while the output voltage ripple coefficient and steady-state accuracy of the DC-regulated power supply are the optimization objectives. By establishing the mathematical model between the optimization objects and the optimization objectives, and defining a multi-objective optimization fitness function, a multi-objective artificial hummingbird optimization algorithm is applied to optimize the control parameters. Based on this, the function relationships of the optimal control parameters with respect to the output current of the power supply are determined. Finally, the effectiveness of the method is verified through simulations and experiments, with a comparison to traditional control methods. The results

demonstrate that the proposed optimal control parameter self-tuning method for the proportional-integral-vector proportional-integral composite control-based low-ripple adjustable DC-regulated power supply can dynamically adjust its optimal control parameters based on the actual output current, achieving the best output voltage ripple coefficient and steady-state accuracy under varying load conditions. For example, within the rated output current range of the power supply, two output current values of 1.8 A and 3.4 A were arbitrarily selected. Compared with the traditional fixed control parameter method, the output voltage ripple coefficient obtained by using the method proposed in this paper decreased by 22.5% and 19.0% respectively, while the steady-state accuracy increased by 21.4% and 19.1% respectively. It can be seen that the use of the method proposed in this paper has significantly improved the technical performance of the power supply, thus has substantial practical application value.

Keywords: new low-ripple adjustable DC power supply; control parameter optimization; multi-objective artificial hummingbird optimization algorithm; parameter self-tuning method

0 引言

目前,直流稳压电源在国民经济各领域均得到了广泛应用^[1-3],然而对于某些应用对象如电子显微镜来说,其直流供电电源的输出电压纹波系数对于确保其分辨率等技术指标将产生直接影响^[4],因此开展低纹波直流稳压电源研究将具有重要意义。

近年来针对低纹波直流稳压电源已开展了大量研究并提出了多种主电路拓扑结构,虽在降低输出电压纹波方面取得了较好的效果,但仍均存在拓扑结构复杂、体积大等不足^[5-7]。为此,本文提出一种基于 Buck-Boost 逆变电路的新型低纹波可调直流稳压电源主电路拓扑结构,该结构相对于目前常用的电源结构,其主电路得到了明显的简化;同时为实现该直流稳压电源低纹波输出电压的控制要求,提出采用一种基于比例积分-矢量比例积分(proportional integral-vector proportional integral, PI-VPI)的复合控制方法^[8],取得了满意的控制效果。然而,当该直流稳压电源处于变负载运行工况下也即其输出电流发生变化时,需对其控制参数进行实时优化调整,如此才能保证其输出电压纹波系数及稳态精度在变负载工况下均能达到最佳取值。因此针对 PI-VPI 复合控制的各控制参数开展优化研究并进而研究确定各最优控制参数与其输出电流间的变化规律,对于实现该直流稳压电源在变负载工况下均能达到其最佳的技术性能将具有重要意义。

近年来,在针对直流稳压电源控制参数优化方面已展开了系列研究,如文献[9]针对采用超前滞后控制的改进型交错并联升压直流稳压电源,提出采用粒子群算法(PSO)对其控制参数进行优化,达到了降低其输出电压纹波的目的;文献[10]针对采用反馈型二自由度 PID 控制的直流稳压电源,提出一种基于蝙蝠优化算法的控制参数自整定方法,降低了其输出电压纹波并提高了其系统鲁棒性;文献[11]针对基于非反相 Buck-Boost 的直流稳压电源,提出一种基于遗传算法(genetic algorithm, GA)的优化方法,在确保变负载工况下其输出电压稳定

的同时,还降低了其输出电压纹波;文献[12]则针对直流稳压电源控制系统提出基于蚁群算法的 PI 控制器参数同步整定方法,显著提高了电源的动态性能;文献[13]通过建立基于分数阶 PID 控制的 Buck 型直流稳压电源数学模型,提出基于适应度-距离平衡的龙格库塔优化算法对其控制参数进行优化,有效降低了其稳态误差并提高了其系统响应速度;文献[14]针对基于线性自抗扰控制的隔离式直流稳压电源,提出采用粒子群优化算法优化其线性自抗扰控制增益参数,显著改善了其输出电压不稳定的问题;文献[15]针对基于自适应模糊控制的全桥升降压直流稳压电源,提出采用粒子群和蝙蝠多目标优化算法优化其控制参数,实现了其输出纹波系数和稳态精度的协同优化等。

然而上述针对直流稳压电源控制参数所提出的各种优化方法尽管都取得了较好的效果,但均是在电源处于稳态工况下所进行的参数优化研究;而当电源处于变负载工况也即其输出电流发生变化时,上述基于某一稳态工况下所获得的最优控制参数,在变负载工况下则难以达到最佳的控制效果。为此,本文针对基于 PI-VPI 复合控制的新型低纹波可调直流稳压电源提出一种控制参数优化自整定方法,取得了明显的效果。本文介绍了新型低纹波可调直流稳压电源拓扑结构及所采用的 PI-VPI 复合控制方法,建立了相关数学模型及其多目标优化适应度函数,提出采用人工蜂鸟优化算法对其控制参数进行优化并研究确定了各最优控制参数与其输出电流间的函数关系式,最后对其效果进行了仿真与实验验证,结果证明了该方法的有效性和可行性。

