

Research on Three-Phase Inverters Control System by Differential Evolution Optimization

Huan Wang^{1, 2†}, Yu-Xing Dai²

1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

2. College of Mathematics Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

†Email: wh83@wzu.edu.cn

Abstract

In order to improve the effective and efficient of double closed-loop PI controller and reduce the total harmonic distortion (THD) of output voltage waveform, this paper presents a novel double closed-loop PI controller design method for a three-phase inverter based on the differential evolution (DE) algorithm. The basic idea behind the proposed method is firstly formulating the design problem of double close-loop PI controller for a three-phase inverter as a typical constrained optimization problem, where the THD and the integral of time weighted absolute error of output voltage waveform are weighed as the optimization objective function. After that, a DE algorithm is designed to solve this formulated problem. At last, the superiority of the proposed method to Z-N empirical method, genetic algorithm, particle swarm optimization is demonstrated by simulation and experimental results on a 6kW three-phase inverter including nominal condition and variable loads conditions.

Keywords: Three-phase Inverter; Differential Evolution; Double Closed-loop Controller

基于 DE 的三相逆变控制系统优化设计

王环^{1,2}, 戴瑜兴¹

1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082

2. 温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江省 温州市 325035

摘要: 为了提高双闭环 PI 控制器的性能, 以降低三相逆变系统输出电压的 THD 值, 本文提出了一种新颖的基于差分进化的三相逆变系统双闭环 PI 控制器参数优化设计方法。该方法的基本思路为将三相逆变系统的双闭环 PI 控制参数优化设计问题转换成一个典型的有约束优化问题, 而后将三相逆变输出电压的 THD 和时间乘误差绝对值积分设计为优化目标函数, 利用所设计的差分进化算法获得双闭环 PI 控制器最优参数, 最后在一台功率为 6kW 三相逆变实验系统进行了仿真测试实验和硬件平台测试实验。实验结果证明, 相对于采用 Z-N 经验法、遗传算法、粒子群算法的系统, 本文所设计的基于 DE 的三相逆变系统不管是在稳态还是负载突变的情况工作性能最优, 系统输出电压谐波含量最低。

关键词: 三相逆变系统; 差分进化; 双闭环系统

引言

目前, 各种先进控制方法在理论和工程实践应用中都有长足的发展^{[1]-[3]}, 但是在微电网系统、分布式电源系统、传统电力系统中^[2], 使用最广泛依然为 PID (Proportional-Integral-Derivative) 或 PI 控制, 其简便性、高效性得到工程界的广泛认同^{[4]-[5]}。分布式电源中的三相逆变系统作为电能转换的关键设备, 其性能的优劣直接影响分布式电源及微电网的工作状态和系统性能。传统三相逆变系统一般采用电压单环 PI 控制, 其反馈信息单一, 导致在一些复杂情况下控制系统的快速性、鲁棒性难以兼顾^{[6]-[8]}。因此, 通过在电压单环的基础上增加电流内环, 利用电压外环保证输出系统输出电压的稳定, 同时电流内环构成的电流随动系统利用其快速性, 来降低系统负载扰动带来的影响^[10]。三相逆变系统采用双闭环 PI 控制拓扑后其控制参数直接决定着系

系统的鲁棒性，对系统输出的电能质量也起决定性作用。因此如何优化整定双闭环控制参数，以此提升三相逆变系统的性能，具有重要的工程应用价值。利用经典控制理论的频域法对三相逆变系统进行 PI 参数整定具有系统建模复杂、计算过程繁琐的问题，且计算结果还需进行一定程度的手动调整。另外一种工程中使用较多的 PI 参数整定方法为 Z-N 法^[11]，由 Ziegler 和 Nichols 提出。该整定方法严重依赖工程师的工程实践经验，导致该方法在参数可变的复杂系统中应用困难。三相逆变系统常采用双闭环控制拓扑，该拓扑中需要整定的 PI 控制数量为四个，利用 Z-N 方法进行参数整定操作复杂，对工程设计人员的实践经验要求过高而应用困难。

当前，利用智能优化算法对三相逆变系统的双闭环 PI 控制参数整定已经成为了研究热点^{[12][13]}。而这些研究工作更多的还是处于理论仿真实验阶段，工程实践应用的案例较少^{[14][15]}。Waleed Al-Saedi 等针对自治微网中的分布式电能逆变系统，提出了一种基于 PSO 的电压-频率 PI 控制器参数优化设计方法^[15]。另外，针对分布式电源在工作模式切换过程中电压、频率易跌落的问题，文献[16]提出了基于和声搜索算法的双闭环 PI 控制参数优化策略，以实现分布式电源工作模式的无缝切换。文献[17]利用二进制编码的极值优化算法对三相逆变系统控制参数进行优化，二进制编码存在算法编码效率较低且变异操作复杂的缺点。综上所述，利用智能优化算法对微电网中的逆变系统 PI 控制参数进行优化是切实可行的。

