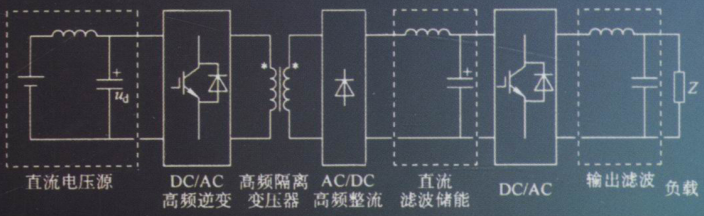
“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子
新技术系列图书
New Technology Series in
Power Electronics



◎孙孝峰 顾和荣 王立乔 邬伟扬 编著

高频开关型逆变器及其并联并网技术

GAOPIN KAIGUANXING NIBIANQI
JIQI BINGLIAN BINGWANG 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

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　邬伟扬　编著

机械工业出版社

本书系统介绍了开关型逆变器的拓扑、调制、控制及在可再生能源并网中的应用。第1章主要综述逆变器的应用和发展状况；第2、3章主要描述单相逆变器的拓扑工作原理；第4章主要描述三相逆变器的拓扑工作原理，重点介绍了准单极逆变拓扑与控制及串联谐振高频链单极逆变器的拓扑及控制；第5章主要阐述逆变器的调制技术；第6章主要阐述逆变器无源逆变与有源并网逆变控制技术，逆变器电压、电流线性与非线性控制器设计；第7章主要阐述逆变器的并联均流技术；第8章主要阐述逆变器的并网切换及分布式电网应用的新技术。

本书可供从事逆变器应用等工作的专业技术人员、技术管理人员以及高等院校有关专业的教师与学生参考使用，也可以作为电气工程方面的研究生教材使用。

图书在版编目（CIP）数据

高频开关型逆变器及其并联并网技术/孙孝峰等编著. —北京：机械工业出版社，2011.1（2011.10重印）

（电力电子新技术系列图书）

ISBN 978-7-111-32395-2

Ⅰ.①高… Ⅱ.①孙… Ⅲ.①高频－开关电源－逆变器 Ⅳ.①TN86 ②TM464

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第213303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：罗 莉

版式设计：霍永明 责任校对：申春香

封面设计：马精明 责任印制：李 妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2011年10月第1版第2次印刷

169mm×239 mm·16.5印张·368千字

3 001—5 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-32395-2

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　周雒维　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

众所周知，开关型逆变技术的应用和电力电子技术中的各种功率变换技术的应用一样，已经渗透到包括工业、民用、航空航天和各种高科技领域的所有方面。

全控型功率半导体开关的出现和高频脉宽调制技术在开关型功率变换电路中的广泛采用，使开关型逆变器的发展进入了一个崭新的阶段，它为开关型功率变换装置向更高的功率密度、更高的效率、更高的静态和动态性能、更高程度的模块化和集成化奠定了基础。逆变技术可以说是实现电能高效变换为目标的电力电子技术中的核心技术，逆变技术的高速发展代表和体现了电力电子技术的高速发展。因此，本书遵循“以应用为主，力求反映电力电子技术的新成就和新经验”的编写宗旨，重点围绕开关型逆变技术、开关型逆变器拓扑、高频调制和各种相应的控制技术以及逆变器的开关均流技术展开编写工作。但是，考虑到逆变技术的基础阶段和发展的过程，书中仍然包含了基于方波逆变和负载谐振型逆变的电路拓扑及工作原理分析，而对组成开关型逆变器的电力电子器件特性、驱动电路、吸收电路、输入输出滤波及辅助性电路未加阐述，有关这些内容，读者可以从已出版的许多电力电子技术书籍中查阅到，这样可以有利于突出本书的特色。

以光伏、风力发电等为代表的新能源的开发和利用是当前世界各国在实现环境保护和人类可持续发展中所共同面临的重大机遇和挑战。开关型逆变器已经显露出其独突的、无可替代的重要性。同时，为了实现逆变器本身及新能源发电系统的高效、稳定和安全的运行，对开关型逆变技术提出了许多新的、更为复杂的要求，新的技术标准也在不断地推出和修改之中，因此本书在编写中，尽力把有关逆变器的并网和脱网技术，包括孤岛技术介绍给大家。由于这方面还有很多研究工作正在进行，本书也只是介绍了一些基础性的研究工作，以便与同行交流。进一步的研究工作，如多能源多并网逆变器的分布式发电系统并网协调控制与切换控制、柔性并网、独立运行时多个逆变器的电压和频率的协调控制，以及适合三相逆变器和/或多台并网逆变器情况下的无盲区孤岛检测方法和防伪孤岛技术等研究将在今后适当的时候再进一步介绍。

