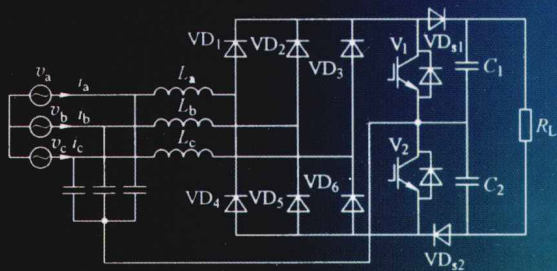


“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎ 徐德鸿 李睿 刘昌金 林平 编著

现代整流器技术 —— 有源功率因数 校正技术

XIANDAI ZHENGLIUQI JISHU
YOUYUAN GONGLV YINSHU
JIAOZHENG JISHU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
电力电子新技术系列图书

现代整流器技术—— 有源功率因数校正技术

徐德鸿 李 睿 刘昌金 林 平 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了功率因数校正电路的原理和应用技术。书中详细介绍了单相功率因数校正电路原理及控制方法（包括 CCM 单相 Boost 型功率因数校正电路、CRM 单相 Boost 型功率因数校正电路、交错并联功率因数校正电路、无桥型功率因数校正电路、低频开关功率因数校正电路）和三相功率因数校正电路原理及控制（重点介绍了电压型和电流型三相功率因数校正电路数学模型、锁相、PWM、控制技术）。此外，本书还介绍了软开关功率因数校正电路的原理，包括单相、三相有源箝位零电压开关功率因数校正电路。

本书可作为电气工程与自动化专业、电子信息工程专业的高年级本科生、电气工程学科的研究生参考书，也可作为从事开关电源、变频器、UPS、工业电源等电力电子装置开发、设计工程技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

现代整流器技术：有源功率因数校正技术/徐德鸿等编著. —北京：机械工业出版社，2013. 1

“十二五”国家重点图书出版规划项目

（电力电子新技术系列图书）

ISBN 978-7-111-40752-2

I. ①现… II. ①徐… III. ①整流器 - 功率因数校正
IV. ①TM461②TM714. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 301999 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：孙流芳 责任编辑：孙流芳 罗莉

版式设计：霍永明 责任校对：肖琳 樊钟英

封面设计：马精明 责任印制：邓博

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 19.25 印张 · 393 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-40752-2

定价：49.80 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 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主任：王兆安

副主任：白继彬 牛新国 徐德鸿 杨耕

委员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈伯时	陈道炼	陈坚	陈守良
陈治明	高艳霞	郭世明	黄耀先	康勇
李崇坚	李永东	刘进军	吕征宇	牛新国
钱照明	阮新波	孙流芳	童宗鉴	王鸿麟
王旭东	王兆安	邬伟扬	肖湘宁	徐德鸿
徐殿国	杨耕	杨旭	余岳辉	张波
张承慧	张为佐	张卫平	张兴	赵善麒
赵争鸣	钟彦儒	周波	周维维	查晓明

秘书组：陈守良 刘进军 孙流芳 罗莉

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在 20 世纪 80 年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

2. 理论联系实际，以应用技术为主。

3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

大量的用电器首先将交流 50Hz 的市电能转换成直流电能，然后才加以使用。这种将交流电转换成直流电的装置通常称为整流器，也称为 AC-DC 电力电子变换器。作为用电器与电网接口，AC-DC 电力电子变换器广泛应用于计算机、通信、照明、家电、特种电源、电动机驱动、不间断电源、光伏和风力等新能源发电用变换器等场合。

传统 AC-DC 电力电子变换器由二极管或晶闸管整流电路构成，产生大量的电力谐波，造成电力环境的谐波污染和电能的浪费，并影响电网安全运行，成为电力公害。为维护良好的电力环境，许多国家和国际组织制定了限制电力谐波标准。自 20 世纪 90 年代起，高性能 AC-DC 电力电子变换器的研究开发引起国内外广泛的关注，出现了有源功率因数校正（Power Factor Correction, PFC）技术。它采用现代电力电子器件，如功率 MOSFET、IGBT、IGCT 等，并结合脉宽调制（PWM）控制技术，使得用电器仅从电网取用正弦波电流，即用电器具有单位功率因数，一般称这样的 AC-DC 电力电子变换器为有源功率因数校正变换器，简称 PFC 变换器。随着人们对电能质量和电力环境的意识的逐步增强，有源功率因数校正技术将获得更加广泛的应用。

