

基于模型设计的孤岛微源逆变器快速开发

卞晶¹, 胡博², 谷万江³, 臧传治¹

(1.中国科学院沈阳自动化研究所,工业控制网络研究室,辽宁 沈阳 110016;
2.国网葫芦岛供电公司,辽宁 葫芦岛 125000; 3.国网鞍山供电公司,辽宁 鞍山 114000)

摘要:以实现孤岛微源逆变器的快速开发为研究目的,采用具有高可靠性的比例积分(PI)控制算法实现孤岛微源的 V/F 双闭环控制器。利用粒子群优化(PSO)算法对 PI 控制参数进行全局优化设计,通过 Simulink 仿真验证了控制算法与控制参数的有效可行性。然后基于模型设计开发方法完成控制器代码的自动快速生成,缩短从仿真到编程调试的开发周期。最后搭建了一台孤岛微源系统,并进行了相关实验。

关键词:微源逆变器;模型设计;粒子群优化;比例积分

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-100X(2018)03-0004-04

Rapid Development of Island-type Micro-source Inverter Based on the Model Design Method

BIAN Jing¹, HU Bo², GU Wan-jiang³, ZANG Chuan-zhi¹

(1.Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The rapid development of an island-type micro-source inverter as the research purposes is taken. Proportional integral(PI) control strategy with high reliability is adopted to implement V/F double closed-loop controller of island-type micro-source. Particle swarm optimization(PSO) is used in the process of controller design. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm and the control parameters. And then, the control codes are generated automatically based on the model design method. It could shorten the development cycle from simulation to programming debugging. At last, an island-type micro-source inverter is set up and some experiments are carried out.

Keywords: micro-source inverter; model design; particle swarm optimization; proportional integral

Foundation Project: Supported by National Natural Sciences Foundation of China(No.61503371); Science and Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., (No.5222AS15006G)

1 引言

微电网中含有大量的随机性微源,并多以逆变器接口的形式接入微电网中^[1]。在孤岛运行模式下,V/F控制型逆变器常用来为微电网提供电压支撑,其采用电压、电流双闭环控制结构,以满足孤岛模式下微电网电压和频率的稳定^[2-4]。对于逆变器电压、电流的控制,大量控制策略被应用,如预测控制、重复控制、神经网络控制及PI控制等^[5]。而控制器开发过程一般先在 Matlab/Simulink 软件中对控制策略进行仿真研究,验证算法的正确性^[6],当仿真结果正确后再将算法改成 C 语言代码烧写在数字信号处理器(DSP)中,完成编程、编译、调试等步骤。从仿真模型到实物开发的过程

中,由于人工编写算法代码错误、DSP 寄存器配置不正确等原因,容易造成仿真算法在 DSP 中无法复现,仿真与实物开发脱节的问题,需要花费大量精力进行代码修改及调试,影响开发速度^[7]。

在此为实现 V/F 型孤岛微源逆变器的快速开发,选用具有稳定可靠性的双 PI 闭环控制策略。为避免在工程应用中对 PI 控制参数反复试凑,首先利用 PSO 算法对 PI 控制参数进行全局优化设计,提高控制精度。然后基于模型设计开发方法,直接由 Matlab/Simulink 控制器模型生成 DSP 可执行代码,顺利完成从概念构思到代码实现的全过程,缩短从仿真到编程调试的开发周期。详细阐述了基于模型设计的孤岛微源逆变器的快速开发方法和相关调试技巧。

2 微源逆变器 V/F 控制策略

V/F 控制策略适用于微电网孤岛运行模式,通过控制主控微源逆变器,使其输出电压保持幅值和频率恒定。主控微源逆变器常使用电压外环、

基金项目:国家自然科学基金(61503371);国网辽宁省电力有限公司科学技术项目(5222AS15006G)

定稿日期:2017-06-13

作者简介:卞晶(1988-),女,辽宁沈阳人,硕士,助理研究员,研究方向为智能电网与微电网控制。

电流内环双闭环控制方案。电压外环负责产生内环参考电流值,为微电网提供电压支撑;电流内环用于控制电流,增大逆变器控制系统的带宽,加快抵御扰动的动态过程,改变逆变输出电能质量。

