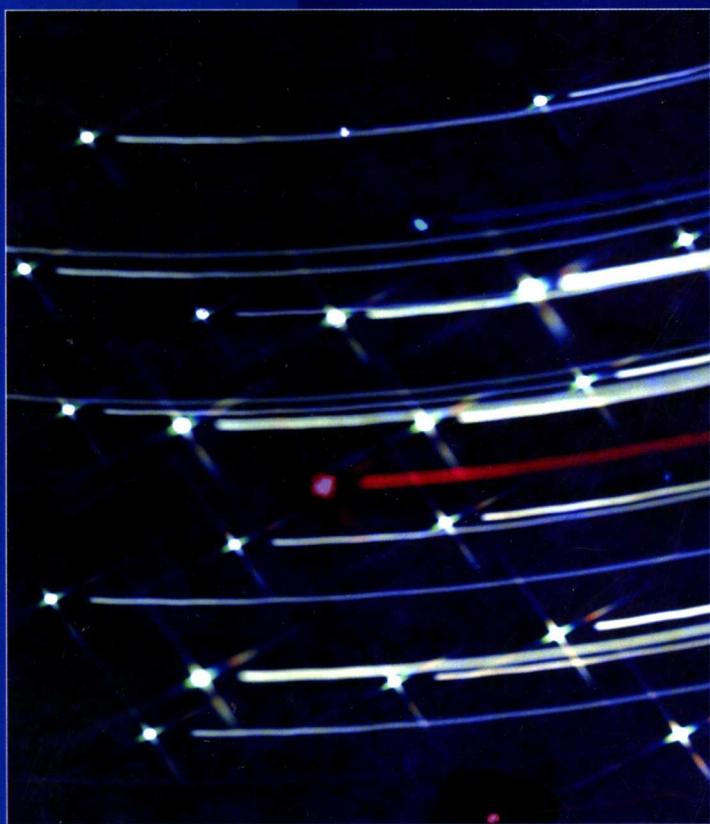


现代电力电子应用技术丛书

开关电源 功率因数校正电路 设计与应用

周志敏 周纪海 纪爱华 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

现代电力电子应用技术丛书

开关电源功率因数校正 电路设计与应用

周志敏 周纪海 纪爱华 编著

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

开关电源功率因数校正电路设计与应用/周志敏,周纪海,纪爱华编著.

—北京:人民邮电出版社,2004.11

(现代电力电子应用技术丛书)

ISBN 7-115-12575-9

I. 开... II. ①周... ②周... ③纪... III. 开关电源—电路设计 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 100956 号

内 容 提 要

本书以典型功率因数校正电路及其应用为核心内容,结合国内外开关电源的应用和发展趋势,系统地阐述了开关电源功率因数校正技术,突出实用性。全书共分为 9 章,主要内容包括开关电源的 PFC 电路、无源 PFC 电路、APFC 电路、单极隔离式 PFC 变换器、三相 PFC 电路、数字控制 PFC 技术、PFC 集成控制电路、开关电源 PFC 电路设计及 PFC 应用电路等。

本书题材新颖实用,内容丰富,文字通俗,可供电信、信息、航天、军事及家电等领域从事电源开发、设计和应用工作的工程技术人员以及高等院校相关专业师生阅读。

现代电力电子应用技术丛书

开关电源功率因数校正电路设计与应用

-
- ◆ 编 著 周志敏 周纪海 纪爱华
 责任编辑 刘 朋
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 读者热线 010-67129264
 北京朝阳展望印刷厂印刷
 新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 印张: 18.25
 字数: 443 千字 2004 年 11 第 1 版
 印数: 1-5 000 册 2004 年 11 北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-12575-9/TN · 2334

定价: 24.00 元

本书如有印装质量问题,请与本社联系 电话:(010) 67129223

丛书前言

电力电子学(或电力电子技术)的理论是建立在电子学、电力学和控制学三个学科基础之上的。起初它被认为是介于电子学、电力学与控制学之间的边缘学科,但是随着电力电子技术的不断发展,它已成为一个涉及领域广阔的学科,可以说凡是涉及到电能应用的场合便有其用武之地。时值今日,它不仅已发展成为高科技的一个分支,而且还是许多高科技的支撑。

电力电子技术之所以和“电力”二字相联,则是因为最初它的应用范围主要是在电气工程和电力系统中,对市电或强电进行控制与变换。其作用就是根据负荷或负载的特殊要求,对市电、强电进行各种形式的变换(主要是频率的变换),以使电气设备得到最佳的电能供给,使电力系统处于最佳的运行状态,从而使电气设备和电力系统实现高效、安全、经济的运行。电力电子技术发展到今天,它不仅仅只涉及到“电力”的变换与应用,而且也涉及到化学能电源(电池)、太阳能电池电能的变换与应用。虽然已突破了当初单纯“电力”的界限,但仍然是功率变换的范围内。仅就电力电子技术本身而言,它主要包括两个方面,即电力半导体器件制造技术和电力半导体变流技术。前者是电力电子技术的基础,后者是电力电子技术的核心。二者相互依存、相互促进,使得电力电子技术发展的势头一浪高过一浪,使其在科技进步和经济建设中发挥着越来越重要的作用。

