



航空电源航空科技重点实验室

第五届电力电子与运动控制学术年会

APSC'2004

论文集

2004年10月 · 南京航空航天大学



航空电源航空科技重点实验室

第五届电力电子与运动控制学术年会

APSC'2004

论文集

邓智泉

2004年10月 • 南京航空航天大学



Aero-Power Sci-tech Center

航空电源航空科技重点实验室

第五届电力电子与运动控制学术年会(APSC'2004)

组织委员会

大会主席：周波

程序委员会：

主席：阮新波

成员：胡育文、邓智泉、邢岩、谢少军、龚春英、

萧岚、刘闯

论文编辑委员会：

主席：马运东

成员：刘闯、黄文新、张方华、张卓然

CD：陈新

会场组：

组长：曹志亮

成员：何礼高、蒋冬青

来宾接待组：

组长：王莉

成员：王慧贞、刘建宏

前 言

APSC'2004 年会将于 2004 年 10 月份召开,它是南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室召开的第五届电力电子与运动控制学术年会。一年一次的 APSC 学术年会对推动航空电源重点实验室的科技进步与发展、开展学术交流、增强学术氛围、促进人才成长起着重要作用。

重点实验室老师与研究生积极参与 APSC 学术活动,踊跃投稿。本次年会收到 72 篇论文,经过评审集成《第五届电力电子与运动控制学术年会论文集》。本次年会论文内容涉及:综述 6 篇,直流变换器 16 篇,逆变器 13 篇,运动控制 23 篇,数字控制技术 7 篇,电力电子集成系统建模及其它 7 篇。论文集内容基本反映了航空电源重点实验室电力电子与运动控制领域研究的新进展。会议还将邀请国内外著名专家教授作大会报告,APSC 学术年会促进了航空电源重点实验室与兄弟单位的交流。

APSC 学术年会得到了学校、学院领导和学校科技部、科协以及有关航空院所、兄弟学校与企业的大力支持,在此我代表航空电源重点实验室表示衷心的感谢。同时热烈欢迎校内外领导和专家教授莅临指导。

本次年会论文集的排版工作由马运东、刘闯、黄文新、张方华、张卓然、陈新老师和研究生完成,对于他们对论文集所做工作表示衷心的感谢!

周波

2004 年 10 月

目 录

一、综述

1.1 电力电子与全电多电飞机	严仰光	1
1.2 航空电源系统的新发展	胡育文	8
1.3 电力电子变换器非线性混沌现象及其应用研究	张波	10
1.4 开关磁阻调速电动机传动系统及其应用	陈昊	17
1.5 半导体照明工程的现状与发展趋势	廖志凌 阮新波	21
1.6 磁轴承的功率放大器及其发展趋势	李祥生 邓智泉	32

二、直流变换器

2.1 零电压开关 PWM 全桥三电平变换器	张之梁 阮新波	37
2.2 全桥三电平变换器的一种新型控制策略	张之梁 阮新波	44
2.3 倍流整流方式 ZVS PWM 复合式全桥三电平变换器	陈武 阮新波	51
2.4 加箝位二极管的 ZVS PWM 复合式全桥三电平变换器	陈武 阮新波	61
2.5 适用于低压大电流输出模块的两级式变换器	任小永 阮新波	70
2.6 平面变压器中并联绕组的设计	旷建军 阮新波 任小永	76
2.7 不对称半桥的分析和设计	殷兰兰 陈乾宏	82
2.8 不对称半桥变换器零电压开通条件的分析	杨建宁 谢少军	88
2.9 Buck 三电平直流变换器闭环参数的设计	程璐璐 阮新波	93
2.10 反激变换器两种缓冲回路的比较研究	孟宪会 王笑娜 邢岩	103
2.11 一种 ZVCS 推挽变换器研究	韩锋 谢少军	107
2.12 一种适合高/低压变换的双向 DC/DC 变换器	岳卫锋 肖华锋 谢少军	111
2.13 一种新型推挽正激变换器的研究与应用	王琪 龚春英	116
2.14 双正激变换器软开关拓扑的分析与评价	毛赛君 王慧贞	121
2.15 直流变压器及其在两级功率变换中的应用	毛赛君 王慧贞	129
2.16 单级 SEPIC 功率因数校正电路的 RCD 箝位电路的损耗分析及比较	刘旬 张洋 龚春英	134

三、逆变器

3.1 交错并联逆变器中耦合电抗器的优化设计	吴涛 阮新波 李启明	139
3.2 电容电流瞬时值反馈控制逆变器数字控制技术研究	许爱国 谢少军	146
3.3 电压电流双环控制的 SVPWM 逆变器仿真研究	蒋华 穆新华	152
3.4 交-交矩阵变换器的电压电流双闭环控制模型及仿真研究	张绍 葛红娟 穆新华	157
3.5 级联型逆变器输出电平的研究	纪峰 肖岚	163
3.6 逆变器并联系统功率管开路故障诊断研究	李睿 肖岚	167
3.7 模数混合分布式逆变器并联控制方法	何中一 邢岩	171
3.8 三电平逆变器内外缓冲电路电压不平衡的分析	陈扬飞 何礼高	178
3.9 一种高频输出零电压开关逆变器	叶益青 肖岚	184

