

开关电源中的 有源功率因数 校正技术

贲洪奇 张继红 刘桂花 孟涛 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



开关电源中的有源功率因数校正技术

贵洪奇 张继红 刘桂花 孟 涛 编著



机械工业出版社

本书结合国内外有源功率因数校正 (APFC) 技术的发展和应⤵用, 对功率因数校正 (PFC) 技术进行了较为全面的论述。主要包括: 无源功率因数校正 (PPFC) 技术、有源功率因数校正技术的典型拓扑结构和控制策略、单相单级 PFC 变换器、三相 PFC 变换器、无桥 PFC 电路、交错技术在 PFC 中的应用、PFC 的数字控制技术以及 PFC 技术在开关电源中的应用等。

编者力图反映国内外电力电子技术领域在 APFC 技术方面的进展和所取得的研究成果, 以便读者系统、全面地了解 and 掌握。本书可供从事开关电源开发、设计及生产的相关工程技术人员和高等院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

开关电源中的有源功率因数校正技术/贲洪奇等编著. —北京: 机械工业出版社, 2010.5

ISBN 978-7-111-30264-3

I. ①开… II. ①贲… III. ①开关电源-功率测量 IV. ①TN86②TM933.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 056130 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘星宁 责任编辑: 吕 潇 版式设计: 张世琴

责任校对: 刘志文 封面设计: 马精明 责任印制: 李 妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17.25 印张·427 千字

0001-3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-30264-3

定价: 40.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着电力电子技术的不断进步及社会发展的需要,几乎所有电气设备的电源装置部分都采用开关电源。开关电源是为计算机、通信和家用电子设备等提供直流电源的一种电力电子装置,具有体积小、效率高、功率密度大等优点,在电源领域中已占据主导地位,获得了越来越广泛的应用,但由此产生的网侧输入功率因数降低以及谐波污染等问题也日趋严重。目前,开关电源等电力电子装置已成为最主要的谐波污染源,它迫使电力电子技术领域的研究人员要对这类问题给出有效的解决方案。

人们最早是采用电感和电容构成的无源网络来进行功率因数校正的,但采用这种技术的设备体积庞大,对输入电流的谐波抑制效果也并不十分理想,随着电力半导体器件的发展,开关变换技术突飞猛进,20世纪80年代,有源功率因数校正(APFC)技术应运而生。到了90年代,国内外学者和科技人员相继提出了一些用于功率因数校正(PFC)的新型拓扑结构、软开关技术和新型控制方法等,使有源功率因数校正技术取得了长足发展。本书结合国内外功率因数校正技术的发展状况及研究成果,系统地介绍了无源功率因数校正(PPFC)技术和有源功率因数校正技术的基本原理、典型拓扑结构、控制策略以及PFC电路的设计与应用技术等,以便从事开关电源开发、设计、应用和维护的技术人员,系统、全面地了解和掌握PFC技术。

本书不仅包括APFC的经典电路结构和控制策略,而且对新出现的无桥PFC、交错并联PFC、单级PFC等新型拓扑结构和PFC数字控制策略等新型控制方式进行了详细分析和归纳总结,并给出了部分设计实例。全书内容分11章进行论述:

第1章绪论,主要介绍PFC的基本概念、谐波限制标准、改善功率因数和谐波的基本方法以及PFC技术的现状和发展趋势等。

第2章PPFC,主要介绍传统PPFC电路的特点和应用场合,并介绍几种提高功率因数的整流电路及部分滤波方式的谐波抑制方法。

第3章、第5章、第6章和第7章分别介绍单相APFC典型电路、单级APFC电路、无桥PFC及交错并联PFC电路的工作原理及应用。

第8章和第9章主要介绍典型三相APFC变换器和三相单级APFC变换器的拓扑结构、工作原理及特点。

第4章 APFC 控制策略,介绍了常用的 CCM、DCM 控制策略,以及单周期控制、滑模变结构控制和空间矢量控制等新型控制策略。在介绍模拟控制技术的基础上,在第10章 PFC 数字控制技术中重点介绍了几种数字控制策略的实现方式和提高系统动态响应能力的方法。

第11章有源功率因数校正技术在开关电源中的应用,针对不同应用场合,以 APFC 技术在直流阀驱动电源、绿色照明电源、不间断电源、大功率焊接电源中的应用为例,介绍了 APFC 技术在开关电源中的应用情况。

本书第1、11章由贾洪奇编写,第2~5章由张继红编写,第6、7、10章由刘桂花编写,第8、9章由孟涛编写。

在编写本书过程中,编者参考了国内外有关单位和学者的著作或文章,在此对文献作者表示衷心的感谢!