目前电力电子技术已经成为新世纪应用最广泛和最受关注的技术之一。发达国家对电力电子器件的研制和电力电子技术的创新十分重视,并且投入了大量的人力、物力和财力,形成了具有一定规模的产业,而我国与发达国家相比在技术和产业规模上都还有较大差距。为此,我们特组织有关专家、学者和技术人员编写了《现代电力电子应用技术丛书》,目的在于介绍目前国内外电力电子领域内的新器件、新产品、新工艺、新技术和新方法,推广和普及电力电子技术的应用。本丛书在编写时力求实用性和先进性并举,希望本套丛书的出版能够解决电力电子技术应用中的一些实际问题,促进电力电子技术的发展和广泛应用。

本套丛书主要包括《IGBT 和 IPM 模块应用电路》、《开关电源功率因数校正电路设计与应用》、《现代开关电源控制电路设计及应用》和《充电器电路设计与应用》等,将陆续出版,恳请广大读者批评指正。

本套丛书题材新颖实用,内容丰富,文字通俗,具有较高的实用价值,可供电力、工控、电信、信息、航天、军事及家电等领域的工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生阅读参考。

前 言

电源是各种电子设备必不可少的组成部分,其性能的优劣直接关系到整个系统安全性和可靠性的高低。开关电源是目前电子设备中应用最为广泛的一种电源装置,具有损耗低、效率高、电路简单等显著优点,主要应用在计算机、电子设备、仪器仪表、通信设备和家用电器等中。开关电源功率因数校正(Power Factor Correction,PFC)集成控制电路自 20 世纪 90 年代问世以来,引起了国内外电源界的普遍关注,现已成为最具发展前景和影响力的一项高新技术产品。近年来随着电子信息产业的高速发展,人们对开关电源的需求与日俱增,开关电源 PFC 集成控制器已成为提高开关电源效率、减少电网污染的核心技术,开关电源的开发、研制和生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。随着开关电源的广泛应用,开关电源 PFC 集成控制器显示出了强大的生命力,它具有集成度高、性能价格比高、外围电路简单和性能指标优良等特点,现已成为开发各类开关电源及开关电源模块的优选集成电路。

为此,本书结合国内外开关电源 PFC 技术的发展方向,系统地介绍了开关电源 PFC 技术的原理及典型模块的技术特性,重点介绍了开关电源 PFC 电路的设计与应用技术。本书尽量做到有针对性和实用性,力求做到通俗易懂和结合实际,使得从事开关电源开发、设计、应用和维护的技术人员从中获益。读者可以此为“桥梁”,系统、全面地了解 and 掌握开关电源的设计和应用技术。

本书从开关电源 PFC 技术的发展与创新以及新技术在工程设计中的应用等方面,多角度地讲述开关电源 PFC 技术的发展和应用,具有技术前沿、实用等特点。在本书写作过程中得到了同行的大力支持和帮助,在此深表感谢。由于水平有限,疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

目 录

| | |
|--|----|
| 第 1 章 概述 | 1 |
| 1.1 功率因数的定义及功率因数校正 | 2 |
| 1.1.1 功率因数的定义 | 2 |
| 1.1.2 功率因数校正 | 4 |
| 1.1.3 功率因数校正控制方法 | 7 |
| 1.2 新型开关电源的发展趋势 | 11 |
| 1.2.1 新型开关电源 | 11 |
| 1.2.2 功率因数校正技术的发展动态 | 14 |
| 第 2 章 无源 PFC 电路 | 18 |
| 2.1 无源 PFC 技术 | 18 |
| 2.1.1 无源 PFC 电路 | 18 |
| 2.1.2 改进型无源 PFC 电路 | 21 |
| 2.2 新型单相无源 PFC 整流器的电路拓扑 | 24 |
| 第 3 章 APFC 电路 | 28 |
| 3.1 APFC 电路特性 | 28 |
| 3.1.1 APFC 电路的工作原理及分类 | 28 |
| 3.1.2 APFC 变换器电流型控制技术 | 30 |
| 3.2 APFC 典型电路 | 37 |
| 3.2.1 主频同步控制 PFC 电路 | 37 |
| 3.2.2 输入电流间接控制的 APFC 电路 | 39 |
| 3.2.3 临界断续模式 APFC 电路 | 41 |
| 3.2.4 不使用专用集成电路的 APFC 电路 | 42 |
| 3.2.5 工作于 DCVM 的 Cuk DC/DC 变换器 | 44 |
| 3.3 复合型单开关 PFC 预调节器 | 48 |
| 3.4 基于 SEPIC 的 PFC 电路 | 52 |
| 3.4.1 基于 SEPIC 的 PFC 电路 | 52 |
| 3.4.2 基于 SEPIC 的 PFC 电路的主要参数设计原则 | 55 |
| 3.5 软开关 PFC 电路 | 58 |
| 3.5.1 PFC 无损吸收电路 | 58 |
| 3.5.2 单相三电平 PFC 电路拓扑 | 59 |
| 3.5.3 单相三电平无源无损软开关 PFC 电路 | 61 |
| 第 4 章 单级 PFC 变换器 | 64 |
| 4.1 单级隔离式 PFC | 64 |

