

基于免疫遗传算法的逆变器控制策略及其 DSP 实现

沈 煜, 陈柏超, 袁佳歆, 张 因

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 采用一种基于免疫遗传算法 IGA (Immune Genetic Algorithm) 的逆变器控制策略对逆变器进行控制, 在保留普通遗传算法 (GA) 优良特性的同时, 针对控制对象的具体特点, 建立了相关的数学模型, 使用疫苗、浓度函数和抗体选择函数对进化过程进行优化, 提高了算法收敛速度和局部收敛能力。设计和搭建了基于数字信号处理器 (DSP) 的实验平台, 使用 C 语言编写实验程序, 实现了控制策略。对实验平台的硬件结构作了详细说明, 针对绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 驱动模块 EXB 841 的缺点设计了改进措施, 介绍了软件设计流程。将采用 IGA 的逆变器输出波形与采用常规控制策略的逆变器输出波形进行了比较, 理论分析和实验结果证明了该算法的可行性与有效性。

关键词: 免疫遗传算法; DSP; 逆变器控制; EXB 841

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)06-0040-04

0 引言

逆变器在有源电力滤波器 (APF)、不间断供电电源 (UPS) 和其他工业设备中都有着广泛应用, 对逆变器控制策略的研究具有重要的实用价值和理论意义。目前, 逆变器控制技术发展十分迅速, 出现了许多控制策略^[1-6]。

本文在文献 [6] 的思想基础上将免疫遗传算法 IGA (Immune Genetic Algorithm) 应用于逆变器控制, 以降低输出电流波形的谐波畸变率为优化目标, 建立了数学模型, 设计和搭建了基于数字信号处理器 (DSP) 的实验平台实现基于 IGA 的控制策略, 并对实验系统的硬件结构和算法的软件实现作了详细说明。实验结果证明: 基于 IGA 的逆变器控制策略收敛速度快, 较好地实现了预期目标, 具有很好可行性与有效性。

1 基于 IGA 的逆变器控制策略

1.1 IGA 的基本思想

IGA 是在遗传算法 (GA)^[7] 基础上引入免疫系统^[8-9] 的概念而建立的, 它能在保留 GA 原有优良特性前提下, 有针对地利用实际研究对象的特征信息优化进化过程, 从而达到快速、准确和高效的目的。

本文通过对系统接种疫苗利用“二次应答”加快算法的搜索速度, 其中接种的治疗型疫苗能提高 IGA 的局部搜索能力, 但是容易造成“早熟”收敛, 陷入局部最优。通过调节抗体浓度, 适当增加较小适应度抗体的进化几率, 人为加入新的抗体以增加群体的多样性等措施避免算法的不成熟收敛。

1.2 控制策略数学描述

为便于分析, 本文以单相全桥两电平电压型逆变器为例进行控制。逆变电路图如图 1 所示。

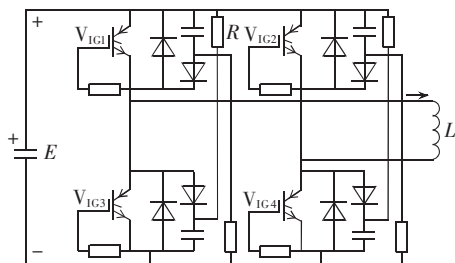


图 1 逆变器实验电路图

Fig.1 Single-phase full-bridge inverter

该逆变电路由电容 C 提供直流电压 E , 通过控制绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 开关器件 $V_{IG1} \sim V_{IG4}$ 的开通和关断使负载电感 L 上输出的电流 i 尽可能接近目标波形 (本文为工频正弦波)。

1.2.1 逆变器控制的数学模型

逆变器开关器件的工作模式只有开通 (1) 和关断 (0) 2 种。本文作如下定义:

$$x_{ni} = \begin{cases} 1 & V_{IG1}, V_{IG4} \text{ 开通, } V_{IG2}, V_{IG3} \text{ 关断} \\ 0 & V_{IG2}, V_{IG3} \text{ 开通, } V_{IG1}, V_{IG4} \text{ 关断} \end{cases}$$

x_{ni} 为状态变量, 其不同状态构成了一个空间矢量 $X_i = (x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{mi})$, 这样就实现了状态矢量与 IGA 数据序列之间的映射。

