

中图分类号：TM564/TM581

论文编号：1028703 08-0182

学科分类号：080804

硕士学位论文

交流固态功率控制器的研究

研究生姓名 陈 昌 林

学科、专业 电力电子与电力传动

研究 方 向 航空配电

指 导 教 师 王 莉 副教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二 〇 〇 八 年 三 月

中图分类号: TM564/TM581
学科分类号: 080804

论文编号: 1028703 08-0182
密 级:

硕士学位论文

交流固态功率控制器的研究

硕士生姓名 陈昌林

学科、专业 电力电子与电力传动

研究方向 航空配电

指导教师 王莉 副教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二〇〇八年三月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

The Graduate School

College of Automation Engineering

Research on AC Solid State Power Controller

A Thesis in

Electrical Engineering

by

Chen Changlin

Advised by

Associate Professor Wang li

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

MAR, 2008

承诺书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名： 陈昌林

日 期： 2008.3.19

摘 要

固态功率控制器是集继电器的转换功能和断路器的保护功能于一体的固态元器件,是和固态配电系统相配套的控制负载通断的开关装置。它具有无触点、无电弧、无噪声、响应快、电磁干扰小、寿命长、可靠性高以及便于计算机远程控制等优点。

双向可控硅和功率 MOSFET 用作交流固态功率控制器的功率管时,各有优缺点,通过分析比较,本文确定了用功率 MOSFET 作为控制器的开关。功率 MOSFET 有三种开关组态:全波桥组态、反串联组态和反并联组态,通过对比选择了反串联组态作为本文的研究对象。反串联结构有二种控制方法:上下管同时通断和上下管按一定次序通断,分别设计了他们的控制电路,并进行了仿真对比,最终确定了“上下管同时通断”这种方法作为本课题的研究内容。

基于上述方案,本文对交流固态功率控制器的控制电路进行了设计,主要包括:过零检测电路、零电压导通和零电流关断电路、相位补偿电路、反时限保护电路、吸收电路等的设计。最后制作了原理样机,并进行了实验验证。

本文在单相交流固态功率控制器的基础上,讨论了三相交流固态功率控制器的设计,并进行了实验验证,文中还分析了开关时缺相对三相负载和电网的影响。

关键词: 固态功率控制器, 反串联组态, 零电压导通, 零电流关断, 反时限保护

ABSTRACT

Solid state power controller (SSPC) is a solid state device which is used to replace the relay's role of switching and the breaker's role of protection. It's a switch matching with solid state distribution system. SSPC has the advantages of no electronic contact, no electronic arc, no noise, reacting quickly, small EMI, long life, high reliability and being controlled long-distance by computers easily.

As the switch of SSPC, TRIAC and Power MOSFET have their own advantages and disadvantages. Through analysis and comparison, Power MOSFET is chosen to be the switch of SSPC. There are three configurations with Power MOSFET, they are full-wave, anti-series and anti-parallel configuration, and by comparing the anti-series is chosen to be the object of research finally. Two methods can be used to control anti-series configuration, they are switching simultaneously and switching according to certain priorities. Circuits are designed and simulated independently and the method of switching simultaneously are chosen to be as the the issue of this paper finally.

According the programme above, controlling circuits of AC Solid-State Power Controller are designed such as circuit of detecting the zero crossing, circuits of zero voltage turn-on, zero current turn-off, phase compensation, over-current protection of inverse-time, snubber circuit and so on. Finally a prototype is fabricated and tested, and acquire good performance.

Based on single phase solid-state power controller, the design of three-phase SSPC is discussed and the experimental verification is carried on. When three-phase sspc switches, the three-phase load will lack phase in short time, the infection is also analyzed in this article.

Key words: Solid-State Power Controller, anti-series configuration, zero voltage turn-on, zero current turn-off, over-current protection of inverse-time

注 释 表

一、缩略词

基本缩略词	名称	基本缩略词	名称
CSCF	恒速恒频	CSD	恒速传动装置
VSCF	变速恒频	SSPC	固态功率控制器
TRIAC	双向可控硅	ZVTO	零电压导通
ZCTO	零电流关断	KVL	基尔霍夫电压定律
ELMC	电气负载管理中心		

二、基本符号与名称

基本符号	名称	基本符号	名称
I_g	门极触发电流	U_{gs}	栅极驱动电压
V_{TH}	阈值电压	I_D	负载电流
R_{DS}	MOSFET 导通电阻	V_{SD}	寄生二极管压降
u_{guan}	功率管两端电压	U_{VP}	电压过零脉冲
U_{IP}	电流过零脉冲信号	CMD	开关控制信号
$CONTROL$	驱动信号	φ	滤波电路滞后角度
φ_1	补偿电路超前角度	$E_w(t)$	导线中存储的能量
R_w	导线的阻抗	R_X	吸收回路电阻
C_X	吸收回路电容	V_C	MOSFET 的耐压值
e	直流分量	L_0	导线电感
V_C	功率管的耐压值	d	导线的截面积
μ	导线的磁导率	μ_0	真空磁导率
l	导线长度	P	电源系统容量

