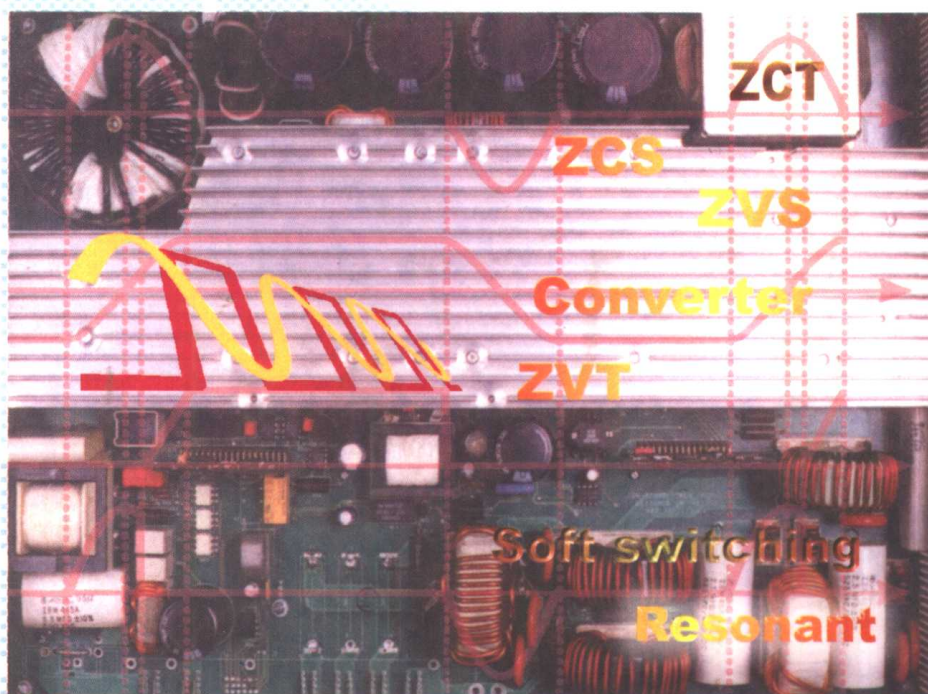


实用电源技术丛书

软开关功率变换器

及其应用

王 聪 编著



科学出版社

内 容 简 介

本书对软开关功率变换技术进行了较全面详细的讨论,阐述了软开关功率变换器发展过程中各阶段典型电路拓扑的工作原理,并对其工作过程作了详细的理论分析和讨论。本书内容包括:准谐振、多谐振 DC-DC 变换电路;准谐振 PWM DC-DC 变换电路;零转换 PWM DC-DC 变换电路;软开关正激与反激式 DC-DC 变换电路,软开关全桥 DC-DC 变换电路;各种直流环节谐振型逆变电路;各种极谐振型逆变电路等。本书对软开关功率变换电路在实际中的应用也进行了介绍。

本书可作为高等院校电力电子或工业自动化类专业高年级学生及研究生的教学参考书,也可供从事电力电子技术研究的广大科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

软开关功率变换器及其应用/王聪编著.-北京:科学出版社,2000
(实用电源技术丛书)
ISBN 7-03-007901-9

I. 软… II. 王… III. 功率变换器,软开关 IV. TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 63484 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000 年 1 月 第 一 版 开本:787×1092 1/16
2000 年 1 月 第 一 次 印 刷 印张:18
印数:1-4 000 字数:405 000

定 价:27.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序 言

什么是电源? 很难用一句话概括。但是, 现代人谁能离得开电源? 衣食住行离不开电源, 文化娱乐、办公学习、科学研究、工农业生产、国防建设、教育、环境保护、医疗卫生、交通运输、照明、通讯、宇宙探索等等, 哪一样能少得了电源? 只要用电就离不了电源。绝大部分的电是由发电厂生产发送的, 称为市电。白炽灯、电炉、交流电动机等只要接通市电就行; 计算机、电视机、X 光机等虽然也是打开开关就能工作, 但是这些机器里面都已经做了电能变换处理, 将正弦波的交流市电转换成各自需要的直流电、高压电、脉冲电; 在无法提供市电的岛屿、车船上, 可以用蓄电池经过电能变换获得跟市电一样的交流电, 让计算机、仪器设备等工作起来; 进入太空的卫星、飞行器, 把太阳能收集起来, 再经过电能变换, 获得需要的各种电能来维持长期运行; 电能是宝贵的资源, 需要珍惜和节约。绿色照明的节能荧光灯、高光效的 HID 灯电子镇流器, 是经过功率因数校正和高频化处理的电源装置, 既省电又净化了电网; 交流电动机经过频率变换即所谓变频调整速实现了电动机科学运转及电能的合理使用; 水力发电、火力发电、核电站是电的主要来源。太阳光、风力、沼气、潮汐、生物能、化学能等等在特定环境里也能发电, 作为电力的补充, 这些补充发电需要经过 DC/DC 和 DC/AC 电能变换使其便于储存, 并转换成与电网频率一致的正弦波。电网不稳定给用电设备带来许多麻烦, 甚至无法正常工作; 太阳、风力受四季和天气影响, 发出的电更是不稳, 很多场合需要稳压供电, 这有赖于电能变换加以调整。总括起来, 所谓电源乃是利用电能变换技术将市电或电池等一次电能转换成适合各种用电对象的二次电能的系统或装置。

