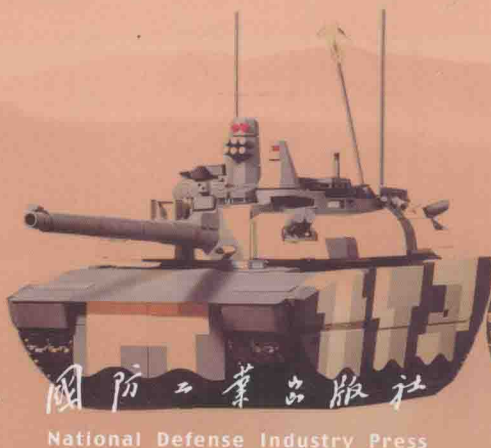


第三届特种车辆 全电化技术发展论坛

第三届特种车辆全电化技术发展论坛组织委员会 编

论文集



国防工业出版社
National Defense Industry Press

第三届特种车辆全电化技术发展论坛论文集

第三届特种车辆全电化技术发展论坛组织委员会 编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书共收录 159 篇学术论文, 内容涉及特种车辆全电化技术发展趋势及总体技术、供电体制及综合电源技术、高密度储能及能量管理技术、电磁弹射及其相关关键技术、电传动/机电混合传动及其相关关键技术、电磁防护及其他主动防护技术、电悬挂技术、建模与仿真技术、全电特种车辆可靠性、测试性、安全性等相关技术。整理成 7 类, 其中, 发展趋势及总体技术 13 篇, 动力与能源技术 27 篇, 驱动及关键技术 31 篇, 综合电子信息与故障诊断技术 14 篇, 武器与防护系统相关技术 19 篇, 建模与仿真技术 19 篇, 其他相关技术 34 篇, 另有特邀论文 2 篇。

本书对从事全电化相关技术研究的科技工作者、科研院所、军校师生等具有重要的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

第三届特种车辆全电化技术发展论坛论文集/第三届特种车辆全电化技术发展论坛组织委员会编. —北京: 国防工业出版社, 2014.6

ISBN 978-7-118-09573-9

I. ①第… II. ①第… III. ①专用汽车—电子技术—技术发展—文集 IV. ①U469.6-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 118518 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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/16 印张 48 $\frac{3}{4}$ 字数 1552 千字

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—800 册 定价 298.00 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

第三届特种车辆全电化技术发展论坛

主办单位

中国工程院机械与运载学部
总装装甲车辆与动力传动技术专业组
装甲兵工程学院
南车集团电力机车研究所
中国北方车辆研究所
北京理工大学
中国兵工学会坦克装甲车专业委员会
全电化技术重点实验室

组织委员会(按姓氏笔划排序)

主任:刘德刚
副主任:王晓俊 冯江华 李春明 张洪康 胡纪滨
委员:李和言 张兵志 陈先勇 杨占华 罗建华 郑伟 黄应清 窦铁焱
组织委员会办公室主任:赵战彪
组织委员会办公室副主任:李波 郑伟 廖自力
组织委员会办公室成员:任锐 刘红珍 刘春光 郝娜 彭增雄 魏曙光

学术委员会(按姓氏笔划排序)

主任:王哲荣
副主任:丁荣军 李春明 孙逢春 臧克茂
委员:马晓军 王克运 王挺泽 毛明 李志刚 李军 张豫南 张承宁
张立群 孟红 陈高华 范知友 周广明 尚敬 项昌乐 赵晓凡
柴风 栗保明 贾小平 常天庆 温旭辉

前 言

在信息化战争和新军事变革的需求牵引下,在高新技术发展的推动下,以综合电力、电驱动、电武器、电装甲等为典型特征的全电化特种车辆成为未来陆军装备的重要发展方向之一。开展全电化特种车辆的军事需求分析和军事应用研究,进行全电化技术基础理论和前沿技术攻关,推动全电化技术的创新发展,对装备发展具有重要意义。

2014年是党和国家部署落实“推动军民融合深度发展”重大战略的关键之年,军民融合领域改革劲风频吹,军民融合理论和实践不断创新。为探索特种车辆全电化技术领域军民融合、寓军于民的发展之路,展示和交流近年来军、民两地特种车辆全电化技术研究成果,中国工程院机械与运载学部、总装备部装甲车辆与动力传动技术专业组、装甲兵工程学院、南车集团电力机车研究所、中国北方车辆研究所、北京理工大学、中国兵工学会坦克装甲车专业委员会、全电化技术重点实验室8家单位,于2014年6月在湖南省长沙市联合举办“第三届特种车辆全电化技术发展论坛”。

这次学术会议紧扣军民融合深度发展这一时代主题,又是特种车辆全电化技术艰苦、漫长的研究工作的一个精彩瞬间,对于发挥学术牵引与技术推动的良性互动,加快我国特种车辆全电化技术的研究步伐,推动特种车辆全电化技术进一步发展,具有重要的意义。

祝愿同行们在特种车辆全电化技术的探索道路上取得更大的成果!