1.2.2 适应度评价函数

本文建立适应度函数 (F) 评价逆变器实际输出波形与理想波形 (标准工频正弦波) 之间的接近程度。设定目标函数为 $I_o(t) = A \sin(2\pi ft)$, 设 I_m 为第 m 个时间段的逆变器输出电流, Δt 为作用时间。则适应度评价函数为

$$F(\mathbf{x}_i)=1/\sum_{m=0}^n\int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t}|I_m(t)-I_o(t)|dt$$

1.2.3 浓度函数

浓度函数是某种抗体的数目在全部抗体数目中所占的比例,IGA 用它控制特定抗体的数目,防止算法的“早熟”收敛。在状态空间中,抗体 $\mathbf{x}_i$ 与全部抗体的空间距离为

$$E(\mathbf{x}_i)=\sum_{m=0}^N e(\mathbf{x}_i,\mathbf{x}_m)$$

式中 N 为系统中抗体的总数。

根据上述分析,可以定义浓度函数为

$$D(\mathbf{x}_i)=1/E(\mathbf{x}_i)$$

1.2.4 抗体选择函数

遗传算法中,目标函数的监督作用是通过选择算子淘汰弱个体来隐含实现的,使用选择算子对群体中的个体进行优胜劣汰操作。选择操作建立在对个体的适应度基础上,主要目的是为了避免基因缺失,提高全局收敛性和计算效率。通常采用一个有倾向性的选择程序促成更合适的抗体。本文采用如下选择函数对进化过程进行控制,在抗体浓度一定的情况下,使适应度大的抗体以较大概率被选择;在适应度一定的情况下,使浓度大的函数以较小概率被选择,以保证抗体种类的多样性。

$$P(\mathbf{x}_i)=\omega\frac{F(\mathbf{x}_i)}{\sum_{j=0}^n F(\mathbf{x}_j)}+(1-\omega)\frac{1}{D(\mathbf{x}_i)}$$

其中, ω 为权重因子,用以描述适应度和浓度函数对进化过程影响的大小。显然,当 $\omega>0.5$ 时,适应度对进化过程影响更大,反之浓度函数的影响更大。实验证明: $\omega=(0.35\sim0.65)$ 时能通过选择函数对进化过程进行较合理的控制。

2 IGA 在 DSP 平台的实现

2.1 实验平台的硬件结构

DSP 实验平台原理图如图 2 所示,主要由数据采集电路、DSP 控制板、PC 机、驱动保护电路和逆变电路组成。使用 TI 公司生产的 TMS320LF 2407a 型 DSP^[10],该型号 DSP 是面向电力电子控制领域的专用 DSP,具有 EVA 和 EVB 2 个事件管理器模块,能够实现 PWM 对称和非对称波形,能对死区实现可编程控制,每个事件管理模块具有 3 个捕获单元和片内

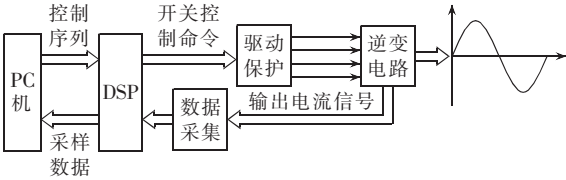


图 2 基于 DSP 的实验平台原理图

Fig.2 Experimental platform based on DSP

光电编码器接口电路。此外,它还具有 16 通道的 AD 转换、串行通信接口(SCI)、16 位串行外设接口模块(SPI)和 CAN 控制器模块。

数据采集电路通过 SCT254FK 精密电流互感器采集逆变器输出的电流信号,送至 DSP 控制板中的 AD 转换芯片 MAX125 实现数据采集。MAX125 是内含采样保持器的高速多通道 14 位 AD 转换芯片,可实现对 4 个通道的并行采样。其高速并行数据接口及总线时序特征与多数数字信号处理器及 16/32 位微处理器的特性兼容,因此可以和 DSP 并行工作,从而减轻了 DSP 的工作负担。