三、主要下标符号及意义

下标符号	意义	下标符号	意义
<i>TH</i>	阈值	<i>DS</i>	漏源极
<i>VP</i>	电压过零脉冲	<i>IP</i>	电流过零脉冲
<i>guan</i>	功率管两端	<i>X</i>	吸收回路

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题研究背景	1
1.1.1 飞机交流电源系统的发展	1
1.1.2 飞机配电系统的发展	2
1.2 论文研究内容	3
1.2.1 选题依据	3
1.2.2 国内外发展现状	4
1.2.3 课题研究内容	5
第二章 交流固态功率控制器的主回路结构及其控制策略	6
2.1 引言	6
2.2 功率开关管的选取	6
2.2.1 双向可控硅的导通机理	6
2.2.2 双向可控硅在 SSPC 中的应用	7
2.2.3 功率 MOSFET 的导通机理	9
2.2.4 双向可控硅与功率 MOSFET 的比较	9
2.3 功率 MOSFET 构成的开关组态	10
2.4 反向串联组态的控制策略	12
2.4.1 MOSFET 的双向导电性	12
2.4.2 上下管同时导通	13
2.4.3 上下管按一定次序通断	14
2.4.4 控制策略的比较	17
2.5 本章小结	17
第三章 单相交流固态功率控制器关键技术的研究	18
3.1 引言	18
3.2 总体方案设计	18
3.3 零电压导通和零电流关断电路的设计	19
3.3.1 过零通断的意义	19

3.3.2 过零检测电路	19
3.3.3 过零逻辑电路的设计	21
3.4 交流固态功率控制器的宽频工作设计	22
3.4.1 设计背景	22
3.4.2 设计难点	23
3.4.3 相位补偿电路	24
3.5 反时限保护的设计	27
3.5.1 反时限保护功能	27
3.5.2 反时限保护的实现方法	28
3.5.3 反时限保护中的“热记忆”	32
3.5.4 与 IEC 标准曲线的比较	33
3.5.5 反时限保护仿真验证	35
3.6 SSPC 与熔断器的级联使用	37
3.7 RC 吸收电路的设计	40
3.7.1 RC 吸收回路的必要性	40
3.7.2 RC 吸收回路设计原理	41
3.7.3 吸收回路的具体设计	42
3.8 本章小结	45
第四章 实验结果及分析	46
4.1 引言	46
4.2 宽频范围内的过零开关测试	47
4.2.1 零电压导通、零电流关断测试	47
4.2.2 过零开关误差分析	48
4.3 感性和容性负载测试	49
4.4 RC 吸收电路的测试	50
4.5 反时限保护测试	51
4.5.1 反时限保护测试	51
4.5.2 热记忆保护的测试	53
4.5.3 热记忆保护的时间分析	54
4.6 短路保护测试	55
4.6.1 短路保护测试结果	55

4.6.2 交流固态功率控制器带负载线长度分析	55
4.7 功耗测试	57
4.8 状态信号测试	58
4.9 变频对 SSPC 的影响	59
4.10 本章小结	60
第五章 三相交流固态功率控制器的研制	61
5.1 引言	61
5.2 三相交流固态功率控制器的开关影响	61
5.2.1 三相交流固态功率器的开关过程	61
5.2.2 开关过程的影响分析	61
5.2 三相交流固态功率控制器的设计	64
5.2.1 过零检测方法的探讨	64
5.2.2 外围配置电路的设计	65
5.3 三相交流固态功率控制器的实验结果	67
5.4 本章小结	68
第六章 结束语	69
6.1 本文的主要工作	69
6.2 下一步要做的工作	70
参考文献	71
致 谢	74
在学期间的研究成果及发表的学术论文	75

图表目录

图 2.1 晶闸管工作原理示意图	6
图 2.2 晶闸管导通正反馈示意图	7
图 2.3 双向可控硅的过零触发电路	8
图 2.4 moc3061 过零触发电路	8
图 2.5 MOS 管构成的三种功率开关组态	11
图 2.6 交流固态功率控制器的主回路结构	12
图 2.7 导通压降较小时的主回路电流流通方向	13
图 2.8 导通压降较大时的主回路电流流通方向	14
图 2.9 上下管按一定次序导通的过程示意图	15
图 2.10 上下管按一定次序关断的过程示意图	16
图 2.11 “上下管按一定次序”通断的仿真波形	16
图 3.1 交流固态功率控制器的功能框图	18
图 3.2 零电压导通、零电流关断时序图	19
图 3.3 过零检测电路	20
图 3.4 过零检测信号示意图	21
图 3.5 过零逻辑处理电路框图	21
图 3.6 过零开关各信号对应的逻辑关系	22
图 3.7 低通滤波电路	23
图 3.8 过零误差原因示意图	24
图 3.9 滤波误差角度与频率的关系	24
图 3.10 超前补偿电路	25
图 3.11 相频特性仿真波形	26
图 3.12 “热记忆”电路模型	29
图 3.13 “反时限保护”原理框图	30
图 3.14 过流保护特性曲线	31
图 3.15 反时限保护曲线比较	35
图 3.16 热记忆保护仿真验证	36