- 3.10 反激逆变器的研究.....孙林 梁永春 龚春英 严仰光 190
- 3.11 一种新型零电流转换逆变器控制策略的研究.....陈延钧 龚春英 195
- 3.12 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法
.....陈东华 谢少军 周波 201
- 3.13 逆变器基准信号几种产生方法的研究.....顾文明 何中一 孟宪会 邢岩 208

四、运动控制

- 4.1 定子双绕组感应发电系统的研究.....叶万富 胡育文 黄文新 213
- 4.2 交流电机变速风力发电技术.....尹玲玲 胡育文 219
- 4.3 基于多绕组的双余度发电机系统理论与仿真分析.....张毅 周波 225
- 4.4 双凸极起动/发电机系统研究.....任海英 周波 232
- 4.5 静止励磁调节器控制的定子双绕组异步发电机漏电抗计算的研究
.....刘陵顺 胡育文 黄文新 238
- 4.6 新型的基于静止励磁调节器的定子双绕组异步发电机无功容量优化的研究
.....刘陵顺 胡育文 黄文新 246
- 4.7 采用瞬时转矩控制策略的异步发电系统的容错研究
.....张兰红 胡育文 黄文新 254
- 4.8 阻尼绕组对直接转矩控制同步电机动态行为的影响
.....周扬忠 胡育文 黄文新 胡春玉 260
- 4.9 基于非线性电感模型的双凸极发电机系统建模的研究.....方斯琛 周波 魏佳丹 267
- 4.10 电励磁双凸极发电机系统的 Pspice 建模与仿真.....吕飞 魏佳丹 周波 271
- 4.11 电励磁双凸极发电机动态特性的研究.....魏佳丹 周波 277
- 4.12 基于半桥变换器的电励磁双凸极电机相电流检测的研究.....谢之灿 周波 282
- 4.13 混合励磁双凸极电机静态特性的分析.....孙亚萍 陈志辉 288
- 4.14 双凸极无刷直流发电机系统设计软件中 VC 6.0、MATLAB 6.5、Fortran 接口方法
.....彭钢 周波 294
- 4.15 无轴承永磁薄片电机磁悬浮机理研究.....廖启新 李立 邓智泉 299
- 4.16 无轴承开关磁阻电机空载稳定悬浮.....张媛 邓智泉 304
- 4.17 永磁同步电动机伺服系统位置控制策略研究.....刘辉 刘日宝 邓智泉 310
- 4.18 一种新型的磁链跟踪 PWM 方法.....林盈杰 邓智泉 316
- 4.19 基于逆变器开关占空比的定子磁链估计新方法.....周远平 王宇 邓智泉 321
- 4.20 矩角特性在开关磁阻电机中的研究与应用.....严加根 刘闯 刘迪吉 326
- 4.21 Halbach 阵列磁场分布特点.....朱德明 秦海鸿 严仰光 331
- 4.22 开关磁阻电机连续滑模调速控制与仿真.....李爱华 朱学忠 335
- 4.23 12/8 开关磁阻电动机绕组联结形式对电机振动和噪声的影响
.....唐超 周强 朱学忠 339

五、数字控制技术

- 5.1 双凸极永磁电机数字控制系统的研究.....黄伟君 秦海鸿 严仰光 343
- 5.2 基于 MC56F8323 的数字功率因数校正控制.....昌建军 陈新 348

5.3 MC56F8323 通用控制平台及其在高频开关通讯电源的工程应用	胡雪莲 张亮 昌建军 陈新	354
5.4 基于 MC56F8323 的移相全桥变换器控制	张亮 洪峰 陈新	360
5.5 一种基于线电压矢量合成的空间矢量调制算法	李景艳 谢少军	366
5.6 30KW 高压直流发电系统数字调压器的研制	张小纪 曹啡 周波	371
5.7 延时电路的 VHDL 设计	蒋贤哲 王莉	376

六、电力电子集成系统、建模及其他

6.1 倒装芯片集成电力电子模块	王建冈 阮新波 吴伟 陈军艳 陈乾宏	381
6.2 基于 Matlab 的功率 MOSFET 建模	严杰 王莉 王志强	387
6.3 JMAG-Studio 软件在开关磁阻电机电磁分析中的应用	周强 唐超 朱学忠	392
6.4 飞机发电机带电子负载的建模及其仿真研究	廖颖熙 穆新华	397
6.5 运行状态下 750kV 悬挂式避雷器静电场计算及优化设计	王世山	402
6.5 便携式电子设备镍氢电池管理器研究	许爱国 谢少军	408
6.7 基于虚拟仪器的飞机电源系统自动测试研究	张保冰 杨善水	413

电力电子与全电多电飞机

严仰光

(南京航空航天大学航空电源重点实验室 江苏 南京 210016)

Power Electronic In All Electric Aircraft And More Electric Aircraft

YAN Yanguang

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Jiangsu Nanjing, 210016)

Abstract: This paper discusses the application of power electronic in all electric aircraft and more electric aircraft .the development of power electronic and electric machine accelerate the development of all electric aircraft and more electric aircraft.

