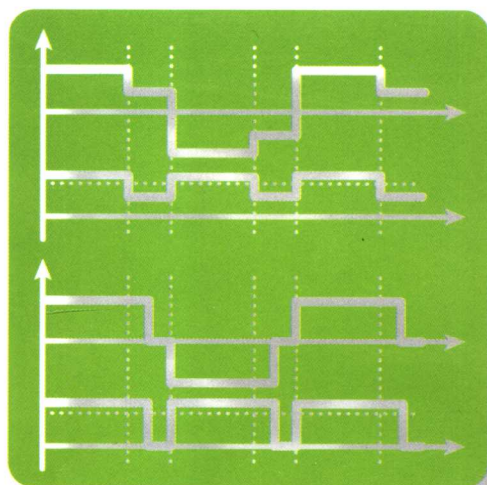
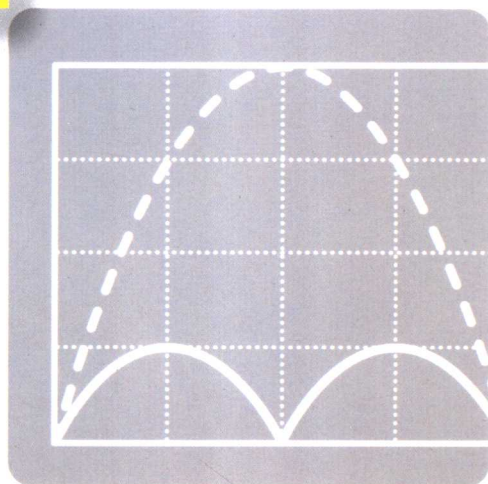
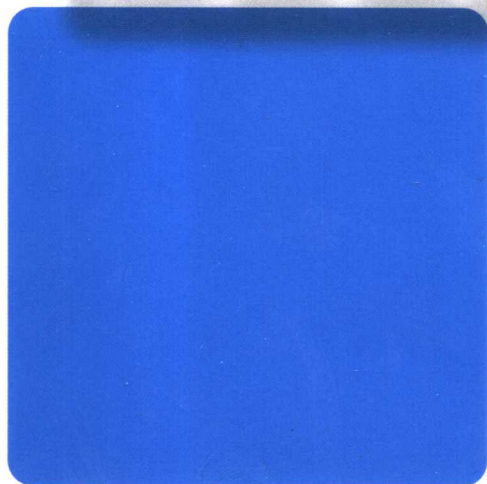


# 三电平直流变换器 及其软开关技术



阮新波 著



# 三电平直流变换器 及其软开关技术

阮新波 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

三电平直流变换器具有开关管电压应力低、滤波器小等特点,适用于输入和/或输出电压较高的中大功率变换场合,对该变换器及其软开关技术的研究具有重要意义。

本书共十九章,第1章系统阐述三电平变换器的发展、分类和应用,第2章至第5章详细论述三电平直流变换器的推导过程、非隔离的三电平直流变换器的工作原理及其分压电容和飞跨电容电压的控制策略,第6章分析多谐振三电平直流变换器的推导及其工作原理,第7章至第12章系统阐述半桥三电平直流变换器的软开关技术,第13章至第17章系统介绍复合全桥三电平直流变换器的软开关技术,第18章介绍全桥三电平直流变换器的软开关技术,第19章阐述组合三电平直流变换器的软开关技术。最后是结束语,对本书的内容进行总结。

本书是一本关于三电平变换器及其软开关技术的专著,具有理论知识与工程设计相结合的特点,可作为高校电力电子专业及相关专业的硕士生、博士生及教师的参考书,也可作为从事开关电源研究开发的工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

三电平直流变换器及其软开关技术/阮新波著. —北京:科学出版社,2006  
ISBN 7-03-018049-6

I. 三… II. 阮… III. ①直流变换器 ②直流变换器-开关电源  
IV. TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第109210号

责任编辑:刘红梅 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 祥

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年12月第一次印刷 印张:20 1/4

印数:1—4 000 字数:463 000

定 价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

# 前 言

三电平逆变器具有开关管电压应力低、输出电压谐波小等优点,自 1980 年由 A. Nabae 等人提出后,吸引了众多学者的研究兴趣,先后提出了二极管箝位型、飞跨电容型和级联型三电平逆变器和多电平逆变器,并广泛应用于交-直流能量转换、高压大容量交流电机变频调速、电能质量控制等领域。将三电平和多电平逆变器的概念应用于直流变换器,可以得到三电平和多电平直流变换器,同样具有降低开关管电压应力、减小输入输出滤波器等优点,适用于高输入/输出电压的功率变换场合。因此研究三电平变换器及其软开关技术具有十分重要的意义。

