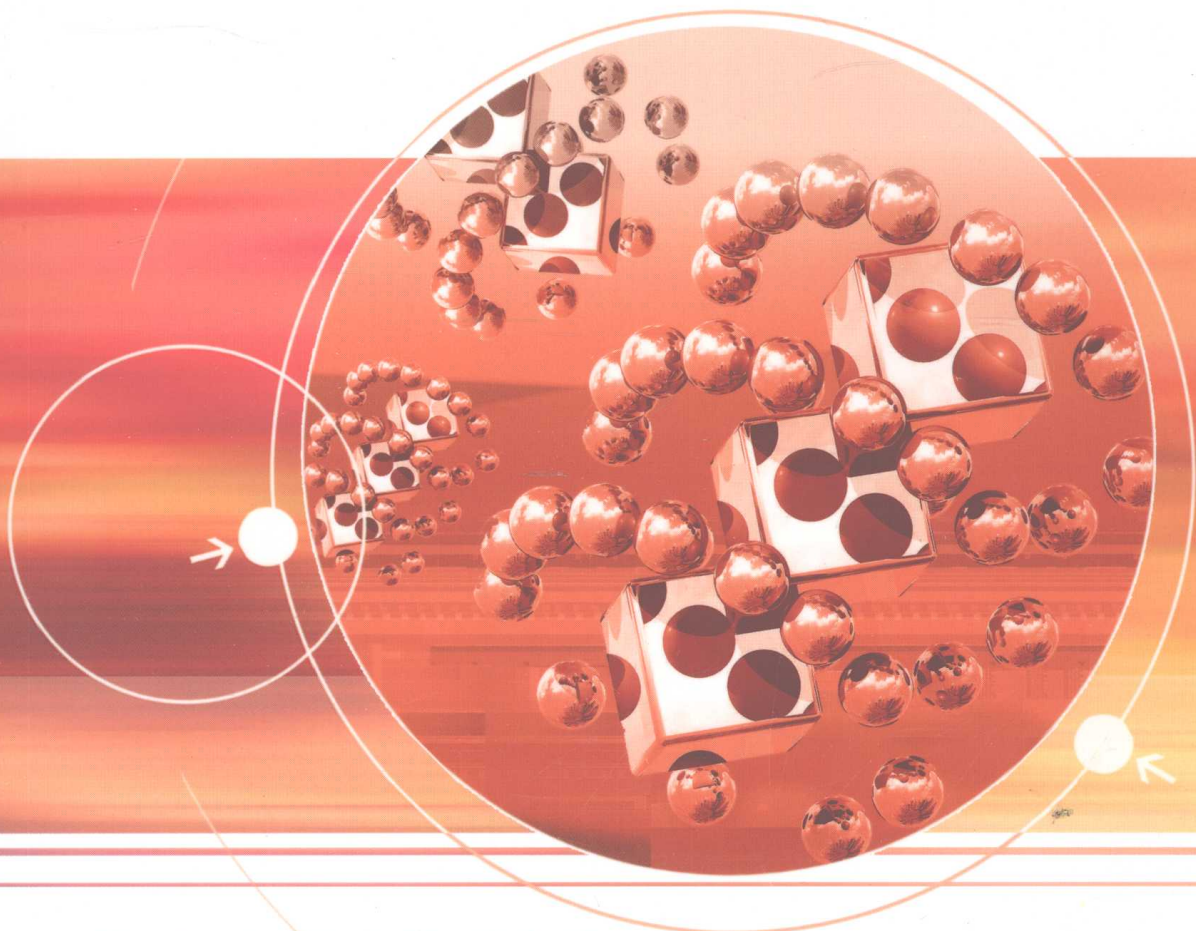


电源系列丛书

电力电子

软开关技术及实用电路



◎ 王增福 李 昶 魏永明 等编著

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电源系列丛书

电力电子 软开关技术及实用电路

王增福 李 昶 魏永明 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了整流(AC-DC变换)、直流-直流(DC-DC)变换器、直流-交流(DC-AC)逆变器、交流-交流(AC-AC)变频、变压电路中的软开关技术,并对软开关技术电路常用的有源器件、控制方法及集成电路做了简单介绍。重点介绍并分析了18例软开关实用电路。希望本书能对工程技术人员设计和制造高质量的开关电源提供帮助。

本书适用于初、中级电力电子工程专业技术人员和大、中专院校相关专业的师生,对业余电子技术爱好者也有参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子软开关技术及实用电路/王增福等编著. —北京:电子工业出版社,2009.6
(电源系列丛书)

ISBN 978-7-121-08888-9

I. 电… II. 王… III. 电力电子开关—电路 IV. TM564

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第079642号

责任编辑:魏永昌 特约编辑:李云霞

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:442千字

印 次:2009年6月第1次印刷

印 数:4000册 定价:36.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着电力电子技术及微机控制技术的迅速发展,功率半导体、电力变换技术也得到迅速发展和广泛应用,因此随之带来很多麻烦的问题,并已成为世人关注的社会问题。首先,高频化和大容量化使电力电子装置内部电压、电流发生剧变,不但给器件造成很大的电应力,还在装置的输入/输出引线及周围空间产生高频噪声,对其他电气设备的工作造成干扰,这种公害称为电磁干扰(EMI)。

其次,开关器件的非线性工作和输入电容滤波方式的整流电路产生大量谐波,不但使装置的输入电流波形严重失真。同时还会降低电网的功率因数,给同电网的其他电气设备造成故障。

再次,电力谐波的存在降低了电能的生产、传输和使用设备的容量。不仅使电气设备过热,产生振动和噪声;而且使绝缘老化,使用寿命缩短,并引起电力系统局部并联谐振或串联谐振,造成电容器或电抗器烧损。电力电子装置引起的谐波污染已成为电力电子发展和普及应用的重要障碍。