Keywords: all electric aircraft; more electric aircraft; all electric engine ;power electronic

摘要:本文讨论电力电子在全电和多电飞机中的应用。电力电子与电机技术的发展促进了全电和多电飞机的发展。

关键词:全电飞机; 多电飞机; 全电发动机; 电力电子; 电机

1 飞机二次能源的统一

现代飞机的二次能源主要有三种, 液压能, 气压能和电能。液压能由航空发动机直接驱动的液压泵产生。用于飞机舵面的操纵、发动机控制、舱门的启闭和起落架的收放等场合。气压能主要是提取发动机增压后的空气, 用于发动机的启动, 机轮的刹车和飞机的环境控制系统。电能主要由航空发动机直接或间接传动的发电机产生, 向飞机电子设备、电气仪表、电动机械、照明和加温等设备供电。

早在上个世纪70年代就提出了飞机二次能源统一为电能的问题, 通过近30年的努力, 已取得不少重大进展, 发展为全电和多电飞机技术。那时国内外不少飞机的液压系统出现故障, 造成机毁人亡的后果, 主要是因为集中式液压系统工作时损耗大、发热大、温

度高, 机件易损坏, 而液压系统某一处泄漏就会使整个系统瘫痪, 出现不可逆转的故障。当时的航空科技工作者基于电工材料和电工技术的发展, 提出用机电作动机构作为液压作动机构的备份的建议, 并取得成功, 从而为电能取代液压能创造了条件。节能航空发动机的发展, 要求限制或不提取航空发动机压缩后的空气, 也要求用电能代替气压能。研究表明, 提取同样马力的压缩空气和发动机的轴功率, 后者能节省更多的燃油。

二次能源的统一, 或者说全电和多电飞机的发展, 带来了飞机技术的更大进步, 促进了航空科技的发展。(1)航空发动机的结构简化, 提高了发动机的推重比, 减少了发动机的迎风面积, 节省了发动机的油耗。现在的航空发动机要传动很多的附件, 必须有专门的附件机匣, 其上装有燃油泵, 滑油泵, 液压泵, 发电机和启动机, 早期的喷气发动机采用电动启动或启动发电机, 也有的装压缩空气启动机, 现在大多为燃气涡轮启动机。这些附件的安装使发动机的结构大为复杂, 迎风面积增加, 导致飞机迎面阻力加大。全电或多电飞机采用发动机内装式启动发电机, 电机与发动机在同一轴上, 不再传动燃油泵, 滑油泵, 液压泵, 从而取消了附件匣, 显著简化了发动机的结构。由于不再提取发动机的压缩空气, 提高了发动机的效率。同时使航空发动机的转子悬浮, 即全电发动机技术也已经进入研制和验证阶段, 发动机转子的悬浮可提高转子转速, 取消滑油泵与滑油系统, 进一步简化结构, 改善性能。(2)

简化了飞机内部结构。液压系统和电气系统一样,分布于飞机的各个地方,从而使管路与电路纵横交错,生产使用和排故困难。液压系统使用时是一个很大的热源。必使用燃油冷却,进一步使结构复杂化。(3)简化了地面支持设备和飞机上与地面支持设备间的接口。

由此可见,飞机二次能源的统一,有助于提高飞机的可靠性,维修性,地面支持性能和生存能力,减轻了飞机重量。

现在全电飞机技术已发展到汽车,坦克和舰船。电动汽车、全电坦克和电驱动舰船已成为人们追求的目标,并为此而努力奋斗。

2 飞机电源系统

全电和多电飞机的电源系统和常规飞机一样,由主电源,辅助电源、应急电源、二次电源和地面电源供电接口等组成。其主要特点是:(1)电源功率显著增大,所需供电类型增多。全电和多电飞机的功率是常规飞机电源、液压、气压源功率的总和,现代高性能的飞机的液压功率远大于电源功率,全电飞机的电源容量急剧增大,而且随着飞机的发展,电源功率还有增大的趋势。例如 F-16A/B 主电源功率为 40KVA, F-16C/D 改为 60KVA,而联合攻击机 JSF 主电源为 250KW 270V 开关磁阻启动发电机系统,国外正在发展 500KW 启动发电机。(2)要求电源有余度、容错和不间断供电功能,显著提高电源的可靠性,减少电源故障导致的危害性。(3)要求电源供电质量进一步提高。(4)要求电源,特别是主电源有高的转换效率,降低电源损耗和发热量。这个要求排除了恒速恒频交流电源和变速恒频电源在飞机上的应用的可能性。因为这两种电源在机械能转换为 400HZ 交流电的过程中,有两次能量变换,恒速恒频电源的效率在 72% 上下,变速恒频电源的效率在 80% 左右。而目前看好的开关磁阻启动发电系统,250KW 级的发电效率为 85% (转速为 13000r/min ~25000r/min)。

现在,国内外航空电源界大都认为全电和

多电飞机的电源以采用 270V 高压直流电源为好。270V 高压直流电源的主电源发电机有旋转整流器式无刷同步发电机,开关磁阻发电机和电磁式双凸极发电机四种可供选择。旋转整流器式无刷同步发电机是恒速恒频交流电源唯一合适的电机,50 年来的到长足的发展。功率重量比相当高。早期的飞机变速恒频电源也大多采用这种电机,十多年前,这个观念有了突破,国外的变速恒频电源开始考虑用开关磁阻或异步发电机。主要是因为旋转整流器式无刷同步发电机转子复杂,故障率高,最高转速也受到限制,从而限制了电机功率的加大和功率重量比的进一步的提高。开关磁阻电机和鼠笼式异步电机都具有转子机构简单而且不需要励磁机,均具有启动发电的功能,主要的不足是发电时也必须功率电子变换器配合工作。目前提出的采用两套隔离的电机绕组异步电机,一套用于发电时的励磁用,另外一套用于输出功率用,可减少可控电子变换器的功率,改善发电性能,但这种结构不利于启动功率的发挥。双凸极发电机与旋转整流器式无刷同步发电机一样,输出接整流管即可得到直流电,但它的转子结构又与开关磁阻电机一样简单。