目 录

特邀论文

大功率交流传动关键技术与特种车辆全电化

- 方案研究 丁荣军 陈高华 梅文庆 许俊峰 刘国友 杨卫峰(3)
- 未来装甲装备发展需求及全电化技术支撑 张兵志 陈文英 魏巍 曾望(18)

第一部分 发展趋势及总体技术

- 从国外电传动技术的发展看装甲车辆全电化关键技术 余正根 李春旭(25)
- 从技术方法谈特种车辆混合电驱动技术发展 张立群 盖江涛 姜基平(29)
- 构建全电化军民融合创新体系,推动陆战平台全电化技术
- 创新发展 廖自力 马晓军 刘春光 罗宏浩 李方正(34)
- 国外坦克装甲车辆电传动及关键技术发展
- 分析 王桂芝 王磊 沈卫 郭美芳 贾喜花 孙毅 宋乐(38)
- 国外致密能源技术发展现状及趋势研究 孙毅 贾喜花 王桂芝(43)
- 军用混合动力技术发展展望 肖磊(49)
- 履带式特种车辆全电化技术发展趋势探索 尹江桥 朱丹克 左咏辉 田野 吴鹏(54)
- 全电化技术在轻型装甲车辆上的应用探究 胡顺京 俞素军 孙宪俊 赵晨 王昕博 甘林(59)
- 全电坦克驱动研究与探索 李景飞 钟敬武 赵云峰 徐远哲(65)
- 全电特种车辆总体技术 周黎明 郭致伸 陈凤琴(67)
- 全电战斗车辆关键技术介绍与分析 曹云泉 麻勇 李其忠(71)
- 特种车辆全电化需求分析 范知友 冯付勇 崔岩(76)
- 新一代陆战武器装备发展典型技术——全电化无人作战单元能源技术的
- 未来发展方向探究 车坚志 杜芳远 张蕊 李曼东(80)

第二部分 动力与能源技术

- 1MJ 小型高功率脉冲电源的研制 … 李贞晓 张亚舟 金涌 田慧 罗红娥 杨春霞 李海元 栗保明(87)
- 1MJ 重复频率电容储能脉冲电源检测系统的
设计 …………… 田慧 李贞晓 罗红娥 张亚舟 李海元 林庆华 杨春霞 栗保明(93)
- T 型三电平逆变器的直流母线设计…………… 王全东 李方正 罗宏浩(100)
- 车载大功率控制器冷板散热研究 …………… 张佳卉 邵春鸣 刘建峰 杨德友(105)
- 电动车辆动力电池热管理技术研究 …………… 李军求 孙逢春 张承宁(109)
- 电动装甲车辆用一体化启动发电机控制系统研究 …………… 于艳君 崔总泽 杨国庆 宋立伟(116)
- 供电体制发展是特种车辆的全电化基石 …………… 刘勇 高峰 刘胜利 张思宁(121)
- 混合动力装甲车辆总体设计开发平台研究 …………… 邢杰 马士奔 叶辉萍(126)
- 基于 DSP 和 CAN 总线的网络化电源管理系统 …………… 余世辉 李顺奇 李立宇 袁东(132)
- 基于 RSD 开关的小型化电容储能脉冲电源 …………… 张亚舟 李贞晓 田慧 B. E. Fridman 栗保明(137)
- 基于 ZVS 移相全桥软开关电路的机载蓄电池充电电源设计 …………… 刘亚龙 李匡成 王治国(141)
- 基于电动汽车锂电池荷电量在线预测的优化设计 …………… 周峰武 杨帆 靳晓光 吕征宇 厉小润(146)
- 基于双 PWM 整流器的坦克发电机整流控制系统研究 …………… 张成 张越雷 雷雄 陈雷 魏建勋(151)
- 一种全电战斗车辆直流变换电源 …………… 闫之峰 李敏裕 王国栋(158)
- 论全电车辆的能量管理和功率管理 …………… 毛明 韩政达 刘翼(162)
- 某型车辆电源系统便携式检查仪的设计 …………… 尚颖辉 石海滨 张健(169)
- 铅酸蓄电池快速充电技术理论分析 …………… 李匡成 焦振宇 刘政 刘岩(172)
- 全电特种车辆高压配电系统安全性研究 …………… 郑洁 高峰 张思宁 戚于飞(176)
- 特种车辆全电化的底盘电力系统改进 …………… 陈欣 董庆伟 任明(182)
- 现代战斗车辆能量体系结构 …………… 曹宏炳(186)
- 新型高功率机电复合系统电磁兼容关键技术研究 …………… 赵晓凡 聂秀丽 杜晓琳(191)
- 旋转变压器位置解算方法研究 …………… 李立宇 李长兵 余世辉 李顺奇(197)
- 一种新型的武器武器配电系统设计 …………… 姜征 魏平(202)
- 装甲车辆启动/发电一体化技术概述 …………… 李长兵 杨怀彬 廖自力 吴庆祥 王国栋(206)
- 装甲车辆启动发电一体化控制系统的研究 …………… 李长兵 杨怀彬 李立宇(211)
- 装甲车辆同步发电机不控与 PFC 整流对比研究 …………… 李方正 王全东 孟宪波(214)
- 装甲车辆用 ISG 电机设计与仿真 …………… 李长兵 杨怀彬 罗宏浩 吴庆祥 刘岩(221)

第三部分 驱动及其关键技术

- 8×8 轮毂电机驱动车辆转向差速控制研究 …………… 张承宁 刘明春 孙逢春(227)
- HEV 技术在军用车辆上的应用前景分析 …………… 田爱武 张超 张大伟(232)