上述电能变换主要体现在变压、调压, 整流、滤波, 稳定, 变换等。而这些基本的电能变换是通过一系列的技术方法实现的, 并且这些技术方法分别适用于不同的环境条件和要求。

变压: 变压器是交流变压最常用的装置, 相位控制也能完成交流变压, 线性补偿、频率变换、时间分割(脉冲宽度调制, 即著名的 PWM) 等都能实现变压。直流变压最常用的手段就是 DC/DC 变换, 无源和有源分压器是小功率直流变压较简便的方法。

调压: 在变压的基础上加以步进和连续的设置就成为调压。根据需要可以手动、自动或遥控。

整流: 整流是最早使交流电转换成直流电的方法。利用单相性的无源器件来实现则最简单, 利用有源开关的同步整流器能将整流器的损耗减至极小。

滤波: 滤波为获得平滑的直流, 可以通过无源或有源的滤波电路来实现。

稳定: 将变压或调压引入自动负反馈控制, 就能使之稳定。若反馈量分别是电压、电流、功率、频率、相位, 则响应获得稳压、稳流、恒功率、稳频、稳相的稳定电源。

变换: 变换的特定含义是由一种状态转变到另一种状态。比如交流-直流之间的转换; 正弦波、方波、三角波、梯形波、脉冲波、特种波等波形转换; 低频-高频转换; 光、热、机械、风、磁、理化等能量与电能之间的转换。

电能变换涉及的技术非常多,常见的有参数稳压、线性反馈稳压、磁放大器技术、数控调压技术、相控技术、变频、PWM、SPWM、软开关 PWM、移相谐振、无功补偿、功率因数校正、裂相、电流均分、传感采样、驱动保护、储能、充电、抗干扰、电磁兼容等等。实际需要推动这些技术不断发展和进步,使电源装置能满足负载各种各样的需求。

造就这些电源装置还需要专用的元器件和材料。电能变换用到的器材有功率开关器件、专用的集成电路、软磁材料以及外围无器件等。由于很多电源装置结构相当复杂,为简化设计而出现的集功率开关、变换控制电路、传感保护电路为一体的智能功率集成模块受到欢迎。

厚膜集成的电源模块、积木式的功能模块,灵活机动,既能单独使用,又能相互组合成较大的电源系统。在这里器件和整机的界限已相当模糊。

不同的负载要求不同的电源装置,万能的电源至少今天还未出现。一个特定用途的电源装置,应当具有符合负载要求的性能参数和外特性,这是基本的要求。安全可靠是必须加以保证的。高效率、高功率因数、低噪音是普遍关注的品质。无电网污染、无电磁干扰、省电节能等绿色指标是全球范围的热门话题,并有相关的国际和国家标准规范进行约束。有时特定的使用环境又要求电源具备一些额外的适应性能力,比如高温、高寒、高湿、抗辐射、抗振动、防爆、体积小、重量轻、智能化等。

电源技术发展到今天,已融汇了电子、功率集成、自动控制、材料、传感、计算机、电磁兼容、热工等诸多技术领域的精华,已从多学科交叉的边沿学科成长为独树一帜的功率电子学。

电源技术又是实用性极强的技术,服务于各行各业、各个领域的各式各样的负载,它们的性能特点以及采用的技术方法千差万别,这就造就了电源技术的丰富内涵。

由中国电源学会和科学出版社联合组织出版的《实用电源技术丛书》将展示多彩的电源世界,帮助读者全面了解当今电源的方方面面,并希望读者能从这套丛书中获得启示,在实际工作中找到最佳的电源方案。为此,丛书的选题为求从实际需要出发,内容突出实用性、新颖性和广泛性,写作侧重于原理阐述、实例解剖和经验介绍。我们将尽力让《实用电源技术丛书》成为广大读者的良师益友,但是,电源技术浩若湮海,有限的书目实难尽述。另外,电源的新技术不断涌现,且成长周期相当短,作者的实践有限,谬误之处在所难免,敬请读者指正。

《实用电源技术丛书》编辑委员会

《实用电源技术丛书》编辑委员会

顾 问:蔡宣三 丁道宏
主 任:倪本来
副主任:王鸿麟 张建荣 侯振程
委 员:马传添 马鹤亭 区键昌 刘凤君 庄蓄田
李厚福 李朔生 李宗光 陈 坚 严仰光
张 立 张广明 张志国 张 嵘 张承志
张占松 张卫平 陆 鸣 段军政 季幼章
周庭光 赵良炳 赵修科 徐德高 徐会明
徐泽玮 徐德洪 徐兰筠 袁维慈 黄济青
龚绍文 喻 翔 谭 信

前 言

电力电子技术从 60 年代诞生后, 经过近 40 年的发展, 已经形成较为完整的学科体系和理论, 成为相对独立的学科门类。近年来, 电力电子学更是获得了突飞猛进的发展, 并且这种发展被各国专家学者视为人类社会的第二次电子革命。本领域权威美国的 B. K. Bose 教授认为: “电力电子技术在世界范围的工业文明发展中所起的关键作用可能仅次于计算机”, 并且在 21 世纪“将对工业自动化、交通运输、城市供电、节能、环境污染控制等方面的发展产生巨大的推动作用”。

