

电子 电力 技术

祁富燕 张妍 主编

吉林大学出版社

电子电力技术

祁富燕 张 妍 主编

吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子电力技术 / 祁富燕, 张妍主编. — 长春: 吉林大学出版社, 2017. 6

ISBN 978 - 7 - 5692 - 0522 - 0

I. ①电… II. ①祁… ②张… III. ①电力电子学 - 教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 188370 号

书 名 电子电力技术
DIANZI DIANLI JISHU

作 者 祁富燕 张 妍 主编
策划编辑 朱 进
责任编辑 朱 进
责任校对 高桂芬 黄 超
装帧设计 贺 迪
出版发行 吉林大学出版社
社 址 长春市人民大街 4059 号
邮政编码 130021
发行电话 0431 - 89580028/29/21
网 址 <http://www.jlup.com.cn>
电子邮箱 jdcbs@jlu.edu.cn
印 刷 人民今典印务有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 17.5
字 数 300 千字
版 次 2017 年 6 月第 1 版
印 次 2017 年 6 月第 1 次
书 号 ISBN 978 - 7 - 5692 - 0522 - 0
定 价 53.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

电子电力技术是应用于电力领域的电子技术,是利用电子电力器件对电能进行变换和控制的新兴学科,是目前发展较为迅速的一门学科,是高新技术产业发展的主要基础技术之一,是传统产业改造的重要手段。电子电力技术的发展是以电子电力器件为核心,伴随变换技术和控制技术的发展而发展的。

电子电力学的诞生和发展推动了电力系统的进步和技术革新。面对能源危机,在倡导可持续发展和绿色能源的今天,光伏、风力发电等新能源发电技术,新型高压直流输电与柔性交流输电技术、有源滤波、无功补偿等谐波治理,以及分布式发电与储能技术等均建立在电子电力相关技术的基础之上。可以预见,电子电力技术正以令人难以置信的迅猛速度逐步深入到国民经济的各个领域,发挥着重要的作用。

本书分为六章,分别从电力电子基础、电力电子技术的变换技术、电力系统电力电子、现代电力电子技术以及电力电子技术应用等几方面进行分析研究。其中第1、2、3章由祁富燕编写,第4、5、6章由张妍编写,全书由祁富燕统稿。限于编者的学识水平,加之时间仓促,本书中难免存在不足和疏漏之处,恳请读者谅解并予以指正,将不胜感激。

目 录

第一章 电力电子技术导论	(1)
第一节 电力技术发展史	(1)
一、直流电力系统的形成和发展	(1)
二、交流电力系统的形成和发展	(3)
第二节 电力电子技术发展史	(5)
第三节 电力电子电路的仿真	(8)
第四节 电力电子技术产业	(11)
一、电力电子技术产业化对我国国民经济发展的影响	(11)
二、我国电力电子技术产业化发展模式选择	(21)
三、我国电力电子技术产业化发展战略	(28)
练习题	(36)
第二章 电力电子技术基础	(37)
第一节 电力电子器件	(37)
一、电力二极管	(37)
二、晶闸管类器件	(39)
三、全控型电力电子器件	(46)

第二节 相控整流电路	(50)
一、单相可控整流电路	(50)
二、三相可控硅整流电路	(58)
第三节 组合变流电路	(64)
一、间接交流变流电路	(64)
二、间接直流变流电路	(68)
第四节 电力电子装置的谐波和功率因数	(71)
一、电力电子装置的谐波	(71)
二、功率因数	(79)
练习题	(83)
第三章 电力电子技术的变换技术	(85)
第一节 直流 - 直流变换器	(85)
一、概述	(85)
二、基本 DC - DC 变换器	(88)
第二节 直流 - 交流变换器	(96)
一、电压型方波逆变器	(96)
二、电压型正弦波逆变器	(104)
第三节 交流 - 直流变换器	(109)
一、二极管整流器	(109)
二、单相晶闸管整流器	(116)
第四节 交流 - 交流变换器	(124)
一、交流电子开关及其应用	(124)
二、交 - 交变频器	(127)
练习题	(132)
第四章 电力系统电力电子	(134)

