

电流型全桥单级APFC 变换器及其关键技术

孟 涛 著



科学出版社

电流型全桥单级 APFC 变换器 及其关键技术

孟 涛 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书对一种适合中、大功率领域应用的电流型全桥单级有源功率因数校正 (APFC) 变换器及其关键技术进行了系统的分析与研究, 介绍了该类单相、三相 APFC 变换器的拓扑结构与工作原理, 在此基础上, 揭示了该类变换器电压尖峰、起动、变压器偏磁以及输出电压纹波问题的产生机理。针对其电压尖峰问题, 在对有源箝位方法进行深入研究的基础上, 相继提出并实现了无源箝位的抑制方法、基于无源缓冲方式的抑制方法以及基于磁集成无源辅助环节的抑制方法; 针对其起动问题, 相继提出并实现了有损起动方法、基于 Buck 模式的单相 APFC 变换器起动方法以及基于 Flyback 模式的单相、三相 APFC 变换器起动方法; 针对其变压器偏磁问题, 提出并设计了一种基于死区调节的偏磁抑制方法; 针对其输出电压纹波问题, 提出并设计了一种基于辅助环节的单相 APFC 变换器输出电压纹波抑制策略。

本书可作为高等院校电力电子技术等相关专业硕士生、博士生的科研参考书, 也可供从事开关电源相关产品研究开发的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电流型全桥单级 APFC 变换器及其关键技术 / 孟涛著. —北京: 科学出版社, 2017.7

ISBN 978-7-03-053109-4

I. ①电… II. ①孟… III. ①单级—功率变换器—研究
IV. ①TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 124054 号

责任编辑: 王 哲 邢宝钦 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏志印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 7 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2017 年 7 月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 310 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

有源功率因数校正(Active Power Factor Correction, APFC)技术是抑制谐波电流、提高功率因数的有效方法。与传统的两级 APFC 相比,单级 APFC 具有结构简单、功率密度高、效率高等优点,是电力电子技术领域中的一项重要课题。目前,单级 APFC 技术在小功率领域的研究相对比较成熟,而在中、大功率领域的研究仍处于发展阶段。

电流型全桥单级 APFC 技术适合中、大功率领域应用。然而,目前该类 APFC 技术尚未得到广泛应用,主要是由于其电路本身存在以下问题:①桥臂电压尖峰大;②无法正常起动;③变压器偏磁;④输出电压纹波相对较大。其中,问题①、②是这类 APFC 变换器的共性问题,问题③、④通常只在该类单相 APFC 变换器中相对突出。

本书以电流型全桥单级 APFC 变换器的研究为主要内容,在介绍其基本工作原理的基础上,主要围绕该类变换器存在各种关键问题(上述问题①~④)的产生机理与解决方法进行深入研究。

全书共 8 章,各章的主要内容概况如下。

第 1 章对电流型全桥单级 APFC 技术的研究意义与研究现状进行综述。

第 2 章主要介绍单相、三相电流型全桥单级 APFC 变换器的拓扑结构与基本工作原理。针对该类单相变换器,分别介绍其工作于电流连续模式(Continuous Current Mode, CCM)与电流断续模式(Discontinuous Current Mode, DCM)时的 PFC 实现机理,分析并给出其升压电感电流的断续条件以及工作于 CCM 时的占空比变化规律;针对该类三相变换器,介绍其 PFC 实现机理与升压电感电流的断续条件,并对其输入电流的谐波与抑制策略进行分析。

第 3~5 章主要针对电流型全桥单级 APFC 变换器的电压尖峰抑制问题进行分析,其中,第 3 章首先对该类变换器变压器原边电压尖峰的产生机理进行分析,推导并得出该电压尖峰的定量表达,在此基础上,依次介绍两种该类变换器电压尖峰的抑制方法,即有源箝位和无源箝位方法;第 4 章依次介绍三种基于无源缓冲方式的电压尖峰抑制方法,即单 LC 谐振无源缓冲、双 LC 谐振无源缓冲与改进型单 LC 谐振无源缓冲方法;第 5 章依次介绍三种基于磁集成无源辅助环节的电压尖峰抑制方法,即基于耦合电感的双 LC 谐振无源缓冲电路、基于耦合电感的多级无源箝位电路以及基于变压器集成的反激式无源辅助环节。

