

多电平逆变 技术及其应用

刘凤君 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



多电平逆变技术及其应用

刘凤君 编著



机械工业出版社

这是一本专门介绍多电平逆变技术及其应用的书。本书以“基本功率单元”的观点,采用物理概念和数学分析相结合的方法,详细介绍了各种多电平逆变器的电路构成、工作原理和控制方法。

本书共分6章。第1章介绍了多电平逆变器的一些基础知识、产生背景、发展过程及应用领域。第2章介绍了钳位式多电平逆变器,其中包括二极管钳位、飞跨电容钳位、混合钳位和通用钳位型多电平逆变器。第3章介绍了级联式多电平逆变器,如2H桥级联式、3H桥级联式和混合级联式多电平逆变器。第4章介绍了多电平逆变器的控制方法,如三角波层叠法、优化PWM法、消除特定谐波法、三角波移相法、空间矢量控制法和不连续层叠法等。第5章介绍了多重叠加法,如 N 个2H桥的叠加、三相逆变器的叠加和电流型逆变器的多重叠加。第6章介绍多电平逆变器在变频调速器、电力有源滤波器和静止同步补偿器中的应用。本书适合于电力电子技术领域的科技人员,从事电气传动自动化、电机及其控制的科技工作者阅读,也可作为大专院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多电平逆变技术及其应用/刘凤君编著. —北京:机械工业出版社, 2007.1

ISBN 978-7-111-20665-1

I. 多… II. 刘… III. 逆变器 IV. TM464

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第165186号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王 玫 版式设计:冉晓华 责任校对:刘志文

封面设计:鞠 杨 责任印制:李 妍

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2007年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm ·25.5印张·627千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-20665-1

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379767

封面无防伪标均为盗版

前言

21 世纪是能源与环保的世纪。能源的开发、资源的利用与环境保护相互协调的发展将是 21 世纪经济发展的基础。

电能是当前人类文明发展的动力，电能也是当前衡量一个国家经济发展与人民生活的一个重要指标。我国的电能生产与发展已名列世界前茅，但仍然满足不了工业生产和人民生活提高的需要。由于缺电，生产不能按照正常的速度和秩序进行，影响了国民经济的发展和人民生活水平的提高。与此同时，在电能十分紧张的情况下，由于技术落后，电能的浪费现象也十分严重。我国的国民生产总值只居世界第四名，其重要原因之一就是单位产值的能耗太大。例如在工业用电中根据国家有关部门的调查统计，年发电量的 60%~70% 用于电动机拖动，其中，90% 是用于交流电动机的直接恒速拖动，由于不能实现变频调速、每年都要造成大量的电能浪费。如占工业用电 30% 以上的风机和泵类负载，全国共有约 4700 万台以上，总功率达 1.3 亿 kW 以上，由于这类负载的工况变化较大，如果将直接恒速拖动改用中、高压大容量变频调速拖动，就可以达到明显的节电效果，以平均节电 20% 计算，全国一年可以节电约 500 亿 kW·h，相当于一个年发电量 1500 万 kW 的发电站。此外，中、高压大容量变频调速系统在轧钢、水泥、造纸、船舶等工业与生活领域中的应用，可以使系统性能最佳，可以提高生产效率和产品质量。同时在解决环境污染方面，中、高压大容量变频调速系统也是一种最好、最直接的方法之一，如高速电气化铁路、城市地铁和轻轨以及电动汽车等，可以大大减少尾气排放的污染。

随着电力电子装置等非线性负载和时变性负载在电力系统、工业、轨道交通以及家电中的大量应用，对电网的无功与谐波污染也日益严重。电网中的无功与谐波不仅仅可以降低发电、输配电和用电的效率，同时也降低了电气设备的可靠性，严重时，还可能损坏设备、危及电网的安全运行。我国的电网具有以下特点：超大规模；超长距离、超大容量电力传输；超级水、火发电中心与能源基地；超重负载中心；能源中心与负载中心联系非常薄弱；交、直流混合输电；多种控制装置混合。这些特点决定了我国的电网将面临非常严重的安全和稳定的隐患问题，而克服这些问题的有效办法就是发展柔性交流输电系统（FACTS）和治理电网的无功与谐波污染，以提高电力系统的可控性及可靠性，提高电能的输送能力以及系统的安全性和稳定性。为此，采用高压大容量多电平逆变器构成的综合潮流控制器（UPFC）和电力有源滤波器无疑是一种最直接最有效的治理方法。

在中、高压大容量变频调速器和电力有源滤波器大量应用的促使下，多电平逆变器已成为当前电力电子技术中倍受人们关注的重要研究热点，也因此使逆变技术出现了完全相反的两条发展道路：一条是高频软开关道路；另一条是低频多电平道路。两者虽然都是为了减小开关应力、改善输出电压波形，但走的道路却是截然相反的。前者的目标是在追求高频化和软开关，并将开关频率提高到兆赫级，而后的出发点则是通过对主电路结构的改进实现多电平基频化。前者适合于低压中、小容量的逆变器，而后者则适合于中、高压大容量的逆变器。前者的技术已基本成熟，而后的技术目前还处于发展阶段。

高压大容量多电平逆变器所用的开关器件是高耐压的大功率开关器件,如 GTO 晶闸管、IGBT、IGCT 等。20 世纪 90 年代,高压 IGBT 与 IGCT 高性能复合器件已经达到了大批量工业应用阶段,为多电平逆变器的开发应用创造了条件。