1 直流稳压电源拓扑结构及控制方法

新型低纹波可调直流稳压电源主电路拓扑结构如图 1 所示。该结构主要由三相 PWM 整流电路、三相交错并联 Buck-Boost 逆变电路及三相桥式不可控整流电路组成。其中,三相 PWM 整流电路用于将三相输入交流电压整流为 PWM 调制的直流电压;三相交错并联 Buck-Boost 逆变电路由 3 组 Buck-Boost 升降压电路采用相位

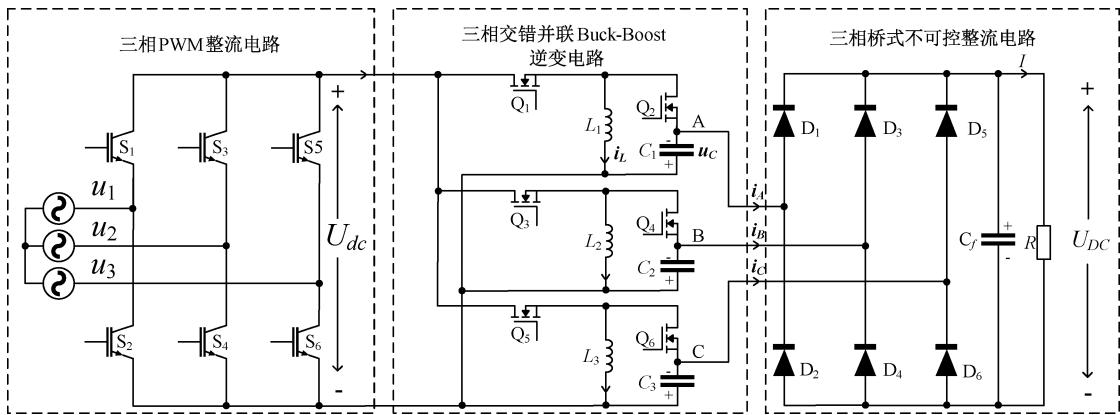


图 1 新型低纹波可调直流稳压电源主电路拓扑结构

Fig. 1 The main circuit topology of a new type of low ripple adjustable DC stabilized power supply

交错方式并联构成,用于将三相 PWM 整流电路输出的 PWM 调制直流电压逆变为高品质的幅值和频率任意可调的三相对称正弦交流电压;三相桥式不可控整流电路用于将三相交错并联 Buck-Boost 逆变电路输出的三相对称正弦交流电压整流为直流电压。

由于该直流稳压电源输出电压纹波系数等技术指标直接取决于其三相交错并联 Buck-Boost 逆变电路的控制

效果,为此,拟针对其逆变电路提出采用基于 PI-VPI 的复合控制方法,其基本原理框图如图 2 所示。该控制系统采用以电容电压和电感电流为状态变量的双闭环控制方案,其中以电容电压为控制外环,电感电流为控制内环,并针对每个控制闭环提出采用 PI-VPI 的复合控制方法,不仅控制方案简单,而且可有效提高其输出电压纹波系数等技术指标。

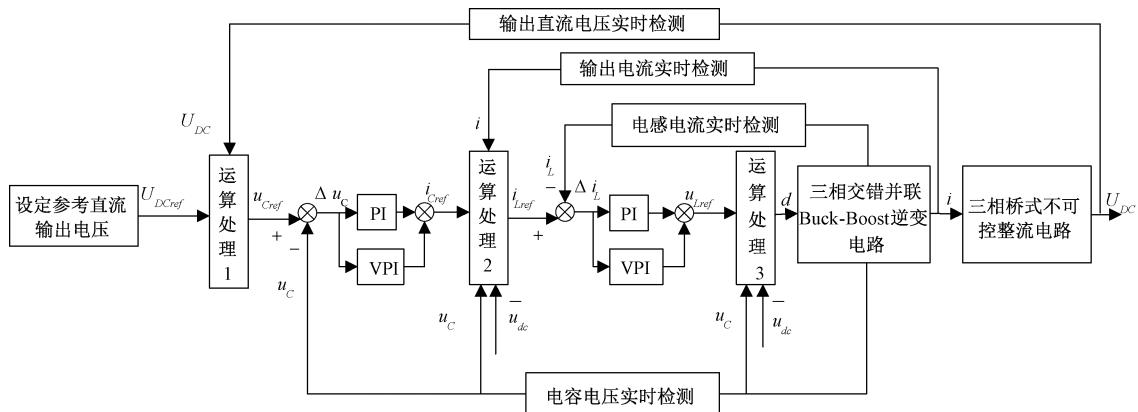


图 2 系统基本控制原理框图

Fig. 2 Control schematic block diagram

2 建立直流稳压电源优化对象与优化目标间的数学模型

针对上述双闭环控制中所采用的 PI-VPI 复合控制方法,以其控制参数为优化对象,以该直流稳压电源输出电压纹波系数及稳态精度为优化目标,建立相应的数学模型。

2.1 建立 Buck-Boost 逆变电路的状态微分方程

鉴于该逆变电路为 3 组结构相同的 Buck-Boost 升降压电路组成的结构,故在以下分析中以其中任意一组为

例,以该逆变电路中电感电流 i_L 和电容电压 u_c 为状态变量,建立其状态微分方程为:

$$\begin{cases} i_L' = \frac{u_c}{L}(d - 1) + \frac{U_{dc}}{L}d \\ u_c' = \frac{i_L}{C}(1 - d) - \frac{u_c}{RC} \end{cases} \quad (1)$$