电力电子技术的发展日新月异,还有许多有价值的研究成果无法在本书中逐一介绍;同时由于编者水平有限,疏漏和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 开关电源输入整流电路形式与谐波电流 1

1.1.1 单相交流输入开关电源 1

1.1.2 三相交流输入开关电源 2

1.2 功率因数和谐波 2

1.2.1 功率因数定义 2

1.2.2 功率因数和 THD 的关系 3

1.2.3 谐波产生的危害 4

1.2.4 谐波限制标准 4

1.3 改善开关电源功率因数及谐波问题的基本方法 6

1.3.1 功率因数校正实现方法 6

1.3.2 功率因数校正方案对比 8

1.3.3 在开关电源中实施功率因数校正的意义 9

1.4 APFC 电路与 DC/DC 变换器的主要区别 10

1.5 PFC 技术的现状和发展趋势 10

参考文献 12

第2章 PPFC 电路 13

2.1 传统无源 LC 滤波电路 13

2.2 提高功率因数的几种整流电路 15

2.2.1 采用充电泵电路 15

2.2.2 采用非线性电容电路 16

2.2.3 倍电压整流电路 18

2.3 部分滤波方式的高次谐波抑制方法 20

2.3.1 1/N 滤波型 20

2.3.2 能量反馈型 23

2.3.3 充电量控制型 24

2.3.4 部分升压方式高次谐波抑制电路 26

参考文献 27

第3章 APFC 典型拓扑结构 29

3.1 基于 Buck 电路的 PFC 变换器 ... 29

3.1.1 工作原理及模态分析 29

3.1.2 输入电流分析 31

3.1.3 输入功率因数及 THD 31

3.2 基于 Boost 电路的 PFC 变换器 ... 33

3.2.1 工作原理及模态分析 33

3.2.2 输入电流分析 34

3.2.3 输入功率因数 35

3.3 基于 Buck - Boost 电路的 PFC 变换器 36

3.3.1 工作原理及模态分析 36

3.3.2 输入电流分析 37

3.4 基于 Cuk、Sepic 和 Zeta 电路的 PFC 变换器 38

3.4.1 工作原理及模态分析 39

3.4.2 输入电流分析 41

3.5 基于 Flyback 的 PFC 变换器 42

3.6 基于 Sepic 的带隔离变压器的 PFC 变换器 43

3.6.1 工作原理及模态分析 43

3.6.2 输入电流分析 44

参考文献 45

第4章 APFC 的控制策略 46

4.1 常用的 CCM 控制策略 46

4.1.1 峰值电流控制 46

4.1.2 平均电流控制 47

4.1.3 滞环电流控制 48

4.1.4 脉动电流面积控制 49

4.2 DCM 控制策略 49

4.2.1 恒频控制 50

4.2.2 变频控制 50

4.3 新型非线性控制策略 51

4.3.1 单周期控制 51

4.3.2 滑模变结构控制	62	5.7.3 数学模型的建立	101
4.3.3 空间矢量 PWM 控制	63	5.7.4 仿真分析	103
4.3.4 无差拍控制	64	参考文献	105
参考文献	65	第6章 无桥 PFC 电路	106
第5章 单相单级 PFC 变换器	66	6.1 基本型无桥 Boost PFC	106
5.1 单相单级 PFC 变换器的发展 历程	66	6.1.1 基本型无桥 Boost PFC 电路的 工作原理	107
5.2 典型单相单级 PFC 变换器拓扑 结构	67	6.1.2 基本型无桥 Boost PFC 的采样 电路	108
5.2.1 PFC(DCM)+DC/DC(DCM,CCM) 组合方式	67	6.2 无桥 Boost PFC 的 EMI 分析 和抑制方法	112
5.2.2 PFC(CCM)+DC/DC(DCM,CCM) 组合方式	68	6.2.1 相对电位分析法	113
5.2.3 并联型单级 PFC(PPFC) 变 换器	69	6.2.2 模型分析法	113
5.2.4 单级全桥 PFC 变换器	70	6.2.3 EMI 抑制措施	115
5.2.5 有源钳位和软开关技术的应用	71	6.3 无桥 Boost PFC 的其他拓扑 结构	116
5.3 带抽头电感的单级 PFC 变 换器	71	6.3.1 图腾式无桥 Boost PFC 电路	116
5.3.1 电路构成	72	6.3.2 伪图腾式无桥 Boost PFC 电路	118
5.3.2 工作原理和模态分析	72	6.3.3 双向开关型无桥 Boost PFC 电路	119
5.3.3 仿真和实验结果	74	6.3.4 双二极管式无桥 Boost PFC 电路	120
5.4 有源钳位 PFC 变换器	77	6.4 无桥 Boost PFC 的电路模型	123
5.4.1 电路结构和工作原理	77	6.4.1 电路的大信号模型	123
5.4.2 软开关条件及电路特性分析	81	6.4.2 电路的小信号模型	124
5.4.3 控制电路设计	83	6.5 无桥 Boost PFC 的控制策略	127
5.4.4 仿真和实验结果	85	6.5.1 模拟控制	128
5.5 单级全桥 PFC 变换器	87	6.5.2 数字控制	131
5.5.1 电路结构与功率因数校正原理	87	6.5.3 部分有源 PFC 控制	132
5.5.2 工作模态分析	88	6.6 无桥 Boost PFC 的软开关技术	133
5.5.3 实验结果分析	91	6.7 无桥单级电子镇流器	135
5.6 并联型高效率 PFC 变换器	93	6.7.1 开关管复用结构的无桥单级电子 镇流器	135
5.6.1 并联型变换器提高效率的原理	93	6.7.2 电荷泵结构的无桥单级电子 镇流器	137
5.6.2 传统并联型 PFC 变换器	94	参考文献	139
5.6.3 改进的并联型 PFC 变换器	95	第7章 交错技术在 PFC 中的应用	142
5.7 变换器数学模型的建立和 仿真分析	98	7.1 交错并联 PFC 电路	142
5.7.1 扩展状态平均法	98	7.1.1 交错技术简介	142
5.7.2 等效电路模型及状态方程的 导出	99	7.1.2 交错并联 PFC 电路结构	142
		7.2 交错并联 Boost PFC 电路的	