NTE260 电动轮矿用车全电化冷却系统设计	刘强	王逢全	高利军	(236)	
PMSM 调速系统低速性能分析与控制研究	朱志昆	李长兵	尚颖辉	石海滨(239)	
采用双转子电机的机电复合传动的传动特性分析与参数匹配	陈星	苑士华	彭增雄	(244)	
电传动车辆转矩补偿直线行驶控制策略研究	刘秋丽	马晓军	郑静	温春(251)	
电传动在军用工程机械上的应用分析	汤久望	冯继新	吴耀强	(256)	
电动轮技术在装甲车辆中的应用分析	李大伟	冯世琪	何华明	(260)	
多轮混合动力电驱动特种车辆综合控制系统设计研究	邹波	谭坤	马海燕	杨世春(264)	
高速大扭矩内置式永磁同步轮毂电机转子机械强度研究	柴凤	李义	裴宇龙	梁培鑫(269)	
国外军用混合电驱动技术发展分析	刘玉英	张文超	范云	王佳(275)	
混合动力电传动技术在装甲车辆上应用浅谈	刘笑任	何兴云	戴斯盛	(283)	
机电复合传动多目标自适应控制方法研究	张东好	项昌乐	韩立金	郑海亮(287)	
机电复合传动系统优化控制策略研究	郑海亮	项昌乐	韩立金	张东好(293)	
基于动力性的 8 轮独立驱动轮毂车辆驱动力优化分配	王云钊	王志福		(297)	
基于轮毂电机多轮独立驱动车辆转向控制策略研究	燕玉林	廖自力	刘春光	樊璞(303)	
基于模糊 PID 的电驱动履带车辆直驶稳定性控制策略研究	周广明	袁艺	盖江涛	(307)	
基于模糊层次分析法的装甲车辆电传动方案评价	廖自力	张运银	庞宾宾	(311)	
6 轮独立电驱动特种车辆驱动力控制算法研究	邹波	谭坤	马海燕	杨世春(316)	
轮毂电机关键技术综述	程树康	梁培鑫	柴凤	(320)	
多轮独立驱动车辆 ASR 与 ABS 控制策略研究	阳贵兵	廖自力	刘春光	任锐(328)	
轮履复合电驱动装甲车辆研究方案	马晓军	曾庆舍	刘春光	魏曙光	廖自力(331)
轮式装甲车辆混合电传动系统评价研究	庞宾宾	刘春光	廖自力	闫之峰(335)	
全电特种车辆电传动系统电磁兼容性能研究	王振楠	高强	洪作鑫	(339)	
湿式离合器在基于双电机独立驱动履带装甲车辆机电复合传动中的应用研究	高拯国	张小鹏		(343)	
双电机混合动力系统综合变速特性研究	王加雪	张建国	张洪才	魏昊(347)	
外军特种车辆混合电传动技术发展现状及启示	唐克	吴繁华		(355)	
一种分布式电驱动系统的协调控制研究	刘春光	曾庆舍	阳贵兵	贾宇飞(358)	
集成化的轮毂电机驱动技术研究	赵毅慧	刘勇		(363)	
装甲车辆电传动装置发展简介	朱磊	毛娜佳	魏飞	(367)	
装甲车辆电传动系统起动发电一体机设计	欧金生	雷雄		(370)	

第四部分 综合电子信息与故障诊断技术

CAN 总线在电动车辆电源管理系统中的应用	王小龙	唐刚		(377)
车辆综合电子系统总线网络拓扑结构设计方法研究	陈克伟	宋小庆		(380)

固态变压器先进控制方法展望	刘宝龙 查亚兵 张涛(384)
混合电传动车辆车载信息化技术研究	陈凤琴 鲍志光 郭致伸 赵鑫 孙伟杰(388)
基层装甲部队战车总线技术应用现状与对策研究	周伟科 卢志伟 陈寿齐(394)
基于 FPGA 的 FlexRay/MIC 网关系统的研究与设计	邢思茗 王勇 任锐(397)
基于 Quantum Leaps 的异型车辆嵌入式故障诊断系统设计	陈辰 厉小润(402)
基于装甲车辆环形链路红外光通信系统研究与分析	赵梓旭 宋小庆 廖自力 刘春光(408)
结构互连诊断中颜色编码算法的选择	牛春平 任哲平 任锐(413)
军用车辆 CAN 网络实时调度算法研究	宋小庆 陈永星 赵梓旭 陈玉龙 金鑫亮(416)
全电化特种车辆可靠性问题与对策研究	肖顺旺(421)
适用于一种综合电力系统的车辆联合制动控制研究	刘春光 项宇 马晓军 阳贵兵(425)
一种有效改善结构互连诊断算法故障诊断能力的方法	牛春平 任哲平 杨月婷(430)
装甲车辆电气系统状态检测体系研究	李光升 魏宁 李刚(433)