式中: d 为逆变电路中功率开关的占空比; U_{dc} 为逆变电路输入电压; L 和 C 分别为逆变电路中的电感和电容; R 为负载电阻。

2.2 确定逆变电路中功率开关的占空比

参考文献[8]得到比例积分-矢量比例积分复合控制

器的传递函数为:

$$G_3(s) = \frac{d_1 s^3 + d_2 s^2 + d_3 s + d_4}{e_1 s^4 + e_2 s^3 + e_3 s^2 + e_4 s} \quad (2)$$

式中: $d_1 = K_1$, $d_2 = K_2 + 2K_3$, $d_3 = 2K_4 + 25K_1\omega^2$, $d_4 = 25K_2\omega^2$, $e_1 = L$, $e_2 = r_L$, $e_3 = 25L\omega^2$, $e_4 = 25r_L\omega^2$; K_1 和 K_2 分别为比例积分控制的比例系数和积分系数; K_3 和 K_4 分别为矢量比例积分控制的比例系数和增益系数, 其中 $K_4 = 8K_3R/\pi^2L$; r_L 为电感 L 的等效电阻; ω 为 Buck-Boost 逆变电路输出交流电压的角频率。

根据式(1)、(2)可得 Buck-Boost 逆变电路中对应功率开关的占空比 $d^{[16]}$ 为:

$$d = \frac{-\lambda_1 \Delta u_c + \lambda_2 (\sqrt{6}I_o + 2i_L)}{U_{dc}} + \frac{u_c}{u_c + U_{dc}} \quad (3)$$

$$\alpha = \left(e^{\frac{-t}{2RC}} \left[h_3 \cos \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{1}{LC}} + h_4 \sin \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{1}{LC}} \right] - h_5 e^{\frac{-t}{RC}} \right) /$$

$$\left(e^{\frac{-t}{2RC}} \left[h_1 \cos \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{d^2 - 2d + 1}{LC}} + h_2 \sin \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{d^2 - 2d + 1}{LC}} \right] + d(1-d)U_{dc} \right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h_5 均为常系数。

$$\beta = \left| e^{\frac{-t}{2RC}} \left[h_6 \cos \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{d^2 - 2d + 1}{LC}} + h_7 \sin \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{d^2 - 2d + 1}{LC}} \right] + d(1-d)U_{dc} - U_{oref} \right| / U_{oref} \times 100\% \quad (7)$$

式中: h_6 、 h_7 均为常系数。

3 控制参数优化方法研究

根据所建立的数学模型, 提出采用人工蜂鸟优化算法对其控制参数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 进行优化。人工蜂鸟优化算法是 Zhao 等^[19]通过模拟自然界中蜂鸟的飞行技能和觅食行为而提出的一种智能优化算法, 该算法具有优化效率高、全局搜索能力强和算法简单等特点。

3.1 建立多目标优化适应度函数

结合式(6)和(7)采用线性规划法建立其多目标优化适应度函数^[20]为:

$$\begin{cases} f_1(K_1, K_2, K_3, K_4) = \alpha \\ f_2(K_1, K_2, K_3, K_4) = \beta \\ F(K_1, K_2, K_3, K_4) = p_1 f_1 + p_2 f_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f_1(K_1, K_2, K_3, K_4)$ 、 $f_2(K_1, K_2, K_3, K_4)$ 分别为纹波系数 α 和稳态精度 β 的目标函数; $F(K_1, K_2, K_3, K_4)$ 为多目标适应度函数; p_1 为输出电压纹波系数的权重系数; p_2 为输出电压稳态精度的权重系数, 且 $p_1 + p_2 = 1$ 。

3.2 控制参数具体优化步骤

根据式(8)所建立的多目标优化适应度函数, 其控

式中: Δu_c 为电容电压偏差; I_o 为实际输出电流; λ_1 和 λ_2 为中间变量如式(4)和(5)所示。

$$\lambda_1 = 2K_2 t / C - 4K_3 \sin 5\omega t / 5\omega C - 4K_4 \cos 5\omega t / 25\omega^2 C \quad (4)$$

$$\lambda_2 = -25\omega^2 L K_1 \sin 5\omega t / 6\omega + 25 L K_3 \cos 5\omega t / 6 + 5 L K_4 \sin 5\omega t / 6\omega \quad (5)$$