特性分析	145	9.1.3 三相双开关反激式 APFC 电路 ...	195
7.2.1 输入电流纹波分析	145	9.1.4 开关缓冲及软开关电路	197
7.2.2 输出电容电流纹波分析	147	9.2 三电平三相单级 APFC 电路	202
7.2.3 交错并联结构对 PFC 电感的 影响	148	9.2.1 电路结构及工作原理	202
7.3 交错并联 PFC 的控制策略和 实现方式	148	9.2.2 软开关实现范围	206
7.3.1 控制策略	148	9.2.3 电流断续条件	207
7.3.2 实现方式	150	9.3 基于全桥拓扑的三相单级 APFC 电路	208
7.4 交错并联 PFC 电路设计实例	155	9.3.1 基于移相控制的三相单级全桥 APFC 电路	208
7.4.1 参数设计	156	9.3.2 基于伪相移控制的三相单级全桥 APFC 电路	211
7.4.2 实验结果	160	9.3.3 基于有源钳位技术的三相单级全桥 APFC 电路	213
参考文献	161	9.4 其他三相单级 APFC 电路	217
第 8 章 三相两级 APFC 电路	163	9.4.1 基于双向开关的能量双向流动三 相单级 APFC 电路	217
8.1 三相单开关 APFC 电路	163	9.4.2 双开关三相单级 APFC 电路	217
8.1.1 三相单开关 Boost APFC 电路	163	9.4.3 同步四开关三相单级 APFC 电路	218
8.1.2 其他三相单开关 APFC 电路	171	9.4.4 由单相 APFC 组成的三相单级 APFC 电路	220
8.2 三相多开关 APFC 电路	175	参考文献	222
8.2.1 三相双开关 APFC 电路	175	第 10 章 PFC 的数字控制技术	224
8.2.2 三相三开关 APFC 电路	179	10.1 PFC 数字控制技术概述	224
8.2.3 三相四开关 APFC 电路	181	10.2 PFC 数字控制策略	225
8.2.4 三相六开关 APFC 电路	182	10.2.1 平均电流控制策略	225
8.3 由单相 APFC 组成的三相 APFC 电路	185	10.2.2 带前馈的平均电流 控制策略	226
8.3.1 由三个单相 APFC 在输出端 并联组成的三相 APFC 电路	186	10.2.3 占空比预测控制策略	227
8.3.2 由带隔离 DC/DC 变换器的单相 APFC 组成的三相 APFC 电路	186	10.3 PFC 数字控制的实现方式	230
8.3.3 将三相电压变成两相后再并联组 成的三相 APFC 电路	187	10.3.1 基于 DSP 的 PFC 数字控制 方式	230
8.4 数字化三相 APFC	188	10.3.2 基于 FPGA 的 PFC 数字控制 方式	232
8.4.1 三相单开关数字 APFC	188	10.3.3 基于多核芯片的 PFC 数字控制 方式	233
8.4.2 三相六开关数字 APFC	189	10.4 快速动态响应 PFC 数字控制 算法	237
8.4.3 三电平三相数字 APFC	189	10.4.1 电压环带宽设计原则	238
参考文献	190	10.4.2 电压环带宽对输入输出谐波 的影响	239
第 9 章 三相单级 APFC 电路	192		
9.1 基于反激式拓扑的三相单级 APFC 电路	192		
9.1.1 三相单开关反激式 APFC 电路 ...	192		
9.1.2 变压器和二极管桥分离的三相单 开关反激式 APFC 电路	194		