主电源电机具有启动和悬浮功能是全电发动机所用发电机的另一主要要求。开关磁阻电机、异步电机和双凸极电机都有良好的可逆性能,易于实现电动运行,可启动发动机。现有全电发动机的结构方案采用主动控制的径向和轴向电磁轴承,另加机械备份轴承,无轴承电机的出现,为全电发动机提供了一种新的结构方案,有助于进一步提高发动机的总体性能。

辅助电源是现代飞机不可缺少的电源。辅助动力装置是小型喷气发动机与启动发电机的组合。美国 F-22 飞机的主电源为两台 65KW 270V 直流发电机,辅助电源为一台由辅助动力装置驱动的 22KW 270V 无刷直流发电机。组合动力装置是辅助动力装置的发展,它具有三个功能:主发电机的启动功能;辅助动力装置的功能和作为应急动力的功能。后者要求组合

动力装置具有更短的启动时间，以保证在主电源故障时应急电源能快速投入。在 JSF 飞机的发展中，国外公司提出了一种称为热/能管理模块 (T/EMM) 的装置，它可作辅助电源和应急电源使用，还可用于冷却飞机的电子设备和乘员。T/EMM 是从系统角度研制的新装置，有利于简化机载机电设备。

早在美国研制的航天飞机上，氢氧燃料电池是飞机的主电源。近 20 年来燃料电池的发展为它在飞机上作为辅助电源创造了条件。燃料电池电能转换效率高，无污染，它和直流变换器的组合可得到 270V 或 28V 直流电，和逆变器组合可得到 115V/200V 400HZ 交流电。

国外飞机使用的应急电源类型很多，主要有冲压空气涡轮发电机，液压马达驱动发电机，肼燃料应急动力装置发电机和蓄电池。前两种大多用于远程飞机，它供电的时间不受限制。后两种因储能有限，应急供电时间不长。在采用低压直流电源的飞机上，大多用蓄电池作为应急和备份电源。因为它结构简单可靠。由航空发动机直接驱动的永磁发电机变换器的组合是一种新发展的应急电源，它具有比现有主电源发电机更广阔的工作转速范围。

二次电源是飞机上不可缺少的，它将主电源产生的电功率转变为某些用电设备所需的电源类型。如果把电子设备内部电源也算在二次电源范畴内，则现代飞机上二次电源的数量是相当多的。提高效率 and 功率密度是二次电源发展的主题。早在 10 年前国外为多电飞机研制的 5.6KW 270V/27V 直流变换器的效率达 90%，重量为 4.04Kg，8KVA 270V/115 400HZ 静止变换器效率达 87% 重量为 8.3Kg。

270V 高压直流电源是典型的分布式电源系统。二次电源是实现余度容错和不间断供电的关键之一，二次电源的模块化技术，并联技术，故障检测诊断和保护技术等是全电和多电飞机的二次电源所必须的。

全电和多电飞机不再需要大量地面支持设备，只要地面的电力供应，但地面电源功率和质量将显著提高。

3 配电系统

配电系统是联接电源与用电设备的重要环节，是实现余度容错和不中断供电的基础。电源，电网导线和用电设备的故障是不可能消除的，关键是在故障的情况下应仍能可靠地向用电设备供电。飞机用电设备分为三类：即一般用电设备，重要用电设备和关键用电设备。关键用电设备是安全飞行和着陆所必须的设备。重要用电设备是完成飞行任务所需的设备。一般用电设备是与飞行安全和完成飞行任务关系较小的设备。双发动机全电或多电飞机对配电系统的要求是：对于关键用电设备，供电系统必须具有发生两次故障仍能工作的能力。对于重要用电设备，供电系统必须具有发生一次故障仍能工作的能力；除非该发动机的启动/发电机故障，供电系统发生一个故障时仍能具备发动机的启动能力；在电气系统发生一个故障或一台发电机故障时应不影响飞机用电设备的正常工作；电源和配电系统的故障不应自行扩大，不应造成不安全因素。

270V 直流电源的关键问题，一个是必须使用无刷电机，另一个是必须采用无触点固态电器。固态功率控制器 (SSPC) 是 270V 直流电系统的核心元件。为了实现不间断供电。同时要求应用 27V 固态功率控制器和 400hz 交流固态控制器。国外 270V 和 28V 固态功率控制器已成系列，额定电流 50A、100A、130A 的 270V 固态功率控制器正在研制。130A SSPC 的切断电流达 1300A。SSPC 的关键是减少通态压降和体积尺寸。触点电器的最大特点是触点闭合时的压降小，损耗小。因而不需要专门的冷却设备。由于功率电子器件的通态压降大，使 SSPC 导通时有较大的压降，大的损耗，要求配置散热器，从而限制了体积重量的减少，限制了 SSPC 的发展。