| | | |
|--------------|-----------------------------------|------------|
| 4.1.1 | 典型的单级隔离式 PFC 变换器拓扑结构 | 64 |
| 4.1.2 | 新型单级 PFC 变换器拓扑结构 | 65 |
| 4.1.3 | 单级 PFC 变换器的功率因数校正效果分析 | 71 |
| 4.1.4 | 单级 PFC 电路的直流母线电压 | 75 |
| 4.1.5 | 单级 PFC 变换器的设计 | 78 |
| 4.2 | 基于 Flyboost 模块的新型单级 PFC 电路 | 84 |
| 4.2.1 | 基于 Flyboost 模块的新型单级 PFC 变换器 | 84 |
| 4.2.2 | 恒功率控制的单级 PFC 电路 | 89 |
| 第 5 章 | 三相 PFC 电路 | 94 |
| 5.1 | 三相整流器 PFC 电路 | 94 |
| 5.1.1 | 三相 PFC 典型电路 | 94 |
| 5.1.2 | 三相多开关 PFC 电路 | 99 |
| 5.2 | 三相 PFC 控制电路 | 107 |
| 5.2.1 | 三相电压型 PWM 整流器的间接电流控制 | 107 |
| 5.2.2 | 多谐振软开关三相高功率因数整流器 | 110 |
| 5.2.3 | 三相降压式准谐振 PFC 电路 | 114 |
| 5.3 | 单相 PFC 组合的三相 PFC 电路 | 118 |
| 5.3.1 | 单相 PFC 组合的三相 PFC 电路的拓扑结构 | 118 |
| 5.3.2 | 多相交叉升压组合电路 | 119 |
| 5.4 | 三相单开关 PFC 电路 | 123 |
| 5.4.1 | 三相单开关 PFC 拓扑结构 | 123 |
| 5.4.2 | 单开关三相高功率因数低谐波整流器 | 127 |
| 5.4.3 | 大容量开关电源的 PFC 电路 | 131 |
| 5.5 | 三相 PFC 技术的发展 | 133 |
| 第 6 章 | PFC 数字控制技术 | 138 |
| 6.1 | 数字控制方法的特点及其在 PFC 中应用 | 138 |
| 6.1.1 | PFC 模拟控制和数字控制的比较 | 138 |
| 6.1.2 | 数字控制 PFC 的实现 | 140 |
| 6.2 | DSP 控制的 PWM 整流器 | 145 |
| 6.2.1 | PWM 整流器及 DSP 控制方案 | 145 |
| 6.2.2 | 控制系统的设计 | 146 |
| 6.2.3 | PFC 数字化模型 | 150 |
| 第 7 章 | PFC 集成控制器 | 155 |
| 7.1 | UC 系列 PFC 集成控制器 | 155 |
| 7.1.1 | UC3852 PFC 集成控制器 | 155 |
| 7.1.2 | UC3854 PFC 集成控制器 | 158 |
| 7.1.3 | UC3854A/B PFC 集成控制器 | 160 |

| | |
|--|------------|
| 7.1.4 UC3855 PFC 集成控制器 | 165 |
| 7.2 UCC 系列 PFC 集成控制器 | 166 |
| 7.2.1 UCC3858 PFC 集成控制器 | 166 |
| 7.2.2 UCC18500 系列 PFC/PWM 组合控制器 | 170 |
| 7.3 TDA 系列 PFC 集成控制器 | 171 |
| 7.3.1 TDA16888 PFC 集成控制器 | 171 |
| 7.3.2 TDA4862 PFC 集成控制器 | 175 |
| 7.3.3 TDA16846 PFC 集成控制器 | 177 |
| 7.4 ML 系列 PFC 集成控制器 | 178 |
| 7.4.1 ML4841 PFC/PWM 集成控制器 | 178 |
| 7.4.2 ML4824 PFC/PWM 复合控制器 | 179 |
| 7.5 其他系列 PFC 集成控制器 | 182 |
| 7.5.1 FA5331P(M)/FA5332P(M)PFC 集成控制器 | 182 |
| 7.5.2 L4981 PFC 集成控制器 | 185 |
| 7.5.3 NCP1650 PFC 集成控制器 | 186 |
| 7.5.4 HA16141 PFC/PWM 集成控制器 | 190 |
| 7.5.5 MC34262 系列 PFC 集成控制器 | 193 |
| 7.5.6 FAN4803 PFC 集成控制器 | 197 |
| 7.5.7 CM68/69××系列 PFC+PWM 单片集成控制器 | 199 |
| 第 8 章 PFC 电路设计 | 204 |
| 8.1 高性能软开关 PFC 主电路设计 | 204 |
| 8.1.1 PFC 主电路 | 204 |
| 8.1.2 主要元器件的选择 | 205 |
| 8.2 利用 MC34262 设计 APFC 电路 | 206 |
| 8.3 UC3852 在 PFC 电路中的应用 | 208 |
| 8.3.1 PFC 功率级设计 | 208 |
| 8.3.2 控制电路的设计 | 211 |
| 8.3.3 UC3852 PFC 应用电路 | 215 |
| 8.3.4 UC3852 控制的 PFC 电路工作原理 | 216 |
| 8.3.5 APFC 电路设计实例 | 217 |
| 8.4 UC3854 的特性及其在 PFC 电路中的应用 | 219 |
| 8.4.1 UC3854 的特性 | 219 |
| 8.4.2 UC3854 在小功率开关电源中的应用 | 222 |
| 8.5 利用 UC3854A/B 设计 PFC 电路 | 225 |
| 8.6 利用 UCC28510 设计 APFC 电路 | 230 |
| 8.7 UCC3858 的典型应用与电路分析 | 236 |
| 8.8 利用 TOPSwitch 设计 PFC 电路 | 242 |
| 8.9 利用 ML4824 设计带 PFC 电路的蓄电池充电器 | 246 |