第 6 章首先以三相电路为例,对该类变换器的起动过程进行分析,在此基础上,介绍一种适合该类变换器的有损起动方法;然后以单相电路为例,介绍一种基于

Buck 模式的无损起动方法；最后依次介绍两种分别适合该类单相、三相变换器的基于 Flyback 模式的无损起动方法。

第 7 章在对该类单相变换器变压器偏磁机理进行分析的基础上，以基于有源箝位电路的单相变换器为例，提出并设计一种基于死区调节的偏磁抑制策略。

第 8 章对该类单相变换器的输出电压纹波进行研究，结合箝位技术提出并实现一种基于反激式辅助环节的输出电压纹波抑制策略。

本书所述各项研究内容得到了国家自然科学基金青年项目(51107017, 三单体组合电流型全桥单级 PFC 及其磁件集成方法与设计理论研究)、国家自然科学基金面上项目(51377036, 基于辅助环节的三相单级全桥 PFC 及其在电网不平衡时的运行机理与控制方法研究)、中国博士后科学基金面上项目(2012M510954, 基于辅助能量变换环节的电流型全桥单级 PFC 技术研究)、台达电力电子科教发展计划(DREO2006010, 一种三相软开关高功率因数 AC/DC 功率变换技术研究)以及黑龙江大学杰出青年科学基金项目(JCL201604, 三相电流型全桥单级 APFC 变换器关键技术及其应用基础研究)的资助。

在本书的撰写过程中，得到了哈尔滨工业大学贾洪奇教授的支持和指导；在上述相关科研工作的过程中，得到了博士研究生王大庆、王雪松，硕士研究生鲁志本、王书强、刘青移、孙莹莹、朱良梅、于帅、杨霖赫的支持与帮助。在此，致以诚挚的谢意。

本书的出版得到了科学出版社的大力支持，王哲编辑为本书的出版做了大量的工作，特此致谢。

孟 涛

于黑龙江大学

2017 年 6 月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	引言	1
1.2	APFC 技术的分类	2
1.2.1	APFC 技术的分类方式	2
1.2.2	两级 APFC 与单级 APFC	3
1.3	典型的单级 APFC 变换器拓扑	4
1.3.1	单相单级 APFC 变换器拓扑	4
1.3.2	三相单级 APFC 变换器拓扑	7
1.4	电流型全桥 Boost 拓扑的研究概况	11
1.4.1	电流型全桥 Boost 拓扑及其特点	11
1.4.2	电流型全桥 Boost 拓扑存在的问题及其解决方法	12
1.5	本书内容概述	16
第 2 章	电流型全桥单级 APFC 变换器拓扑结构与工作原理	18
2.1	引言	18
2.2	单相电流型全桥单级 APFC 变换器	18
2.2.1	变换器拓扑结构与基本工作原理	18
2.2.2	DCM 时的工作原理	19
2.2.3	CCM 时的工作原理	22
2.3	三相电流型全桥单级 APFC 变换器	24
2.3.1	变换器拓扑结构与基本工作原理	24
2.3.2	功率因数校正机理与电流断续条件	25
2.3.3	输入电流的谐波分析与抑制策略	30
2.3.4	仿真与实验验证	34
2.4	本章小结	38
第 3 章	变压器原边电压尖峰的产生机理及其箝位方法	39
3.1	引言	39
3.2	变压器原边电压尖峰的产生机理	39

3.2.1	电压尖峰产生机理分析	39
3.2.2	仿真与实验验证	41
3.3	变压器原边电压尖峰的有源箝位方法	43
3.3.1	电路结构与工作原理	43
3.3.2	软开关设计与实现	49
3.3.3	实验验证	51
3.4	变压器原边电压尖峰的无源箝位方法	52
3.4.1	电路结构与工作原理	52
3.4.2	电压尖峰抑制能力分析	56
3.4.3	实验验证	59
3.5	本章小结	61
第 4 章	基于无源缓冲方式的电压尖峰抑制方法	62
4.1	引言	62
4.2	单 LC 谐振无源缓冲的电压尖峰抑制方法	62
4.2.1	电路结构与工作原理	62
4.2.2	缓冲电路的参数分析与设计	71
4.2.3	实验验证	73
4.3	双 LC 谐振无源缓冲的电压尖峰抑制方法	75
4.3.1	电路结构与工作原理	75
4.3.2	缓冲电路的参数分析与设计	80
4.3.3	实验验证	82
4.4	改进型单 LC 谐振无源缓冲的电压尖峰抑制方法	84
4.4.1	电路结构与工作原理	84
4.4.2	缓冲电路参数的对比分析与设计	92
4.4.3	实验验证	95
4.5	本章小结	100
第 5 章	基于磁集成无源辅助环节的电压尖峰抑制方法	101
5.1	引言	101
5.2	基于耦合电感的双 LC 谐振无源缓冲电路	101
5.2.1	电路结构与工作原理	101
5.2.2	耦合电感的作用机理与设计要素	106
5.2.3	实验验证	110
5.3	基于耦合电感的多级无源箝位电路	113
5.3.1	电路结构与工作原理	113