自 1980 年日本长冈科技大学的南波江章(A.Nabae)等人提出了三电平中点钳位式逆变器以来,多电平逆变技术经历了 20 多年研究,积累了大量的文献资料,已经初步形成了一门完整的科学门类。我写此书的目的一是总结以前的成果,二是进一步推动多电平逆变技术的发展,起到抛砖引玉的作用。

本书共有 6 章,第 1 章介绍有关多电平逆变器的一些基础知识、定义、产生背景、发展过程和应用领域等。第 2 章介绍钳位式多电平逆变器,其中包括二极管钳位、飞跨电容钳位、混合钳位和通用钳位型逆变器等。第 3 章介绍了级联式多电平逆变器,其中包括 2H 桥级联式、3H 桥级联式及不同开关器件、不同直流电源电压的 2H 桥与 3H 桥混合级联式多电平逆变器。第 4 章介绍了多电平逆变器的 PWM 控制方法,其中包括三角载波层叠法、优化 PWM 法、消除特定谐波法、三角载波移相控制法、空间相量控制法以及混合多电平逆变器的不连续层叠控制法等。第 5 章介绍了多重叠加式多电平逆变器,其中包括 N 个 2H 桥方波电压的叠加、三相逆变器的多重叠加、并联三相逆变器的多重叠加、采用一个三相变压器的多重叠加和电流型逆变器的多重叠加等。第 6 章介绍了多电平逆变器的应用,其中主要介绍了二极管钳位三电平逆变器和 2H 桥级联式、多重叠加式多电平逆变器在变频调速器、电力有源滤波器和静止同步补偿器中的应用及其控制法。

本书适合于电力电子技术领域的科研工作者,从事电气传动自动化、电机及其控制的科研工作者阅读,也可以作为大专院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的教学参考书。为了适应这些读者的阅读需求,本书的编写突出了以下特点:①内容丰富、全面,代表了当代的发展水平。②按照开发的顺序由浅入深、循序渐进地进行深入介绍。③采用了基本单元分析法,揭示了各种多电平逆变器及其控制方法的内在联系。④采用了物理概念、图表和数学分析相结合的分析法,解出了它们的输出电压表示式,以使读者能够全面、系统地得到较深的理论知识。

多电平逆变技术是最近 20 多年才发展起来的一门新型电能变换技术,尚处于发展阶段,需要广大的相关科技工作者共同努力来推动加速它的发展,并将其应用于中、高压变频调速系统及直流输电和电力有源滤波器中,这也是作者写此书的重要目的之一。

参加本书编写的有李文贞、刘康两位高级工程师,他们帮助搜集、整理资料,绘图与文字润饰等,因此缩短了编写过程。

由于作者学识水平所限以及这项技术尚处于发展阶段,因此书中的内容难免有不足和错误之处,敬请读者批评指正。

刘凤君

2006 年 9 月于航天工业总公司二院

目 录

前言

第 1 章 概述 1

- 1.1 定义和产生的背景 1
 - 1.1.1 多电平逆变器的定义 2
 - 1.1.2 多电平逆变器产生的背景 2
- 1.2 发展过程与应用领域 4
 - 1.2.1 多电平逆变器的发展过程 4
 - 1.2.2 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 多电平逆变器的基本工作原理 6
 - 1.3.2 多电平逆变器的分类 7
 - 1.3.3 多电平逆变器的特点 8
- 1.4 多电平逆变器的基本单元分析法 9
 - 1.4.1 多电平逆变器电路的基本单元 10
 - 1.4.2 多电平逆变器的基本单元分析 11
- 1.5 基本逆变器单元的数学表示式 13
- 1.6 多电平逆变器生成的多重叠加法 17
 - 1.6.1 N 个单相逆变器的多重叠加 18
 - 1.6.2 三相逆变器的多重叠加 26
- 1.7 生成多电平逆变器的级联法 27
- 1.8 多电平阶梯波的谐波分析新方法 28
- 1.9 多电平逆变器用的开关器件 29
- 本章小结 31

第 2 章 钳位式多电平逆变器 32

- 2.1 二极管钳位式多电平逆变器 32
 - 2.1.1 二极管钳位式三电平逆变器 32
 - 2.1.2 单相全桥式二极管钳位三电平逆变器 38
 - 2.1.3 三相二极管钳位三电平逆变器 40
 - 2.1.4 采用辅助臂的二极管钳位式三电平逆变器 45
 - 2.1.5 二极管钳位五电平逆变器 47
- 2.2 飞跨电容钳位式多电平逆变器 52
 - 2.2.1 单相飞跨电容钳位三电平逆变器 53
 - 2.2.2 三相飞跨电容钳位三电平逆变器 56

- 2.2.3 飞跨电容钳位多电平逆变器 57
- 2.3 电容钳位自平衡式多电平逆变器 62
 - 2.3.1 电容钳位自平衡式五电平逆变器 64
 - 2.3.2 电容钳位自平衡式多电平逆变器的派生电路 66
- 2.4 混合钳位式多电平逆变器 66
 - 2.4.1 混合钳位式三电平逆变器的结构原理 66
 - 2.4.2 三相混合钳位式三电平逆变器 67
 - 2.4.3 混合钳位式多电平逆变器的单相电路 69
- 2.5 钳位式逆变器的缓冲电路与软开关技术 69
 - 2.5.1 钳位式多电平逆变器的缓冲电路 70
 - 2.5.2 二极管钳位三电平逆变器的软开关技术 71
 - 2.5.3 辅助谐振变换极二极管钳位三电平逆变器的软开关电路 73
 - 2.5.4 电容钳位三电平逆变器的有源软开关技术 75
- 本章小结 77