因此,对于电磁干扰和谐波污染不得不考虑进行必要的抑制。虽然对有关电磁公害和谐波污染问题各国都制定了一些强制性标准,但这些标准未必是充分的,满足标准要求仅仅是治标,要治本更应该在电力电子变换电路的拓扑结构和控制方法上寻找新的出路。防御电磁干扰和抑制谐波是一个重要课题,对于防御电磁干扰目前采用软开关技术,谐波抑制则采取谐波补偿和 PWM 调制。为此,本书集中介绍功率半导体、电力变换中的软开关技术及其应用。

本书共 7 章。

第 1 章绪论。介绍主要软开关技术的原理构造及特点、发展历程及趋向。

第 2 章软开关技术常用的有源电子器件。介绍半导体二极管、半导体三极管、功率 MOS-FET 管、IGBT 有源器件的构造原理、技术参数和使用方法。

第 3 章软开关技术控制方法和集成电路。重点介绍了脉冲调宽(PWM)和移相 PWM 调节(PMPT)两种控制方法及适用于软开关技术的集成电路的典型产品。

第 4 章直流-直流(DC-DC)变换器中的软开关技术。重点介绍零电压开关(ZVS)、零电流开关(ZCS)PWM 变换器;零电压转换(ZVT)、零电流转换(ZCT)PWM 变换器;移相控制零电压、零电流开关 PWM 变换器的工作原理、设计及计算。

第 5 章直流-交流(DC-AC)逆变器中的软开关技术。重点介绍直流谐振环、极谐振软开关技术及三相 ZVT PWM DC-AC 逆变器、三相 ZCT PWM DC-AC 逆变器的工作原理和参数选择。

第 6 章在整流和交流变压变频电路中的软开关技术。重点介绍单相 PWM 整流器和三相半波 PWM 整流器及全波 PWM 整流器、软开关功率校正电路、软开关交流-交流变换器的电路构成、工作原理及参数选择。

第 7 章软开关技术实用电路。重点介绍和分析了高频直流开关电源、超声波电源、中频逆变电源、电镀电源等 18 种具有代表性的典型的软开关技术实用电路。

本书主要由三部分组成,第 2 章、第 3 章为软开关技术必备的基础知识,第 4 章、第 5 章、第 6 章为软开关技术的主要内容,第 7 章是软开关技术的实用电路。这是一本比较系统和全

面地介绍软开关技术的书籍。

在本书编写过程中,我们对国内外已出版的部分有关软开关技术的论述和开关电源及元器件生产厂商的技术资料进行了整理和筛选,将其中有价值的、实用性较强的内容编入本书中,在此对相关专家、学者深表感谢。

本书由王增福、李昶、魏永明等同志编写。在编写期间得到许多朋友和同事的支持,他们在资料收集、整理方面做了大量工作,尤其是电子工业出版社魏永昌编审,为本书的出版做了精心的策划和认真细致的编排及审阅,在此一并表示感谢。

由于编者能力有限,难免出现错误和不妥之处,请广大读者予以指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 软开关技术的提出及实现策略	(1)
1.2 软开关技术发展历程及趋向	(3)
1.3 ZCS、ZVS、ZCS PWM、ZVT PWM 变换器软开关技术简介	(4)
1.3.1 ZCS 变换器	(4)
1.3.2 ZVS 变换器	(5)
1.3.3 ZCS PWM 变换器	(5)
1.3.4 ZVT PWM 变换器	(7)
1.3.5 ZCT PWM 变换器	(7)
第 2 章 软开关技术常用的有源电子器件	(9)
2.1 半导体二极管	(9)
2.1.1 半导体二极管工作原理及技术参数	(9)
2.1.2 快恢复二极管	(10)
2.1.3 二极管模块	(14)
2.2 半导体三极管.....	(16)
2.2.1 半导体三极管的特性曲线	(16)
2.2.2 半导体三极管的三种基本接法	(17)
2.2.3 半导体三极管的主要参数	(18)
2.3 功率晶体管.....	(21)
2.3.1 功率晶体管的结构	(21)
2.3.2 特性与参数	(23)
2.3.3 GTR 的驱动与保护	(29)
2.4 功率场效应晶体管.....	(35)
2.4.1 功率场效应晶体管结构与工作原理	(35)
2.4.2 功率场效应晶体管的特性与参数.....	(37)
2.4.3 栅极的驱动与保护	(42)
2.4.4 VMOSFET 模块	(49)
2.5 绝缘栅双极型晶体管.....	(51)
2.5.1 绝缘栅双极型晶体管的工作原理与特性	(51)
2.5.2 门极驱动	(57)
2.5.3 IGBT 的保护	(63)
2.5.4 IGBT 模块	(68)
第 3 章 软开关技术控制方法和集成电路	(73)
3.1 PWM 技术	(73)
3.1.1 工作原理	(73)

