

军用车辆电气系统 瞬态分析

The Transient Performance Analysis of Electrical
Systems in Military Vehicles

威克茂 著

国防工业出版社

军用车辆电气系统 瞬态分析

The Transients Analyze of Electrical
Systems in Military Vehicles

臧克茂 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

军用车辆电气系统瞬态分析/臧克茂著. —北京:国防工业出版社, 2002. 1

ISBN 7-118-02594-1

I. 军... II. 臧... III. 军用车辆—电气设备—瞬态状况—分析 IV. U469.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 042142 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 176 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:18.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 崔士义 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 李德毅 杨星蒙 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 崔尔杰

常显奇 彭华良 韩祖南 舒长胜

前 言

军用车辆上的电源装置、耗电装置、检测仪表和辅助器件等,传统称作“电气设备”。进入 20 世纪 70 年代后,微电子技术的广泛应用,耗电装置日益增多,自动化程度不断提高,对电源装置容量的需求愈来愈大,对可靠性的要求也越来越高,大大扩展了“电气设备”的内涵和外延,形成了“电气系统”这一概念。以致现代坦克等军用车辆的火力威力、机动性、防护能力等在很大程度上依赖于电气系统的性能及其有效性。电气系统成为决定坦克等军用车辆战斗力的主要因素之一。作者根据军用车辆电气系统组成的特点,抓住各类瞬变过程的物理本质,相应地采用恰当的数学处理方法进行分析和计算,对结果进行实验验证,表明所作瞬态分析具有正确性和合理性。从而本书试图向读者提供对军用车辆电气系统进行优化设计、合理生产和正确使用的理论依据,也为军用车辆电气系统的进一步发展提供参考。

撰写本书的主要基础是十多年来的教学经验和科研工作结果。所发表过的拙文,见本书末参考文献中所列。在撰写过程中,曾参阅和利用了不少已有著作的成果,主要的已列入书末的参考文献,以便读者了解本书某些内容的主要来源和进一步查阅某些感兴趣的课题,同时也表示对原著者的感谢和敬意。

全书共分九章。第一章是介绍军用车辆电气系统的组成、特点和发展。目前的军用车辆电气系统主要是有蓄电池并联的低压直流电气系统;其中发电机由车辆发动机驱动发电,为了保证系统电压稳定在规定范围内,军用车辆发电机都配有电压调节器。所以进行电气系统瞬态分析前,在第二章、第三章和第四章分别研究了蓄电池的等效电路、电压调节器对发电机电压的调节过程,介绍

了军用车辆发电机的特点、发展和基本电磁关系。在第五章和第六章分别对起动扰动电压、浪涌电压、尖峰脉冲电压和突然短路电流等进行了分析计算,列出了实验对比结果。交流电气系统与直流电气系统相比有诸多优点,某些军用车辆上,在有直流电气系统的前提下,还有辅助的交流电气系统。在交流电气系统中异步电动机负载对系统的稳定及电压变化过程有着重要影响。第七章研究了电气系统突然短路时异步电动机的转速变化。第八章和第九章介绍了电气系统静态稳定和动态稳定的分析计算方法。

装甲兵工程学院夏永霖教授对作者开展军用车辆电气系统研究作了指导和帮助,并提供了部分材料;刘世参教授仔细审阅了书稿,提出了许多宝贵意见;责任编辑崔晓莉同志对正确缮写书稿给予了具体指导和耐心帮助,在此一并向他们致以诚挚的谢意。最后作者衷心地感谢国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社对本书的资助和出版。

由于撰写者的水平有限和时间仓促,书中一定有许多错误和缺点,恳切希望读者予以批评指正。

作 者

目 录

第一章 军用车辆电气系统的组成	1
1.1 军用车辆电气系统的组成	1
1.2 军用车辆电气系统的特点	3
1.3 军用车辆电气系统瞬变状态的涵义	4
第二章 军用车辆蓄电池特性的分析及其等效电路	6
2.1 军用车辆蓄电池电特性的分析	6
2.2 军用车辆蓄电池的传递函数和等效电路	16
2.3 军用车辆蓄电池的频率特性	23
第三章 军用车辆发电机	26
3.1 军用车辆发电机的种类	26
3.2 军用车辆直流发电机的电磁关系	29
3.3 军用车辆硅整流发电机的电磁关系	36
第四章 军用车辆发电机电压的调节	78
4.1 军用车辆发电机电压调节器的分类	78
4.2 直流发电机的电压调节	80
4.3 硅整流发电机的电压调节	88
第五章 军用车辆直流发电机电气系统瞬态分析	96
5.1 起动扰动电压的分析与计算	96
5.2 军用车辆直流发电机电气系统等效电路图	101
5.3 浪涌电压的分析与计算	106
5.4 尖峰脉冲电压的分析与计算	108
5.5 突然短路电流的计算	114
第六章 军用车辆硅整流发电机电气系统的瞬态分析	118
6.1 硅整流发电机输出电压的瞬时值及工作模式	119