图 1 为微源逆变器采用 V/F 控制策略的结构框图,包括主逆变器拓扑、控制算法、滤波电路等。

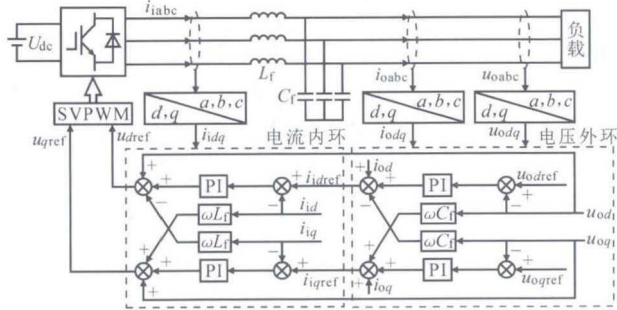


图 1 V/F控制策略的结构框图

Fig. 1 The structural diagram of V/F control strategy

其中, u_{oabc}, i_{oabc} 为经滤波后逆变器输出电压、电流, 经过 $a, b, c/d, q$ 坐标变换, 得到同步旋转 d, q 坐标系下对应值 u_{odq} 和 i_{odq} ; u_{odref}, u_{oqref} 为电压外环参考值, 根据微源逆变器输出电压等级设定; i_{iabc} 为开关管输出电流值, 经过 $a, b, c/d, q$ 坐标变换, 得到 d, q 坐标系下对应值 i_{idq} ; i_{idref}, i_{iqref} 为电流内环参考值, 由电压外环计算得到。

电压外环采用 PI 调节, 引入输出电流 i_{odq} 前馈, 抑制负荷波动对输出电压的影响, 提高系统的动态响应性能。调节电压外环获取内环电流参考值:

$$\begin{cases} i_{idref} = (u_{odref} - u_{od}) (k_{pi} + k_{ii}/s) + i_{od} - u_{od} \omega C_f \\ i_{iqref} = (u_{oqref} - u_{oq}) (k_{pi} + k_{ii}/s) + i_{oq} + u_{oq} \omega C_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_{pi}, k_{ii} 为电压环比例、积分系数; C_f 为滤波器电容。

电流内环输出的空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 控制器输入指令电压参考值为:

$$\begin{cases} u_{dref} = (i_{idref} - i_{id}) (k_{pi} + k_{ii}/s) - i_{id} \omega L_f + u_{od} \\ u_{qref} = (i_{iqref} - i_{iq}) (k_{pi} + k_{ii}/s) + i_{id} \omega L_f + u_{oq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_{pi}, k_{ii} 为电流环比例、积分系数; L_f 为滤波器电感。

3 基于 PSO 算法的 PI 参数优化

PI 控制参数的选取是决定系统响应速度、跟踪精度的关键, 虽然根据公式可计算 PI 参数值^[8], 但理论值与实际值相差甚大, 在工程应用中需要反复尝试、试凑, 造成时间和人力的浪费。PSO 算法对非线性系统的适应性强, 易于工程实现。因此采用 PSO 算法对 PI 控制参数进行优化, 加快 PI 参数调试流程。

3.1 PSO 原理

PSO 算法的基本原理为^[9]: 首先在可行解空间

中随机生成初始种群, 并由目标函数确定一个适应值。由一个速度决定粒子在解空间中运动的方向和距离。粒子搜索当前最优粒子, 经过迭代搜索, 更新随机粒子, 寻求最优解。每一代中, 粒子跟踪两个极值: 粒子当前找到的最优解 p_{best} 和整个种群中当前最优解 g_{best} 。

假设一个 N 维空间中存在一个由 m 个粒子组成的种群 $x = [x_1, \dots, x_i, \dots, x_m]$, 其中 x_i 为第 i 个粒子的位置, $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T$, v_i 为飞行速度, $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}]^T$, p_i 为个体极值, $p_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}]^T$, p_g 为种群全局极值, $p_g = [p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn}]^T$ 。 x_i 将根据追随当前最优粒子的原理, 更新速度和位置如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m, m$ 为种群规模; t 为当前迭代次数; c_1, c_2 为学习因子, 是非负数; r_1, r_2 为介于 $[0, 1]$ 间的随机数。