第 3 章 级联式多电平逆变器 78

- 3.1 级联式多电平逆变器的结构与特点 78
- 3.2 IGBT 2H 桥级联式多电平逆变器 81
 - 3.2.1 SPWM-2H 桥的工作方式与输出电压表示式 82
 - 3.2.2 SPWM-2H 桥的应用级联方式 87
- 3.3 IGBT 3H 桥级联式多电平逆变器 94
 - 3.3.1 3H 桥的工作方式与输出电压的表示式 95
 - 3.3.2 3H 桥的级联方式 99
- 3.4 IGBT 2H 桥与 3H 桥的混合级联 103
 - 3.4.1 一个 2H 桥与一个钳位式三电平逆变器的级联 104
 - 3.4.2 一个 2H 桥与一个 3H 桥的混合级联 105

3.5 不同开关器件不同直流电压的 2H 桥混合级联	107	4.2.2 开关频率优化 PWM 法	164
3.5.1 用 GTO 晶闸管与 IGBT 作开关的两级 2H 桥串联叠加	107	4.2.3 消除特定谐波的 PWM 控制法	165
3.5.2 用 GTO 晶闸管与 IGBT 作开关的三级 2H 桥串联叠加	109	4.3 三电平逆变器的空间电压相量 PWM 控制法	169
3.5.3 采用不同开关器件的其他 2H 桥级联方式	111	4.3.1 基本相量的分类与对中性点电压的影响	171
3.6 不同开关器件不同直流电压的 2H 桥与 3H 桥的混合级联	112	4.3.2 参考电压相量的合成	173
3.6.1 2H 桥与 3H 桥的混合级联	113	4.3.3 三电平空间相量 PWM 控制的算法	174
3.6.2 2H 桥与不对称 3H 桥的混合级联	117	4.3.4 60° 坐标系的算法	176
3.7 三相半桥式逆变器的级联	119	4.4 多电平逆变器的载波 PWM 控制	179
3.7.1 三相半桥式 SPWM 逆变器的输出电压表示式	119	4.4.1 三角载波移相 PWM 控制	179
3.7.2 三相半桥式 SPWM 逆变器的级联方式	124	4.4.2 三角载波层叠 PWM 控制	185
3.7.3 三相半桥式 SPWM 逆变器的串-并联混合叠加	126	4.4.3 开关频率优化 PWM 控制	192
3.8 三相 SPWM 逆变器的线电压串联叠加	130	4.4.4 性能指标的实现与优化	193
3.8.1 电路中的电压、电流和功率关系	131	4.5 多电平逆变器的空间电压相量 PWM 控制法	194
3.8.2 控制方式、特点和扩展	134	4.5.1 空间相量模型及控制目标	198
3.9 开绕组双端供电式电路	135	4.5.2 60° 坐标系多电平空间相量 PWM 控制法	199
3.9.1 开绕组交流电动机双逆变器供电的电路结构分析	137	4.5.3 参考电压分解多电平空间相量 PWM 控制法	200
3.9.2 等效原理与扩展	139	4.5.4 多电平逆变器的通用空间相量 PWM 控制法	205
3.10 层叠式多电平逆变器	143	4.6 级联式多电平逆变器的载波 PWM 控制	213
3.10.1 层叠式多电平逆变器的典型结构	144	4.6.1 2H 桥实现级联的必备条件与控制方式	215
3.10.2 层叠式多电平逆变器的自平衡	146	4.6.2 2H 桥级联输出电压与控制电路	217
3.11 2H 桥与三相半桥式逆变器的广义软开关技术	147	4.7 不同开关器件 H 桥混合级联分段载波层叠式 PWM 控制法	221
3.11.1 用缓冲电路使开关软化	148	4.7.1 不同开关器件 2H 桥混合级联 PWM 控制法	222
3.11.2 LCD 关断无源无损缓冲电路	149	4.7.2 不同开关器件 2H 桥与 3H 桥混合级联的 PWM 控制法	224
3.11.3 有源无损缓冲电路	152	4.7.3 阶梯波 EPWM 控制法	228
本章小结	154	本章小结	233
第 4 章 多电平逆变器的 PWM 控制技术	156	第 5 章 多重叠加式逆变器	236
4.1 PWM 控制法的来源、分类及其内在关系	156	5.1 利用分组特性进行多重叠加的应用实例	236
4.1.1 多电平逆变器 PWM 控制法的分类	157	5.1.1 2H 桥输出电压为方波的表示式	236
4.1.2 PWM 控制法的来源及其内在关系	158	5.1.2 用 6 个 2H 桥实现 5 个方波电压的叠加	239
4.2 三电平逆变器的载波 PWM 控制	160	5.1.3 用 6 个 2H 桥实现 4 个方波电压的	
4.2.1 三角载波层叠法	160		

