

现代电力系统丛书



电力电子系统电磁瞬态过程

赵争鸣 袁立强 鲁挺 著

清华大学出版社

现代电力系统丛书



电力电子系统电磁瞬态过程

赵争鸣 袁立强 鲁挺 著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地论述了电力电子系统瞬态过程的理论分析和实际应用。全书内容分为10章。第1章从电力电子系统解析和综合两方面分别梳理和认识电力电子系统的结构和属性；第2章叙述电力电子系统电磁瞬态过程及其建模；第3~5章分别论述了功率开关器件瞬态特性、瞬态换流拓扑及其杂散参数和基于器件特性的系统安全工作区；第6~8章分别论述了电磁瞬态过程的量测、主电路电磁脉冲及其序列和高性能闭环控制及其限制；第9章阐述了瞬态电磁能量平衡控制策略基本原理与控制方法；第10章主要介绍了电磁瞬态分析在典型电力电子系统中的应用。

本书可供从事电力电子领域工作,特别是从事大容量电力电子系统研究、装置开发和工程应用的专业人士参考,也可作为高等院校相关专业教师和研究生的参考教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电力电子系统电磁瞬态过程/赵争鸣,袁立强,鲁挺著. —北京:清华大学出版社,2017
(现代电力系统丛书)
ISBN 978-7-302-46634-5

I. ①电… II. ①赵… ②袁… ③鲁… III. ①变换器—研究 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 031139 号

责任编辑:张占奎

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:27.5 插 页:2 字 数:543千字

版 次:2017年5月第1版 印 次:2017年5月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:128.00元

产品编号:029587-01

作者简介

赵争鸣 清华大学电机工程与应用电子技术系教授,博士生导师,电力系统国家重点实验室副主任。1991年于清华大学电机系获工学博士学位,留校任教至今。1994—1997年先后在美国俄亥俄州立大学和美国加州大学欧文分校从事博士后研究工作,1998—1999年先后在加拿大哥伦比亚大学和香港大学作高级访问学者和研究教授。主要研究方向包括:大功率电力电子技术、光伏并网发电及应用、电机及其控制、无线电能传输等。先后兼任 IEEE 电力电子学会(PELS)执委会委员(2014—2016年),IEEE 电力电子学会(PELS)会员发展委员会主席(2013—2015年),IEEE 电力电子学会(PELS)北京分部主席(2007年至今);同时兼任中国电工技术学会常务理事,电力电子学会副理事长,北京电力电子学会副理事长;担任多种国内外重要学术期刊主编、副主编和编委。先后负责完成多项国家攻关课题、国家“863”课题、国家自然科学基金重点和面上课题以及多项重大横向科研课题和国际合作项目。2015—2019年负责主持国家自然科学基金重大项目“大容量电力电子混杂系统多时间尺度动力学表征与运行机制”。发表400余篇学术论文,出版6部科技书籍;获得30余项国家发明专利、20余项软件著作权,获得10余项科技成果奖。2005年获得“全国优秀科技工作者”称号,2006年评为“北京市教育创新标兵”,2012年获得中国电工技术学会电工行业科技成就奖。





袁立强 副研究员,博士生导师。2004年毕业于清华大学电机系,获博士学位,同年进入清华大学电机系工作,现任电力电子与电机系统研究所副所长。主要从事大容量电力电子技术、新能源发电、电力牵引、功率半导体器件等教学和研究工作。曾负责自然科学基金项目,参与“863”项目、国家科技支撑项目、国家自然科学基金重点项目、国家自然科学基金重大项目等。出版4部著作,发表科技论文100余篇,获国家发明授权专利20余项。先后获得省部级科技奖一等奖3项,二等奖1项,三等奖1项。

鲁挺 助理研究员,2010年毕业于清华大学电机工程与应用电子技术系,获得博士学位,同年进入清华大学电机工程与应用电子技术系工作。主要从事大功率半导体器件应用、大容量电力电子变换、新能源并网发电等方面研究。曾参与国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“能源高效转换高压大容量新型功率器件研发与应用”、国家科技支撑计划课题“7MW级风电机组及关键部件设计和产业化技术”、国家自然科学基金重大项目“大容量电力电子混杂系统多时间尺度动力学表征与运行机制”、国家自然科学基金重点项目“大容量特种高性能电力电子系统理论与关键技术研究”等项目研究工作。发表论文80余篇,获中国电工技术学会科学技术一等奖2项、国际学术会议优秀论文奖3项,授权发明专利7项、软件著作权12项。2015年进入荣信汇科电气技术有限责任公司工作,主要从事柔性直流输电、大容量变频器、大容量STATCOM等大容量电力电子产品和工程研发工作。