3.1.2	SPWM 波电路	(76)
3.1.3	PWM 反馈控制模式	(80)
3.2	PMPT 技术	(84)
3.2.1	工作原理	(87)
3.2.2	控制电路	(89)
3.2.3	栅极驱动信号延迟	(91)
3.3	软开关集成控制器	(93)
3.3.1	PFM 谐振型集成控制器 MC34066 系列	(93)
3.3.2	移相谐振全桥软开关控制器 UC1875/UC2875/UC3875 系列	(99)
3.3.3	UC3855A/UC3855B 软开关功率因数预调节器	(108)
3.3.4	SLE4520 三相 PWM 集成电路	(121)
第 4 章	直流-直流(DC-DC)变换器中的软开关技术	(126)
4.1	零开关 PWM DC-DC 变换器	(127)
4.1.1	ZCS PWM 变换器	(127)
4.1.2	ZVS PWM 变换器	(129)
4.1.3	ZVS-ZCS-Buck-PWM 变换器	(130)
4.2	零转换 PWM DC-DC 变换器	(132)
4.2.1	ZCT PWM 变换器	(132)
4.2.2	ZVT PWM 变换器	(135)
4.3	移相控制零开关 PWM DC-DC 全桥变换器	(137)
4.3.1	移相控制零电平开关(ZVS)PWM DC-DC 全桥变换器	(137)
4.3.2	移相控制 ZCS PWM DC-DC 全桥变换器	(143)
4.3.3	移相控制 ZVZCS PWM DC-DC 全桥变换器	(147)
第 5 章	直流-交流(DC-AC)逆变器中的软开关技术	(150)
5.1	基本谐振环逆变器(RDCLI)	(150)
5.1.1	RDCLI 的工作原理	(150)
5.1.2	RDCLI 谐振元器件 L_r 、 C_r 参数计算	(151)
5.2	有源钳位谐振直流环逆变器	(152)
5.3	同步谐振直流环逆变器	(153)
5.4	改进型谐振直流环逆变器	(153)
5.4.1	并联谐振直流环逆变器	(153)
5.4.2	新型并联谐振直流环逆变器	(154)
5.4.3	结实型软换流逆变器	(155)
5.5	直流谐振环在三相 PWM 逆变器中的应用	(156)
5.5.1	载波为锯齿波的 SPWM 单边调制技术	(156)
5.5.2	单相软开关技术	(157)
5.5.3	三相直流谐振环软开关逆变器	(158)
5.6	谐振极逆变器	(160)
5.6.1	单相半桥准谐振电流模式逆变器	(160)
5.6.2	三相 QRCEMI 逆变器	(161)

5.6.3	谐振极在串联谐振逆变器中的应用及设计	(161)
5.6.4	结实型谐振极逆变器	(163)
5.6.5	采用反馈电感的辅助谐振极逆变器	(164)
第6章	在整流和交流变压变频电路中的软开关技术	(166)
6.1	功率因数校正电路(PFC)中的软开关技术	(166)
6.1.1	无源功率因数校正电路	(166)
6.1.2	有源功率因数校正电路	(166)
6.1.3	单级 PFC 电路	(167)
6.1.4	无整流桥的 PFC 电路	(168)
6.1.5	软开关功率因数校正(PFC)电路	(170)
6.2	同步整流(SR)电路中的软开关技术	(171)
6.2.1	同步整流技术主要电路	(171)
6.2.2	ZVS、ZCS 同步整流	(173)
6.2.3	ZVS 正激式变换电路的同步整流	(174)
6.3	PWM 整流电路中的软开关技术	(175)
6.3.1	电流型 PWM 整流电路	(175)
6.3.2	电压型 PWM 整流电路	(179)
6.3.3	整流电路中的软开关技术	(184)
6.4	AC-AC 变换中的软开关技术	(186)
6.4.1	变频器主电路结构和工作原理	(186)
6.4.2	变频器变换电路中的软开关技术	(187)
第7章	软开关技术实用电路	(190)
7.1	输出为 1000W($\pm 15\text{V}$, 30A)的 ZVS PWM 全桥移相开关电源	(190)
7.1.1	整流电路	(190)
7.1.2	辅助电源电路	(191)
7.1.3	全桥逆变电路	(191)
7.1.4	输出整流滤波电路	(192)
7.1.5	过电流保护电路	(192)
7.1.6	输出电压检测电路	(192)
7.1.7	UC3875 的外围电路	(192)
7.1.8	全桥开关电源的驱动电路	(194)
7.2	1.5kW ZVS 全桥变换器	(194)
7.3	2kW ZVZCS 全桥 PWM 变换器	(197)
7.4	全桥移相高功率因数软开关电源	(199)
7.4.1	全桥移相高功率因数开关电源总体框图	(199)
7.4.2	主电路组成	(199)
7.4.3	功率因数校正控制电路	(200)
7.5	具有功率因数校正和输出均流功能的 300W 软开关电源	(201)
7.5.1	输入整流滤波电路	(201)
7.5.2	辅助供电电路	(201)

7.5.3	功率因数校正电路	(204)
7.5.4	全桥驱动电路与转换电路	(204)
7.5.5	一次过电流保护电路	(205)
7.5.6	斜坡补偿电路	(205)
7.5.7	输出整流滤波与隔离电路	(205)
7.5.8	输出取样反馈电路	(205)
7.5.9	输出均流控制电路及 UC3907 功能简介	(205)
7.6	100W 电流谐振变换器实用电路	(211)
7.7	73W 电压谐振变换器实用电路	(215)
7.8	90W ZVS 直流开关电源	(218)
7.8.1	输入电路	(218)
7.8.2	半桥-开关电路	(220)
7.8.3	变压器	(220)
7.8.4	输出部分	(220)
7.8.5	稳压、光电耦合器和控制器	(220)
7.8.6	启动	(221)
7.8.7	保护	(222)
7.8.8	TEA1610 功能简介	(222)
7.9	直流斩波串联谐振式 ZCS 超音频电源	(224)
7.9.1	电路组成	(224)
7.9.2	主电路	(225)
7.9.3	控制电路	(225)
7.10	直流斩波并联谐振式 ZVS 逆变电源	(228)
7.10.1	电路结构	(228)
7.10.2	电路工作原理	(229)
7.10.3	斩波电路的 PWM 生成电路	(229)
7.10.4	逆变器控制	(229)
7.11	可控整流串联谐振式软开关中频电源	(230)
7.11.1	电路组成	(230)
7.11.2	主电路工作原理	(230)
7.11.3	逆变电路工作原理	(230)
7.11.4	控制电路	(232)
7.11.5	CD4046 集成锁相环	(233)
7.12	可控整流并联谐振式 ZCS 逆变电源	(235)
7.12.1	电路结构	(235)
7.12.2	电路工作原理	(236)
7.13	脉冲密度调节功率控制串联谐振式软开关逆变电源	(237)
7.13.1	主电流	(238)
7.13.2	逆变器结构及工作原理	(238)
7.13.3	逆变器工作原理分析	(240)