软开关电力电子变换技术是近年来电力电子学领域中的一个热门话题。对软开关 (soft switching) 理论的深入研究, 以及软开关技术的广泛应用, 使电力电子变换器的设计出现了革命性的变化。软开关技术的应用使电力电子变换器可以具有更高的效率——自身损耗大大降低, 更高的功率密度——自身体积、重量大大减小, 以及更高的可靠性; 并可有效地减小电能变换装置引起的电磁污染 (EMI) 和环境污染 (噪声等), 为在 21 世纪大力发展绿色 (无公害或低公害) 电力电子产品提供了有效的方式和方法。软开关技术的诸多显著优点使其理论从一出现就显示出了蓬勃的生命力, 并受到各国专家学者的广泛重视。现在每年在世界上都有大量的相关论文发表, 应用软开关技术的电力电子变换器也越来越多地推向市场。

本书主要讨论了软开关的直流-直流 PWM 变换电路及直流-交流 PWM 逆变电路在发展过程中的各典型电路拓扑及基本工作原理。作者希望本书的出版能对国内广大从事电力电子技术的科研人员和工程技术人员较为全面地了解这一领域的发展和概况有所帮助, 能对我国在这一研究领域的进步起到一点促进作用。

本书是作者在给本校研究生授课的讲义基础上编写的。第一章概述了电力电子变换器及软开关功率变换技术的基本概念; 第二章讨论了四种基本的 DC-DC 变换器的工作原理; 第三章讨论了准谐振与多谐振 DC-DC 变换器; 第四章讨论了零电压开关与零电流开关 PWM DC-DC 变换器; 第五章讨论了零电压转换与零电流转换 PWM DC-DC 变换器; 第六章讨论了零电压开关单端正激、反激以及正反激组合式变换器; 第七章讨论了软开关全桥 PWM DC-DC 变换器; 第八章简要介绍了电压型 PWM 逆变器的基本工作原理以及几种典型的 PWM 调制方式; 第九章讨论了直流环节谐振型逆变器的各种典型电路拓扑和基本工作原理; 第十章讨论了极谐振型逆变器的各种典型电路拓扑和基本工作原理; 第十一章给出了软开关功率变换器的一些应用实例。

在本书出版之际, 作者首先要感谢中国电源学会和科学出版社对作者编著此书的大力支持, 特别是科学出版社的张建荣和汤秀娟编辑对此书付出了大量心血, 使此书得以高质量顺利地出版。感谢作者的研究生们把一篇凌乱的讲义输入到计算机中变为整洁的书稿, 并完成了全书插图的绘制。另外, 本书第十一章第二节的内容由北京动力源公司

提供，在此一并表示感谢。

由于本书涉及的是一个发展很快的研究领域，因此作者在各个章节的论述都还很不深入、全面，加之作者的学识有限，本书肯定有值得讨论之处。敬请广大读者给予批评指正。

作 者

1999年10月

目 录

第一章 概述	1
1.1 功率变换电路的基本概念	1
1.2 硬开关功率变换电路及其局限性	2
1.3 软开关功率变换电路的提出及其发展	5
第二章 基本的 PWM DC-DC 开关变换器	10
2.1 Buck 变换器	11
2.2 Boost 变换器	13
2.3 Buck-Boost 变换器.....	15
2.4 Cúk 变换器.....	17
第三章 准谐振与多谐振 DC-DC 变换器	21
3.1 零电流与零电压型准谐振开关.....	21
3.2 零电流开关准谐振变换器(ZCS-QRCs)	23
3.2.1 基本工作原理	23
3.2.2 工作过程分析	24
3.2.3 对 ZCS-QRCs 变换电路的几点讨论	27
3.3 零电压开关准谐振变换器(ZVS-QRCs)	29
3.3.1 Boost ZVS-QRCs 变换电路的基本工作原理	30
3.3.2 Buck ZVS-QRCs 变换电路的基本工作原理	33
3.3.3 对 ZVS-QRCs 变换电路的几点讨论	34
3.4 零电压开关多谐振变换器(ZVS-MRCs).....	38
3.4.1 Buck ZVS-MRCs 变换电路的基本工作原理	40
3.4.2 Buck ZVS-MRCs 变换电路工作过程分析	40
3.4.3 Buck ZVS-MRCs 变换电路的输出电压调节方式及变比特性	43
3.4.4 Buck ZVS-MRCs 的优缺点分析.....	44
第四章 零电流开关(ZCS)与零电压开关(ZVS)PWM 变换器	45
4.1 零电流开关(ZCS)PWM 变换器	47
4.1.1 基本工作原理	47
4.1.2 工作过程分析	48
4.1.3 对 Buck ZCS-PWM 变换电路的几点讨论	51
4.2 零电压开关(ZVS) PWM 变换器.....	53
4.2.1 基本工作原理	53
4.2.2 工作过程分析	54