图 3.17 SSPC 的功率回路	37
图 3.18 SSPC 的反时限曲线和熔断器的安秒特性曲线	38
图 3.19 RC 吸收回路	40
图 3.20 功率管关断后主回路等效电路图	42
图 3.21 未加吸收回路时负载电流和功率管电压仿真波形	43
图 3.22 加吸收回路后负载电流和功率管电压仿真波形	43
图 3.23 关断时主回路等效电路	44
图 3.24 吸收电容为 $0.01\mu\text{F}$ 时短路的仿真波形	44
图 3.25 感性负载关断时负载电流和功率管端电压波形	45
图 4.1 交流固态功率控制器的测试平台	46
图 4.2 宽频范围内的零电压导通和零电流关断波形图	48
图 4.3 失调电流、失调电压等因素引起的过零误差	49
图 4.4 感性负载实验波形	49
图 4.5 容性负载实验波形	50
图 4.6 吸收电路实验波形	51
图 4.7 反时限保护波形图	51
图 4.8 反时限过流保护曲线	52
图 4.9 热记忆保护实验	53
图 4.10 短路保护实验波形	55
图 5.1 三相负载过零开通示意图	61
图 5.2 三相交流固态功率控制器连接图	62
图 5.3 三相过零触发脉冲	65
图 5.4 改进后的三相过零脉冲示意图	65
图 5.5 三相交流固态功率控制器应用框图	66
图 5.6 外围配置电路	66
图 5.7 实验波形	67
表 2.1 双向可控硅与功率 MOSFET 的优缺点比较	10
表 2.2 三种开关组态的优缺点比较	11
表 2.3 三种控制策略的优缺点	17
表 3.1 补偿误差度数	27

表 3.2 MOSFET 的冲击电流与对应时间	39
表 4.1 某些定点的跳闸延时时间的理论值和实验值	52
表 4.2 样机功耗测试	58
表 4.3 状态信息表	58
表 4.4 AD736 在不同频率时的转换数据	60

第一章 绪 论

1.1 课题研究背景

1.1.1 飞机交流电源系统的发展

1、恒速恒频交流电源^[1]

1946 年,美国发明恒速传动装置,开辟了恒速恒频交流电源(CSCF)的时代。目前飞机恒频交流电的额定频率为 400Hz,电压为 115V/200V。飞机交流发电机通过恒速传动装置由航空发电机传动。恒速传动装置简称 CSD,它将变化的航空发电机转速变为不变的转速传动交流发电机,故发电机输出 400Hz 交流电。恒频交流电源的应用消除了低压直流电源的缺点:①直流发电机的电刷与换向器限制了电机转速,从而限制了电机的最大容量;②电源容量加大后,飞机直流电网的重量显著增加;③二次电源的效率低,重量大。

几十年来,恒速恒频电源经历了很大的发展,它的优点是:工作环境温度高,过载能力强。但也暴露出了它的缺点:①恒速传动装置生产制造、使用维护困难;②电能变换效率低,主电源效率约为 70%;③电能质量难于进一步提高;④难于实现起动发电。

2、变速恒频电源^[1]

电力电子技术的发展为变速恒频电源(VSCF 电源)奠定了基础。1972 年美国 GE 电气公司研制的 20kVA VSCF 电源首次装机(A-4 飞机)使用,此后的 20 多年来 VSVF 电源有了迅速的发展,成为新型飞机电源发展的方向。VSCF 电源的优点是:①电能质量高;②电能转换效率高;③旋转部件少,工作可靠;④结构灵活性大;⑤能实现无刷起动发电;⑥生产使用维修方便。这种电源的缺点是:①允许工作环境温度较低;②承受过载和短路能力较差。

VSCF 与 CSCF 电源不同之处仅在于主电源,CSCF 电源的主电源由恒速传动装置、交流发电机和发电机控制器构成,VSCF 则由交流发电机、功率变换器和控制器构成。功率变换器有两种类型:交交型变换器和交直交型变换器。前者由晶闸管构成。由于功率晶体管允许结温比晶闸管高,且晶体管变换器所用器件少,故可靠性高,从 80 年代起已广泛采用晶体管变换器的变速恒频电源。