DSP 读取数据采集结果送入 PC 机,PC 机根据 IGA 计算出逆变器开关最优控制序列输入 DSP,通过 DSP 中的事件模块输出一系列的开关控制命令(PWM 控制信号)。

PWM 信号通过基于 EXB 841 的驱动保护电路放大以后控制逆变电路开关器件的开通和关断,使逆变器输出预期波形。

逆变电路根据图 2 搭建,使用箝位式 RCD 吸收电路作为电力电子开关的缓冲电路,抑制了集射极间的尖峰电压,减小了电阻的功耗。不仅对尖峰电压吸收效果好,而且开关损耗也较低。

正确设计和合理使用 IGBT 的驱动保护电路,是逆变器正常工作的关键。本文采用 EXB 841 作为 IGBT 的驱动模块。EXB 841 是混合 IC,能驱动高达 400 A 的 600 V IGBT 和高达 300 A 的 1 200 V IGBT,是目前应用非常广泛的一种驱动模块。但它存在容易烧毁、过流保护盲区大和负栅压过低的缺点,本文设计了如图 3 所示的驱动保护电路:通过外扩 NPN 三极管 9013 V_1 、PNP 三极管 9012 V_3 和 10 V 稳压管 V_{D3} (1N4740)可解决负栅压过低、不适于高压电路的缺点;在 V_{D1} 与 IGBT 的 C 极间反串一个 3.3 V 的稳压管 V_{D2} (1N4728)使保护阈值降为 4.2 V,防止器件

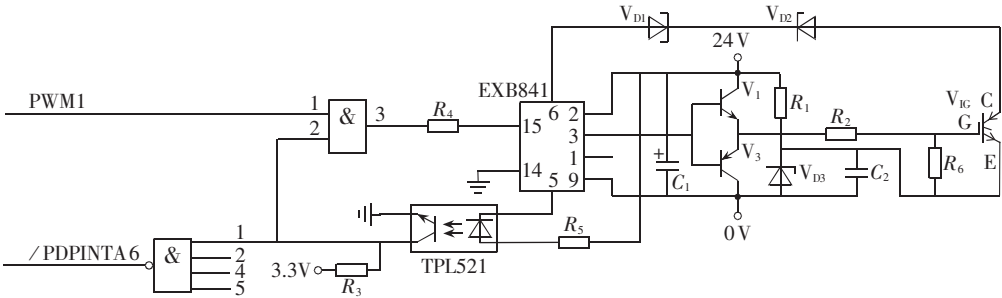


图 3 驱动电路图

Fig.3 Drive circuit

过流烧毁。当检测到 IGBT 过流后,EXB 841 的 5 脚变为低电平,光耦 TPL521 输出低电平,通过与门封锁控制信号输入,同时使四输入与非门输出低电平触发功率驱动保护中断,作出相应的保护处理。

门极电阻 R_2 的取值很重要。 R_2 增加,IGBT 通断时间延长,使开通和关断损耗增加; R_2 减小,可能引起触发误导通或损坏 IGBT。一般 R_2 取十几欧到几十欧,本系统取 R_2 为 $30\ \Omega$ 。为防止 IGBT 误导通现象的发生,在栅射间并联一电阻 R_6 可起到一定的抗干扰作用。一般 R_6 取 $(1\,000\sim5\,000)R_2$,而且应将它并联在栅射极最近处。电路中的电容器 C_1 和 C_2 用来平抑因电源接线阻抗引起的供电电压变化。