10.4.3 快速动态响应 PFC 数字控制 算法	239	中的应用	254
参考文献	241	11.3.1 拓扑结构	254
第 11 章 APFC 技术在开关电源中		11.3.2 工作原理	255
的应用	243	11.3.3 主要参数设计	257
11.1 单级 APFC 技术在直流阀 驱动电源中的应用	243	11.3.4 控制方式与实现	258
11.1.1 主电路结构	243	11.4 单周期控制策略与无桥 PFC 电路在开关电源中的应用	259
11.1.2 功率因数校正原理	243	11.4.1 电路构成与控制策略	259
11.1.3 软开关的设计与实现	245	11.4.2 单周期控制的抗扰动能力 分析	260
11.1.4 控制电路设计	246	11.4.3 PFC 电路相关参数设计	261
11.1.5 实验分析	248	11.4.4 实验分析	263
11.2 PFC 技术在“绿色照明”电源中 的应用	249	11.5 三相 APFC 技术在大功率焊接 电源中的应用	264
11.2.1 PFC 技术在电子镇流器中的 应用	249	11.5.1 电源结构	264
11.2.2 APFC 技术在 LED 驱动电源中的 应用	252	11.5.2 APFC 级构成及工作原理	265
11.3 APFC 技术在不间断电源 (UPS)		11.5.3 软开关设计及实现	265
		参考文献	266

第 1 章 绪 论

开关电源具有体积小、效率高、功率密度大等优点，在电源领域已占主导地位，并且随着电力电子技术的飞速发展，开关电源等电力电子装置已经广泛应用于电力系统、工业、交通以及家庭等领域，由此产生的电网侧输入功率因数降低以及谐波污染等问题也日趋严重。目前，开关电源等电力电子装置已成为最主要的谐波污染源，它迫使电力电子技术领域的研究人员要对谐波的污染问题给出有效的解决方案。

1.1 开关电源输入整流电路形式与谐波电流

输入为交流的开关电源是应用范围广、数量多的典型电力电子装置，其内部的输入整流滤波环节，大多是由二极管构成的不可控整流电路和电容滤波型电路组成的。正是由于这一环节，导致开关电源产生谐波污染和功率因数较低的问题。

1.1.1 单相交流输入开关电源

输入为单相交流的开关电源，其输入整流滤波环节大部分都采用图 1-1 所示的单相桥式不可控整流滤波电路。输入 220V 交流电，整流后直接接滤波电容，以获得较为平滑的直流电压。

由于整流二极管的非线性和滤波电容的储能作用，导致整流二极管只有在输入电压峰值附近的瞬时值大于滤波电容两端电压的短时间内才导通，其他大部分时间里，二极管被反向偏置而处于截止状态。这样一来，使输入电流（电容器的充电电流）成为一个时间很短、峰值很高的周期性尖峰电流，其波形如图 1-2 所示。

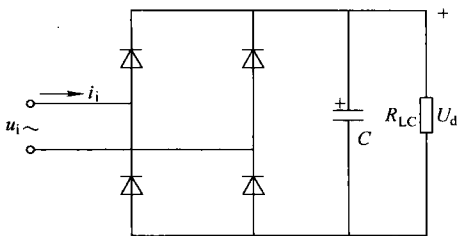


图 1-1 单相桥式不可控整流滤波电路

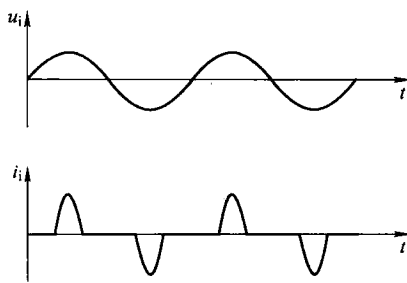


图 1-2 二极管整流桥对应的输入电压和电流波形

对图 1-2 所示电路的畸变电流进行傅里叶分析可知，它除含有基波分量外，还含有丰富的谐波分量，但是在交流输入电流中只有基波电流做功，其余各次谐波分量均不做功，这些谐波电流注入电网就会对电网造成严重的谐波污染。

此外，图 1-1 所示的整流滤波电路存在输入功率因数低的缺点，通常电容滤波二极管整

流器输入功率因数只能达到 0.65 左右, 而且输入电流的畸变使得整流器输入电流额定值增大, 导致效率降低。

1.1.2 三相交流输入开关电源

在容量相对较大的开关电源中, 大都采用三相交流供电。输入整流滤波电路一般为三相桥式不可控整流电路, 电路形式如图 1-3 所示。这种电路不用中线, 输出电压也较高, 其输出电压平均值为

$$U_d = 1.35U_i \quad (1-1)$$

式中, U_i 为输入线电压有效值。

虽然三相桥整流电路输出电压的纹波较小, 但输入电流也存在畸变现象, 其中一相的电压、电流波形如图 1-4 所示。与单相桥式不可控整流滤波电路一样, 除含有基波分量外, 也含有丰富的谐波分量, 同样会对电网造成严重的污染。

