

学校编码: 10384
学号: 19920090153647

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

三相电压型逆变器电流预测控制方法研究
Current Predictive Control Method Research for
Three-phase Voltage Source Inverter

薛文东

指导教师姓名: 洪永强 教授

专 业 名 称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 2012 年 8 月

论文答辩时间: 2012 年 9 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2012 年 9 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(厦门市光伏产业研发与公共检测平台)课题(组)的研究成果,获得(洪永强 教授)课题(组)经费的资助,在(测控技术研究室)实验室完成。

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

近年来,随着新能源的加速开发利用,新能源的微网或并网发电等对逆变器的电流跟踪控制技术提出了更高的要求。三相电压型逆变器是目前应用最多最广的一种拓扑结构,其 FCS-MPC (Finite Control Set-Model Predictive Control) 电流预测控制具有响应速度快、跟踪精度高、原理简单、控制灵活等优点,但也存在着控制延时、开关频率不受限制、模型参数敏感等问题,严重影响电流跟踪精度和逆变器性能的发挥等,尤其在多电平电压型逆变器的控制中更为明显。本文主要围绕这些问题展开以下研究工作:

建立了三相电压型逆变器的 FCS-MPC 电流预测控制的数学模型,分析了几种近似离散方法对模型精度的影响,并通过仿真分析深入研究了影响逆变器电流跟踪效果的各种因素和模型参数敏感性问题。

采用内嵌 FPGA 的 Compact RIO 9073 作为控制器,设计并搭建了集测量控制和分析于一体的系统实验平台,通过引入 LabVIEW 的 FPGA 开发环境,简化了 FPGA 的编程,重点解决了 FPGA 中实现 FCS-MPC 电流预测控制算法关键性问题,实现了硬件级的并行高速计算,解决了控制延时的问题,并进行了控制算法的实验验证和分析。

从矢量分析的角度出发,建立几种空间电压矢量使能矩阵表,对参与预测控制算法的矢量进行了使能和屏蔽,大幅度减小了核心算法的计算量;通过分析开关切换次数与电压矢量的关系,建立了动态使能矩阵表,并对零开关矢量进行重配,优化了开关切换在时间轴上的分布,减少了开关切换次数。

通过研究电压矢量的模与开关切换次数间的规律,在控制算法的代价函数中引入了与开关频率相关的权重,建立了开关切换次数表,对权重进行了等比例标定,实现了对开关频率的灵活限制。

通过建立渐近状态观测器对 *back EMF* 参数未知情况进行观测;通过二阶最小二乘在线参数辨识对 *R* 和 *L* 参数未知情况进行在线参数辨识;通过四阶在线参数辨识和信号扰动法对 *R*、*L* 和 *back EMF* 均未知情况进行在线参数辨识,自动修正模型参数,实现电流预测自适应控制。

本文的主要创新工作有：

(1) 设计并搭建了基于 LabVIEW 的控制实验平台，首次将 LabVIEW 的 FPGA 开发环境引入逆变器的电流跟踪控制中，极大降低了 FPGA 开发难度，解决了并行加速计算、有限资源使用、死区控制等问题，实现在 200 万门的 FPGA 中完成 FCS-MPC 控制算法的高速计算，总计算时间 $275ns$ ，总控制延时小于 $2\mu s$ 。

(2) 提出了减小计算量的 FCS-MPC 优化算法，从矢量角度分析了 FCS-MPC 算法的特点，对参与预测控制的电压矢量进行了动态使能和屏蔽，在保持电流跟踪精度前提下，减小了核心算法中约 42% 的计算量。

(3) 提出来减小开关频率的优化算法，通过建立动态使能矩阵表对开关状态切换进行限制或在代价函数中引入与开关频率相关的权重，灵活限制了开关频率。

(4) 在 R 、 L 和 $back\ EMF$ 均未知的情况下，通过四阶最小二乘在线参数辨识和参考信号扰动法实现系统参数的快速准确辨识和电流预测自适应控制。

关键词：逆变器；模型预测控制；LabVIEW FPGA；开关频率

Abstract

In recent years, with the accelerated development and utilization of new energy, higher performance in the current tracking of inverter is required by the micro-grid or grid connected. Three-phase voltage source inverter is the topology which is the most widely used. Its current FCS-MPC (Finite Control Set-Model Predictive Control) takes the advantages of fast response, high accuracy, simple principle, flexible control, etc. However, it also has the problems of control delay, switching frequency unrestricted and model parameter sensitivity, which affect the current tracking accuracy and other performances of inverter. These problems are more serious in multi-level voltage source inverter control. This paper presents the following works focused on these problems:

Build a mathematical model of three-phase voltage source inverter based on FCS-MPC current predictive control; analyse the accuracy affect of the several approximated discrete method to the system model, and research the factors and the model parameter sensitivity problem that related to the current control accuracy by simulation.