4.2.3	对 Buck ZVS-PWM 变换电路的几点讨论	57
第五章	零转换 PWM 变换器	60
5.1	基本的零电流转换(ZCT)PWM 变换器	60
5.1.1	ZCT-PWM 变换电路的拓扑结构及基本工作原理	60
5.1.2	Boost ZCT-PWM 变换电路的工作过程讨论与相平面分析	62
5.1.3	对 Boost ZCT-PWM 电路的几点讨论	65
5.2	基本的零电流转换(ZCT) PWM 变换电路控制方式的改进	68
5.3	基本的零电流转换(ZCT) PWM 变换电路拓扑结构的改进	74
5.4	基本的零电压转换(ZVT) PWM 变换电路	80
5.4.1	基本的 ZVT-PWM 电路的拓扑结构和工作原理	80
5.4.2	基本的 Boost ZVT-PWM 变换器的工作过程讨论	82
5.4.3	对基本的 Boost ZVT-PWM 电路的几点讨论	85
5.5	基本的零电压转换(ZVT)PWM 变换电路拓扑结构的改进	89
5.5.1	改进的 ZVT-PWM 电路拓扑结构(一)	89
5.5.2	改进的 ZVT-PWM 电路拓扑结构(二)	93
第六章	有源箝位正激、反激、正-反激组合式软开关变换器	101
6.1	有源箝位零电压开关(ZVS)PWM 正激变换器	101
6.1.1	有源箝位正激变换器的基本结构	101
6.1.2	基本工作过程分析	102
6.1.3	几点讨论	108
6.2	有源箝位零电压开关(ZVS)PWM 反激变换器	111
6.2.1	基本工作过程分析	111
6.2.2	有关电路设计的几点讨论	117
6.3	有源箝位零电压零电流开关(ZVZCS)反激变换器	120
6.3.1	基本工作过程分析	120
6.3.2	软开关条件的讨论	123
6.4	有源箝位正-反激组合式 PWM 变换器	124
6.4.1	基本工作过程分析	125
6.4.2	几点讨论	134
第七章	软开关全桥(FB)PWM 变换器	137
7.1	基本的全桥 PWM 变换器	137
7.2	基本的移相控制 FB-ZVS-PWM 变换器	139
7.2.1	基本工作原理	139
7.2.2	运行过程分析	141
7.2.3	几点讨论	146
7.3	基本的移相控制 FB-ZVS-PWM 变换器的改进	148
7.3.1	利用饱和和电感减小电压占空比丢失	149
7.3.2	利用变压器励磁电感扩大零电压开关负载范围	152
7.3.3	利用输出滤波电感扩大零电压开关负载范围	155

7.3.4	通过增加辅助电路扩大零电压开关负载范围	158
7.4	移相控制全桥零电压、零电流开关(FB-ZVZCS)PWM 变换器	158
7.4.1	原边加隔直电容和饱和电感的全桥 ZVZCS-PWM 变换器	159
7.4.2	变压器副边采用有源箝位的 ZVZCS 全桥移相式 PWM 变换器	165
第八章	基本的 PWM 电压型逆变器	172
8.1	单相电压型逆变器	172
8.2	三相电压型逆变器	174
8.3	脉宽调制(PWM)控制技术在逆变器设计中的应用	175
8.3.1	SPWM 的自然采样法	177
8.3.2	SPWM 的规则采样法	177
8.3.3	滞环电流 PWM 控制法	178
8.3.4	谐波消除法	178
第九章	直流(DC)环节谐振型逆变器	181
9.1	谐振直流(DC)环节逆变器(RDCLI)	181
9.1.1	谐振 DC 环节的基本工作原理	182
9.1.2	RDCLI 的工作过程分析	184
9.1.3	对 RDCLI 的几点讨论	185
9.2	有源箝位谐振直流环节逆变器(ACRLI)	187
9.2.1	ACRLI 的基本工作原理	187
9.2.2	ACRLI 的工作过程分析	188
9.2.3	对 ACRLI 的几点讨论	191
9.3	直流(DC)环节并联谐振逆变器 I (PRDCLI1)	194
9.3.1	DC 环节并联谐振电路 PRDCLI1 的基本工作原理	194
9.3.2	PRDCLI1 的基本工作过程分析	195
9.3.3	对 PRDCLI1 电路的两点讨论	200
9.4	直流(DC)环节并联谐振逆变器 II (PRDCLI2)	201
9.4.1	基本工作过程分析	202
9.4.2	参数计算	206
9.5	直流(DC)环节谐振型逆变器的 PWM 控制策略	207
9.5.1	离散脉冲 PWM 调制策略	207
9.5.2	单相软开关换向技术及其与谐振的配合	208
第十章	极谐振型逆变器	211
10.1	准谐振电流模式逆变器(QRCMI)	211
10.1.1	QRCMI 电路的基本工作原理	211
10.1.2	QRCMI 的工作过程分析	212
10.1.3	QRCMI 电路与 DC 环节谐振型逆变电路的比较	216
10.2	辅助二极管谐振极 PWM 逆变器(ADRPI)	217
10.2.1	ADRPI 变换桥臂的拓扑结构及工作原理	217
10.2.2	结实型变换桥臂的工作过程讨论及相平面分析	220

10.2.3	零电压开关操作的限制	224
10.2.4	设计过程举例	226
10.3	辅助谐振变换极 PWM 逆变器(ARCPI)	229
10.3.1	ARCPI 变换桥臂的拓扑结构及工作原理	229
10.3.2	ARCPI 电路的作用方式一	230
10.3.3	ARCPI 电路的作用方式二	233
10.3.4	对 ARCPI 电路的几点讨论	235
10.4	其他类型的极谐振型逆变器	236
10.4.1	零电压转换三相 PWM 逆变器(ZVTI)	236
10.4.2	Y-Snubber 谐振极 PWM 逆变器(Y-RPI)	240
10.4.3	Δ -Snubber 谐振极 PWM 逆变器(Δ -RPI)	244
第十一章	软开关功率变换器的应用	248
11.1	AC/DC 变换器中采用 ZCT 技术的有源功率因数校正电路设计	248
11.1.1	功率因数的定义及问题的提出	248
11.1.2	功率因数校正的基本方式和方法	249
11.1.3	Boost ZCT-PFC 电路设计与实现	251
11.2	零电压零电流开关(ZVZCS)全桥 PWM 变换器在实际中的应用	254
11.2.1	问题的提出	255
11.2.2	电路的基本工作原理	256
11.2.3	暂态过渡过程分析	257
11.2.4	实用电路设计与参数选择	260
11.3	离散脉冲调制感应电机的直接转矩控制	260
11.3.1	引言	260
11.3.2	感应电机在两相静止坐标系上的空间复矢量模型	261
11.3.3	离散脉冲调制的 DSC 控制系统	265
11.3.4	定子电流空间复矢量 i_s 的估计	268
11.3.5	离散脉冲调制的 DSC 控制系统的实现	270
参考文献		271