《现代电力系统丛书》编委会(第三届)

主 编：卢 强

副 主 编：周孝信 韩祯祥 陈寿孙

编 委：(按姓氏笔画排序)

王祥珩 甘德强 卢 强 余贻鑫 张伯明

杨奇逊 陈 陈 陈寿孙 周孝信 贺仁睦

赵争鸣 倪以信 夏道止 徐 政 顾国彪

梁恩忠 程时杰 韩英铎 韩祯祥

责任编辑：张占奎

丛 书 序

当我剪烛为这篇短序时,竟几次因思绪万千未开头便搁笔。出版“现代电力系统丛书”是我的导师高景德院士于1990年开始构思、策划的。作为一位科学家和教育家,高先生十分重视“丛书”对提高我国电力系统学术水平和高层次人才培养方面的重要作用。先生认为:各领域的科技专著应是那个领域最前沿和最高水平科技成果的结晶,是培育一代代科技精英和先锋人物的沃野和圣堂。先生对我说:优秀著作是人类先进思想和成果最重要的载体,正是它们构成了人类文化、科技发展万世不竭的长河。导师的教导音犹在耳。

1997年因这位清华大学老校长烛炬耗尽致使“丛书”出版工作一度停顿。三年后,清华大学出版社重新启动了“丛书”的出版工作,于2002年组成了第二届编委会,继擎着高景德院士亲手点燃的火炬前行。

自1992年以高先生为主编的第一届编委会成立起,至2006年止,我国的电力装机提高了2.7倍,年均以将近20%的速度增长。这在世界各国电力工业发展史上是绝无仅有的。此刻我想到,高先生的在天之灵会问我们这些晚辈:我国电力高科技含量的增长是否也与我国的电力总量的增长相匹配?这一问题是要我国电力科技工作者用毕生不懈的努力来回答的。

时光如梭,2002年的第二届编委会又到了换届之时,感谢数位资深编委出色完成了他们的职责。时至2007年5月,第三届编委会在清华大学出版社主持下成立。编委共19名,包括四位中国科学院院士,四位中国工程院院士,其他皆为处于我国电力系统顶尖之列的精英学者,其中不乏新充实的优秀中青年学者,从而保证了“丛书”的火炬不仅能得以传承,而且会越燃越旺。本届编委会进一步明确“丛书”涵盖的领域:电力系统建模、分析、控制,以安全稳定经济运行为主;新能源并网发电,如风力发电、太阳能发电等;分布式能源电力系统等内容。

至今,该丛书系列已出版专著约十本,预计今明两年将至少再出版六部。应该说已出版的该系列专著已经引领几代青年学者、科技工作者走上了科技大道。近年来,我们在“电力系统灾变防治和经济运行重大科学问题”方面得到国家首期“973”项目资助和支持,并取得了一些突破性进展;电力领域第二期“973”项目“提高超大规模输电系统的运行可靠性研究”从2004年推着前浪前进,成果丰硕。所取得的这些前沿成果将在“丛书”中得到充分的体现。有些成果在世界上未有先例。

因此,我们相信中国电力科学会引领世界电力科技的发展;相信“丛书”系列还将继续引领和帮助一代代电力界科技工作者开辟康庄之途。

按照高景德院士的教育思想,“丛书”的作用主要不是去“灌满一桶桶的水”,而是去“点燃一把把的火”。

导师英名长存。感谢清华大学出版社使“丛书”之炬得以传承。

相信中国电力科技能为世界电力科技引路之光。

卢 强

2007 年 7 月于清华园

前 言

继人们对电机过渡过程和电力系统暂态过程分析之后展开的对电力电子系统瞬态过程的分析,正改变着人们对电气工程学科的看法,使之形成一种新的电气工程学科自然观,促进了一批电气工程学科新思想、新理念、新方法和新技术的孕育和发展,并有可能从根本上影响现代电气工程学科的动力学分析体系。