在 2003～2006 年期间，编者有幸和华中科技大学共同承担了一项国家自然科学基金重点项目——“新型高频中小功率逆变电源的控制和拓扑研究”（项目编号：50237020），本书中的内容大部分与此相关，因此本书的出版实际上是所有参加该课题工作的全体同志的劳动成果，编者借此机会向所有参加课题工作的同事表示由衷的谢意！本书由燕山大学邬伟扬教授提出整体结构，孙孝峰、顾和荣、王立乔和邬伟扬共同编写，孙孝峰完成了最后的统稿工作。编写过程中，王德玉博士、

郭小强博士在资料整理、打印、插图等方面做了大量工作，硕士生彭晶、王强、王爱涛等也参与了部分文字录入工作，向他们表示感谢！

本书编写提纲曾由《电力电子新技术系列图书》编委会组织审查并提出宝贵意见，在本书的编写过程中也参考和引用了国内外同行的著作和文章，在此一并致以深切的谢意！

由于作者水平所限，难免有叙述不当或错漏之处，欢迎读者提出宝贵意见。

燕山大学　孙孝峰

目　录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章　概论 …… 1

1.1　电能变换与开关型逆变技术应用…… 1

1.2　开关型逆变器的现状及发展…… 4

1.2.1　高频开关型逆变器的基本电路结构…… 4

1.2.2　开关型逆变器的高频调制与控制…… 7

1.2.3　逆变器电源的发展趋势…… 8

1.2.4　逆变器在可再生能源并网发电中的应用与技术需求 …… 10

第 2 章　单相开关型逆变器的电路拓扑及工作原理 …… 14

2.1　单相逆变电路 …… 14

2.1.1　单相逆变电路拓扑 …… 14

2.1.2　单相逆变电路开关器件利用系数 …… 16

2.1.3　单相逆变电路性能比较 …… 17

2.2　单相方波输出逆变电路工作原理 …… 18

2.2.1　单相方波输出逆变电路 …… 18

2.2.2　相移式方波逆变电路 …… 21

2.2.3　负载谐振型逆变电路 …… 23

2.3　基于方波组合的正弦波输出逆变电路 …… 32

第 3 章　单相高频链逆变器的电路拓扑及工作原理 …… 39

3.1　带中间直流储能环节的高频链逆变电路 …… 39

3.2　单级高频链逆变电路 …… 41

3.2.1　电压型单级高频链逆变器 …… 41

3.2.2　电流型单级高频链逆变器 …… 44

3.3　电压型准单级高频链逆变电路 …… 45

3.3.1　电路拓扑 …… 45

3.3.2　工作原理 …… 46

3.4　串联谐振高频链逆变电路 …… 53

3.4.1　串联谐振与能量传递 …… 53

3.4.2　电路结构 …… 55

3.4.3　工作过程分析 …… 56

3.4.4　谐振电流给定幅值调制技术 … 63

第 4 章　三相逆变器的电路拓扑及工作原理…… 66

4.1　三相电压型逆变器 …… 66

4.1.1　三相电压型逆变器的拓扑 …… 66

4.1.2　三相电压型逆变器的工作原理 …… 66

4.2　三相电流型逆变器 …… 69

4.2.1　三相电流型逆变器的拓扑 …… 69

4.2.2　三相电流型逆变器的工作原理 …… 70

4.3　三相四线制逆变器 …… 71

4.3.1　组合式三相四线制逆变器 …… 71

4.3.2　中点形成变压器输出三相四线制逆变器 …… 73

4.3.3　应用分裂电容的三相四线制逆变器 …… 74

4.3.4　三相四桥臂逆变器 …… 75

4.4　矩阵式高频链逆变器 …… 76

4.4.1　矩阵式变换器的基本概况和换流方法 …… 76

4.4.2　高频链矩阵式变换器开关换流技术 …… 77

第 5 章　开关型逆变器的高频调制技术…… 79

5.1　高频调制技术概述 …… 79

5.1.1 冲量等效原理 …… 79
5.1.2 高频调制技术 …… 79
5.2 正弦波脉宽调制（SPWM） …… 82
5.2.1 SPWM 基本原理 …… 82
5.2.2 单相逆变器 SPWM 技术 …… 83
5.2.3 三相逆变器 SPWM 技术 …… 89