5.3.2	多电感耦合的作用机理与设计要素	119
5.3.3	箝位电路级数的影响机制分析	123
5.3.4	实验验证	126
5.4	基于变压器集成的反激式无源辅助环节	128
5.4.1	电路结构与工作原理	128
5.4.2	反激式集成变压器的作用机理与结构设计	134
5.4.3	辅助环节的参数分析与设计	136
5.4.4	实验验证	139
5.5	本章小结	142
第 6 章	APFC 变换器的起动方法	143
6.1	引言	143
6.2	变换器的起动过程	143
6.2.1	变换器的起动过程分析	143
6.2.2	变换器恒占空比起动的仿真与实验结果	146
6.3	变换器的有损起动方法	147
6.3.1	变换器的有损起动方法分析	147
6.3.2	变换器有损起动方法的仿真与实验结果	148
6.4	基于 Buck 模式的单相 APFC 变换器起动方法	150
6.4.1	基于 Buck 模式起动的工作机理	150
6.4.2	输入过流抑制能力分析	157
6.4.3	起动参数分析	162
6.4.4	仿真与实验验证	165
6.5	基于 Flyback 模式的单相 APFC 变换器起动方法	168
6.5.1	起动方法的基本原理	168
6.5.2	起动过程分析	170
6.5.3	关键参数分析与设计	173
6.5.4	实验验证	175
6.6	基于 Flyback 模式的三相 APFC 变换器起动方法	177
6.6.1	起动方法的基本原理	177
6.6.2	工作过程分析	178
6.6.3	关键参数分析与设计	182
6.6.4	实验验证	186
6.7	本章小结	188

第 7 章 单相 APFC 变换器变压器偏磁机理及其抑制方法	189
7.1 引言	189
7.2 变压器偏磁机理分析	189
7.2.1 传统全桥电路的偏磁机理	189
7.2.2 单相电流型全桥单级 APFC 变换器变压器偏磁机理分析	190
7.3 基于死区调节的变压器偏磁抑制方法	192
7.3.1 变压器偏磁抑制的基本原理	192
7.3.2 变压器偏磁抑制工作机理分析	195
7.3.3 其他因素导致的变压器偏磁抑制能力分析	197
7.4 实现方案及关键参数分析	200
7.4.1 积分复位电路设计	200
7.4.2 死区影响分析	201
7.5 实验验证	203
7.6 本章小结	205
第 8 章 基于辅助环节的单相 APFC 变换器输出电压纹波抑制策略	207
8.1 引言	207
8.2 单相电流型全桥单级 APFC 变换器输出电压纹波的影响因素分析	207
8.3 基于反激式辅助环节的单相 APFC 变换器	209
8.3.1 电路结构	209
8.3.2 主电路工作原理	210
8.3.3 辅助环节工作原理	214
8.4 基于反激式辅助环节的输出电压纹波抑制策略	215
8.4.1 纹波抑制原理	215
8.4.2 补偿电流设计	217
8.5 辅助环节功率分析	219
8.5.1 箝位电容输入功率	219
8.5.2 辅助环节输出功率	220
8.5.3 箝位电容影响规律分析	224
8.6 实验验证	225
8.6.1 辅助环节控制方案	225
8.6.2 实验结果分析	226
8.7 本章小结	230
参考文献	231

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着科学技术的发展,电力电子装置在国民生产、生活中得到了越来越广泛的关注和应用。其中,常规的用于电力电子设备前端的整流装置普遍采用的是电容滤波型桥式结构,当电路达到稳态后,晶闸管或二极管整流器件的导通角远小于 180° ,造成虽然交流侧输入电压是正弦的,但输入电流却发生了严重的失真,波形畸变为幅度很大的窄脉冲电流。测试表明,这种畸变的电流含有丰富的谐波成分,谐波的存在就会使功率因数降低到0.6左右^[1-3]。