与电机和电力系统学科不同,电力电子学科从一开始就定义为交叉学科,包括功率半导体器件、功率变换电路以及对器件与电路的控制,同时需要考虑电磁场、热力场、机械力场等多种物理场的融合。特别是全控型半导体开关器件的应用和脉冲调制技术的引进,它们将连续变化的电磁能量转化为准离散型的、可控的电磁能量脉冲序列组合,使得原来在电机学和电力系统暂态分析中采用的连续的大时间尺度电磁暂态过渡过程分析方法难以适用。它不仅带来对脉冲型电磁瞬态过程分析方法的困惑,更是带来人们对电磁能量变换认识上的变更。从这个意义说,电力电子学科的发展是对整个电气工程学科内涵的深化和外延的扩展。

电力电子系统由半导体开关器件、电子电路及控制等要素构成,尽管各要素特性不尽相同,但是从整个变换系统的角度来看,由于它们在系统中的有机结合,从而形成了电力电子系统的有机统一。一般来说,电力电子系统具有硬件与软件的统一性、能量与信息的互动性、线性与非线性的转换性、离散与连续的混杂性以及多时间尺度的协调性等,正是这些独有的综合特性体现出了电力电子学科自身的学科属性。与之相对应的电力电子技术则需要处理好在这些属性条件下的电磁能量可控变换,涉及电磁能量变换瞬态过程及其平衡,需要处理好器件与装置、控制与主电路、分布参数与集总参数等关系的问题。

电力电子变换理论和技术目前还处在一个基于功率半导体技术、电子电路技术以及控制技术的简单合成应用技术层面,基本上还处于实验科学的范畴,其自身理论体系还在持续发展过程之中。从系统集成、能量变换以及电磁瞬变的角度进行电力电子技术(特别是针对大容量电力电子装置与系统)的应用基础理论研究应该是这种发展的主要方向。过去二十多年来,我们研究团队先后在电机传动控制、光伏并网发电、大容量多电平变换器研制,以及近年来的面向能源互联网的电能路由器、无线电能传输等方面进行了较深入的理论研究和工程应用,深刻感受到电磁瞬态过程是电力电子系统中的关键核心问题之一。正是基于这样一个认识,结合

我们研究团队多年来在电力电子系统领域的理论探索和技术实践,我们撰写了这本书,尝试初探电力电子系统电磁瞬态过程的规律及其分析方法,进而起到抛砖引玉的作用。

本书共分为 10 章。第 1 章为绪论,从大容量电力电子系统入手,分别从电力电子系统的解析和综合两方面来梳理和认识电力电子系统的结构和属性,围绕电力电子系统的核心问题——电磁能量变换瞬态换流平衡,阐述这种变换所具有的多时间尺度、准离散性和强非线性等特点。在分别叙述典型大容量电力电子应用系统的电磁瞬变特点之后,列举了电力电子系统研究和应用中存在的相应困惑和问题。第 2 章作为立论基础,叙述了电力电子系统中不同换流回路、不同变化时间尺度的电磁瞬态过程;简述了针对这些电磁瞬态过程的数学建模以及建模方法;具体分析了各时间尺度的差异及其带来的影响;分析了各种电磁脉冲及其序列的数学描述和差异。第 3 章从功率半导体器件的内部物理机制和外部影响因素两个方面,分析了功率半导体器件在电力电子系统应用中表现出来的电磁瞬态特性。第 4 章论述了瞬态换流拓扑及其杂散参数,包括不同类型变换器中的杂散参数影响差异、杂散参数的提取方法以及如何设计降低杂散参数影响等问题。第 5 章在分析了器件特性和变换器各元素之间相互约束关系的基础上,论述了电力电子系统安全工作区的概念,从系统的角度、能量变换的角度以及全时域电磁瞬态过程的角度来描述电力电子装置的尽限应用和可靠性之间的矛盾。第 6 章描述了采样系统的结构、组成和功能,论述了采样系统中功率量和信号量之间的差异,分析了采样延迟和误差对控制性能的影响,并给出了采样系统的优化设计方法。第 7 章叙述了信号脉冲、驱动脉冲和功率脉冲之间的差异和互动关系,通过这些脉冲的比较,讨论了电力电子系统中的信息与能量之间的互动关系。第 8 章从控制的角度来分析电力电子系统中的高性能闭环控制及其限制,讨论了闭环控制的结构、传统控制的特性及其限制,特别分析了无效脉冲和异常脉冲产生的原因以及带来的影响。第 9 章基于电力电子变换器中瞬态能量分布和流动规律,阐述瞬态电磁能量平衡控制策略的概念和基本原理;演示基于瞬态电磁能量平衡的控制方法;分析基于瞬态电磁能量平衡的控制方法的稳定性和鲁棒性。第 10 章重点介绍电磁瞬态分析在高压 IGBT 串联动态均压变换器和基于 SiC 高频开关器件的功率放大器等变换系统中的应用。