第五部分 武器与防护系统相关技术

车辆主动防护的仿真系统总体设计	曹春(441)
车载小型化多功能导弹对抗技术研究	王永康 宋海平(445)
电磁防护及其他主动防护技术	易永生 刘遵飞 张存旺(449)
电磁轨道炮的研究与发展	闫涛 马强 刘贵民(452)
电磁驱动器件在三防系统关闭机构上的应用	李平 杨旭 李曼东(457)
电磁装甲等非常规装甲在装甲车综合防护系统中的运用	朱岩 叶剑 薛军 吴澜涛(463)
电磁装甲防护材料在轻型装甲车辆上的应用 研究	俞素军 赵晨 陈雪琴 胡顺京 孙宪俊 次会欣 魏成思(467)
复杂电磁环境下军用特种车辆电磁防护与兼容性研究	李伟(471)
基于车载电控系统的某型武器系统的发射车电气设计	刘晓斌 杨鑫 姜征(474)
激光驾束制导武器光电对抗技术研究	杨建昌 易琰 解国栋 李萍(477)
全电陆战平台激光武器系统分析与应用	易琰 杨建昌 解国栋(481)
数字化坦克全电化火控系统展望	侯宇飞 韩剑 杨庆中(485)
特种车辆电磁干扰及电磁防护的探讨	李华 林赓(488)
提高炮控驱动系统电流环响应速度的措施	李长兵 李年裕 杨怀彬(491)
网络化火控系统体系结构及关键技术研究	王钦钊 郭傲兵 吴伟胜 黄钊(494)
一种新型转轴式智能防护系统的构建	周黎明 赵学青 杨文秀 李澎(499)
载体平台扰动对车载捷联惯导初始对准影响研究	吴伟胜 唐帅 黄钊(506)

- 装甲车辆的主动防护系统技术与发展 徐春和 刘达 史少华(511)
 装甲车辆炮塔电机驱动系统自适应控制及其参数整定研究 袁东 马晓军 廖自力 吴伟胜(515)

第六部分 建模与仿真技术

- 电传动特种车辆驱动变频器的电容选型及纹波电流仿真分析 杨大成 应婷 张宇 尚敬(521)
 观瞄仪器离焦现象仿真及 FPGA 实现 李强 何炳阳 程高峰 张旭帆(525)
 柜体屏蔽效能研究及仿真分析 杨德勇 闵建军 范祝霞(530)
 基于模糊数学的燃气轮机评价指标体系建立 李嘉麒 张志勇 任锐 刘春光(534)
 基于物理学建模的功率电子模块的接口定义方法 赵晓凡(538)
 几种灰色模型建模方法验证与分析 任哲平 牛春平(545)
 履带车辆肘内式油气弹簧主动悬挂性能仿真 高晓东 董明明 高俊峰(549)
 瞄准镜光码信号建模与预测研究 谢志宏 黄应清 李萍 张桂敏(553)
 某型电动车用永磁同步电机直接转矩控制仿真研究 杜晓坤 任锐 王蕤(558)
 耦合仿真在柴油机冷却系统设计中的应用研究 冯建涛 卫振彪 王云开 刘国夫(561)
 全电特种战斗车辆仿真训练系统设计研究 邹立仁 高洪涛 马凯(566)
 全电装甲平台性能仿真研究 颜南明 张豫南 李年裕(569)
 双侧电机耦合驱动转向控制方法实时仿真验证 马田 盖江涛 刘翼 张欣 万帆(574)
 特种车辆用 IGBT 水冷散热器的热仿真分析 丁杰 尚敬 王坚(579)
 特种车辆用水冷电机冷却系统与温度场仿真研究 杨金霞 元约平 胡勇峰 邹煜林 胡华(583)
 一种新型自供能量主动悬挂系统仿真研究 梁经芝(587)
 异步电机 SVPWM 矢量控制系统的建模与仿真分析 谭君洋 马晓军(591)
 主动油气悬架动态特性仿真研究 赵丰 董明明 管继富 朱兴高(596)
 装甲车辆供电系统的传导 EMI 建模 李方正 孟宪波 王全东(602)

第七部分 其他相关技术

- 便携式检测设备可靠性分析与设计 魏宁 李光升 谢永成(609)
 变频调速系统电机端过电压研究 王涛 陈恒林(613)
 超轻点阵三明治结构抗侵彻性能数值模拟 周黎明 赵学青 张鹏 郎璞(618)
 车厢侧倾对轮式速差转向车辆转向特性的影响 唐寿星 李雪原(623)
 车用燃气轮机减振设计与台架试验分析 邢俊文 鲍立群 张传清 李炯 段路茜(628)
 电磁主动悬架能量需求研究 阴运宝 马国新 冯占宗 龙振新 周宁宁(632)
 电动侧面转矩定向差速器的特性分析 柳春旺 苑士华 陈凯(637)