| | |
|---|-----|
| 第 9 章 PFC 技术的应用 | 250 |
| 9.1 PFC 技术在开关电源中的应用 | 250 |
| 9.1.1 200kHz/200W 环保型开关电源 | 250 |
| 9.1.2 HT-220/10 高频开关电源 | 255 |
| 9.2 具有 PFC 的高效 UPS 变换器 | 258 |
| 9.2.1 变换器的工作原理 | 258 |
| 9.2.2 变换器的设计 | 260 |
| 9.3 高功率因数低空载损耗 AC/DC 电源 | 261 |
| 9.3.1 基本工作原理 | 262 |
| 9.3.2 参数设计 | 263 |
| 9.4 变频空调中的 PFC 控制电路 | 265 |
| 9.5 PFC 预变换器应用电路 | 268 |
| 9.6 单级 PFC 电路在 AC-PDP 开关电源中的应用 | 269 |
| 9.7 采用 FAN4803 设计的开关电源电路 | 272 |
| 9.8 采用 UC3854A/B 设计的直接并联大功率 AC/DC 变换器 | 273 |
| 参考文献 | 280 |

第 1 章 概 述

开关电源以其效率高、功率密度高而在电源领域中占主导地位。开关电源多数是通过整流器与电力网相接的,经典的整流器是由二极管或晶闸管组成的一个非线性电路,在电网中会产生大量的电流谐波和无功功率而污染电网,成为电力公害。传统的开关电源存在一个致命的弱点,即功率因数较低,一般仅为 0.45~0.75,而且其无功分量基本上为高次谐波,其中三次谐波的幅度约为基波幅度的 95%,五次谐波的幅度约为基波幅度的 70%,七次谐波的幅度约为基波幅度的 45%,九次谐波的幅度约为基波幅度的 25%。高次谐波的危害在很多文献中已有论述,这里不再赘述。

开关电源已成为电网最主要的谐波源之一。针对高次谐波的危害,从 1992 年起国际上开始以立法的形式限制高次谐波,传统的开关电源在此限制之列。我国国家技术监督局在 1993 年颁布了国家标准 GB/T 14549-93《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 IEC5552 进行了修正,另外还制定了 IEC61000-3-2 标准,其 A 类标准对电网谐波的要求见表 1-1。传统整流器因谐波远远超标而面临前所未有的挑战。

表 1-1 IEC61000-3-2A 类标准对电网谐波的要求

| | 谐波次数 n | 最大允许谐波电流值(A) |
|----|----------|--------------------|
| 奇次 | 3 | 2.30 |
| | 5 | 1.14 |
| | 7 | 0.77 |
| | 9 | 0.40 |
| | 11 | 0.33 |
| | 13 | 0.21 |
| | 15~39 | $0.15 \times 15/n$ |
| 偶次 | 2 | 1.08 |
| | 4 | 0.43 |
| | 6 | 0.30 |
| | 8~40 | $0.23 \times 8/n$ |

抑制开关电源产生谐波的方法主要有两种:一是被动法,即采用无源滤波或有源滤波电路来旁路或滤除谐波;二是主动法,即设计新一代高性能整流器,它具有输入电流为正弦波、谐波含量低以及功率因数高等特点,即具有功率因数校正功能。国外改善开关电源功率因数工作的重点,主要是功率因数校正电路拓扑结构的研究和功率因数校正控制集成电路(如 UC3842~UC3855A 系列、KA7524、TDA4814 等)的开发,国内一些厂家也做了类似的工作。采用功率

因数校正电路的开关电源,其功率因数可达 0.95~0.99,近似于 1。近年来功率因数校正电路得到了很大的发展,成为电力电子学研究的重要方向之一。

1.1 功率因数的定义及功率因数校正

1.1.1 功率因数的定义

根据电工学的基本理论,功率因数(PF)定义为有功功率(P)与视在功率(S)的比值,用公式表示为

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{U_1 I_1 \cos \phi_1}{U_1 I_R} = \frac{I_1 \cos \phi_1}{I_R} = \gamma \cos \phi_1 \quad (1-1)$$

式中: I_1 为输入电流基波有效值; I_R 为电网电流有效值, $I_R = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$, 其中 I_1, I_2, \dots, I_n 为输入电流各次谐波有效值; U_1 为输入电压基波有效值; γ 为输入电流的波形畸变因数; $\cos \phi_1$ 为基波电压和基波电流的位移因数。