差分进化（Differential Evolution, DE）作为一种高效的优化算法，由 Rainer Storn 和 Kenneth Price 受生物进化论中“优胜劣汰、适者生存”思想启发而提出的一种新颖的随机启发式优化算法^[20]。目前，将 DE 应用于复杂系统包括三相逆变系统的 PID 控制参数优化的应用却较少^[20]。为此，本文提出了基于 DE 的分布式电源三相逆变系统控制优化设计，其关键点是将三相逆变系统的双闭环 PI 控制参数优化设计转换成一个典型的有约束优化问题，而后利用逆变输出电压的总谐波失真（The Total Harmonic Distortion: THD）和时间乘误差绝对值积分（Integral of Time Weighted Absolute Error: ITAE）来设计优化目标函数，通过 DE 来对双闭环 PI 控制器参数进行优化，最终提升三相逆变系统的性能，包括系统可靠性；高鲁棒性，能同时满足瞬态、稳态方面的要求；最为关键的是三相逆变系统作为电压源其输出电压的 THD（total harmonic distortion）的降低。

1 逆变系统双闭环 PI 控制参数优化模型建立

三相逆变系统根据功能主要由直流部分、三相半桥开关、电感部分、Y 形负载等部分构成。其结构框图^[17]如图 1 所示。其中直流部分中 V_{dc} 为直流母线电压， L_s 为直流母线电抗， R_s 为电抗等效阻抗， C_s 为直流电容。三相半桥开关部分有 S_1 - S_6 六个 IGBT 构成。电感部分中 L 为滤波电感， R_L 为滤波电感的等效阻抗。Y 形负载部分中 C 为滤波电容， R 为负载。

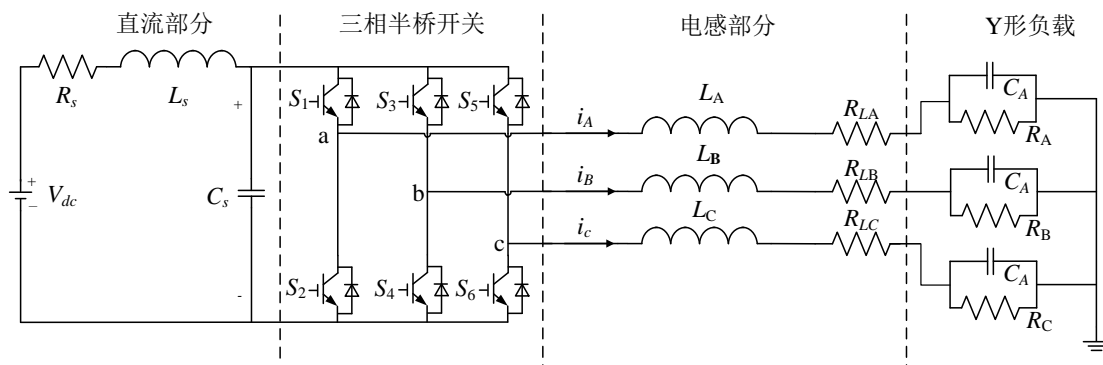


图 1 三相电压型逆变器结构框图

利用基尔霍夫电流定律（KCL）、基尔霍夫电压定律（KVL）、 dq 坐标变换对上述电路进行平均模型建模，得到数学模型如下：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} - \frac{1}{RC} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} wV_d \\ -wV_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = -\frac{R_L}{L} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} Z_q \\ Z_d \end{bmatrix} V_{dc} - \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} 2V_q - V_d \\ -V_q + 2V_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & w \\ -w & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 V_d 、 V_q 为三相逆变系统输出电压的 d 轴和 q 轴分量， i_d 、 i_q 为三相逆变系统输出电流的 d 轴和 q 轴分量， Z_d 、 Z_q 为开关函数的 d 轴和 q 轴分量。由公式 (1) 和 (2) 可知 V_d 和 V_q 、 i_d 和 i_q 存在耦合分量，需要进行解耦控制。三相逆变系统的双闭环 PI 控制拓扑模型如图 2 所示。