第一章 概 述

1.1 功率变换电路的基本概念

通常从电网上直接得到的单相或三相固定幅值和频率的交流电能,或从蓄电池、太阳能电池等电源得到的直流电能可被称为原始电能(raw power),这种电能能得到有效、合理的使用之前,一般需经过一定的转换和加工。能够应用电力半导体开关器件及电子技术对原始电能进行转换、加工、调节的电子设备就称为电力电子变换器(power electronic converters),或简称为功率变换器(power converters),以示与电子信号变换器的区别。原始电能经过加工后,可以广泛应用在电机传动、不间断电源、加热与照明、电化学、电弧焊、高压直流输电、有源滤波、无功补偿等等领域。按某些文献的估计,随着科学技术的进步,今后,所有原始电能都需经过加工后才可以使使用,而功率变换器将用在从发电、传输到配电的所有环节上。

功率变换器属于电力电子学(power electronics)范畴。所谓电力电子技术就是使用电力半导体器件及电子技术对电气设备的电功率进行变换和控制的技术。从60年代诞生后,经过近40年的发展,电力电子学已经形成较为完整的学科体系和理论,成为相对独立的学科门类。近年来,电力电子学更是获得了突飞猛进的发展,并且这种发展被各国专家学者称为人类社会的第二次电子学革命。本学科权威 B. K. Bose 教授预言:“在将来工业高度自动化情况下,计算机技术、电力电子技术及自动控制技术将成为三种最重要的技术。”^[1]

功率变换器根据能量转换形式的不同可以分为四大类,即:交流-直流变换 AC-DC(整流)、直流-交流变换 DC-AC(逆变)、直流-直流变换 DC-DC(斩波)、交流-交流变换 AC-AC(交-交变频)。图 1.1 为四种转换形式的说明。

图 1.2 为一假想的通用功率变换器原理图。虽然它并不是一个实用的设备,但作为一

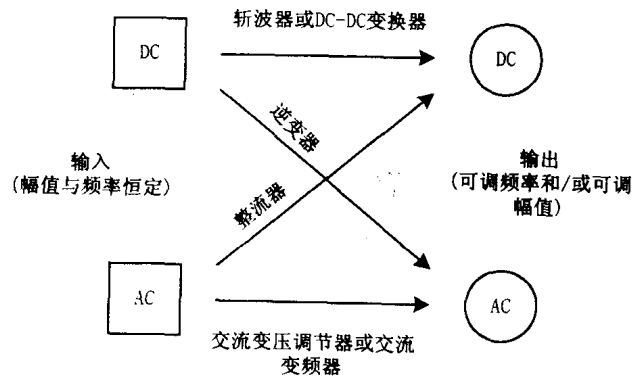


图 1.1 功率变换器四种转换形式的说明

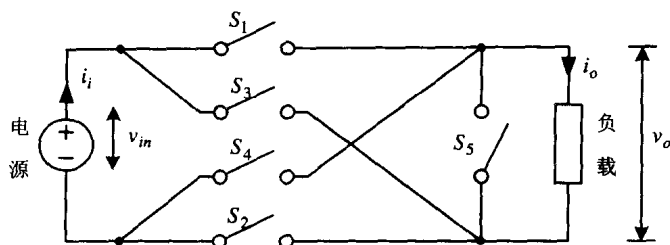


图 1.2 通用功率变换器

个工具,利用它可以很好地说明功率变换器转换和控制电能的原则。图 1.2 所示电路为一 5 开关双端口网络。 S_1 、 S_2 将输入端直接连接到输出端, S_3 、 S_4 将输入端与输出端交叉连接。电源假设为电压源(当然也可以为电流源),负载假定为由电阻和电感构成的感性负载。为了使负载可以有续流通路,增设开关 S_5 ,当 $S_1 \sim S_4$ 都打开时, S_5 闭合。这里假设开关的动作是同时完成的。由于假设电源为理想电压源,因此它不可以被短路,负载为感性负载,因此它不可以被开路,否则磁场的突然释放,将产生高电压,造成电路的损坏。因此图 1.2 所示电路只可能有三种有效状态:

状态 0:开关 $S_1 \sim S_4$ 都打开, S_5 闭合。这时输出端被短路,输出电流通过 S_5 续流,输出电压 v_o 等于零。

状态 1:开关 S_1 、 S_2 闭合,其他开关打开。这时输出电压、输出电流分别等于输入电压、输入电流。

状态 2:开关 S_3 、 S_4 闭合,其他开关打开。这时输出电压、输出电流与输入电压、输入电流数值相同,极性相反。

设输入电压 $v_{in} = V_{ip} \sin \omega t$,如果让图 1.2 所示电路在输入电压的前半个周期工作于状态 1,后半周期工作于状态 2,则有输出电压 $v_o = V_{ip} |\sin \omega t|$ 。这时图 1.2 所示电路实现了整流器的功能。