可见,功率因数由输入电流的波形畸变因数 γ 以及基波电压和基波电流的位移因数 $\cos \phi_1$ 决定。 $\cos \phi_1$ 越小,则设备的无功功率越大,设备利用率越低,导线和变压器绕组的损耗越大; γ 越小,表示设备输入电流谐波分量越大,将造成电流波形畸变,对电网造成污染,使功率因数降低,严重时会造成电子设备损坏。通常无源电容滤波二极管整流电路输入端的功率因数只能达到 0.65 左右。从式(1-1)可见,抑制谐波分量即可达到减小 γ 、提高功率因数的目的。因此,可以定性地说谐波的抑制电路就是功率因数校正电路(实际上二者有所区别)。

如何抑制和消除谐波对公共电网的污染、提高功率因数已成为当今国内外电源界研究的重要课题。PFC 技术应用到新型开关电源中,已成为新一代开关电源的主要标志之一。

1. 不良功率因数的成因

由 $PF = \gamma \cos \phi_1$ 知,PF 值由以下两个因素决定:一是输入基波电压与输入基波电流的相位差 ϕ_1 ,二是输入电流的波形畸变因数 γ 。

(1) 相控整流电路

对于常见相控整流电路,其基波电压和基波电流的位移因数如表 1-2 所示。

表 1-2 常见相控整流电路基波电压和基波电流的位移因数

| 电路形式 | 单相电路 | 三相电路 | 12相电路 |
|----------------|-------|-------|-------|
| 基波电压和基波电流的位移因数 | 0.911 | 0.949 | 0.986 |

功率因数低的主要原因是基波电压和基波电流位移因数 $\cos \phi_1$ 的影响,即受可控硅控制角 α 影响,使电流滞后于电压, $\cos \phi_1 < 1$ 。改善功率因数的措施,一般是在负载端并联一个性质相反的电抗元件。若电网呈感性,通常采用电容补偿的方法。

(2) 开关整流电路

对开关整流电路而言,AC/DC 前端通常由桥式整流器和大容量滤波器组成,如图 1-1 所示。在这种电路中,只有当线路的峰值电压大于滤波电容两端的电压时,整流元件中才有电流流过,如图 1-2 所示。图中, i 为输入电流, u 为输入电压。输入电流 i 呈尖脉冲形式,且产生一系列奇次谐波(如图 1-3 所示),致使功率因数降低为 0.6~0.7。所以,对开关整流电路而言,不良功率因数主要源于电流波形的畸变。

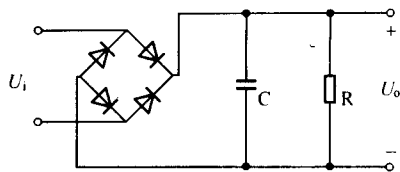


图 1-1 AC/DC 前端电路

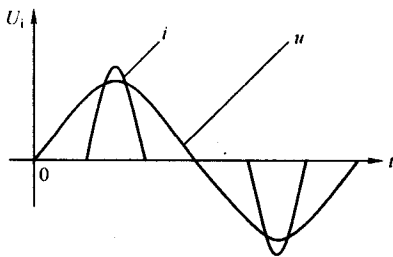


图 1-2 输入电压与整流二极管波形

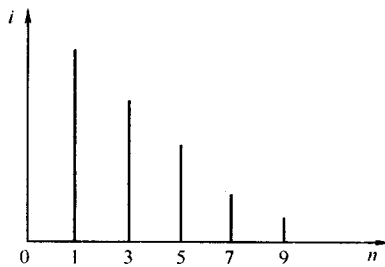


图 1-3 输出谐波分量

2. 谐波电流对电网的危害

脉冲状的输入电流中含有大量谐波,因此在 AC/DC 整流输入端需加滤波电路,从而增加了电路的体积和成本。谐波电流对电网的危害主要表现在以下几个方面:

① 谐波电流的“二次效应”,即电流流过线路阻抗而造成的谐波压降反过来使电网电压波形(原来是正弦波)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,谐波电流还会引起电网 LC 谐振,或者高次谐波电流流过电网的高压电容,使之过流、过热而导致电容器损坏。

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,使中性线因过流而导致中性线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,引起电话网噪音,引起照明设备故障等。

3. 开关电源的功率因数

常规开关电源功率因数低的根源是整流电路后面的滤波电容使输出电压平滑,但却使输入电流变为尖脉冲,如图 1-4 所示。而当整流电路后面不加滤波电路,仅为电阻性负载时,输入电流即为正弦波,并且与电源电压同相位,功率因数为 1。因此,功率因数校正电路的基本思想是将整流电路与滤波电容隔开,使整流电路由电容性负载变为电阻性负载。在功率因数校正电路中,其隔离型电路如图 1-5 所示。因为这种电路结构不能实现输入与输出的电隔离,所以提出了单极正弦波输入电流的电网隔离型开关电源。

具有低污染、高效率、低应力、低输出纹波等特点的新型开关电源主要包括 EMI 及浪涌吸收滤波电路、前级有源软开关功率因数校正电路、移相谐振软开关 DC/DC 变换电路及输出纹波抑制电路等。

