



国防科技图书出版基金

The New Control Technology
for Interfer

逆变控制新技术

邢娅浪 赵锦成 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

逆变控制新技术

The New Control Technology for Inverter

邢娅浪 赵锦成 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

逆变控制新技术/邢娅浪,赵锦成编著. —北京:国防工业出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-118-10057-0

I. ①逆... II. ①邢... ②赵... III. ①逆变电源
IV. ①TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 119130 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 14½ 字数 264 千字

2015 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 65.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专

家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

随着装备信息化的发展,军用装备供电系统的供电质量、可靠性、隐蔽性都影响着武器系统战斗性能的发挥。由于目前柴油、汽油机动力发电机组的军用装备供电系统存在着电能质量差、油料保障压力大、不易隐蔽等缺点,采用分散式供电系统对其进行替代,可以提高装备供电系统的安全性、可靠性和供电质量,对于补充和改进我军武器装备电源供应方式具有重要的意义。而逆变电源作为能量转换装置,在分散式供电系统中发挥着重要的作用。由于武器装备种类的不断增多,逆变电源输出所带非线性负载的种类、数量和比重都迅速增加,而非线性负载所带来的诸如谐波增大、波形畸变等一系列问题将严重影响武器系统的正常工作,从而对供电系统造成严重影响。

由于逆变电源负载的不确定性和参数时变性特点,传统依赖于数学模型进行系统 PID 控制的方法已经不适应逆变电源控制系统的需求。而模糊控制技术由于具有在专家经验的基础上实施控制、不需建立对象精确的数学模型、模糊推理逻辑严谨、易于解释等优点,被认为是应用于逆变电源的智能控制技术的最好方案。但是模糊控制器的设定没有系统的方法,具有很大的主观性和不确定性,无法获得全局最优。因此,寻找新的优化方法对模糊控制器进行优化,从而提高模糊控制器的控制效果,是亟待解决的问题。

基于上述背景,针对现有的逆变电源由于非线性负载引起的输出波形畸变、输出波形质量不好等问题,本书以模糊控制技术为主线,将蚁群优化算法引入到模糊控制优化中,提出了蚁群优化模糊控制系统的系统结构和优化算法,对于逆变电源降低谐波畸变因数、提高输出波形质量具有重要的意义。

本书共分 9 章。第 1 章绪论,由逆变技术在军事领域的应用,提出了军用供电系统逆变电源现存的问题,引出逆变控制技术,对现有的各种逆变控制策略进行了论述。第 2 章为逆变电源输出特性分析,简介了逆变电源系统构成,对逆变电源各组部分进行分析,得出各部分所对应的数学模型,并进行了开环系统仿真分析。第 3 章为逆变电源负荷特性分析,根据装备电气负荷特性建模研究方法,对整流性负荷和冲击型负荷进行研究,得出其对应的数学模型并进行了仿真分析。第 4 章为逆变电源与负荷结构关联分析,针对逆变电源 PID 控制技术,对整流性和冲击性负荷条件下逆变电源 PID 控制特性进行分析,指出了智能控制的必要性。第 5 章针对近几年新兴的几种智能控制方法如免疫遗传算法、支持向

量机等方法在逆变电源系统控制中的应用进行了探讨。第6章针对几种智能控制的缺陷,提出逆变电源模糊控制系统设计,对其存在的问题进行了讨论,提出了采用蚁群算法优化模糊控制参数和结构的构想。第7章针对目前的蚁群算法易陷入停滞的缺点,提出了基于“懒蚂蚁”效应的改进蚁群算法,并进行了仿真验证。第8章为模糊优化策略研究,采用改进蚁群算法对模糊控制器的参数和结构分别进行了优化。第9章为逆变电源模糊控制系统设计与实现,对逆变电源模糊控制系统进行了设计和仿真实验,并进行了逆变电源模糊控制系统硬件及软件实现。对系统的实验波形分析结果表明,该模糊控制系统完全满足设计要求,提高了逆变电源带非线性负荷的输出特性,降低了输出谐波畸变率。