设输入电压 $v_{in} = V_m$ 恒定不变,让图 1.2 所示电路的工作状态按上述同样规律变化,则在输出端可以得到一个周期为 $T = 2\pi/\omega$ 的交流方波电压。这时图 1.2 所示电路实现了逆变器的功能。

如果输入端电压为三相交流,或要求输出电压为三相交流,只要将图 1.2 所示电路拓扑加以适当扩展,就可以实现要求的电能转换功能。

在图 1.2 所示电路中,根据输入电能的不同形式,通过让电路以不同的时间顺序工作于不同的状态,可以同样实现直流-直流变换及交流-交流变换的功能。

本书将重点讨论直流-直流变换电路及直流-交流逆变电路。这两种变换电路在现代电力电子学领域中占据着重要的地位,并在实际生活中得到了广泛的应用。

1.2 硬开关功率变换电路及其局限性

60 年代开始得到发展并应用的 DC-DC PWM(脉宽调制)功率变换技术使直流变换器的设计出现了很大的变化,对常用的线性调节电源(本质上为一可控电阻)提出了挑战。它去掉了庞大笨重的工频变压器,提高了电源的功率密度(单位体积所能得到的最大功

率),减小了装置的体积重量,提高了变换器的整体效率。随着功率半导体元器件的发展,它可以工作于越来越高的开关频率,因而具有越来越小的体积、重量和越来越高的功率密度。在70年代,其工作频率已从最初60年代几kHz上升到20kHz,并在当时被称为20kHz革命。目前DC-DC PWM变换器可以以最佳的重量、尺寸、效率、可靠性及价格工作在50~200kHz频率范围内^[2]。近些年来,随着个人电子计算机(笔记本电脑)、通信设备、微小型电器设备的发展,以及空间技术实际应用的需求,要求DC-DC PWM变换器具有更小的体积、重量和更高的功率密度,这就要求DC-DC PWM变换器要具有更高的开关频率,例如几MHz或几十MHz。

然而,对于常规的DC-DC PWM变换器,进一步提高开关频率会面临许多实际的问题。在常规的DC-DC PWM变换器中,功率开关管在电压不为零时导通,在电流不为零时关断,处于强迫开关过程,这种开关过程又称为硬开关(hard switching)过程。在硬开关状态下工作的DC-DC PWM变换器,随着开关频率的上升,一方面开关管的开关损耗会成正比地上升,使电路的效率大大降低,处理功率的能力大幅度减小;另一方面,会产生严重的电磁干扰(EMI)噪声。

由于功率开关管并不是理想开关,开和关不能瞬时完成,需要一定时间。在这段时间里,在开关管两端电压(或通过电流)减小的同时其上通过的电流(或两端的电压)同时上升,形成电压和电流波形的交叠,从而产生了开关损耗。根据电力电子学教科书,开关管的开通损耗和关断损耗分别等于在开通和关断时间里开关管两端电压 v_s 和通过电流 i_s 乘积的积分,即

$$W_{on} = \int_0^{t_{on}} v_s i_s dt, \quad W_{off} = \int_0^{t_{off}} v_s i_s dt$$

则一周开通和关断的总损耗分别为:

$$P_{on} = f_s W_{on}, \quad P_{off} = f_s W_{off}$$

式中, t_{on} 为开通时间, t_{off} 为关断时间, f_s 为开关频率。显然,随着开关频率的提高,开关损耗将成正比线性上升。

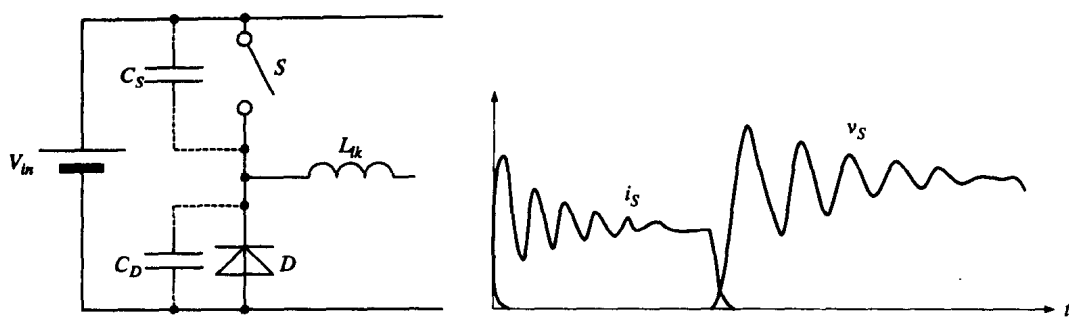
电路中寄生参数的影响以及寄生参数之间的振荡,使开关管在硬开关状态下的开关环境进一步恶化^[3]。图1.3给出考虑了寄生参数的变换器局部电路,及在寄生参数影响下开关管电压电流波形在开关周期中的变化。由图1.3可看出:

- 当开关管S导通时,其输出电容C上的储能 $CV_m^2/2$ 将通过S释放,一方面增大了开关损耗,一方面在开关管S中产生巨大的电流尖峰;另外,极高的 di/dt 将产生严重的电磁干扰噪声,该噪声会通过Miller电容耦合到驱动电路和控制电路,造成系统工作的不稳定。

- 开关管S导通瞬间,由于二极管D反向恢复特性造成电压源短路,增大了S和D的开关损耗,在S和D中同时产生巨大的电流尖峰,影响开关管 and 二极管的安全运行;另外,同样会产生很大的 di/dt ,形成严重的电磁干扰噪声。