第一节 电力系统电力电子装置及其工作原理	(134)
一、灵活交流输电系统	(134)
二、高压直流输电系统	(142)
第二节 相控晶闸管阀应力特性	(152)
一、相控晶闸管阀开通应力	(152)
二、相控晶闸管阀通态应力	(155)
第三节 高压直流换流阀应力特性	(160)
一、高压直流换流阀开通应力	(160)
二、高压直流换流阀通态应力	(171)
第四节 电压源换流器阀应力特性	(176)
一、柔性直流换流阀暂态应力	(176)
二、链式 STATCOM 阀应力	(189)
练习题	(193)
第五章 现代电力电子技术	(194)
第一节 PWM 原理与控制技术	(194)
一、控制的基本原理	(194)
二、PWM 逆变电路及其控制方法	(196)
三、PWM 逆变电路的应用	(202)
第二节 软开关变换技术	(210)
一、开关损耗和软开关的基本类型	(210)
二、准谐振软开关电路	(213)
第三节 矢量控制和直接转矩控制	(217)
一、矢量控制	(217)
二、直接转矩控制	(221)
第四节 电力电子器件的驱动和保护	(227)

一、电力电子器件驱动技术·····	(227)
二、电力电子器件的保护·····	(231)
练习题·····	(234)
第六章 电力电子技术应用·····	(236)
第一节 电力电子技术电力系统中的应用·····	(236)
一、控制同步电动机励磁系统·····	(236)
二、变速恒频发电技术·····	(241)
三、超导磁体储能系统 SMEC·····	(245)
第二节 电力电子技术在交通运输行业中的应用·····	(247)
一、电力电子技术在火车中的应用·····	(247)
二、电力电子技术在磁悬浮列车中的应用·····	(253)
第三节 电力电子技术在工程中的应用·····	(256)
一、典型的直流调速系统·····	(256)
二、变频器·····	(260)
三、高压直流输电·····	(263)
第四节 电力电子技术在智能电网中的应用·····	(265)
一、电力电子技术在智能电网中的作用·····	(265)
二、电力电子技术在智能电网中的应用·····	(267)
练习题·····	(269)
参考文献·····	(270)

第一章 电力电子技术导论

第一节 电力技术发展史

电动机制造技术的进步和电能应用范围的扩展以及工业生产对电力需求的迅速增长,大大促进了发电厂和发电站的建设。电能刚刚被人们使用的时候,它的主要作用是为电灯照明提供能源。发电机或发电厂产生电能后,再把它输送给用户,输送的距离越远,经济价值就越大。在远距离输电方面,人们首先尝试了直流电输电方式,即直流电力系统。

一、直流电力系统的形成和发展

直流发电机比交流发电机的出现整整早了将近 50 年。因而早期电能的应用,大多为直流电系统。第一条直流输电线路建于 1873 年,长度仅有 2km。世界上第一条远距离直流输电实验线路是由法国人建立的。1882 年,法国物理学家和电气工程师德普勒由德国葛依吉工厂资助在慕尼黑国际博览会上展出了一条实验用高压直流输电线路,把米斯巴赫一台容量为 2.2kW 的水轮发电机发

出的电能输送到相距 57km 的慕尼黑，驱动博览会上的一台水泵，并形成一个人工喷泉。这一成功演示，展示出了电力的巨大潜力，证明了远距离输电的可能性。在这次实验中，线路始端电压为 1343V，末端降至 850V，输送功率不到 200W，线路损耗达 78%，传输效率很低。

早期的直流输电系统大多用于照明。众所周知，美国发明家托马斯·阿尔瓦·爱迪生发明了用于照明的灯泡，其灯丝经历了从脆弱的碳丝、昂贵的铂丝到耐高温和延展性好的钨丝的复杂过程。虽然钨丝具备了作为灯泡灯丝一系列优良的特性，但由于早期的加工工艺比较落后，很难拉制出细如发丝的钨丝，因而早期用于照明的灯泡钨丝的电阻较小，只能承受较低的耐压。因此，早期用于照明的供电系统，多为 110V 的低压直流供电系统。

然而，低压直流供电系统不可能实现大功率电能的长距离传输。由于早期的技术受限，一方面是直流电无法像交流那样依靠变压器来实现升、降压；另一方面是由于当时的直流发电机依靠电刷进行换向，容易在高压下产生电火花，因此无法制造出超高电压等级的直流发电机组。基于上述原因，直流输电线路造成的电压损失就无法得到弥补。早期的直流输电系统，其最大传送距离只有 2.41 千米，为了实现更长距离的电能量传输，每隔一段传输距离必须就地安装一台与负载匹配的直流发电机组，以弥补输电线路造成的损失。因此，直流输电系统的造价十分高昂。

