

江苏省高校自然科学基金项目 (15KJD470003)
淮海工院校青年基金项目 (Z2014003)
连云港市“521”人才工程项目

开绕组电机双逆变器调制技术

吴迪◆著

江苏省高校自然科学基金项目(15F

淮海工学院青年基金项目(Z2014

连云港市“521”人才工程项目

开绕组电机双逆变器调制技术

吴 迪 著

西安电子科技大学出版社

内容简介

开绕组电机双逆变器调速系统是近年来研究的热点。本书基于作者的研究工作体会,以双三电平逆变器为主要研究对象,全面介绍了双逆变器调制技术的结构特点、工作原理以及控制方法。书中首先介绍系统的拓扑结构,推导了不同结构下的数学模型;然后重点介绍了双逆变器调制策略中存在的零序电压抑制、中点电位平衡、死区补偿、窄脉冲消除等共性问题的控制方法;最后进一步介绍了双三电平逆变器在不同母线结构下的多种 SVPWM 调制策略。

本书适合于电气工程及其自动化、电机与控制、电力电子专业领域的科研工作者阅读,也可以作为高校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

开绕组电机双逆变器调制技术/吴迪著. —西安:

西安电子科技大学出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5606-4181-2

I. ① 开… II. ① 吴… III. ① 逆变器—调制技术

IV. ① TM464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 210166 号

策划编辑 秦志峰

责任编辑 秦志峰 杨 璠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年10月第1版 2016年10月第1次印刷

开 本 710毫米×1000毫米 1/16 印张 11.5

字 数 206千字

印 数 1~1000册

定 价 40.00元

ISBN 978-7-5606-4181-2/TM

XDUP 4473001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

电能作为清洁、高效的能源，其消耗量是衡量一个国家电气化程度的重要标准。在全球推进低碳环保发展的趋势下，提高电能能源消耗中所占的比重已成为世界各国的发展趋势。虽然在2010年，我国的电能消耗所占比重就已经超过22%，但由于工业设备和工艺技术相对落后，我国的电能利用率与国际先进国家相比仍有相当大的差距。目前，变频技术作为节能降耗、环保减排的重要手段，在中、低压领域中已经得到广泛的应用，但在10 kV以上的高压等级上，存在一定的应用瓶颈。据统计，我国高压大功率电动机总容量超过1.5亿千瓦，耗电量约占全国总耗电量的25%，其中大部分电机应用于风机、水泵类负载场合，长期工作在低效率状态。因此，发展可靠性高、体积小、成本低的中高压电力电子变换装置对实现社会的经济节约型发展具有重要意义。另外，作为解决环境污染的重要途径之一，高速公共交通工具(如电力汽车、全电船舶、地铁、轻轨)的发展，其核心也是大容量电力电子变换技术。

在提高输出容量的同时避免器件串联，就需要采用更高电平数的逆变器。五电平二极管钳位型拓扑和飞跨电容型拓扑由于自身结构的原因很难实现工业应用，H桥级联式多电平拓扑需结构复杂的曲折变压器，而开绕组电机双逆变器系统(Open-Winding Power Conversion Systems Fed by Dual Inverter)的提出为多电平变换提供了新的思路。开绕组电机双逆变器拓扑是一种特殊的级联供电方式，它可以看成一个五电平电力变换器，输出电压波形更趋近于正弦，谐波含量更少，电磁兼容性能更好，在大功率应用领域具有很高的经济实用价值。

经过多年的发展，虽然关于开绕组电机双逆变器系统的研究很多，并且在基础理论和实际应用方面已取得了相当的进展，但在调制策略方面多集中于双电平逆变器，而对双三电平逆变器结构进行研究的文献较少。目前，尚没有全面系统地介绍双三电平逆变器工作原理及调制策略的书籍。因此作者希望在本书中，一方面较为详细地介绍双三电平逆变器协同控制的工作原理，为读者进一步深入研究该技术打下基础；另一方面介绍该系统对于多种调制目标的不同调制策略，帮助读者解决在实际应用中遇到的问题。此外，对于双逆变器的死区补偿、窄脉冲消除等问题，本书也予以充分的重视。希望读者能够通过本书对双逆变器系统更加了解，从而关注该技术，推动该技术的进一步发展。

本书共分为六章。第1章简述开绕组电机双逆变器的发展背景、分类和结构特点。第2章重点介绍了双三电平逆变器系统的拓扑结构,以及在不同母线结构下的工作原理,推导开绕组异步电机双三电平逆变器系统的数学模型。第3章介绍了独立母线结构下的双三电平逆变器容错控制系统结构,及相应的容错调制策略。第4章介绍了共母线结构下存在的零序环流问题,给出一种零共模电压矢量调制策略。第5章介绍了另外一种零序电压消除方法,并以此为基础,介绍了两种不同的SVPWM调制策略以实现不同的调制目标。第6章介绍了死区和窄脉冲问题在双三电平逆变器调制中的影响,并给出相应的补偿和消除方法。