电动轮矿用自卸车信息管理系统	刘通 孙明达 汪仁志 王逢全 高利军(642)
电机驱动器功率器件散热问题的探讨	许大浦 杨建欣(646)
关于车辆电悬挂基本问题的讨论	周宁宁 马国新 雷强顺 阴运宝 白国华 龙振新 张春生(656)
机电混合传动支撑轴表面精确镀铬工艺技术研究	李文刚 张建强 牟启芬(660)
基于 ANSYS Workbench 的轻型高机动底盘驱动桥架的有限元分析	袁佳(665)
基于 DSP 和 FPGA 的捷联惯导多位置对准算法研究及实现	武萌 尹训锋 周曙光(669)
基于机器视觉的阶梯状路径识别方法研究	顾柏园 于莹 王加雪 谢碧炜(674)
基于目标工况的新型复合储能装置的参数匹配	王言子 项昌乐 王伟达(681)
基于运动预测目标跟踪算法的研究	丁岩松 杨月婷 王晓卫(686)
激光防护镜的关键技术	曲宙 王秋贵 孟海鸿(690)
军用轮式车辆 CEPS 的 H_{∞} 控制器设计	李军 何海宝(693)
车辆电磁悬挂瓶颈技术分析	冯占宗 魏来生 马国新 阴运宝 白国华(696)
某型混合动力车辆的再生制动算法研究	郝娜 燕玉林 廖自力 胡睿凡(705)
某装甲车磁流变半主动悬挂的振动控制与试验研究	汪小平 万锂 王洋 闵峰(708)
逆变器设计新方法	丁国宝 叶剑 殷大卫(712)
全电化战斗车辆维修保障并行建设探讨	朱斌 常天庆 陈玉强 张雷 杨国振(715)
全电坦克观瞄系统发展研究综述	刘义 梅林 徐阳 朱晶晶 周平(719)
3500V, 15A 全碳化硅功率模块制备与 测试	陈思哲 何俊伟 郭清 盛况 黄润华 陶永洪 柏松(722)
坦克用燃气轮机发展现状与优势分析	陈正宏 方剑 邢俊文 廖自力(726)
特种车辆用永磁同步电机极槽配合的研究	彭俊 符敏利 陈致初 元约平 史文波(731)
涡流管技术在全电特种车辆热管理中的应用构想	王东基 王波(735)
无人车辆路径跟踪的模糊控制器设计	李年裕 李长兵 李辉(739)
谐振式无线充电技术在特种电动车辆中的应用 研究	崔玉龙 王会明 许大浦 范好亮 刘会军 史风光(744)
一种串级控制器设计	宋克岭 高峰 王大志 崔雷 张晓波(750)
一种高性能永磁同步牵引电机控制策略研究	何亚屏 许峻峰 文字良 张朝阳 刘雄(756)
永磁同步发电机 PWM 整流并列运行方法研究	段卓琳 赵峰 温旭辉(760)
装甲车辆全系统性能测试系统软件设计及实现	解国栋 李卫东 李萍 杨建昌(764)

特邀论文

大功率交流传动关键技术与特种车辆全电化方案研究

丁荣军 陈高华 梅文庆 许俊峰 刘国友 杨卫峰

(南车株洲电力机车研究所有限公司,湖南株洲 412001)

摘要:介绍了交流传动系统的大功率器件技术、变流技术和高性能控制技术,分析了特种车辆的应用环境对交流传动系统的特殊需求和处理方法,提出了特种车辆全电化技术的解决方案。

关键词:交流传动;特种车辆;全电化技术;特种应用环境;IGBT;SiC;永磁电机

随着国防建设对特种车辆的机动性、轻型化等方面提出更高需求,加强特种车辆全电化技术研究与应用具有更加重要的现实意义。大功率交流传动技术是特种车辆全电化的核心,与传统机械传动相比,交流传动具有显著的技术优势:结构简单、调速范围宽,动态响应快、传动效率高。与此同时,功率器件的高功率密度小型化和集成一体化、控制器的多核化和微型化、控制理论技术的不断发展推动交流传动技术的快速发展,为交流传动技术在特种车辆上的应用奠定了物质基础。本文介绍了大功率器件技术、变流技术和控制技术,分析了特种车辆应用环境对交流传动系统的特殊需求和处理方法,提出了特种车辆全电化技术解决方案。

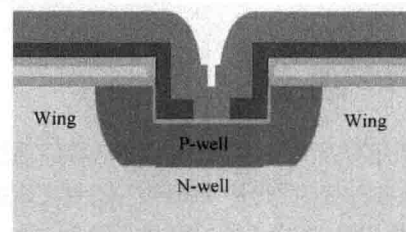
1 大功率器件技术

新型大功率器件及其新型材料一直是电力电子行业的研究重心,而且特别活跃。每一代新型器件的诞生,都会带来电传动技术的革命,从水银管到晶闸管,再到 GTO,直到目前广泛应用的 IGBT、IGCT 以及 IPM,直接推动了大功率变流技术的快速发展,一代器件决定一代变流装置。

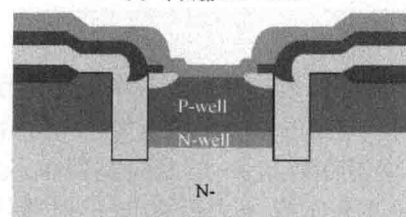
20 世纪 50 年代,美国通用电气公司研制出世界上第一个工业用普通晶闸管,其耐压高、导通压降小、功率损耗低,在高压直流输电、动态无功功率补偿等场合有着广泛的应用,目前依然朝着高电压、大电流的方向发展。但晶闸管需要用复杂的辅助换流关断电路,因此 20 世纪 80 年代,GTO 等器件得到迅速发展,也标志着电力电子技术进入了发展的第二个阶段——可以实现器件的自关断。在此基础上 ABB 和 CSR 推出了

集成门极换流晶闸管 IGCT,关断时间和关断过电压大幅减小,但无论是 GTO 还是 IGCT,实际应用中存在不足:大的门极关断电流使门极驱动单元庞大复杂,效率低下;应用开关频率仅约 1000Hz。1982 年美国 RCA 公司和 GE 公司先后发明了 IGBT,经 20 世纪 90 年代的飞速发展,IGBT 已经发展到沟槽栅电场截止型(Trenchstop)结构的第五代技术。IGBT 是电压型全控器件,它混合集成 MOSFET 与双极型晶体管,具有较高的开关频率,控制单元简洁可靠,效率高,没有二次击穿问题,无需旁路吸收电路等优点,在各种中大功率交流传动系统中得到广泛应用。