本书共分为 8 章。第 1 章在讨论传统整流器对电网的谐波干扰和谐波危害的基础上，介绍了谐波标准和电磁兼容标准，简要介绍了两种谐波抑制原理，即被动式抑制电力电子装置谐波的方法和有源功率因数校正技术，重点介绍了功率因数校正电路的概念，还简要说明了软开关功率因数校正电路的概念。第 2 章介绍了电力电子变换电路基础，包括基本变换电路及调制方式。第 3 章介绍了单相有源功率因数校正电路原理及控制方法，包括 CCM 单相 Boost 型功率因数校正电路、CRM 单相 Boost 型功率因数校正电路、交错并联功率因数校正电路、无桥型功率因数校正电路、低频开关功率因数校正电路。第 4 章介绍三相功率因数校正电路原理及控制方法，包括单开关、双开关、三开关、六开关三相功率因数校正电路。第 5 章在分析三相三线线和三相四线 PWM 整流器的数学模型的基础上，介绍了相应的控制策略，还介绍了三相 PWM 整流器的电网锁相方法。第 6 章介绍了三相电流型 PWM 整流器的工作原理，给出了电流型整流器的数学模型、PWM 控制技术，还介绍了四种常用的电流型整流器的控制方法。第 7 章介绍软开关功率因数校正技术，包括单相、三相软开关功率因数校正技术。在三相软开关电路方面，介绍了直流侧和交流侧软开关电路。第 8 章详细分析了有源箝位软开关功率因数校正电路，主要包括复合有源箝位零电压开关（ZVS）单相 PFC 电路、最小电压有源箝位 ZVS 单相 PFC

电路、复合有源箝位 ZVS 三相 PFC 电路和最小电压有源箝位 ZVS 三相 PFC 电路，还详细介绍了各种电路的工作原理、谐振过程分析、软开关实现条件分析和开关应力分析。

本书可作为电气工程与自动化专业、电子信息工程专业的高年级本科生、电气工程学科的研究生参考书，也可作为从事开关电源、变频器、工业电源等电力电子装置开发、设计工程技术人员的参考书。

徐德鸿制定了本书的章、节目录和编写大纲，并撰写了前言、第 1 章、第 3 章、第 4 章，并负责全书的统稿。李睿撰写了本书第 5 章、第 7 章、第 8 章。刘昌金撰写了本书第 6 章，林平撰写了本书第 2 章。

在本书的编写过程中，得到柳绪丹、马智远等的大力支持，本书还引用了国内外许多专家、学者的著作、论文等文献，在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限、所见资料有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

作者

电力电子新技术系列图书

目 录

- 矩阵式变换器技术及其应用 孙凯、周大宁、梅杨编著（已出版）
- 逆变焊机原理与设计 张光先等编著（已出版）
- 高压直流输电原理与运行（第2版） 韩民晓、文俊编著（已出版）
- 宽禁带半导体电力电子器件及其应用 陈治明、李守智编著（已出版）
- 开关电源的实用仿真与测试技术 陈亚爱编著（已出版）
- 交流电动机直接转矩控制 周扬忠、胡育文编著（已出版）
- 新能源汽车与电力电子技术 康龙云编著（已出版）
- 电力电子技术在汽车中的应用 王旭东、余腾伟编著（已出版）
- 脉冲功率器件及其应用 余岳辉、梁琳、彭亚斌、邓林峰编著（已出版）
- 开关稳压电源的设计和应用 裴云庆、杨旭、王兆安编著（已出版）
- 太阳能光伏并网发电及其逆变控制 张兴、曹仁贤、张崇巍编著（已出版）
- 高频开关型逆变器及其并联并网技术 孙孝峰、顾和荣、王立乔、郭伟扬编著（已出版）
- 电力半导体器件原理与应用 袁立强、赵争鸣、宋高升、王正元编著（已出版）
- PWM 整流器及其控制 张兴、张崇巍编著（已出版）
- 机车动车牵引交流传动技术 郭世明编著（已出版）
- 电压源换流器在电力系统中的应用 同向前、伍文俊、任碧莹等编著（已出版）
- 有功源率因数校正技术 徐德鸿编著（已出版）
- 固态感应加热电源技术及其应用 陈辉明、金天均、李胜川编著
- 电能质量控制技术 查晓明、孙建军、宫金武编著
- 功率变换器高频磁技术及其应用 陈为编著
- 双馈风力发电交流控制技术 杨淑英、张兴、曹仁贤、张崇巍编著
- 电力电子新器件及其制造技术 王彩琳编著
- 船舶电力推进系统 汤天浩、韩朝珍主编
- 绝缘栅双极型晶体管（IGBT）设计与工艺 赵善麟、高勇、王彩琳编著
- 高性能多单元串联多电平变换器原理及实现 周京华、陈亚爱编著
- 新能源并网发电系统的低电压穿越和控制 耿华、刘淳、张兴、杨耕编著
- 异步电机无速度传感器高性能控制技术 张永昌、张虎、李正熙编著