7.13.4	逆变器输出电压电流波形	(241)
7.14	用 PIC12C671 控制电源输出特性的 600W 软开关充电电源	(242)
7.14.1	抗干扰抑制电路	(242)
7.14.2	输入整流滤波与保护电路	(244)
7.14.3	IC1(UC3845)的工作电压	(244)
7.14.4	直流转换电路	(244)
7.14.5	风扇转速控制电路	(244)
7.14.6	输出整流滤波电路	(245)
7.14.7	反馈取样电路	(245)
7.14.8	PIC12C671 的控制电路及功能简介	(245)
7.15	240W 谐振式电动轮椅充电器	(247)
7.15.1	NCP1653 的特性及功能简介	(250)
7.15.2	L6598 的功能简介	(250)
7.15.3	NCP1207 主要特性及功能	(254)
7.16	60W 谐振式适配器	(254)
7.17	2000W 软开关电弧电源	(256)
7.18	150W 高效绿色电源	(258)
7.18.1	L6562 功能简介	(260)
7.18.2	UCC28600 功能简介	(261)
参考文献	(266)

第1章 绪 论

一切用电设备都离不开电源,供电电源总体上分为交流电源和直流电源两大类。

从发电厂生产的交流电源经变压器升压后,有交流和直流两种高压输电方式。交流输电方式是直接将升压后的交流电通过三相三线传输,终端通过变压器降压后供给用户;直流传输方式是将升压后的高压经过整流(AC-DC变换)变成直流电压,通过正、负两线传输,终端再将直流逆变成交流电压(DC-AC变换),通过变压器降压后供给用户。直流输电的优点是节约输电成本,减小无功损耗。无论是交流输电还是直流输电,在用户终端都是交流电源。

如果电网提供的交流电源不能直接满足用电设备的要求,必须有一个中间环节将供电电源转换成用电设备需要的电源,这个电源就是变换电源。变换电源主要包括 AC-DC 变换(整流)、DC-DC 变换、DC-AC 变换和 AC-AC 变换等几种形式。低损耗、高效率的变换电源都采用先进的软开关技术。

AC-DC 变换已经是很成熟的电源变换技术,它包括二极管整流和晶闸管可控整流技术。由于它的结构简单,因此得到了广泛的应用。但它有一个很大的缺点,就是输入电流含有很大谐波,波形严重失真,降低了电网的功率因数,晶闸管可控整流还会对电网造成严重的污染。提高整流电路的功率因数,减小谐波干扰,是整流技术的发展方向。将软开关技术应用到 AC-DC 整流电路中,是近年来主要的研究领域,比较成熟的软开关技术有 PWM 整流和软开关功率因数校正。

DC-DC 直流变换将一种固定的直流电压变换成可调的直流电压或是另一种固定的直流电压。由于采用开关电路,开关器件在导通和关断时有电压和电流作用在开关器件上,会造成很大的开关损耗和高次谐波,尤其是高频情况下更为严重。将软开关技术应用到 DC-DC 直流变换器电路中,也是近年来主要的研究领域。主要成果有 ZVS PWM DC-DC 变换器;ZCS PWM DC-DC 变换器;ZVT PWM DC-DC 变换器;ZCT PWM DC-DC 变换器;移相控制 ZVS PWM DC-DC 变换器;移相控制 ZCS PWM DC-DC 变换器等。

DC-AC 变换将直流电源变换成频率可调或固定的交流电源。三相变频电源一般用于驱动三相交流电动机,频率变化范围从几赫兹到几百赫兹,高速交流变频电源有的达到几千赫兹。单相变频电源根据负载的类型决定频率范围,有的固定在某一个很小的频率范围内。DC-AC 变换电路也是开关电路,为了减小开关损耗,减小谐波干扰,也要研究软开关技术。在逆变器电路中有采用负载谐振创造软开关条件,也有采用直流输入侧谐振创造软开关条件,还有在变换电路内部产生部分谐振创造软开关条件。将软开关技术应用到逆变器电路中,也是近年来主要的研究领域。

1.1 软开关技术的提出及实现策略

讨论和研究开关电路时,如果不是明确指出是软开关,一般都是指硬开关而言的。硬开关,是指开关器件工作在硬开关(Hard switching)状态。图 1-1 是开关管开关时的电压波形和电流波形。由于开关管不是理想器件,在导通时开关管的电压不是立即下降到零,而是有一个

下降时间,同时它的电流也不是立即上升到负载电流,也有一个上升时间。在这段时间里,电流和电压有一个交叠区,产生损耗,称为导通损耗(Turn-on loss)。当开关管关断时,开关管的电压不是立即从零上升到电源电压,而是有一个上升时间,同时它的电流也不是立即下降到零,也有一个下降时间。在这段时间里,电流和电压也有一个交叠区,产生损耗,称为关断损耗(Turn-off loss)。因此在开关管开关工作时,要产生导通损耗和关断损耗,统称为开关损耗(Switching loss)。在一定条件下,开关管在每个开关周期中的开关损耗是恒定的,变换器总的开关损耗与开关频率成正比,开关频率越高,总的开关损耗越大,变换器的效率就越低。开关损耗的存在限制了变换器开关频率的提高,从而限制了变换器的小型化和轻量化。