IGBT 器件体结构由 PT(穿通),发展到 NPT(非穿通),再到 SPT(软穿通),体区不断变薄,功率损耗大大降低;栅结构则由平面栅发展到沟槽栅,电流密度不断提高,当前国内领先水平的平面栅 SPT + IGBT(载流子增强型平面栅软穿通 IGBT,如图 1(a)所示)



(a) 平面栅 SPT+IGBT



(b) 沟槽栅 SPT+IGBT

图 1 IGBT 栅结构

已经在 CSR 下线,国际先进水平的沟槽栅电场截止型 IGBT(如 1(b))即出样品。

近年来碳化硅(SiC)器件的迅速发展标志着大功率器件进入了新的发展阶段。与传统的硅器件相比, SiC 功率器件具有“三高一低”的特点:更高的耐受电压(>20kV),更高的工作温度(>300℃)和抗辐射能力,具有更高的工作频率(>100kHz),具有更低的能量损耗(如图 2、图 3 所示),从而使 SiC 器件

的装置具有更小的体积和更高的功率密度。SiC 功率模块分为混合碳化硅模块(比如采用硅 IGBT 和 SiC FRD)与全 SiC 模块,技术上日趋成熟。日本、法国等已经在地铁牵引系统上应用 SiC 器件,国内 CSR 正在研发 SiC 器件,研发出了 SiC 变流器、SiC 器件功率模块和 1700V/1200V/650V 三种电压等级全数字可编程 SiC 器件门极驱动器,具有小型、高频、高隔离耐压的特点。

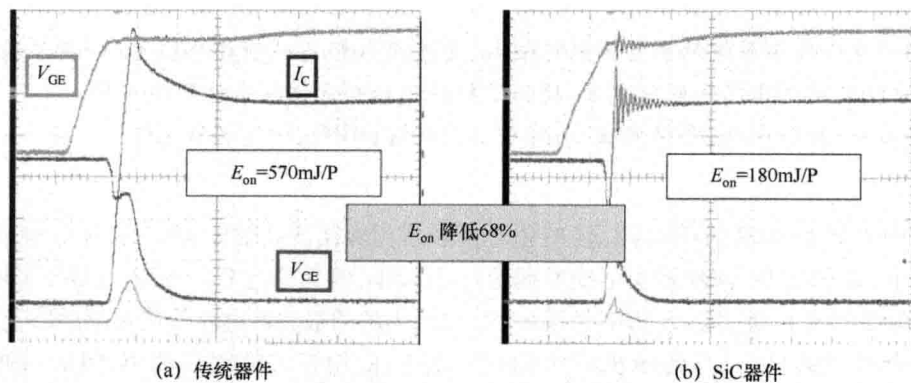


图 2 SiC 器件开通波形(开通损耗降低 68%)

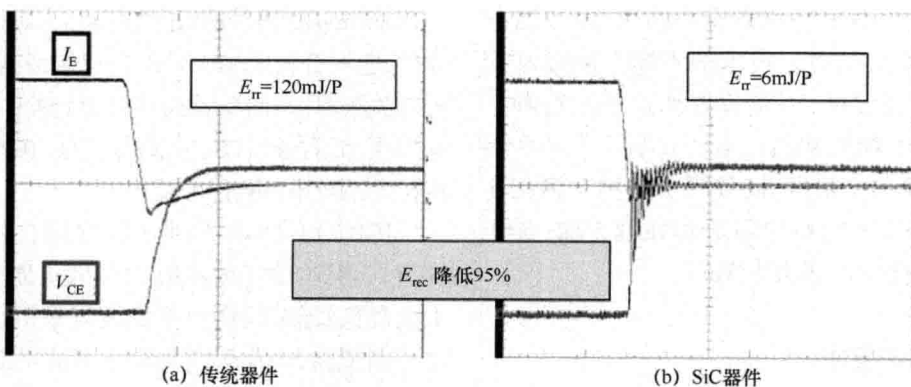


图 3 SiC 器件反向恢复波形(反向恢复损耗降低 95%)

2 大功率变流技术

大功率变流技术的实质是大功率器件通过一定拓扑结构组成各种变流器,并以特定的控制实现能量形式的变换、相数变换、频率变换、幅值变换或相位变换。

2.1 拓扑结构

变流器的电路拓扑形式分为两电平电路结构和多电平结构。典型的两电平结构如图 4 所示,目前应用最广,所用器件数量少,电路结构简单,通过器件的串联或并联来实现大功率输出,但对器件均压和均流有要求,对器件耐压等级要求较高,同时由于输出只有两个电平,所以相对来说谐波较大。

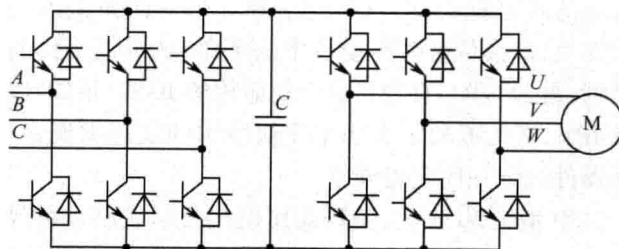


图 4 两电平电路拓扑结构

更大功率化的需求出现,促进了多电平的拓扑结构研究。20 世纪 80 年代,日本学者提出了二极管箝位三电平电路拓扑结构,并在高速列车上广泛应用,其基本结构如图 5 所示,通过多个电平台阶合成阶梯波以逼近正弦输出电压。多电平变流器能够实