本书的选题和撰稿过程中,得到了西安电子科技大学出版社秦志峰编辑的大力支持,在这里深表感谢。同时还要感谢中国矿业大学信电学院伍小杰教授及其研究团队,在研究过程中给予的毫无保留的指导和帮助。我的师弟苏良成在本书的公式推导和仿真实验部分给予了极大的帮助,在此表示深深的感谢。此外,在本书写作期间,也得到了王经卓教授、龚成龙教授、周渊深教授的热情鼓励和大力支持,在此表示衷心的感谢。

本书得到了江苏省高校自然科学基金项目(15KJD470003)、淮海工学院青年基金项目(Z2014003)、连云港市“521”人才工程项目的资助,在此表示衷心感谢!

由于学识有限,在双三电平逆变器的研究中本书还有很多内容没有提及,恳请读者谅解。书中如有疏漏和不当之处,敬请专家和各位读者给予批评和指正。

吴迪
2016年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 双逆变器技术发展背景	1
1.2 多电平变换器的发展历程	3
1.3 开绕组电机双逆变器技术现状.....	12
第 2 章 开绕组电机双三电平逆变器数学模型及分析	22
2.1 双三电平逆变器拓扑分析.....	22
2.2 双三电平逆变器换流分析.....	25
2.3 开绕组异步电机数学模型.....	28
2.4 开绕组异步电机的仿真建模.....	35
2.5 开绕组电机双三电平逆变器调速系统的数学模型.....	42
2.6 双三电平逆变器系统零序电压与共模电压.....	53
2.7 中点电位平衡控制.....	55
2.8 双三电平逆变器空间电压矢量原理.....	56
第 3 章 独立母线结构的双三电平逆变器容错调制策略	65
3.1 双三电平逆变器容错控制系统主回路.....	67
3.2 空间电压矢量解耦方法.....	68
3.3 三电平 SVPWM 简化算法	70
3.4 中点电位控制方法.....	76
3.5 实验分析.....	77
第 4 章 零共模电压矢量调制策略	84
4.1 零序电压消除策略.....	84
4.2 中点平衡控制策略.....	92
4.3 最优空间矢量位置优化控制.....	95
4.4 实验分析.....	98

第 5 章 基于统一快速算法的平均共模电压消除调制策略	104
5.1 统一快速算法	104
5.2 参考电压矢量解耦调制策略	108
5.3 平均零序电压消除方法	112
5.4 中点电位平衡	114
5.5 零共模电压矢量钳位调制策略	116
5.6 矢量钳位调制策略下的中点电位控制	118
5.7 电压越级跳变现象	120
5.8 调制范围分析	122
5.9 实验分析	124
5.10 参考矢量解耦策略与零共模电压矢量钳位控制策略分析对比	131
 第 6 章 双三电平逆变器系统的死区补偿及窄脉冲消除	144
6.1 双三电平逆变器系统的死区效应分析	144
6.2 零电流钳位效应及补偿	149
6.3 死区补偿方法	153
6.4 窄脉冲产生原理及消除对策	158
6.5 实验分析	162
 参考文献	166

第1章 绪论

1.1 双逆变器技术发展背景

近年来,虽然以 IGBT(Insulated Grid Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管)、IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor, 集成门极换流晶闸管)为代表的高性能复合电力电子器件有了长足的发展,但是仍然无法满足大功率应用场合对电力电子变换器高耐压、大容量、低损耗的要求。现阶段我国大功率电力电子器件生产水平相对落后,新型高压大容量电力电子器件价格昂贵^[1],极大地增加了变换器的成本。因此如何使用较低功率等级的开关器件实现高压大功率变换成为电力电子研究领域的热点问题。

电力电子变换器的研发与电力电子技术的革新、功率器件的开发以及半导体材料的制造工艺息息相关。到目前为止,基于硅材料的半导体功率器件已经经历了半个世纪的发展,在性能上已逼近所用材料的极限。在发达国家,采用碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)等宽能带间隙材料的新一代功率器件已经开始投入实际应用^[2],而我国在功率器件的生产研发上仍然相对落后。目前,大功率开关器件市场由国外公司占主导地位,造成其价格相对昂贵,直接影响国内变频器产业的发展。同时,随着国内大功率电力电子变换装置的兴起,在节能环保、提高产品质量等方面取得了明显的经济效益,这也促使了工业生产、矿井开采、交通运输乃至军事应用等领域对大功率电力电子变换器在运行效率、故障保护、外形尺寸、成本控制等方面提出更高的要求。