2.2 软件程序设计

本文使用 C 语言在 DSP 调试环境 CCS 下成功实现了基于 IGA 的控制策略对逆变器的控制。主要的程序流程图如图 4~7 所示。

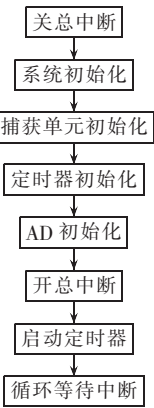


图 4 主程序流程图
Fig.4 Flowchart of main program

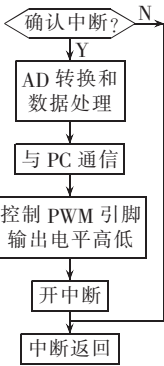


图 5 定时器周期中断
Fig.5 Flowchart of timer interruption program

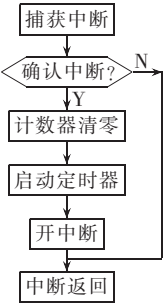


图 6 捕获中断流程图
Fig.6 Flowchart of capture interruption program

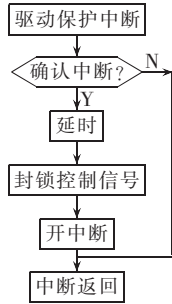


图 7 功率驱动保护中断
Fig.7 Flowchart of protection interruption program

3 实验结果分析

本文搭建的实验平台包括:PC 机、数据采样电路和同步电路、基于 EXB841 的驱动电路、DSP 控制板以及逆变电路。

3.1 实验参数

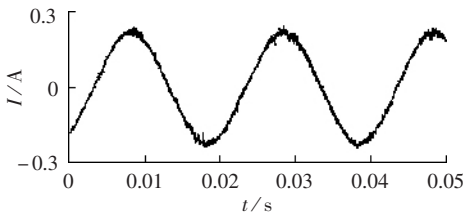
目标输出电流 $I_o(t)=0.24\sin(2\pi\times50\times t)$,逆变器电路 $E=35\text{ V}$, $L=0.22\text{ H}$ 。系统采样频率 20 kHz ,即每个状态变量的作用时间为 $\Delta t=50\ \mu\text{s}$,为了便于分析,本文忽略器件的开关损耗。最大迭代次数

为 25,每代抗体数为 50,每个抗体含有 100 个基因(即开关状态变量个数为 100),交叉率 0.7,变异率 0.005,选择函数中 $\omega=0.5$ 。

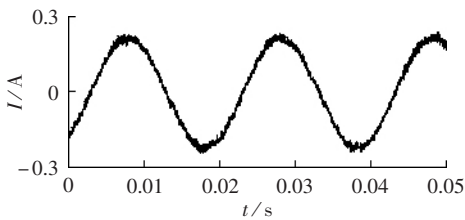
3.2 实验结果及分析

本文分别采用定时比较和 IGA 2 种控制策略,对实验结果进行分析和比较,并使用 Tektronix 示波器分析专用软件 Wavestar Version 2.4 对输出电流波形进行谐波分析。结果如表 1 和图 8、图 9 所示(λ 为谐波含量, N 为谐波次数)。

表 1 试验结果比较分析			
Tab.1 Comparison of two control strategies			
控制策略	适应度	输出波形 THD/%	每周期开关次数
定频滞环	5435	1.663	96
IGA	9706	1.103	192

