电源系列

http://www.phei.com.cn

环保节能型H桥及SPWM直流电源式逆变器

◎ 刘凤君　编著



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电源系列

环保节能型 H 桥及 SPWM 直流电源式逆变器

刘凤君　编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书的主要内容有两部分：一是介绍了采用不同开关器件，不同直流电源电压的环保节能式2H桥、3H桥的各种级联叠加方式，以及最多电平数的级联叠加方式；二是介绍了我们最新针对环保节能而研发的，可以节省大量开关器件，消谐波能力强、性能优越的独立SPWM直流电源级联叠加方式、电容分压SPWM直流电源级联叠加方式，以及它们的$N \times N'$双级联叠加方式。

本书的特点是内容新，技术新，且加入了数学分析。

本书适合自动化与电力电子技术专业的大学教师、研究生，以及从事逆变技术、变频技术和UPS技术研发的专业技术人员阅读。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

环保节能型H桥及SPWM直流电源式逆变器/刘凤君编著. —北京：电子工业出版社，2010.5
(电源系列)
ISBN 978-7-121-10636-1

Ⅰ. ①环… Ⅱ. ①刘… Ⅲ. ①逆变器 Ⅳ. ①TM464

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第056644号

策划编辑：张 榕
责任编辑：侯丽平 文字编辑：谭丽莎
印 刷：北京市海淀区四季青印刷厂
装 订：涿州市桃园装订有限公司
出版发行：电子工业出版社
北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036
开 本：787×1 092 1/16 印张：26.5 字数：658千字
印 次：2010年5月第1次印刷
印 数：4 000册 定价：58.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888。

质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

前　言

21 世纪是环保与节能的世纪。所谓环保节能式逆变器，就是对负载和周围环境的谐波污染小，逆变效率高的逆变器。逆变器对负载和环境造成的污染是由其产生的谐波造成的。逆变器产生的谐波是一种只能对负载和环境造成污染，而不能像基波那样在负载中作功的废能。但废能也是一种损耗，也会降低逆变器的逆变效率。例如，当它的输出电压是 180°的方波时，波形中将包含所有的奇次谐波，波形畸变率将高达 46%，也就是说在逆变器输出的电能中，有 46% 是不能被负载利用作功的废能，只有 54% 的基波电能被负载有效利用。这就说明，由谐波造成的损耗比逆变器的欧姆热损耗、电路的开关损耗、自用电损耗之和还要大很多倍，是逆变器产生电能损耗的主要根源。从这个意义上来说，谐波将是逆变器环保与节能革命的主要对象。此外，逆变器产生的谐波也与逆变电路的形式及开关管的工作方式有关，硬开关产生的谐波及开关损耗比软开关产生的谐波及开关损耗要大。因此，实现逆变器环保与节能的主要方法有两个：一是选择合适的逆变电路与逆变方式，以减少逆变器的谐波含量；二是采用软开关，以减少逆变器的开关损耗。

当前逆变器减小输出电压谐波的研究方向有两个：一个是对两电平 SPWM 逆变器的研究，用高频化和软开关的方式来减少谐波和开关损耗，即用提高逆变器的 SPWM 开关频率的方法来减小输出电压中的谐波含量。该方法的特点是必须用高频 IGBT 做开关管，$\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$ 大，EMI 大，开关损耗大，只能提高谐波频率，不能消除谐波。该方法的优点是可以调压；另一个是对多电平逆变器的研究，用增加电平数和逆变器的级联法来减小谐波，即用 N 个逆变器的级联叠加法，利用波形之间的相位差来消除某些低次谐波。该方法的特点是逆变器工作在基频，开关频率低，可以采用中、低速开关器件，$\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$ 小，EMI 小，开关损耗小，不用软开关，电路简单，成本低廉，但不能调压。该方法的优点是可以消除某些低次谐波。如果把这两个研究方向相结合，集两者的优点，弃其缺点，就可以得到一种新型的环保节能逆变方式，即将 N 个 SPWM 逆变器，按照多电平逆变器的级联叠加法进行叠加，由此就可以得到一种新的具有较强消谐波能力的环保节能式 SPWM 多电平逆变器，这种逆变器既可以在不增加开关损耗的条件下把消谐波的能力提高 N 倍，又可以进行输出电压的调节。这种优良的逆变器，就是以级联叠加法为手段的 H 桥级联式多电平逆变器。其特点是使用的元器件数目最少、不存在电容上电压的平衡问题；流过各个开关管的电流相同，便于模块化、控制简单、扩容方便，一般不用软开关。

此外，当前常用的 2H 桥级联式多电平逆变器的特点是：逆变、级联叠加与 SPWM 控制都是在逆变器及其逆变开关上进行的。这种传统的逆变方式存在着使用元器件较多，开关损耗较大的缺点。为了进一步扩大逆变器的环保与节能效果，我和我的研究小组（以下简称我们）对其进行了一次技术改革，将级联叠加与 SPWM 控制都移到直流电源上进行，这将会大大减少元器件的数目，也可使开关损耗减少 50% 以上。这种逆变器就是将在本书中进行介绍的 SPWM 直流电源级联式逆变器。