大量的谐波成分造成了电网的“污染”,并主要表现在以下几个方面^[4]。

(1)谐波电流的“二次效应”,即电流流过线路阻抗造成的谐波压降反过来使电网电压波形也发生畸变。

(2)谐波电流引起电路故障,损坏设备,如使线路和配电设备过热,引起电网LC谐振,或者高次谐波电流流过电网的高压电容,使之过热而损坏。

(3)三相四线制电路中,三次谐波在中线中的电流同相位,合成中线电流很大,可能超过相电流,中线又无保护装置,使中线因过热而引起火灾并损坏电气设备。

(4)谐波电流对自身及同一系统中的其他电子设备产生恶劣的影响,如引起电子设备误操作、电话网噪声和照明设备故障等。

针对谐波的危害,从1992年起国际上开始以立法的形式限制高次谐波。一些世界性的学术组织或国家相继颁布或实施了一些对输入电流谐波的限制标准,如IEC555-2、IEEE519、IEC1000-3-2等。我国国家质量监督检验检疫总局在1993年颁布了国家标准GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》。国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)于1998年对谐波标准IEC555-2进行修正,另外制定IEC61000-3-2标准,对不同的用电设备制定了相应的谐波限制标准。这些标准要求用电设备必须满足其谐波要求,将用电设备对电网的污染限制在能够接受的范围内^[5-8]。

解决用电设备谐波污染的主要途径有两种:①增设电网补偿装置(有源滤波器和无源滤波器)以补偿电力电子设备、装置产生的谐波;②改造电力电子装置本身,使之不产生或产生很小的谐波,即功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)。二者相比较而言,后者是更积极的方式^[9,10]。

PFC 技术包括无源和有源两种类型^[11,12]。

无源功率因数校正 (Passive Power Factor Correction, PPFC) 技术是通过在二极管整流电路中增加电感和电容等无源元件, 对用电设备的输入电流进行移相和整形, 以降低其电流谐波含量, 提高功率因数。PPFC 技术具有简单可靠、无须控制和电磁干扰 (Electro Magnetic Interference, EMI) 小的优点。然而, 随着人们对谐波抑制装置要求的不断提高, 该技术的缺点也日渐突出, 主要表现在^[13]: ①采用低频电感和电容进行输入滤波, 体积较大, 而且难以得到很高的功率因数 (一般可提高到 0.9 左右), 在有些场合无法满足现行谐波标准的限制; ②抑制效果随工作条件 (如工作频率、负载、输入电压等) 的变化而变化; ③如产生的谐波超过设计参数的情况时, 会造成滤波器过载或损坏; ④滤波电容上的电压是后级 DC/DC 变换器的输入电压, 它随输入交流电压和输出负载的变化而变化, 这个变化影响了 DC/DC 变换器的性能。因此, PPFC 技术主要应用于功率等级相对较小、对体积和重量要求不高的场合。

随着电力电子技术的发展, PFC 技术已经从早期的由大容量电感、电容组成的 PPFC 技术发展到有源功率因数校正 (Active Power Factor Correction, APFC) 技术。APFC 技术从 20 世纪 80 年代中后期开始成为电力电子领域的研究热点, 自 20 世纪 90 年代以来得到了迅速推广。它直接采用有源开关或 AC/DC 变换技术, 使输入电流成为和电网电压同相位的正弦波, 这种方法可以得到较高的功率因数 (接近 1), 总谐波畸变小。APFC 电路工作于高频开关状态, 可以在较宽的输入电压范围内和宽带下工作, 具有体积小、重量轻、输出电压恒定等优点, 并且效率明显高于 PPFC 电路^[14-16]。目前 APFC 技术已经成为电力电子技术领域的一个重要课题和研究方向^[17-20]。

APFC 技术按电路结构不同可以分为两级型和单级型。两级型 APFC 的第一级为 PFC 电路, 第二级是 DC/DC 变换器, 这种方式的 PFC 效果好, 但电路复杂、效率相对较低; 单级 APFC 将 PFC 环节和 DC/DC 变换环节集成, 共用一个控制器, 具有结构简单、成本低、效率高等优点, 符合电力电子技术的发展要求^[21]。目前, 单级 APFC 技术主要应用于小功率领域, 而在中、大功率领域的应用还有待其在拓扑结构和控制策略等方面获得进一步的发展与突破^[22]。