除 SSPC 外，270V 配电系统还应发展过流、差动电流和短路电流检测保护元件，电弧检测和灭弧元件，高可靠连接器和无感直流母线。

据 F/A-18 多电飞机项目组分析, 该多电飞机验证机的第一期工程的额定发电容量为 165KW, 5s 过载功率为 217W, 其中 40KW 为航空电子设备使用, 125KW 为其他用电设备使用, 主要为电动机负载。38KW 为飞行关键用电设备, 38KW 中的 5KW 用电设备要求不间断供电。

电子设备和电动机的大量使用, 使飞机的用电设备发生了重要变化。(1) 电子设备电源和马达控制器都是电力电子变换设备, 具有非线性、恒功率、脉冲时变、能量再生、容性输入阻抗等特点, 给供电系统的品质和稳定性带来了新的挑战。(2) 具有内部电源的电子设备和有调速控制器的电动机是典型的恒功率用电设备, 供电电压的升高, 消耗电流反而下降。

(3) 单相静止变流器对电源讲是一种典型的时变负载, 若该变流器向电阻性负载馈电, 则负载功率按变流器输出频率的两倍变化, 其最大值为负载额定功率的一倍, 最小值几乎为零, 若该变换器向整流负载供电, 则其功率变化更为急剧。(4) 飞机机电作动机构中的电动机制动工作时, 运动部分的机械能将向电源馈送, 导致飞机电网电压的升高, 飞机电网应有快速吸收再生能量的能力。(5) 开关电源和马达控制器均有容性输入滤波器, 容性负载接通时的冲击电流可能使 SSPC 误保护, 大量容性负载的同时接通会导致电网电压的急剧下降。

电气负载管理中心 ELMC 是自动配电系统的智能配电装置, 其作用相当于常规飞机的配电盘。ELMC 内置的电气电子控制器 EEU 实现对内部汇流条的检测和切换、负载的优先管理、配电网故障检测保护和向供电系统处理机报告故障处理的情况和用电功率, 接受上级计算机的控制指令并作出响应。为了提高供电品质、减轻电网重量和对全机电网监控, 二次电源宜设计在 ELMC 的附近, 也可将二次电源与 ELMC 结构上组合在一起, 借助 ELMC 的 EEU 对冗余二次电源进行管理。

4 无刷直流电动机

全电和多电飞机使用大量无刷直流电动机

及电动机构, 以替代液压作动机构, 驱动电气环境控制系统的压气机和驱动燃油泵。机电作动机构或电动静液作动机构中的电动机是伺服电动机, 除有功率密度高的要求外, 应有好的动态性能和宽的调速范围。环境控制系统、电动燃油供给系统和起落架与舱门用电动机为驱动电动机, 可分为两类, 一类为长期工作的, 另一类为短期工作的。长期工作电动机应有高的效率和小的体积重量。短时工作的起落架和舱门驱动电机应有高的功率密度和大的驱动转矩。

若广义地定义由直流电源供电的电动机为无刷直流电动机, 则异步电动机, 同步电机, 开关磁阻电机, 双凸极电机和步进电机等均可构成无刷直流电动机。

稀土永磁材料有高的磁能积, 线性的去磁曲线和低的磁导率, 因而稀土永磁电机具有机构简单, 体积小, 重量轻和损耗小效率高的特点, 受到航空界的重视, 在飞机上得到广泛的使用。

稀土永磁无刷直流电动机常指由永磁同步电动机、电机转子位置传感器、功率变换器和数字控制器构成的无刷直流电动机。这种电机具有线性的转矩电流特性, 即电机输出的转矩和电枢电流成正比; 具有较强的过载能力, 一般最大转矩可达额定转矩的 3 倍, 大的可至 8~10 倍; 在恒转矩调速区, 输出转矩一定时, 电机输出功率和转速成正比, 故电源电压不变时, 电机的输入电流与电机转速成正比; 电机转速和转矩不变时, 电源电压的升高, 电机输入电流减小, 具有恒功率特性。

稀土永磁无刷直流电动机有两种工作方式, 120 度方波电流工作方式和正弦波电流工作方式, 后者的转矩脉动更小, 应用磁场定向控制可在很低的转速 (例如 0.1~0.01r/min) 下平稳运行和有更大的调速范围, 调速范围在 10000:1 以上。

稀土永磁同步电机不足的是弱磁升速比较困难, 为进一步扩大电动机的高速工作区, 不少学者提出了永磁同步电动机的弱磁方法, 采

用混合励磁结构是其中的一种较有效的方法。

飞机电动环境控制系统要求采用高速电动机，高速电动机的一个重要课题是采用转子悬浮技术。目前用滑油润滑的 150KVA 同步发电机的长期工作转速已达到 40000r/min 以上。气悬浮轴承得到了使用，磁悬浮技术已相当成熟，无轴承电机技术已进入工业应用阶段，这些均为高速电机在多电和全电飞机中应用创造了条件。必须注意到高速和超高速电动机是和电力电子变换器分不开的。它不可能由 50 或 60HZ 电源直接供电，也不可能由 400HZ 飞机交流电源直接供电工作。因此这类电机本质上仍属于无刷直流电动机。开关磁阻电机和双凸极电机，由于转子结构简单坚固，在采用高强度磁性材料时，可以在很高的转速下工作。