开关管工作在硬开关时还会产生高的 di/dt 和 du/dt ,从而产生大的电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)。图 1-2 所示为接感性负载时,开关管工作在硬开关条件下的开关轨迹,图中虚线为双极型晶体管的安全工作区(Safety Operation Area, SOA),如果不改善开关管的开关条件,其开关轨迹很可能会超出安全工作区,导致开关管的损坏。

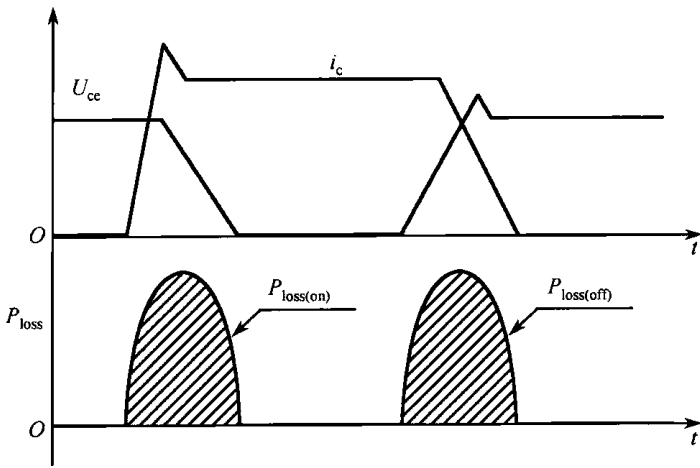


图 1-1 开关管开关时的电压波形和电流波形

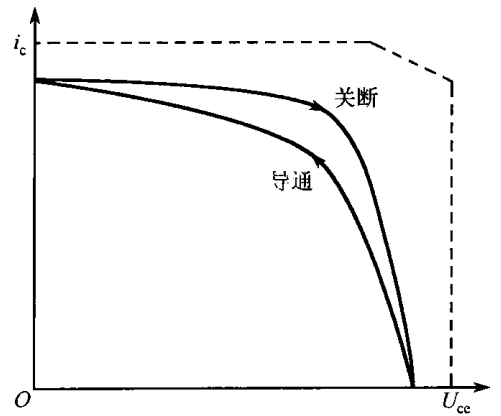


图 1-2 开关管工作在硬开关条件下的开关轨迹

减小开关损耗的途径就是实现开关管的软开关(Soft switching),因此软开关技术应运而生。图 1-3 所示为开关管实现软开关的波形图。

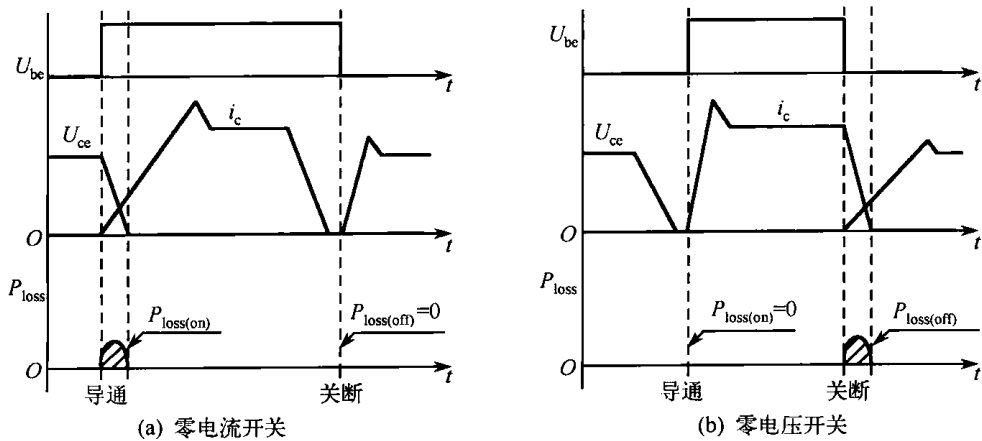


图 1-3 开关管实现软开关的波形图

从前面的讨论可以知道,开关损耗包括导通损耗和关断损耗。减小导通损耗有以下几种方法:

(1) 在开关管导通时,使其电流保持在零,或者限制电流的上升率,从而减小电流与电压的交叠区,这就是零电流导通。从图 1-3(a)可以看出,导通损耗大大减小。

(2) 在开关管导通前,使其电压下降到零,这就是零电压导通。从图 1-3(b)可以看出,导通损耗基本减小到零。

(3) 同时做到(1)和(2),在这种情况下,开关损耗为零。

从图 1-3 中可以看出减小关断损耗有以下几种方法:

(1) 在开关管关断前,使其电流减小到零,这就是零电流关断。从图 1-3(a)可以看出,关断损耗基本减小到零。

(2) 在开关管关断时,使其电压保持在零,或者限制电压的上升率,从而减小电流与电压的交叠区,这就是零电压关断。从图 1-3(b)可以看出,关断损耗大大减小。

(3) 同时做到(1)和(2),在这种情况下,关断损耗为零。

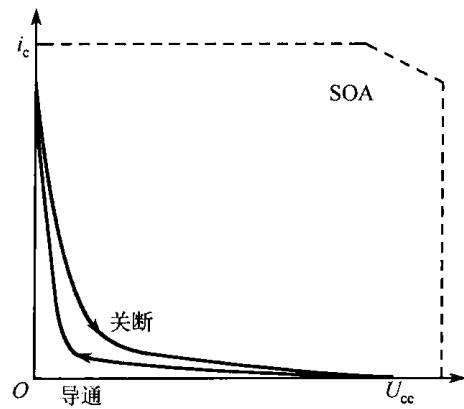


图 1-4 开关管工作在软开关条件下的开关轨迹

图 1-4 所示为开关管工作在软开关条件下的开关轨迹,从图中可以看出,此时开关管的工作条件很好,不会超出安全工作区。

1.2 软开关技术发展历程及趋向

自 20 世纪 50 年代末晶闸管问世,电力电子的新时代诞生以来,信息技术的进步推动了电力电子技术的深入研究和广泛应用。40 多年间电力电子技术进步和发展的历史进程有三大标志:电力半导体器件、高频化和软开关技术、电力电子系统的集成技术。