叠加	242	泵类负载中的应用	309
5.1.4 用 6 个 2H 桥实现 3 个方波电压的 叠加	245	6.1.2 多电平逆变器变频调速在轧钢系 统中的应用	310
5.1.5 用 9 个 2H 桥实现 5 个方波电压的 叠加	247	6.1.3 多电平逆变器变频调速在轨道交 通系统中的应用	312
5.2 应用余弦规律多重叠加的应用实例	250	6.2 多电平逆变器在中、高压变频调速领 域的应用技术	315
5.2.1 $N=6$ 的 6 个方波电压的叠加	250	6.2.1 中、高压变频调速器的控制方式	315
5.2.2 $N=8$ 的 8 个方波电压的叠加	252	6.2.2 二极管钳位三电平逆变器的开关 模型	316
5.3 采用三相逆变器的多重叠加	253	6.2.3 三电平逆变器供电的异步电动机 调速系统的数学模型	318
5.3.1 $N'=2$ 的普通三相方波逆变器的叠 加应用实例	255	6.2.4 由三电平逆变器供电的异步电动 机直接转矩控制	322
5.3.2 $N'=3$ 的普通三相方波逆变器的叠 加应用实例	258	6.2.5 异步电动机直接转矩控制的系统 组成和应用实例	328
5.3.3 由 4 个三相逆变器多重叠加组成 的不间断电源 (UPS)	262	6.3 2H 桥级联式多电平逆变器在变频器中 的应用技术	333
5.3.4 常用的多重叠加方式	265	6.3.1 2H 桥级联式变频器的结构	333
5.3.5 多重叠加法的控制电路	265	6.3.2 2H 桥级联式逆变器的微机控制	337
5.4 并联三相多重叠加逆变器	271	6.3.3 2H 桥级联式逆变器的相量控制	344
5.4.1 中心抽头电抗器式并联叠加 逆变器	271	6.3.4 采用 2H 桥级联式多电平逆变器的 中压变频器实例	346
5.4.2 并联多重变压器式单相 2H 桥多重 叠加	276	6.4 多电平逆变器在有源滤波器中的应用 技术	351
5.4.3 并联多重变压器式三相多重叠加 逆变器	278	6.4.1 谐波的危害与有源滤波	352
5.5 采用一个并联多重变压器的三相多重 叠加式逆变器	281	6.4.2 参考电流的检测	358
5.6 电压型三相逆变器的串联和并联 叠加方式	288	6.4.3 适合于 CSAPF 的有功电流检测与 参考电流检测法	362
5.7 电流型逆变器的多重叠加	291	6.4.4 电力有源滤波器的控制方式	369
5.7.1 直接并联多重叠加	292	6.5 多电平逆变器在静止同步补偿器中的 应用技术	376
5.7.2 通过输出变压器的多重叠加	298	6.5.1 STATCOM 的工作原理	377
5.7.3 直接并联叠加与通过变压器叠加的 比较	304	6.5.2 STATCOM 的主电路组成	378
本章小结	306	6.5.3 STATCOM 的数学模型	386
第 6 章 多电平逆变器的应用	308	6.5.4 STATCOM 的控制系统	390
6.1 多电平逆变器在变频调速领域的 应用现状	308	本章小结	394
6.1.1 多电平逆变器变频调速在风机、		参考文献	395

第 1 章 概 述

在这一章中,将概括介绍有关多电平逆变器的一些基本知识,如多电平逆变器的定义及产生背景、发展过程及应用领域、基本工作原理、分类及特点、多电平逆变器的基本单元分析法、基本单元的数学表示式、多电平逆变器生成的多重叠加法与级联法的原理以及多电平逆变器输出电压的谐波分析新方法等,以便了解多电平逆变器的生成和得到迅速发展的真谛。最后还将介绍多电平逆变器所用的开关器件。

1.1 定义和产生的背景

在电压型逆变器中,最早广泛应用的是两电平逆变器。所谓两电平逆变器,就是通过控制开关管的导通和关断,在输出端把直流电源的正极(p)和负极(n)电压分别引出,将直流电能变换成交流电能的一种电能变换器。这种变换器一个最大的弱点是,受开关管功率和耐压的限制,不宜实现高压大功率输出。为了解决这个问题,通常的办法是将开关管直接串联,但这样做还需要解决开关管串联引起的静态和动态均压问题,同时还需要加入输出滤波器,以降低输出谐波和 du/dt 。为了避免出现上述技术难题,于20世纪80年代,在电力电子技术领域中应电力系统直流输电、无功补偿、电力有源滤波以及高压大功率交流电动机变频调速系统发展的需要,一种新型的、适合于环保节能应用的逆变器新思路——多电平逆变器(Multilevel Inverter)开始出现,并受到了越来越多的人们的关注。经过20多年的研究改进,现在已基本形成了几种结构定型的多电平逆变器电路,形成了一门独立的新型电力电子逆变技术新学科。