本书主要介绍的内容如下所示。

第1章：主要介绍本书所涉及的一些基础知识，如定义、分类、分析法和所用开关器件等。

第2章：主要介绍H桥的构成及工作原理，如2H桥和3H桥的构成及工作原理，以及它们之间的内在关系，目的是纠正一些文献中的不足之处，为第3章H桥的级联叠加作准备。

第3章：主要介绍我们开创的H桥SPWM级联的各种叠加法，如IGBT－2H桥的级联叠加、IGBT－3H桥的级联叠加、IGBT－2H桥与IGBT－3H桥的级联叠加、不同开关器件与不同直流电压的2H桥与3H桥的混合级联叠加，2H桥的三进制（3^{N-1}）级联叠加、2H桥的二进制（2^{N-1}）级联叠加、三相半桥式逆变器的级联叠加等。在混合级联叠加法中，我们推导出来了能使各个电平都能进行SPWM控制的最多电平数叠加方式的计算式，为H桥级联叠加实现最环保、最节能效果（最多电平数）找到了依据。

第4章：主要介绍第3章中H桥的各种SPWM级联叠加控制法，如基本单元两电平SPWM控制法，载波三角波移相SPWM控制法、载波三角波层叠式SPWM控制法，载波分段层叠式SPWM控制法，开关频率优化SPWM控制法等，找出了它们之间的内在联系，并由此推导出了各种H桥级联叠加的输出电压表示式。在第3章中推导出来的最多电平数级联叠加的计算式，和本章介绍的载波三角波分段层叠式SPWM控制法一起使H桥的级联叠加技术达到了顶峰。其标志是：叠加的电平数最多（最节能环保），可以使用廉价的高压低频开关器件，降低了成本，提高了逆变器的性能，是多电平逆变器的一次突破性的发展。

第5章：主要介绍我们最近几年新研发的独立SPWM直流电源级联式多电平逆变器，独立直流电源$N\times N'$双级联串联叠加和串－并联级联叠加式多电平逆变器、二极管二进制（2^{N-1}）级联叠加式多电平逆变器，以及叠加控制开关的ZVS和ZCS软开关电路。这种逆变器的特点是把级联叠加与SPWM控制都移到了直流电源上进行，从而大大减少了元器件的数目，也使开关损耗减少了50%，这是对多电平逆变器的一次革命性技术改革。

第6章：主要介绍直流电容分压SPWM直流电源级联式多电平逆变器、电容分压直流电源$N\times N'$双级联串联叠加和串－并联叠加式多电平逆变器，它是与第5章中介绍的逆变器同时研发出来的，适合于单一直流电源应用的变形逆变器。

第7章：主要介绍2H桥多重叠加式多电平逆变器。在这一章中着重介绍多重叠加的分组特性及“消去法”，多重叠加的余弦规律、多重叠加法的PWM调制及PWM控制，以及三相逆变器的多重叠加，以求对2H桥的多重叠加法有一个理论上的深入了解。

第8章：主要介绍新研发的电流型H桥及TPWM直流电源级联式逆变器，其中着重介绍了电流型逆变器的PWM调制与级联叠加法，三相典型电流型TPWM逆变器、2H桥三相电流型TPWM逆变器及其并联级联叠加，TPWM直流电流源级联式多电平逆变器、TPWM直流电流源$N\times N'$双级联并联叠加多电平逆变器。这些电流型多电平逆变器在其他文献上是看不到的。

第9章：主要介绍在变频调速系统或UPS中的一些应用举例。

对于在一般文献中作为重点介绍的钳位式多电平逆变器（其中包括二极管钳位，电容钳位或混合钳位式多电平逆变器），由于它具有许多缺点，如使用元器件较多，具有电容上电压平衡问题，流过开关管的电流不相同，SPWM控制较复杂，不易用于电平数大于7的逆

变，不能实现高低频开关器件共用，不便于模块化，不便于扩容等，在技术上已经落后，故在本书中不进行介绍。对于受多数人推崇的相应空间电压相量 SPWM 控制，因为它不适合用于电平数大于 5 的逆变器，而本书介绍的逆变器的电平数都大于 5，故也不介绍。

由于书中所介绍的逆变器是一种各个电平都可以进行 SPWM 控制的多电平逆变器，它的开关频率和开关损耗本来就不高，一般选用开关频率高一级的开关管，通过提高开关速度，在开关过程中减小管子上的电压和电流重叠时间来减小开关损耗就足够了，不再需要专门设置软开关电路，故本书也不再专门介绍软开关电路（只是对第 5 章的新型逆变器有点例外）。

本书的编写具有以下特点：突出了环保与节能，内容新、技术新；多数内容是 2007 年以后新研发的成果；采用了基本单元分析法，并由此揭开了级联式多电平逆变器电路与其控制方法的内在关系；采用了物理概念，图表及数学分析相结合的分析方法，解出了各种逆变器输出电压的表示式，以使读者能够全面、系统地得到最新技术的理论知识和逆变技术的数学分析法。