已出版相关工具书目录

书 名	书 号	定 价	出 版 时 间
电气传动自动化技术手册(第3版)	978-7-111-33989-2	198	201105
高压变频器应用手册	978-7-111-26564-1	88	200905
低压变频器应用手册	978-7-111-26701-0	188	200905
电力电子设备设计和应用手册(第3版)	978-7-111-25571-0	188	200901
电力电子技术手册(译)	978-7-111-14261-6	118	200406
工业控制自动化技术实用手册	978-7-111-24703-6	98	200901
低压电器选用手册	978-7-111-24333-5	49	200808
电气工程师手册(第3版)	978-7-111-19818-5	128	200808
电气电子绝缘技术手册	978-7-111-22570-6	158	200801
电线电缆手册(第2版增订版)(第1册)	978-7-111-23975-8	138	200805
电线电缆手册(第2版增订版)(第2册)	978-7-111-25322-8	68	200901
电线电缆手册(第2版)(第3册)	978-7-111-28417-8	88	200911
光伏技术与工程手册	978-7-111-33935-9	198	201107
风电场工程技术手册	978-7-111-14023-8	88	201002
电气工程安装及调试技术手册新版(上、下册)	978-7-111-24228-4	398	200808

以上图书由全国各地新华书店经销。也可由中国科技金书网(WWW. golden-book. com) 订购, 联系电话: 010-68993821 010-88379639 010-88379641

