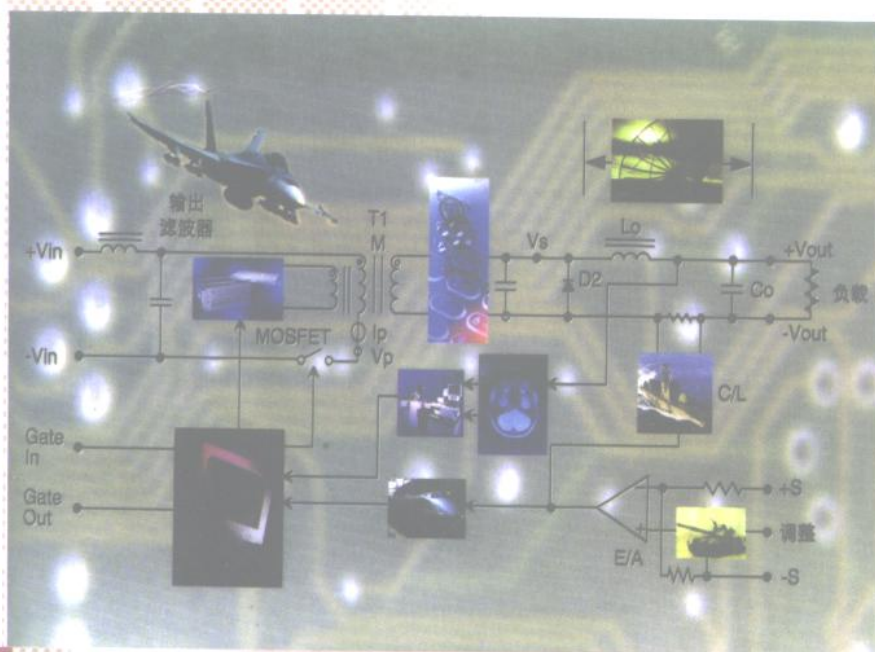


科

TIN624



科学出版社

实用电源技术丛书

不连续导电模式 高功率因数开关电源

严百平 刘 健 程红丽 著

国家自然科学基金和中国博士后研究基金资助

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书系统地论述不连续导电模式(DCM)功率因数校正(PFC)开关变换器的组成、基本原理和分析方法,还讨论了这类变换器的稳定性以及软开关技术和开关电容功率变换技术在PFC电路中的应用等。本书共分九章,内容包括:绪论,基本电压跟随器功率因数校正电路及其临界条件,boost-buck组合功率因数校正电路,用开关电容网络改善传统DC-DC变换器的性能,开关电容boost-buck组合功率因数校正电路,单位功率因数单相开关变换器的输出电压纹波,PFC DCM组合开关变换器输出电压的稳定范围,零电压开关电压跟随器功率因数校正电路,不连续导电模式PFC开关电源的设计。

本书适合从事开关电源研究、开发、生产和使用的技术人员和管理人员阅读,也可供高等学校教师、研究生和高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

不连续导电模式高功率因数开关电源/严百平,刘健,程红丽著.-北京:科学出版社,2000

(实用电源技术丛书)

ISBN 7-03-008361-X

I. 不… II. ①严… ②刘… ③程… III. 开关-变换器 IV. TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第09418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

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2000年7月第一次印刷 印张:10 1/4

印数:1—2 500 字数:221 000

定价:20.00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

谐波是电力系统的大敌。直接接入电网的开关电源的应用已经非常普遍,若不采取措施,其采用二极管整流、电容滤波的整流环节会使其输入电流严重畸变,不仅对电网产生严重的谐波污染而且造成开关电源的功率因数较低。对于数量多而且分散的中小功率单相电源系统,最理想的方法是在电源内部采取功率因数校正(PFC)措施,从根本上消除谐波源。随着 IEC 555-2 等国际标准的提出,对于接入电网的设备的功率因数和总谐波含量提出了很高的要求,因此更有必要研究电源内部的 PFC 技术,为设备的更新换代作好准备。