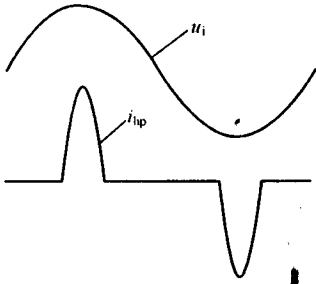


图 1-4 常规开关电源输入电压与输入电流的波形

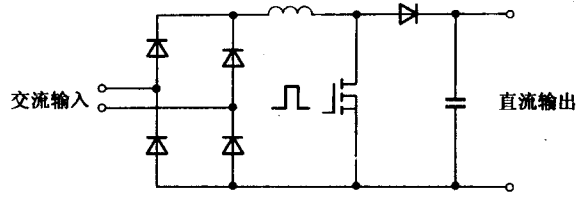


图 1-5 基本隔离型 PFC 电路

一般开关电源的输入整流电路如图 1-6 所示。市电经整流后对电容充电，其输入电流波形为不连续的脉冲，如图 1-7 所示。这种电流中除了含有基波分量外，还含有大量的谐波，其有效值 I 为

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (1-2)$$

式中： I_1, I_2, \dots, I_n 分别表示输入电流的基波分量与各次谐波分量。

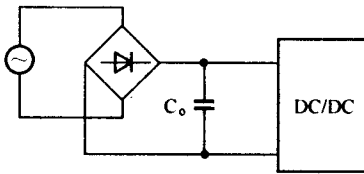


图 1-6 电容输入型电路

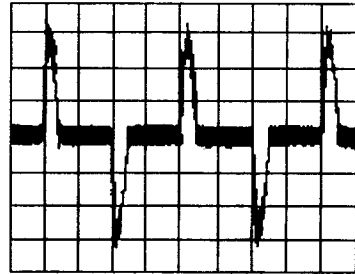


图 1-7 电容输入型电路的输入电流(5A/DIV)

谐波电流使电力系统的电压波形发生畸变。将各次谐波有效值与基波有效值的比称为总谐波畸变 (Total Harmonic Distortion, THD)，其表达式为

$$THD = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2}} \quad (1-3)$$

THD 用来衡量电网的污染程度。

1.1.2 功率因数校正

1. 功率因数校正的基本原理

功率因数校正电路基本上是一个 AC/DC 变换器。一个标准的变换器利用脉冲波宽度调制 (Pulse Width Modulation) 技术来调整输入功率的大小，以供应适当的负载所需的功率。脉冲波宽度调制器控制切换开关 (通常利用 Power MOSFET 来达成) 将直流输入电压变换成一串电压脉冲波，随后利用变压器和快速二极管将其转成平滑的直流电压输出。这个输出电压随即与一个参考电压 (这个电压是电源供应器应该输出的标准电压值) 进行比较，所产生的电压差回馈至 PWM 控制器。这个误差电压信号用来改变脉冲波宽度的大小，如果输出电压过高，脉冲波宽度会减小，进而使输出电压降低，以使输出电压恢复至正常输出值。

PFC 电路也是利用这个方法，但是加入了一个更先进的元件，使得来自交流电源的电流是一个正弦波并与交流电压同相位。此时误差电压信号的调变是由整流后的交流电压和输出

电压的变化来控制的,最后误差电压信号回馈至 PWM 控制器。也就是说,当交流电压较高时,PFC 电路就从交流电源吸取较多的功率;反之,若交流电压较低,则吸收较少的功率,这样可以抑制交流电流谐波的产生。

2. PFC 技术的分类

根据电网供电方式,PFC 电路可分为单相 PFC 电路和三相 PFC 电路;根据电路构成,PFC 电路可分为无源 PFC 电路和有源 PFC(Active Power Factor Correction, APFC)电路。

PFC 技术有多种分类方法,一般认为有两种基本的有源 PFC 技术,其中一种是变换器工作在连续导电模式下的乘法器型 PFC 技术,另一种是变换器工作在不连续导电模式下的电压跟随器型 PFC 技术。实际上还有磁放大 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。

乘法器型 PFC 技术的基本原理是 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,使其幅值与与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。乘法器型 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。乘法器型 PFC 技术的控制方式可分为三种: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)。

基本电压跟随器型 PFC 电路中的变换器工作在不连续导电模式,其开关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与输入电压波形相同。

事实上,对于不同的变换器结构,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 电路的控制方式更为简单,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。另外,变换器工作在不连续导电模式下,从而避免了 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(或是 LC 低通滤波器)以滤除高频纹波。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。

根据软开关特性,有源 PFC 技术可分为两类,即零电流开关(Zero Current Switching)PFC 技术和零电压开关(Zero Voltage Switching)PFC 技术。按实现软开关的具体方法,每一种 PFC 技术还可以进一步划分为并联谐振型、串联谐振型以及准谐振型。

在控制方法上,有源 PFC 技术可以采取脉宽调制(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)控制等控制方法。从拓扑结构上划分,有源 PFC 电路可分为预调整器(Preregulator)型 PFC 电路以及单极组合 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。

3. 常用功率因数校正方法

目前广泛使用的改善功率因数的方法主要有以下几种:

① 多脉冲整流法。它的基本原理是利用变压器对各次不同谐波电流进行移相,使奇次谐波在变压器次级相互叠加而抵消。这种方法在变压器负载平衡的情况下对减小输入端的低次

谐波是有效的。

② 无源滤波法。在电路的整流器和电容之间串联一个滤波电感,或在交流侧接入一个谐振滤波器。其主要优点是电路简单,成本低,可靠性高,电磁干扰小;主要缺点是尺寸大,重量大,难以得到高功率因数(一般可提高到 0.9 左右),工作性能与频率、负载变化及输入电压有关,电感和电容间有大的充放电电流等。这种方法对抑制高次谐波有效,但滤波设备庞大,而且运行情况受系统阻抗的影响,若不使用调谐电抗器,很可能会与系统电抗产生并联谐振。但由于此法结构简单,目前还常使用。