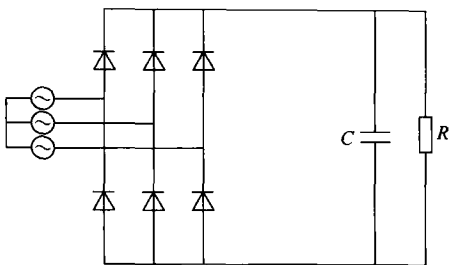


图 1-3 三相桥式不可控整流电路

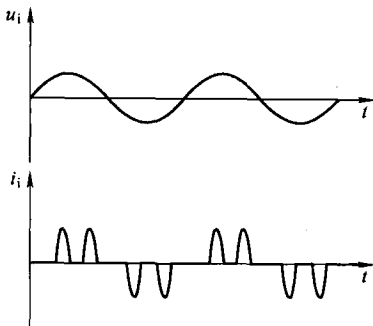


图 1-4 三相桥式不可控整流电路输入电压和电流波形

有些场合, 为了限制开关电源等电力电子装置给电瞬间的电流冲击, 采用单相桥式半控整流电路、三相桥式半控整流电路等电路形式。在这些电路中, 仍然存在谐波污染和功率因数较低等问题。

1.2 功率因数和谐波

1.2.1 功率因数定义

要想正确认识、分析并解决开关电源等电力电子装置带来的谐波污染和无功问题, 首先应明确功率因数的基本概念。

在电工学中, 线性电路的功率因数 (Power Factor, PF) 习惯用 $\cos\varphi$ 表示, φ 是正弦电压和正弦电流的相位差。在开关电源中, 由于输入整流滤波电路中二极管的非线性和电容的储能作用, 尽管输入电压为正弦波, 但输入电流却发生了相位的变化和波形的严重畸变, 所以线性电路中的功率因数定义不再适用于开关电源中。为此, 本书中用 PF 表示开关电源的网侧输入功率因数。

定义功率因数为有功功率与视在功率的比值, 如下式所示:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{U_i I_1 \cos\varphi_1}{U_R I_R} \quad (1-2)$$

式中 P ——输入有功功率;

S ——视在功率;

U_R ——电网电压有效值;

I_R ——输入电流有效值;

U_1 ——输入电压基波有效值;

I_1 ——输入电流基波有效值;

φ_1 ——输入电流基波与输入电压的相位差。

在开关电源等 AC/DC 变换电路中, 可以认为输入电压为正弦波, 而输入电流是非正弦波, 其有效值为

$$I_R = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_n^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_k^2} \quad (1-3)$$

由于电网电压是正弦波, 因此 $U_R = U_1$, 式 (1-2) 可以写成

$$PF = \frac{I_1}{I_R} \cos \varphi_1 = \xi \cos \varphi_1 \quad (1-4)$$

式中

$$\xi = \frac{I_1}{I_R} = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_n^2}} \quad (1-5)$$

式 (1-4) 中的 ξ 为畸变因数, 它标志着电流波形偏离正弦波的程度, $\cos \varphi$ 被称为位移因数, 它标志着基波电流与电压间的相位大小。因此功率因数也被看作是畸变因数与位移因数的乘积。

可以发现, 当电流不含谐波分量时, 该功率因数的定义为 $PF = \cos \varphi_1$, 与传统的功率因数定义一样。因此, 式 (1-2) 可以认为是传统功率因数定义在电流存在谐波情况下的推广。

1.2.2 功率因数和 THD 的关系

工程中, 电流谐波或者电压谐波的含量经常用谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 来表示, 即 THD 定义为总谐波有效值与基波有效值之比:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{j=2}^n I_j^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (1-6)$$

由式 (1-5) 和式 (1-6) 可得 THD 与畸变因数 ξ 的关系为

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (1-7)$$

所以功率因数可以表示为

$$PF = \xi \cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cos \varphi_1 \quad (1-8)$$

当 $\varphi_1 = 0$ 时, $THD < 5\%$ 即可使 PF 控制在 0.9999 左右。

由式 (1-8) 可知, 电流中谐波含量越大, ξ 就会越低, 从而导致功率因数越低。所以只有从输入电流的相位校正技术和谐波的消除技术两个方面考虑, 才能真正提高电路功率因数。

1.2.3 谐波产生的危害

谐波是一个周期电气量的正弦波分量，其频率是基波频率的整数倍，谐波畸变一般分为电压畸变和电流畸变。一般情况下，供电电网电压的畸变率相对电流畸变率低得多，而且电网电压畸变多是由于电流畸变引起的。

在电力电子装置大量应用之前，最主要的谐波源是电力变压器的励磁电流，其次是发电机。近几十年来，公用电网中的谐波源主要是各种电力电子装置（包括家用电器、计算机的开关电源部分）、变压器、发电机、电弧炉等。其中在各种电力电子装置中，整流装置所占的比例最大，由于其输入电流的谐波分量很大，给公用电网造成严重污染，其主要危害有：

(1) 谐波电流在输电线路阻抗上的压降会使电网电压（原来是正弦波）发生畸变（称之为二次效应），影响供电系统的供电质量。

(2) 谐波会增加电网电路的损耗，在电力变压器中，谐波分量不但增加了铜损，还增加了磁滞和涡流损耗，在电机中，谐波也会给定转子带来额外的损耗。

(3) 谐波电流造成输电线路故障，影响电气设备的正常工作。例如，谐波对电机的影响除引起附加损耗外，还会产生机械振动、噪声和过电压，使变压器、电容器和电缆等设备因过热而损坏。