5.3 谐波注入 PWM（HIPWM） …… 94
5.3.1 马鞍型波 HIPWM …… 95
5.3.2 最小开关损耗 PWM …… 96
5.4 空间矢量调制（SVM） …… 97
5.4.1 SVM 基本原理 …… 98
5.4.2 SVM 与 HIPWM 的内在联系 …… 103
5.4.3 三相电流型桥式变流器的 SVM 技术 …… 105
5.5 跟踪型 PWM 技术 …… 107
5.6 优化 PWM 技术 …… 108
5.6.1 基本原理 …… 109
5.6.2 开关角求解 …… 110
5.7 三相四线逆变器的调制技术 …… 110
5.7.1 基本概述 …… 111
5.7.2 三相四桥臂逆变器的 3D SVM …… 112
5.7.3 分裂电容三相四线制逆变器的 3D SVM …… 121
第 6 章 逆变器控制技术 …… 125
6.1 逆变器数学模型 …… 125
6.1.1 单相逆变器数学模型 …… 125
6.1.2 三相变换器基本数学模型 …… 127
6.1.3 三相逆变器解耦模型 …… 130
6.1.4 三相逆变器在两相旋转坐标系中的模型 …… 131
6.2 逆变系统控制分析 …… 132
6.2.1 无源逆变器控制结构 …… 132
6.2.2 并网逆变控制结构与控制分析 …… 134
6.2.3 逆变系统控制机理 …… 142
6.2.4 逆变系统性能指标 …… 143
6.3 线性调节器设计 …… 145
6.3.1 零极点校正 …… 145
6.3.2 PID 控制 …… 145
6.3.3 双自由度 PI 控制 …… 148
6.3.4 内模 PID 控制 …… 150
6.3.5 波形库控制 …… 153
6.3.6 比例谐振控制 …… 154
6.3.7 比例复数积分控制 …… 158
6.3.8 无差拍控制 …… 159
6.3.9 线性二次型优化控制 …… 160
6.4 非线性控制技术 …… 162
6.4.1 三态滞环倍频调制 …… 162
6.4.2 电流定时比较控制 …… 165
6.4.3 模糊控制 …… 166
6.4.4 参数自调整模糊控制 …… 171
6.4.5 开关逆变器重复控制 …… 173
6.4.6 单周期控制和定频积分控制 …… 177
6.4.7 神经网络控制 …… 179
第 7 章 开关型逆变器的并联均流技术 …… 183
7.1 逆变器并联运行的原理与分析 …… 183
7.1.1 并联逆变器负载均分原理 …… 184
7.1.2 并联逆变器系统的环流分析 …… 185
7.2 逆变器并联均流控制技术 …… 190
7.2.1 均流开环控制 …… 190
7.2.2 均流闭环控制 …… 193
7.3 并联逆变器输出同步技术 …… 196
7.3.1 主从锁相同步方式 …… 197
7.3.2 争主同步跟踪方式 …… 197
7.4 并联逆变器环流抑制技术 …… 198
7.5 现场总线在逆变器并联中的应用 …… 201
7.6 无互连线自主限容并联控制 …… 203
7.6.1 逆变器限幅输出并联控制思想 …… 203
7.6.2 削顶式限幅并联控制 …… 204
7.6.3 正弦波限幅并联控制 …… 206
第 8 章 逆变器的并网运行及孤岛效

应防护 …… 213
8.1 并网/独立双工作模式控制 …… 213
8.1.1 可调度型并网发电系统…… 213
8.1.2 并网/独立双工作模式逆变器原理…… 213
8.1.3 模式切换过程的暂态分析…… 214
8.1.4 并网/独立模式切换控制技术…… 218
8.1.5 并网锁相控制…… 221
8.1.6 逆变器并网时直流注入及其抑制…… 225
8.1.7 逆变器并网运行时漏电流及其抑制…… 227
8.2 分布式多机逆变并网运行控制…… 230
8.3 孤岛效应及其防护…… 232
8.3.1 孤岛效应及其防护要求…… 232
8.3.2 被动式孤岛检测方法 …… 234
8.3.3 主动式孤岛检测方法…… 240
参考文献 …… 249