多电平变换技术具有输出电能质量高、功率器件电压应力低、开关损耗小等特点,在一定程度上克服了大功率开关器件耐压不足的问题。经过多年的发展,多电平逆变技术形成了几种成熟的拓扑结构:钳位式多电平逆变器^[3],级联式多电平逆变器^[4]以及层叠式多电平逆变器^[5]和多重叠加式逆变器^[6]等,其中,以二极管钳位三电平变换器(Three-level Neutral Point Clamped, 3L-NPC)应用最为广泛。NPC 三电平逆变器结构简单,开关器件相对较少,易于实现能量回馈,已经应用于高压大功率传动系统。但是受限于当前功率器件的技术参数,通常采用多个功率器件串联的方式来提高变换器输出电压等级^[7]。该方式需要保证串联的各开关器件所承受电压相等,这就必须加入特殊的门极驱动电

路,但这样不仅造成功率器件控制电路复杂化,也增加了变换器的故障率^[8,9]。

为了进一步提高输出电压等级,同时避免多功率器件串联,增加变换器的输出电平数是一种很好的选择。在多电平变换器拓扑结构中,当二极管钳位型拓扑扩展到五电平以上时,在高调制度下很难保持电容电压平衡^[10],飞跨电容型拓扑也存在相似的问题;H桥级联式多电平拓扑以多单元叠加的方式较好地解决了均压问题,已经成功应用于工业领域,但是由于其特殊的结构,需要配置曲折变压器,大大增加了设备体积和成本,而且较难实现四象限运行。

开绕组电机双三电平逆变器系统(Dual Three-level Inverter for Open-end Winding Induction Motor, DTI)的提出为多电平拓扑提供了新的思路。开绕组电机双逆变器系统是指将电机(绕线式异步电机、永磁同步电机等)的定子绕组中性点拆开,所得三个端子引出后连接到另一台逆变装置供电,是一种特殊的级联供电方式,其结构组合如图 1-1 所示。由图可以看出,在双逆变器拓扑中电机每相绕组的相电压由两台逆变器输出电压叠加得到,因此输出相电压电平数多,输出谐波低,电能质量更高。如果电机两端的两台逆变器采用独立的直流母线供电,则作用于电机绕组的电压为单一逆变器的两倍;而当两台逆变器并联使用同一条直流母线时,能够减少一个整流单元,大大减少变频驱动系统的设备体积和资金投入,并且此时整个系统只存在一个整流单元,与普通的背靠背系统相似,降低了四象限运行的难度。与常规单逆变器系统相比,公共母线结构下的双逆变器级联系统的功率器件利用效率略低,但在功率器件额定电压、电流一定的情况下,双逆变器级联系统则拥有更高的性价比^[11],且在矿井生产、航空航天和船舶驱动等应用领域具有很高的经济实用价值。

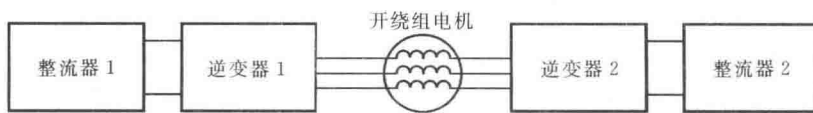


图 1-1 双端级联式逆变器拓扑

Figure 1-1 Open-winding configurations

总的来说,双逆变器技术具有如下优势:

(1) 开绕组电机绕组电压为两个逆变器输出电压之和。同一个传动系统中,采用双端级联式多电平逆变器的直流母线电压只有采用普通五电平逆变器时的一半。以 6 kV 为例,DTI 系统直流母线电压仅为 ± 2.5 kV,电压跳变幅值与 3.3 kV 电压等级的 3L-NPC 变频器相同,因此可以采用普通 6 kV 电机和电缆,不必加强绝缘。

(2) 接于电机绕组两端的两个 3L-NPC 支路构成一个三电平 H 桥,因此

输出相电压电平数更多。如果两台逆变器共用一个直流母线,可产生5种电平;而采用独立母线结构时,当母线电压相等时相电压最多可产生17个电平,当母线电压成不同的比例时则获得的相电压电平数更多。更多的电平数使逆变器输出电压波形更趋近于正弦,谐波含量更少,同时减小 dv/dt ,其电磁兼容性能更好。

(3) 双逆变器与开关器件串联的三电平逆变器相比,开关器件数量相同,在增加逆变器输出电压电平数的同时避免了器件串联时产生的均压问题。另外DTI拓扑也不需要H桥级联型变频器所必需的曲折变压器。

(4) 当其中一台逆变器发生故障时,可将故障部分断开,切换为单边供电结构继续运行;此时电机电流不变,电压下降为正常情况下的一半。这种结构特别适用于煤矿提升机等安全性要求高的应用场合,当出现故障时,系统能够实现全载半速运行,保证安全生产。