(4) 谐波会对通信线路和雷达设备造成干扰，谐波噪声会对周围的通信系统产生很大的干扰，严重时会使通信系统无法正常工作。

(5) 谐波会引起同一系统中的继电保护装置的误动作，会使常规测量仪表产生谐波误差。

开关电源等电力电子装置产生的谐波不仅对电网造成严重的污染，而且对开关电源等电力电子装置自身也产生许多不利影响，主要有：

(1) 功率因数下降，导致电能利用率降低，由于在不控整流电路中，整流二极管只有在输入电压大于负载电压时才导通，网侧的功率因数很低，一般为 0.5 ~ 0.7，这样就给电网造成大量的能源浪费，使发电和输电设备运行效率下降，同时也加大了对电气设备额定容量的要求。

(2) 过大的尖峰脉冲电流，严重危害直流侧的滤波电容。

(3) 整流二极管正向压降增加、导致功耗增加。

(4) 输入侧的电磁干扰（EMI）滤波元件因承受高峰值电流脉冲，需要加大参数指标，以提高承受能力。

因此，从根本上解决开关电源等电力电子装置的谐波污染问题，对于提高电网供电质量和用电效率、缓解我国的能源短缺问题等都具有重要的现实意义。

1.2.4 谐波限制标准

为了减小开关电源等电力电子装置对电网产生的谐波污染，以保证电网供电质量、提高电网的可靠性；同时也为了提高开关电源输入端功率因数，达到节能效果，必须限制开关电源等电力电子装置所产生的电流谐波。

为此，一些国际组织或国家颁布或实施了一些输入电流谐波限制标准。欧洲和日本等发达国家首先制定了限制谐波的标准，在欧洲要求从 1996 年 1 月 1 日开始，不仅当时生产的新产品，就是当时国内正在出售和进口的电视机、计算机和空调器等几乎所有的电气产品必

须满足谐波标准。在欧洲和日本限制标准的基础上，国际电工委员会（IEC）制定了谐波限制的 IEC61000-3-2 国际标准，针对不同的电器 IEC61000-3-2 分 A、B、C、D 四类（Class A、Class B、Class C、Class D），如图 1-5 所示。

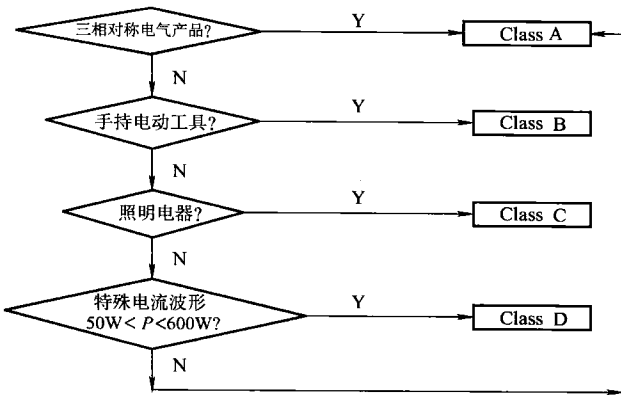


图 1-5 分类流程图

其中，Class A 为三相对称电气设备和不属于其他类别的所有产品；Class B 为手持电动工具；Class C 为照明电器；Class D 为具有特殊输入电流波形，且有功率在 600W 以下的电气产品，如电视机、计算机等。输入电流波形是否属于 Class D，判断方法如图 1-6 所示。输入电流波形的 95% 在台形状所围成的包络线内，属于 Class D，否则为 Class A。表 1-1 中给出了 Class D 及 Class A 的谐波电流限制值。

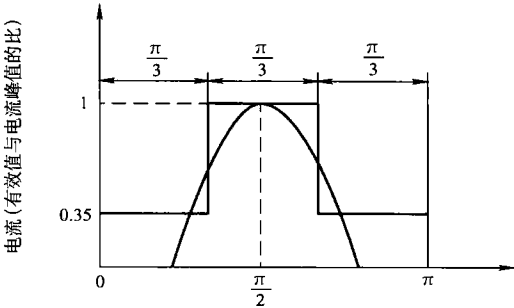


图 1-6 特殊波形

表 1-1 谐波电流限制值

谐波次数 n	电力比例限定值 Class D [$\times (230/U_{\text{nom}})$] [⊖] / (mA/W)	最大允许谐波电流 Class A [$\times (230/U_{\text{nom}})$] [⊖] /A
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.04	0.77
9	0.5	0.40
11	0.354	0.33
$13 \leq n \leq 39$	$3.85/n$	$0.15 \times (15/n)$