第 1 章　概　　论

1.1　电能变换与开关型逆变技术应用

能源是人类赖以生存和发展的基础，电能是迄今为止人类文明史上利用最广泛、最方便、最清洁、最高效和最灵活的能源，正是依赖于对电能的充分开发和利用，人类才得以在短短的两个多世纪里取得了如此辉煌的成就。人类的生存条件和生活质量从来没有现在这样优越和舒适。但是，当人类正在无休止地向地球索取更多的能源和资源以及人类仍在孜孜以求不断提升生活享受的欲望时，一个严酷的事实是，人类在这 100 多年的工业化、电气化发展过程中，消耗的能源是过去人类在 3000 年中消耗的总和。联合国环境规划署和世界野生生物基金会共同发布的《2004 年地球生存报告》显示：1960 年，人类消耗的自然资源仅占地球所能生产的 50%，而随着人类对煤、天然气和石油等化石燃料的过度使用，人类现在消耗的自然资源已经超出了地球资源再生能力的 20%。地球环境的未来令人堪忧。人类已经开始认识到节约资源、保护环境、实现长期的可持续发展是当今世界各国面临的最重大的挑战。

据统计，当今世界的能源消耗主要是以电能形式或间接以电能的形式体现的，虽然人类在电能的产生、传输、变换和分配使用方面已经取得辉煌的成就，但是如何更加节约、高效、高质量和方便地利用电能，仍然是从事电能变换工作者面临的重要任务。

电力电子技术的高速发展为我们实现能量的高效变换和控制奠定了技术基础。以电力半导体器件作为功率开关来实现电能的形式及主要参数（如电压、电流、频率、相位和波形）的变换和以微电子芯片为工具的模拟控制技术和数字控制技术的完美结合，使电能在满足负载特性的需要，实现电能的高效、高质变换方面达到了前所未有的高度。

电能变换的实现可以追溯到最初的旋转变流机组，即采用一台由三相交流电网供电的交流原动机同轴连接带动一台直流发电机，通过控制直流发电机的励磁获得所需要的直流电，实现了电能由交流电向直流电的变换。如果把直流发电机的输出再提供给另一台与交流发电机同轴连接的直流电动机，那么通过控制直流电动机的转速就可以获得所需要的交流电，即又实现了电能从直流电向交流电的变换。显然，采用旋转变流机组实现电能的变换是一种耗材、耗能、低效的手段，这种古老落后的电能变换经历了近百年的历史，后来汞弧整流器的出现开创了静止变流器时代的开始，但是汞弧整流器的先天不足使得旋转变流机组一直延续到 20 世纪 60 年代仍被广泛采用。

实现电能高效变换的真正动力起源于 1956 年第一只功率晶闸管的诞生，在此后的 20 年里，各种晶闸管整流和晶闸管逆变的静止型半导体变流装置全面取代了传统的旋

转变流机组和一直未得到普遍应用的汞弧整流器装置。从第一只晶闸管问世开始，到20世纪60年代，各种单相、三相晶闸管逆变电路的基本拓扑都已经出现。桥式晶闸管逆变电路已经非常接近现在的全控型桥式逆变电路，所不同的是由于晶闸管的不可关断性而必需的换流电路。也正是在60年代，出现了正弦波逆变器的概念。当时已经广泛应用的整流电路和逆变电路，使得电力开关变换器所带来的谐波危害逐渐显露出来。再加上本来就已经存在的电力系统谐波，使得谐波“污染”问题变得日益严重。正弦波逆变器正是在这种背景下出现的。最初的正弦波逆变器是在普通的方波逆变器后级加入低通滤波器构成的，滤波器的体积、效率和成本成为影响逆变电路功率等级、输出电压品质的关键因素。为了解决上述问题，德国的A. Schonung于1964年最早提出了将无线通信领域中的脉宽调制（Pulse Width Modulation，PWM）技术应用于功率变换器的思想。在PWM技术方面，尤其是正弦波PWM（SPWM）技术方面，英国的S. R. Bowes博士先后发表了多篇重要文献，对SPWM的原理、数学本质做出了详细而缜密的研究，得到了确定性的结论。我们熟知的有关SPWM的内在规律如谐波分布及其大小等都得到了定量的解释。这些贡献在PWM技术乃至整个电力电子技术领域都具有划时代的意义。