在不连续导电模式(DCM)下,通过恰当设计,几乎所有类型的开关变换器都可以实现功率因数补偿,并且具有控制简单、成本低廉和便于应用的优点。近年来提出的单级组合 PFC 变换器更加表现出其优越性。

但至今对于 PFC 开关变换器的临界条件、稳态特性以及输入电流畸变等的研究还很不深入。采用单级结构后,由于 PFC 和 DC-DC 变换部分存在不可避免的相互联系,因此有必要研究这类变换器的稳定性,以便设计出达到期望性能指标的开关电源。

随着软开关技术和开关电容功率变换技术的成熟和发展,在 DCM PFC 开关电源中运用这些新技术不仅可行而且还能带来显著的优良性能,如较高的转换效率、较低的应力和电磁干扰(EMI)以及较宽的输出电压稳定范围等。

作者对于上述问题进行了系统的研究,本书就是结合这些研究成果写成的。书中许多概念、拓扑结构和分析方法是首次提出的,难免存在不妥之处,望读者批评指正。

本工作得到国家自然科学基金和中国博士后研究基金资助;后期工作得到开曼迈瑞电子公司总裁李西廷先生的关心和支持,作者在此表示感谢。在成书过程中,杨耕教授、刘树林副教授、杜忠博士和杨旭博士给予大力支持和帮助,作者在此一并表示感谢。

谨以本书献给我们敬爱的老师陈治明教授、王兆安教授和钟颜儒教授。

作 者

1999 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 PFC 技术的发展	2
1.3 PFC 技术的分类	3
1.4 基本 PFC 技术	4
1.4.1 乘法器 PFC 技术	4
1.4.2 电压跟随器 PFC 技术	5
1.4.3 新型无源 PFC 技术	6
1.4.4 PFC 中的软开关技术	6
1.4.5 其他 PFC 技术	7
1.5 PFC 技术的发展方向	7
1.6 本书研究的内容	8
1.7 一些基本定义	9
第二章 基本电压跟随器功率因数校正(PFC)电路及其临界条件	10
2.1 电压跟随器 PFC 电路的基本原理	10
2.2 基本 DC-DC 变换器的临界条件	12
2.3 PFC 电路与 DC-DC 变换器的区别	12
2.4 基本变换器构成的电压跟随器 PFC 电路及其临界条件	13
2.4.1 基于 buck 变换器的 PFC 电路	13
2.4.2 基于 boost 变换器的 PFC 电路	18
2.4.3 基于 buck-boost 变换器的 PFC 电路	23
2.4.4 基于 Zeta 变换器的 PFC 电路	26
2.4.5 基于 Cuk 和 Sepic 变换器的 PFC 电路	32
2.5 本章结论	37
第三章 boost-buck 组合功率因数校正电路	38
3.1 boost-buck 组合 DC-DC 变换器	38
3.1.1 boost-buck 组合 DC-DC 变换器的基本拓扑结构	38
3.1.2 boost-buck 组合 DC-DC 变换器的临界条件	39
3.1.3 boost-buck 组合 DC-DC 变换器的电压变比	41
3.1.4 实例与数字仿真结果	41
3.2 电压跟随器型 boost-buck 组合 PFC 电路	42
3.2.1 boost-buck 组合 PFC 电路的拓扑结构	42
3.2.2 电压跟随器型 boost-buck 组合 PFC 电路的电压变比	44