3、变频电源^{[2][3][4]}

由于多电飞机供电大容量的要求,飞机供电体制应具有高效率,而传统的恒频交流电源效率较低,由于其恒装比较大,它的发电容量受到限制;作为交流电源的发展,变频电源具有与恒频电源相同的供电质量,其效率更高达 90% 以上。

变频交流电源系统具有结构简单可靠、重量轻、体积小、成本低、维护费用少、效率高等优点。但由于其输出频率取决于发动机减速器输出转速,尤其是多数飞机均采用涡喷发动机或涡扇发动机,发动机转速变化范围大,因此这种变频交流电源系统称之为宽变频交流电源系统,它具有频率变化大的缺点,难以满足机载电子设备对供电品质的要求,其发展曾一度受到了限制。但随着电力电子技术的发展和在飞机上的应用,变频交流电源系统更易于构成变频交流起动发电系统,因此,在最新研制的大型民用飞机上也得到了很好的应用,如 Boeing787 飞机和 A380 飞机。

1.1.2 飞机配电系统的发展

飞机配电系统按照控制方式来分有常规式、遥控式和自动配电三种^{[5][6][7]}。

1、常规配电系统

这是目前用得最广泛的一种配电系统,绝大多数飞机都采用它。在这种配电系统中,配电功率线全部引入座舱内的配电中心或中央配电装置,二级配电中心或电气负载从中央配电装置获得电能。控制装置采用了诸如继电器、接触器、断路器、限流器等机电式配电设备。为了使空勤人员能直接操纵和控制这些配电设备,配电中心就安装在驾驶舱。这就导致发电机馈电线必须先从发电机端敷设到驾驶舱,然后再从驾驶舱返回到全机,因而配电线又长又重,线路压降大。我国目前生产和装备的飞机大都为这种配电方式。

2、遥控配电系统

在遥控配电系统中,关键的配电设备是遥控断路器。对老式的遥控断路器来讲,为了使空勤人员能够了解遥控断路器的工作状态和对它进行操作,每个遥控断路器都通过两根细导线与驾驶舱中控制面板上的控制/指示装置相接。采用老式的遥控断路器后,电网的总重量减轻了,但控制和指示所需要的细导线总长度反而增加了,同时,这种遥控配电系统没有电气负载自动管理功能,由飞行员手动管理,自动化程度不高。80 年代后,人们又研制出一种新式的遥控

断路器，它采用微处理器来实现全部控制和监控功能，并与计算机化的总线管理系统综合在一起，构成了现代遥控配电系统，提高了配电系统的效率和可靠性。目前，国产的一些中型飞机采用这种配电方式。

3、自动配电系统

自动配电系统是指以飞机电气系统处理机为控制中心，采用多路传输技术，通过汇流条控制器、负载管理中心、电气远程终端、固态功率控制器、大电流机电混合式功率控制器对飞机电气负载进行自动管理的配电系统。在 B-1B 轰炸机、P-7A 反潜机和一些武装直升机上已有使用。在自动配电系统中，由电气负载管理中心的固态功率控制器来控制负载的接通和断开。此配电控制，其负载的接通与断开是直接由固态功率控制器来实现。

对比以上三种配电方式，常规配电系统的优越性在于它在技术上已经成熟，且目前应用得非常广泛，但其缺点是电网重量大，空勤人员负担重。遥控配电系统由于大部分电力线不需要敷设到驾驶舱，因而可大大减轻电网重量，但其缺点是离散控制线过多，自动化程度不高。自动配电系统中由于采用了分布式汇流条和负载自动管理技术，用电设备就近与配电汇流条相连，由计算机通过多路传输数据总线传递控制信号和状态信息，经固态功率控制器对负载进行控制和保护，这种配电系统可以大大减轻导线重量，提高配电可靠性及自动化程度，减轻飞行人员负担，因而是下一代先进飞机配电系统的发展趋势。

飞机自动配电系统的发展对固态功率控制器的发展也提出了新的要求。在综合电源与航空电子信息系统中，电气系统与电子系统共享数据总线，通过冗余数据总线传送全部的配电控制信号，这样在一架典型的飞机上可能需要用到 500 多个不同电压电流定额的固态功率控制器(包括高压直流 270V、低压直流 28V 以及交流 115V 各种类型)，因此，对固态功率控制器的体积、重量及可靠性等又提出了更高的要求。

目前，固态功率控制器容量还较小，因而在已采用了电气多路传输技术的配电系统中还存在机电式配电设备或混合式配电设备。

1.2 论文研究内容

1.2.1 选题依据

对固态功率控制器(SOLID-STATE POWER CONTROLLER,简称 SSPC)的