飞机机电作动机构一般为多余度装置，按可靠性要求的不同，有二、三、四三种余度结构。对于四余度作动机构，一个通道的损坏，应不影响输出功率和性能；两个通道故障，输出功率减小，但仍能实现对舵面的操纵。

5 电力电子在全电多电飞机中的应用

全电多电飞机的供电系统是完善的分布式电源与配电系统，借助分布式计算机网络实现电能的控制和分配，借助 270V 飞机电网实现电能的传输，使电气系统有高的可靠性，好的维修性，强的生存能力。实现余度、容错和不间断供电，使用电设备得到高质量的电能供应。从而使它具有优良的性能。

以上讨论可见，电力电子不仅在全电飞机的电源系统中得到了广泛应用，在配电系统中也处于关键部位，而用电设备的绝大多数也以电力电子变换器为其功率接口，因此全电多电飞机的发展离不开电力电子，电力电子学的发展促进了全电和多电飞机的发展，推动了航空科技的前进。

表 1 是美国已完成多电飞机计划中的第一代多电飞机对电气元件技术进步的要求，从表 1 中可见，多电飞机技术是建立在电气

技术的发展基础上，而不是应用现有的技术来构成多电和全电飞机。为此必须进一步发展高频电力电子和高温电力电子技术。

高频电力电子技术是降低电力电子装置的体积重量，提高功率密度和达到高工作可靠性的重要途径。高频电力电子的发展依赖于高频电力电子器件的发展，高频磁心和高频电容的发展，也与电力电子电路拓扑和封装技术的发展分不开的。元器件的发展是电力电子技术发展的基础，近十年来 IGBT 和 MOS 的发展令人兴奋。高频磁心和高频电容的发展也有长足进步，非晶、超微晶和新型铁粉芯磁性材料的发展为装置的小型化创造了条件，扁平磁心的广泛应用有助于开关电源的性能提高，软开关技术的进步为提高开关频率创造了条件。从表面上看来，电力电子装置是一个典型的电工装置，但实际上电力电子装置不是一个简单的电工装置，而是和材料、机械、发热冷却、结构和工艺密切相关的机电设备。电力电子装置的小型化离不开结构，封装及其工艺路线的发展。电力电子的功率驱动部分更是这样，结构的优化有助于提高开关频率，减少器件关断电压的尖峰和二极管的反向恢复电流，减少高频振荡和电磁干扰；结构的优化有助于减少损耗，提高效率，从而减少散热器尺寸；结构优化有助于改善散热条件，降低工作温度，提高工作可靠性。

合理地安排主功率器件，驱动电路和检测保护电路有助于电力电子装置的安全运行，一旦发生故障，可避免故障的扩大，将故障约束在很小的范围内，以尽可能地减小故障的损失，且应便于检修。

全电和多电飞机的发展需要发展高温电力电子学，现代飞机和发动机的发展，使飞机电气设备的工作环境温度显著升高，例如 F-15 飞机在海平面以 $M=1.2$ 飞行时，飞机头部、机翼、机身和尾翼的温度在 $85\sim 96^{\circ}\text{C}$ 范围内，喷气口周围的温度达 165°C ；当飞行高度在 37 000 呎， $M=2.3$ 时，机头、机翼、机身的温度上升到 $139\sim 173^{\circ}\text{C}$ ；高度在 45 000 呎， $M=2.5$ 时，机头、机翼、机身的温度上升到 $170\sim 214^{\circ}\text{C}$ ，

表 1 第一代多电飞机电气技术发展目标

序号	项目	现有技术水平	第一代多电飞机目标	改进百分比
1	启动/发电机			
	可靠性 (MTBF)	1500~2500	10 000	300%
	功率密度 (KW/#)	0.5	1.0	100%
2	DC/AC,DC/DC 变换器			
	功率密度 (KW/#)	1.5	3.0	100%
	功率密度 (KW/in ³)	100	200	100%
3	固态开关			
	效率 (100%)	90	93	10%
	温度 (°C)	125	150	20%
4	储能电容			
	能量密度 (J/g)	1.0	2.0	100%
	能量密度 (J/cm ³)	0.91	2.4	160%
5	滤波电容			
	工作温度 (°C)	-40~+125	-55~+225	80%
	能量密度 (J/g)	0.5	2.0	300%
6	28V 电池			
	能量密度 (wJ/g)	36	33	25%
	工作寿命 (yrs)	2	15	650%

喷气口周围的温度达 3420C, 发动机机匣在 50 000 呎高空飞行速度 $M=2.5$ 时温度达到 315°C。为了在这样严酷的环境下, 让硅电子设备正常工作, 必须要使用专门的飞机环境控制系统, 以使硅电子设备的工作温度控制在 80°C 左右, 一方面环境控制系统需要消耗大量能量, 另一方面, 由于环境控制系统本身结构复杂, 体积重量大, 不可能构成冗余系统, 埋藏着电子设备安全的隐患。同时电子设备被约束在某些具有空调的地方, 阻碍了向分布式发展, 而向分布式系统发展是实现控制系统和供电系统优化的重要途径。

高温电力电子技术, 要求发展高温电力电子器件。碳化硅器件是首选的高温电力电子器件, 它具有通态电阻小, 击穿电压高, 导热率高, 热阻小, 工作温度高(可达 600°C),