3.2.3	电压跟随器型 boost-buck 组合 PFC 电路的临界条件	44
3.2.4	电压跟随器型 boost-buck 组合 PFC 电路的输出特性	46
3.2.5	电压跟随器型 boost-buck 组合 PFC 电路的器件应力	46
3.3	隔离非耦合 Cuk PFC 电路	48
3.4	电压跟随器型 boost-buck 组合 PFC 电路的设计实例	49
3.5	仿真与实验研究	50
3.5.1	数字仿真结果	50
3.5.2	实验结果	51
3.6	本章结论	53
第四章	用开关电容网络改善传统 DC-DC 变换器的性能	55
4.1	引言	55
4.2	典型开关电容网络	55
4.2.1	串并电容组合结构	55
4.2.2	反转极性开关电容网络	56
4.2.3	推挽开关电容网络	56
4.3	开关电容 buck DC-DC 变换器	58
4.3.1	基本 buck DC-DC 变换器的组成和性能	58
4.3.2	开关电容 buck DC-DC 变换器	59
4.4	开关电容 boost DC-DC 变换器	62
4.4.1	基本 boost DC-DC 变换器的稳态特性	63
4.4.2	SP-SC boost DC-DC 变换器	64
4.4.3	RSC boost DC-DC 变换器	64
4.4.4	Push-Pull SC boost DC-DC 变换器	65
4.5	开关电容网络和其他 DC-DC 变换器的结合	67
4.5.1	SP-SC buck—boost DC-DC 变换器	67
4.5.2	SP-SC Cuk DC-DC 变换器	68
4.6	本章结论	69
第五章	开关电容 boost-buck 组合功率因数校正电路	72
5.1	开关电容 boost-buck DC-DC 变换器	72
5.1.1	开关电容 boost-buck DC-DC 变换器的拓扑结构	72
5.1.2	开关电容 boost-buck DC-DC 变换器的工作状态	72
5.1.3	开关电容 boost-buck 组合 DC-DC 变换器的临界条件	73
5.1.4	开关电容 boost-buck DC-DC 变换器的电压变比	75
5.1.5	开关电容 boost-buck DC-DC 变换器的实验结果	76
5.2	开关电容 boost-buck PFC 电路	79
5.2.1	开关电容 boost-buck PFC 电路的拓扑结构	79
5.2.2	开关电容 boost-buck PFC 电路的工作原理	79
5.2.3	开关电容 boost-buck PFC 电路的临界条件	80

5.2.4	电压跟随器型开关电容 boost-buck PFC 电路的元器件应力	81
5.2.5	SC boost-buck PFC 电路的设计、仿真与实验研究	82
5.3	本章结论	86
第六章	单位功率因数单相开关变换器的输出电压纹波	87
6.1	引言	87
6.2	单位功率因数单相开关变换器的统一宏模型	87
6.3	采用功率匹配法分析变换器的输出电压纹波	88
6.4	采用等效电流源法分析变换器的输出电压纹波	90
6.5	讨论	91
6.6	实验验证	92
6.7	本章结论	93
第七章	PFC DCM 组合开关变换器输出电压的稳定范围	94
7.1	引言	94
7.2	单级 PFC DCM 组合变换器的稳定性	94
7.3	PFC DCM boost 正激组合变换器的稳态特性	96
7.3.1	PFC DCM boost 正激组合变换器的组成	96
7.3.2	PFC DCM boost 正激组合变换器的稳态特性	98
7.3.3	实验结果	100
7.3.4	结 论	101
7.4	PFC DCM 单级 boost 正激组合变换器的临界条件	101
7.4.1	电感 L_1 工作在 CCM 和 DCM 的临界条件	101
7.4.2	电感 L_2 工作在 CCM 和 DCM 的临界条件	103
7.4.3	输入电流	103
7.4.4	实验结果	104
7.4.5	结 论	104
7.5	PFC DCM boost-buck 组合变换器的稳定性	104
7.5.1	基本原理	104
7.5.2	实验研究	107
7.5.3	结 论	107
7.6	采用开关电容扩大 PFC DCM 组合开关变换器输出电压的稳定范围	108
7.6.1	基于开关电容网络的 PFC DCM boost-buck 组合变换器	108
7.6.2	开关电容 PFC DCM boost-buck 组合变换器的稳定性	108
7.6.3	开关电容 PFC DCM boost-buck 组合变换器的稳定范围	109
第八章	零电压开关电压跟随器功率因数校正电路	111
8.1	ZVS DC-DC 变换器	111
8.1.1	基本拓扑	111
8.1.2	稳态工作模式	112