以时间乘绝对误差积分准则作为适应度函数, 来判断最优, 具体公式为:

$$J = \sum_{t=t_0}^{t_1} [(t-t_0)W|E(t)|] \quad (4)$$

式中: t 为仿真运行时刻; t_0 和 t_1 为仿真起始和结束时间; W 为权重矩阵; $|E(t)|$ 为绝对误差矩阵, $E(t) = [u_{odref} - u_{od}, u_{oqref} - u_{oq}, i_{idref} - i_{id}, i_{iqref} - i_{iq}]^T$ 。

3.2 PSO 实施步骤

PSO 计算流程: ①初始化系统参数, 包括随机产生 m 个粒子的粒子速度、粒子位置、设定位置、速度上下限范围等; ②根据式 (4) 计算每个粒子的适应度函数; ③比较粒子适应度值, 更新 p_{best}, g_{best} ; ④根据式 (3) 更新粒子速度和位置, 产生新种群; ⑤判断是否满足结束条件 (达到给定精度或达到迭代次数), 如果满足则进入 ⑥, 否则跳转到第 ②步, 继续执行; ⑥结束 PSO 计算, 输出优化后 PI 参数。

3.3 PSO 参数选择

根据 $m=30, t=15, c_1=c_2=2, W=[1, 1, 1, 1]$, 使用 m 语言编写 PSO 算法, 得到基于 PSO 的 PI 控制参数, 其中电压环 PI 控制参数为 $k_{pi}=4.86, k_{ii}=0.24$, 电流环 PI 参数为 $k_{pi}=2.71, k_{ii}=5$ 。

4 基于模型设计的控制器开发流程

4.1 软硬件平台

选用 TMS320F28335 浮点型 DSP 作为微源逆变器的主控芯片, 该 DSP 可直接进行浮点运算, 与 Matlab 的双精度浮点型数据格式转换起来更为直接、方便。此外还需准备配套 DSP 仿真器 XDS100

及 CCS5.5 版本 DSP 集成开发环境。为支持高版本(CCS4 及以上版本)的 DSP 开发环境,选用 2012 或以上版本的 Matlab 软件,此处选用 Matlab2012b。不同于 CCS3.3 版本在与低版本的 Matlab 配合使用时可以直接自动连接生成代码和 DSP 工程^[10],在使用高版本的 CCS5.5 及 Matlab2012 时,需提前在 Matlab 中对 Makefile 进行配置,在 Matlab 窗口中执行 xmakefile setup 命令,配置 CCS 版本、安装路径、编译路径等相关信息,建立起 CCS5.5 和 Matlab 的连接,为基于模型设计的自动代码生成做好准备。

4.2 Simulink 仿真

按照图 1 在 Simulink 环境下搭建主从模式下微源逆变器 V/F 控制策略模型,包括对采样电压、电流进行 $a, b, c/d, q$ 变换子系统、电压电流双闭环控制子系统、SVPWM 子系统。控制器内的上述全部子系统将在后续步骤中由 Matlab 自动生成控制代码。Simulink 模型中的仿真参数根据实际实验平台中的硬件参数进行设定,以方便完成最终从模型到实物直接代码生成的应用。受硬件实验条件的限制,降低了仿真的电压等级。逆变器模型参数为:直流侧电压 400 V, 开关频率 10 kHz, 输出滤波电感 6.6 mH, 输出滤波电容 4.8 μ F, $k_{pu}=4.86, k_{iu}=0.24, k_{pv}=2.71, k_{vi}=5$ 。初始负荷 150 Ω , 突变负荷 1, 2 分别为 75 Ω +270 mH 和 75 Ω +40 μ F。

仿真中设置固定仿真步长 5×10^{-6} s, 选择离散化求解器。Simulink 模型中全部使用离散化模块搭建 V/F 控制算法。为验证控制器的动态性能,设计两组实验。第一组实验为在第 0.2 s 时由 150 Ω 纯阻性负荷切换为 75 Ω +270 mH 的阻感性负荷,并在第 0.26 s 时卸载掉该负荷。第二组实验设计为由阻性负荷切换为 75 Ω +40 μ F 的容性负荷,得到的两组实验三相电压、电流仿真结果如图 2 所示。由图可见,无论是突增或突减负荷,还是改变负荷属性,基于优化 PI 的 V/F 控制策略均能保证逆变器输出三相电压保持幅值和频率恒定。通过 Simulink 仿真结果证明了 V/F 控制策略的有效性及其基于 PSO 后得到的 PI 控制参数的可行性。