Adopt the CompactRIO 9073 with FPGA embedded as the system controller; design and build a experiment platform that including measurement system, control system, data recording and analysis system; simplify the FPGA programming by introducing the LabVIEW FPGA development environment; solve the problems caused by programmed FCS-MPC algorithm in FPGA; realize the parallel high-speed computing the control algorithm and solve the control delay problem.

Construct enable-matrix tables of space voltage vector from space vector point; greatly reduce the core control algorithm calculation by enable or disable the number of voltage vector used in the current predictive control; construct a dynamic enable-matrix table and optimize the switching zero-vector according to the relationship between switching number and voltage vector; realize the reducing of switching frequency and uniform distribution.

Introduce a weight of switching frequency to FCS-MPC cost function according to the law of voltage vector length and swithing number; construct a switching number table to calibrate the weight of switching frequency to proportion and achieve the flexibly limit of the switching frequency.

Observe the model parameter *back EMF* which is in unknown situation by constructed a Luenberger state observer; online identify the model parameter R and L which are in unknown situation by 2-order recursive least squares estimator; online identify the model parameter when all are unknown by 4-order recursive least squares estimator and refence signal disturbance method; auto correct the model parameter and realize current adaptive predictive control.

The creative points of the paper are presented as follows:

(1) Design and build a system control platform base LabVIEW, which introduce the LabVIEW FPGA development environment to current predictive of inverter for the first time, greatly reducing the difficulty in FPGA development; solve the problem of parallel accelerate calculation, usage of limited FPGA resource, deadtime control and etc; realize high-speed calculation of the FCS-MPC current control algorithm in 2 million gate FPGA resource, total computation consume 275ns, total control delay is less then $2\mu s$.

(2) Propose an FCS-MPC optimized algorithm of reducing the calculation. It can reduce the main control algorithm about 42% calculations by enable or disable voltage vector involved in predictive control.

(3) Propose an FCS-MPC optimized algorithm of reducing switching frequency. It can limit the switching frequency flexibly by constructed a dynamic enable-matrix table or introduced a weight of swiching frequency to cost function.

(4) Identify the R L and *back EMF* parameter online fastly and realize current adaptive predictive control by recursive least squares estimator and refence signal disturbance method when all model parameter are in unknown condition.

Keywords: Power Inverter; MPC; LabVIEW FPGA; Switching Frequency

目 录

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 摘 要 | I |
| Abstract | III |
| 第一章 绪 论 | 1 |
| 1.1 逆变技术概述..... | 1 |
| 1.1.1 逆变技术的发展历程 | 1 |
| 1.1.2 逆变技术的发展趋势 | 2 |
| 1.2 三相电压型逆变器..... | 3 |
| 1.3 电流跟踪控制技术..... | 5 |
| 1.3.1 电流 PI 控制..... | 5 |
| 1.3.2 电流滞环比较控制 | 7 |
| 1.3.3 电流滑模控制 | 7 |
| 1.3.4 电流预测控制 | 8 |
| 1.4 问题提出及主要研究工作..... | 14 |
| 1.4.1 问题提出 | 14 |
| 1.4.2 主要研究内容 | 17 |
| 第二章 电流预测控制建模与仿真分析..... | 19 |
| 2.1 电流预测控制方法建模..... | 19 |
| 2.1.1 三相电压型逆变器与 $R-L-E$ 负载数学模型 | 19 |
| 2.1.2 FCS-MPC 电流预测控制原理 | 27 |
| 2.2 系统仿真与分析..... | 30 |
| 2.2.1 Matlab/Simulink 建模仿真 | 30 |
| 2.2.2 系统仿真分析 | 31 |
| 2.3 本章小结..... | 43 |
| 第三章 系统实验平台设计与实验验证..... | 45 |
| 3.1 系统实验方案设计..... | 45 |
| 3.2 硬件实验平台构建..... | 48 |
| 3.2.1 三相两电平电压型逆变器的搭建 | 48 |
| 3.2.2 $R-L-E$ 实验负载的设计 | 53 |
| 3.3 软件程序设计..... | 54 |
| 3.3.1 控制及实验数据采集程序框架设计 | 54 |
| 3.3.2 FPGA 程序的关键问题 | 56 |
| 3.4 实验分析..... | 65 |
| 3.5 本章小结..... | 72 |