目 录

电力电子技术系列图书序言

前言

绪论 1

第 1 章 有源功率因数校正技术

基础 8

1.1 整流电路及谐波 8

1.2 谐波的危害 10

1.3 功率因数、谐波、电磁干扰及标准 11

1.4 谐波抑制方法 14

1.4.1 被动式谐波抑制方法 14

1.4.2 有源功率因数校正方法 15

1.5 功率因数校正电路 17

1.5.1 单相功率因数校正电路 17

1.5.2 三相功率因数校正电路 19

1.6 软开关 PFC 20

1.6.1 软开关的概念 20

1.6.2 软开关 PFC 电路 23

1.7 本章小结 27

参考文献 28

第 2 章 电力电子变换电路基础 30

2.1 DC-DC 变换器 30

2.1.1 降压型 DC-DC 变换器 30

2.1.2 升压型 DC-DC 变换器 34

2.1.3 升降压型 DC-DC 变换器 38

2.1.4 隔离型变换器 42

2.2 DC-AC 变换器——逆变器 49

2.2.1 单相逆变器 49

2.2.2 脉宽调制 (PWM) 控制 51

2.2.3 三相逆变器 53

2.2.4 空间矢量调制 (SVM) 工作原理 55

2.3 AC-DC 变换器——功率因数校正

电路 56

2.3.1 有源功率因数校正电路分类 56

2.3.2 有源两级 PFC 变换技术 56

2.3.3 有源单级 PFC 变换技术 58

2.4 本章小结 62

参考文献 62

第 3 章 单相有源功率因数校正 63

3.1 单相有源 PFC 原理 63

3.1.1 电阻负载模拟 63

3.1.2 电力电子变换器与有源 PFC 64

3.2 CCM 单相 Boost 型 PFC 变换器 68

3.2.1 电路原理分析 69

3.2.2 CCM 单相 Boost 型 PFC 变换器的控制 74

3.3 DCM 单相 Boost 型 PFC 变换器 78

3.3.1 CRM 单相 Boost 型 PFC 变换器电路分析 81

3.3.2 CRM 单相 Boost 型 PFC 变换器的控制 85

3.4 其他单相 PFC 变换技术 87

3.4.1 无桥型 PFC 变换电路 87

3.4.2 低频开关 PFC 变换电路 87

3.4.3 窗口控制 PFC 变换电路 91

3.5 本章小结 93

参考文献 93

第 4 章 三相有源功率因数校正 96

4.1 三相单开关 Boost 型 PFC 电路及控制 96

4.1.1 工作原理 96

4.1.2 三相单开关 PFC 电路的控制 103

4.2 三相六开关 PFC 电路及控制 105

4.3 其他三相 PFC 电路	108
4.3.1 三相双开关 PFC 电路	108
4.3.2 三相三开关三电平 PFC 电路	109
4.3.3 电流型三相 PFC 电路	110
4.4 本章小结	110
参考文献	111
第 5 章 三相六开关电压型 PWM 整流器的控制	113
5.1 三相三线 PWM 整流器原理 分析	113
5.1.1 三相三线 PWM 整流器的 工作原理	113
5.1.2 三相三线 PWM 整流器的空间 矢量坐标系下的数学 模型	125
5.2 三相三线 PWM 整流器的电流 控制	134
5.2.1 三相三线 PWM 整流器的 间接电流控制	134
5.2.2 三相三线 PWM 整流器的 直接电流控制	135
5.2.3 基于同步旋转坐标系的三相 三线 PWM 整流器的直接 电流控制	136
5.2.4 考虑电网电压不平衡时的 改进控制方法	141
5.3 三相四线 PWM 整流器的数学 模型和控制	153
5.3.1 三相四线 PWM 整流器的 数学模型	154
5.3.2 三相四线 PWM 整流器的 控制	163
5.4 交流电源锁相环技术	171
5.4.1 硬件锁相环	174
5.4.2 软件锁相环	176
5.5 本章小结	184
参考文献	184

第 6 章 三相电流型 PWM

整流器	189
6.1 三相电流型 PWM 整流器原理 ..	189
6.1.1 三相电流型整流器的工作 原理	189
6.1.2 abc 静止坐标系下的三相电流 型 PWM 整流器的数学 模型	192
6.1.3 dq 旋转坐标系下三相电流 型 PWM 整流器的数学 模型	194
6.1.4 稳态分析	196
6.1.5 三相电流型 PWM 整流器的 交流小信号模型	198
6.2 三相电流型 PWM 整流器的调制 技术	199
6.2.1 电流型 SPWM 驱动信号的 分配原理	199
6.2.2 电流型 PWM 整流器的空间 矢量调制 (SVM) 技术	200
6.3 三相电流型 PWM 整流器的 控制	203
6.3.1 abc 静止坐标系下的间接 电流控制原理	203
6.3.2 abc 静止坐标系下的直接 电流控制原理	205
6.3.3 dq 旋转坐标系下的直接电流 控制原理	209
6.3.4 基于调制比和相位角的电流 型整流器控制原理	211
6.4 本章小结	214
参考文献	214
第 7 章 软开关有源功率因数校正 技术	216
7.1 PFC 软开关技术的意义	216
7.2 软开关单相功率因数校正器	217
7.2.1 几种常见的单相软开关 PFC 变换器拓扑	219
7.2.2 复合有源箝位 ZVS 单相 PFC 变换器	230