现高质量的输出波形,克服了两电平变流器的部分不足,具有有效开关频率低、 du/dt 小的特点。多电

平变流器主要有三种结构:二极管箝位型、飞跨电容型和级联 H 桥型。

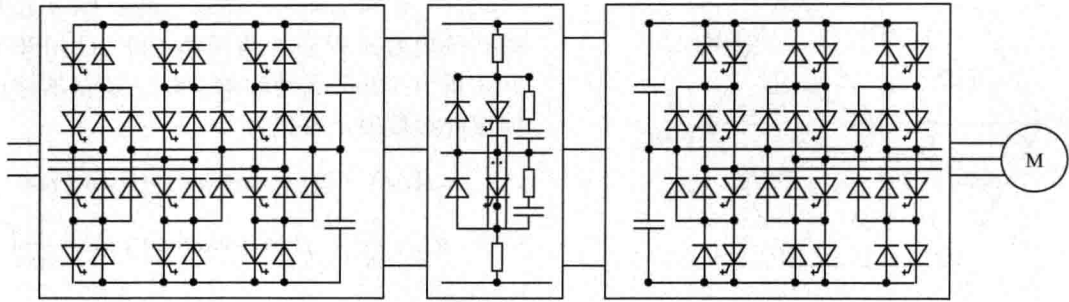


图5 三电平电路拓扑结构

2.2 散热技术

大功率变流器的散热对可靠性有重要影响,温度升高会减小器件的输出功率,增大器件的损耗,影响器件的寿命,造成系统故障。因此,变流器的散热设计特别重要。

变流器常用散热方式主要有空气冷却和液冷冷却,空气冷却有自然冷却、强迫冷却和热管冷却三大类。自然冷却通过空气的自然对流和热辐射将变流器的热量散发出去,结构简单、可靠性高,但散热性较低。强迫风冷通过风扇强迫空气流动带走热量,散热效率高,但噪声较大、可靠性受风扇影响。热管冷却通过热管散热,热管是一种高效能传热元件,由密封管、吸液芯、汽通道组成,液体吸收热量形成蒸汽,流向冷凝段,通过管壁与外界换热凝结成液体,从而散发热量,散热性能好。相对于空气冷却,液体冷却方式效果更好,主要有油冷和水冷。油冷由于结构复杂,已逐步被取代。水冷体积小、效果好,目前在大功率变流器上有着广泛的应用。

3 大功率控制技术

3.1 PWM 控制技术

PWM 技术一直是交流传动的核心之一,1964 年 A. Schonung 和 H. stemmler 首先提出将 PWM 通信技术应用到交流传动中,为交流传动的应用开辟了新局面。从最初采用模拟电路完成三角调制波和参考正弦波比较,产生正弦脉宽调制 SPWM 信号以控制功率器件的开关,到目前采用全数字化方案,完成优化的实时在线的 PWM 信号输出,可以说 PWM 在各种应用场合仍占主导地位,并一直是研究的热点。

3.1.1 正弦脉宽调制 (SPWM)

SPWM 调制方法使逆变器输出电压波形接近正弦波,所产生的波形是与正弦波等效的一系列等幅

不等宽的矩形脉冲波形。产生正弦波脉宽调制波形的基本原理是采用一个等腰三角形与一个正弦波进行比较,其相交的时刻作为功率开关器件导通或截止的时刻。图 6 表示 SPWM 的调制过程,等腰三角形称为载波,正弦波称为调制波。正弦波的频率和幅值是可控的,改变正弦波的频率和幅值,就可以改变逆变器输出电压的频率和幅值。采用 SPWM 调制,逆变器输出电压的基波相比于方波 ($0.78U_d$),直流电压利用率不高。

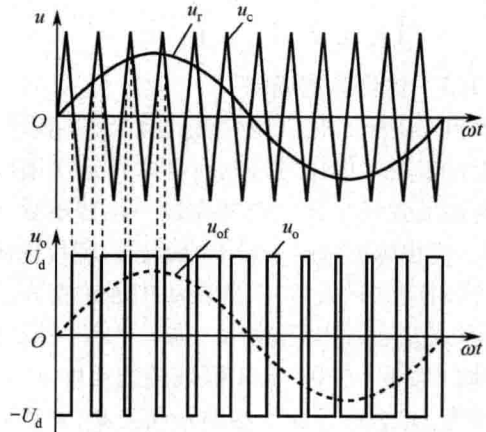


图6 SPWM 产生原理图

3.1.2 空间电压矢量脉宽调制 (SVPWM)

SVPWM 调制方法将逆变器和电机作为一个整体,以交流电动机理想圆形磁场为基准,用逆变器不同的开关状态所产生的实际磁场去逼近基准圆磁场,由此形成 PWM 脉宽波形。忽略定子电阻,定子电压空间矢量的积分即电机定子磁链空间矢量,因此控制作用于电机的电压矢量(大小和方向)以及该电压矢量的作用时间,就能控制电机的磁场轨迹。以下用两电平电压型变流器说明 SVPWM 的原理,图 7 给出了 SVPWM 的电压空间矢量图形,其中 \vec{V}_1 、 \vec{V}_6 称为有效矢量, \vec{V}_0 、 \vec{V}_7 则称为零矢量。