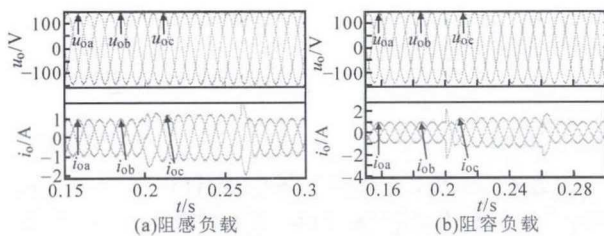


图 2 三相输出电压及电流波形

Fig. 2 The output voltage and current waveforms

4.3 SIL 软件在环测试

在 Simulink 环境下得到正确的仿真结果后,对 V/F 控制器子系统进行 SIL 软件在环测试。软件在环测试,即将控制算法模型生成的 C 代码编译成 S-function 模块,替换原来模型中的控制器部分,如果 S-function 模块表现出的功能与原 Simulink 物理模型表现出的功能完全一致,那么可认为生成的代码和用于代码生成的原模型一致。

SIL 测试步骤为:①在 Configuration Parameters 中选择定步长离散求解器;②在 Code Generation 页面,设置 TLC 文件为 ert.tlc;③Code Generation \rightarrow Verification \rightarrow SIL or PIL verification block 中选择 SIL,同时勾选 Report,生成算法生成报告;④右键 V/F 控制子系统模块(内含锁相环、电压电流双闭环算法),选择 C/C++ Code \rightarrow Build This Subsystem,生成控制算法对应的 C 语言代码编写的 S-function 内部结构及 C 代码报告;⑤给 V/F 控制子系统模型和生成代码的 S-function 模块加载相同的输入,观察两种模块生成的 PWM 波形情况。图 3 为经 Simulink 控制子系统模型和 S-function 模块输出的单路 PWM 波 u_{um} 和 u_s 以及两者做差得到的波形 Δu 。可见,两种模式下输出的 PWM 波形一致,波形差值为零。可见,控制器模型生成的 C 代码和原控制器 Simulink 模型具有等效性。



图 3 PWM 输出等效性验证波形

Fig. 3 The waveforms of PWM output to verify equivalence

4.4 DSP 代码的自动生成

仿真结果和 SIL 在环测试验证了控制算法的正确性以及代码生成的一致性,随后执行将控制算法自动转化为 DSP 代码的操作:

(1) 加入 DSP 处理器 在模型库 Embedded Coder \rightarrow Embedded Targets 中选择 Target Preferences 模块,将其中 IDE/Tool Chain 配置为与使用的 CCS5.5 环境相一致,处理器选择为使用的 F28335。

(2) 配置 DSP 各功能模块 在 Embedded Coder \rightarrow Embedded Targets \rightarrow Texas Instruments C2000 \rightarrow C28x3x 中选择需要使用的 ADC, SCI Transmit, EPWM 模块。ADC 模块根据硬件设计配置转换通道数为 9,分别负责采样开关管输出电流值、逆变器输出三相

电压和电流值,将它们作为控制算法的输入,配置数据类型为 Uint16,配置 A/D 转换方式为软件启动。SVPWM 模块输出扇区导通时间,连接 DSP 的 EPWM 模块,模块需要配置 PWM 通道、周期值、计数模式、动作方式等,其中设置 EPWM1(1/2/3)A 与 EPWM1(1/2/3)B 为互补的死区模式。加入 SCI Transmit 模块,利用串口将采样值传输给 PC 主机,将实际物理数据应用于 Simulink 控制对象模型中观测结果,可与实际运行结果进行对比。

(3)代码优化 直接由 Matlab 自动生成的代码存在冗长、繁琐、执行效率低的问题。Matlab 中提供了代码优化功能。在 Code Generation 界面中点击 Set objectives 按钮,选择代码优化类型,包括提高执行效率、减少 RAM 和 ROM 使用量及执行时间、提供模型元素与代码之间映射关系等。选择完毕后,点击 Check model 按钮,选择具体优化的模型,确认后根据生成的优化报告,对相关设置进行调整修改,完成代码优化。