式中: t 为 Buck-Boost 逆变电路的实际运行时间。

2.3 确定电源输出电压纹波系数和稳态精度的函数关系式

根据式(1)和(3)得到直流稳压电源输出电压纹波系数 α 和稳态精度 β 与其控制参数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 的函数关系式分别为^[17-18]:

$$e^{\frac{-t}{2RC}} \left[h_3 \cos \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{1}{LC}} + h_4 \sin \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{1}{LC}} \right] - h_5 e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\left(e^{\frac{-t}{2RC}} \left[h_1 \cos \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{d^2 - 2d + 1}{LC}} + h_2 \sin \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{d^2 - 2d + 1}{LC}} \right] + d(1-d)U_{dc} \right) \times 100\% \quad (6)$$

制参数优化流程如图 3 所示, 具体步骤如下:

步骤 1) 初始化参数, 包括: 种群维度 D 、种群大小 N 、种群上下边界 Up 和 Low 及外部存档 S 、最大迭代次数 M ;

步骤 2) 随机初始化初代种群 X , 根据式(8)计算其各个体的适应度值 $F(x_i)$, 并在存档中保留其中最优个体位置及其适应度值;

步骤 3) 更新下一代种群, 并获得下一代种群各个体的位置;

步骤 4) 根据式(8)计算下一代种群各个体的适应度值 $F(x_m)$, 并获取其最优个体;

步骤 5) 将当前最优个体的适应度值与下一代最优个体的适应度进行比较, 保留其较小的适应度值及其对应的个体;

步骤 6) 判断当前迭代次数, 若未达到最大迭代次数 M , 则迭代次数加 1, 返回步骤 3), 反之, 进入步骤 7);

步骤 7) 输出存档中当前最优个体位置, 即可获得各控制参数的最优取值。

4 最优控制参数自整定方法研究

如上文所述, 当直流稳压电源所带负载大小也即其输出电流发生变化时, 其控制参数需作相应的优化调整, 如此才能保证在变负载工况下均能达到其最优的技术性能, 为此, 提出一种其最优控制参数的自整定方法, 在直流稳压电源额定输出电流范围内任取 n 组输出电流值, 针对每组输出电流值采用上述方法获得其最优控制参数, 根据所得 n 组最优控制参数及其相应的输出电流值,

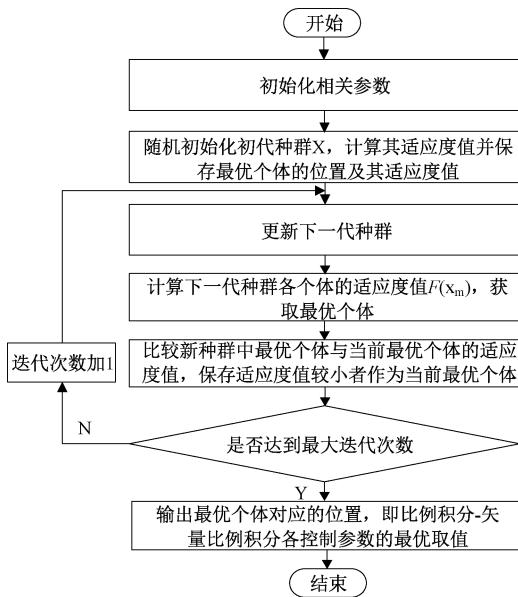


图 3 控制参数寻优方法流程

Fig. 3 Flowchart of the control parameters optimization method

采用数值拟合方法得到各最优控制参数与其输出电流值间的函数关系式^[21]。

各控制参数 K_1, K_2, K_3, K_4 的最优参数函数关系式分别为：

$$K_1(I_o) = \frac{a_1 I_o^5 + a_2 I_o^4 + a_3 I_o^3 + a_4 I_o^2 + a_5 I_o + a_6}{I_o^2 + a_7 I_o + a_8} \quad (9)$$

式中： $K_1(I_o)$ 为最优控制参数 K_1 的函数； I_o 为输出电流； $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ 为函数 $K_1(I_o)$ 中的常系数。

$$K_2(I_o) = \frac{b_1 I_o^5 + b_2 I_o^4 + b_3 I_o^3 + b_4 I_o^2 + b_5 I_o + b_6}{I_o + b_7} \quad (10)$$

式中： $K_2(I_o)$ 为最优控制参数 K_2 的函数； I_o 为输出电流； $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$ 为函数 $K_2(I_o)$ 中的常系数。

$$K_3(I_o) = p_1 \sin(p_2 I_o + p_3) + p_4 \sin(p_5 I_o + p_6) + c p_7 \sin(p_8 I_o + p_9) + p_{10} \sin(p_{11} I_o + p_{12}) \quad (11)$$

式中： $K_3(I_o)$ 为最优控制参数 K_3 的函数； I_o 为输出电流； $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}$ 为函数 $K_3(I_o)$ 中的常系数。

$$K_4(I_o) = g_1 \sin(g_2 I_o + g_3) + g_4 \sin(g_5 I_o + g_6) + g_7 \sin(g_8 I_o + g_9) + g_{10} \sin(g_{11} I_o + g_{12}) + g_{13} \sin(g_{14} I_o + g_{15}) + g_{16} \sin(g_{17} I_o + g_{18}) \quad (12)$$