基于以上分析, 为了有效地提高电网电能质量和电能利用率, 加强适合于中、大功率领域应用的单级 APFC 技术的研究是十分必要的。

1.2 APFC 技术的分类

1.2.1 APFC 技术的分类方式

APFC 技术的分类方式有多种, 其中最基本的分类方式为以下四种^[23-29]。

(1) 按不同电路拓扑结构来分类。理论上各种 DC/DC 变换器的拓扑形式都可以用来作为 APFC 的主电路,但根据不同的拓扑形式,其用于 APFC 电路的特点不同,典型的 APFC 主电路拓扑主要有升压(Boost)型、降压(Buck)型和反激(Flyback)式三种。

(2) 按电网供电方式不同来分类,可分为单相 APFC 和三相 APFC。

(3) 按电路结构不同来分类,可分为两级 APFC 和单级 APFC。

(4) 按工作原理不同来分类,可分为乘法器型 APFC 和电压跟随器型 APFC。

除了以上四种基本的分类方式,常用的还有以下的一些分类方式。

根据电路软开关特性的不同,APFC 技术可分为两类,即零电流开关(Zero Current Switch, ZCS) APFC 技术和零电压开关(Zero Voltage Switch, ZVS) APFC 技术。如按实现软开关的具体方法,每一种 APFC 技术还可以进一步分为并联谐振型、串联谐振型以及准谐振型^[30,31]。

按照控制方式的不同,APFC 技术一般可分为电压跟踪控制和直接电流控制两大类,其中,直接电流控制是目前应用最为广泛、技术最为成熟的 APFC 控制技术。如按输入电流控制方式的不同,采用直接电流控制的 APFC 还可以进一步分为峰值电流控制、滞环电流控制和平均电流控制三种模式^[32-36]。近年来,随着 APFC 技术的快速发展,各种新型控制方式层出不穷,如单周期控制、空间矢量调制、无差拍控制、滑模变结构控制等,已陆续地应用于 APFC 技术中,并取得了一定的效果^[37-49]。

另外,还有磁放大 APFC 技术、三电平 APFC 技术和不连续电容电压模式 APFC 技术等。

1.2.2 两级 APFC 与单级 APFC

典型的两级结构 APFC 变换器(这里以单相变换器为例)的结构如图 1.1(a)所示,它由 PFC 电路和 DC/DC 功率变换器级联而成。第一级的 PFC 电路可采用 Boost 或 Buck-Boost 等拓扑形式,中间母线电压一般稳定在 400V 左右(就单相 APFC 变换器而言);第二级完成输出电压的隔离、电压变换(一般为降压)和稳定作用,与第一级电路相对独立,可以根据需要采用 DC/DC 变换器的各种拓扑形式。这种结构具有各级可以单独分析、设计和控制以及通用性较好等优点,但由于它是以附加功率级为条件换取了高功率因数,并且其功率级需处理全部的负载能量,所以这种结构的缺点是元件多、成本高、效率低。但由于第二级可由若干个不同的 DC/DC 变换器模块构成,所以适合在分布式电源系统中应用。

图 1.1(b)所示为单级结构 APFC 变换器(以单相变换器为例),图中的 DC/DC 变换器可以采用 Boost、Buck-Boost 等各种电路拓扑形式。因为 PFC 和输出电压变换全部由一级电路完成,所以具有结构简单、效率高等优点。单级 APFC 电路控制简单、成本较低,但就功率因数和谐波特性来说,目前不如两级 APFC 电路好^[50-55]。

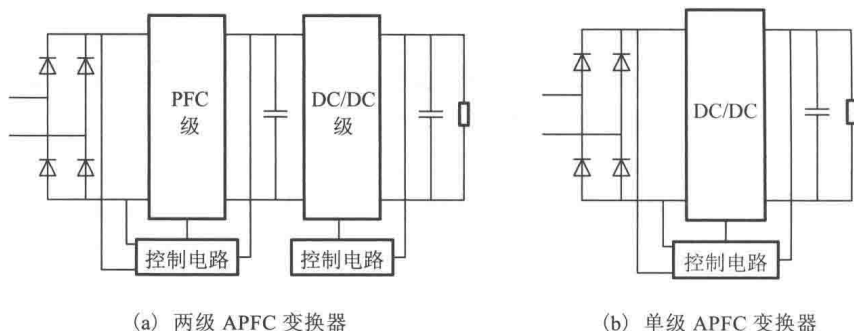


图 1.1 两级 APFC 变换器与单级 APFC 变换器

1.3 典型的单级 APFC 变换器拓扑

1.3.1 单相单级 APFC 变换器拓扑

20 世纪 90 年代初,美国科罗拉多大学的研究人员将两级 APFC 的功率级 Boost 电路和 DC/DC 变换级的反激 (Flyback) 或正激 (Forward) 电路的开关管共用,两级电路被整合为一级,提出了基于正激式或反激式结构的单相单级 APFC 变换器。与传统的单相两级 APFC 变换器相比,单相单级 APFC 变换器的整个系统结构更加简单^[56]。