③ 有源功率因数校正法。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。在整流器和负载之间接入一个 DC/DC 开关变换器,应用电流反馈技术,使输入端电流 i_i 的波形跟踪交流输入正弦电压的波形,从而使电网输入端的电流波形逼近正弦波,并与输入的电网电压同相位。这种方法的主要优点是:可得到较高的功率因数,总谐波畸变小,可在较宽的输入电压范围内和宽带下工作,体积小,重量轻,输出电压也可保持恒定。主要缺点是:电路复杂,MTBF(平均无故障时间)下降,成本较高,效率会有所降低等。有源功率因数校正器已广泛应用在 AC/DC 开关电源、交流不间断电源(UPS)等领域。

综上所述,只要设法抑制输入电流中的谐波分量,即通过电路方法将输入电流波形校正为正弦波或使其无限接近正弦波,即可实现功率因数校正。有很多的电路方式可以实现这一目的,比如说在电路中加入一个大电感(如图 1-8 所示),使整流管的导通角变大。这种方法虽然简单,价格低,但存在体积大、重量大、效果不好(PF 小于 80%)等缺点。

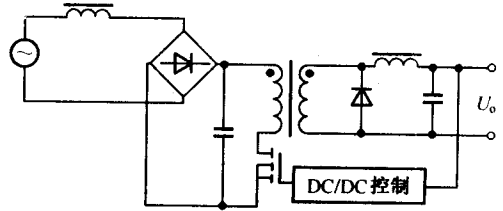


图 1-8 扼流圈输入型电路

4. 功率因数校正电路的结构形式

功率因数校正电路分为有源和无源两种。

无源功率因数校正电路通常由大容量的电感、电容和工作于工频电源的整流器组成。有源功率因数校正电路往往工作于高频开关状态,它们的体积较小,重量较轻,其功率比无源功率因数校正电路的效率高。图 1-9 给出了功率因数校正电路的三种不同结构形式。这三种结构形式各有其特点,如表 1-3 所示。

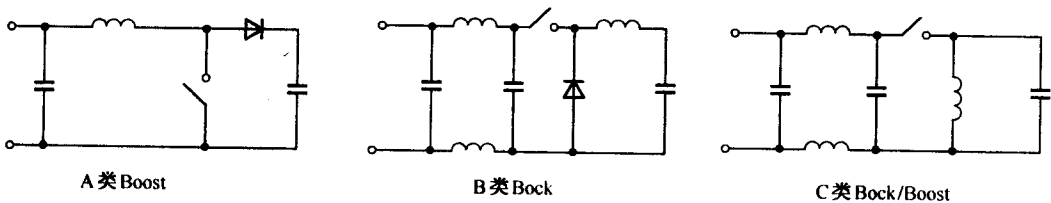


图 1-9 功率因数校正电路的不同形式
三种功率因数校正电路的特点

表 1-3

| 结构形式 | A 类 | B 类 | C 类 |
|-------------------|----------------|----------------|------------|
| 功率因数 | 高 | 低 | 高 |
| U_o 与 U_i 的关系 | $U_o \geq U_i$ | $U_o \leq U_i$ | U_o 为任意值 |

续表

| 结构形式 | A类 | B类 | C类 |
|--------|----------|----------|----------------|
| 滤波电路体积 | 小 | 大 | 大 |
| 短路保护 | 无 | 有 | 有 |
| 开关电压 | 等于 U_0 | 等于 U_1 | 等于 $U_1 + U_0$ |
| 门极驱动信号 | 接地 | 浮地 | 浮地 |

由于 Boost 电路结构简单,实现成本低,所以它是目前应用最广泛的功率因数校正电路。除了上述特点以外,在 Boost 电路中与整流桥串联的电感能减小高频噪声,减小输入滤波器的体积,从而降低了成本。图 1-10 是此电路的原理框图。

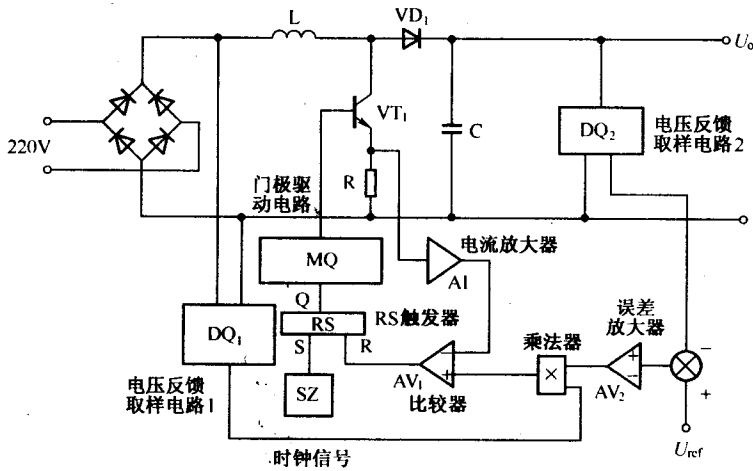


图 1-10 Boost 功率因数校正电路原理框图

Boost 拓扑结构的功率因数校正电路工作在连续电流模式(也就是说输入端的电感电流在整个切换周期内是连续导通的),利用输入电容 C_i 可减少切换时所造成的杂信号回流至交流电源。此外,Boost 电感只储存一小部分的转换能量,因为交流电源在电感去磁期间,即 MOSFET 在关断期间仍持续供给能量,所以与其他拓扑结构相比,Boost 拓扑结构只需较小的电感。