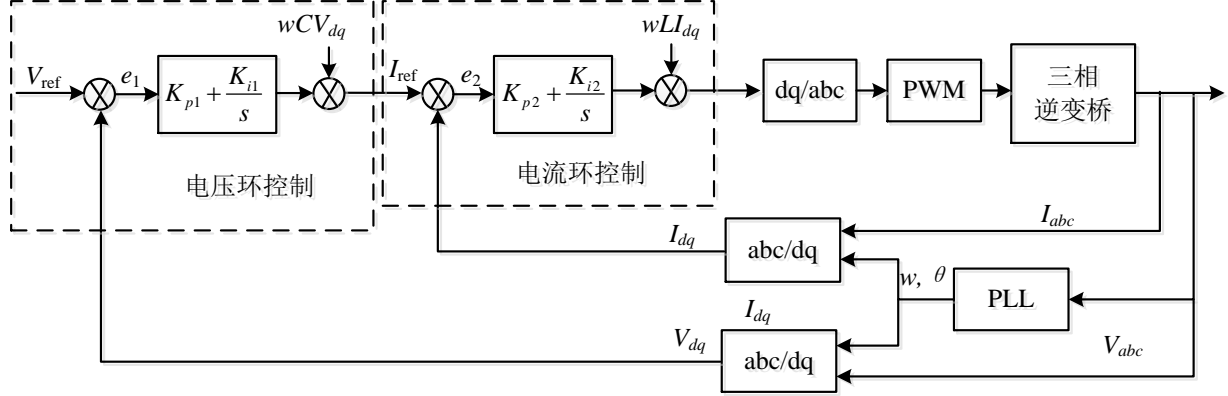


图 2 采用双闭环 PI 控制的三相逆变系统的控制结构框图

图中 K_{p1} 和 K_{i1} 为电压外环 PI 控制器中比例系数和积分系数。 K_{p2} 和 K_{i2} 为电流内环 PI 控制器中比例系数和积分系数。三相逆变系统的电压输出波形质量受很多因素影响，除了控制参数外还包括系统的调制方法，滤波器的类型，控制策略等等。本文三相逆变系统中调制方法采用了 SVPWM 调制，相较 SPWM 调制可降低逆变输出波形的谐波含量。此外系统还采用了简单有效的 LC 滤波器，通过选择合理的截止频率，将开关频率对逆变输出波形质量的影响尽量降低。本文的主要工作为将双闭环 PI 控制的三相逆变系统输出电压质量优化控制转换为包含四个优化参数 K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{p2} 和 K_{i2} 的优化控制问题，同时将目标函数定义为逆变输出电压的 THD 和 ITAE。系统目标函数的详细表达如下：

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{x}) &= w_1 \int_0^{T_{\max}} t |e_1(t)| dt + w_2 THD_V \\ \mathbf{x} &= (K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}) \\ s.t. \quad & l_1 \leq K_{p1} \leq u_1 \\ & l_2 \leq K_{i1} \leq u_2 \\ & l_3 \leq K_{p2} \leq u_3 \\ & l_4 \leq K_{i2} \leq u_4 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 w_1 、 w_2 为权重系数， T_{\max} 为时间窗的最大值， THD_V 为逆变输出电压的 THD， l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 为 K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{p2} 和 K_{i2} 的下限， u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 为 K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{p2} 和 K_{i2} 的上限。

2 三相逆变系统双闭环 PI 控制器参数的优化设计

从上节描述可知，本文中的三相逆变系统输出电压质量主要取决于双闭环 PI 控制拓扑的参数。基于 DE 的三相逆变系统双闭环 PI 控制器参数优化设计方法核心思想为，根据所设定的控制参数的上下限，对上一节中建立的三相逆变系统双闭环 PI 控制器的四个参数进行实数编码，利用建好的三相逆变系统模型得出带了加权系数的系统输出电压 THD 和 ITAE 的适应度值，并以此为依据来评估个体的性能；然后采用 DE 算法中简单变异操作和一对一的竞争生存策略来最终获得系统的最优参数。基于 DE 的三相逆变系统双闭环 PI 控制器参数优化的原理框图和流程图如图 3、4 所示：