式中： $K_4(I_o)$ 为最优控制参数 K_4 的函数； I_o 为输出电流； $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8, g_9, g_{10}, g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{14}, g_{15}, g_{16}, g_{17}, g_{18}$ 为函数 $K_4(I_o)$ 中的常系数。

根据函数关系式(9)~(12)及直流稳压电源的实际

输出电流值，即可得到直流稳压电源在该输出电流下的最优控制参数，根据所得最优控制参数对该电源进行控制，即可获得相应的最佳输出电压纹波系数及稳态精度。

5 仿真分析

为了验证本文所提出的针对基于 PI-VPI 复合控制的新型低纹波可调直流稳压电源控制参数自整定方法的效果，采用 MATLAB 构建相应的仿真模型进行验证。设该直流稳压电源主电路参数如表 1 所示，其主要技术指标和相关优化参数分别如表 2 和 3 所示。

表 1 直流稳压电源主电路参数

Table 1 Main circuit parameters of DC power supply

参数	数值
逆变电路主电感 L	7 μH
逆变电路主电容 C	9 μF
滤波电容 C_f	100 μF
负载电阻 R	100 Ω

表 2 直流稳压电源主要技术指标

Table 2 Main technical specifications of power supply

技术参数	数值
额定输入电压	380 V
额定输入频率	50 Hz
额定输出直流电压	1 000 V
额定输出电流	10 A

表 3 人工蜂鸟优化算法相关参数

Table 3 Parameters related to objective artificial hummingbird optimization algorithm

优化算法参数	数值
种群大小 N	50
最大迭代次数 M	500
种群维度 D	4
种群上边界 Up	$[100, 1 \times 10^{-2}, 100, 1 \times 10^{-1}]$
种群下边界 Low	$[0, 1 \times 10^{-6}, 0, 1 \times 10^3]$

在该直流稳压电源额定输出电流范围任取 20 组电流值，并针对每组电流值，采用上述优化方法得到相应的最优控制参数，如表 4 所示。

根据表 4 所得数据，得到式(9)~(12)所对应各函数关系式的系数，即各最优控制参数与其输出电流间的具体函数关系式。

最优控制参数 K_1 的函数关系式 $K_1(I_o)$ 为：

$$K_1(I_o) = (5.17 \times 10^{-2} I_o^5 - 1.39 I_o^4 + 20.16 I_o^3 - 74.32 I_o^2 - 27.35 I_o + 347.2) / (I_o^2 - 7.22 I_o + 13.47) \quad (13)$$

表4 输出电流及其最优控制参数

Table 4 Output current and its optimal control parameters

输出电流/A	K_1	K_2	K_3	K_4
0.5	31.458	3.59×10^{-6}	12.60	16.2
1	36.70	4.90×10^{-4}	13.829	64.1
1.5	40.41	8.67×10^{-4}	20.26	102
2	45.12	1.26×10^{-3}	25.364	123
2.5	48.17	1.80×10^{-3}	28.56	169
3	50.48	2.39×10^{-3}	34.26	276
3.5	54.61	2.86×10^{-3}	39.013	335
4	62.84	3.39×10^{-3}	45.43	377
4.5	67.46	4.01×10^{-3}	50.67	465
5	71.01	4.94×10^{-3}	56.99	524
5.5	73.18	5.69×10^{-3}	64.01	579
6	76.51	6.03×10^{-3}	67.49	621
6.5	78.22	6.53×10^{-3}	68.73	663
7	82.31	6.91×10^{-3}	73.157	751
7.5	83.34	7.32×10^{-3}	76.63	786
8	86.48	7.65×10^{-3}	80.54	833
8.5	89.79	8.29×10^{-3}	87.13	862
9	92.84	8.83×10^{-3}	91.78	893
9.5	96.45	9.27×10^{-3}	95.54	927
10	99.49	9.86×10^{-3}	99.09	986

最优控制参数 K_2 的函数关系式 $K_2(I_o)$ 为:

$$K_2(I_o) =$$

$$(6.09 \times 10^{-6} I_o^5 - 1.45 \times 10^{-4} I_o^4 + 1.16 \times 10^{-3} I_o^3 - 2.52 \times 10^{-3} I_o^2 + 4.92 \times 10^{-3} I_o - 1.97 \times 10^{-3}) / (I_o + 1.88) \quad (14)$$

最优控制参数 K_3 的函数关系式 $K_3(I_o)$ 为:

$$K_3(I_o) = 2.07 \times 10^3 \sin(0.16I_o + 9.68 \times 10^{-2}) + 1.97 \times 10^2 \sin(0.15I_o + 3.24) + 1.97 \sin(1.38I_o + 0.54) - 0.74 \sin(3.65I_o - 2.73) \quad (15)$$

最优控制参数 K_4 的函数关系式 $K_4(I_o)$ 为:

$$K_4(I_o) = 3.31 \times 10^2 \sin(0.26I_o + 0.56) + 3.04 \times 10^2 \sin(0.31I_o + 3.67) + 14.26 \sin(0.66I_o + 5.31) + 1.84 \sin(1.69I_o + 4.58) + 0.33 \sin(2.04I_o + 5.55) + 0.37 \sin(4.59I_o - 6.12) \quad (16)$$