双逆变器级联式拓扑作为多电平变换器拓扑发展的新思路,可广泛应用于矿井提升、轨道交通等高电压大功率调速领域,提高变频设备的调速性能和功率密度,对我国高压大功率变频器产业的发展起到积极促进作用,有效减少能源消耗和因此带来的环境污染问题。同时,该技术涉及电子、控制、电控装备技术等多个领域,其推广必将直接带动相关电子与电控装备产业的发展。

1.2 多电平变换器的发展历程

多电平变换器自从被提出以来,经过了半个多世纪的发展,已经广泛应用于现代社会的方方面面,取得了不菲的经济与社会效益。但是随着技术的不断更新,各行各业对多电平变换器小型化、高效率、高可靠性的要求日益提高。世界各国投入大量的人力物力对电力电子变换领域进行研究,以期实现技术革新。在世界范围内,研究人员围绕着提高能源利用效率、可靠性、功率密度,简化控制和降低拓扑成本等方面进行深入研究,进一步拓宽多电平变换器的应用领域,使其更有吸引力和竞争力^[12-14]。

拓扑结构是多电平变换器实现的基础。不同的硬件结构决定了变换器的优势与不足,并且直接关系到多电平系统的调制策略。在20世纪60年代,有学者提出H桥串联(Series-connected H-bridge)结构,并首次提出了多电平的概念^[15];同年出现了用于低功率等级的飞跨电容型(Flying Capacitor, FC)拓扑^[16];在20世纪70年代末,二极管钳位型变换器(Diode-Clamped Converter, DCC)被首次提出^[17],该变换器逐渐发展为3L-NPC变换器,成为第一款真正被成功应用于中压领域的多电平变换器^[18]。20世纪80年代末,H桥级联型

(Cascaded H-Bridge, CHB)变换器被提出^[19]，并在 90 年代被成功应用于工业场合^[20]。FC 变换器也在 20 世纪 90 年代初被成功应用于中压调速领域^[21]，并推广到多单元变换器中。

多电平变换器的分类如图 1-2 所示。

NPC、FC 和 CHB 三种多电平变换器拓扑在过去的三十年中被成功应用于工业领域，被称为典型多电平变换器拓扑。由于 FC 拓扑在运行时需要较高的开关频率来实现电容电压平衡，同时电容体积大，寿命较低，所以相对来说 NPC 和 CHB 拓扑更适用于工业应用^[22]。自从多电平拓扑出现以来，研究人员提出了大量的多电平拓扑结构形式，这些结构大部分都是由三种典型拓扑扩展或混合而来的。