1999 年,我在刚成立的台达电力电子研发中心短期工作,开始研究三电平(Three-Level, TL)直流变换器,回到南京航空航天大学后,继续开展 TL 变换器的研究,并很幸运地得到了台达电力电子科教发展基金的资助。经过一年多的研究,我发现前面研究的 TL 变换器本质上是一个半桥变换器,并分析了该变换器的推导思路,然后将该推导思路推广到所有直流变换器中,系统地提出了一族 TL 变换器。同样幸运的是,我们研究小组又先后得到了国家自然科学基金、台达电力电子科教发展基金、江苏省自然科学基金和雅达电子有限公司的资助。我们的研究受到了很多同行的关注,他们鼓励我将研究成果整理成书。在去年国家自然科学基金项目结题后,我开始本书的整理工作,直到今年五月才完成。可以说,本书是我们研究小组近七年研究成果的总结,今天奉献给大家,我们的心情是忐忑不安的,希望没有让大家失望。恳请电力电子与电源界的各位前辈和同行批评指正,提出宝贵意见和建议。

本书共十九章。第 1 章系统阐述 TL 变换器的发展、分类和应用;第 2 章在分析半桥 TL 变换器推导思路的基础上提出一族 TL 变换器,并对 6 种非隔离的 TL 变换器进行改进,对正激 TL 变换器进行简化;第 3 章详细分析 6 种非隔离 TL 变换器的工作原理,推导其输入-输出关系,并与其原型电路进行比较;第 4 章引入隔直电容的概念,对 6 种非隔离的 TL 变换器进行改进,使其输入与输出共地,并以 Buck TL 变换器为例分析它们的工作原理及特点;第 5 章针对非隔离的 TL 变换器提出其分压电容的均压控制方法和飞跨电容电压的控制方法;第 6 章将多谐振变换器的概念引入到非隔离 TL 变换器、正激 TL 变换器和反激 TL 变换器中,提出一族零电压开关(Zero-Voltage-Switching, ZVS)多谐振 TL 变换器,以 Buck ZVS 多谐振 TL 变换器为例分析它的工作原理和特性,并与两电平 Buck 多谐振变换器进行比较,以说明 ZVS 多谐振 TL 变换器的优点;第 7 章至第 12 章系统地阐述半桥 TL 变换器的 PWM(Pulse Width Modulation, 脉宽调制)软开关技术,将该变换器分为零电压开关和零电压/零电流开关(Zero-Voltage and Zero-Current-Switching, ZVZCS)两类,

详细分析 ZVS PWM 半桥 TL 变换器、ZVZCS PWM 半桥 TL 变换器、加箝位二极管的 ZVS PWM 半桥 TL 变换器和倍流整流方式 ZVS PWM 半桥 TL 变换器的工作原理、特点和参数设计;第 13 章至第 17 章系统地阐述复合式全桥(Hybrid Full-Bridge, H-FB)TL 变换器的软开关技术,详细分析 ZVS PWM H-FB TL 变换器、ZVZCS PWM H-FB TL 变换器、加箝位二极管的 ZVS PWM H-FB TL 变换器、倍流整流方式 ZVS PWM H-FB TL 变换器及 ZVS H-FB TL LLC 变换器的工作原理、特点和参数设计;第 18 章提出全桥 TL 变换器的最佳控制方式,分析续流二极管和飞跨电容的作用,并提出其软开关技术;第 19 章提出组合式 TL 变换器,详细分析其工作原理、特点和参数设计。最后的结束语对本书进行小结,并按照 TL 变换器的分类介绍它们的适用场合。

在 TL 变换器的研究过程中,我的很多学生先后参与了研究工作,他们是李斌、许大宇、梁小国、薛雅丽、金科、危建、陈志英、刘福鑫、张之梁、陈武、马运东、张元媛、冯颖盈、陈乾宏、王建冈、周林泉、李金钟、李冬、曲小慧。他们努力、勤奋,付出了大量劳动和心血,为该课题的研究作出了重要贡献。我们一起承受研究中的艰难、分享成功的快乐,可以说,这本书是我们的心血之作。在本书的写作过程中,金科、刘福鑫、曲小慧、李冬等同学校阅了全部书稿。在此对他们表示衷心感谢。