7.2.3 最小电压有源箝位 ZVS 单相 PFC 变换器	233	变换器	261
7.3 软开关三相 PFC 变换器	234	8.2.1 最小电压有源箝位 Boost 型 PFC 变换器工作原理 分析	262
7.3.1 几种常见的三相软开关 PFC 变换器拓扑	234	8.2.2 最小电压有源箝位 Boost 型 PFC 变换器的谐振过程 分析	265
7.3.2 复合有源箝位 ZVS 三相 PFC 变换器	244	8.2.3 最小电压有源箝位 Boost 型 PFC 变换器的稳态分析	268
7.3.3 最小电压有源箝位 ZVS 三相 PFC 变换器	246	8.3 复合有源箝位 ZVS 三相 Boost 型 PFC 变换器	271
7.4 本章小结	247	8.3.1 改进的复合有源箝位 ZVS 三相 Boost 型 PFC 变换器空间矢量 调制方法	273
参考文献	247	8.3.2 复合有源箝位 ZVS 三相 Boost 型 PFC 变换器理论分析	277
第 8 章 ZVS 有源箝位软开关 功率因数校正器	251	8.4 最小电压有源箝位 ZVS 三相 Boost 型 PFC 变换器	290
8.1 复合有源箝位 ZVS 单相 Boost 型 PFC 变换器	251	8.5 本章小结	293
8.1.1 复合有源箝位 Boost 型 PFC 变换器工作原理分析	252	参考文献	293
8.1.2 复合有源箝位 Boost 型 PFC 变换器的谐振过程分析	255		
8.2 最小电压有源箝位 Boost 型 PFC			

绪 论

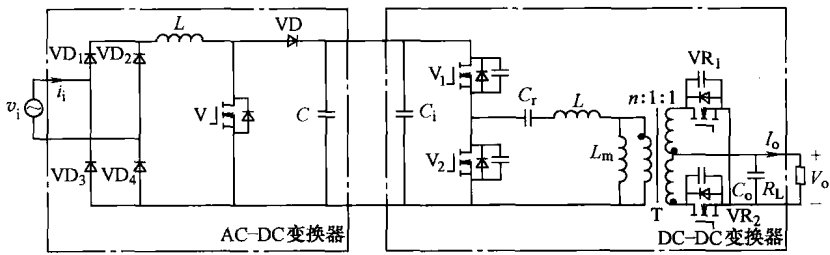
电能具有传输、分配、使用方便的特点，是目前最广泛使用的能源形式。为了满足各种用电负载或设备的要求，或者为了提高电能使用的效率，许多用电器首先将交流 50Hz 的市电通过 AC-DC 功率变换器转换成直流电能，然后再转换成其他电压等级的直流或其他频率的交流电能。这种将交流 50Hz 的市电转换成直流电压的装置通常称为整流器，也被称为 AC-DC 功率变换器。作为用电器与电网接口，AC-DC 功率变换器广泛应用于计算机电源、通信电源、节能灯、LED 照明系统、家用电器、电动机驱动变频器、不间断电源、光伏和风力发电变换器、工业电源等场合。

传统 AC-DC 电力电子变换器由二极管或晶闸管组成的整流电路构成，工作时会产生大量的电力谐波，因此造成电力环境的谐波污染和电能的浪费，成为电力公害。保证电网的安全、优质、经济运行，维护良好的电力环境，许多国家和国际组织制定了限制电力谐波标准。自 20 世纪 90 年代起，高性能 AC-DC 电力电子变换器的研究开发引起人们的广泛关注。高性能 AC-DC 电力电子变换器采用电力电子器件，如功率金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）或绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等，并且应用脉宽调制（PWM）控制技术，使电网输入的电流逼近正弦波和单位功率因数，一般将这样 AC-DC 电力电子变换技术称为有源功率因数校正（Power Factor Correction, PFC）技术，称这样的 AC-DC 电力电子变换器为有源 PFC 变换器，随着人们对电能质量和电力环境意识的逐步强化，有源 PFC 变换器将获得更加广泛的应用，它是整流器发展的方向。

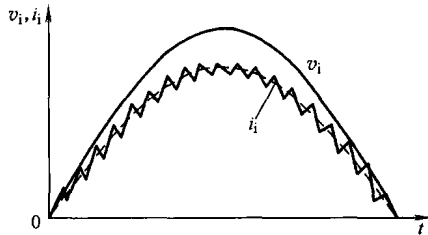
1. 有源 PFC 变换器的用途

图 0-1 是表示通信基础电源的示意图。它由前级功率因数校正（PFC）变换器和 DC-DC 变换器构成，如图 0-1a 所示。前级 PFC 变换器实现输入电流的功率因数校正，使电网输入的电流逼近正弦波和单位功率因数。后级 DC-DC 变换器实现电隔离，同时实现高精度的输出。PFC 变换器有两个功能，保证 PFC 单元输入电流跟踪输入电网电压变化，逼近正弦波，以实现通信基础电源输入功率因数为 1，如图 0-1b 所示。此外，PFC 变换器的另一个功能是使输出直流电压稳定，为后级 DC-DC 变换器提供稳定的电压输入。