自20世纪70年代中后期开始，大功率晶体管（GTR）、大功率场效应晶体管（MOSFET）、门极关断（GTO）晶闸管、绝缘栅双极晶体管（IGBT）以及集成门极换流晶闸管（IGCT）等全控型功率开关器件开始登上历史舞台，它们的出现并与正在迅猛发展的各种微电子技术（包括模拟电子技术和数字电子技术）的完美结合，使电能变换从以半控型晶闸管为主的相控整流和带有强迫换流的逆变电路迅速跨入了以全控型半导体功率开关为主的高频PWM开关型逆变器时代。

从相控整流到开关型逆变，从开关型逆变再发展到高频PWM的开关型整流和逆变，各种形式的电能变换在实现高效、高功率密度、高性能和高精度方面达到了前所未有的高度。所谓开关型逆变技术是指通过半导体功率开关器件的开通和关断作用，把直流电能变换成满足负载要求的交流电能的一种技术，这种逆变通常称为无源逆变；如果把直流电能变换成交流电能，再接入电网，例如过去常用的可逆传动和交流串级调速中的网侧变流器，则称之为有源逆变。当前，由于光伏、风电等可再生能源的利用和微电网技术的迅速发展，实现并网运行的有源逆变技术正在步入一个快速发展的新时期。由于电能变换技术高频化的发展已成为电力电子技术中的主要特点之一，传统意义上的所谓AC/DC整流技术和DC/AC逆变技术已经经历了交融和结合。尤其是电能可以双向流动的高频调制双向变流装置已经把整流技术和逆变技术合为一体。同样道理，传统意义上的DC/DC变换和DC/AC变换由于高频化的技术发展，逆变技术也已经渗透到这些领域，所以可以这样理解，逆变技术已经是四种电能变换技术中应用最广的核心技术。它包含了电能变换中面临的电压、电流、频率、相数、有功、无功、谐波和波形等所有参数的变换和控制。特别要提出的是，逆变技术在可再生能源的开发和利用领域将占据越来越重要的地位。

下面讨论逆变器的分类形式与应用领域。逆变器的分类方法有很多种，主要包括：

（1）按逆变器输出相数，可分为单相逆变器、三相逆变器、多相逆变器。

（2）按逆变器输出的电能流向，可分为有源逆变器、无源逆变器。

（3）按逆变器输入的不同，可分为电压源逆变器（输入为恒定的直流电压）和电流源逆变器（输入为恒定的直流电流）。

（4）按开关的调制方式，可分为方波调制逆变器、阶梯波调制逆变器、单极性PWM调制逆变器、双极性PWM调制逆变器、矢量调制及跟踪型调制逆变器。

（5）按逆变器输出的控制方式，可分为以输出正弦波电压为被控量的电压型逆变器和以输出正弦波电流为被控量的电流型逆变器。

（6）按逆变器输出满足不同负载特性要求的方式，可分为输出频率具有自动跟踪性能的变频逆变器，输出电压和频率同步变化的变频变压逆变器，输出电压和频率保持恒定的正弦波电源逆变器，输出电流幅值恒定、频率和相位与电网电压保持同步的并网逆变器。

（7）按逆变开关的工作方式，可分为谐振式逆变器，定频硬开关式逆变器，定频软开关式逆变器。

开关型逆变器的应用可以说已经扩展到国民经济的各个方面，而且还在不断地发展，在此只是列举以下几个突出的应用领域。

（1）各种交直流开关型稳频、稳压电源，包括各种在线的不间断电源（UPS）、通信电源和备用电源（EPS）。大到某些系统工程，小到单台计算机，均需要不间断电源（UPS）的支持。UPS主要由蓄电池和逆变器组成。逆变器具有能量双向传输功能。在市电电网正常供电时，逆变器工作于整流状态，给蓄电池充电。在市电电网断电的情况下，逆变器工作于逆变状态，给用电设备提供50Hz的交流电。

（2）各种电动机传动领域用变频调速、串级调速、能量再生反馈调速。运用逆变技术将市电电网电压变换成电压和频率均可调节的交流电，对交流电动机进行无级调速。变频调速技术在许多场合（如机床、风机、机车牵引、电梯、空调等的控制）均有广泛应用。

（3）光伏发电、风力发电、燃料电池等新能源的开发和利用。目前，主要能源是煤、石油、天然气等，但这些能源日趋紧张，许多国家都在进行新能源的开发和利用，如太阳能发电、风力发电、潮汐发电等。一般情况下，这些发电设备输出的是直流电（或者是不稳定的交流电，输出前变换成直流电），运用逆变技术将其变换成50Hz的交流电，直接提供给用电设备，或并入市电电网。