所谓电力电子技术就是用电力半导体开关器件(开关管)和电路对电能进行变换(如电压、电流、频率、相数和波形的变换等)、控制(如稳压稳频和变压变频的控制等)、优化(如效率优化、波形优化等)和利用(如在各个领域中的应用)的一门技术,该技术广泛应用于电动机调速系统、电力系统及各种电源系统等工业生产和民用的各个部门。电力电子变换技术分为四种类型,即DC-DC变换(将一种直流电能变换成另一种或多种直流电能);AC-DC变换(将交流电能变换成直流电能,俗称整流或顺变);AC-AC变换(将一种交流电能变换成另一种交流电能,俗称变频);DC-AC变换(将直流电能变换成交流电能,俗称逆变)。两电平逆变或多电平逆变就是DC-AC变换中的两种逆变技术,它们有不同的特点和不同的应用领域。当代的逆变技术,为了减少输出电压中的谐波含量和 du/dt ,有两种不同的研究方向。一种是两电平研究方向,即利用PWM控制方式,通过提高开关频率的方法,使输出电压波形正弦化。但这种方法由于电压应力 du/dt 较大,使逆变器的开关损耗增大,电磁干扰(EMI)也增大。为了减小电压应力、开关损耗和EMI,必须采用软开关技术,使逆变器工作在PWM控制的零电压开关(ZVS)或零电流开关(ZCS)状态,这将使逆变器的电路复杂化,并且还必须采用高频开关器件,增加了成本,降低了可靠性。另一种是多电平研究方向,即利用增加主电路电平数来减小 du/dt 和输出电压中的谐波,并使逆变器的开

关管工作在低压低频（或工频）状态，以减小开关损耗及 EMI。由于增加了逆变器的主电路电平数，电路结构必然要发生改变，逆变器的开关管数目必然要增多，但增多的是低频开关器件，这种器件货源充足、价格便宜，虽增多了开关器件数目，却使逆变器的造价降低，从提高逆变器性能价格比的角度来看还是合适的。这种逆变器更适合于高压大功率应用，它和两电平逆变器相比，不存在开关管串联的静态和动态均压问题， du/dt 小，EMI 小，逆变效率高。

1.1.1 多电平逆变器的定义

所谓电平数，对于电压型逆变器而言，指的是输出电压波形中，从正的最大值到负的最大值之间所包含的阶梯数，如图 1-1 所示。它的正、负最大值之间所包含的阶梯数是 9，所以它的电平数为 9。

所谓多电平逆变器是指这种逆变器输出电压波形中的电平数等于或大于 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压分压成多种直流电压，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，用不同的开关切换组合得到多电平输出；另一种则是利用单相全桥式逆变器（俗称 FBI 或 H 桥），通过直接串联叠加组成级联式多电平逆变器，每一个单相全桥式逆变器的直流电源必须是独立的直流电源时才能进行级联。独立直流电源的电压可以相等，也可以不相等。不同直流电源电压的取法，可以得到不同电平数的电压输出，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，这些将在以后的介绍中进行说明。

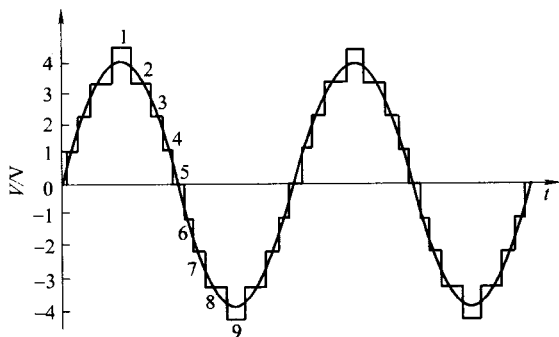


图 1-1 九电平电压波形

1.1.2 多电平逆变器产生的背景

多电平逆变器是以电力系统中直流输电、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变频调速系统大量应用的需求，以及 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，目前的市电网的电压和电流存在着严重的质量问题。这是由于市电网的复杂性，例如容量的不足、输变电和各种配电设备性能及质量问题、各用电设备配置的不合理、设备之间的相互影响以及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，使市电电能供应的质量在逐渐地恶化。其中主要是市电电压的波动、谐波、闪变以及市电电流中无功与谐波分量的影响。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、荧光灯等非线性阻感负载以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:超大规模;超长距离;超大容量的电力传输;超级水力火力发电中心与能源基地;超重负载中心;能源中心与负载中心联系非常薄弱;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,简称FACTS)的新概念。所谓柔性交流输电系统,其本质就是将高压电力电子技术以及现代控制技术,如静止无功发生(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,以增强对电力系统的控制能力,提高原有电力系统的输出能力,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,而这些设备的组成,都是要用到高压大功率的多电平逆变器。

采用高压大功率多电平逆变器制成的静止无功功率补偿器、电力有源滤波器、综合潮流控制器、直流输电的整流器和逆变器以及与此相关的技术等可以构成柔性输电系统。治理谐波和补偿无功功率是当前电力系统的发展趋势。因此研究开发高压大功率多电平逆变器是电力系统发展的需要,也是必然的趋势。

2. 高压大功率交流电动机变频调速的需求

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也正在被推广应用,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,广泛应用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,改善了工艺条件,提高了生产效率,也大大提高了产品的质量。要达到这个效果,必须研究开发多电平逆变器。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,不适合于高压应用等,不能很好地达到上述理想的效果。也正是由于这些原因才促使了多电平逆变器的发展。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,上述这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。通常的做法是用多个低压开关器件进行串联叠加来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