⊖ IEC61000-3-2 谐波标准最早是以欧洲各国为中心确立的，电源电压属于 230V 系列，在电源电压不同的国家使用时，可在 IEC 限制值上乘上一个系数 [$\times (230/U_{\text{nom}})$]，例如日本电源电压为 100V，可乘系数 $230/100 = 2.3$ 。

为了解决日益严重的谐波问题,我国也在近年相继发布了 GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》、GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》、GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》、GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》、GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》等五项标准来保证我国的电能质量。

1.3 改善开关电源功率因数及谐波问题的基本方法

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) 改进电力电子装置本身,使之不产生或产生很小的谐波,如采用功率因数校正技术。两者相比较而言,前者是消极的方法,即在装置产生谐波后,进行集中补偿;后者是积极的方法,也是谐波抑制的重要方法,具有广泛的应用前景。

1.3.1 功率因数校正实现方法

功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)技术根据是否用有源器件可分为无源功率因数校正(Passive Power Factor Correction, PPF)技术和有源功率因数校正(Active Power Factor Correction, APFC)技术两大类。

所谓 PPF 技术,就是通过在电路中加入电感和电容等无源元件,而使电路输入端电流波形接近正弦波的方法,它是传统补偿无功和抑制谐波的主要手段,得到了广泛应用。

随着电力电子技术的不断发展,APFC 技术获得迅速发展。其基本思想是:在整流器之后接入 DC/DC 开关变换器,应用电流反馈技术,使输入电流波形接近正弦波并且与输入电压同相位,进而达到功率因数校正的目的。

1. PPF 技术

PPF 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与二极管构成无源网络,对电路中的电流脉冲进行抑制,以降低电流谐波含量,提高功率因数。如图 1-7 所示,在二极管整流桥后添加一个滤波电感和滤波电容结合的无源网络,使得输入电流满足谐波限制要求。

PPF 技术的主要优点是:简单可靠、不需控制电路、EMI 小。主要缺点是:

(1) 滤波电感和滤波电容的值较大,因此体积较大,有色金属耗材多,而且难以得到高功率因数(一般可提高到 0.9 左右),在有些场合下,无法满足现行标准规定的谐波限制要求;

(2) 抑制效果随工作条件的变化而变化;

(3) 如产生的谐波超过设计时的参数,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

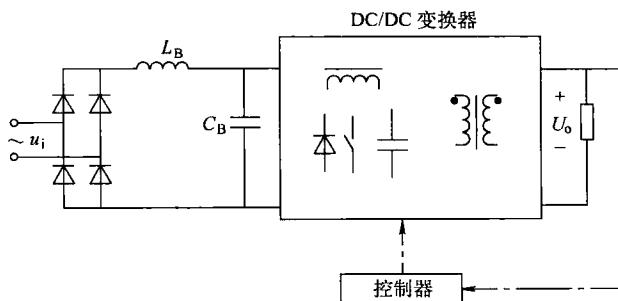


图 1-7 PPF 变换器

载的变化而变化, 这个变化的电压影响了 DC/DC 变换器的性能。

由于 PPFC 技术采用低频电感和电容进行输入滤波, 工作性能与频率、负载变化及输入电压变化有关, 因此比较适合于功率相对较小 (如小于 300W)、对体积和重量要求不高且对价格敏感的场所应用。

近年来, PPFC 技术也有所发展, 出现了若干新型 PPFC 电路, 图 1-8 所示的电路就是其中之一。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

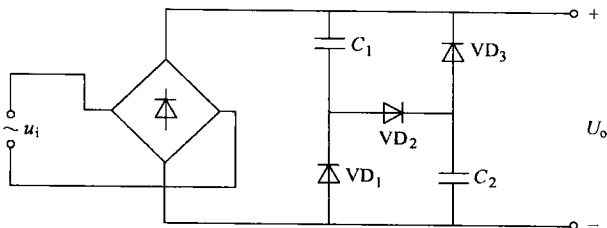


图 1-8 PPFC 整流电路

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, 这种 PPFC 方法可使功率因数达到 0.9 以上。

2. APFC 技术

APFC 技术由于电路工作在高频开关状态, 因此相对于 PPFC 技术具有体积小、重量轻、效率高的优点, 在开关电源中得到广泛应用。

从不同的角度看, APFC 技术有很多种分类方法。从电网供电方式来分, 可分为单相 APFC 电路和三相 APFC 电路; 从控制模式来分, 可分为电流连续模式 (Continuous Current - Mode, CCM)、电流断续模式 (Discontinuous Current Mode, DCM) 和电流临界模式 (Boundary Current - Mode, BCM) 从开关模式来分, 可分为硬开关模式和软开关模式; 从电路构成来分, 可分为两级 APFC 电路和单级 APFC 电路。

两级 APFC 技术经过多年大量的研究, 相对来说比较成熟, 是最常用的方案。图 1-9 所示为两级 APFC 方案的框图, 是由两个相互独立的变换器构成的。前级与整流后的输入电源侧相连, 为实现 APFC 部分, 中间为储能电容, 后级为实现稳定输出电压和输出电压的快速调节部分, 前后级相互独立, 有各自的开关管和控制电路。前级通常采用 Boost