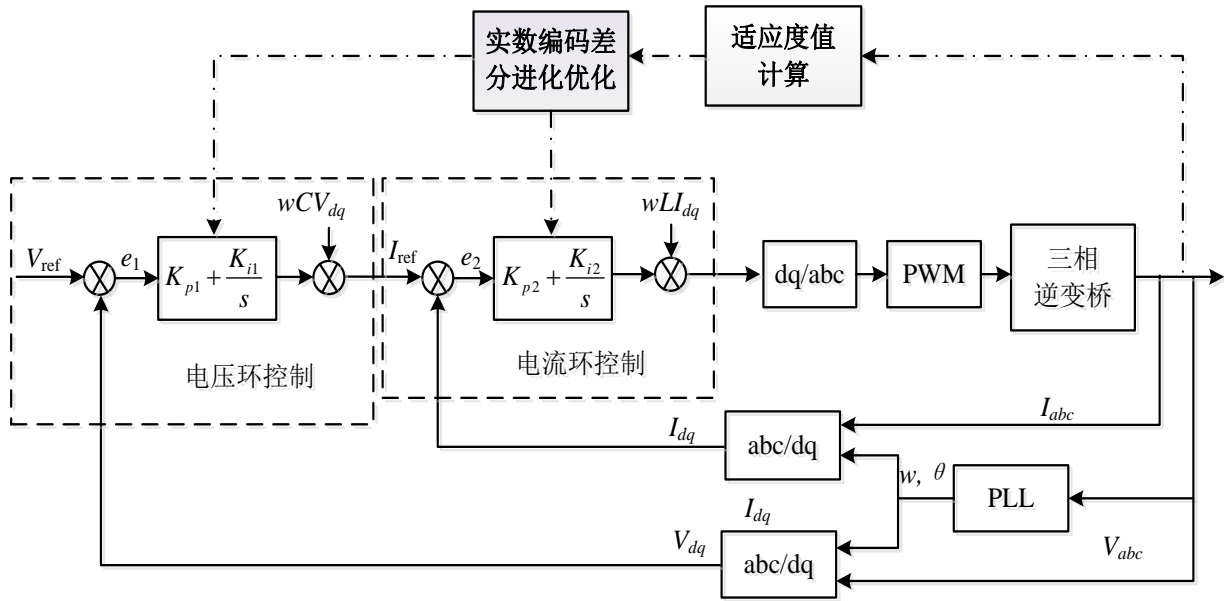


图 3 基于 DE 的三相逆变系统双闭环 PI 控制参数的优化原理框图

基于差分进化的三相逆变系统双闭环 PI 控制器参数优化算法的详细步骤描述如下：

输入：三相逆变系统双闭环 PI 控制模型，采样时间 T_s ，控制参数 $(K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2})$ 的下限 (l_1, l_2, l_3, l_4) 和上限 (u_1, u_2, u_3, u_4) ，变异因子 F ，交叉因子 CR ，种群大小 M ，权重系数 w_1, w_2 ，最大迭代次数 G 。

输出：全局最优解 S_{best} （最优 PI 控制参数 $K_{po1}, K_{io1}, K_{po2}, K_{io2}$ ）和全局最优适应度值 F_{best} 。

(1) 在上限 (u_1, u_2, u_3, u_4) 和下限 (l_1, l_2, l_3, l_4) 的范围内通过实数编码方式随机产生初始种群 $P=(x_1, x_2, \dots, x_p)$ ，其中第 i 个个体 x_i 表示待优化的控制增量序列 $(K_{p1i}, K_{i1i}, K_{p2i}, K_{i2i})$ ，具体产生过程如下：

$$x_{ij} = l_j + rand_{ij}(u_j - l_j), i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, 4 \quad (4)$$

其中， $rand_{ij}$ 表示一组在 0 和 1 之间产生的随机数。

(2) 利用三相逆变系统双闭环 PI 控制模型和公式 (3) 计算种群 P 的初始适应度 $F(S)$ ，并将种群中当前最小的目标函数值设置为 F_{best} ，将对应的个体设置为当前最好解 S_{best} ；

(3) 进行变异操作，从群体中随机选择 3 个体 x_{p1}, x_{p2}, x_{p3} ，且 $i, p1, p2, p3$ 互不相等，具体变异操作如下：

$$h_{i,j}(t+1) = x_{p1j}(t) + F \cdot (x_{p2j}(t) - x_{p3j}(t)) \quad (14)$$

(4) 为了增加干扰参数向量的多样性，进行交叉操作，具体操作如下：

$$v_{ji}(t+1) = \begin{cases} h_{ji}(t+1) & \text{如果 } randl_{ij} \leq CR \text{ 或者 } j = rnbr(i) \\ x_{ji}(t) & \text{如果 } randl_{ij} > CR \text{ 且 } j \neq rnbr(i) \end{cases} \quad (15)$$

其中， $randl_{ij}$ 表示一组在 0 和 1 之间产生的随机数。

(5) 为了确定 $x_i(t)$ 能否成为下一代的成员，和实验向量 $v_i(t+1)$ 和目标向量 $x_i(t)$ 对评价函数进行比较，具体操作如下：

$$x_i(t+1) = \begin{cases} v_i(t+1), f(v_{i1}(t+1), \dots, v_{in}(t+1)) < f(x_{i1}(t), \dots, x_{in}(t)) \\ x_{ji}(t), f(v_{i1}(t+1), \dots, v_{in}(t+1)) \geq f(x_{i1}(t), \dots, x_{in}(t)) \end{cases} \quad (16)$$