随着相关研究的不断深入,其他 DC/DC 变换电路逐渐被应用于单级 APFC 技术中,并出现了许多新的单相单级 APFC 变换器的结构。典型的结构如:基于 Cuk 结构的单相单级 APFC 变换器、基于半桥结构的单相单级 APFC 变换器、基于全桥结构的单相单级 APFC 变换器等^[57-60]。

1. 正激式单相单级 APFC 变换器

正激式单相单级 APFC 变换器是结合传统 DC/DC 变换中的正激式电路与基于 Boost 的 APFC 电路提出的,如图 1.2 所示。该电路具有较高的功率因数,电路结构简单,并且效率较高^[61]。

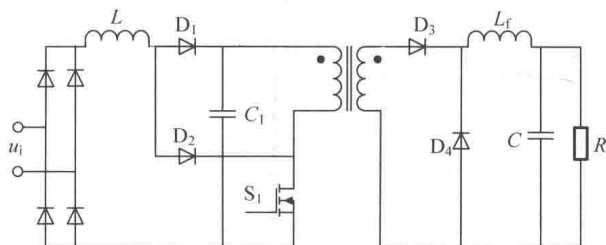


图 1.2 基于正激式结构的单相单级 APFC 变换器

然而,正激式单相单级 APFC 变换器存在一些缺点限制了它的应用:在不使用

其他辅助措施的前提下,其开关管的开关方式为硬开关,影响了系统的效率;当开关管关断时,其高频变压器磁芯具有剩磁,因此必须添加磁复位电路来防止变压器磁芯饱和;电路中变压器的磁芯单向磁化,磁芯利用率低,在中、大功率领域的应用受到限制。因此,正激式单相单级 APFC 变换器一般只应用于小功率领域。

在实际应用中,可以对图 1.2 中的正激式单相单级 APFC 变换器进行改进,进一步提高其性能,如增加有源箝位电路来为高频变压器提供磁复位,并且能够辅助主电路开关管实现软开关。

2. 反激式单相单级 APFC 变换器

反激式单相单级 APFC 变换器是结合传统 DC/DC 变换中的反激式电路与基于 Boost 的 APFC 电路提出的,典型的反激式单相单级 APFC 变换器如图 1.3 所示。

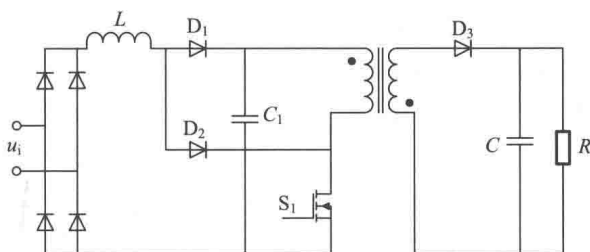


图 1.3 基于反激式结构的单相单级 APFC 变换器

反激式单相单级 APFC 变换器具有较高的功率因数,电路结构简单,且效率较高,与传统的反激式 DC/DC 变换器相同,反激式单相单级 APFC 变换器同样能够用于多路输出的场合^[62-64]。

然而,反激式单相单级 APFC 变换器存在的一些缺点限制了它的应用:开关管承受的电压应力较大;高频变压器工作在第一象限,磁芯利用率低,限制了变换器功率等级的提高;在不使用其他辅助措施的前提下,其开关管为硬开关,开关损耗较大;此外,由于结构上的限制不能空载运行,且输出电压纹波较大,反激式单相单级 APFC 变换器与正激式单相单级 APFC 变换器类似,一般仅适合小功率场合应用^[65, 66]。

3. 隔离型 Cuk 单相单级 APFC 变换器

基于隔离型 Cuk 结构的单相单级 APFC 变换器是结合传统 DC/DC 变换中的 Cuk 电路与基于 Boost 的 APFC 电路提出的,其典型结构如图 1.4 所示。基于隔离型 Cuk 结构的单相单级 APFC 变换器是在 Cuk 电路的基础上通过增加隔离变压器来实现单级功率因数校正。该变换器与 Cuk 型 DC/DC 变换电路相同:由于输入、输出端都具有电感,所以能够实现输入、输出电流连续;变换器中的隔直电容能够有效抑制变压器的偏磁问题^[67]。