图 0-2 为不间断电源（UPS）的示意图。当市电正常时，交流市电通过前级 AC-DC 电力电子变换器转换成直流电能，一边通过逆变器向负载供电，另一边向电池充电。这里前级 AC-DC 电力电子变换器有两个功能，一个功能是实现功率因数校正，即使电网输入的电流逼近正弦波和功率因数为 1；另一个功能是输出稳定



a) 通信基础电源功率变换原理电路



b) 输入电流跟踪输入电网电压变化波形

图 0-1 通信基础电源的电路及输入电压、电流波形

的直流电压，供给后级逆变器。在市电正常时，输入电能通过 AC-DC 整流器和 DC-AC 逆变器处理再供给负载，因此对电网干扰具有很好的抑制能力。在市电故障时，蓄电池的电能经逆变器逆变成交流电能，供给负载。如果逆变器出现故障，通过旁路静态开关切换到电网，由电网直接向负载供电。

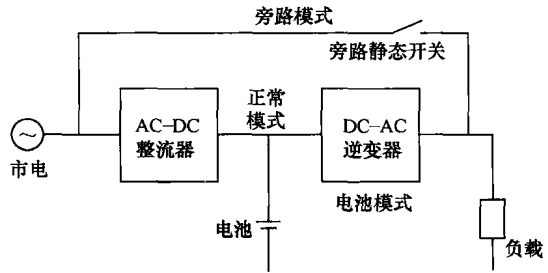


图 0-2 不间断电源的示意图

图 0-3 为用于电动机驱动变频器的示意图。变频器由前级 AC-DC 电力电子变换器和逆变器构成。前级 AC-DC 功率变换器的作用实现三相功率因数校正，同时稳定中间直流电压，最后由逆变器将直流电压转换成频率和输出电压基波幅度可变

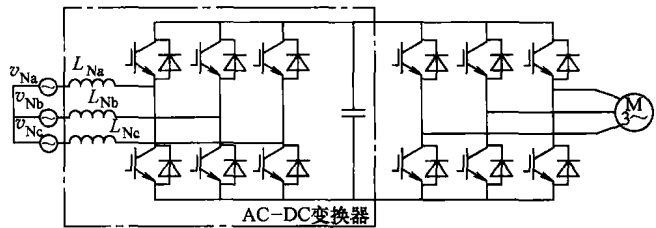


图 0-3 电动机驱动变频器

的电，供给电动机以满足电动机调速的目标。异步电动机的调制方式有恒压频比 (V/f) 控制、转差频率控制、矢量控制、直接转矩控制等。

风力发电输出功率与风速有关，为获得最大功率，要求风力机的速度可变，使它根据运行条件而变化。图 0-4 为双馈风电机组示意图，双馈发电机定子接入电网，通过变频器控制双馈发电机的转子绕组电压幅度和频率，以调节发电机转子速度，最终实现风力机的最大风能捕获。这里驱动双馈发电机的变频器也是由前级 AC-DC 电力电子变换器和逆变器构成。前级 AC-DC 电力电子变换器的作用实现三相功率因数校正，同时稳定中间直流电压。对于双馈风电机组要求前级 AC-DC 电力电子变换器能够实现能量双向流动，而且在电网发生故障时，功率因数需要可控，以满足故障穿越的要求。