由于本书介绍的是一些新研发的逆变技术，尚处于发展阶段，故需要广大的读者共同努力来推动它的发展。作者写此书只想起到抛砖引玉的作用。

由于作者水平有限，所以书中难免有不足或错误之处，敬请广大读者批评指正。

作　者

于航天二院

目　录

第 1 章　概述 …… 1
1.1　定义和研制背景 …… 1
1.1.1　定义 …… 1
1.1.2　SPWM 多电平逆变器的研制背景 …… 2
1.2　发展过程和应用领域 …… 5
1.2.1　SPWM 多电平逆变器的发展过程 …… 5
1.2.2　SPWM 多电平逆变器的应用领域 …… 5
1.3　基本工作原理、分类及特点 …… 6
1.3.1　传统 SPWM 多电平逆变器的工作原理与分类 …… 6
1.3.2　传统 SPWM 多电平逆变器的特点 …… 8
1.4　SPWM 多电平逆变器的基本单元分析法 …… 9
1.4.1　基本单元 …… 10
1.4.2　SPWM 多电平逆变器的基本单元组成 …… 10
1.5　SPWM 多电平逆变器所用的开关器件 …… 12
1.5.1　晶闸管(SCR) …… 12
1.5.2　可关断晶闸管(GTO) …… 14
1.5.3　绝缘栅双极晶体管(IGBT) …… 16
1.5.4　集成门极晶闸管(IGCT) …… 17
1.5.5　开关器件的选择 …… 17
1.6　级联式多电平逆变器的结构及 H 桥功率单元 …… 19
1.6.1　级联式多电平逆变器的优缺点 …… 20
1.6.2　基本功率单元 H 桥的定义及典型级联结构 …… 20
第 2 章　H 桥的构成及工作原理 …… 22
2.1　基本单元单相半桥式两电平逆变器 …… 22
2.2　2H 桥的构成及其工作原理 …… 27
2.2.1　采用两电平 SPWM 控制法求解 u_{ab} …… 28
2.2.2　用单极性载波三角波 SPWM 控制法求解 u_{ab} …… 33
2.3　二极管钳位 3H 桥的构成及其工作原理 …… 35
2.3.1　二极管钳位式三电平逆变器 …… 36
2.3.2　二极管钳位式三电平逆变器的输出电压表示式 …… 38
2.3.3　采用层叠式 SPWM 控制法求解 u_{AO} …… 40
2.3.4　二极管钳位 3H 桥逆变器 …… 43
2.4　电容钳位 3H 桥的构成及其工作原理 …… 44

2.4.1 电容钳位式三电平逆变器 …… 45
2.4.2 电容钳位 3H 桥逆变器 …… 47
2.5 混合钳位 3H 桥的构成及其工作原理 …… 48
2.5.1 混合钳位式三电平逆变器的结构原理 …… 49
2.5.2 混合钳位 3H 桥逆变器 …… 51
2.6 2H 桥与 3H 桥的内在关系与应用比较 …… 52
2.6.1 2H 桥与钳位式三电平逆变器的输出电压 …… 52
2.6.2 3H 桥、2×2H 桥与钳位式五电平逆变器的输出电压 …… 54
2.6.3 2H 桥、钳位式多电平逆变器及 3H 桥的对比 …… 61
第 3 章 H 桥的 SPWM 级联叠加 …… 63
3.1 H 桥级联 SPWM 多电平逆变器的结构与特点 …… 63
3.2 H 桥级联的条件及级联的种类 …… 64
3.2.1 H 桥级联叠加的条件 …… 65
3.2.2 H 桥级联叠加的种类 …… 66
3.3 IGBT-2H 桥级联叠加 SPWM 多电平逆变器 …… 67
3.3.1 SPWM-2H 桥的串联级联叠加 …… 68
3.3.2 SPWM-2H 桥的并联级联叠加 …… 71
3.3.3 SPWM-2H 桥的串 - 并联级联叠加 …… 72
3.3.4 SPWM-2H 桥串 - 并联级联叠加的控制电路 …… 73
3.4 IGBT-3H 桥级联叠加 SPWM 多电平逆变器 …… 75
3.4.1 采用反相层叠 SPWM 控制的 3H 桥逆变器 …… 75
3.4.2 IGBT-3H 桥的串联级联叠加 …… 79
3.4.3 IGBT-3H 桥的并联级联叠加 …… 80
3.4.4 IGBT-3H 桥的串 - 并联级联叠加 …… 81
3.4.5 IGBT-3H 桥串 - 并联级联叠加的控制电路 …… 82
3.5 IGBT-2H 桥与 3H 桥的混合级联叠加逆变器 …… 84
3.5.1 一个 2H 桥与一个钳位式三电平逆变器的级联叠加 …… 84
3.5.2 一个 2H 桥与一个 3H 桥的混合级联叠加 …… 85
3.6 不同开关器件、不同直流电压的 2H 桥的级联叠加 …… 87
3.6.1 用 GTO 与 IGBT 做开关的两级 2H 桥串联级联叠加 …… 88
3.6.2 用 GTO 与 IGBT 做开关的三级 2H 桥串联级联叠加 …… 92
3.6.3 采用不同开关器件、不同直流电压的其他 2H 桥的级联叠加方式 …… 94
3.7 不同开关器件、不同直流电压的 2H 桥与 3H 桥的混合级联叠加 …… 96
3.7.1 2H 桥与 3H 桥的混合级联叠加 …… 99
3.7.2 2H 桥与不对称 3H 桥的混合级联叠加 …… 103
3.8 2H 桥的三进制(3^{N-1})级联叠加 …… 106
3.8.1 两个 2H 桥 3^{N-1} 级联叠加式九电平逆变器 …… 109
3.8.2 三个 2H 桥 3^{N-1} 级联叠加式二十七电平逆变器 …… 115
3.9 公用一个桥臂的 2H 桥二进制(2^{N-1})级联叠加 …… 118