6.2	模式转移及电流关系	122
6.3	浪涌电压的分析与计算	124
6.4	尖峰脉冲电压的分析与计算	128
6.5	突然短路电流的计算	130
第七章	军用车辆电气系统中异步电机的瞬态分析	141
7.1	d_c 、 q_c 、 θ 坐标系统中异步电机的数学模型	142
7.2	异步电机在电气系统短路时的基本电磁关系	146
7.3	电气系统短路时异步电机输出(或消耗在定子电 路内)的最大电能	147
7.4	电气系统短路时异步电机的最大转速降落	155
7.5	计算与试验	158
第八章	军用车辆电气系统的静态稳定	163
8.1	同步电机的瞬变电势	163
8.2	同步电机转子的运动方程	165
8.3	交流发电机的电磁转矩和功率	168
8.4	分析电气系统静态稳定的增量法	172
8.5	阻尼作用对静态稳定的影响	176
8.6	自动调压作用对静态稳定的影响	178
8.7	提高军用车辆电气系统静态稳定的措施	185
第九章	军用车辆电气系统的动态稳定	187
9.1	物理过程分析	188
9.2	等面积定则	192
9.3	发电机转子运动方程的求解	194
9.4	电压调节器对电气系统动态稳定的影响	204
9.5	提高军用车辆电气系统动态稳定的措施	207
参考文献		208

CONTENTS

CHAPTER 1 THE COMPOSITION OF ELECTRICAL SYSTEMS IN MILITARY VEHICLES	1
1.1 The composition of electrical systems	1
1.2 The distinguishing feature	3
1.3 The implication in transients	4
CHAPTER 2 THE EQUIVALENT CIRCUIT AND ANALYSIS OF THE BATTERY IN MILITARY VEHICLES	6
2.1 Battery performance analysis	6
2.2 Transfer function and equivalent circuit	16
2.3 Frequency response	23
CHAPTER 3 THE GENERATORS IN MILITARY VEHICLES	26
3.1 Classifications of generators	26
3.2 The electromagnetic relations of DC generators	29
3.3 The electromagnetic relations of silicon rectifying generators	36
CHAPTER 4 VOLTAGE REGULATIONS OF GENERATOR IN MILITARY VEHICLES	78
4.1 Classifications of regulators	78
4.2 Voltage regulations of DC generators	80
4.3 Voltage regulations of silicon rectifying generators	88
CHAPTER 5 TRANSIENTS IN A ELECTRICAL SYSTEMS WITH A DC GENERATOR	96

5.1	Starting disturbances	96
5.2	Equivalent Circuit.....	101
5.3	Surges.....	106
5.4	Spikes.....	108
5.5	Suddenly short-circuit currents	114
CHAPTER 6 TRANSIENTS IN A ELECTRICAL		
SYSTEMS WITH A SILICON		
RECTIFYING GENERATOR		
6.1	The instantaneous values and output modes of a silicon rectifying generator voltages	118
6.2	Mode transfer and current relations.....	122
6.3	Surges	124
6.4	Spikes	128
6.5	Suddenly short-circuit currents.....	130
CHAPTER 7 TRANSIENTS IN ASYNCHRONOUS MACHINES		
IN ELECTRICAL SYSTEMS IN MILITARY		
VEHICLES		
7.1	Mathematical model of asynchronous machines in d_c, q_c, o coordinate systems.....	141
7.2	The fundamental relations of asynchronous machines during a electrical system short-circuits	142
7.3	The maximum output	146
7.4	The maximum speed-drop	147
7.5	Calculations and tests	155
CHAPTER 8 STATIC STABILTY OF ELECTRICAL		
SYSTEMS IN MILITARY VEHICLES		
8.1	Transient EMF of synchronous machines	163
8.2	The motion equations of synchronous machine rotor	165
8.3	The electromagnetic torque and power of AC	

machines	168
8.4 Incremental method for calculating static stability ...	172
8.5 Effect of damping windings	176
8.6 Effect of automatic regulators	178
8.7 Improving static stability... ..	185
CHAPTER 9 DYNAMIC STABILITY OF ELECTRICAL	
SYSTEM IN MILITARY VEHICLES	
9.1 Analysis of innate laws of dynamic stability	188
9.2 Equivalent-area theorem	192
9.3 Solved motion equation of synchronous machine	
rotor	194
9.4 Effect of automatic regulators	204
9.5 Improving dynamic Stability	207
References	208