| | |
|--|------------|
| 第四章 电流预测控制开关频率优化算法研究..... | 73 |
| 4.1 零开关矢量的优化与重新分配..... | 73 |
| 4.2 控制算法优化..... | 75 |
| 4.2.1 电压矢量优化 | 77 |
| 4.2.2 开关频率优化 | 84 |
| 4.3 电压矢量参考系与开关频率权重..... | 88 |
| 4.3.1 电压矢量参考系 | 88 |
| 4.3.2 开关频率权重 | 91 |
| 4.5 本章小结..... | 96 |
| 第五章 电流预测自适应控制方法研究..... | 97 |
| 5.1 R 和 L 已知 $back\ EMF$ 未知情况状态观测器设计..... | 97 |
| 5.2 R 和 L 未知 $back\ EMF$ 已知情况参数辨识与自适应控制..... | 100 |
| 5.2.1 最小二乘在线参数辨识 | 100 |
| 5.2.2 R 和 L 参数在线辨识和 FPGA 实现 | 102 |
| 5.3 R 、 L 和 $back\ EMF$ 均未知情况参数辨识与自适应控制..... | 109 |
| 5.4 本章小结..... | 118 |
| 第六章 总结与展望 | 119 |
| 6.1 总结..... | 119 |
| 6.2 工作展望..... | 120 |
| 参考文献 | 123 |
| 攻读博士学位期间取得的科研成果 | 129 |
| 致 谢 | 131 |

Table of Content

| | |
|---|------------|
| Abstract | III |
| 1 Introduction..... | 1 |
| 1.1 Inverter Technology Developments and Trends | 1 |
| 1.1.1 Inverter Technology Developments..... | 1 |
| 1.1.2 Inverter Technology Trends | 2 |
| 1.2 Three-phase Voltage Source Inverter | 3 |
| 1.3 Current Control..... | 5 |
| 1.3.1 Current PI Control | 5 |
| 1.3.2 Current Hysteresis Comparators Control..... | 7 |
| 1.3.3 Current Sliding Mode Control | 7 |
| 1.3.4 Current Predictive Control | 8 |
| 1.4 Problems and Works | 14 |
| 1.4.1 Problems | 14 |
| 1.4.2 Research Works | 17 |
| 2 Predictive Current Control Modeling and Simulating | 19 |
| 2.1 Predictive Current Control Modeling | 19 |
| 2.1.1 Three-phase VSI with R-L-E Load Modeling | 19 |
| 2.1.2 FCS-MPC Current Control Principle | 27 |
| 2.2 System Simulation and Analysis | 30 |
| 2.2.1 Matlab/Simulink Modeling and Simulation | 30 |
| 2.2.2 Simulation and Analysis | 31 |
| 2.3 Summary | 43 |
| 3 Platform Design and Experiment Verification | 45 |
| 3.1 Experiment Scheme Design | 45 |
| 3.2 Hardware Experiment Platform Build | 48 |
| 3.2.1 Two-level Three-phase VSI Build | 48 |
| 3.2.2 R-L-E Load Design | 53 |
| 3.3 Program Design | 54 |
| 3.3.1 Control and Data Acquisition Program Scheme | 54 |
| 3.3.2 FPGA Program Key Problems | 56 |
| 3.4 Experiment Verification..... | 65 |
| 3.5 Summary | 72 |
| 4 FCS-MPC Switching Frequency Optimization Algorithm..... | 73 |
| 4.1 Switching Zero-vector Optimization | 73 |

| | |
|---|------------|
| 4.2 Control algorithm Optimization | 75 |
| 4.2.1 Voltage Vector Optimization..... | 77 |
| 4.2.2 Switching Frequency Optimization | 84 |
| 4.3 Voltage Vector Reference and Switching Frequency Weight | 88 |
| 4.3.1 Voltage Vector Reference..... | 88 |
| 4.3.2 Switching Frequency Weight..... | 91 |
| 4.5 Summary | 96 |
| | |
| 5 Current Adaptive Control Research | 97 |
| 5.1 State Observer Design with $R L$ Known and <i>Back-EMF</i> Unknown..... | 97 |
| 5.2 Adaptive Control with $R L$ Unknown and <i>Back-EMF</i> Known | 100 |
| 5.2.1 Least Squares Parameter Identification Online | 100 |
| 5.2.2 R and L Parameter Identification Online and FPGA Implementation | 102 |
| 5.3 Adaptive Control with $R L$ and <i>Back-EMF</i> Unknown..... | 109 |
| 5.4 Summary..... | 118 |
| | |
| 6 Conclusion and Outlook..... | 119 |
| 6.1 Conclusion..... | 119 |
| 6.2 Prospect for Future Work..... | 120 |
| | |
| References..... | 123 |
| | |
| Publications and Rewards..... | 129 |
| | |
| Acknowledgement..... | 131 |