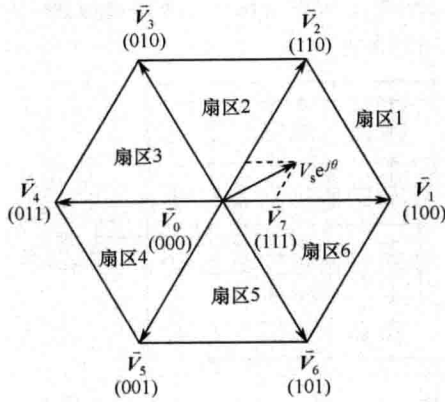


图7 空间矢量调制基本矢量合成图

在每个扇区用相邻的两个有效矢量和零矢量进行矢量拟合,根据伏秒平衡原则,在扇区1有:

$$\int_{kT}^{(k+1)T} V_s e^{j\theta} dt = \vec{V}_1 T_1 + \vec{V}_2 T_2 + \vec{V}_0 T_0 \quad (1)$$

其中 T_1 、 T_2 和 T_0 分别是基本矢量 \vec{V}_1 、 \vec{V}_2 和 \vec{V}_0 的作用时间,由式(2)计算可得,其中 m 为调制比,则对应的作用时间为

$$\begin{cases} T_1 = \sqrt{3}mT \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_2 = \sqrt{3}mT \sin(\theta) \\ T_0 = T - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (2)$$

3.1.3 优化脉宽调制

特殊应用场合,需要采用优化脉宽调制以提高系统控制性能,主要优化宽调制有消除特定次谐波脉宽调制、电流谐波最小脉宽调制和最小化转矩脉动脉宽调制等。优化脉宽调制一般离线通过特定目标函数优化计算出对应的开关角,实际应用中通过查表或数据拟合的方式来实现PWM输出。如A相开关器件开关波形如图8所示,在 $0 \sim \pi/2$ 区域内的角度 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ (开关角)位置进行逆变器的开通关断,并且对于此 m 个开关角满足下列关系(在工程应用中相邻两个开关角的差值还需满足最小脉宽长度限制):

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_m < \pi/2 \quad (3)$$

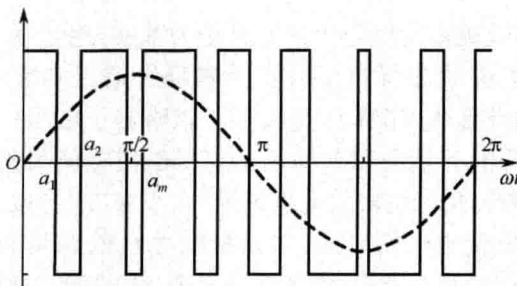


图8 A相电压脉宽调制输出波形

在实际工程应用中,为使电流谐波最小,三相电

压脉宽调制输出波形需保持 $1/2$ 波对称和 $1/4$ 波对称,即对应A相开关器件在 $\pi/2 \sim \pi$ 内的开关角为 $\pi - \alpha_m, \dots, \pi - \alpha_2, \pi - \alpha_1$ 依次类推。则B相开关器件的开关角为A相开关角顺移 120° ,C相开关器件的开关角为A相开关角顺移 240° 。逆变器输出电压的傅里叶级数表示形式为

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (4)$$

式中: $a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos n\omega t d\omega t$; $b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin n\omega t d\omega t$.

输出电压波形保持 $1/2$ 波对称和 $1/4$ 波对称,有:

$$f(\omega t) = f(\pi - \omega t), f(\omega t) = -f(\pi + \omega t) \quad (5)$$

所以傅里叶级数中的余弦分量、直流分量和偶次正弦分量为零,以 $4U_d/\pi$ 为电压基值进行电压的标么化,得到标么后的电压表示为

$$u_k = \frac{1}{k} [1 - 2\cos(k \times \alpha_1) + 2\cos(k \times \alpha_2) - \dots + (-1)^m \times 2\cos(k \times \alpha_m)] \quad (6)$$

通常在三相对称电路的线电压中,相电压所含的3次谐波相互抵消,因此可得如下联立方程:

$$\begin{cases} u_1 = 1 - 2\cos\alpha_1 + 2\cos\alpha_2 - 2\cos\alpha_3 + \dots \\ u_5 = \frac{1}{5}(1 - 2\cos5\alpha_1 + 2\cos5\alpha_2 - 2\cos5\alpha_3 + \dots) \\ u_7 = \frac{1}{7}(1 - 2\cos7\alpha_1 + 2\cos7\alpha_2 - 2\cos7\alpha_3 + \dots) \\ \dots \end{cases} \quad (7)$$

改变 α 角即可消除特定次谐波。

3.2 电机控制技术

3.2.1 标量控制技术

感应异步电机是一个高阶、非线性、强耦合、多变量系统,早期的交流传动只做到了稳态模型控制,其中较为广泛应用的为标量控制,通过控制逆变器输出电压控制电流、磁链和转矩,实现简单且不受电机参数影响,在动态要求不高工业应用领域有着极为广泛的应用,但其动态响应性能较差,无法满足如车辆牵引等高端应用场合。

3.2.2 矢量控制技术

矢量控制(Vector Control)又称磁场定向控制(Field Oriented Control),将交流电机空间磁场矢量的方向作为坐标轴的基准方向,通过坐标变换将电机定子电流正交分解为与磁场方向一致的励磁电流分量与与磁场方向垂直的转矩电流分量,然后就可以像直流电机一样对励磁电流分量和转矩电流分量分别进行控制。矢量控制