(6) 重复步骤 2 和步骤 5 直到满足最大迭代次数 I_{max} ；

(7) 输出全局最优解 S_{best} 和对应的适应度值 F_{best} ，三相逆变系统双闭环 PI 控制器四个参数 $(K_{po1}, K_{io1}, K_{po2}, K_{io2})$ 。

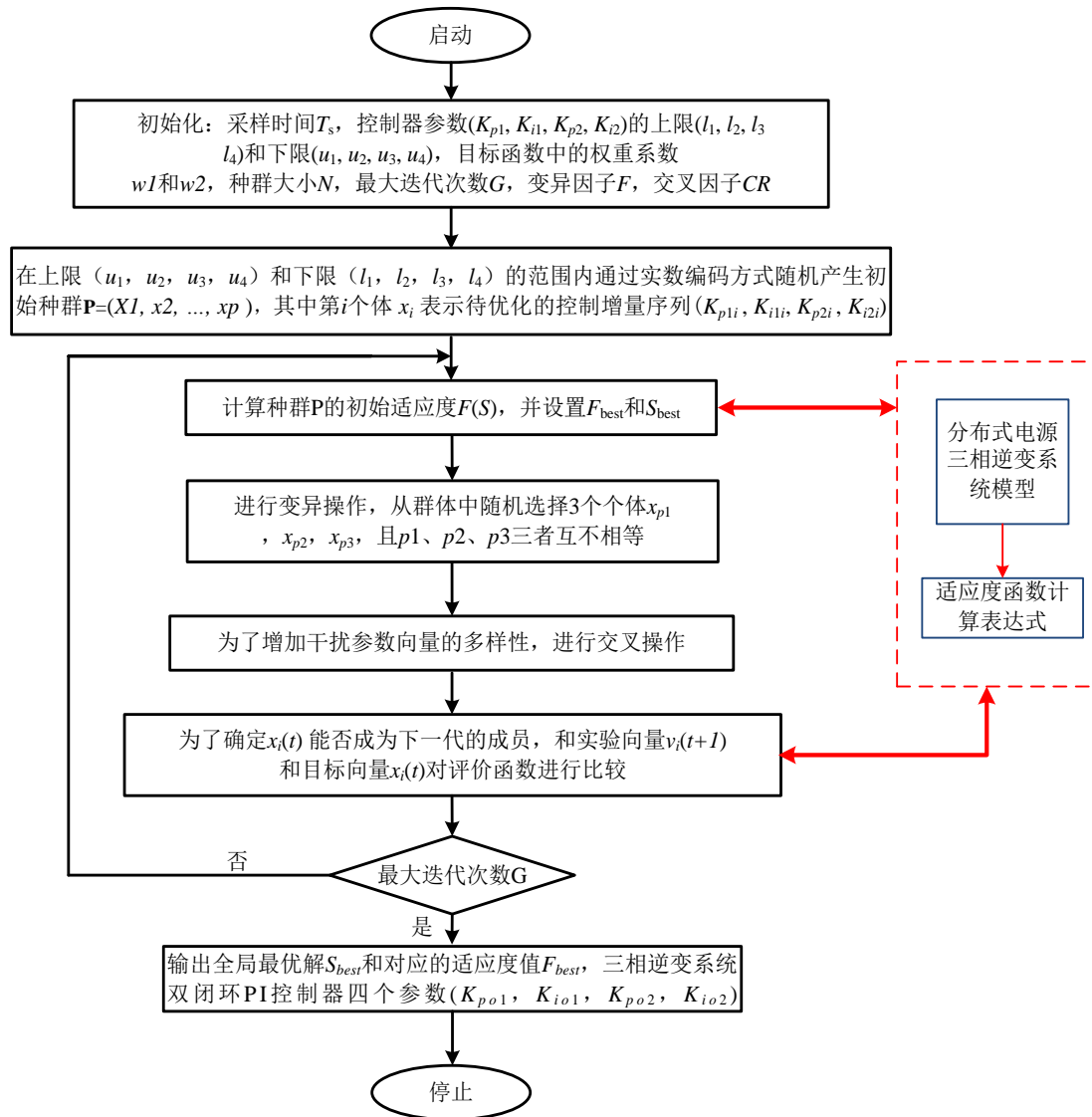


图 4 基于 DE 的三相逆变系统双闭环 PI 控制参数的优化流程图

通过上述描述, 基于 DE 的三相逆变系统双闭环 PI 控制参数的优化设计思路已经清晰。DE 算法通过采用简单变异操作和一对一的竞争生存策略, 降低了 GA 算法的复杂度。同时, DE 算法由于其特有的记忆功能使其具有较强的全局收敛性能和鲁棒性。相对于采用更加复杂操纵和迭代机制的 GA 和 PSO, DE 具有更好的简便性和更高的优化性能。