（4）电力系统中的高压直流输电、动态有源滤波、电能质量控制。随着国民经济的高速发展，供电质量日趋恶化，利用有源滤波器和交流电网净化装置，可以大大改善市电电网的供电质量。有源滤波器和交流电网净化装置是运用逆变技术来消除谐波和对无功分量进行补偿，以净化市电电网。

（5）电气化高速铁路和城市轨道交通中的各种牵引传动控制和磁悬浮列车驱动控制。磁悬浮列车是利用高尖技术产生一种磁场，使列车车轮和铁轨不完全接触，减小摩擦，提高牵引效率，这其中就利用了逆变技术。

（6）各种中、高频感应加热电源；各种逆变式弧焊电源。电弧焊、等离子弧焊、切割焊等弧焊电源采用逆变技术，以逆变式弧焊电源取代传统的整流式弧焊电源。

（7）各种逆变式电镀、电解、电泳电源。

（8）各种高精度、高稳定度医用电源。

（9）各种中小功率的照明、空调等小型家用电器。

（10）在除尘、水处理、臭氧发生、等离子脉冲发生器等环保领域。对水、空气进行消毒、除尘所用的臭氧发生器、超声波发生器和高压静电除尘器中均利用了逆变技术。

1.2 开关型逆变器的现状及发展

1.2.1 高频开关型逆变器的基本电路结构

（1）无隔离直接变换逆变器。根据输入侧是恒压源还是恒流源，可分为电压源直接变换逆变器和电流源直接变换逆变器。

电压型直接变换逆变器电路如图 1-1 所示，由直流电压源、输入直流滤波和输出交流滤波环节、逆变环节和负载等部分组成。作为核心部分的逆变环节将直流电压 u_d 变换为交流输出 u_o 提供给负载。

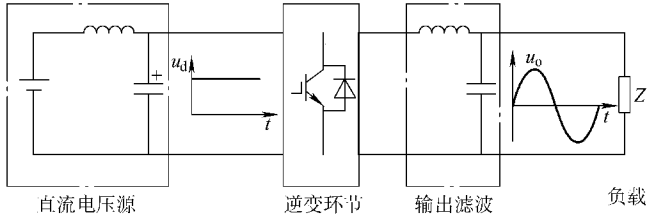


图 1-1　电压型直接变换逆变器电路

与电压型直接变换逆变器不同，电流型逆变器的输入为直流恒流源 i_d，通过逆变环节和滤波后得到交流电流输出 i_o 提供给负载，其电路如图 1-2 所示。

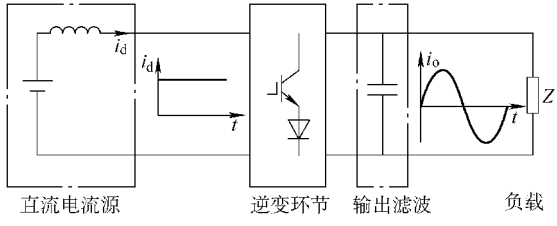


图 1-2　电流型直接变换逆变器电路

与电流型直接变换逆变器相比，电压型直接变换逆变器具有更为广泛的应用，本书主要讨论电压源开关逆变器。下面以电压源输入逆变器为对象说明按电路拓扑分类的逆

变器类型。

（2）带工频变压器的工频隔离型逆变器。工频隔离型逆变器电路如图 1-3 所示，在直接电压型直接变换逆变器的逆变环节后加入工频变压器，起到电气隔离的作用。这种传统的隔离逆变技术十分成熟，性能可靠、效率高，获得了广泛的应用。但变压器工作频率低、体积大、结构笨重、动态性能较差的缺点。