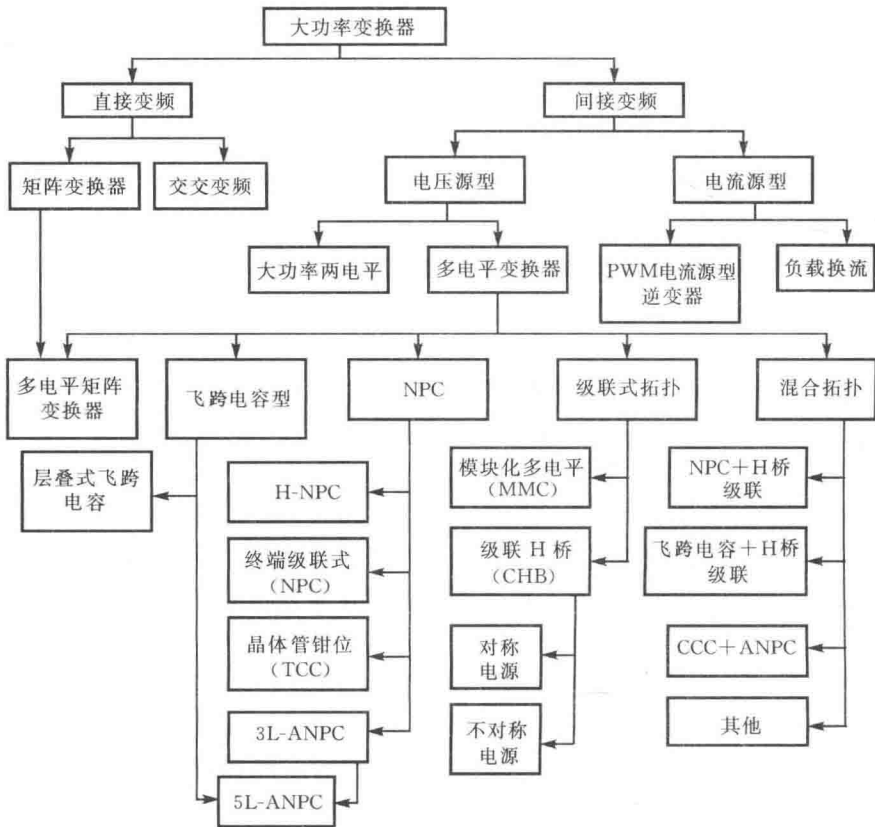


图 1-2 多电平变换器的分类

Figure 1-2 The classifications of multilevel converters

以下所列拓扑已经被成功应用于工业场合^[23-27]：① NPC/H 桥级联式五电

平逆变器(Five-level H-bridge NPC, 5L-HNPC); ② 有源钳位三电平逆变器(Three-level Active NPC, 3L-ANPC); ③ 有源钳位五电平逆变器(Five-level Active NPC, 5L-ANPC); ④ 模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converter, MMC); ⑤ 矩阵变换器(Cascaded Matrix Converter, CMC)。另外一些拓扑正处于研究阶段,如晶体管钳位型变换器^[28](Transistor-Clamped Converter, TCC)、不对称电源的 CHB 变换器^[29]、开绕组电机双三电平变换器(DTI)^[30]、NPC-CHB 混合式变换器^[31]、层叠式多单元变换器^[32](Stacked Multicell Converter, SMC)等。

1.2.1 几种典型的五电平逆变器拓扑

拓扑结构直接决定了多电平逆变器的特性。从最早提出的二极管钳位型拓扑、飞跨电容型拓扑、多单元串联结构到目前被广泛应用的三电平二极管钳位型变换器^[18]、FC 变换器、H 桥级联型变换器等,科技工作者提出了大量的拓扑结构,部分拓扑已经被证明其可行性,并投入工业应用^[23-27]。

多电平变换器拓扑结构可以分为二极管钳位型、飞跨电容型和 H 桥级联型三种典型结构,其他拓扑均可以认为是以这三种结构为基础衍生出来的。基于开绕组电机的双 NPC 三电平逆变器属于二极管钳位型拓扑,需要将电机定子绕组中性点打开,两端由两台 NPC 三电平逆变器同时供电。下面对目前应用较多的几种典型多电平拓扑结构进行简单的分析和比较。

1. 二极管钳位型五电平逆变器

二极管钳位型三电平逆变器由日本学者 A. Nabae 提出,因其自身特点以及成熟的三电平 PWM 调制技术,得到了广泛的应用。但是这种拓扑结构也有缺点:开关损耗分布不均衡,且存在直流侧电容均压问题。对于 NPC 三电平逆变器来说,上述不足已经有了成熟的解决方案,但是随着拓扑的电平数增多,固有的缺点会变得更为复杂难解。

图 1-3 为二极管钳位型五电平逆变器拓扑。拓扑直流侧 4 个电容均匀分压,每相桥臂包含 8 个开关器件、12 个钳位二极管,钳位二极管保证每个开关器件所承受的电压为一个直流电容电压,即 $\frac{1}{4}U_{dc}$ (U_{dc} 为直流侧电压)。二极管钳位型五电平逆变器的特点可以归纳如下:

(1) 虽然每个开关器件的阻断电压只需要 $\frac{1}{4}U_{dc}$,但是不同位置的钳位二极管所承受的反向电压不同。以 A 相桥臂为例,当 $S_{a5} \sim S_{a8}$ 开通时, VD_{a3} 和 VD_{a4}

需要承受 $\frac{3}{4}U_{dc}$ 的反向电压， VD_{a2} 和 VD_{a5} 需要承受 $\frac{2}{4}U_{dc}$ 的反向电压，而 VD_{a1} 和 VD_{a6} 只需要承受 $\frac{1}{4}U_{dc}$ 的反向电压。因此如果选用与开关器件耐压相同的二极管，就需要在反向电压高的位置串联多个二极管。这也在增加设备成本的同时降低了系统的可靠性。

(2) 与三电平类似，五电平的各个开关器件的导通时间不同。因此越靠近中点的器件需要的电流容量越大，这样也会加剧器件损耗不均衡的现象。

(3) 直流侧的四个电容使电容电压平衡控制更为艰难。对二极管钳位型五电平逆变器来说，当只输出无功功率的时候，各级电容在一个开关周期内能够实现电容电压自平衡，但是对电容电压的控制能力随着负载功率因数的增加而减弱。当功率因数接近 1 时，逆变器电容电压能够平衡的最大调制比在 0.5 附近，极大地限制了二极管钳位型五电平逆变器的应用场合^[10]。