我国当前在能源十分紧张的情况下,能源的浪费现象却十分严重。我国的国民生产总值排名在世界第四位,其中重要原因是单位产值的能耗太大。据有关单位统计,在我国,发电量的60%~70%用于驱动电动机做功,其中90%的电动机是交流电动机,且大部分是直接拖动。由于采用的是直接恒速拖动,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、谐波以及各种用电设备上的自身浪费,全国总的数量加起来是十分惊人的。如占工业用电30%以上的各种风机、泵类负载,全国有4700万台,总功率约为1.3亿kW。由于此类负载的工况变化较大,如果采用交流电动机调速技术实现变速运行,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kW·h,相当于1500万kW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t的发电用煤,50万t的二氧化硫和1200万t的二氧化碳污染排放。要实现交流电动机的变频调速运行,就必须采用多电平逆变器。所以从节能的角度出发,也促进了多电平逆变器的研究和发展。特别是前面已经提到过的工业用大功率风机、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扇以及城市自来水厂用的供水泵等,这些驱动电动机都是400~4000kW、3~10kV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,被称作耗电巨大的“电老虎”。因此,开发高压大功率多电平逆变器,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具有重大意义。

从以上三个方面的分析可知,从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、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,都必须开发运用多电平逆变器。

1.2 发展过程与应用领域

本节首先介绍多电平逆变器的发展过程,然后再介绍它的应用领域。

1.2.1 多电平逆变器的发展过程

使输出电压的电平数等于或大于3的逆变技术,早在1962年就在阿波罗登月指令舱逆变器中得到了应用。1964年我们也曾根据A.Kernick提出来的谐波抵消法原理,仿照阿波罗登月指令舱逆变器电路;用8个晶体管单相全桥逆变器(FBI或H桥)与一个输出变压器,研制出三相400Hz、750W、115/200V的多电平逆变器。但那不是真正意义上的多电平逆变器,因为多电平的输出电压既不是单相全桥逆变器(FBI或H桥)本身的输出电压,也不是单相全桥逆变器(FBI或H桥)直接串联叠加的输出电压,而是两电平单相全桥逆变器(FBI或H桥),通过其输出变压器进行移相多重叠加得到的输出电压,所以它仍然是两电平逆变器。由德国的学者Holtz于1977年提出来了一种三电平逆变器,他在两电平半桥式逆变器电路的基础上,加入了开关管辅助钳位电路,得到了三电平电压输出。但这种三电平逆变器由于采用的是开关管辅助钳位结构形式,故只能得到三电平输出,即使增多开关管也不能得到多电平输出,所以只能算是一种多电平逆变器的雏形,还算不上是真正的多电平逆变器。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与发展,

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主电路的结构。这才开始进入到多电平逆变器的研发新阶段。由于电力系统的发展、高压大功率交流电动机变频调速的发展和环保节能的需要,又促使高电压大功率多电平逆变器的研究进入到一个新高潮。随着 Akira Nabae 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多电平逆变器。1992 年, 法国学者 T.A. Meynard 和 H. Foch, 提出了飞跨电容钳位式多电平逆变器。2000 年由 Fang Z. Peng 在综合了多种钳位式多电平逆变器(如二极管钳位式、飞跨电容钳位式以及二极管与飞跨电容混合钳位式多电平逆变器)的特点以后, 在 2000 年的 IEEE 工业应用 (IAS) 年会上, 提出了一种通用式的多电平逆变器的主电路结构。这种电路结构可以不需要借助于附加电路来抑制直流侧电容的电压偏移问题, 并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主电路结构。此电路结构是以飞跨电容钳位的半桥式结构为基本单元组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单元(即 FBI 或 H 桥)串联式多电平逆变器。上述各种多电平逆变器的主电路结构形式, 将在以后的章节中逐步进行介绍。

1.2.2 多电平逆变器的应用领域

多电平逆变器与传统两电平逆变器相比, 具有许多优势, 如控制方式灵活、输出电压的相位和幅值便于调节与控制、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压大功率开关器件、适合于高压大功率输出等。因此, 在各种高压大功率领域中的 AC-DC 变换、DC-DC 变换和 DC-AC 变换中得到应用, 但主要应用于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, 感应加热和大功率不间断电源(UPS)等领域。同时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比例的增加, 电网所受到的无功功率与谐波的污染日益严重, 而无功功率补偿和电力有源滤波器也向着高压大功率的方向发展。因此, 多电平逆变器在电能质量综合治理上也有着广泛的应用前景。高压大容量交流电动机的变频调速系统, 是多电平逆变器的另一个重要应用领域, 在城市自来水厂用的供水泵, 电厂用的给水泵、引风机、水泵, 钢厂轧钢用的大容量交流电动机拖动、制氧机、除尘风机, 石油工业用的压缩机, 煤矿用的排水泵、排风扇, 交通运输用的电力机车, 船舶用的电力推进系统, 轨道交通用的机车牵引系统等, 采用多电平逆变器的变频调速系统可以节省大量的能源, 不但可以提高生产效率, 而且还可以实现重载和高速列车的牵引。总之, 在当前我国国民经济高速发展的今天, 多电平逆变器将有着广阔的应用前景。当前研究的重点, 是在以下两个方面的应用:

(1) 在电力系统中, 作为直流输电的高压整流器 and 高压逆变器使用, 和作为治理无功与谐波污染的静止无功功率发生器与电力有源滤波器的主电路使用;