本书可供高等院校电力系统专业的研究生以及从事电力系统科学研究的人员参考。

由于作者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,衷心希望广大读者不吝赐教和批评指正。

编者

2015年1月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 逆变技术的概念	1
1.1.2 逆变技术的军事应用	2
1.1.3 逆变控制的军事需求	3
1.2 逆变控制技术	5
1.2.1 逆变控制的基本概念	5
1.2.2 PWM 调制与控制技术	6
1.3 逆变控制技术发展概述	8
1.3.1 传统逆变控制技术	8
1.3.2 数字逆变控制技术	10
第2章 逆变电源输出特性分析	18
2.1 逆变电源系统构成	18
2.2 逆变电源数学模型	19
2.2.1 PWM 过程的数学模型	19
2.2.2 逆变电路的数学模型	21
2.2.3 输出滤波电路数学模型	23
2.2.4 逆变电源系统数学模型	25
2.3 逆变电源系统仿真分析	26
2.3.1 逆变电源系统数学模型参数确定	26
2.3.2 逆变电源系统数学模型分析	27
2.4 逆变电源系统仿真模型	29
2.5 逆变电源谐波机理分析	31
2.5.1 谐波畸变性能指标	32
2.5.2 脉宽调制波形的傅里叶级数分析	32
2.5.3 规则采样脉宽调制波形的谐波分析	34
2.6 调制度 M 优化策略	37
2.6.1 调制度 M 与 THD 的关系	37
2.6.2 调制度 M 与输出电压幅值的关系	39

2.6.3	调制度 M 优化策略	40
第3章	逆变电源负荷特性分析	42
3.1	装备电气负荷特性建模研究方法	42
3.2	整流性负荷特性及建模	44
3.2.1	整流性负荷的代表性	44
3.2.2	单相不控整流桥数学模型	46
3.2.3	建模仿真分析	53
3.3	电机类负荷结构特性建模	57
3.3.1	单相感应电动机数字模型	58
3.3.2	建模仿真分析	60
第4章	逆变电源与负荷结构关联分析	63
4.1	逆变电源数字 PID 控制	63
4.1.1	PID 控制基本原理	63
4.1.2	数字 PID 控制在逆变电源中的应用	64
4.1.3	逆变电源数字 PID 控制器分析	66
4.1.4	线性负荷下逆变电源 PID 控制分析	68
4.2	整流性负载下的逆变电源 PID 控制分析	69
4.2.1	动态性能	70
4.2.2	输出波形的畸变机理	72
4.2.3	系统稳定性分析	74
4.3	冲击性负荷条件下的逆变器特性分析	76
4.3.1	逆变器—感应电动机系统模型	77
4.3.2	仿真结果分析	77
4.4	智能控制的必要性	78
第5章	智能控制在逆变电源控制中的应用	79
5.1	免疫遗传算法用于逆变电源控制优化	80
5.1.1	状态空间矢量	81
5.1.2	评价函数	81
5.1.3	疫苗的接种与注入	82
5.1.4	抗体选择函数	83
5.1.5	仿真	83
5.1.6	实验	84
5.2	遗传算法用于逆变电源最优控制	85
5.2.1	多目标优化函数	86
5.2.2	遗传算子和参数的选择	87
5.2.3	仿真实验分析	87

5.2.4	结束语	90
5.3	支持向量机用于逆变器控制策略	90
5.3.1	概述	90
5.3.2	最小二乘支持向量机	91
5.3.3	前馈学习控制器的设计	92
5.3.4	仿真实验	95
5.4	神经网络控制用于改进 SPWM 逆变器的优化	97
5.4.1	最优开关角的变化规律	98
5.4.2	神经网络拟合仿真分析	100
第 6 章	逆变电源模糊控制系统设计	102
6.1	模糊控制理论	103
6.1.1	模糊控制的特点	103
6.1.2	模糊控制基本原理	104
6.1.3	模糊控制器结构及功能	104
6.1.4	模糊控制器设计要求	105
6.1.5	模糊控制器设计方法	106
6.2	逆变电源模糊控制系统设计	111
6.2.1	逆变电源系统数学模型	111
6.2.2	逆变电源模糊控制器设计	112
6.2.3	构建逆变电源模糊推理系统	113
6.2.4	建立 Simulink 仿真编辑环境	115
6.2.5	仿真结果及分析	116
6.3	模糊控制技术存在的问题及对策	117
第 7 章	基于懒蚂蚁效应的改进蚁群算法研究	119
7.1	蚁群算法概述	119
7.2	蚁群优化理论	120
7.2.1	蚁群算法基本原理	120
7.2.2	基本蚁群算法描述	121
7.2.3	几种改进蚁群算法	123
7.2.4	蚁群算法的特点	126
7.3	基于懒蚂蚁效应的改进蚁群算法	127
7.3.1	引言	127
7.3.2	懒蚂蚁效应	127
7.3.3	懒蚂蚁算法原理	128
7.3.4	懒蚂蚁算法的流程	131
7.4	蚁群算法的收敛性证明	132