截止到 1890 年前后，美国已经建有 100 多座爱迪生发电站，大截面积输电导体的大量使用推动了世界铜价的上涨。1898 年，纽约又建立了容量为 30000kW 的火力发电站，用 87 台锅炉推动 12 台大型蒸汽机为发电机提供动力。当时直流发电厂的供电范围有限，仅能对一栋房子或一条街道供电，此后建立的中心电厂也仅能供几平方千米内的用户用电。

若再扩大供电范围,直流电场已不能胜任。尽管后来经过多年的发展,通过技术的改进解决了大容量高压直流发电机的问题,使直流发电机发展至能输出电压高达 57.6kV,功率为 4650kW 的电,从而使输送距离延长至 180km。但直流发电和输电系统的发展还是很快达到了技术上的极限,难以再取得新的进展。由焦耳定律可知,若输送相同容量的电能,电压越高,则热损耗就越小。要增加输电距离,增大输电容量,又要减少输电损失,最为有效的办法就是提高输电电压。虽然,当时的直流输电能靠改进发电机提高电压,但当电能输送给用户时,又面临将电压降至负载所能承受电压水平的问题。因此,若要使直流电实现大幅度地升压或降压在当时是难以想象的。同时,用户的电压一般要求在 250V 以下,直接使用高压既不安全也不经济。

交流发电机和变压器的发明解决了电压升降的难题,输电线路上的电能损失可以通过变压器升压来加以补偿,电能输送距离的限制得到了较好的解决;同时,用户端的电压匹配也可通过合理设计变压器的电压比加以解决。因而,交流输电具有直流输电无法比拟的优越性,交流电力系统开始得到重视和发展。

二、交流电力系统的形成和发展

交流输电技术最早获得成功的是俄国的亚布洛契科夫,他在 1876—1878 年成功试验了单相交流输电技术。1880 年前后,英国的费朗蒂改进了交流发电机,并主张采用交流高压输电方式。1882 年,英国的高登制造了大型二相交流发电机。同年,法国人高兰德和英国人约翰·吉布斯获得了“照明和动力用电分配办法”的专利,并成功研制了第一台具有实用价值的变压器。可以说,它是交流输电系统中的主要设备或心脏部分。变压器的基本结构是铁芯和绕

组,以及油箱和绝缘套管等部件,它所依据的工作原理是法拉第在1831年发现的电磁感应现象:只要在同一铁芯上绕制初级线圈和次级线圈,并在初级线圈中通入交变电流,则电流的不断变化使得产生的磁场也随之不断变化,从而在次级线圈中感应出电动势。变压器依靠这一工作原理,可对发电机的输出电压进行升压,并在用户端实现降压,从而满足了高压交流输电的基本条件。19世纪80至90年代,经过许多电工学家对变压器的不断改进,远距离高压交流输电取得了长足的进步。1885年,英国工程师菲尔安基设计的第一座交流单相发电站建成发电,这座发电站建在距伦敦12km的捷波特弗尔德,发电机功率为1000kW,电压高达2500V,经变压升高到10kV后向伦敦输送。经过几次变压后,用户的供电电压为100V。1888年,由费朗蒂设计,建设在泰晤士河畔的伦敦大型交流发电站开始输电,其输出电压高达10kV,经两级变压后输送到用户。随着交流电逐步替代直流电,爱迪生的公司逐渐陷入困境,最终由摩根将其公司通过合并重组,变成了现在的世界知名电气公司——通用电气。

交流远距离输电问题的根本解决是三相交流理论的形成与技术发明的结果。1887—1891年德国电机制造公司成功取得了三相交流技术。其主要发明者曾是在德国、瑞士工作的俄国电工学家多利沃·多勃罗沃尔斯基。他通过从电动机绕组上每隔 120° 的三个地方引出抽头,在1889年制成了最早的一台功率为100W的三相交流异步发电机。同年,多勃罗沃尔斯基又开发出了三相四线制交流接线方式,并在1891年的法兰克福输电实验中获得了圆满成功。正是他的发明,人们在电能应用中广泛采用了三相制。1891年,多利沃·多勃罗沃尔斯基在德国法兰克福的电气技术博览会上,成功地进行了远距离三相交流输电实验。他将180km外三相交流发电机发出的电能用8500V的高压输送,输电效率达到75%。在当时的条件下,如