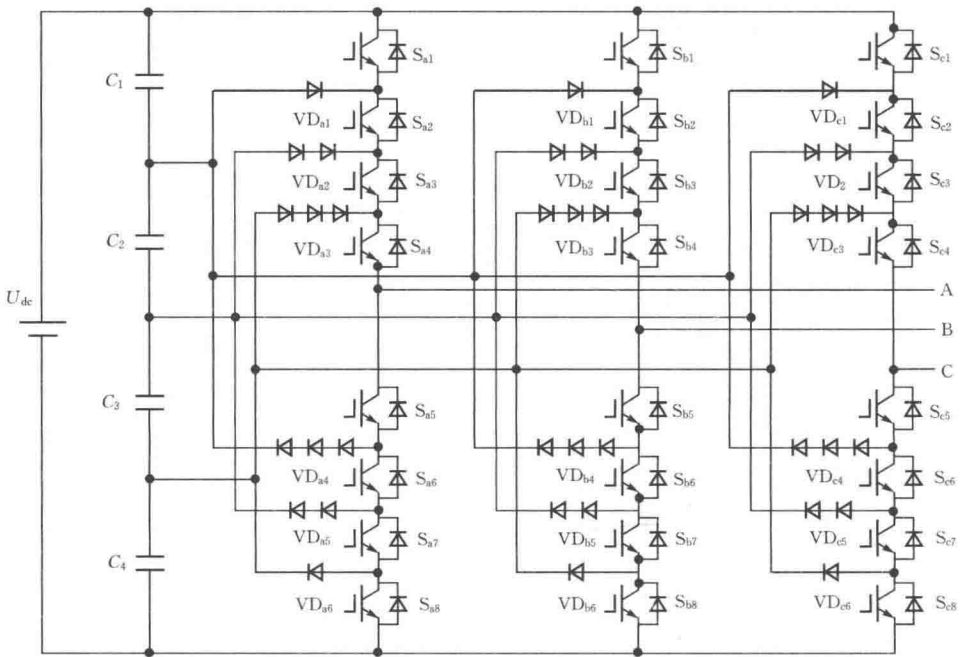


图 1-3 二极管钳位型五电平逆变器拓扑

Figure 1-3 Schematic of neutral-point clamped five-level inverter

2. 飞跨电容型五电平逆变器

为解决二极管钳位型变换器中钳位二极管耐压不均衡及反向电压难以快速恢复的问题,法国人 T. A. Meynard 采用电容对开关器件进行钳位,提出了飞跨电容型多电平变换器的拓扑结构。这种结构同样可以使各开关器件承受相同的电压,提高变换器输出电压和输出功率。飞跨电容型五电平逆变器拓扑如图 1-4 所示。该拓扑具有以下特点:

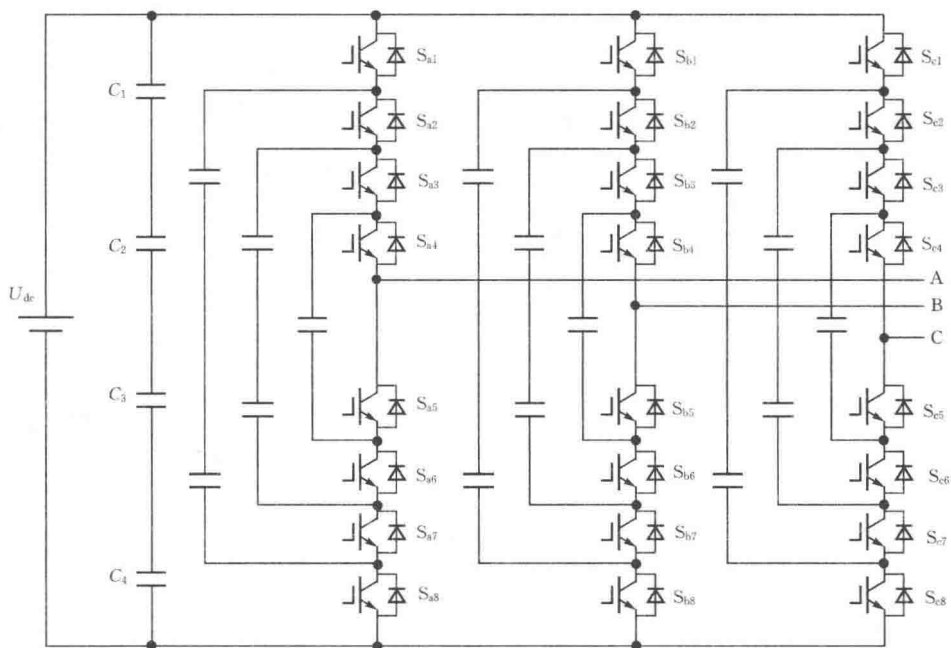


图 1-4 飞跨电容型五电平逆变器拓扑

Figure 1-4 Schematic of flying capacitor five-level inverter

(1) 使用电容代替二极管可以避免二极管耐压不均衡的问题,但是电容本身体积大、寿命短,可靠性较差。在高压大功率场合,这些问题尤为突出,因此实际应用中较为困难。

(2) 电容钳位使拓扑具有大量的冗余开关状态,在不同的输出电压下可以很容易地找到合适的开关状态组合来平衡电容电压。但是这也带来了复杂的开关状态选择和较高的开关频率要求。