(2) 在高压大功率传动机械, 或高压大功率交流电动机变频调速系统中作为整流器与逆变器使用, 如应用于工业风机或泵类的变频调速系统以及轨道交通系统的牵引动力。

1.3 基本工作原理、分类及特点

在这一节中，主要介绍多电平逆变器的基本工作原理、分类及特点。

1.3.1 多电平逆变器的基本工作原理

1980 年，A.Nabae 等人提出的中性点钳位三电平逆变器，为人们研制高压大功率逆变器开辟了一条新思路，即通过逆变器电路结构的改造，利用增加逆变电路电平数的方法来减小 du/dt 和 EMI，减少输出电压中的谐波，并使逆变器开关管工作在低频（或工频）状态，以减少开关损耗，增大逆变器的输出电压和输出功率。经过 20 多年的研究和发展，现在已经形成了几种典型的多电平逆变器主电路的结构形式。这些主电路结构形式从原理上可以分为两大类：一类是钳位式半桥结构形式，包括二极管钳位、飞跨电容钳位、二极管飞跨电容混合钳位和通用钳位式半桥结构形式；另一类是利用单相全桥逆变器（FBI 或 H 桥）直接串联叠加的级联式结构形式。这两种结构形式的多电平逆变器的等效原理电路如图 1-2 所示。这是一种正半周期输出的等效原理电路，其中图 1-2a 为钳位式半桥结构形的等效原理电路；图 1-2b 为级联结构形式的等效原理电路。下面利用等效原理电路来说明这两类多电平逆变器是如何输出多电平，如何输出高压大功率交流电的。

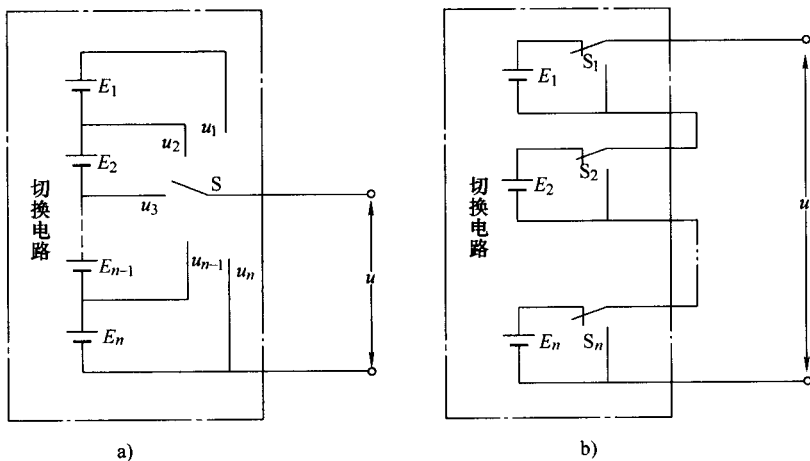


图 1-2 多电平逆变器半周期等效原理电路

a) 钳位式 b) 级联式

多电平逆变器和两电平逆变器一样，也有电压型与电流型逆变电路之分，但应用较多的是电压型多电平逆变器，因此我们将以电压型多电平逆变器为主进行介绍。对于电流型多电平逆变器，可以通过对偶原理去了解。

根据多电平逆变器直流电源电压连接方式的不同，电压型多电平逆变器开关管的通断控制方式也不同。对于图 1-2a 所示的钳位式多电平逆变器，开关管的通断切换电路（图中点画线框内的切换电路）的工作状态，可以等效成一个切换开关 S 。因此，通过对钳位式多电平逆变器开关管通断状态的控制，或者说对开关 S 的切换控制，就可以得到多电平电压输出；对于图 1-2b 所示的级联式多电平逆变器，开关管的通断切换电路（图中点画线框内的切换电路）的工作状态，可以等效成几个与独立直流电源 $E_1 \sim E_n$ 串并联的开关 $S_1 \sim S_n$ 。因

除了上面所介绍的多种主要多电平逆变器之外, 还有其他一些多电平逆变器, 如带倒相器的多电平逆变器和带变压器抽头的多电平逆变器等。

当前多电平逆变器的研究已经成为电力电子技术的热点, 新的多电平逆变器电路还在不断地出现, 上述分类所包含的内容只是根据当前的资料作出的。

1.3.3 多电平逆变器的特点

当前的逆变器有两种研究方向: 一种是两电平 PWM 研究方向, 即利用单一直流电源及两只开关管进行 PWM 控制, 得到的输出电压为幅值恒定的 ($+E/2$ 及 $-E/2$) PWM 波的电压, 故称两电平逆变器。这种逆变器的发展方向是提高开关频率, 用高频 SPWM 控制, 对输出电压的波形进行改善。但由于只有一个直流电源, 因此 du/dt 大, 开关损耗也大, EMI 也大。为了减小 du/dt 、EMI 及开关损耗, 必须使逆变器采用软开关技术, 必须采用高频开关器件, 使电路复杂化, 增大了成本, 减小了可靠性, 不适宜在高压大功率场合应用。另一种研究方向是对逆变器主电路进行改造, 采用多个直流电源及多个开关器件以及特定的电路结构, 通过对多个开关管的控制, 使不同的直流电源串联输出, 用增加电平数的办法减少输出电压中的谐波。由于有多个直流电源串联, 开关管的耐压与 du/dt 只取决于与之并联的那一个直流电源, 因而 du/dt 小, EMI 小, 但逆变器的输出电压却取决于多个直流电源串联的电压之和, 因此可以提高逆变器的输出电压和输出功率。由于是通过增加电平数来减小输出电压谐波的, 故可以使开关管工作在低频或工频, 开关损耗小, 逆变效率高, 适合于高电压大功率场合应用, 这是多电平逆变器与两电平逆变器最主要的区别。