从 20 世纪 70 年代末到 90 年代初,高频化和软开关技术的开发研究,使电力电子功率变换器性能更好,重量更轻,尺寸更小。高频化和软开关技术是过去 20 年国际电力电子界研究的热点之一,已研究开发并得到应用的各种高频软开关技术见表 1-1。

表 1-1 软开关技术发展过程

提出时间	软开关技术	开关电源中应用
20 世纪 70 年代	串联谐振或并联谐振	半桥或全桥
20 世纪 80 年代初	有源钳位 ZVS	主要是单端
20 世纪 80 年代中	准谐振或多谐振	单端或桥式
20 世纪 80 年代末	ZVS/ZCS-PWM ^①	单端或桥式
20 世纪 80 年代末	移相全桥 ZVS-PWM	全桥
20 世纪 90 年代初	ZVT/ZCT-PWM ^② 移相全桥混合 ZVS/ZCS-PWM	全桥

注:① ZVS/ZCS-PWM 变换技术是 PWM 变换技术和 ZVS/ZCS 准谐振变换技术的综合。

② ZVT/ZCT-PWM 变换技术是另一种形式的零电压/零电流开关技术。

20 世纪 90 年代中期,30A/48V 开关变换器采用移相全桥 ZVS-PWM 技术后,比用 PWM 技术的同类产品重量下降了 40%。软开关技术的开发和应用,提高了开关变换器的效率。20 世纪末,国内生产的通信用 50~100A 输出电流、移相全桥 ZVZCS-PWM 开关变换器模块的

效率超过 93%。

对于低电压大电流输出的开关变换器,进一步提高其效率的措施是,在应用软开关技术的基础上,以电力 MOS 管反接作为整流用开关二极管,称为同步整流(Synchronous Rectifier, SR),代替肖特基二极管(SBD)可降低整流管压降,从而提高电路效率。有报道称,应用软开关和同步整流等技术的小功率 DC-DC 变换器,48V/12V 模块的效率达到 96%、48V/5V 模块的效率可达到 92%~93%。

日本文献报道了一台 100W 输出的软开关(ZVS)变换器的试验结果,用肖特基二极管的变换器效率为 83%,电路损耗(包括整流器件、变压器、开关器件、控制电路、滤波器等)为 21W;而用同步整流的变换器效率为 90%,电路损耗仅为 11W。

目前,软开关技术已在国内外多种开关变换器中广泛应用。然而要想实现开关频率为兆赫级软开关电源的实用化,仅依赖电路拓扑的开发是很困难的,在很大程度上,还有赖于半导体开关器件性能的改善,以及封装技术的进步等。

今天继续研究软开关技术及其应用仍是有现实意义的。例如,新型开关器件的出现及开关器件性能的提高,需要研究最佳软开关变换器拓扑,深入持久地普及和推广已开发的软开关技术及电路拓扑,研究和开发在新的条件下应用软开关技术的可能性及适用于软开关技术的新领域。

1.3 ZCS、ZVS、ZCS PWM、ZVT PWM 变换器软开关技术简介

1.3.1 ZCS 变换器

如图 1-5(a)所示,在开关管支路上串联电感,是 ZCS(Zero Current Switching)的基本思路。开关器件导通时,抑制 di/dt ,消除开关管上的电压 U 、电流 i 的重叠时间,从而不会产生开关损耗。为确保开关器件的安全,在开关管关断之前,串联电感上的能量要释放为零(电流为零)。

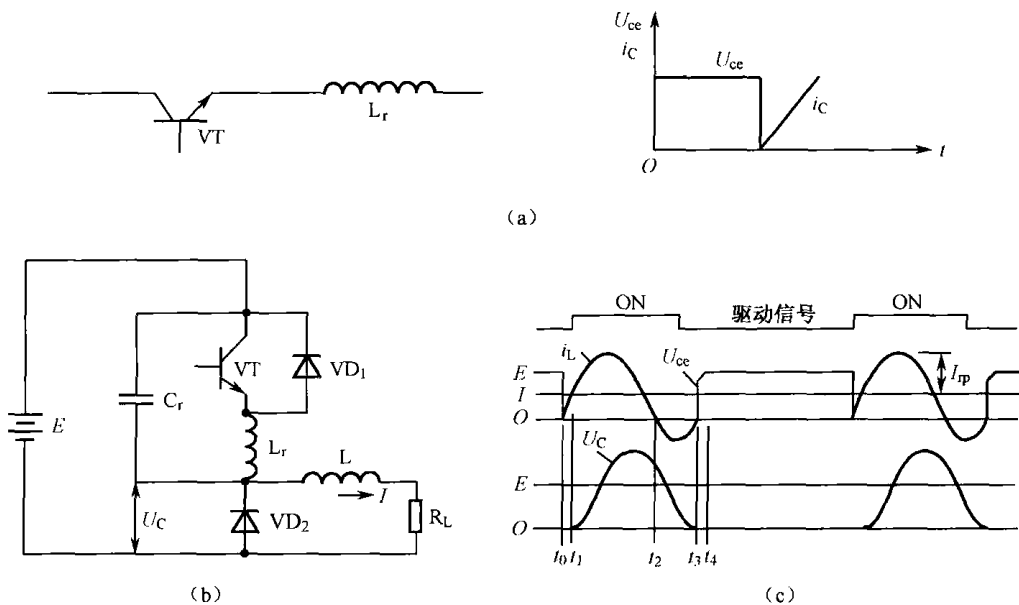


图 1-5 ZCS 型准谐振变换器的基本结构

图 1-5(b)是 ZCS 型准谐振变换器的基本结构。该方案利用串联电感实现 ZCS 导通,谐振时电感放电,再利用反并联二极管进行关断。在反向导通的开关器件上串联谐振电感 L_r ,外侧并联谐振电容 C_r ,形成零电流谐振开关。图 1-5(c)为电压电流波形, t_0 时刻驱动开关管导通,由于 L_r 的初始电流为零,开关动作属于 ZCS。