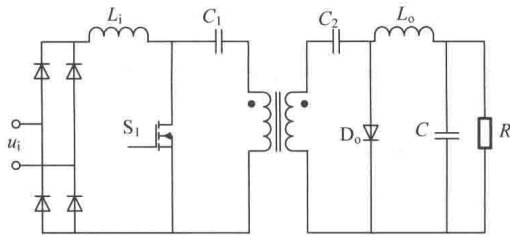


图 1.4 基于隔离型 Cuk 结构的单相单级 APFC 变换器

但是该结构中隔直电容数量较多，并且电容需要承受较大的纹波电流。当变压器原边电流较大时，隔直电容容值的选取存在的问题。如果隔直电容较小，则能够较快地阻断变压器原边电流，对整个系统的性能影响较小，但是这将导致隔直电容两端的电压较高，增加了开关管的电压应力；如果选取较大的隔直电容，则变压器原边电流变化缓慢，影响系统的最大占空比、开关频率。所以隔直电容的使用限制了这种变换器应用功率等级的提高。此外，这种类型的电容成本高，可靠性也较差。另外，该结构中开关管的电压应力较大，在不增加辅助电路的情况下，主电路开关管的工作方式为硬开关，影响了系统的可靠性。因此，基于隔离型 Cuk 结构的单相单级 APFC 变换器的应用受到了一定的限制^[68]。

4. 半桥式单相单级 APFC 变换器

基于半桥式结构的单相单级 APFC 变换器是结合传统 DC/DC 变换中的半桥式变换电路与基于 Boost 的 APFC 电路提出的，其结构如图 1.5 所示。

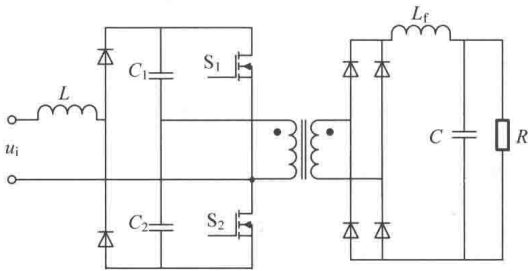


图 1.5 基于半桥式结构的单相单级 APFC 变换器

该变换器中的开关管电压应力较低，变压器双端磁化，与变压器单端励磁的 APFC 变换器相比，磁芯利用率比较高，在同等功率条件下，其变压器的体积仅为正激式变换器中变压器的一半，适合应用于中等功率场合，另外，可以通过不对称控制实现开关管的零电压开通^[69-71]。

然而，基于半桥式结构的单相单级 APFC 变换器的输入电压利用率较低，开关管的电流应力较大，影响了应用功率等级的提高，致使其在大功率领域的应用受到限制，所以该变换器通常只应用于中等功率等级^[72]。

5. 全桥式单相单级 APFC 变换器

为了实现中、大功率领域的应用,全桥式电路被引入单级 APFC 技术中。基于 Boost 全桥结构的单级 APFC 变换器使用一级电路较好地实现了功率因数校正与 DC/DC 变换,能够使输入、输出之间具有的电气隔离,高频变压器双端励磁,适用于中、大功率领域应用。因此,在中、大功率领域且要求输入、输出具有电气隔离的场合,基于 Boost 结构的全桥式单相单级 APFC 变换器是较好的选择^[73-76]。

基于全桥式结构的单相单级 APFC 变换器结构如图 1.6 所示。该变换器的主电路使用 4 只开关管,与其他单相单级 APFC 变换器相比,虽然使用的开关管相对较多,但是具有以下优点^[77,78]: ①整个主电路仅使用了一只电感和一只滤波电容,有利于提高系统的功率密度;②变压器双端励磁,磁芯的利用率高,更适合用于中、大功率领域;③开关管的电流应力较低,其他结构开关管的电流应力通常为 PFC 变换电流与 DC/DC 变换电流之和,而全桥结构的单相单级 APFC 变换器的电流应力取 PFC 变换电流与 DC/DC 变换电流之间的最大值即可;④可以通过控制开关管的开通时序,在不过多增加变换器复杂程度的基础上实现开关管的软开关,有利于提高系统的效率。