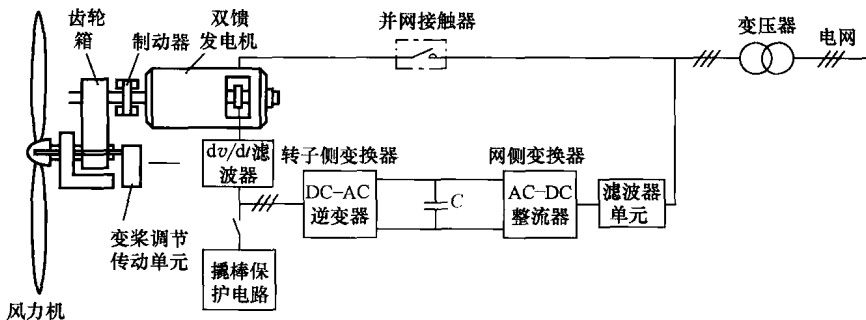


图 0-4 双馈风电机组示意图

2. 有源 PFC 变换电路分类

PFC 技术按照是否采用有源电力电子器件可以分为无源 PFC 技术和有源 PFC 技术两大类。利用电感电容等无源器件组成滤波器来减少谐波，以提升功率因数的方法被称作无源 PFC 技术。无源 PFC 技术存在体积和重量较大、功率因数提升效果不理想等问题。引入功率 MOSFET 或 IGBT 等电力电子开关器件，通过对电力电子开关器件的 PWM 控制，使得网侧输入交流电流跟踪输入电网电压正弦波，实现高功率因数的方法则称为有源 PFC 技术。本书重点介绍有源 PFC 技术。

图 0-5 所示为采用有源 PFC 的开关电源的示意图。它由前级 PFC 变换器和后级 DC-DC 变换器构成。前级 PFC 变换器实现输入电流正弦化，而后级 DC-DC 变换器实现输出电压的高精度和快速响应。前级 PFC 电路将交流输入电压转换为直流母线电压，通常为 400V 左右，同

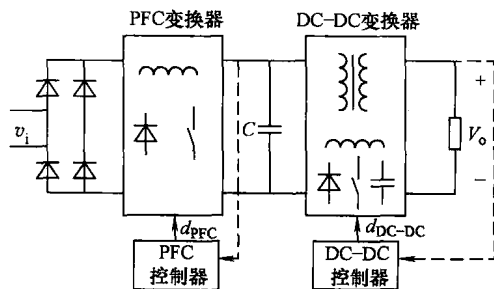


图 0-5 开关电源的示意图

时控制网侧输入电流跟踪输入正弦电压，实现高输入功率因数。后级 DC-DC 变换器电路将 400V 直流母线电压精确地调节为所需的直流电压，并且可以获得较快的动态响应。

两级 PFC 结构可以实现较高的功率因数，且可以获得较高精度的输出电压，但是电路中使用器件较多。于是出现了单级 PFC 变换器的概念，将 PFC 变换器与 DC-DC 变换器合二为一，简化了电路。但是单级 PFC 拓扑存在电压电流应力较大、效率偏低的问题，适合于小功率且输出性能要求较低的场合。因此，目前许多电力电子装置设计一个前级 AC-DC 变换器，专门用于实现 PFC。

从理论上讲，基本 DC-DC 变换器拓扑都可以用来作为有源 PFC 电路，图 0-6 给出了 Boost（升压）型变换器、Buck（降压）型变换器及 Buck-Boost（升降压）型变换器构成的单相 PFC 电路。但由于 Boost 型变换器输入电流连续，易于实现较高的功率因数，对电磁干扰（EMI）滤波器要求较小，且开关管源极接地而便于驱动电路设计，另外 Boost 型变换器的电能变换效率也较高，是目前应用最为广泛的 PFC 电路。

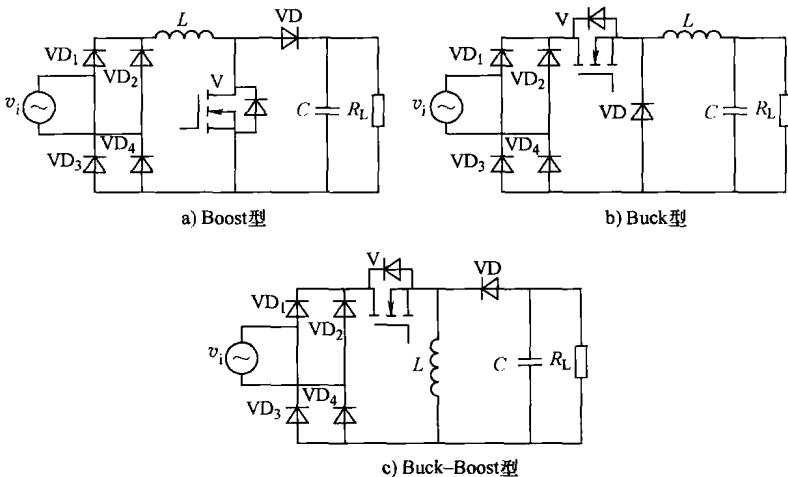


图 0-6 单相有源 PFC 变换器

在 Boost 型 PFC 电路的基础上，又出现交错并联 Boost 型 PFC 电路、无桥 PFC（Bridgeless PFC）电路、单级 PFC（Single Stage PFC, S^2 PFC）电路。表 0-1 给出了单相有源功率因数校正电路分类。