在研究前期,严仰光教授提出了很多建设性的指导意见,并给予了极大的支持和鼓励,在此向严仰光教授表示诚挚的谢意。

本项研究工作得到国家自然科学基金、台达电力电子科教发展基金、江苏省自然科学基金和雅达电子有限公司的资助,在此也表示衷心的感谢。

南京航空航天大学的严仰光教授和丁道宏教授认真细致地审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见和建议。两位老前辈严谨求实的作风令我肃然起敬,这种学者风范也是我所终生追求的。在此,向两位老前辈表示崇高的敬意和衷心的感谢。

本书的出版得到了科学出版社的大力支持,崔炳哲编辑为本书的出版做了大量工作,特此致谢!

阮新波

2006 年 5 月于南京航空航天大学

# 目 录

<b>第 1 章 概 述</b> .....	1
1.1 三电平逆变器的发展概况 .....	1
1.1.1 二极管箝位型三电平逆变器 .....	1
1.1.2 飞跨电容箝位型三电平逆变器 .....	2
1.1.3 级联型多电平逆变器 .....	4
1.1.4 混合箝位型三电平逆变器 .....	4
1.2 三电平直流变换器的发展概况 .....	5
1.2.1 非隔离型 TL 变换器 .....	5
1.2.2 隔离型 TL 变换器 .....	6
1.2.3 半桥 TL 变换器 .....	8
1.3 三电平直流变换器的应用 .....	19
1.3.1 通信电源 .....	19
1.3.2 功率因数校正变换器 .....	20
1.3.3 高电压应用场合 .....	21
1.3.4 低压大电流应用场合 .....	21
本章小结 .....	21
<b>第 2 章 三电平直流变换器的推导和简化</b> .....	23
2.1 半桥 TL 变换器的推导 .....	23
2.2 三电平开关单元 .....	23
2.3 TL 变换器的推导 .....	25
2.3.1 TL 变换器的推导过程 .....	25
2.3.2 一族 TL 变换器 .....	26
2.4 TL 变换器的改进和简化 .....	27
2.4.1 非隔离 TL 变换器的改进 .....	27
2.4.2 正激 TL 变换器的简化 .....	31
2.5 复合式全桥 TL 变换器 .....	32
2.6 三电平波形存在的可能性 .....	33
本章小结 .....	33
<b>第 3 章 非隔离三电平直流变换器</b> .....	35
3.1 Buck 三电平变换器 .....	35

3.1.1 电路拓扑和控制方法 .....	35
3.1.2 电感电流连续时 Buck TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	35
3.1.3 电感电流断续时 Buck TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	38
3.1.4 Buck TL 变换器的外特性 .....	39
3.1.5 Buck TL 变换器的优点 .....	41
3.2 Boost 三电平变换器 .....	42
3.2.1 电路拓扑和控制方法 .....	42
3.2.2 电感电流连续时 Boost TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	43
3.2.3 电感电流断续时 Boost TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	44
3.2.4 Boost TL 变换器的控制特性 .....	46
3.2.5 Boost TL 变换器的优点 .....	47
3.3 Buck-Boost 三电平变换器 .....	49
3.3.1 电路拓扑和控制方法 .....	49
3.3.2 电感电流连续时 Buck-Boost TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	49
3.3.3 电感电流断续时 Buck-Boost TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	51
3.3.4 Buck-Boost TL 变换器的控制特性 .....	52
3.3.5 Buck-Boost TL 变换器的优点 .....	54
3.4 Cuk 三电平变换器 .....	55
3.4.1 电路拓扑和控制方法 .....	55
3.4.2 电流连续时 Cuk TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	56
3.4.3 电流断续时 Cuk TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	59
3.4.4 Cuk TL 变换器的外特性 .....	61
3.4.5 Cuk TL 变换器的优点 .....	62
3.5 Sepic 三电平变换器 .....	63
3.5.1 电路拓扑和控制方法 .....	63
3.5.2 电流连续时 Sepic TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	63
3.5.3 Sepic TL 变换器的特点 .....	66
3.6 Zeta 三电平变换器 .....	67
3.6.1 电路拓扑和控制方法 .....	67
3.6.2 电流连续时 Zeta TL 变换器的工作原理和基本关系 .....	67
3.6.3 Zeta TL 变换器的特点 .....	70
本章小结 .....	71
<b>第 4 章 输入输出共地的三电平变换器 .....</b>	<b>73</b>
4.1 引 言 .....	73
4.2 隔直电容的提出 .....	73
4.3 非隔离 TL 变换器的改进 .....	75
4.3.1 Buck TL 变换器的改进 .....	75
4.3.2 Boost TL 变换器的改进 .....	75
4.3.3 Buck-Boost TL 变换器的改进 .....	76