3 系统软件仿真测试

为了验证所提出的差分进化算法的有效性, 本文通过 SIMULINK 和 Sim Power System 搭建一个 20kW 的三相逆变器仿真模型进行验证。本节中三相逆变器双闭环 PI 控制器的 4 个参数将分别利用 Z-N 算法、GA、PSO 和 DE 进行优化。所搭建的三相逆变器仿真模型其他参数如下: $V_{dc}=560V$, $L_s=1.08mH$, $C_s=4700\mu F$, $C_A=C_B=C_C=40\mu F$, $L_A=L_B=L_C=2.5mH$, $R_{LA}=R_{LB}=R_{LC}=0.1\Omega$, $R_A=R_B=R_C=24\Omega$ 。双闭环 PI 控制器的 4 个参数的阈值设置为 $l_1=l_2=l_3=l_4=0$, $u_1=1$, $u_2=150$, $u_3=10$, $u_4=150$ 。系统的采样时间 T_s 设置为 $10e-6s$, 权重系数 w_1 , w_2 设置为 0.1 和 1。需要注意的是权重系数 w_1 , w_2 不仅取决于性能指标的重要性, 还跟它们的数量等级有关, 而且还需要通过试验操作进行相应调整。

表 1 GA、PSO 和 DE 的相关参数设置

算法	参数设置
GA	种群大小设为 40，最大迭代次数 I_{\max} 设为 30，比例选择算子 β 设为 0.7，交叉概率 p_c 设为 0.6，变异概率 p_m 设为 0.001，每个决策变量的二进制字符串长度 l 设为 10
PSO	种群大小设为 40，最大迭代次数 I_{\max} 设为 30，惯性权重 w_{\max} 设为 0.5， w_{\min} 设为 0.5，粒子速度上限 V_{\max} 设为 4，加速度因子 c_1 设为 1.0， c_2 设为 1.0， l 设为 10
DE	种群大小设为 40，最大迭代次数 I_{\max} 设为 30，变异因子 F 设为 1.2，交叉因子 CR 设为 0.9

为公平起见，每种算法独立运行 20 次，其参数设置如表 1 所示。优化算法独立运行后的统计结果如表 2 所示，包括了最终输出适应度值的成功率，最小值，中间值，最大值，平均值，标准偏差值。表 2 所示的统计结果清晰表明采用了差分进化算法后模型输出的各个统计性能指标要优于其他的优化算法。此外，表 3 为利用四种优化方法，包括传统的 Z-N 经验法、GA、PSO 和 DE 所获得的最优控制参数和对应的逆变输出三相电压的 THD 值。需要说明的是表 3 中的 THD 值包含了系统启动时的第一个周期动态过程，导致三相电压中有两个相的电压 THD 数值较大。忽略启动时第一个周期动态过程的 THD 值在表 3 中用括号标出，可以清晰的看出三相电压的 THD 值数值小很多。从上述数据可以清晰获得出采用了 DE 算法后三相逆变系统输出的电压波形质量最优，其三相电压的 THD 值也为最小的一组。

表 2 遗传算法、粒子群算法和差分进化算法的统计性能指标

算法	成功率 %	最小值	中间值	最大值	平均值	标准偏差值
GA	80	0.0052	0.0239	0.0881	0.0359	0.0261
PSO	100	0.0024	0.0095	0.0179	0.0099	0.0012
DE	100	0.0022	0.0089	0.0125	0.0092	0.0008

表 3 四种优化方法下获得的最优控制参数及对应的输出电压 THD 值

算法	A相电压THD (%)	B相电压THD (%)	C相电压THD (%)	K_{po1}	K_{io1}	K_{po2}	K_{io2}
Z-N	2.80(0.95)	10.44(0.97)	8.93(0.98)	0.0245	36.9502	8.5924	140.3226
GA	1.73(0.49)	8.73(0.46)	8.23(0.47)	0.0782	78.0059	4.1545	147.0674
PSO	1.50(0.36)	8.73(0.37)	8.07(0.37)	0.0391	80.7918	8.1623	107.4780

4 系统硬件测试实验

为了进一步验证所提出方法的有效性，本文在一台 20kW 三相逆变器硬件平台对仿真实验结果进行了验证。该硬件平台的参数与仿真平台的参数一致，实验平台如图 5 所示。其中 DC 直流源的型号为 Chroma 62100H，输出的最大电流为 16A，因此后续实验中功率上限设为 6kW。为了对比不同方法在负载突变条件下获得的控制参数的性能，设计了负载突加 3kW-6kW 的实验来验证。实验中不同方法下获得的电压和电流波形如图 15 所示。从上述波形图可以清晰得出基于 DE 三相逆变系统在负载突变的条件下系统鲁棒性最优，DE 参数优化效果最佳。