3.9.1 两个2H桥臂级联叠加式七电平逆变器 …… 120
3.9.2 三个2H桥臂级联叠加式十五电平逆变器 …… 124
3.9.3 四个2H桥臂级联叠加式三十电平逆变器 …… 130
3.10 三相半桥式逆变器的级联叠加 …… 135
3.10.1 三相半桥式SPWM逆变器的输出电压表示式 …… 135
3.10.2 三相半桥式SPWM逆变器的级联叠加方式 …… 140
3.10.3 三相半桥式SPWM逆变器的串-并联混合级联叠加 …… 144
3.11 三相SPWM逆变器的线电压串联级联叠加 …… 148
3.11.1 电路中的电压、电流和功率关系 …… 149
3.11.2 控制方式、特点和扩展 …… 152
3.12 开绕组双端供电电路 …… 153
第4章 H桥SPWM级联叠加的控制方法 …… 158
4.1 H桥SPWM级联叠加的控制 …… 158
4.1.1 H桥SPWM级联叠加的必备条件 …… 159
4.1.2 H桥级联的主要叠加方式与控制方法 …… 161
4.2 基本单元两电平SPWM控制法 …… 163
4.2.1 2H桥级联叠加的输出电压 …… 166
4.2.2 2H桥级联的控制电路及仿真波形 …… 167
4.3 载波三角波移相SPWM控制法(CPS-SPWM) …… 171
4.3.1 与基本单元两电平SPWM控制法的关系 …… 174
4.3.2 双极性载波三角波移相SPWM控制法的输出电压表示式 …… 176
4.3.3 单极性载波三角波移相SPWM控制法的输出电压表示式 …… 177
4.4 载波三角波层叠式SPWM控制法 …… 179
4.4.1 载波三角波单层层叠式SPWM控制法 …… 179
4.4.2 载波三角波多层层叠式SPWM控制法 …… 182
4.4.3 五电平逆变器的输出电压表示式 …… 184
4.4.4 七电平逆变器的输出电压表示式 …… 187
4.4.5 电平数为$N+1$,载波层数为N时u_A的通用表示式 …… 189
4.5 载波三角波分段层叠式SPWM控制法 …… 189
4.5.1 不同开关器件2H桥混合级联的分段层叠式SPWM控制法 …… 190
4.5.2 不同开关器件2H桥与3H桥级联叠加的分段层叠式SPWM控制法 …… 192
4.6 开关频率优化SPWM控制法 …… 196
4.7 性能指标的实现与性能对比 …… 199
4.7.1 各种SPWM控制法的消谐波性能 …… 199
4.7.2 电容电压的平衡控制 …… 201
第5章 独立SPWM直流电源级联式多电平逆变器 …… 202
5.1 引言 …… 202
5.2 SPWM直流电源逆变器 …… 203
5.3 独立直流电源的级联叠加方式 …… 205

5.4 独立 SPWM 直流电源的级联叠加 …… 210
5.4.1 两个独立 SPWM 直流电源的级联叠加 …… 210
5.4.2 五个独立 SPWM 直流电源的级联叠加 …… 211
5.5 独立 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器 …… 212
5.5.1 两个独立 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器 …… 212
5.5.2 五个独立 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器 …… 216
5.5.3 独立 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器的同族电路 …… 219
5.6 独立直流电源 $N \times N'$ 双级联串联叠加多电平逆变器 …… 221
5.6.1 独立直流电源 2×2 双级联串联叠加多电平逆变器 …… 221
5.6.2 独立直流电源 3×2 双级联串联叠加多电平逆变器 …… 223
5.7 独立直流电源 $N \times N'$ 双级联串 - 并联叠加多电平逆变器 …… 226
5.7.1 独立直流电源 2×2 双级联串 - 并联叠加多电平逆变器 …… 226
5.7.2 独立直流电源 3×2 双级联串 - 并联叠加多电平逆变器 …… 228
5.8 采用二极管的二进制(2^{N-1})级联叠加式多电平逆变器 …… 230
5.8.1 逆变器的工作波形 …… 230
5.8.2 逆变器的 PWM 控制 …… 231
5.8.3 采用二极管的二进制级联叠加式三十电平逆变器 …… 234
5.9 独立 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器的特点与开发前景 …… 239
5.10 叠加控制开关的 ZVS 和 ZCS 电路 …… 244
第 6 章 直流电容分压 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器 …… 246
6.1 引言 …… 246
6.2 电容分压直流电源的级联叠加 …… 247
6.3 电容分压 SPWM 直流电源的级联叠加 …… 250
6.4 电容分压 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器 …… 251
6.4.1 逆变方式与控制电路 …… 251
6.4.2 单相电容分压 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器 …… 253
6.4.3 电容分压 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器的同族电路 …… 257
6.5 电容分压直流电源 $N \times N'$ 双级联串联叠加多电平逆变器 …… 261
6.5.1 电容分压 2×2 双级联串联叠加多电平逆变器 …… 262
6.5.2 电容分压 3×2 双级联串联叠加多电平逆变器 …… 264
6.6 电容分压直流电源 $N \times N'$ 双级联串 - 并联叠加多电平逆变器 …… 266
6.6.1 电容分压直流电源 2×2 双级联串 - 并联叠加多电平逆变器 …… 266
6.6.2 由容分压直流电源 3×2 双级联串 - 并联叠加多电平逆变器 …… 268
6.7 电容分压 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器的特点与发展前景 …… 270
6.8 变压器初级磁合成的推挽式多电平逆变器 …… 277
6.8.1 变压器初级磁合成推挽式多电平逆变器的构成与工作原理 …… 279
6.8.2 控制方式 …… 280
6.8.3 变压器初级磁合成推挽式多电平逆变器的串、并联级联叠加 …… 282