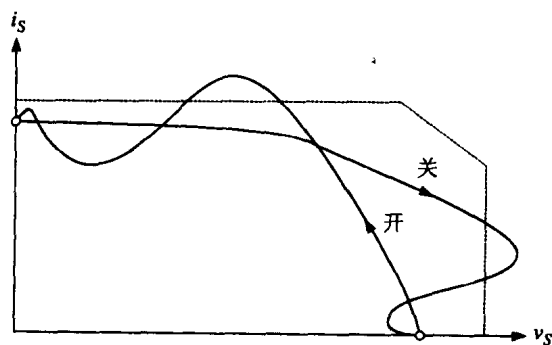
- 开关管S关断时,寄生电感与寄生电容产生谐振,一方面产生一高电压加在开关管S上,影响S的安全运行,另一方面加大了S的关断损耗。另外,很大的 dv/dt 会产生严重的电磁干扰噪声。

同样是在60年代,德国的A. Shnong等人将脉宽调制(PWM)技术从通信领域引入



(a) 考虑了寄生参数的变换器局部电路

(b) 开关过程中开关管 \$S\$ 电压、电流波形



(c) 开关过程中开关管 \$S\$ 电压、电流开关轨迹

图 1.3 考虑了寄生参数的变换器局部电路及开关管电压电流变化波形

到 DC-AC 逆变电路的设计中,这个引入对近代交流调速系统的发展起到了极大的促进作用。与常规的六阶梯波逆变器相比,PWM 逆变器具有很显著的优点。如:主电路结构简单,一个功率控制级既用来控制逆变器输出交流基波电压幅值,又可控制其输出频率;使用了不可控整流桥,使系统对电网的功率因数与逆变器输出电压值无关而接近于 1;逆变器在调频时同时实现了调压,而与中间直流环节的元件参数无关,加快了系统的动态响应;可获得比常规六阶梯波好得多的输出电压波形,能有效消除与抑制低次谐波,使负载电机可在近似正弦的交变电压下运行,转矩脉动小,从而大大地扩展了拖动系统的调速范围。正是这些优点,使 PWM 的电压型逆变器在当今 DC-AC 转换领域里占据了绝对的统治地位。

然而常规的 PWM 逆变器也远不是最优的,很长时间以来人们就认识到,在 PWM 逆变电路中,如果能将开关频率在原有基础上进一步提高,将会带来一系列好处。如,低次谐波会被更有效地抑制;输出将具有更标准的正弦波形;滤波器尺寸将大大减小;特别当开关频率在 18kHz 以上时,噪声将已超出人类听觉范围,即已超出临界噪声,使无噪声传动系统成为可能。

同样,对于工作在硬开关状态下的常规的 PWM 逆变器,进一步提高运行的开关频率,将受到与直流-直流 PWM 变换器类似的限制^[4],如:

- 在开通和关断瞬间产生的电压和电流尖峰将可能使开关器件的状态运行轨迹超出安全工作区(SOA),影响开关的可靠运行。

- 开关损耗将随开关频率成正比上升。
- 过高的 $dv/dt, di/dt$ 将产生严重的电磁干扰(EMI)。

由上述可知,不论是直流-直流 PWM 变换电路还是直流-交流 PWM 逆变电路,虽然它们应用的功率范围及频率范围在概念上有很大不同,但当工作在硬开关状态下且希望进一步提高开关频率时,将面临着近乎完全相同的问题。

1.3 软开关功率变换电路的提出及其发展

为了克服前述 DC-DC PWM 变换器和 DC-AC PWM 逆变器在硬开关状态下工作的诸多问题,80 年代以来软开关技术得到了深入广泛的研究并在近些年得到了迅速发展。所谓“软开关”通常是指零电压开关 ZVS(zero voltage switching)和零电流开关 ZCS(zero current switching)或近似零电压开关与零电流开关。

对于“硬开关”和“软开关”,一般的理解是:硬开关过程是通过突变的开关过程中断功率流完成能量的变换过程;而软开关过程是通过电感 L 和电容 C 的谐振,使开关器件中电流(或两端电压)按正弦或准正弦规律变化,当电流自然过零时,使器件关断,当电压下降到零时,使器件导通。开关器件在零电压或零电流条件下完成导通与关断的过程,将使器件的开关损耗理论上为零。而在文献[4]中,则按一种渐进的比较过程给出了硬开关和软开关的描述。文献[4]认为:由于现代功率半导体器件的开关转换过渡时间(开通瞬间和关断瞬间)在毫秒到纳秒级,因此变换器电路中的寄生电感和寄生电容在开关过渡过程中总是要起作用。当变换器开关的过渡过程只受外部的寄生成分影响时,这种开关在使用过程中被定义为硬开关。借助于附加的电感和电容来延缓开通和关断过程,这就是缓冲电路的作用。当在开关过渡过程中为了减小开关的应力而使储存的电磁能量增大,从而造成在每一个开关过渡过程中储存的能量在下一个循环中不能比较经济地消耗掉,就产生了馈能型缓冲电路技术。当储存在电磁元件中的能量进一步增加的时候,可以明显地观察到谐振现象,就导致了谐振变换器技术的产生。将谐振限制在仅在开关周期某一区间内工作就产生了目前变换器中使用的大部分软开关技术。