8.2	ZVS PFC 电路	115
8.2.1	拓扑结构	115
8.2.2	临界条件	115
8.2.3	电感 L_2 的选择	117
8.2.4	控制电路	117
8.2.5	设计和模拟结果	117
8.3	ZVS 谐振 PFC 电路	118
8.3.1	拓扑结构描述	118
8.3.2	基本工作模式	119
8.3.3	临界条件	121
8.3.4	电压变比	122
8.3.5	仿真和实验结果	123
8.4	本章结论	126
第九章	不连续导电模式 PFC 开关电源的设计	127
9.1	TOPswitch-Ⅱ 简介	127
9.2	主电路及其设计	129
9.2.1	PFC 主电路拓扑结构	129
9.2.2	主电路设计	132
9.3	设计实例	140
参考文献		147

第一章 绪 论

1.1 引 言

在大部分用电设备中,工作电源直接来自交流电网,但是几乎所有的电子线路均必须采用直流供电,因此 AC-DC 变换器成为电子产品的必不可少的部分。最简单的 AC-DC 变换器由普通二极管整流桥实现,其输出是不可调节的直流电压 V_d ,一个大电容 C_d 用来滤除低频纹波(见图 1.1)。使用二极管整流桥作为电网与用电设备的接口时,由于二极管导通角很小,因此电网仅在每个工频周期的一小部分时间里给负载提供能量。其典型的输入电流波形如图 1.2 所示,这样的电流波形包含丰富的高次谐波。表 1.1 为单相整流环节输入电流波形谐波含量的典型值。

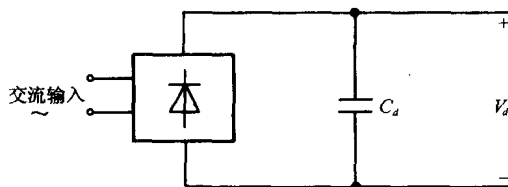


图 1.1 简单的二极管单相整流 AC-DC 变换器

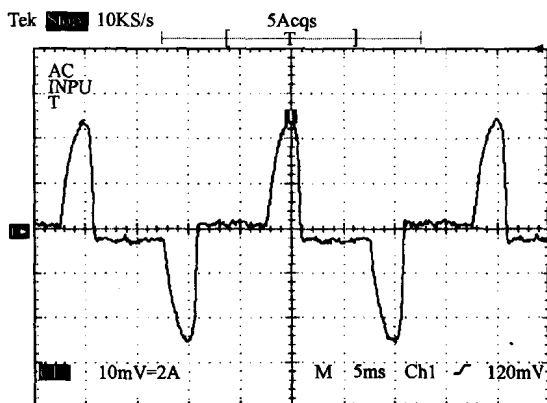


图 1.2 普通二极管单相整流桥对应的输入电流波形

表 1.1 单相整流 AC-DC 变换器输入电流谐波含量的典型值

谐波含量	3	5	7	9	11	13	15	17
$\left(\frac{I_h}{I_1}\right) \%$	73.2	36.6	8.1	5.7	4.1	2.9	0.8	0.4

为了说明谐波电流对电网的影响,考虑一个简单的例子,如图 1.3 所示,图中每一相电源的内阻抗等效为 Z_s 。因此,谐波电流越大(或 Z_s 越大),公共点(PCC)的电压畸变就越明显。

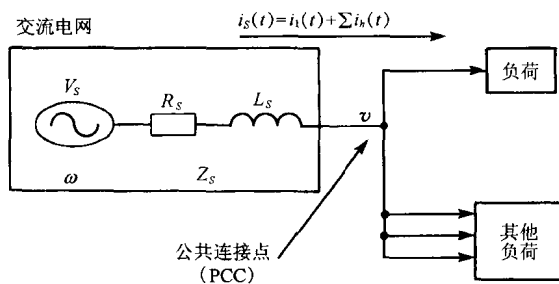


图 1.3 谐波电流对电网的影响

电流波形的畸变及因此产生的网侧电压波形的畸变给系统本身和周围的环境带来一系列的灾害:对电力系统产生污染、对通信系统产生干扰,还可引起仪器仪表和保护装置的误测量、误动作。这就是通常所说的“谐波污染”。随着用电设备日益增多,谐波污染问题引起了越来越广泛的关注。显然,使用有效的校正技术把谐波污染控制在较小的范围已是当务之急。