(3) 为保证开关器件电压均衡分配,需要选择合适的电容参数。目前多采用电压波动值相等原则来选取,同时需要考虑电平数、开关频率以及负载电流

的基波幅值^[33]。

(4) 可控制有功功率和无功功率,适用于变频调速和高压直流输电。但是负载为纯无功负载时,电容电压平衡控制较为困难。

3. 有源钳位型五电平逆变器

德国学者 T. Bruckner 提出的有源钳位型变换器拓扑实际上是对二极管钳位型变换器的一种改进。它采用开关器件与反并联二极管的组合替换二极管钳位型拓扑中的钳位二极管,避免了损耗分布不均匀造成的某些开关器件发热大、温度高的问题,其拓扑结构如图 1-5 所示。

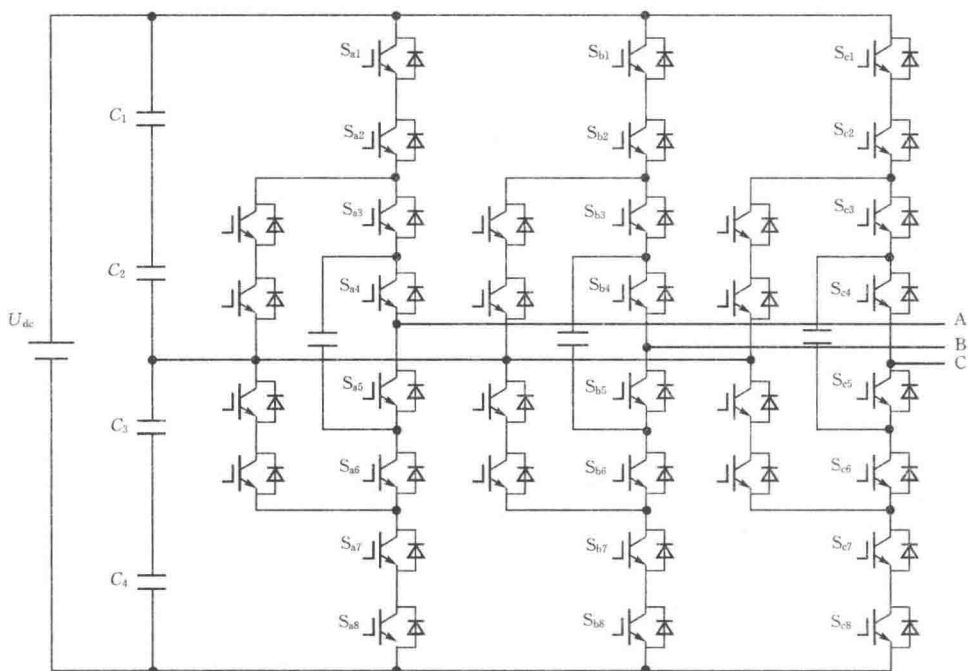


图 1-5 有源钳位型五电平逆变器拓扑

Figure 1-5 Schematic of active neutral-point-clamped five-level inverter

有源钳位型五电平逆变器相较于二极管钳位型五电平逆变器有如下特点:

(1) 有源钳位型五电平逆变器可以依靠增加的 18 个开关管灵活选择电流路径,以此均衡各开关器件的功率损耗,避免出现二极管钳位拓扑中功率不均衡的问题。但由于增加了大量的开关器件,造成系统成本的大幅度提高。

(2) 由于增加了大量的开关状态, 在控制上更为灵活, 电容电压平衡控制更易于实现, 在理想条件下能够实现电容电压的自平衡^[34]。但是同样由于增加了大量的开关器件, 需要更多的触发脉冲, 控制更为复杂。

4. H 桥级联型多电平逆变器

典型的 H 桥级联型多电平逆变器拓扑是由多个直流电源和 H 桥组成的模块串联而成的, 每个模块可以输出 $U_{dc}/2$ 、0、 $-U_{dc}/2$ 三种电平, 叠加后可以输出多电平的电压波形。如图 1-6 所示为 H 桥级联型五电平逆变器拓扑。

与上述几种多电平拓扑相比, H 桥级联型多电平逆变器具有如下特点:

(1) 与二极管钳位和电容钳位相比, 无需钳位器件, 因此输出电平数相同时所需元件最少, 易于实现模块化。

(2) 其模块化的结构容易实现高电平输出, 并且很容易实现冗余控制, 因此可以用在高压大功率领域; 当其中一个模块出现故障时, 可以使该模块处于旁路状态, 而其他模块仍可以正常工作。