谐振开关在 $t_0 \sim t_4$ 期间有一连串动作,中途不能停止,输出电压为 U_c 的平均值,以固定导通时间进行控制。该变换器没有开关器件和续流二极管之间的短路状态,导通和关断都属于 ZCS 型。

利用 ZCS 方式使器件导通时,开关器件的极间电容上积蓄的电荷都短路掉,能量没有充分利用。因此,一般 ZCS 只用在 500kHz 以下开关动作的场合。

1.3.2 ZVS 变换器

如图 1-6(a)所示,在开关管上并联电容,是 ZVS(Zero Voltage Switching)的基本思路。开关管关断时,抑制 du/dt ,消除 u, i 重叠时间,避免产生开关损耗。可在任意时刻以 ZCS 关断。开关管导通之前,并联电容上的电荷要放完,以确保开关管的安全。

图 1-6(b)是 ZVS 准谐振变换器的基本结构。这种方式是利用并联电容使开关器件 ZVS 导通,由于谐振电容放电,并通过串联二极管导通而工作。在开关管 VT 上并联谐振电容 C_r ,其外侧串联谐振电感 L_r ,构成零电压谐振开关。图 1-6(c)是其电压电流波形。

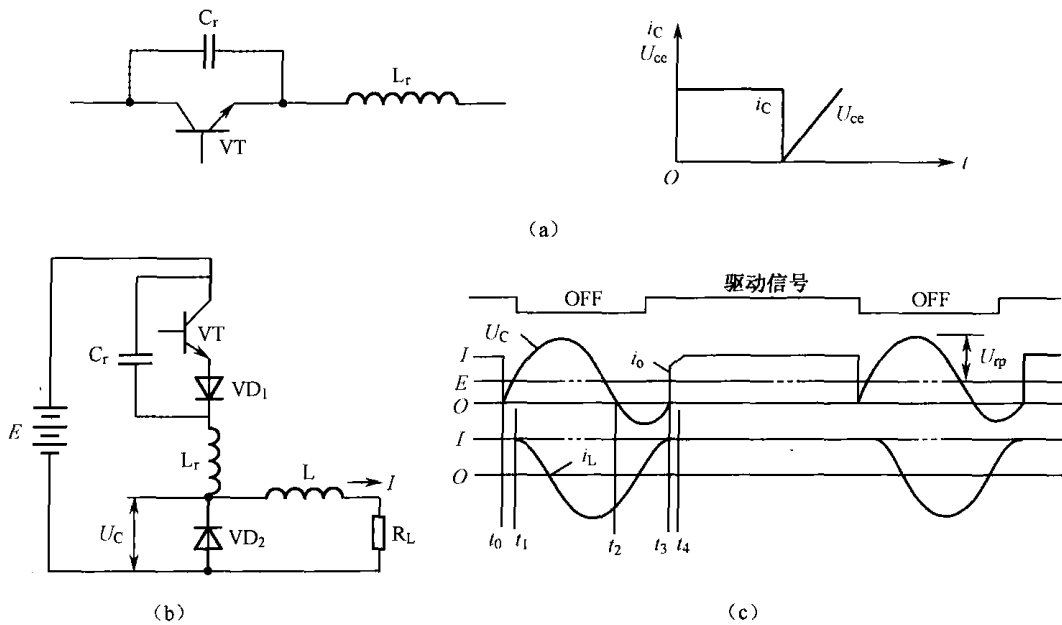


图 1-6 ZVS 型准谐振变换器

该变换器的关断时间是固定的,通过控制频率可以控制输出电压 U_o 。准谐振 ZVS 实现零电压导通条件是,谐振电压的峰值高于电源电压。

谐振 ZVS 开关器件的极间电容是谐振电路的一部分,不造成损耗,适用于 500kHz 以上的高频动作,但负载范围窄,只适用固定负载或接近于固定的负载。

1.3.3 ZCS PWM 变换器

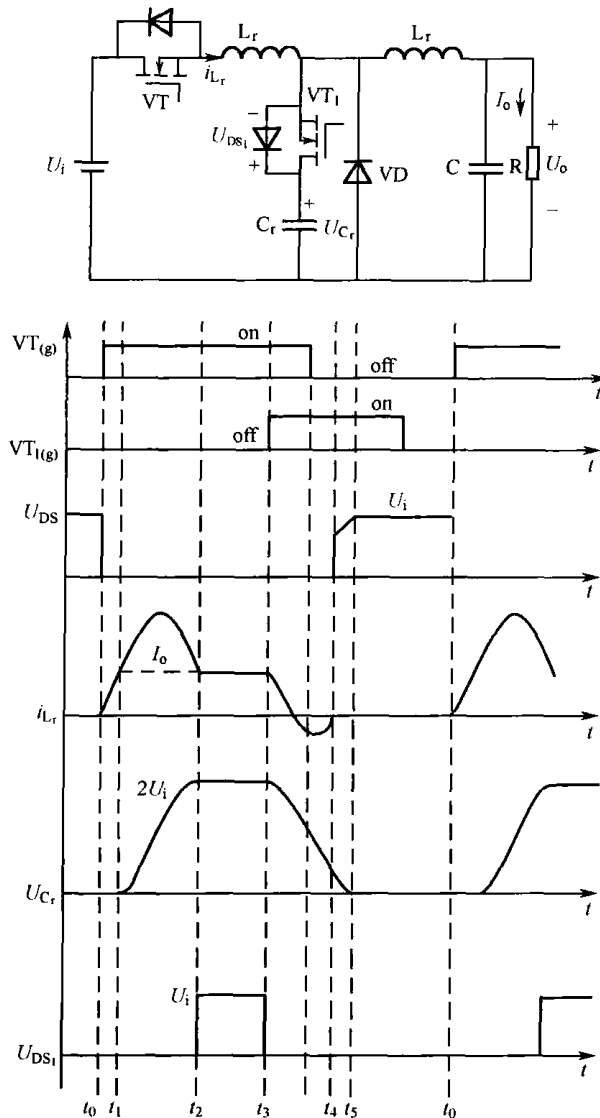
当外部电路电流流经图 1-7(a)所示二极管 VD 时,开关管 VT 处于零电压、零电流状态。