1.1.3 功率因数校正控制方法

有源功率因数校正的概念出现于 1980 年,但被重视和推广则是在 20 世纪 80 年代末期和 90 年代。欧洲和日本相继对开关电源装置的输入谐波要求制定了标准,目前有两个标准,它们分别是 IEC555-2 和 IEC1000-3-2。综观 PFC 技术的发展,PFC 技术可划分为两大类,一类是无源 PFC 技术,另一类是 APFC 技术。前者采用无源元件来改善输入功率因数,减小电流谐波以满足标准要求,其特点是方法简单、但电路体积庞大、笨重,在有些场合则无法满足要求。后者是用一个变换器串入整流滤波电路与 DC/DC 变换器之间,通过特殊的控制强迫输入电流跟随输入电压,反馈输出电压使之稳定,从而使 DC/DC 变换器的输入实现预稳。这种方法的特点是控制复杂,但体积大大减小,设计也易优化,从而进一步提高了性能。目前研究

最多的是 APFC 技术。

APFC 技术的研究已有一段时间,目前最为大家所关注的 APFC 电路有下面两类:一是两级 APFC 电路;二是单级 APFC 电路。两级 APFC 电路通常由一个专门负责功率因数校正的前置级和一个 DC/DC 变换器构成,而这一前置的功率级基本上都是 Boost 电路。单级 APFC 电路一开始就是在对两级方法简化的基础上另辟途径进行专门研究。

目前 APFC 的控制策略有单环控制和双环控制两种,其中单环控制又分为平均电流模式、峰值电流模式、滞后电流模式和电压模式等几种,双环控制将电流控制与电压控制融为一体。图 1-10 是双环控制的原理框图,采用 Boost 电路作为开关变换器输入侧的电流反馈控制内环,电流检测信号经电流反馈网络送入乘法器,输出端直流电压反馈至控制外环,电压检测信号经误差放大器放大后也送入乘法器,最后从乘法器输出的信号送入 PWM 比较器,从而控制开关管 VT_1 的占空比。内环控制大大提高了系统的瞬态响应能力;外环控制使系统具有高度的静态电压稳定性,而且展宽了 AC/DC 变换器输入电压的调节范围。

常用的利用 AC/DC 变换器实现有源功率因数校正的方法有两大类:一是乘法器控制法,二是电压跟踪控制法。下面主要介绍乘法器控制法的 3 种基本方式,即电流峰值控制、电流滞环控制以及平均电流控制。

1. 电流峰值控制

电流峰值控制的输入电流波形如图 1-11 所示。开关管在恒定的时钟周期内导通,当输入电流上升到基准电流时,开关管关断。取样电流取样于开关电流 i_k 或电感电流 i_L 。可实现电流峰值控制的集成电路有 ML4812、ML4819 等。

2. 电流滞环控制

电流滞环控制的输入电流波形如图 1-12 所示。开关导通时电感电流 i_L 上升,当其上升到上限阈值 i_{max} 时,滞环比较器输出低电平,开关管关断,使电感电流下降;当电感电流下降到下限阈值 i_{min} 时,滞环比较器输出高电平,开关管导通,使电感电流上升。如此周而复始地工作,其中取样电流来自电感电流。

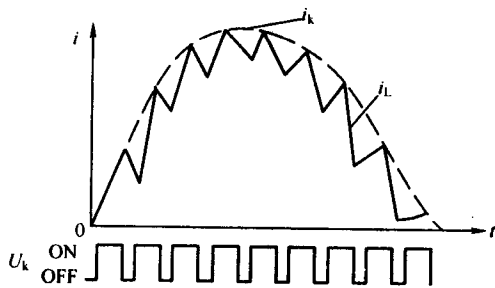


图 1-11 电流峰值控制的输入电流波形

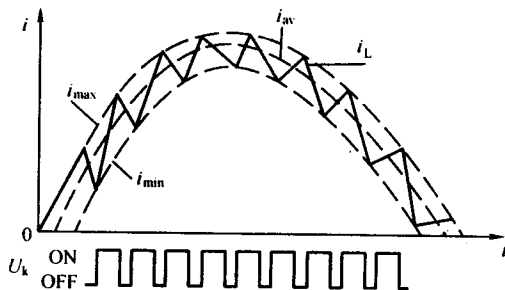


图 1-12 电流滞环控制的输入电流波形

3. 平均电流控制

平均电流控制的输入电流波形如图 1-13 所示。在平均电流控制方式中,电感电流信号与锯齿波信号相加,当两信号之和大于基准电流时开关管关断,当其和小于基准电流时开关管导通。取样电流来自实际输入电流而不是开关电流。用于平均电流控制的集成电路有