基于限制电流波形畸变和谐波,使电磁环境更加干净的宗旨,一些世界性的学术组织提出了谐波限制标准,如 IEC555-2, IEEE519 等。其中 IEC555-2 标准自 1994 年起已在欧盟国家全面实施,所有在欧盟市场销售的用电装置都必须满足这一标准。采用现代高频功率变换技术的有源功率因数校正(PFC)技术是解决谐波污染最有效的手段。与传统的 PFC 电路相比,有源 PFC 电路的输入电流接近正弦波且与输入电压同相位,因此避免了对同一电网上其他用电设施的干扰。

1.2 PFC 技术的发展

回顾 PFC 技术的发展历程可以看出,人们最早是采用电感器和电容器构成的无源网络进行功率因数校正。最简单的无源功率因数校正电路是在二极管整流桥前添加一个电感器。进一步改善输入电流波形的无源功率因数校正电路如图 1.4 所示。图中 C_{d1} 与 C_d 相比是一个容量较小的电容器,因此其上的电压可以随着输入电压而波动,这使输入整流二极管的导通角增大,从而使输入电流波形得到明显改善。

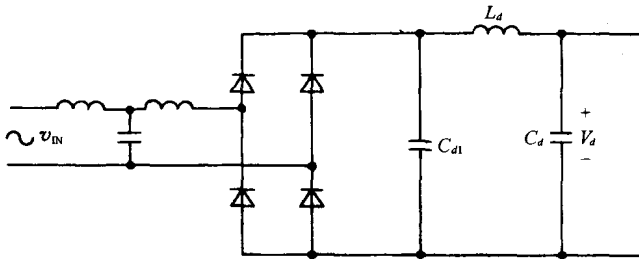


图 1.4 一种典型的无源功率因数校正(PFC)结构

作为无源功率因数校正电路的一个特例,一种利用电容器和二极管网络构成“串并电容组合结构”(又称“部分滤波器”)进行功率因数校正的填谷(Valley Fill)方式也应用于电子镇流器以及中小功率电源中。

采用无源功率因数校正技术,所需的滤波电容器和滤波电感器的取值较大,因此电路

往往较笨重;通过恰当地设计,采用填谷方式虽然能以较轻便的结构获得较高的输入功率因数,但是对于输入电流波形中的谐波电流的抑制效果却不是很好。

早期的有源功率因数校正电路是晶闸管电路^[1,2]。进入 70 年代以后,随着功率半导体器件的发展,开关变换技术突飞猛进,到 80 年代,现代有源 PFC 技术应运而生。由于变换器工作在高频开关状态,这种有源功率因数校正技术具有体积小、重量轻、效率高、功率因数可接近 1 等优点。80 年代的有源功率因数校正技术可以说是基于 boost 变换器的功率因数校正的年代,在此期间的工作主要集中在对工作在连续导电模式(CCM)下的 boost 变换器的研究上^[3,4],这类变换器的各种控制方式一般是基于所谓“乘法器”(Multiplier)的原理;连续导电模式下的功率因数校正技术可以获得很大的功率转换容量,但是对于大量应用的 200W 以下的中、小功率容量的情形,却不是非常合适的,因为这种方式往往需要较复杂的控制方式和电路。80 年代末提出了利用工作在不连续导电模式(DCM)下的变换器进行功率因数校正的技术,由于其输入电流自动跟随输入电压,因而可实现接近 1 的输入功率因数^[5,6]。这种 PFC 技术在文献中称为自动功率因数校正,也称为电压跟随器(Voltage Follower)。这种有源功率因数校正技术因其控制简单(仅采用一个控制量,即输出电压)而倍受青睐,但是一般不能应用于较大的功率变换中。80 年代是现代有源功率因数校正技术发展的初级阶段,这一时期提出的一些基本技术是有源功率因数校正技术的基础。