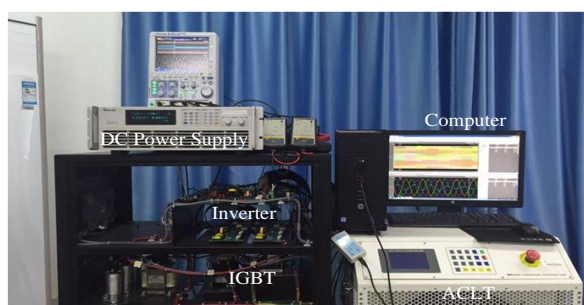


图 13 三相逆变系统硬件测试平台

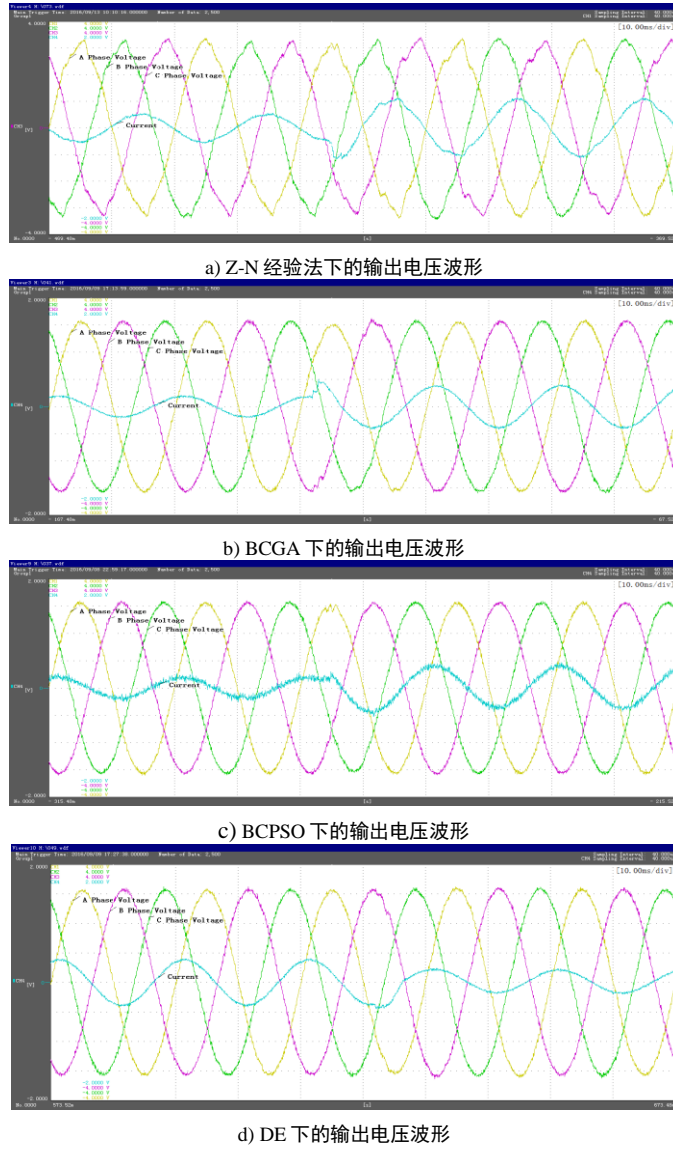


图 15 负载从 3kW 突加到 6kW 下基于不同优化算法的三相逆变系统测试平台输出电压波形

5 小结

本文的主要内容为针对三相逆变器的最优控制提出了基于 DE 三相逆变系统双闭环 PI 控制器参数优化设计方法。其核心问题为通过随机编码产生双闭环 PI 控制器参数，通过一个包含了输出电压 ITAE 和 THD 有效的加权目标函数来评估控制器的性能，通过采用基于差分的简单变异操作和一对一的竞争生存策略实现控制器参数优化。与现有常见的进化算法，如 GA、PSO 等优化算法，DE 最大的优势是具有更明显的简便性和高效性。通过软件仿真实验和硬件平台测试实验，实验结果表明基于 DE 三相逆变系统双闭环 PI 控制器参数优化方法不管是在稳态还是负载突变的情况下都要优于 Z-N 经验法，GA 和 PSO。因此，本文所提出的基于 DE 三相逆变系统双闭环 PI 控制器参数优化方法为电能变换系统优化设计提供了一个有前途的发展方向。

REFERENCES

- [1] Y. Q. Wu, H. Y. Su, R. Q. Lu, Z. G. Wu, and Z. Su, "Passivity-based non-fragile control for Markovian jump systems with aperiodic sampling," *Systems & Control Letters*, vol. 84, pp.35-43, 2015.