第 7 章　H 桥的多重叠加 …… 286
7.1　引论 …… 286
7.2　N 个 2H 桥多重叠加的谐波分组特性及“消去法” …… 287
7.2.1　多重叠加的谐波分组特性 …… 288
7.2.2　多重叠加的“消去法” …… 291
7.3　N 个 2H 桥多重叠加的余弦规律 …… 294
7.3.1　$N=6$ 或 $N=9$ 的多重叠加方式 …… 298
7.3.2　$N=6$ 的余弦规律合成法应用实例 …… 299
7.4　多重叠加法的 PWM 调制 …… 301
7.4.1　阶梯起点角在分点上 …… 303
7.4.2　阶梯波起点角在分点之间 …… 304
7.5　多重叠加法 PWM 调制的应用举例 …… 305
7.5.1　6 个 2H 桥实现 5 个方波电压的叠加 …… 306
7.5.2　6 个 2H 桥实现 5 个方波电压叠加的 PWM 控制 …… 311
7.6　三相逆变器的多重叠加 …… 315
7.6.1　$N'=2$ 的三相方波电压的多重叠加 …… 316
7.6.2　4 个三相逆变器多重叠加组成的 UPS 电源 …… 322
7.7　4 个三相逆变器的Y-△多重叠加式逆变器 …… 329
第 8 章　电流型 H 桥及 TPWM 直流电流源级联式逆变器 …… 339
8.1　定义和特点 …… 339
8.2　电流型逆变器的 PWM 调制与级联叠加 …… 341
8.2.1　电流型逆变器的 PWM 控制法及特点 …… 342
8.2.2　电流型逆变器的级联叠加 …… 344
8.3　三相典型电流型 TPWM 逆变器及其并联级联叠加 …… 345
8.3.1　三相典型电流型 TPWM 逆变器 …… 345
8.3.2　三相典型电流型 TPWM 逆变器的并联级联叠加 …… 349
8.4　2H 桥三相电流型 TPWM 逆变器及其并联级联叠加 …… 350
8.4.1　2H 桥三相电流型 TPWM 逆变器 …… 350
8.4.2　2H 桥三相电流型 TPWM 逆变器的并联级联叠加 …… 353
8.5　TPWM 直流电流源级联式多电平逆变器 …… 354
8.5.1　TPWM 直流电流源逆变器 …… 354
8.5.2　TPWM 直流电流源级联式多电平逆变器简介 …… 357
8.6　TPWM 直流电流源 $N\times N'$ 双级联并联叠加多电平逆变器 …… 361
8.7　TPWM 直流电流源级联式多电平逆变器的特点与开发前景 …… 363
8.8　TPWM 直流电流源并联级联式多电平逆变器的应用 …… 365
第 9 章　应用举例 …… 368
9.1　引言 …… 368
9.2　2H 桥级联式变频器 …… 370
9.2.1　30 相输入整流电路 …… 370

9.2.2 2H 桥级联式十一电平逆变电路 …… 372
9.3 采用 2H 桥级联式多电平逆变器的中压变频器实例 …… 374
9.3.1 日本东芝公司生产的 TOSVERT-MV 变频器 …… 374
9.3.2 美国罗宾康公司的完美无谐波变频器 …… 377
9.3.3 日本三菱电机公司的 PMT-F500HV 变频器 …… 379
9.4 独立 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器在变频器中的应用 …… 380
9.4.1 在完美无谐波变频器中的应用 …… 380
9.4.2 在电动汽车驱动系统中的应用 …… 382
9.5 多电平逆变器在大功率 UPS 中的应用 …… 386
9.5.1 独立 SPWM 直流电源级联叠加式 UPS …… 387
9.5.2 采用二极管的二进制(2^{N-1})级联叠加式 UPS …… 392
9.6 2H 桥级联叠加逆变器在静止同步补偿器中的应用 …… 399
9.7 采用 2H 桥级联叠加逆变器的电力有源滤波器 …… 404
9.7.1 参考电流的检测 …… 405
9.7.2 CSAPF 的无差拍控制方式 …… 406
参考文献 …… 410

第1章 概 述

本章将概括介绍有关级联式 SPWM 多电平逆变器的一些基本知识，如级联式 SPWM 多电平逆变器的定义和研制背景、发展过程和应用领域、基本工作原理、分类及特点等，以使读者对级联式 SPWM 多电平逆变器有一个大概的了解。本章最后还将介绍这种逆变器所用的开关器件。

1.1 定义和研制背景

1.1.1 定义

所谓 SPWM 脉宽调制法（Sinusoida Pulse Width Modulation，SPWM），是指用以正弦波做调制波（Modulating Wave），以 F 倍于正弦调制波频率的三角波做载波（Carrier Wave）进行波形比较而产生的一组幅值相等，而宽度正比于正弦调制波的矩形脉冲列来等效正弦调制波，用开关量取代模拟量，并通过对逆变器开关管的通、断控制，把直流电能变换成正弦交流电能的一种逆变器控制法。由于载波三角波的上、下宽度是线性变化的，所以 SPWME 脉宽调制是线性调制。