第一章 绪论

逆变技术作为电力电子学四种变换技术中的一种，起源于 20 世纪 30 年代，特别是 80 年代以来随着半导体技术的成熟，逆变技术得到了突飞猛进的发展，被广泛应用于电机控制^[1,2]、光伏并网^[3,4]、APF 有源电力滤波器^[5,6]、UPS 不间断工作电源^[7,8] 等，对推动工业自动化、交通运输、节能、环境污染控制等方面技术的快速发展起到了极为重要的作用。

近年来，随着化石能源逐渐枯竭，能源危机日益严重，以太阳光能、风能、生物能等清洁能源为代表的新能源得到快速开发和推广利用。新能源的微网和并网发电已成为其发展的主流，并对逆变器电流跟踪控制的跟踪精度、转换效率和谐波等几个方面提出更高的要求，成为了近年来逆变技术领域的研究热点^[4,9-12]。

1.1 逆变技术概述

逆变是相对整流（将交流电变换为直流电的过程）而言的，将直流电变换成交流电的过程^[13]。现代逆变器主要通过控制电力电子器件（如 SCR、GTO、STR、IGBT、IGCT）的通断，以实现电能变换的过程。

1.1.1 逆变技术的发展历程

电力电子器件是逆变技术发展的关键器件，其发展水平也直接决定了逆变技术实现方式和控制水平。逆变原理最早在 1931 年提出，1948 年美国西屋电气公司用汞弧整流器制成了 3000Hz 的感应加热用逆变器。1956 年晶闸管(SCR)问世，并首先应用于整流电路，表现出很明显的优越性，之后很快被推广应用到逆变器上。但由于 SCR 是一种没有自关断能力的器件，工作频率低，电流功率因数低，对电网的污染严重，因此限制了逆变技术的发展。20 世纪 50 年代可自关断晶闸管（GTO）问世，并于 70 年代后期应用于大功率电力传动、静止无功补偿器（SVC）等逆变电路中，逆变技术进入全控器件时代，其中以日本三菱、瑞士 ABB 公司技术最为成熟。70 年代末至今，全控型电力电子器件得到迅猛发展，出现了大功率晶体管（GTR）、大功率场效应晶体管（MOSFET），但 GTR

开关频率较低,最高不超过 4kHz,而 MOSFET 因为材料和工艺限制,在功率上很难突破。1983 年,绝缘栅双极晶体管(IGBT)在美国问世。IGBT 是由 GTR 与 MOSFET 复合而成的,具有噪声小,工作频率高等优点,最高可达 100kHz,因此迅速成为中小功率电力电子设备的主流开关器件。1996 年,瑞典发明了集成门极换流晶闸管(IGCT),将硬驱动的 GTO 及其驱动器做成一体,具有功率大,通态损耗小,工作频率高等优点,并将逐步取代 GTO 器件。功率器件集成化,模块化是逆变技术的发展趋势,21 世纪以来,随着微电子技术的发展,功率集成电路(PIC)得到了迅猛的发展并具有方便、可靠、体积小等优点。例如目前在小容量应用领域广泛使用的智能功率模块 IPM(Intelligent Power Module),将多个功率半导体器件及其驱动电路、检测电路、保护电路封装在一个模块中,不仅降低了体积和成本,还大幅提升了可靠性和抗干扰能力^[13,14]。

在逆变器的控制技术中,脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术是应用最多最广的技术,目前中小功率的逆变电路几乎都采用了 PWM 调制技术。PWM 调制控制技术是通过控制输出电压的脉冲宽度,将直流电压调制成等幅值而脉宽可变的系列交流输出电压脉冲,实现输出电压有效值的控制,并能有效的抑制谐波,具有动态响应好等优点。其发展主要经历了以下历程:1963 年 F. G. Turnbull 提出了消除特定谐波法^[15]。1964 年 A. Schonung 和 H. Stemmler 首次提出将通信系统的调制技术应用到交流传动中^[16],开创了正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)变压变频研究的新局面。由于当时开关器件频率的限制,直到 1975 年 Bristol 大学的 S. R. Bowes 等人对 SPWM 做了深入的研究,相继提出了全数字化 SPWM 技术方案、规则采样数字化 PWM 方案、准优化 PWM 技术,提高直流电压的利用率,并对自然采样规律做了简单的近似,为 PWM 控制信号实时计算提供了理论基础,并将该技术正式应用到逆变技术中,使逆变器的性能大幅提升^[14]。此后出现了空间矢量调制技术(SVPWM)^[17]、随机 PWM 技术^[18-20]、电流滞环比较 PWM 技术^[21-23]等。

1.1.2 逆变技术的发展趋势

随着电力半导体器件的高速发展和新型器件的出现,现代逆变技术正朝着高频化,高效率化,高压大功率化,集成化,全数字化控制方向发展。新型 PWM 技术,谐振软开关技术及全数字化控制技术已经成功应用在多种逆变器上^[14,24]。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库