根据表4所得各最优控制参数及式(13)~(16)所示各最优控制参数的函数关系式,得到各最优控制参数的拟合曲线,分别如图4~7所示。

为进一步验证式(13)~(16)的效果,如任取1.9和3.9 A两组电流值,分别采用式(13)~(16)及直接采用优化算法优化得到各最优控制参数及其相应的输出电压纹波系数和稳态精度,分别如表5和6所示。

根据表5和6可见,根据式(13)~(16)计算与直接采用优化算法所得结果基本吻合,从而说明本文所得各最优控制参数的函数关系式是有效的。

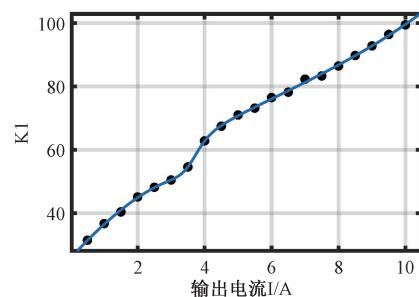
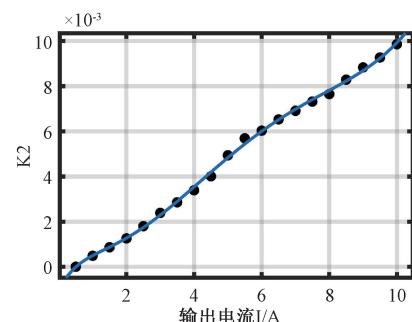
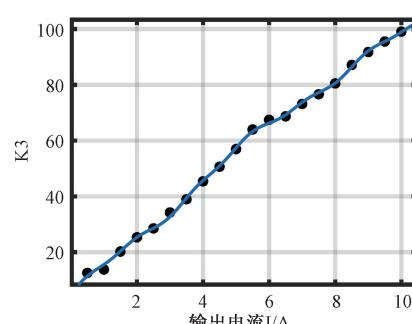
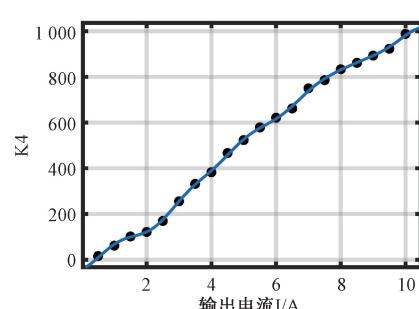
图4 最优控制参数 K_1 的拟合曲线Fig. 4 Fitting curve of the optimal control parameter K_1 图5 最优控制参数 K_2 的拟合曲线Fig. 5 Fitting curve of the optimal control parameter K_2 图6 最优控制参数 K_3 的拟合曲线Fig. 6 Fitting curve of the optimal control parameter K_3 图7 最优控制参数 K_4 的拟合曲线Fig. 7 Fitting curve of the optimal control parameter K_4

表 5 计算法和直接优化法所对应输出电压纹波系数**Table 5** Output voltage ripple coefficient corresponding to calculation method and direct optimization method

实际输出电流/A	函数计算法/%	直接优化法/%
1.9	0.032	0.031
3.9	0.034	0.033

表 6 计算法和直接优化法所对应稳态精度**Table 6** Steady-state accuracy corresponding to calculation method and direct optimization method

实际输出电流/A	函数计算法/%	直接优化法/%
1.9	0.011	0.01
3.9	0.015	0.014

同时,为进一步验证本文所提基于输出电流自适应的最优控制参数自整定方法的效果,将本文所提方法(简称本方法)与采用固定控制参数的方法(简称传统方法)进行对比分析。传统方法采用额定工作点即输出电流为 10 A 时所对应的最优控制参数进行控制,同时在其额定输出电流范围内任取两组电流值,如分别任取 1.8 及 3.4 A 进行分析;针对这两组电流值,分别采用本方法和传统方法进行控制,得到两种方法所对应的输出电压纹波系数和稳态精度,分别如表 7 和 8 所示。

表 7 本文方法和传统方法所对应输出电压纹波系数**Table 7** Output voltage ripple coefficient correspond to this method and the traditional method

实际输出电流/A	本文方法/%	传统方法/%
1.8	0.031	0.04
3.4	0.034	0.042

表 8 本文方法和传统方法所对应稳态精度**Table 8** Steady-state accuracy correspond to this method and the traditional method

实际输出电流/A	本文方法/%	传统方法/%
1.8	0.011	0.014
3.4	0.014	0.0173

根据表 7 和 8 可见,相对于传统方法,本文方法输出电压纹波系数分别下降了 22.5% 及 19.0%,而稳态精度则分别提高了 21.4% 及 19.1%,可见本方法相对于传统方法,其优化效果是十分明显的。