本书总结了我们研究室十多年来在电力电子变换系统理论探讨和技术实践的研究成果。曾经在我们研究室学习和工作过的不少学者和同学为本书内容作出了重要贡献,他们是白华、张海涛、易荣、张颖超、张永昌、钟玉林、胡斯登、尹璐、邹高域、贺凡波、陈凯楠、姬世奇、葛俊杰等,在此对他们表示衷心感谢。同时在撰写本书的过程中,还得到本研究室其他老师和同学们的大力帮助和校核,如孙晓瑛、翁幸、蒋烨、凌亚涛、鲁思兆等,在此一并表示感谢。另外,在撰写该书时,我们参阅了

大量的论著文献,主要的已经列入了参考文献中,在此对这些论著文献的作者表示衷心的感谢。

本书部分内容是在国家自然科学基金重大项目“大容量电力电子混杂系统多时间尺度动力学表征与运行机制”(51490680、51490683)资助下完成的,如电力电子综合系统分析、电磁瞬态过程建模、信号脉冲与功率脉冲的比较、多时间尺度的比较和分析、基于能量平衡的控制方法等,在此深表感谢。

本书可供从事电力电子技术,特别是从事大容量电力电子系统研究、装置开发和工程应用的专业人士参考,也可供高等院校相关专业的教师和研究生作为参考书籍。

由于作者水平有限,且电力电子系统电磁瞬态过程研究仍处在动态发展之中,我们在这方面仅做了一些初步的工作,书中难免存在许多的不足,甚至是错误之处,恳请广大读者批评指正。

赵争鸣

2017年3月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子系统解析	1
1.1.1 功率半导体器件	2
1.1.2 功率变换电路	5
1.1.3 脉冲控制	6
1.2 电力电子系统综合	9
1.2.1 硬件与软件的统一性	9
1.2.2 能量与信息的互动性	10
1.2.3 线性与非线性的转换性	12
1.2.4 离散与连续的混杂性	13
1.2.5 多时间尺度的协调性	14
1.3 电力电子系统应用	16
1.3.1 柔性交直流输电	16
1.3.2 新能源并网发电中电力电子装置	20
1.3.3 电力牵引	23
1.4 电力电子系统存在的问题	24
1.4.1 对功率开关器件短时间尺度的电磁瞬态过程认识不清	25
1.4.2 瞬态电能变换拓扑结构理想化	26
1.4.3 信号脉冲与能量脉冲差异	28
1.4.4 电磁瞬态过程不明确	28
第 2 章 电磁瞬态过程及其建模	30
2.1 电力电子系统中的电磁瞬态过程	30
2.1.1 主功率回路电磁瞬态过程	31
2.1.2 驱动回路电磁瞬态过程	36
2.1.3 控制回路电磁瞬态过程	39
2.2 电磁瞬态过程数学模型	43
2.2.1 电磁瞬态过程建模方法	43
2.2.2 主电路电磁瞬态模型	48