此高的传输效率是直流输电所不能办到的。从此，高压交流输电的有效性和优越性得到了公认。1892年，法国建成了第一座三相交流发电站，把交流发电站的发展向前推进了一步。随后，美国于1893年也建成了第一座三相交流发电站。由于交流输电的发展和成功，美国当时正在准备建设的尼亚加拉水电站最终决定采用三相交流输电系统。威斯汀豪斯为其公司赢得了这座水电站的承建合同，该座水电站从1891年开始建设，1895年建成，并于1898年开始投入运行。电力的应用和输电技术的发展，促使一大批新的工业部门相继产生。首先是与电力生产有关的行业，如电动机、变压器、绝缘材料、线路器材等电力设备的制造、安装、维修和运行等生产部门；其次是以电作为动力和能源的行业，如照明、电镀、电解、电车、电梯等工业交通部门；另外，还有各种与生产、生活相关的新的电器生产部门也相继出现。这种发展的结果，又反过来促进了发电和高压输电技术的提高。到1903年输电电压达到60kV，第一次世界大战前夕，输电电压达到150kV。

19世纪90年代，三相交流输电系统研制成功，并很快取代了直流输电，是电力系统大发展的里程碑。三相交流电得以推广和延续使用至今是电力输送及使用过程中技术合理性与节省设备投资的综合平衡结果。

第二节 电力电子技术发展史

自从1831年英国物理学家法拉第发现了电磁感应现象，电能的开发和应用就与人类的活动息息相关。现在社会已经不仅仅满足于有电，现代科学技术对电能的要求越来越高，各种不同装置和设备

要求有不同的电源,需要对电能进行变换和控制,例如交流电和直流电的互相变换,对电压、电流和交流电频率进行控制等,以提高电能的品质和用电的效率,对这些电能的变换和控制也提出了很高的节能和环保要求。

1946 年美国贝尔实验室研究出了第一个晶体管,从此人类进入了电子时代。在电子技术中首先是微电子技术,它将大规模的半导体电路集成在一块微小的芯片上,微处理芯片和电脑是微电子技术杰出的伟大成果,它强大的信息处理和传播能力对世界社会的影响已经在各个方面显现出来,并且导致了现代信息科学的诞生。电子技术的另一个发展是电力电子,它的特点是能以微信号控制大功率。在信息化社会中信息不仅是传媒,信息更需要能转变为人们能使用的物质,为人类谋福利。在信息转变为物质的过程中,电力电子技术以微小的信号控制强大的电流,使机器转动起来。以工业生产为例,工厂从网络获取市场信息,发出生产指令开动机器,按需要的规格、数量生产出产品供应市场,在这过程中计算机产生的微信号通过电力电子装置使庞大的机器按人们的意志运转起来,微信号控制了大功率的工业生产,电力电子技术就是其中不可缺少的技术。正因为微电子技术和电力电子技术的成就,才使大规模、现代化、自动化的工业生产能够实现,可以说微电子和电力电子是现代电子学发展的两大前沿,前者是芯片越做越小,功能越来越强,消耗的功率越来越小;后者是被控制的电压越来越高,电流越来越大,控制的功率越做越大。

电力电子技术出现于 20 世纪 50 年代,1957 年美国通用电气公司在晶体管的基础上研制出了第一个晶闸管,当时称为可控硅。晶闸管是一种利用半导体 PN 结原理开发的固体可控开关,它可以用小电流控制开关的导通,从而控制高电压大电流的电路。由于它不仅应用于整流,并且可以应用于逆变和交直流的调压等方面,具

有早年电子闸流管的特点,后来国际电工委员会将它正式命名为 Thyristor 晶体闸流管,简称晶闸管。由于晶闸管较汞弧整流器体积小、无污染、功耗低,它的出现很快淘汰了当时的汞弧整流器,成为将交流电变换为直流电的主要器件,并且在 20 世纪 60 年代到 80 年代,晶闸管一直流电动机调速系统取代了传统的直流发电机-电动机系统,取得了明显的节能降耗效果,减少了噪音等环境污染。由于第一代电力电子器件-晶闸管的出现,使小信号可以控制大功率,促进了控制理论和计算机技术在工业上的应用,使生产的效率、产品的质量不断提高。