6 实验验证

为进一步验证本文所提基于输出电流自适应的最优控制参数自整定方法的效果,研制了一套该电源的实验装置,如图 8 所示。该实验装置包括 DSP 控制电路、主

电路、驱动电路、电流采集电路、电压采集电路、辅助电源电路、直流电子负载等。其中,数字控制芯片采用 TI 公司型号为 TMS320F28335 的 DSP,功率开关管采用英飞凌公司型号为 IHW30N120R2 的 IGBT。为便于与仿真结果进行对比分析,实验中相关参数设置与仿真分析保持一致。其参考输出电流分别仍取 1.9 和 3.9 A,其实验结果分别如图 9 和 10 所示,相关实验结果如表 9 所示。

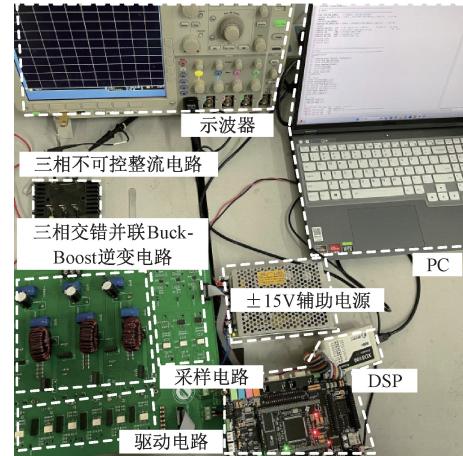
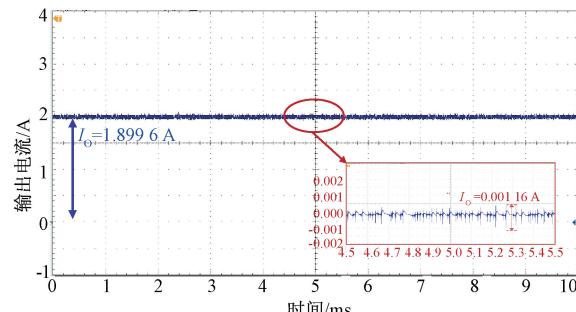
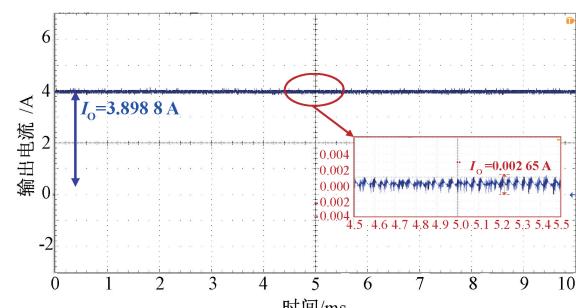
**图 8** 实验样机**Fig. 8** Experimental prototype**图 9** 参考输出电流为 1.9 A 时的输出电流波形**Fig. 9** Waveform of the output current at a reference output current of 1.9 A**图 10** 参考输出电流为 3.9 A 时的输出电流波形**Fig. 10** Waveform of the output current at a reference output current of 3.9 A

表 9 实验结果
Table 9 Experimental results

输出电流 I_o/A	纹波系数/%	稳态精度/%
1. 9	0.061	0.021
3. 9	0.068	0.031

结合表 5、6 和 9 可见,实验结果与仿真结果基本吻合。同时,为进一步说明本文所提方法的效果,将其分别与文献[7,9]中所采用的常用方法(分别为 PSO 和 GA)进行对比分析,根据文献[7,9],上述两种方法所得输出电压纹波系数分别为 0.16%(PSO)及 0.2%(GA),而稳态精度则分别为 0.1%(PSO)及 0.1%(GA)。可见,本文所提方法相较于现有方法,其输出电压纹波系数和稳态精度均得到了明显提升,由此进一步说明了本文所提方法的效果。

7 结 论

针对基于 PI-VPI 复合控制的新型低纹波可调直流稳压电源在变负载工况下其输出电压纹波系数和稳态精度受其输出电流影响大的问题,提出一种基于输出电流自适应的最优控制参数自整定方法。本文建立了相关数学模型及其多目标优化适应度函数,深入研究了采用人工蜂鸟优化算法对其控制参数进行优化的具体设计方法,并在此基础上研究确定了各最优控制参数随电源输出电流变化的函数关系式,最后通过仿真和实验对其效果进行了验证,同时与传统控制方法进行了对比分析,结果表明,本文针对基于 PI-VPI 复合控制的新型低纹波可调直流稳压电源所提出的控制参数优化自整定方法,能根据其变负载工况也即输出电流的实时变化实时调整其最优控制参数,使其输出电压纹波系数和稳态精度在变负载工况下均能达到其最佳取值,如在其额定输出电流范围内任取 1.8、3.4 A 两组输出电流值,采用本文所提方法相较于传统固定控制参数法,所得输出电压纹波系数分别下降了 22.5% 及 19.0%,而稳态精度则分别提高了 21.4% 及 19.1%,可见采用本文所提方法使电源技术性能得到了明显提升,同时也为进一步开展该直流稳压电源在多工况耦合场景下的全过程优化控制研究奠定了基础,因而具有较好的实际应用价值。