此外, 多电平逆变器的另一个优点是输出电压的跳变小, 即 du/dt 小, 瞬间过大的电压跳变会带来很大的冲击电流, 对负载和逆变器本身都有非常大的危害, 还会产生很大的 EMI。在相同的输出电压等级下, 采用多电平逆变器不仅仅可以降低对开关管的耐压要求, 而且还可以减小对电动机绝缘的损害, 降低了电磁干扰 (EMI)。

在高压大功率场合应用, 例如对于高压大功率交流电动机的变频调速系统中, 传统的 PWM 两电平逆变器有一个最严重的缺点是不易实现直接高压大功率输出。在需要高压大功率输出时, 除了少数低速场合采用 AC-AC 变频调速方式外, 通常多采用 AC-DC-AC 变频方式。在这种方式中, 有的将多个低压小功率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。显然, 上述这两种方法都需要采用笨重、昂贵和耗电的变压器。对于第二种方法还会出现中间环节电流过大、系统效率下降、可靠性降低、低频时电能传输困难等诸多缺点。为了克服这些缺点有人也采用了直接高压输出的变换方式, 这对开关管提出了很高的技术要求, 要求开关管能承受很高的电压应力, 一般的做法是用多个低压开关器件的串联来提高承受高电压应力, 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。因此两电平逆变器不如多电平逆变器更适宜应用于高压大功率场合。这也是多电平逆变器最大的优点之一。也正是由于这个原因, 才促使很多学者对多电平逆变器进行研究。

除上述特点外, 多电平逆变器的优点还体现在三相系统中输出的共模电压较小。在驱动电动机的情况下, 共模电压过大会对电动机的轴和轴承造成损害。在高压大功率应用场合这

个问题更加明显。采用多电平逆变器,输入电流的畸变也会得到一定程度的改善。

此外,人们对高压大功率电压型多电平逆变器进行的广泛深入研究表明:各种不同电路结构的多电平逆变器,具有各自不同的特点,适用于不同的场合,读者在应用时应注意这一点。例如二极管钳位半桥式结构的三相多电平逆变器,其特点是采用多个二极管对相应的开关管进行钳位,以保证每次一个桥臂只有一个开关管动作,以实现多电平输出,而每一个开关管只承受直流电源电压的 $1/2$ 。这种三相多电平逆变器的缺点是:当电平数较多时,钳位二极管承受的反压就不同,开关管所需的额定电流也不相同,同时还存在电容电压的平衡问题;再如飞跨电容钳位半桥式结构的三相多电平逆变器,其工作原理与二极管钳位多电平逆变器相似。但由于电容的引入使电压合成的选择增多,开关状态的选择具有更大的灵活性。这种三相多电平逆变器的缺点是大量的电容使体积增大、成本高及封装困难。然而通过同一电平上不同开关状态的组合,可以使电容电压保持均衡,可以较好地应用于有功调节和变频调速系统,但控制较复杂,对于具有独立电源的级联式三相多电平逆变器其特点是要想获得更多的电平只要增多 H 桥的串联个数即可,与钳位式多电平逆变器相比,级联式多电平逆变器不存在电容电压均衡问题,不需要钳位二极管或电容,适合于调速控制、容易实现模块化,维修方便,在电平数相同时所需元器件数目最少,不受钳位二极管或电容的限制,可以得到更多的电平输出,可以更方便地提高输出电压与更多地减少谐波含量,控制方法也相对简单,可以对每一个 H 桥进行 PWM 控制,然后进行波形重组。但这种多电平逆变器也有缺点,那就是所需的独立直流电源个数较多,使直流供电电源电路复杂化。

综上所述,一般来说钳位式多电平逆变器由于存在电容均压问题,比较适合应用于无功调节,而在有功传递如电动机调速方面应用时控制比较困难,需要实施额外的算法。虽然如此,但钳位式三电平逆变器却在交流电动机调速领域应用较多。这主要是因为现有的高耐压器件很适合三电平逆变器应用,电容的均压问题也可以通过控制来解决。对于级联式多电平逆变器,虽然它具有应用独立直流电源多的缺点,但在电力有源滤波器中应用时,独立直流电源被储能电容所取代,独立直流电源多的缺点也就不存在了,所以比较适合应用于电力有源滤波器。但在输入变压器成本允许的情况下,或需要减小输入电流的谐波含量时,也可以应用于交流电动机变频调速系统,因为它可以实现模块化、使用的元器件少、控制简单,如美国罗宾康公司完美无谐波高压变频器就是采用了这种方案。

1.4 多电平逆变器的基本单元分析法

20 世纪 80 年代以来,人们发展了新型的多电平逆变器,各种电压型多电平逆变器相继被提出,其控制性能也得到了很大的提高,因此成为高压大功率逆变器的发展方向,并在大功率逆变领域得到了广泛的应用。

在多电平逆变器的发展过程中,围绕输出多电平电压波形的生成,研究出多种主电路结构,并且随着研究的深入,新的多电平逆变电路还在不断地出现。而且人们从研究中还发现,各种不同的多电平逆变器电路结构,具有各自不同的特点,可以应用于不同的场合。然而这些不同结构的多电平逆变器,都是由多个半桥式单相两电平逆变器组成的,或者是经过一定的简化以后组成的。按照这个设想,还可以研究派生出更多的新型电路结构。为了便于叙述,我们将组成多电平逆变器的单相半桥式两电平逆变器称作为“基本单元”。下面用基