具体而言，SPWM 脉宽调制法是把通信系统中的调制技术应用于逆变器的控制中的一种正弦脉宽调制技术。1983 年，笔者在航天部第二研究院院刊上发表了 SPWM 逆变器理论的数学分析一文，对 SPWM 技术进行了严格的数学证明，这种证明是以双重傅里叶级数为基础的一种数学证明，笔者用它推导出了逆变器输出电压的表示式，以及对输出电压中所包含谐波成分进行了分析。

SPWM 多电平逆变器中的 SPWM 脉宽调制的功能是为了调节逆变器的输出电压、改善输出电压的波形。所谓 SPWM 多电平逆变器的电平数，是指在输出电压一个周期内的 SPWM 电平数，也即输出电压波形中从正最大值到负最大值之间所包含的 SPWM 阶梯数，如图 1－1所示。由于 SPWM 多电平逆变器从正最大值到负最大值之间所包含的 SPWM 阶梯数是 7，所以它的电平数为 7。

所谓 SPWM 多电平逆变器，是指其输出电压波形中的 SPWM 电平数等于或大于 3 的逆变器，如三电平逆变器、五电平逆变器和七电平逆变器等。这种 SPWM 多电平逆变器主要有两种结构形式：一种是在传统两电平逆变器半桥式结构的基础上，按照相同的半桥式结构，通过增加直流分压电容将直流电源电压分压成多个相同的直流电压，然后通过加入钳位电路和增加开关管的串联个数构成的半桥式多电平逆变器。它用不同的开关切换组合进行 SPWM 控制来得到 SPWM 多电平输出。这种 SPWM 多电平逆变器通常被叫做钳位式 SPWM 多电平逆变器；另一种是利用单相全桥式 SPWM 逆变器（俗称 FBI 或 H 桥），通过直接串联级联叠加组成的

SPWM多电平逆变器，这种SPWM多电平逆变器通常被叫做级联式SPWM多电平逆变器。这种多电平逆变器的每个FBI（或H桥）的直流电源必须是独立的直流电源，只有在这种情况下才能进行级联。独立直流电源的电压可以相等，也可以不相等。取不同的直流电源电压，可以得到不同的SPWM电平数的电压输出，如三电平、五电平、七电平等。除了上述两种主要的SPWM多电平逆变器的结构形式之外，还有其他一些电路结构形式，如SPWM直流电源级联式多电平逆变器等，这将在第5章与第6章的介绍中进行说明。

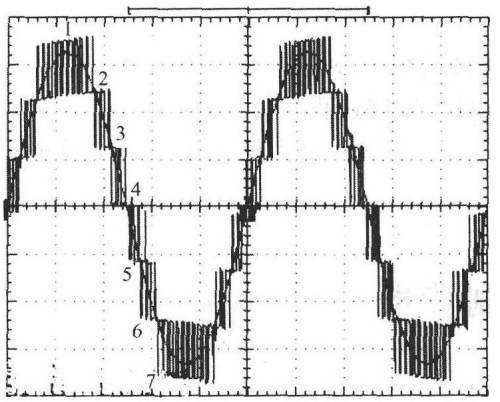


图1-1 SPWM七电平电压波形

1.1.2 SPWM多电平逆变器的研制背景

SPWM多电平逆变器，是以电力系统中的直流输电、无功功率补偿、电力有源滤波器等应用发展的需要，高压大功率交流电动机的变频调速系统大量应用的需求，由20世纪70年代以来两次世界性的能源危机和当前严重的环境污染所引起的世界各国对节能技术与环保技术的广泛关注，以及轨道交通发展的需要为背景的。

1. 电力系统的发展需要

随着我国国民经济的高速发展，市电电网的电压和电流存在着严重的质量问题。首先，由于市电电网的复杂性，如容量的不足、输变电和各种配电设备的性能及质量问题，各用电设备配置的不合理、设备之间的相互影响、配电系统中各种非线性负载的增加、电力电子设备的广泛应用、自然界的雷击、地电和人为因素的影响等，使得市电供电的质量在逐渐地恶化。其中市电电压的波动、谐波、闪变，以及市电电流中无功与谐波分量的影响最大。而市电电能质量的恶化会给用户带来较大的损失。其次，用户负载中的电动机、变压器、荧光灯等非线性负载及电力电子电源的大量应用，也引起了谐波和无功功率的大量产生，这不仅增大了市电电网的负担，也造成了对市电电网的严重污染。

在我国，由于能源与工业发展的不平衡，西部能源多但用电少，而东部能源少但用电多，这就决定了我国电力开发与电网建设只能是“西电东送，南北互供”，以三峡水电站为核心进行辐射。因此，我国的电网具有如下的特点：规模超大；距离超长；电力传输容量超大；拥有水力、火力超级发电中心与能源基地；拥有超重负载中心；能源中心与负载中心的联系非常薄弱；交、直流混合输电；多种控制装置混合等。这些特点决定了我国的市电电网将有可能会遇到严重的安全稳定问题。为了治理污染，提高电力系统的控制能力和输电能