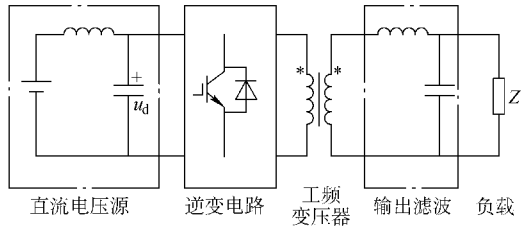


图 1-3　工频隔离型逆变器电路

（3）带高频变压器的高频隔离型多级变换逆变器。为了去除体积庞大的工频隔离变压器，用高频变压器取而代之，目前在 UPS 中广泛应用图 1-4 所示的高频隔离 DC/AC/DC/AC 三级变换逆变器。该类拓扑在直流侧和后级逆变器之间加入一级 DC/DC 变换器，利用高频变压器替换工频变压器，在具备电压比调整和电气隔离的前提下，降低变换器的体积。高频逆变环节可以根据应用背景需求或设计指标，选择正激式（包括单管正激式、交错并联单管正激式、双管正激式和交错并联双管正激式）、反激式（包括单管反激式、交错并联单管反激式、双管反激式和交错并联双管反激式）、推挽式（包括推挽正激式）、桥式等多种逆变结构实现高频逆变。该拓扑增加的直流储能环节实现了前后级解耦，可分别进行控制。这种变换技术发展成熟、控制灵活、具有高性价比和可靠性。然而，该拓扑过多的能量传输级数会降低系统效率；直流储能环节不但增加了装置体积，也降低了系统的寿命和可靠性，不利于系统集成。

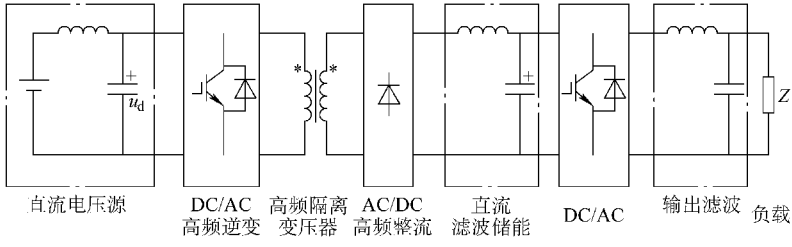


图 1-4　高频隔离型三级变换逆变器电路

（4）带高频变压器的高频隔离型单级变换逆变器。针对有直流储能环节的 DC/AC/DC/AC 多级逆变器的不足，发展了无直流储能环节的单级 DC/HFAC（高频交流）/LFAC（低频交流）拓扑，如图 1-5 所示。单级变换逆变器又可分为电压型（见图 1-5a）和电流型（见图 1-5b）两种，无论哪种都是近年来研究的热点，不同时期提出了各种拓扑以解决不断出现的新问题。

DC/HFAC/LFAC 拓扑是：前级应用 DC/AC 将直流电变换为高频交流电，后级应用周波变换器（Cyclo－converter）进行高频交流到低频交流的变换，中间没有直流储能环节。目前许多新的拓扑研究都是基于这种结构，具有变换级数少、效率高的特点。但由

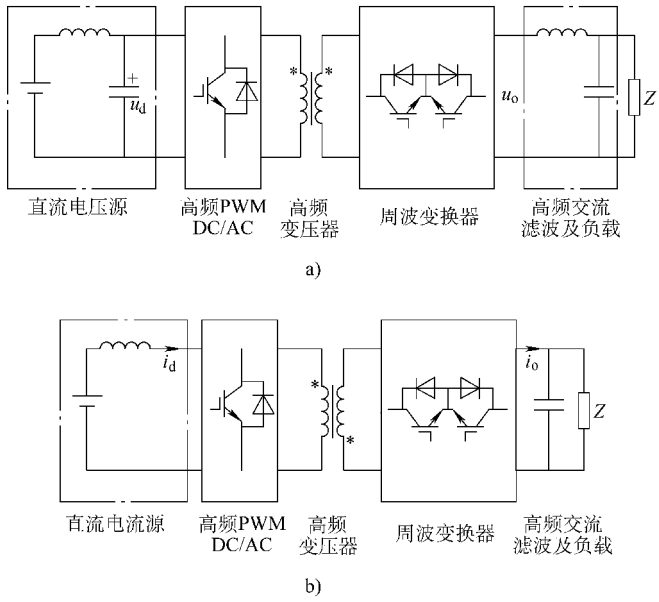


图 1-5　高频隔离单级变换逆变器电路

a）电压型高频交换器单级变换逆变器　b）电流型高频变换器单级变换逆变器

于变压器漏感造成的双向开关的换流应力问题始终没有突破性进展，至今仍吸引众多研究者探索其实用化过程中的关键技术。

此外，准单级高频链逆变拓扑利用有源箝位环节替代直流储能环节，并且配合适当的 PWM 调制可实现功率器件的软开关，能够有效地抑制电压过冲，提高可靠性。如图 1-6 所示，高频整流环节可用二极管整流，但该种情况下逆变器只能实现能量的单向流动。可以采用全控开关代替二极管的结构来帮助实现能量的双向流动。