常用的 PFC 电路控制方法有平均电流控制、峰值电流控制、电流滞环控制、电压跟踪控制、单周期控制等方法。PFC 控制策略按照电感电流特性，还可以分为电感电流连续模式（Continue Current Mode, CCM）、电感电流断续模式（Discontinue Current Mode, DCM）和介于两者之间的电感电流临界模式（Critical Current Mode, CRM）。

表 0-1 单相有源功率因数校正电路分类

分类	特点	用途
Boost 型 PFC 电路	输入滤波电感小,输出直流电压大于输入交流电压幅值	应用广泛,如计算机电源、通信电源、工业电源、家用电器
Buck 型 PFC 电路	具有输出降压功能,滤波元件大	特殊场合
交错并联 Boost 型 PFC 电路	功率密度较高	服务器电源、通信电源、液晶电视电源
无桥型 PFC 电路	功率器件通态损耗减少	服务器电源、通信电源等
单相三电平 PFC 电路	功率器件电压应力低,效率高	服务器电源、通信电源等
单级 PFC 电路	电路元器件少,但效率较低	小功率充电器、家用电器

大功率的场合通常采用三相电路,于是出现了三相 PFC 电路。三相 PFC 电路及控制技术吸取了单相的思想。三相单开关 PFC 电路可以看成是单相电流断续 Boost 型 PFC 电路在三相电路中的延伸,如图 0-7 所示。三相单开关 PFC 电路输出电压与参考电压的误差经过比例积分 (PI) 调节器放大后,与三角波比较获得 PWM 脉冲,对功率器件 V 进行开关的动作。三相单开关 PFC 电路仍存在较大的输入电流畸变,

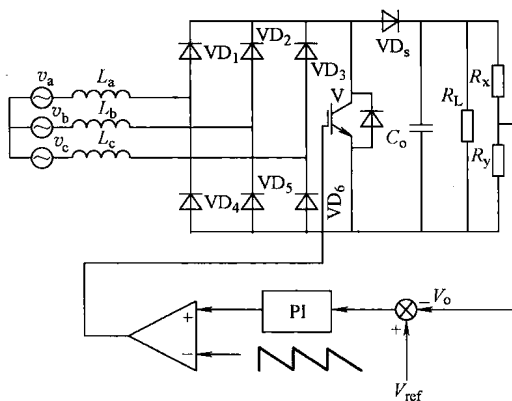


图 0-7 三相单开关 PFC 电路

于是出现了一些改进方法,如注入谐波的方法通过开关管的控制脉宽微调,从而减小电流总谐波畸变率 (THD) 值,将两个三相单开关 PFC 的交错 (Interleaving) 并联的方法也减小输入电流的 THD 等。

在三相电路中,三相电流总共有两个自由度,而三相单开关 PFC 中只使用了一只开关管对电流进行控制,不能有效地控制输入的各相电流,因此仍存在较大的输入电流畸变。可以通过增加一只开关管提高对输入三相电流波形的控制性。图 0-8 为三相双开关 PFC 电路。通过输入端 Y 联结的三个电容构成的中点与输

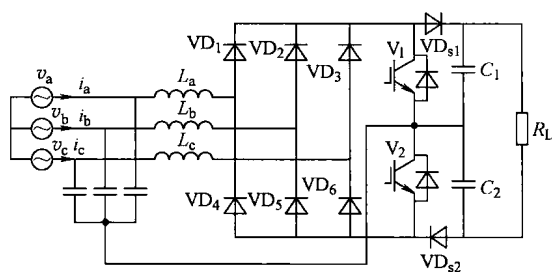


图 0-8 三相双开关 PFC 电路