由于普通晶闸管只具有控制导通的能力,它不能自主关断,它的关断需要依靠外部电路创造一定的条件,应用在斩波控制时,需要有辅助关断电路,这使电路的结构变得很复杂,也降低了装置的可靠性。因此在晶闸管出现后又继续研究发展了能自主控制导通和关断的电力电子器件,如电力晶体管、可关断晶闸管、电力场效应管、IGBT 等一系列可以控制导通和关断的器件,称为全控型器件,而普通晶闸管则称为半控型器件,形成了电力电子器件系列。现在新型电力电子器件正在不断地研究发展中,制造工艺在改进,一些性能不高的器件在淘汰,如电力晶体管已经基本退出市场,场控晶闸管停止了继续研发,高耐压、大电流、高频、低损耗、易驱动的电力电子器件是发展的方向,并且电力电子器件的模块化、集成化和智能化也成为器件制造的趋势。模块化是将由多个电力电子器件组成的电路封装到一个模块中,集成化将功率模块和驱动、检测、保护等功能集而为一,使器件的使用更方便、更安全。

第三节 电力电子电路的仿真

由于电力电子器件具有非线性特性,给电力电子电路讨论和分析带来了一定的困难,使电路计算的复杂程度增加。对于电力电子电路的分析,一般采用波形分析和分段线性化的处理方法。现代计算机仿真技术为电力电子电路和系统分析提供了崭新的方法,使复杂的电力电子电路分析和设计变得更加容易和简单。

所谓仿真,指的是在计算机平台上虚拟实际的物理系统,用数学模型代替实际的物理器件和电路,从而实现对实际电路工作过程的研究和讨论。随着数值算法的不断完善,已经出现了大量的通用数字仿真语言和软件。现代仿真软件已经模块化,更适合工程的应用,各种仿真软件已经成为科研、设计及学生学习的必备工具和好助手。

电力电子电路的仿真软件有很多,目前最常用的是 MATLAB 的 Simulink 平台。MATLAB 配备了电力系统仿真工具包,可与 Simulink 下的其他模块并列存在,使用起来比较方便。

通过仿真软件的使用,电力电子电路设计人员可以在进行电路实验前先进行电路仿真分析,确定合理应用的主电路和控制方式,大大减小了电力电子装置开发和设计的工作量,缩短了开发和设计时间。所以,电力电子仿真软件的学习对于从事电力电子装置开发和应用的工程技术人员来说是非常重要的。

(一) MATLAB/Simulink 仿真平台

MATLAB 是一种科学计算软件, MATLAB 是“矩阵实验室”的缩写,这是一种以矩阵为基础的交互式程序计算语言。早期的 MAT-

LAB 主要用于解决科学和工程的复杂数学计算问题。由于它使用方便,输入便捷,运算高效,适应科技人员的思维方式,并且有绘图功能,有用户自行扩展的空间,特别受用户的欢迎,使它成为在科技界广为使用的软件,也是国内外高校教学和科学研究的常用软件。

Simulink 系统的仿真环境是在 MATLAB 原来的工具箱基础上拓展和开发的,它包括 Simulink 仿真平台和系统仿真模型库两部分,它是一个高级计算和仿真平台。

Simulink 作为面向电路和系统框图的仿真平台,它有如下特点:

(1) 以调用模块代替编写程序,以模块连成的框图表示电路和系统,点击模块即可以输入模块参数。以框图表示的电路或系统必须包括输入、输出和组成系统本身的模块。

(2) 系统仿真模型完成后,设置了仿真参数,即可启动仿真。仿真开始时,软件首先自动进行被仿真电路和系统的初始化过程,将系统的框图转换为仿真的数学方程,建立仿真的数据结构并计算系统在给定激励下的响应。

(3) 系统运行的状态和结果可以通过波形和曲线观察,这和实验室中用示波器观察的效果几乎是一致的。

(4) 仿真的数据可以用 .mat 为后缀的文件保存,并且可以用其他数据处理软件。

(5) 如果仿真中系统模型有问题、不完整或仿真过程中出现计算不收敛的情况,软件会给出一定的出错提示信息,但是这提示不一定准确。

(6) 以框图形式仿真控制系统是 Simulink 的最早功能,后来在 Simulink 的基础上又开发了数字信号处理、通信系统、电力系统、模糊控制等数十种模型库,但是 Simulink 的窗口界面是各种模型库公用的平台,在这平台上可以进行控制系统、电力系统、通信系统等各种系统的仿真。