4.3.4 Cuk TL 变换器的改进 .....	77
4.3.5 Sepic TL 变换器的改进 .....	77
4.3.6 Zeta TL 变换器的改进 .....	78
4.4 输入输出共地的 Buck TL 变换器 .....	78
4.4.1 工作原理 .....	78
4.4.2 输入输出关系 .....	79
4.4.3 特 点 .....	80
本章小结 .....	80
<b>第 5 章 非隔离三电平变换器中分压电容的均压策略 .....</b>	<b>81</b>
5.1 引 言 .....	81
5.2 分压电容不均压的原因 .....	81
5.3 分压电容均压的方法 .....	84
5.3.1 Buck TL 变换器 .....	84
5.3.2 其他非隔离 TL 变换器 .....	85
5.4 输入输出共地的非隔离 TL 变换器的飞跨电容电压控制 .....	86
5.5 实验验证 .....	87
本章小结 .....	88
<b>第 6 章 零电压开关多谐振三电平变换器 .....</b>	<b>89</b>
6.1 引 言 .....	89
6.2 一族 ZVS-MR-TLCs 的推导 .....	90
6.3 ZVS-MR-TLCs 的工作原理 .....	91
6.4 Buck ZVS-MR-TLC 的特性 .....	95
6.5 Buck ZVS-MR-TLC 与 Buck ZVS-MRC 的比较 .....	97
6.5.1 电压传输比和开关管电压应力 .....	97
6.5.2 输出滤波器 .....	99
6.6 PFM 交错控制电路的实现 .....	100
6.7 飞跨电容电压控制策略 .....	102
6.8 Buck ZVS-MR-TLC 的设计和实验结果 .....	105
本章小结 .....	107
<b>第 7 章 软开关 PWM 半桥 TL 变换器 .....</b>	<b>109</b>
7.1 引 言 .....	109
7.2 PWM 半桥 TL 变换器的控制策略 .....	110
7.3 PWM 控制方式的分类 .....	113
7.4 超前管和滞后管的软开关实现 .....	115
7.4.1 超前管的软开关实现 .....	115
7.4.2 滞后管的软开关实现 .....	115
7.4.3 软开关 PWM 半桥 TL 变换器的分类 .....	116



7.5 ZVS PWM 半桥 TL 变换器的控制方式 .....	116
7.5.1 滞后管的控制方式 .....	116
7.5.2 超前管的控制方式 .....	118
7.5.3 ZVS PWM 半桥 TL 变换器的控制方式 .....	118
7.6 ZVZCS PWM 半桥 TL 变换器及其控制方式 .....	118
7.6.1 电流复位方式 .....	118
7.6.2 超前管的控制方式 .....	118
7.6.3 滞后管的控制方式 .....	120
7.6.4 ZVZCS PWM 半桥 TL 变换器的控制方式 .....	120
7.6.5 反向通路的阻断 .....	120
本章小结 .....	122
<b>第 8 章 零电压开关 PWM 半桥三电平变换器 .....</b>	<b>123</b>
8.1 引 言 .....	123
8.2 工作原理 .....	123
8.3 ZVS PWM 半桥 TL 变换器的特点 .....	127
8.3.1 实现 ZVS 的条件 .....	127
8.3.2 超前管实现 ZVS .....	127
8.3.3 滞后管实现 ZVS .....	127
8.3.4 占空比丢失 .....	128
8.4 设计实例 .....	128
8.4.1 变压器匝比的选择 .....	128
8.4.2 谐振电感量的选择 .....	129
8.4.3 开关管实现 ZVS 的负载范围 .....	129
8.5 实验结果与分析 .....	129
本章小结 .....	131
<b>第 9 章 零电压零电流开关 PWM 半桥三电平变换器 .....</b>	<b>133</b>
9.1 引 言 .....	133
9.2 工作原理 .....	133
9.3 参数设计 .....	137
9.3.1 阻断电容的峰值电压 .....	137
9.3.2 实现超前管 ZVS 的条件 .....	138
9.3.3 最大有效占空比 $D_{\text{eff-max}}$ .....	138
9.3.4 实现滞后管 ZCS 的条件 .....	138
9.3.5 滞后管的电压应力 .....	138
9.3.6 阻断电容的选择 .....	138
9.4 设计实例 .....	139
9.4.1 变压器匝比的选择 .....	139
9.4.2 阻断电容的计算 .....	139