第一章 军用车辆电气系统的组成

1.1 军用车辆电气系统的组成

军用车辆电气系统是指车辆上的电源、耗电设备及其控制装置等各个分系统等所组成的整体。“电气系统”这一概念是由“电气设备”扩展而来的。“电气设备”是指电源装置、耗电装置、检测仪表和辅助器件等的总称。最早应用于军用车辆的电气设备是发动机的电点火、电起动装置、照明光源和信号装置等,这些耗电设备均以蓄电池作为电源。它们的控制手段十分简单,以手动操作为主,构不成一个控制分系统。为了能及时补充蓄电池所消耗的电能,在车辆上安装了直流发电机,它由发动机驱动发电;在发动机工作(例如车辆在行驶中)时,就能向蓄电池充电。直到现在,军用车辆电气系统的电源仍然绝大部分是蓄电池和发电机并联组成的低压直流电气系统,如图 1-1 所示。

直流发电机的重量、尺寸较大,电刷在工作时可靠性差,电刷

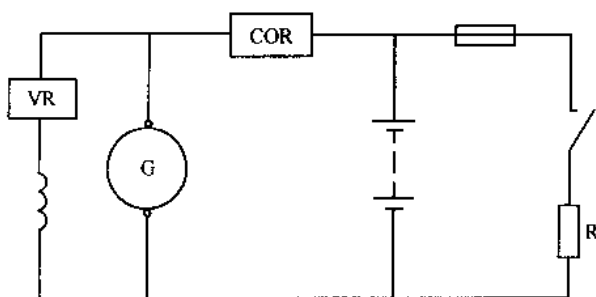


图 1-1 军用车辆直流发电机电气系统示意图

VR—电压调节器; COR—逆流断电器。

下的火花会产生电磁干扰。现代军用车辆上已广泛采用装有硅整流器的交流发电机,交流发电机发出的交流电经硅整流管整流成为直流电。这种电机实际上是以硅整流器替代了直流发电机中的机械式换向器,通常称为硅整流发电机。硅整流发电机的可靠性高,重量、尺寸也大为减小。例如某坦克直流发电机的比功率为 0.06kW/kg ,改为硅整流发电机后,比功率为 0.25kW/kg ,比功率增大了3倍。

军用车辆发电机通常是由车辆上的发动机驱动发电的。车辆发动机在工作过程中转速变化范围大,为满足耗电设备对电源电压稳定的要求,军用车辆发电机必须配有电压调节器。军用车辆上还需要有给特殊耗电设备供电的电源,如陀螺仪等的电源,它通常从主发电机构成的电源(称为一次电源)取得电能,经变流机、整流器等产生出能满足特殊要求的电流或电压,这称之为二次电源。

军用车辆电气系统的一次电源为交流电时,就比较容易得到有各种特殊要求的二次电源。此外,采用交流电系统后,车辆上的电机都可采用交流电机,从而可提高整个电气系统的可靠性及效

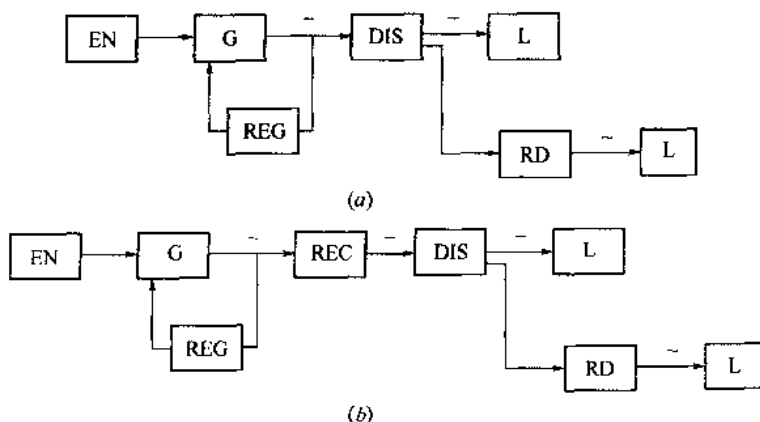


图 1-2 军用车辆电气系统结构原理图

(a)直流发电机电气系统;(b)硅整流发电机电气系统。

EN—发动机;G—发电机;REG—电压调节器;REC—整流装置;DIS—配电箱;