(3) 模块化结构不需要考虑电容电压平衡的问题, 但是需要大量的独立电源, 会增加成本和设备体积。

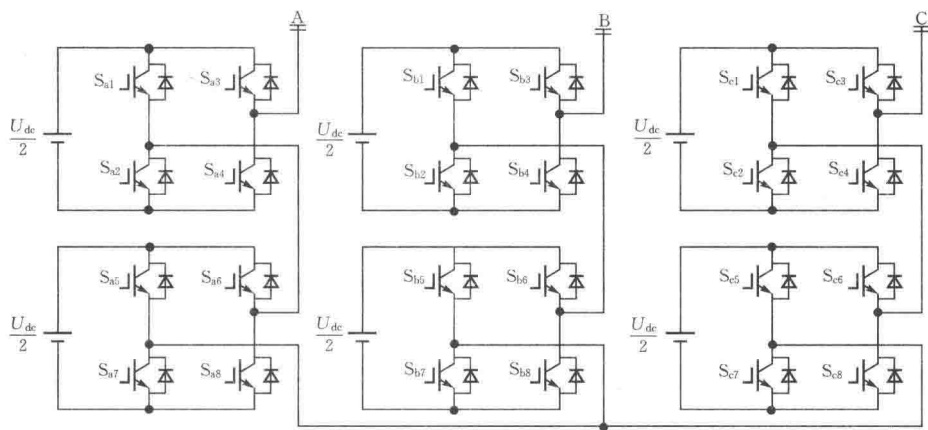


图 1-6 H 桥级联型五电平逆变器拓扑结构

Figure 1-6 Topology of H-Bridge cascaded five-level inverter

1.2.2 多电平变换器 PWM 调制策略

多电平 PWM 调制方法主要分为三角载波调制 (SPWM) 和空间电压矢量调制 (SVPWM) 两种类型, 同时, 根据不同的控制目标和拓扑结构特点, 又衍生

出很多不同的实现方式。针对特定的拓扑结构选择合适的调制策略，不但能够发挥拓扑的优势，还能弥补拓扑固有的缺陷。因此，根据不同的拓扑结构研究特定的调制策略是多电平变换器控制研究中的重点。

在李永东教授编著的《大容量多电平变换器——原理·控制·应用》一书中，将多电平 PWM 调制技术的控制目标归纳为两大类：第一类是对输出电压的控制，即多电平变换器的输出波形要与期望的参考波形相一致；第二类是对变换器自身状态的协调控制，如电容电压平衡控制、功率元件输出功率平衡控制、损耗控制等。

1. 输出波形控制

多电平变换器的输出电压与参考电压的偏差主要体现在谐波含量上，在控制上要尽可能地对谐波进行抑制。逆变器输出电压的基波分量与参考电压相对应，基波分量的最大值直接关系到逆变器的最大输出功率。因此，多电平变换器调制方法需要在保证谐波特性的基础上获得尽可能大的基波电压。PWM 方法主要可以分为三角载波调制 (SPWM) 和空间电压矢量调制 (SVPWM) 两种方法。

两电平的载波层叠法 (Level-Shifted PWM, LS-PWM) 和载波移相法 (Phase-Shifted PWM, PS-PWM) 可以直接推广到 NPC 多电平变换器和 FC/CHB 级联式多电平变换器。其中，载波层叠法根据各三角波相位的不同，可分为同相层叠 (Phase Disposition, PD)、正负反相层叠 (Phase Opposition Disposition, POD) 和交替反相层叠 (Alternative Phase Opposition Disposition, APOD)。载波移相法是将调制波与多个幅值相同、相位不同的三角波进行比较，得到各个功率单元的驱动信号。假设变换器电平数为 n ，则共有 $n-1$ 个三角波，相位依次相差 $2\pi/(n-1)$ 。几种控制方式中，PD-PWM 具有最高的谐波性能^[35]。PS-PWM 的谐波性能与 APOD-PWM 相似，但是其对于功率单元的控制方式趋于与主回路相似的模块化结构，使每个功率单元的输出 PWM 波形基本一致。在这种控制方式下，首先避免了各功率单元之间的功率不平衡问题；其次 PS-PWM 的输出电压频率是载波频率的 n 倍 (n 为每相功率单元数)，并且在任意调制度下，输出电压频率保持不变，不会出现部分功率单元没有输出造成的输出谐波含量增加。鉴于这些特点，PS-PWM 已经被作为 CHB 多电平变换器的一种标准调制策略，LS-PWM 相对更适合 NPC、FC 和层叠式多单元结构。在实际应用中，LS-PWM 可以通过调制波零序分量注入的方式控制电容电压平衡，也可以对电压利用率和开关损耗等性能进行算法优化^[36, 37]。