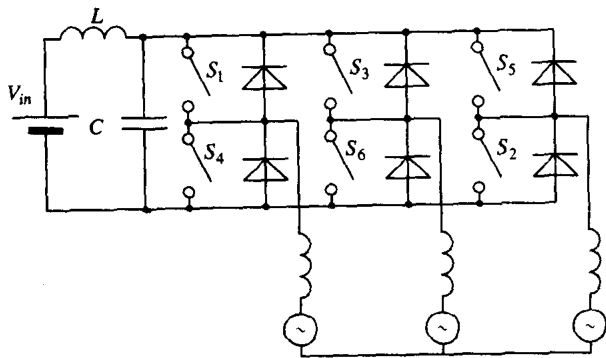
在 DC-DC PWM 变换器设计中较早提出的软开关变换器是准谐振变换器(QRCs),因电路工作在谐振的时间只占一个开关周期中的一部分,故称为准谐振。准谐振变换器通过谐振使开关器件上的电流或电压按准正弦规律变化,从而创造出零电流或零电压开关条件,极大地减小了变换器的开关损耗和开关噪声。由于准谐振变换器不能使电路中的有源开关和二极管同时具有软开关条件,因此之后又提出了多谐振变换器(MRCs)。在多谐振变换器(MRCs)中,由于电路中谐振拓扑和参数不止一个,故称为多谐振。在准谐振变换器和多谐振变换器中,输出电压的调节是通过调节开关频率实现的,当负载和输入电压在大范围内变化时,开关频率也需要大范围的变化,这使得变压器及滤波器的设计变得很困难。为此,又提出了 ZVS-PWM 变换器和 ZCS-PWM 变换器。这种类型的变换器,将准谐振变换器与常规的 PWM 变换器相结合,通过附加的辅助有源开关阻断谐振过程,使电路在一周期内,一部分时间按 ZCS 或 ZVS 准谐振方式运行,另一部分时间按 PWM 方式运行,既具有软开关的特点,又具有 PWM 恒频占空比调节的特点。在 ZVS-PWM 变换器和 ZCS-PWM 变换器中,谐振电感串联在主功率回路中,因此电路中总是存在着很大的

环流能量,这不可避免地增加了电路的导通损耗;另外,电感储能与输入电压和输出负载有很大关系,这使得电路的软开关条件极大地依赖于输入电源和输出负载的变化。为了解决这些问题,零电压转换(ZVT)PWM变换电路和零电流转换(ZCT)PWM变换电路被提出。在这种类型的电路中,辅助谐振电路与主功率开关管相并联,电路中环流能量被自动地保持在较小的数值,且软开关条件与输入电压和输出负载的变化无关。上述各种软开关变换技术在实际的DC-DC PWM变换器的设计上正在获得越来越广泛的应用,比较典型的有:零电压开关或零电流开关的正激、反激或正反激组合式变换电路,全桥移相式ZVS变换电路,全桥移相式ZVZCS变换电路,以及采用ZVT、ZCT技术的有源功率因数校正

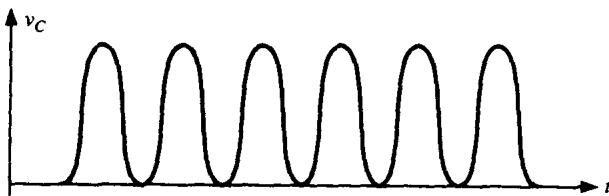
电路等等,所有这些应用表现出了软开关技术在DC-DC PWM变换电路中的良好应用前景。

在DC-AC逆变器设计中,80年代末美国威斯康星大学麦迪逊分校的Divan博士提出的谐振直流环节逆变器(RDCLI)获得了广泛的关注,Divan博士的论文也因此而在IEEE工业应用分册获优秀论文一等奖。在此之后,软开关逆变电路的研究成为电力电子学领域中热点研究方向之一。由于谐振软开关逆变电路与常规硬开关逆变电路相比具有明显的优点,因此,从1986年以来,在每一年的IEEE-IAS年会、PESC年会、IPEC等会议上都有大量的关于这个领域研究的论文发表,目前已提出多种不同拓扑结构的谐振软开关逆变电路。如果粗略地把它进行分类,大致可分为两种:直流(DC)环节谐振型逆变器和极谐振型逆变器(RPI)。

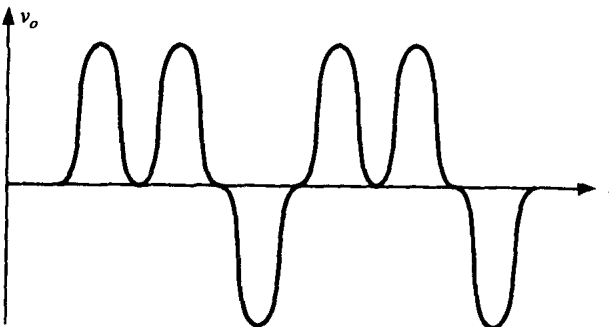
直流(DC)环节谐振型逆变器的特点是在逆变桥与直流母线之间有一辅助谐振回路。图1.4(a)即为Divan博士在1986年最早提出的RDCLI(resonant DC link inverter)电路原理图^[5]。图中 LC 为辅助谐振电路。通过谐振,电容电压 v_c 周期性地返回零点,从而为后面的逆变桥创造了零电压开关间隔。图



(a) RDCLI 电路原理图



(b) 直流(DC)环节谐振电压波形



(c) 逆变器单相输出 PWM 电压波形

图 1.4 RDCLI 电路原理图及谐振电压与输出 PWM 电压波形