力，美国电力研究院于20世纪80年代提出了柔性交流输电系统（也有人译为灵活交流输电系统）（Flexible AC Transmission System，FACTS）的新概念。所谓柔性交流输电系统，其本质就是将高压大容量电力电子技术及现代控制技术，如静止无功补偿器（SVG）、电力有源滤波器（APF）、综合潮流控制器（Unified Power Flow Controller，UPFC）应用到电力系统中，从而增强对电力系统的控制能力，提高原有电力系统的输电能力，治理电力系统的无功与谐波污染，提高电能质量，使电力系统高效、稳定、可靠地运行，使用户放心地用电。事实证明，加装先进的静止无功功率补偿器、电力有源滤波器与综合潮流控制器的办法是非常有效的，而装配这些设备，都需要用到高压大功率的SPWM多电平逆变器。这是当前电力系统的发展需要，也是必然的发展趋势。

2. 高压大功率交流电动机变频调速的要求

在传统工业技术改造场合，高压大功率交流电动机变频调速技术正在被推广应用，并逐步取代直流电动机调速技术而占到了主导地位。在轧钢、造纸、水泥、煤炭、铁路及船舶等领域中，也已广泛应用了大中容量的交流电动机调速系统。交流电动机调速系统的应用，不但可以节能，也可以使整个系统的性能达到最佳，从而改善工艺条件，提高生产效率，大大提高产品的质量。传统的两电平逆变器，由于其固有的缺点，如 du/dt 大、EMI大、开关频率高，逆变效率低，不适合于高压大功率应用等，不能很好地达到上述理想的效果。要达到这个效果，必须研究开发SPWM多电平逆变器。例如，传统两电平逆变器在应用于高压大功率输出时，除了少数低速场合采用AC－AC变频方式外，通常多采用AC－DC－AC变频方式。在这种方式中，有的将多个低压小容量的变频器通过变压器多重叠加技术得到高压大功率输出；也有的在交流输入和输出端分别用变压器进行降压和升压，中间环节仍然采用低压变频器。很显然，上述两种方法都采用了笨重、昂贵、耗电的变压器。对于第二种方法，在过程中还会出现中间环节电流过大，系统效率下降、可靠性降低、低频时能量传输困难等诸多缺点。为了克服这些缺点，人们采用了直接高压变换方式，这就对开关器件提出了很高的要求，如要求开关器件能承受很高的电压应力。通常的做法是将多个低压开关器件串联级叠加起来以提高电压的承受能力，这样做虽然在一定程度上降低了成本（几个低压开关器件的价格往往比一个同容量的高压开关器件便宜），但存在着静态和动态均压问题。均压电路将会导致系统复杂化、损耗增加、效率下降。因此，一种通过逆变器自身结构的改进或用FBI（H桥）直接串联级叠加的办法达到既不需要升、降压变压器，也不需要均压电路的高压大功率SPWM多电平逆变器应运而生，受到了人们的欢迎，解决了高压大功率交流电动机变频调速的难题。

3. 节能的需要

我国当前能源十分紧张，但能源的浪费现象却十分严重。其中重要的原因是单位产值的能耗太大。据有关单位的统计，在我国，发电量的60%～70%用于驱动电动机做功，而由于其中90%的电动机是交流电动机，且大部分是直接拖动，再加上采用的是直接恒速拖动，所以每年造成的电能浪费很大。如果再考虑到电能从发出到传输和使用中的损耗，如调峰、励磁、网损、无功、谐波及各种用电设备上的自身浪费，全国总的耗能数量加起来是十分惊人的。例如，占工业用电30%以上的各种风机、泵类负载，全国有4700多万台，总功率约

为1.3亿千瓦以上。由于此类负载的工况变化较大，如果采用交流电动机变频调速技术实现变频运行，节能效果将非常明显。假定平均节电按20%计算，全国一年节省的电能约为500亿千瓦时，相当于1500万千瓦发电站一年的发电量。此外，还可以节省数百亿元的电力建设费用，减少2000万吨的发电用煤，以及50万吨的二氧化硫和1200万吨的二氧化碳污染的排放。要实现交流电动机的变频调速运行，就必须采用SPWM多电平逆变器。因此，从节能的角度出发，现状也促进了SPWM多电平逆变器的研究和发展。特别是工业用的大功率风机、水泵，如钢铁工业用的高炉鼓风机、炼钢制氧机、除尘风机；石油化工生产用的压缩机，电力工业用的给水泵、引风机；煤矿用的排水泵和排风机，以及城市自来水厂用的供水泵等，这些机械的驱动电动机都是400～40000 kW，3～10 kV的高压大功率交流电动机。这些设备由于没有调速功能，天天都在大量地浪费电能，所以被称做耗电巨大的“电老虎”。因此，开发高压大功率SPWM多电平逆变器，并由此组成交流电动机的变频调速节能装置，用于这些大功率风机及水泵，将会对我国的工业降低单产能耗产生重大意义。

从以上三个方面的分析可知，不管是为了提高电力系统的控制能力，治理电力系统的无功与谐波污染，还是提高交流电动机传动系统的节能效果和性能，达到提高生产效率和产品质量的效果，都必须研究开发和运用SPWM多电平逆变器。