2.2.3	元器件电磁瞬态模型	49
2.2.4	驱动电路和控制电路的电磁瞬态模型	54
2.3	时间尺度的差异及其影响	55
2.3.1	典型瞬态回路时间尺度及比较	56
2.3.2	不同时间常数回路电磁变换关系	62
2.3.3	时间常数差异带来的影响	66
2.3.4	电磁变换平衡下的回路参数匹配	68
2.4	电磁脉冲及脉冲序列	71
2.4.1	电磁脉冲及脉冲序列数学描述	71
2.4.2	脉冲及其序列传输和变异	74
2.4.3	时间脉冲序列和脉冲逻辑组合	76
第3章	功率开关器件瞬态特性	83
3.1	功率开关器件的物理机制和器件特性关系	83
3.1.1	物理机制与典型器件特性的关系	84
3.1.2	不同物理机制器件特性差异	91
3.2	变换器中功率开关器件瞬态特性测试	94
3.2.1	单个器件测试的拓扑与控制	94
3.2.2	独立测试平台单个器件瞬态特性	98
3.2.3	变换器中的单个器件瞬态特性	100
3.3	变换器中功率开关器件瞬态特性分析	106
3.3.1	运行中开关特性分析	106
3.3.2	相互影响现象分析	108
3.4	功率开关器件的并联运行	112
3.4.1	关键参数对并联器件瞬态特性影响	113
3.4.2	IGBT 并联特性分析	116
3.4.3	IGBT 并联实验研究	119
3.5	功率开关器件的串联运行	124
3.5.1	器件串联均压的基本思路	124
3.5.2	IGCT 串联	127
第4章	瞬态换流拓扑及其杂散参数	132
4.1	瞬态换流拓扑定义	132
4.1.1	变换器拓扑定义	132
4.1.2	变换器瞬态换流拓扑	136
4.2	复杂主电路杂散参数提取方法	140
4.2.1	提取方法对比	140

4.2.2	PEEC 准确性分析	142
4.2.3	复杂结构的参数提取简化处理	145
4.3	基于模块封装 IGBT 的变换器主电路杂散参数分析	147
4.3.1	杂散参数对变换器中 IGBT 特性影响	147
4.3.2	IGBT 变换器直流母排建模	151
4.4	基于平板压装 IGCT 的变换器主电路杂散参数分析	155
4.4.1	IGCT 三电平变换器主电路母排建模	155
4.4.2	瞬态换流拓扑	157
4.5	杂散参数影响量化分析及其优化	162
4.5.1	模块封装 IGBT 变换器中的杂散参数影响评估	162
4.5.2	模块封装 IGBT 变换器母排优化	164
4.5.3	平板压装 IGCT 变换器中的杂散参数影响评估	168
4.5.4	平板压装 IGCT 三电平变换器母排优化	172
第 5 章	基于器件特性的系统安全工作区	181
5.1	系统安全工作区的定义	181
5.1.1	系统安全工作区的基本思想	181
5.1.2	器件安全工作区与系统安全工作区的关系	183
5.2	系统安全工作区的数学模型	187
5.2.1	关键器件、拓扑和控制参数定义	187
5.2.2	数学模型推导	189
5.2.3	基于系统安全工作区设计样例	196
5.3	系统安全工作区的影响因素分析	198
5.3.1	直流母排杂散参数影响	199
5.3.2	控制参数影响	200
5.3.3	外部参数影响	202
5.3.4	温度参数影响	203
5.3.5	器件并联特性影响	204
5.4	基于系统安全工作区的评估与优化设计	206
5.4.1	评估与优化设计流程	206
5.4.2	系列化电力电子变换器设计中的应用	209
5.4.3	基于系统安全工作区变换器评估与保护	217
第 6 章	电磁瞬态过程的量测/观测分析	225
6.1	采样系统的结构、组成和功能	226
6.2	采样系统中功率量和信号量的差异	229
6.3	采样延迟和误差对控制性能的影响	231

6.3.1	频域分析	233
6.3.2	时域分析	245
6.4	抑制采样延迟和误差设计	253
6.4.1	硬件设计	253
6.4.2	软件设计	254
6.4.3	采样系统优化设计的效果	257
第7章	主电路电磁脉冲及其序列	260
7.1	电力电子系统中各类脉冲及其序列的数学描述	260
7.1.1	各类脉冲的区别及演化过程	260
7.1.2	能量脉冲数学描述	261
7.1.3	信号脉冲数学描述	263
7.1.4	能量脉冲序列数学描述	263
7.1.5	信号脉冲序列数学描述	264
7.2	脉冲形态变化的影响及解决方法	264
7.2.1	死区影响及最小脉宽设计方法	264
7.2.2	最小脉宽影响及解决方法	277
7.2.3	离散误差及其补偿方法	291
7.3	脉冲时序变化的影响及解决方法	296
7.3.1	脉冲延迟对控制性能的影响	296
7.3.2	脉冲延迟的补偿方法	302
第8章	高性能闭环控制及其限制	306
8.1	闭环控制系统结构与限制	306
8.1.1	闭环控制系统的结构	306
8.1.2	传统控制方法的限制	307
8.2	控制策略造成的无效脉冲的影响及解决方法	309
8.2.1	控制耦合产生的无效脉冲	309
8.2.2	控制器饱和产生的无效脉冲	316
8.2.3	变换器特殊运行状态中产生的无效脉冲	318
8.3	短时间尺度主动控制方法	324
8.3.1	主电路电磁脉冲的控制方法分类	324
8.3.2	主电路电磁脉冲的主动控制方法	326
8.3.3	主动控制方法的效果	330
8.3.4	主动控制方法与主电路集成技术	333
8.3.5	分布式主动控制方法的效果	337