7.4.1	问题描述	132
7.4.2	懒蚂蚁算法收敛性证明	134
7.5	仿真及结果分析	140
7.5.1	参数的设定	140
7.5.2	仿真结果分析	141
第8章	逆变电源模糊控制器优化策略研究	144
8.1	模糊控制器优化设计	144
8.2	模糊控制器参数优化设计	144
8.2.1	模糊控制器参数优化与系统性能研究	145
8.2.2	基于改进蚁群算法的模糊控制器参数优化设计	151
8.2.3	仿真及结果分析	160
8.3	模糊控制器结构优化设计	164
8.3.1	模糊控制器结构优化原则	164
8.3.2	模糊规则相容性研究	166
8.3.3	模糊控制器结构优化设计过程	171
8.3.4	仿真结果及分析	173
第9章	逆变电源模糊控制系统设计与实现	180
9.1	逆变电源系统硬件设计	180
9.1.1	系统硬件拓扑结构	180
9.1.2	系统硬件工作原理	181
9.2	逆变电源模糊控制系统设计	183
9.2.1	逆变电源系统模型	184
9.2.2	模糊控制系统模型	187
9.2.3	逆变电源模糊控制系统仿真实验	187
9.3	逆变电源模糊控制系统实现	192
9.3.1	系统硬件实现	192
9.3.2	系统软件实现	196
9.4	逆变电源模糊控制实验结果分析	200
9.5	结束语	208
参考文献		210

CONTENTS

Chapter 1 Exordium	1
1.1 Put forward the problem	1
1.1.1 Conception of inverter technology	1
1.1.2 Martial application of inverter technology	2
1.1.3 Martial requirement of inverter technology	3
1.2 Control technology of interver	5
1.2.1 Basic conception of inverter control	5
1.2.2 PWM modulation and control technology	6
1.3 Development of interver control technology	8
1.3.1 Traditional control technology for inverter	8
1.3.2 Digital control technology for inverter	10
Chapter 2 Analysis of output characteristic for inverter	18
2.1 Composition of inverter system	18
2.2 Mathematical model of inverter	19
2.2.1 Mathematical model of PWM	19
2.2.2 Mathematical model of inverter circuit	21
2.2.3 Mathematical model of output filter circuit	23
2.2.4 Mathematical model of the whole inverter system	25
2.3 Simulation analysis of inverter system	26
2.3.1 Parameters determination of inverter system	26
2.3.2 Mathematical model analysis of inverter system	27
2.4 Simulation model of inverter system	29
2.5 Harmonic mechanism analysis of inverter	31
2.5.1 Performance index of harmonic distortion	32
2.5.2 Fourier serious analysis of PWM waveform	32
2.5.3 Harmonic analysis of regular sampling PWM waveform	34
2.6 Optimization strategy of modulation(M)	37
2.6.1 Relationship between modulation(M) and THD	37
2.6.2 Relationship between modulation(M) and the extent of output valtage	39

2.6.3	Optimization strategy of modulation(M)	40
Chapter 3	Load characteristics analysis of inverter	42
3.1	Modeling Research methods of electrical loads characteristics	42
3.2	Rectified load characteristics and modeling	44
3.2.1	Representative of rectified load	44
3.2.2	Mathematical model of single – phase Uncontrolled Rectifier	46
3.2.3	Simulation analysis	53
3.3	Motor load characteristics and modeling	57
3.3.1	Mathematical model of single – phase induction motor	58
3.3.2	Simulation analysis	60
Chapter 4	Correlation analysis between inverter and load	63
4.1	Digital PID control of inverter	63
4.1.1	Basic principle of PID control	63
4.1.2	Application of digital PID control technology for inverter	64
4.1.3	Analysis of inverter digital controller	66
4.1.4	PID control analysis of inverter under linear load	68
4.2	PID control analysis of inverter under rectified load	69
4.2.1	Dynamic performance	70
4.2.2	Mechanism of output waveform distortion	72
4.2.3	Stability analysis of inverter system	74
4.3	Characteristic analysis of inverter under impact load	76
4.3.1	model of inverter – induction motor	77
4.3.2	Simulation result analysis	77
4.4	Necessity of intelligent control	78
Chapter 5	Application of intelligent control for inverter	79
5.1	Immune genetic algorithm based approach for inverter	80
5.1.1	State space vector	81
5.1.2	Evaluating function	81
5.1.3	Vaccination	82
5.1.4	Antibody choosing function	83
5.1.5	Simulation	83
5.1.6	experiment	84
5.2	Genetic algorithm based approach for inverter	85
5.2.1	Multiple objective optimization function	86
5.2.2	Chosen of genetic operator and parameters	87
5.2.3	Simulation and experiment analysis	87