90 年代以来,有源功率因数校正技术取得了长足的进展。1992 年以前的 PESC Records(IEEE 电力电子专家会议文集)上有关功率因数校正技术的报道很少。自 1992 年起,PESC 设立了单相功率因数校正专题,这被看作是单相有源功率因数校正技术发展的里程碑。这次会议上,有关电压跟随器型功率因数校正技术的报道占了几乎一半,有关软开关功率因数校正技术也是这个专题的一项主要内容。到 1994—1995 年,PESC 上有关功率因数校正技术报道的一个主要内容是把软开关技术和通常的功率因数校正技术结合以提高功率因数校正电路的性能。近年来,有关连续导电模式下功率因数校正的控制新方法的研究也有不少报道,主要有单周期(One Cycle)控制、滑模(Sliding Mode)控制以及其他新控制方法。同时,也提出了一些新颖的功率因数校正原理及拓扑结构。

1.3 PFC 技术的分类

从不同的角度看,功率因数校正技术有多种分类方法。从电网供电方式可分为单相 PFC 电路和三相 PFC 电路。从电路构成来看可分为无源 PFC 电路和有源 PFC 电路。过去,有源 PFC 电路是借助于晶闸管电路实现的,如今这种电路只在变换功率很大时才使用。基于现代高速半导体开关器件的现代高频功率电子电路构成了现代有源功率因数校正电路的主流。为了对单相 PFC 技术有一个比较全面的了解,下面对其作一简单分类。

一般认为有两种基本的有源功率因数校正技术,一种是变换器工作在连续导电模式的“乘法器”型(Multiplier);另一种是变换器工作在不连续导电模式的“电压跟随器”型(Voltage Follower)。实际上,这两类技术并不能完全囊括有源功率因数校正的所有技术,比如还有磁放大 PFC 技术、三电平(Three-Level)PFC 技术和不连续电容电压模式(DCVM)PFC 技术等。

还可以从采用的软开关技术的角度进一步对上述两种方式的有源功率因数校正技术加以分类。

从软开关特性来划分,有源 PFC 电路可分为两类,第一类是零电流开关(Zero Current Switching, 简称为 ZCS) PFC 技术,第二类是零电压开关(Zero Voltage Switching, 简称为 ZVS) PFC 技术。按实现软开关的具体方法还可以进一步划分,有并联谐振型(Parallel Resonant Converter, 简称为 PRC)、串联谐振型(Serial Resonant Converter, 简称为 SRC)、串并联谐振型(Serial Parallel Resonant Converter, 简称为 SPRC;也叫 LCC)以及准谐振型(Quasi-Resonant Converter, 简称为 QRC)等软开关谐振有源功率因数校正技术。

从控制方法来分,有源功率因数校正电路可以采用脉宽调制(PWM)、频率调制(FM)、单环电压反馈控制、双环电流模式控制、数字控制、滑模(Sliding Mode)控制以及单周期(One Cycle)控制以及其他各种控制方法。

从拓扑结构上划分,有源功率因数校正电路可以分为预调整器型(Preregulator)PFC 电路以及单级组合 PFC 变换器两种形式,后者被认为是较理想的有源功率因数校正电路结构。

1.4 基本 PFC 技术

1.4.1 乘法器 PFC 技术

80 年代中期,有源功率因数校正技术的研究以乘法器方式为主,其基本原理如图 1.5 所示。图中 boost 变换器工作在连续导电模式,其电感电流就是输入电流。电感电流被采样并被控制,使其幅值与和输入电压同相位的正弦参考信号成正比,从而达到功率因数校正的目的;乘法器方式 PFC 电路还可以根据输出电压反馈信号,利用一个乘法器电路来控制正弦参考电流信号,从而获得可调整的输出电压。有关乘法器型 PFC 技术的控制方式可分为三种:即常频控制(Constant-frequency Control)、常误差带控制(Constant-tolerance-band Control)和变误差带控制(Variable-tolerance-band Control)。