4. 轨道交通发展的需要

为了满足交通运输日益增长的需求，西方工业化国家从20世纪50年代就开始了大规模的现代化铁路建设。到2002年年底为止，据不完全统计，世界铁路的营业里程为1 185 518.5 km，其中已修建电气化铁路的有65个国家和地区，铁路总营业里程为1 080 464.5 km，电气化铁路总营业里程为261 688 km，电气化率已经达到了24.2%。而欧洲国家的电气化率达到了46%，其中瑞士的电气化率最高，达到了98%。

电力机车按照传动方式的不同可以分成两种，一种是直流传动，另一种是交流传动，前者采用的是直流电动机，后者采用的是交流异步电动机。直流传动的缺点是直流电动机的电刷需要经常维护更换，不利于高速运行，且直流电动机与交流异步电动机相比，在容量相同时体积和重量要大很多。而交流传动采用的是交流异步电动机，其优点是体积、质量较小，无须经常维护，故障率低，恒功率区比较大，可以高速运行，启动牵引力大，持续功率大，有利于重载高速牵引，电气制动容易，制动闸瓦的损耗小，可以利用制动反馈的能量达到节能节油的目的，经济效益高。此外，交流传动的一个最大优点是黏着性好，即由于交流传动具有很硬的机械特性，所以车轮不容易打滑或空转，电力机车的牵引和再生工况的功率因数接近于1，这不仅降低了电网的损耗，而且在再生制动时还可以将较高质量的电能反馈回电网，减少了电网对信号和通信系统的干扰。交流传动系统的上述优点受到了各国铁路运输部门的关注，得到了迅速的发展，现在已经基本上取代了直流传动系统。

此外，城市交流也采用了电力牵引技术，但一般采用的是直流馈电，而高速电气化铁路采用的是交流馈电，即通过变压器降压，再经过整流后逆变成交流电能来驱动异步电动机。当然，城市轨道交通也可以采用交流传动，只不过要将整流部分去掉，从技术上来说两者是基本相同的。

当前，我国正在大力地开展铁路电气化、城际高速铁路、城市轨道交通的建设。因此，从轨道交通发展的需要来说，也必须研究开发和运用SPWM多电平逆变器。

1.2 发展过程和应用领域

1.2.1 SPWM 多电平逆变器的发展过程

1977 年，德国学者 Holtz 提出来了一种三电平逆变器的雏形，即在两电平半桥式逆变器的基础上加入了开关管辅助钳位电路，从而得到了三电平电压输出。1980 年，日本长冈科技大学的南波江章（A. Kira Nabae）等人对其进行了改进，在 IEEE 工业应用（IAS）年会上提出了二极管钳位式三电平逆变器，这才开始进入到多电平逆变器的研发阶段。由于电力系统的发展，高压大功率交流电动机变频调速器的发展和环保节能的需要，又促使高压大功率多电平逆变器的研究进入到一个新高潮。随着南波江章二极管钳位式三电平逆变器的出现，1983 年，P. M. Bhagwat 等人将三电平扩展到五电平、七电平和多电平二极管钳位式逆变器。1999 年，Xiaoming Yuan 提出了二极管自钳位式多电平逆变器。1992 年，法国学者 T. A. Meynard 和 H. Foch 提出了电容钳位式多电平逆变器。2000 年，Fang Z. Peng 综合了多种钳位式多电平逆变器（如二极管钳位式、电容钳位式及二极管与电容混合钳位式多电平逆变器）的特点，然后在 IEEE 工业应用（IAS）年会上提出了通用式多电平逆变器电路，这种电路可以不借助附加电路来抑制直流侧分压电容上电压的偏移，从而从理论上实现了一个真正的有实际应用价值的多电平逆变器的电路形式——以电容钳位的半桥式电路为基本单元构成的电容电压自平衡式通用钳位多电平逆变器。1988 年，M. Marchesoni 等人提出了具有独立直流电源的级联式多电平逆变器。2000 年，M. D. Manjrekan 等人提出了单相全桥式逆变器（FBI 或 H 桥）直接串联式多电平逆变器。2007 年，我们提出了 SPWM 直流电源级联式多电平逆变器，这是对多电平逆变器原理的一种革命性的改革，其特点是将 SPWM 控制从逆变开关移到了直流电源上，并采用了 SPWM 直流电源的级联叠加，这种改革可以显著减少开关管的数量，也使逆变开关自然地工作在 ZVS 状态，从而降低了成本，减少了开关损耗，增加了可靠性。有关这种新型的多电平逆变器，将在第 5 章和第 6 章进行重点介绍。

1.2.2 SPWM 多电平逆变器的应用领域

SPWM 多电平逆变器与传统的两电平逆变器相比，具有很多优点，如控制方式灵活、输出电压的相位和幅值便于调节控制、输出电压的谐波含量低、逆变效率高、可以使用价格便宜的低频高耐压大功率的开关器件、适合于高压大功率输出等。因此，它在各种高压大功率电能变换领域中的 AC/DC 变换、DC/DC 变换和 DC/AC 变换中得到了广泛应用，但主要仍应用在高压大功率交流电动机的变频调速、直流输电和电能质量综合治理，以及超导储能、轨道交通、感应加热和大功率不间断电源（UPS）等领域。同时，它在清洁能源的利用上也可以起到重要作用，如风力发电和太阳能发电都可以通过高压多电平逆变器入网。随着大量电力电子装置的普及使用，以及变压器、交流电动机、整流器、荧光灯等非线性感性负载的比例增加，市电电网受到无功功率与谐波的污染日益严重，而无功功率补偿器和电力有源滤