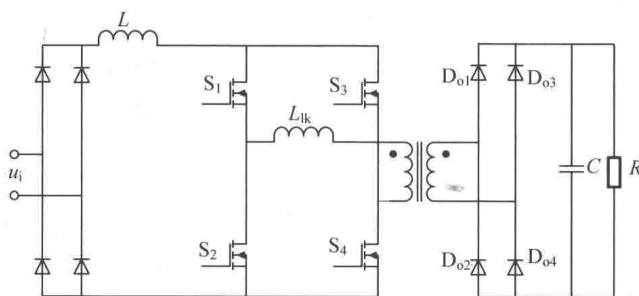


图 1.6 基于全桥式结构的单相单级 APFC 变换器

除上述典型拓扑外,随着研究的深入,不断有新的适用于单相单级 APFC 技术的电路拓扑被提出,同时一些新技术也不断被应用到传统的单相单级 APFC 变换器中,以适应不同的应用领域^[27,29,79,80]。例如,文献[81]提出的一种基于 LLC 谐振技术的单相单级 APFC 变换器,文献[82]将全桥电路与双向 Buck 电路相结合提出的一种新型适用于照明电源的单相单级 APFC 变换器等,此处不再详细介绍。

1.3.2 三相单级 APFC 变换器拓扑

两级型 APFC 的第一级为 PFC 电路,第二级为 DC/DC 变换器。在三相 APFC 中,目前研究较为成熟的三相单开关 Boost 型 APFC 变换器和三相六开关 Boost 型 APFC 变换器都属于这种类型。该类型变换器的 PFC 效果较好,但一般存在着输入、输出侧没有电气隔离的问题,由于 APFC 变换器本身输出电压较高,调节性差,在实际使用时一般需增加一级 DC/DC 变换器对输出电压进行调节,所以该类电路具

有结构复杂、效率较低的缺点。三相单级 APFC 使用一级功率变换电路，同时实现 PFC 和 DC/DC 变换，以高效率、高性能、高功率密度为目标，符合电力电子技术发展趋势和要求^[66,83]。

目前，研究较为广泛的三相单级 APFC 拓扑主要有：反激式结构、能量双向流通式结构、三电平结构、全桥式结构。另外，类似于两级 APFC 变换器，由技术较成熟的单相单级 APFC 变换器组合构成的三相单级 APFC 变换器也具备一定的优势^[84]。

1. 反激式三相单级 APFC 变换器

典型的反激式三相单级 APFC 变换器结构如图 1.7 所示。该变换器工作于电流断续模式，当开关导通时，变压器原边电感储能，电感电流峰值正比于相应相的输入电压；当开关关断时，变压器副边电感向负载释放能量。

反激式三相单级 APFC 变换器不仅具有较高的功率因数，而且能够提高变换器的效率，限制中间储能电容的电压，同时还具有结构简单的优点。

然而，该变换器的开关管承受的电压应力较大，高频下开关损耗较大。另外，高频变压器工作在单向磁化状态，通常需要增加气隙，虽然铁心损耗较小，但气隙的增加会增大励磁电流，增加变压器的铜损，使磁芯利用率降低，这就限制了变压器的功率等级。因此，反激式三相单级 APFC 变换器一般仅适合小功率场合^[85-88]。

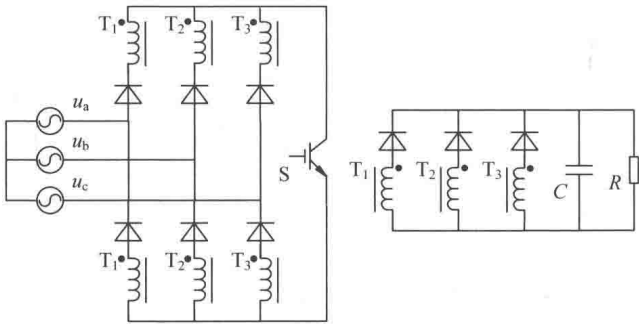


图 1.7 反激式三相单级 APFC 变换器

2. 能量双向流通式三相单级 APFC 变换器

能量双向流通式三相单级 APFC 变换器结构如图 1.8 所示。该变换器采用可控整流，将整流环节与 PFC 环节结合到一起，与通常的 APFC 变换器相比，减少了不可控整流环节，但增加了开关管的数量(功率开关管是由两只开关管反向串联组成的双向开关)，高频变压器副边同样使用双向开关进行可控整流，因此，该结构能够实现能量双向流通。该变换器的 PFC 效果较好，能够实现解耦，结构中不含中线，但使用的开关器件较多，成本较高，控制电路复杂。能量双向流通式三相单级 APFC 变换器主要应用于需要能量双向流动的大功率场合^[20,27]。