目前,基于 boost 变换器的乘法器功率因数校正电路在工业上已得到广泛应用,其控

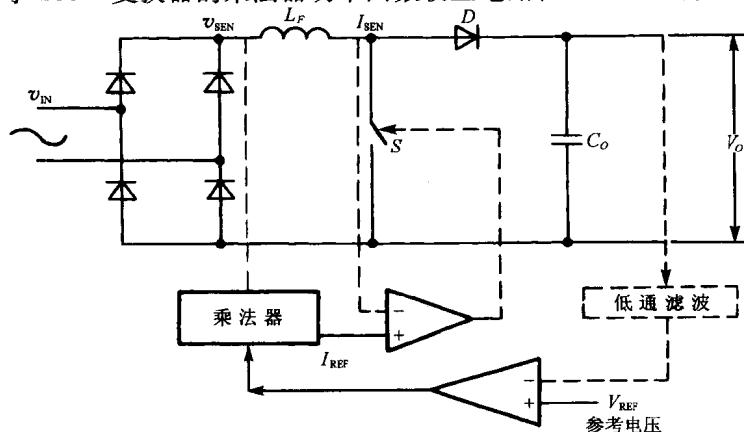


图 1.5 典型的乘法器方式 PFC 电路的组成

制电路已有单片集成电路实现,如 MC34262 等。

有关这一类有源功率因数校正电路的研究除了提出一些新的拓扑结构外,目前主要集中在各种新的控制技术的研究上,如滑模(Sliding Mode)控制以及单周期(One Cycle)控制等。

1.4.2 电压跟随器 PFC 技术

80 年代后期,Doc. S. D. Freeland 首先提出了利用不连续导电模式进行功率因数校正的概念,有人称之为自动功率因数校正。K. H. Liu 首先应用“电压跟随器(Voltage Follower)”这个词来描述这一类有源功率因数校正技术。

基本电压跟随器型 PFC 电路可用图 1.6 所示的 boost 变换器来说明。

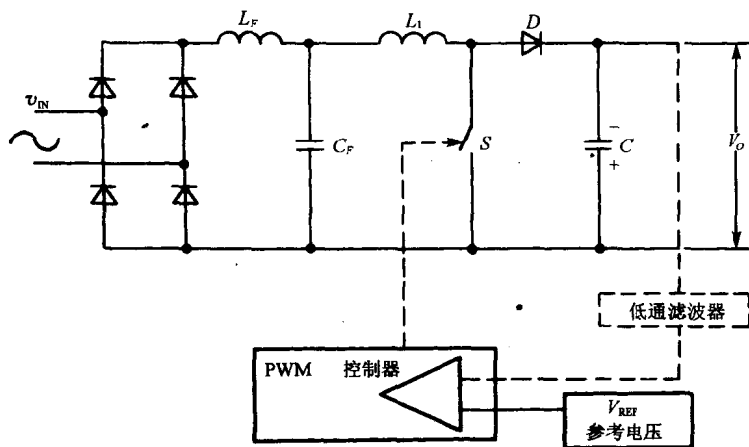


图 1.6 基于 boost 变换器的电压跟随器型 PFC 电路的组成

该变换器工作在不连续导电模式,开关 S 由输出电压误差信号控制,开关周期为常数。由于峰值电感电流基本上正比于输入电压,因此,输入电流波形自然地跟随输入电压波形。事实上,对不同的变换器结构,输入电流波形会出现不同程度的畸变,但这对输入功率因数的影响并不明显。与乘法器型 PFC 电路相比,电压跟随器型 PFC 电路的控制简单,仅需要一个输出电压控制开关。因此,多数现有的开关电源 PWM 控制用集成电路均可作为电压跟随器型 PFC 电路的控制器。而且,变换器工作在不连续导电模式下,就避免了 boost 变换器中因输出二极管反向恢复电流而带来的问题。