抗辐射能力强和可在高频下工作等特点。要求发展高温绝缘材料和高温导线, 高温低损耗电容器。应进一步减小磁心高频损耗和提高磁心的高温工作性能。高温电力电子装置的结构特征和设计方法也将提到日程上来。

高频和高温电力电子学的发展必将促进全电和多电飞机技术的发展, 高性能的多电全电飞机的诞生将使航空科技跃上一个新的台阶。

6 小结

全电或多电飞机是将二次能源统一为电能的飞机, 它的诞生显著地提高了飞机的可靠性, 维修性和生命力, 降低了对地面支持设备的依赖。

全电或多电飞机要求电源系统, 配电系统和飞机用电设备有一个新的发展, 而它们

的发展是和电力电子学的发展分不开的。全电和多电飞机不是现有技术装置的集成，而是在新的技术基础上的新型飞机，因此要求电源、配电和用电设备有新的发展，也就要求电力电子技术有更快的发展，高频电力电子技术和高温电力电子技术是适应全电和多电飞机发展的电力电子技术。为了推进高频和高温电力电子技术的发展，必须从电力电子的元器件发展入手，在此基础上推进电力电子装置的发展，为全电和多电飞机的发展打好基础。

参 考 文 献

[1] R.A.Smith , "The J/IST of improving JSF",

Aerospace America,Nov,1997

- [2] M.A.Maldonado, "power Management and distribution system for a more electric aircraft", IEEE AES Systems Magazine ,Dec, 1999
- [3] A.Emadi," Aircraft power systems: technology, state of the art ,and future trends ",IEEE AES Systems Magazine ,Jan, 2000
- [4] M.E.Elbuluk, "Potential starter/generator technologies for future aerospace applocayion", IEEE AES Systems Magazine ,Oct, 1996
- [5] 张玉明,“碳化硅功率器件的现状”,电源技术学报, NO:4,2003

航空电源系统的新发展

胡育文

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

The New Development of Aviation Power Supply System

HU Yuwen

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The paper presents the new development of aviation power supply system technology in the world.

Keywords: multi-electric plane, variable frequency generating system

摘要: 本文介绍了航空电源系统的技术现状。

关键字: 航空电源, 多电飞机, 变频发电系统

近年来, 在航空电源领域中新成果应接不暇。继美国第四代战机 F-22 采用了 270V 高压直流电源发电系统之后, 2001 年开始设计的 F-35 又采用 270v 高压直流电源起动/发电系统。F-22 的电源系统由 $2 \times 60\text{KW}$ 三级同步电机组成, 没有起动功能。F35 则采用了 132KW 的具有起动/发电双功能的开关磁阻电机系统, 它将在 2012 年上天。在人们眼中看来, 对于大功率的航空电源系统, 似乎 270V 高压直流系统成为将来飞机电源系统已成定论, 转子结构最为简单的开关磁阻电机取代转子结构复杂的三级无刷同步电机也被人们接受, 飞机电源系统的方案似乎已经非常明朗了。

但是, 有许多技术的发展往往出乎人们的意料, 在人们正在大力张罗多电飞机的时候, 我们发现, 西方国家的多电飞机已经悄然问世。众所周知, 多电飞机中许多原来液压系统、气压系统承担的任务转为由电动系统来完成, 自然, 飞机的用电量将大幅度增加, 预计要达兆瓦级。美国的波音 B-7E7 和欧洲空中列车 A380 这二种民航飞机就是当代多电飞机的代表, 它们的发电功率达到

1.35MW! 而它们的发电系统不是我们想象的 270V 高压直流, 也不是开关磁阻电机, 而是变频发电系统, 由具有起动/发电双功能的三级同步电机组成! 这使人稍稍有些意外。

仔细琢磨, 使用变频发电系统可能确实比较合理。因为有一部分负载对频率不敏感, 例如加热负载等, 这部分电能就不必去整流或逆变。在多电飞机中, 很多执行机构是频率可调的调速电动机, 而不是恒 400HZ 运行的电动机。它们由交直交调速系统变频控制, 整流放在该调速系统中比较合理。放弃 270v 高压直流系统的概念, 接受变频电源系统的概念, 这是一个很大的变革。当然, 变频电源系统并没有否定 270v 高压直流系统, 只是在二个方面作了进一步的改善: 一是变频电源是一种混合电源系统, 它包含了频率可变的部份, 也包括了高压直流部分; 二是高压直流部分由集中整流分散到各个 T 用户进行分布式整流。这使整个航空电源系统更为合理。

在当代的大功率变频系统中, 采用我们认为转子复杂、不适宜高速运行的三级同步电机做起动/发电系统这更要很大的勇气, 但事实上, 它正在安全可靠地在有极高要求的民航飞机中服役。这给了我们另一个很重要的启示: 即是大功率的航空电源系统已进入多元化的状态。采用何种飞机电源系统, 要科学的根据各国的历史情况、工业情况、工艺基础、技术发展的情况、各机种的要求等等, 平衡多方面的因素来决定方案的选择,

而不应该机械的模仿和照搬。B-7E7 和 A380 给我们上了一堂很好的哲学课，说不定，在我们还未惊叹完毕，人家又在进行新一轮令我们更瞠目结舌的研究，只是我们现在不知道而已。当人家一上天，我们又要惊叹一回我们思想落后了。