(4)执行自动代码生成 点击 Build Model 按钮执行自动代码生成操作。代码生成结束后,Matlab 将在其默认路径下生成名称“模型名_ticcs”的文件夹,其中包含生成的各类文件内容,如主程序、DSP 相关模块寄存器配置子程序、算法子程序、各类头文件等。

(5)软硬件调试 将代码下载到 DSP 中,并在实验平台中进行软硬件联合调试。利用自动代码转化过程中生成的.h 头文件,理解自动生成的控制算法代码原理,包括 V/F 控制器中涉及到的 $a, b, c/d, q$ 变换、PI 控制、SVPWM 算法等,便于调试人员后续对程序代码进行人工调试及参数修改。

5 系统搭建与实验结果

为实现基于模型设计方法的逆变器快速开发,孤岛微源逆变器实验系统硬件参数及 PI 控制参数与仿真设置完全相同。选用智能功率模块 PS21564 作为开关管。开关频率为 10 kHz,使用 TBC15P 电流互感器和 HV03-10 电压互感器对控制器输出电流、电压值进行采样反馈。输出滤波器采用 LC 滤波形式。

利用快速开发的逆变器实验平台进行 4.2 节所述两组实验,实验场景与仿真参数一致。图 4a 为实验 1 将负荷由阻性负荷切换为阻感负荷。切换后,a 相电流相位落后于电压相位,符合阻感负载特性,三相输出电压稳定,电压总谐波畸变率 $THD=3.52\%$ 。图 4b 为实验 2 将负荷由阻性切换为

阻容负荷。切换后,a 相电流超前于电压相位,符合阻容负载特性,总谐波畸变率为 3.37%。通过两组实验波形可知,针对不同属性的负荷类型,基于模型设计方法快速开发的逆变器均可输出幅值和频率恒定的电压波形,动态性能表现良好。

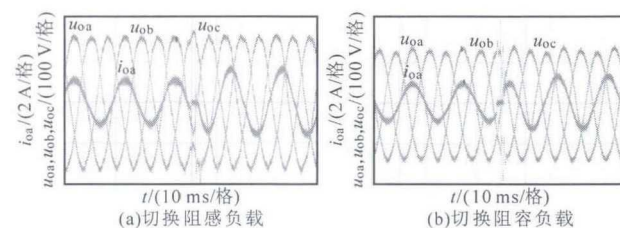


图 4 实验波形

Fig. 4 Experimental waveforms

6 结论

在对基于 V/F 控制策略的孤岛微源逆变器开发过程中,利用粒子群算法对 PI 参数进行全局优化,简化了控制参数的调节时间。基于模型设计方法,经过模型仿真、代码验证、硬件实验环节,验证了该开发方法简便、有效、可行,缩短了逆变器从仿真到实物验证的调试周期,实现了孤岛微源逆变器的快速开发。实验证明了基于模型设计快速开发的微源逆变器动态性能表现良好。

参考文献

- [1] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.
- [2] 陈新,姬秋华,刘飞.基于微网主从结构的平滑切换控制策略[J].电工技术学报,2014,29(2):163-170.
- [3] Rocabert J, Luna A, Blaabjerg F, et al. Control of Power Converters in AC Microgrids[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [4] 纪明伟,张兴,杨淑英.基于电压源逆变器的微电网控制策略[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(11):1678-1682.
- [5] 王成山,高菲,李鹏,等.低压微网控制策略研究[J].中国电机工程学报,2012,32(25):2-8.
- [6] 郑竞宏,王燕廷,李兴旺,等.微电网平滑切换控制方法及策略[J].电力系统自动化,2011,35(18):17-24.
- [7] 赵纪倩,贾要勤.基于 Matlab/Simulink 的 DSP 控制代码开发技术[J].电力电子技术,2010,44(12):59-61.
- [8] 伍家驹,孙红艳,刘斌.基于 CIGRE HVDC 控制器的 PI 参数可视化整定方法[J].电力自动化设备,2012,32(10):115-119.
- [9] 张丽平,俞欢军,陈德钊,等.粒子群优化算法的分析与改进[J].信息与控制,2004,33(5):513-517.
- [10] 王成.基于 Matlab/Simulink 的 DSP 仿真调试研究[J].中国科技信息,2013,2(21):99-101.