参考文献

- [1] 姜月明,俞洋,彭喜元. 基于关键特征提取和 Elman 神经网络的开关电源多参数辨识[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(7):11-19.
- JIANG Y M, YU Y, PENG X Y. Multi-parameter identification of switch mode power supply based on key features and Elman neural network [J]. Journal of

- Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7):11-19.
- [2] HAN X, YAO X, LIAO Y. Full operating range optimization design method of LLC resonant converter in marine DC power supply system [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(11): 2142.
- [3] 周京华,孟祥飞,陈亚爱,等. 基于新能源发电的电解水制氢直流电源研究 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 389-397.
- ZHOU J H, MENG X F, CHEN Y AI, et al. Research on DC power supply for hydrogen production from electrolytic water based on new energy generation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(6):389-397.
- [4] ONG D C Y, SIM K S. Single image signal-to-noise ratio (SNR) estimation techniques for scanning electron Microscope-A review [J]. IEEE Access, 2024, 12: 155747-155772.
- [5] ZARGHANI M, MOHSENZADE S, HADIZADE A, et al. An extremely low ripple high voltage power supply for pulsed current applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7991-8001.
- [6] BANDEIRA D G, LAZZARIN T B, BARBI I. High voltage power supply using a T-type parallel resonant DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 2459-2470.
- [7] WANG Z, WANG P, LI B, et al. A bidirectional DC-DC converter with high voltage conversion ratio and zero ripple current for battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(7): 8012-8027.
- [8] 谈宜雯,张小平,李毅凡. 基于 Buck-Boost 逆变电路的低纹波可调直流稳压电源控制方法 [J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(6):204-212.
- TAN Y W, ZHANG X P, LI Y F. Control method of low ripple adjustable DC regulated power supply based on Buck-Boost inverter circuit [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (6): 204-212.
- [9] BANERJEE S, GHOSH A, RANA N. An improved interleaved boost converter with PSO-based optimal type-III controller [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 5(1): 323-337.
- [10] CHEN S Y, YANG B C, PU T A, et al. Active current sharing of a parallel DC-DC converters system using bat algorithm optimized two-DOF PID control [J]. IEEE Access, 2019, 7: 84757-84769.
- [11] ORTATEPE Z, KARAARSLAN A. Pre-calculated duty cycle optimization method based on genetic algorithm

- implemented in DSP for a non-inverting buck-boost converter[J]. Journal of Power Electronics, 2020, 20: 34-42.
- [12] AHMAD A, KASHIF S A R, NASIR A, et al. Controller parameters optimization for multi-terminal DC power system using ant colony optimization[J]. IEEE Access, 2021, 9: 59910-59919.
- [13] ISEN E. Determination of different types of controller parameters using metaheuristic optimization algorithms for buck converter systems [J]. IEEE Access, 2022, 10: 127984-127995.
- [14] OYEWOLE O E, ABDELAZIZ A A, JIMOH I A, et al. Optimised linear active disturbance rejection control of multiport-isolated DC-DC converter for hydrogen energy storage system integration [J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 102: 159-168.
- [15] CHEN C L. Many-objective adaptive fuzzy with sliding mode control for a class of switching power converters using global optimization[J]. IEEE Access, 2022, 10: 10317-10332.
- [16] 张小平,朱建林,唐华平,等. 新型 Buck-Boost 矩阵变换器的双闭环控制策略[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(2): 203-208.
ZHANG X P, ZHU J L, TANG H P, et al. A double-loop control strategy for the new Buck-Boost matrix converter [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(2): 203-208.
- [17] CHEN J, WANG Z, HUANG J, et al. A configurable DC-DC ripple attenuator module with active ripple cancellation technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 7217-7229.
- [18] 张逸,孙金林,丁世宏,等. 基于复合自适应的 Buck 变换器预设性能控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 85-93.
ZHANG Y, SUN J L, DING SH H, et al. Composite adaptive prescribed performance control for Buck converters [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 85-93.
- [19] ZHAO W, WANG L, MIRJALILI S. Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 388: 114194.
- [20] 刘继,张小平,张瑞瑞. 基于 FTC 的 BBMC 调速控制策略及参数优化 [J]. 自动化学报, 2020, 46(2): 332-341.
LIU J, ZHANG X P, ZHANG R R. BBMC speed control strategy and parameter optimization based on FTC [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(2): 332-341.
- [21] 张瑞瑞,张小平. BBMC 逆变级分段延迟反馈控制参数稳定域[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 130-136.
ZHANG R R, ZHANG X P. Parameter stability region of piecewise delay feedback control in BBMC inverter stage[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2): 130-136.

作者简介



袁硕,现为湖南科技大学硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。
E-mail: 978456198@qq.com



Yuan Shuo is now a M. Sc. candidate in Hunan University of Science and Technology. His main research interests include power electronics and power transmission.

张小平(通信作者),博士,现为湖南科技大学教授,博士生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等。
E-mail: zxp836@163.com



谈宜雯,2024 年于湖南科技大学获得硕士学位,主要研究方向为电力电子与电力传动。
E-mail: 1299367901@qq.com

Tan Yiwen received a M. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2024. Her main research interests include power electronics and power transmission.