当然，这些创造要根据严格的科学规律，不能随心所欲。实践是检验真理的标准。在大功率的航空电源系统中，要遵循的四个共同的原则应该是：可靠、效率、性能、成本。根据目前所掌握的技术资料，在国际上已装机和推荐装机的有三种：三级式同步电机、开关磁阻电机，这二种已装机；异步电机则被 NASA 和 wiscontion 大学 Lipo. 教授所推荐^[1, 2]。本文推荐另一篇 Jacek F. Gieras 关于异步电机和开关磁阻电机的比较性文章^[3]，他是从电动机角度出发进行比较的，可供大家分享此信息。从该论文中可以看到，比较的异步电机在转速上基本上达 1 万 8 千转/分（17955 转/分）；功率达 249KW；效率达 95.3%，这些技术指标，都是航空上能接受的，特别是当事实已证明三级电机能成为大功率的航空起动/发电电源系统之后，转子结构更简单的异步电机系统就没有理由说它因转子结构比开关磁阻电机复杂而不适宜航空电源系统了。

在国内，三级式同步电机的航空电源发电系统应用最为普遍，它的起动功能，在 1998 年的航空科学基金重点资助下开展了研究，取得了一定的预先研究成果，客观上跟上了

国外航空电源的技术动向。开关磁阻电机起动/发电系统的研究在航空基金及一些高校、企业研究单位的推动下，正在深入进行。在国家自然科学基金的资助下，异步电机起动发电系统的研究取得较大进展，正在向应用转化。

电磁式双凸极电机电源系统为国内首先提出，该系统具有转子结构简单，发电输出通过励磁调节电压的优点。该系统正在研制之中，暂还没有看到诸如效率、性能、发热情况、成本等全面的技术指标报告。我们相信，严谨的科学工作者们在研制一个阶段后我国这四种电源系统都会提出一个全面的技术报告，以便我们科学地、全面的来认识这几类航空电源系统，做出一总的客观的评价，促进我国航空电源技术的发展。

参考文献：

- [1] M. E. Elbulku and M. D. Kankam, "Potential Starter/Generator Technologies for Future Aerospace Application", IEEE AES Systems Magazine, Vol. 12, No. 5, May 1997, pp. 24-31
- [2] I. Alan, T. A. Lipo. Starter/generator Employing Resonant-Converter Fed Induction Machine Part I: Analysis and Part II: Hardware Prototype. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 2000, 36(4), PP1309-1329
- [3] Jacek F. Gieras "Comparison of High-Power High-speed Machines Cage Induction versus Switched Reluctance" IEEE (特种文献数据库),

电力电子变换器非线性混沌现象 及其应用研究*

张波

(华南理工大学电力学院 510640)

Study on Their Applications and Nonlinear Chaotic Phenomena of Power Converters

ZHANG BO

(South China University of Technology, Electric Power College 510640)

Abstract: Nonlinear chaotic phenomena of power converters is a problem that must be paid attention to, its researches will enhance to understand deeply the nature of power converters and explain some existing phenomena not being analyzed so far, such as the irregular electromagnetic noise and operational status not being controlled efficiently by the general methods; on the other hand, the new design methods and control strategies shall be possible to being developed by these researches to achieve some properties available of converters. Therefore, this paper points out the necessity and aim to research the chaotic phenomena of converters, and analyzes synthetically the basic kinds of chaotic phenomenon of power converters taking DC-DC converter as a kind of research object. Finally, the development and application in the future of the chaotic phenomenon of power converters is forecasted.

Keywords: Power converters; Chaotic phenomena; Nonlinear; Application

摘要: 电力电子变换器混沌现象是一个必须加以重视的问题, 它的研究一方面将深刻认识电力电子变换器的本质, 解释一些以往无法分析的现象, 如不规则

的电磁噪声、无法用常规方法控制的运动状态; 另一方面将有可能利用混沌理论提出新的设计方法和控制策略, 实现现有电力电子变换器无法达到的性能。为此, 本文从确定性运动、随机运动角度分析电力电子变换器混沌现象研究的必然性, 明确电力电子变换器混沌现象的研究目的, 并主要以 DC-DC 变换器为研究对象, 对电力电子变换器混沌现象的基本类型进行分析和综合, 由此对电力电子变换器混沌研究的发展和未来应用进行展望。

关键词: 电力电子变换器; 混沌现象; 非线性; 应用

1 引言

电力电子变换器是各种电力电子设备的核心技术, 实际运行中常常会出现一些奇异或不规则现象, 诸如运行的突然崩溃、不明的电磁噪声、控制系统的间歇振荡、系统运行的不稳定和系统无法按设计要求工作等等。这些现象由来已久, 然而长期以来人们都把它们归纳为系统故障和外界随机干扰, 影响了电力电子变换器的研究、设计和开发, 使得电力电子变换器性能的提高受到极大的限制。

此外, 由于电力电子技术极强的应用性, 一个电力电子变换器还未被系统地分析之前的就已经被广泛地使用了, 因而人们习惯将电力电子变换器作为一种电路拓扑来研究,

*国家自然科学基金(50177009)和广东省自然科学基金(011652)资助项目