- [2] Z. G. Wu, P. Shi, H. Y. Su, and J. Chu, "Asynchronous H₂-H_∞ filtering for discrete-time stochastic Markov jump systems with randomly occurred sensor nonlinearities," *Automatica*, vol.50, no.1, pp.180-186, 2014.
- [3] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.13, no.4, pp. 559-576, 2005.
- [4] C. H. Liu, and Y. Y. Hsu, "Design of a self-tuning PI controller for a STATCOM using particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no.2, pp.702-715, 2010.
- [5] W. Al-Saedi, S. W. Lachowicz, D. Habibi, and O. Bass, "Voltage and frequency regulation based DG unit in an autonomous microgrid operation using particle swarm optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.53, pp.742-751, 2013.
- [6] Xiangwu, Yan, et al. "Double closed-loop control of three-phase five-level PWM current source inverter." *Industrial Electronics Society*, 2007. *IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE. IEEE*, 2007.
- [7] Shuai Z, Luo A, Shen J, et al. Double Closed-Loop Control Method for Injection-Type Hybrid Active Power Filter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(9):2393-2403.
- [8] L. Y. Yi. Digital UPS/EPS Control System Key Technologies and Its Applications Study[D]. Hunan University of Technology, 2007.
- [9] Zhu M L, Zhao R X, Cai Z J, et al. A novel voltage and current double closed-loop control method based on inverter load on-line parameter estimation[C]// *International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE*, 2010:311-315.
- [10] Adhikari, Sarina, and Fangxing Li. "Coordinated V_f and PQ control of solar photovoltaic generators with MPPT and battery storage in microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.3 (2014): 1270-1281.
- [11] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Transaction on ASME*, vol.64, no.11, pp.759-768, 1942.
- [12] M. W. Iruthayarajan and S. Baskar, "Evolutionary algorithms based design of multivariable PID controller," *Expert Systems with applications*, vol.36, no.5, pp.9159-9167, 2009.
- [13] G. R. Meza, J. Sanchis, X. Blasco, and J. M. Herrero, "Multiobjective evolutionary algorithms for multivariable PI controller design," *Expert Systems with Applications*, vol.39, no.9, pp.7895-7907, 2012.
- [14] C. H. Liu, and Y. Y. Hsu, "Design of a self-tuning PI controller for a STATCOM using particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no.2, pp.702-715, 2010.
- [15] W. Al-Saedi, S. W. Lachowicz, D. Habibi, and O. Bass, "Voltage and frequency regulation based DG unit in an autonomous microgrid operation using particle swarm optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.53, pp.742-751, 2013.
- [16] M. N. Ambia, H. M. Hasanien, A. Al-Durra, and S. M. Muyeen, "Harmony search algorithm-based controller parameters optimization for a distributed-generation system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.30, no.1, pp. 246-255, 2015.
- [17] Dai, Y.X.; Wang, H.; Zeng, G.Q. Double closed-loop PI control of three-phase inverters by binary-coded extremal optimization. *IEEE Access* 2016, 4, 7621–7632.
- [18] Murugan M, Balaraman P. Selective harmonic elimination PWM method in two level inverter by differential evolution optimization technique[C]// *Recent Advances and Innovations in Engineering. IEEE*, 2014:1-6.
- [19] Razali A M, Kamisman N, Lazi J M, et al. Differential evolution technique in solving HEPWM switching angles of three-phase voltage source inverter[C]// *IEEE International Conference on Power and Energy. IEEE*, 2017:489-494.
- [20] Liu Z, Wu H, Jin W, et al. Two-step method for identifying photovoltaic grid-connected inverter controller parameters based on the adaptive differential evolution algorithm[J]. *Iet Generation Transmission & Distribution*, 2017, 11(17):4282-4290.
- [21] Lu K D, Zeng G Q, Chen J, et al. Comparison of binary coded genetic algorithms with different selection strategies for continuous optimization problems. *Chinese Automation Congress*, 2013, pp.364-368.

- [22] M. I. Menhas, L. Wang, M. Fei, H. Pan, Comparative performance analysis of various binary coded PSO algorithms in multivariable PID controller design, *Expert Systems with Applications*, 2012, 39: 4390-4401.

【作者简介】



¹ 王环（1983-），男，汉族，在职博士研究生，中级职称，研究方向为新能源发电、电能转换、电能质量控制。

Email:wh83@wzu.edu.cn

² 戴瑜兴（1956-），男，汉族，博士，教授，研究方向：大功率特种电源技术、电能转换技术等。