电压跟随器型 PFC 技术的一个缺点是其输入电流波形为脉动三角波。因此其前端需添加一个小容量的滤波电容以滤除高频纹波,实际上,一个 LC 低通滤波器会获得更为理想的滤波效果。这在一定程度上增加了电路的复杂性。另一个缺点是其较高的开关峰值电流会带来较大的开关关断损失。尽管如此,由于这种 PFC 技术控制简单,近年来对它的研究也最活跃。研究发现,所有基本变换器类型,如 buck、boost、buck-boost、Cuk、Sepic 和 Zeta 变换器等在不连续导电模式下都可用于构成电压跟随器方式的 PFC 电路,目前还在不断提出各种基于 DCM 的新的 PFC 电路。

有关电压跟随器型 PFC 电路的研究主要集中在对其性能的改进方面,如采用软开关技术、多导电模式以及新的拓扑结构,以提高其动态响应速度等。

尽管早期提出的 boost 型电压跟随器功率因数校正电路存在这样那样的缺点,但这并没有阻挡其在工业上应用的步伐。最近,已有利用 boost 型电压跟随器进行功率因数校正的集成电路投放市场。

1.4.3 新型无源 PFC 技术

近年来,无源功率因数校正技术也有所发展,典型的新型无源 PFC 技术就是利用电容二极管网络构成的填谷(Valley Fill)方式 PFC 整流电路,其基本结构如图 1.7 所示。当输入电压高于电容 C_1 和 C_2 上的电压时,两个电容处于串联充电状态;当输入电压低于电容 C_1 和 C_2 上的电压时,两个电容处于并联放电状态。由于电容和二极管网络的串并联特性,因此这种结构增大了二极管的导通角,从而使输入电流的波形得到改善。在图 1.7 中,用一个电阻或电感与二极管 D_2 串联可进一步改善输入电流波形^[7,8],这种无源功率因数校正方法可使功率因数达到 0.9 以上。

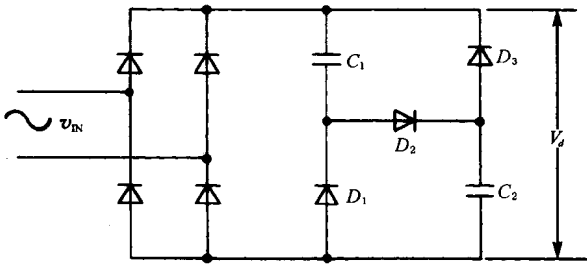


图 1.7 填谷方式 PFC 整流电路的组成

填谷方式 PFC 整流电路已应用于电子镇流器等小型电器设备,但是正如前文所述,这种方式虽然能够获得较高的输入功率因数,但是却不能很好地抑制输入电流中的谐波含量。

1.4.4 PFC 中的软开关技术

随着变换器开关频率的进一步提高,功率开关、二极管以及吸收电路(Snubbers)上的能量损失随开关频率增加,有源功率因数校正电路的效率将明显降低。这一点在电压跟随器方式的 PFC 电路中尤为突出。借助各种软开关技术进一步提高有源功率因数校正电路的性能是解决这一问题最有效的途径。

典型的零电流开关型(ZCS) PFC 电路的组成如图 1.8 所示。这个电路的基本结构和 PWM 型的 Sepic 变换器是一样的,然而它的功率开关是在零电流下开通和关断的。有两

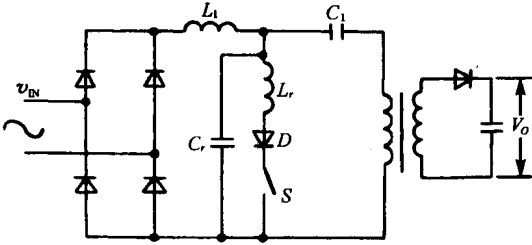


图 1.8 ZCS Sepic PFC 电路的组成