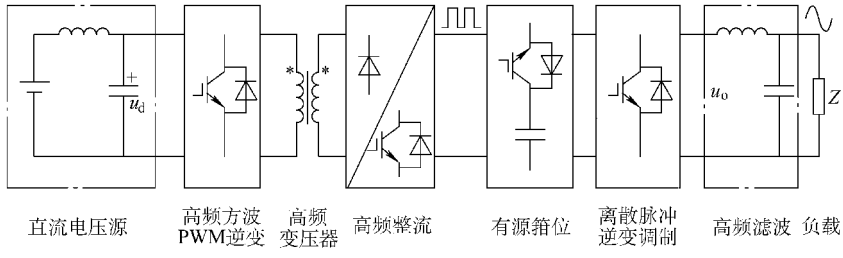


图 1-6　高频隔离准单级变换逆变器电路

（5）带高频变压器的高频隔离型矩阵式单级变换器。在交流调速 AC/AC 变频器基础上发展的高频 PWM AC/AC 矩阵式直接变频单级变换器是一种基于双向开关并采用脉宽调制而得到期望输出电压的电力变换装置，可以产生交流或直流输出电压。广义的矩阵式变换器概念包括 *M* 相 – *N* 相变换的各类拓扑，目前研究较多的有间接型三相 – 三

相矩阵式变换器、三相－单相矩阵式变换器、单相－单相矩阵式变换器等。与传统的交－直－交型变频器不同的是：矩阵式变换器由整流级电路和逆变级电路两部分组成，其中间环节不采用电容或电感等直流储能元件，如图 1-7 所示。

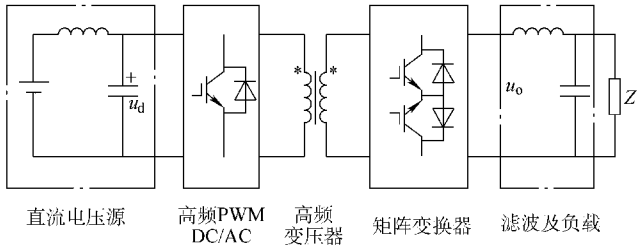


图 1-7　高频隔离型矩阵式单级变换器电路

由于自身结构的特点，矩阵式变换器具有一系列优点：能量双向流动、可实现四象限运行、正弦输入/输出电流、对任意负载输入功率因数为 1，且不需要直流储能元件等。

矩阵式变换器的电路拓扑中不存在自然续流通道，因而使得双向开关的换流控制非常困难，换流过程中产生的过电压和过电流很可能损坏电力电子器件。这种情况也严重地限制了矩阵式变换器在工业实际中的应用。为了解决矩阵式单级变换器换流困难的问题，研究人员先后提出了一系列用于双向开关的多步换流控制方法。这些换流策略的应用，基本上实现了双向开关的安全运行，为矩阵式单级变换器应用到实际工业生产中扫清了障碍。

1.2.2　开关型逆变器的高频调制与控制

开关型逆变电路的广泛应用与其开关调制技术的发展密切相关，高频开关调制技术是决定逆变电路工作在高频条件下的技术保障。所谓高频调制就是在低频调制波（通常为正弦波或方波）的波形上叠加整数倍频率的高频载波（通常为锯齿波或三角波），使开关的开通和关断被高频载波和低频调制波的交点所控制。由于锯齿波或三角波的宽度是线性变化的，因此经调制后的开关输出基波分量将跟随调制波的形状；同时，其高频分量易于滤除，因此大大减小了输出谐波含量。调制的方式可分为脉冲宽度（脉宽）调制（PWM）、脉冲频率调制、脉冲幅度调制和脉冲密度调制等多种。其中，PWM 技术由于变宽恒频特性有利于电路的设计和稳定工作，因此得到广泛的应用。

PWM 是应用最广泛的一种调制技术，除了能提高系统动态响应速度、减小谐波、改善输出波形等优点之外，由于载波的频率是固定的，因此有利于功率开关和电路的参数设计与稳定工作。正弦波 PWM（SPWM）技术在逆变器调制中有着最广泛的应用。除了 SPWM 外，近 20 年来又有了多种 PWM 技术，如空间矢量调制（Space Vector Modulation，SVM）技术、滞环跟踪型 PWM 技术、单周期 PWM 技术等。基于各种目标优化 PWM 技术，如三次谐波注入 PWM 技术、定次谐波消除 PWM 技术、谐波损耗最小 PWM 技术、中心对称 PWM 技术等先后出现，极大地丰富了开关型逆变器的调制手段，从而