此时导通或关断开关管 VT, 都是 ZVS、ZCS 动作。外部电路由 LC 无源器件、辅助开关等谐振电路组成, 也有同时使用电感和电容的情况。谐振型变换器兼用了反并联二极管的 ZCS 和 ZVS 的功能。

图 1-7(b) 所示为谐振型 ZCS PWM 降压式变换器的主电路及波形图, 图中 $VT_{1(g)}$ 和 $VT_{(g)}$ 分别表示辅助开关管 VT_1 和主开关管 VT 的驱动信号, U_{DS} 、 U_{DS1} 和 U_{C_r} 分别为 VT、 VT_1



(a) 反并联二极管结构



(b) Buck 型 ZCS-PWM 变换器电路及波形

图 1-7 反并联二极管结构及 ZCS PWM 变换器电路

和谐振电容 C_r 两端的电压, i_{L_r} 为流过 VT 和谐振电感 L_r 的电流。与谐振式 ZCS 相比, 多了一个与谐振电容 C_r 串联的辅助开关管 VT_1 , 主开关管 VT 与谐振电感 L_r 串联。设 $t < t_0$ 时。主开关管 VT 和辅助开关管 VT_1 均关断, $t = t_0$ 时, 令主开关管 VT 导通。一周内有 6 种运行模式, 见表 1-2。

表 1-2 Buck 型 ZCS PWM 变换器一周期的运行模式

模 式	1	2	3	4	5	6
特征	i_{L_r} 线性上升	准谐振	i_{L_r} 恒流	准谐振	C_r 恒流放电	续流
VT	导通	导通	导通	通→断	关断	关断
VT_1	关断	关断	关断	导通	导通	通→断
U_{DS}	0	0	0	0	$\approx U_i$	U_i
i_{L_r}	上升到 I_o	$I_o +$ 正弦	I_o	下降变负	0	0
状态		QRC	PWM	QRC		PWM

Buck 型 ZCS-PWM 变换器的主开关最大电压钳定在 U_i , 最大电流 $I_{max} = I_o + U_i/Z_n$ 发生在模式 2 准谐振阶段, $Z_n = \sqrt{L_r/C_r}$ 为特征阻抗。

ZCS-PWM 变换器的优点是: ①主开关器件及辅助开关器件零电流关断; ②恒频控制; ③主开关电压应力小; ④续流二极管 VD 零电压关断。缺点是: ①主开关电流应力大; ②谐振电感与主开关串联, 满足零电流开关条件的电源电压, 负载电流变化范围窄; ③续流二极管 VD 电压应力等于 $2U_i$; ④谐振网络未吸收主开关管结电容能量, 关断时有寄生振荡。

1.3.4 ZVT PWM 变换器

图 1-8 所示为 ZVT PWM 变换器的主电路结构。主开关管 VT 导通前, 使辅助开关管 VT_1 导通, L_r 、 L 有电流通过。VD 关断后, 由于 L_r 、 C_r 谐振, C_r 放电。放电结束后, 使 VT 以 ZVS 导通。此后, 使 VT_1 关断, L_r 的电流经过 VD_1 返回电源。任意时刻使 VT 关断, 由于 C_r 存在, VT 是以 ZVS 关断的。

优点: VT、VD 都是软开关动作, 耐压和电流有效值与硬开关 PWM 一样。

缺点: VT_1 导通是软开关, 而关断是硬开关。因电流有效值小, 使用高速器件更好。

主开关器件使用 IGBT, 开关频率为 100kHz, 600W 的升压 DC-DC 变换器, 效率可达 97.3%。增加电容和二极管, 辅助开关器件的关断也可实现 ZVS。

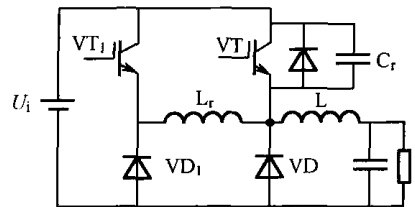


图 1-8 ZVT PWM 变换器的主电路结构

1.3.5 ZCT PWM 变换器

ZCS PWM 变换器的谐振电路与主电路并联, 使主电路的电流不通过谐振电感, 则主开关器件的峰值电压和电源电压相等, 不会增加谐振电感引起的导通损耗, 效率与硬开关 PWM 相同。

图 1-9 所示为 ZCT PWM 变换器的结构图。开关动作时, 谐振的反向电流提供给主开关管 VT 和续流二极管 VD。VD 导通期间, C_r 的电压是左正右负。

先触发辅助开关管 VT_1 导通, 通过 VT_1 、VD 流过谐振电流, 谐振电流反方向时, VT_1 反