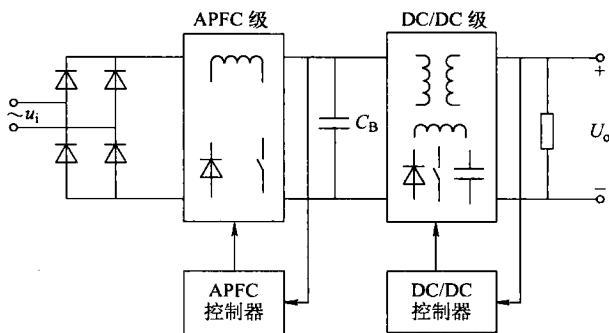


图 1-9 两级 APFC 方案

变换器、工作在 CCM 下实现 APFC, 其母线电压变化范围一般为 380 ~ 400V (单相), 不管储能电容的值多大, 直流母线电压均存在二倍频纹波。这个内部的直流总线电压再通过后级 DC/DC 变换器 (通常由带有隔离变压器的 DC/DC 变换器构成) 实现隔离和变换, 得到负载所需的直流输出电压和实现对输出电压的快速调节。由于母线电压近似恒定, 后级的 DC/DC 变换器可以被优化。此外, 由于母线电压相对较高, 对于一个给定的保持时间可采用较

小的储能电容。但两级方案因为至少有两个开关管和两套控制电路，因此增加了成本和复杂度。

两级 APFC 方案有着明显的优点：

- (1) 输入电流畸变小，THD 一般小于 5%，功率因数大于 0.99；
- (2) 系统动态响应快，可以实现输出电压的快速调节，稳压精度高；
- (3) 调压范围大，功率应用场合广；
- (4) 各级可单独分析、设计和控制，通用性较好。

缺点：电路复杂，成本高，体积大，功率密度低。

1990 年，美国科罗拉多大学 Erickson 教授等将前置级 Boost（升压）电路和后随 Flyback（反激）变换器或者 Forward（正激）变换器的 MOSFET 共用，提出所谓单级 APFC 变换器，将 APFC 级和 DC/DC 级合二为一，目的是减少元器件、节约成本、提高效率 and 简化控制等。

图 1-10 所示为单级 APFC 变换器的框图，同两级 APFC 方案相比，单级 APFC 只有一个开关管和一套控制电路，同时实现输入电流整形和输出电压的快速调节。实际上，控制电路只负责对输出电压进行快速调节。因此，图 1-10 所示的变换器工作在稳定状态时，在半个交流周期里占空比基本不变。在恒定占空比下，Boost 电感自动实现输入电流整形。

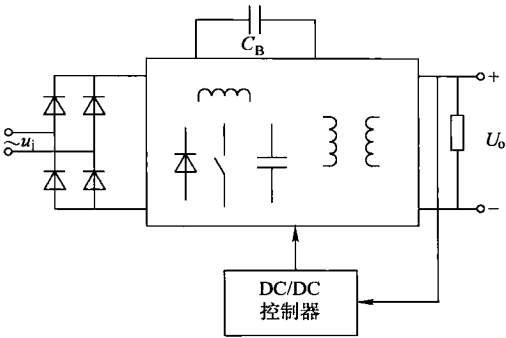


图 1-10 单级 APFC 方案

在图 1-10 中，储能电容 C_B 用来平衡 APFC 级和 DC/DC 级之间瞬时不相等的能量。总的来说，单级 APFC 的性能（THD 和 PF）比 PPFC 方案要好，但不如两级 APFC 方案。

很多单级 APFC 拓扑可以直接从两级 APFC 拓扑经过简单的组合得到，在所有的 APFC 变换器中，在一个交流周期里，瞬态输入功率是脉动的，而后接 DC/DC 变换器的输出功率是恒定的。因此，任何 APFC 电路都必须有一个储能电容存储这些不平衡的能量。然而不同于两级 APFC 变换器，在单级 APFC 变换器里，由于控制器只调节输出电压，不调节储能电容上的电压 U_B ，所以 U_B 不再被调节在一个恒定值。因此，单级 APFC 变换器的 U_B 随输入线电压和负载的变化而变化，且电压变化范围大（轻载时尤为突出），影响了变换器的性能。

1.3.2 功率因数校正方案对比

设计一个 PFC 电路需要考虑的因素有很多，通过前面的简要介绍，可对 PPFC 方案、APFC 两级方案和 APFC 单级方案在 THD、PF、效率、体积、重量、储能电容电压、控制电路、器件数量和设计难度上进行一些对比、分析，见表 1-2。

表 1-2 PFC 方案性能比较

	PPFC 方案	两级 APFC 方案	单级 APFC 方案
THD	高	低	中
PF	低	高	中
效率	高	稍低	稍低