5.2.4	Conclusion	90
5.3	Support vector machine(SVM)based approach for inverter	90
5.3.1	Introduction	90
5.3.2	Least squares support vector machine	91
5.3.3	Design of learning – forward controller	92
5.3.4	Simulation	95
5.4	Application of inverter with neural – net control	97
5.4.1	Change law of optimal switching angle	98
5.4.2	Simulation analysis	100
Chapter 6	Design of fuzzy control system for inverter	102
6.1	Fuzzy control theory	103
6.1.1	Characteristic of fuzzy control	103
6.1.2	Basic principle of fuzzy control	104
6.1.3	Struction and function of fuzzy control	104
6.1.4	Requirment of fuzzy controller design	105
6.1.5	Design means of fuzzy controller	106
6.2	Design of fuzzy controller for inverter	111
6.2.1	Mathematical model of inverter system	111
6.2.2	Design of fuzzy control system for inverter	112
6.2.3	Design of fuzzy reasoning system for inverter	113
6.2.4	Design of simulink environment	115
6.2.5	Simulation result analysis	116
6.3	Problem and strategy of fuzzy control technology	117
Chapter 7	Research on improve ant colony algorithm based on idle ant effect	119
7.1	Conception of ant colony algorithm	119
7.2	Ant colony optimization theory	120
7.2.1	Basic principle of ant colony algorithm	120
7.2.2	Description of basic ant colony algorithm	121
7.2.3	Improved ant colony algorithm	123
7.2.4	Characteristics of ant colony algorithm	126
7.3	Improved ant colony algorithm based on idle ant effect	127
7.3.1	Introduction	127
7.3.2	Idle ant effect	127
7.3.3	Principle of idle ant algorithm	128
7.3.4	Flow of idle ant algorithm	131

7.4	Astringency of ant colony algorithm	132
7.4.1	Description of astringency	132
7.4.2	Astringency validation of ant colony algorithm	134
7.5	Simulation and result analysis	140
7.5.1	Parameters determination	140
7.5.2	Simulation result analysis	141
Chapter 8	Research on fuzzy controller optimization strategy	
	for inverter	144
8.1	Optimization design of fuzzy controller	144
8.2	Parameters optimization design of fuzzy controller	144
8.2.1	Research on parameters optimization and system performance	145
8.2.2	Parameters optimization design of fuzzy controller based on improved ant colony algorithm	151
8.2.3	Simulation result analysis	160
8.3	Structure optimization design of fuzzy controller	164
8.3.1	Principle of structure optimization design	164
8.3.2	Research on fuzzy rules compatibility	166
8.3.3	Structure optimization design process of fuzzy controller	171
8.3.4	Simulation result analysis	173
Chapter 9	Implement of fuzzy controller for inverter	180
9.1	Hardware design of inverter system	180
9.1.1	Structure of hardware system	180
9.1.2	Operating principle of hardware system	181
9.2	Design of fuzzy control system for inverter	183
9.2.1	Model of inverter system	184
9.2.2	Model of fuzzy control system	187
9.2.3	Simulation and experiment	187
9.3	Implement of fuzzy control system	192
9.3.1	Implement of hardware system	192
9.3.2	Implement of software system	196
9.4	Experiment result analysis of fuzzy control system	200
9.5	Conclusion	208
Reference		210

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

1.1.1 逆变技术的概念

能源是人类赖以生存和发展的基础,而电能是迄今为止人类文明史上利用最广泛、最方便、最清洁高效和最灵活的能源,据统计,当今世界的能源消耗主要是直接或间接以电能的形式体现的。虽然人类在电能的产生、传输、变换和分配使用方面已经取得了辉煌的成就,但是随着人类对能源过度使用、自然资源日益减少、环境污染日益严重的问题的出现,如何更加节约、高效、高质量和方便地使用电能,仍然是从事电能变换工作者面临的重要任务。

电力电子技术的高速发展为人类实现电能的高速变换和控制奠定了技术基础,以电力半导体器件作为功率开关来实现电能的形式及主要参数(如电压、电流、频率、相位、波形)的变换和以微电子芯片为工具的模拟控制技术和数字控制技术的完美结合,使电能能满足负载特性的需要,实现电能高效、高质量方面达到了很高的水平。

电能变换的实现从最初的旋转变流机组开始,经历了 1956 年第一只功率晶闸管的诞生,再到此后 20 年间各种晶闸管整流和逆变的静止型半导体变流装置的问世,使得电力开关变换器带来的谐波危害逐渐显露出来,在此背景下正弦波逆变器应运而生。随着人们对生活水平要求的不断增长和国民经济的迅速发展,生活用电和经济增长所需用电量都在不断增大,对于各种电源的质量和效率的要求也有所改变。为了能够高质量、高效率地使用电能,许多行业都不直接使用交流电网提供的交流电作为电源,而是根据用电要求采用电力电子技术对电能进行变换,从而得到各自所需的电能。这些电能形式的幅值、频率、稳定度及变化形式因用电设备的不同而不尽相同,如通信电源、加热电源、不间断电源、医用电源等,它们所使用的电能都是通过整流和逆变组合电路对原始电能进行变换后得到的。

通常,将交流电变换为直流电的过程称之为整流,完成整流功能的电路称为整流电路;与之相反,将直流电变换为交流电的过程称之为逆变,完成逆变功能的电路称为逆变电路,而实现逆变过程的装置称为逆变电源或逆变器。