RD—二次电源;L—负载。

率,减小重量和尺寸等。车辆交流电气系统的频率通常选定为 400Hz,电压提高到 110V 或 270V。此时车辆上的直流电源,除由蓄电池供给外,也可通过变压器变压后整流得到。图 1-2(a)为直流发电机电气系统结构原理图,(b)为硅整流发电机电气系统结构原理图。

某些军用车辆在有直流电气系统的条件下,还专门设置了辅助的交流电气系统,它的结构原理图如图 1-3 所示。在发动机和发电机之间需要有恒速传动装置,以保证发动机转速变化时发电机电压有稳定的频率。

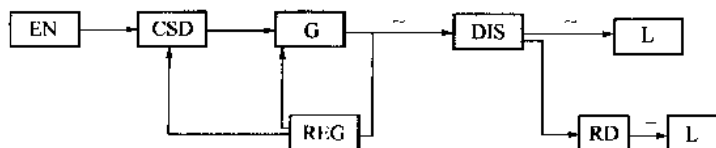


图 1-3 军用车辆交流电气系统结构原理图

CSD—恒速转动装置。

1.2 军用车辆电气系统的特点

军用车辆电气系统具有以下特点：

(1) 目前绝大多数的军用车辆电气系统是蓄电池和发电机并联的低压直流电气系统。电气系统的额定电压和稳态电压调节的范围,除取决于耗电设备的要求,还取决于对蓄电池充电的需要和蓄电池放电时的电压变化。例如耗电设备的额定电压为 24V 时,考虑到馈线中的电压降,电气系统的额定电压定为 28V。考虑蓄电池充电需要,军用车辆发电机的电压为 27~29V;蓄电池长期放电运行时,允许电压低至 22V。这样,当军用车辆电气系统的额定电压为 28V,它的稳态电压调节范围为 22~29V;而对起动电动机供电时,工作时间不超过 5s,电压允许降低到 18V。可见军用车辆电气系统的电压在很大程度上取决于蓄电池的电压变化。

(2) 军用车辆发电机是由车辆发动机带动旋转发电,因此发电机转速将在很大范围内变化。发电机转速和输出电流变化时,都会引起发电机电压的变化。为了保持电压稳定,军用车辆发电机必须有电压调节器与其配合工作。电压调节器能在发电机转速或输出电流变化时,自动改变励磁电流的大小,从而保持电压稳定在规定值。

(3) 军用车辆电气系统容量较小,电源与主要负载的单机容量比值(称作扰动比)较低,在负载冲击下最小值接近于1。整个电气系统有上千米的导线,连接了数以百计的电子、电气装置,它们被局限在狭窄的安装空间内,电力线路与信息传输线路并行往返。某些耗电设备的特殊工作制使发电机的转速和负载状况不稳定。因而军用车辆电气系统瞬态性能的研究变得十分重要,同时它的研究内容和方法也有显著的特点。

1.3 军用车辆电气系统瞬变状态的涵义

瞬变状态是指性能状态变化的过程。这个过程尽管时间短暂,但会产生出过大的电流、过高或过低的电压,从而导致电子设备的工作失常。例如瞬时的过电压即可导致半导体或计算机的误动作;当电网电压急剧下跌时,造成电子线路的失压,导致记忆装置中储存信息的丢失,继电器脱扣等等。实践中确曾发生过当大负载起动时计算机丢失数据、电台的遥控开关动作;大负载断开时引起电引信炮弹走火等等严重事故。

军用车辆电气系统瞬变状态的涵义中,除了包括一般的突然短路电流变化外,在 GJB298—87“军用车辆 28V 直流电气系统特性”中,特别指出了浪涌电压和尖峰脉冲电压是瞬变过程中必须考察的项目。

浪涌电压是指偏离受控稳态电压特性的一种电压。在发电机和蓄电池并联工作、发电机单独工作或蓄电池单独工作条件下,负载切换时都能出现浪涌电压;其中起动电动机起动发动机时的浪