第 9 章 瞬态过程中的电磁能量平衡	342
9.1 电磁能量平衡及建模	343
9.1.1 瞬态电磁能量平衡关系	343
9.1.2 基于瞬态能量平衡的控制建模	344
9.2 基于瞬态能量平衡的控制	345
9.2.1 传统电压控制策略性能分析	345
9.2.2 基于瞬态能量平衡的控制策略	348
9.3 背靠背变换器能量平衡控制	350
9.3.1 双 PWM 变频器系统的能量平衡模型	351
9.3.2 双 PWM 变频器母线电容能量波动过程分析	354
9.3.3 基于分步补偿的能量平衡控制策略	356
9.3.4 基于能量平衡控制策略的母线电压波动 最小化设计方法	360
9.4 电磁能量平衡控制分析	366
9.4.1 控制系统小信号模型	366
9.4.2 系统稳定性分析	369
9.4.3 系统动态性能分析	371
9.4.4 系统稳态误差分析	373
9.4.5 仿真与实验结果分析	374
第 10 章 变换系统中电磁瞬态分析的应用	381
10.1 高压 IGBT 串联变换器电磁瞬态分析	381
10.1.1 适用于高压 IGBT 串联的瞬态机理模型	381
10.1.2 串联 IGBT 瞬态行为分析	386
10.1.3 拖尾阶段的瞬态特性	392
10.2 基于 SiC 器件的高频变换器	398
10.2.1 开关瞬态过程分析与建模	398
10.2.2 高频变换器电磁瞬态过程分析	408
10.3 结语	418
参考文献	420

第1章 绪 论

电力电子与微电子的本质区别在于所涉及的电磁功率等级不同。本书所涉及的电力电子系统意指功率等级在几十千瓦、几百千瓦乃至几十兆瓦以上,电压等级在百伏、千伏乃至几十万伏以上,电流容量在几十安、几百安乃至上万安以上,面向不同应用领域的电力电子变换装置和系统。

电力电子装置和系统相关产业是一个涉及三个层面的产业链:电力电子元器件(上游)、元器件构成的电力电子装置(中游)及以装置为基础的应用系统(下游)。该产业覆盖了几乎所有关系国民经济发展和国防安全的关键技术领域,如材料、制造业、信息和通信、航空和运输、能源和环境等。

电力电子系统即为多学科交叉系统,电气部分主要包括功率半导体器件、功率变换电路以及对器件与电路的控制,表现出弱电控制强电、软件控制硬件、部件融于系统、信息能量互动的系统特点。早在1973年,国际电力电子先驱、美国西屋公司的 William E. Newell 博士就指出电力电子的多学科性质:“电力电子技术是电气工程的三个主要学科——电子学、电力和控制的交叉”。因此,电力电子系统的本质就是器件、电路及其控制的相互交叉作用以实现电磁能量的有效变换。

为得到所期望的变换特性,电力电子系统中一般采用类似脉宽调制的方法以得到所需的电力特性,这种以脉冲调制方法输出的电磁能量表现为能量脉冲及其序列形式。电磁能量脉冲序列是电力电子系统中的基本形式,也是电力电子系统电磁瞬态过程的特殊表现形式。该瞬态过程的时间常数通常在微秒或纳秒之间,这种短时间尺度的电磁瞬态过程对于电力电子系统的可靠有效运行起着决定性作用:一方面它是电量波形变换的基础;另一方面,若控制不好,它将直接导致器件失效和装置损坏。因此,短时间尺度的电磁瞬态过程是电力电子系统中的核心问题之一。

1.1 电力电子系统解析

电力电子系统由多方面要素构成。要分析电力电子系统的电磁瞬态过程,首先需要分别对其构成要素(如功率半导体器件、主电路及控制等)进行解析,解析的目的是了解各要素的结构、特性以及在系统中的作用和限制。