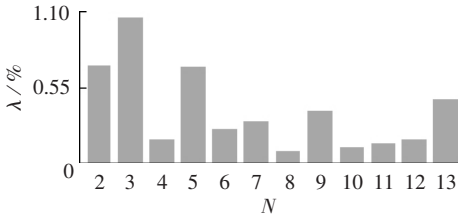


(a) 定频滞环控制

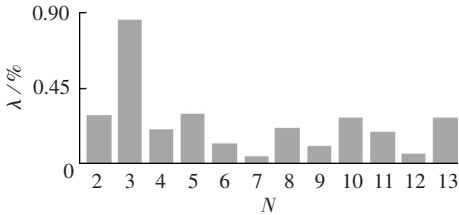


(b) IGA 控制

图 8 不同控制策略所对应的输出波形
Fig.8 Output waveforms of two control strategies



(a) 定频滞环控制



(b) IGA 控制

图 9 输出波形的谐波分析
Fig.9 Harmonic analysis of two control strategies

通过分析比较可以看出:基于 IGA 的逆变器控制策略的试验效果要优于滞环控制策略。输出波形的 THD 较后者减小 33.7%。

4 结语

本文的创新之处在于:首先,引入IGA并应用于逆变器最优控制策略的选取上;其次,设计了基于DSP和PC的硬件实验系统,并针对EXB841的缺点设计了改进电路,通过实验验证了该思想的可行性;最后,通过与常规控制策略的比较证明了本思想的有效性,为今后IGA在复杂系统中的应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] WANG Hong-yan, LU Man, DENG Yan, et al. Relationship between flying capacitor multilevel inverter PWM methods and switching loss minimized PWM method for flying capacitor multilevel inverter [C]//Proceedings of 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2004: 4418 - 4422.
- [2] KOVARI A, KADAR I, HALASZ S. The influence of inverter control algorithm and DC link voltage on the inverter switching loss [C]//Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology. Hammamet, Tunisia: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2004: 590 - 595.
- [3] 王学华, 阮新波. SPWM控制单相三电平逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 73 - 76.
WANG Xue-hua, RUAN Xin-bo. SPWM control single phase three electrical level inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 73 - 76.
- [4] LAI Yen-shin, SHYU Fu-san. Optimal common-mode voltage reduction PWM technique for induction motor drives with considering the dead-time effects for inverter control [C]//Proceedings of 38th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference, 2003. Salt Lake City, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2003: 152 - 159.
- [5] SCHUTTEN M J. Genetic algorithms for control of power converters [C]//Proceedings of 1995 26th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Atlanta, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1995: 18 - 22.
- [6] 袁佳歆, 陈柏超, 贾嘉斌. 基于遗传算法的逆变器控制规律[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 32 - 35, 50.

- YUAN Jia-xin, CHEN Bai-chao, JIA Jia-bin. Genetic algorithm based approach for inverter control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 32 - 35, 50.
- [7] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
 - [8] LIN C H, CHEN C S, WU C J, et al. Application of immune algorithm to optimal switching operation for distribution-loss minimization and loading balance [J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 2003, 150(2): 183 - 189.
 - [9] WANG Zi-qiang, FENG Bo-qin. Information query immune algorithm based on vector space model [C]//Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Shanghai, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2004: 2515 - 2519.
 - [10] 刘和平, 王维俊, 江渝. TMS320LF240x DSP C语言开发应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
 - [11] 余勇, 刘正之. 基于DSP的有源逆变复合控制 [J]. 电气传动, 2005, 35(8): 36 - 39.
YU Yong, LIU Zheng-zhi. Simple and novel compound control scheme for high-power inverter [J]. Electric Drive, 2005, 35(8): 36 - 39.
 - [12] 龚春英, 沈忠亭, 李春燕, 等. 神经网络在逆变器控制中的应用 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 98 - 102.
GONG Chun-ying, SHEN Zhong-ting, LI Chun-yan, et al. Application of a SPWM inverter with neural-net control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 98 - 102.
- (责任编辑: 李育燕)

作者简介:

沈煜(1983-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与控制、电力电子技术在电力系统中的应用 (E-mail: totoshenyu@163.com);

陈柏超(1960-), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统过电压及防护技术、电能质量与控制、电力电子技术在电网中的应用;

袁佳歆(1981-), 男, 江苏金坛人, 博士研究生, 研究方向为电能质量与控制、电力电子在电力系统中的应用、灵活交流输电技术;

张因(1983-), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与稳定分析。

IGA-based control strategy for inverter and its realization on DSP platform

SHEN Yu, CHEN Bai-chao, YUAN Jia-xin, ZHANG Nan

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A control strategy based on the IGA (Immune Genetic Algorithm) is put forward for inverters. With excellent characteristics of the common GA (Genetic Algorithm) reserved, a concerned math model is established according to concrete characteristics of the controlled object, and the convergence speed and the partial convergence capability are improved by using the bacterin, concentration functions and the antibody selection function for the evolution process optimization. An experimental platform based on the DSP (Digital Signal Processor) is designed and built up. C language is used to write the experimental program for realizing the control strategy. The hardware structure is explained in detail. Furthermore, improvement measures for EXB841, which is the drive module of the IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), are presented and the software design flow is introduced. Output waveforms of the inverter with the IGA and with the routine control strategy are compared. The theoretic analysis and experiment results prove the feasibility and validity of the algorithm.

Key words: immune genetic algorithm; DSP; inverter control; EXB841