9.4.3 核算变压器匝比和阻断电容选择是否合理 .....	139
9.4.4 滞后管实现 ZCS 的负载范围 .....	141
9.4.5 超前管实现 ZVS 的负载范围 .....	141
9.5 实验结果与分析 .....	141
本章小结 .....	143
<b>第 10 章 加箝位二极管的 ZVS PWM 半桥三电平变换器</b> .....	145
10.1 引 言 .....	145
10.2 工作原理 .....	145
10.3 实现 ZVS 和副边占空比丢失 .....	151
10.3.1 超前管 ZVS 的实现 .....	151
10.3.2 滞后管 ZVS 的实现 .....	151
10.3.3 副边占空比的丢失 .....	151
10.4 简化型加箝位二极管 ZVS PWM 半桥 TL 变换器 .....	152
10.5 设计实例 .....	152
10.6 实验结果与讨论 .....	155
本章小结 .....	157
<b>第 11 章 改进型加箝位二极管的 ZVS PWM 半桥三电平变换器</b> .....	159
11.1 引 言 .....	159
11.2 工作原理 .....	159
11.3 Tr lead 型和 Tr lag 型变换器的比较 .....	165
11.3.1 ZVS 的实现 .....	165
11.3.2 箝位二极管的电流应力 .....	166
11.3.3 零状态时的导通损耗 .....	166
11.3.4 占空比丢失 .....	166
11.4 简化的改进型 ZVS PWM 半桥 TL 变换器 .....	166
11.5 隔直电容的影响 .....	168
11.6 实验结果和分析 .....	169
本章小结 .....	172
<b>第 12 章 倍流整流方式 ZVS PWM 半桥三电平变换器</b> .....	173
12.1 引 言 .....	173
12.2 工作原理 .....	173
12.3 超前管和滞后管实现 ZVS .....	178
12.4 参数设计 .....	179
12.4.1 变压器变比 $K$ 的确定 .....	179
12.4.2 滤波电感量 .....	179
12.4.3 阻断电容的选择 .....	181
12.5 实验结果 .....	182

本章小结 .....	185
<b>第 13 章 零电压开关 PWM 复合式全桥三电平变换器 .....</b>	<b>187</b>
13.1 引 言 .....	187
13.2 控制策略 .....	187
13.3 ZVS H-FB TL 变换器的工作原理 .....	188
13.3.1 3L 模式 .....	189
13.3.2 2L 模式 .....	192
13.4 ZVS H-FB TL 变换器的特点 .....	194
13.4.1 开关管的电压应力 .....	194
13.4.2 开关管实现 ZVS 的条件 .....	194
13.4.3 占空比丢失 .....	195
13.4.4 电压传输比 .....	195
13.4.5 输出滤波电感 .....	196
13.4.6 输出整流管耐压 .....	197
13.4.7 输入滤波器 .....	198
13.5 设计实例 .....	198
13.5.1 变压器匝比的选择 .....	198
13.5.2 谐振电感量的选择 .....	199
13.5.3 开关管实现 ZVS 的负载范围 .....	199
13.6 实验结果 .....	200
本章小结 .....	203
<b>第 14 章 零电压零电流开关 PWM 复合式全桥三电平变换器 .....</b>	<b>205</b>
14.1 引 言 .....	205
14.2 工作原理 .....	205
14.2.1 3L 模式 .....	206
14.2.2 2L 模式 .....	209
14.3 ZVZCS PWM H-FB TL 变换器的特点 .....	210
14.3.1 三电平桥臂的 ZVS .....	210
14.3.2 两电平桥臂的 ZCS .....	211
14.3.3 输出滤波电感 .....	212
14.4 实验结果 .....	213
14.5 其他几种 ZVZCS H-FB TL 变换器 .....	217
本章小结 .....	218
<b>第 15 章 加箝位二极管的零电压开关复合式全桥三电平变换器 .....</b>	<b>219</b>
15.1 引 言 .....	219
15.2 工作原理 .....	219
15.2.1 3L 模式 .....	220

15.2.2	2L 模式	225
15.3	加箝位二极管 ZVS PWM H-FB TL 变换器的特点	227
15.4	谐振电感和变压器是否可以交换位置	227
15.5	实验结果	229
	本章小结	232
<b>第 16 章</b>	<b>倍流整流方式的零电压开关复合式</b>	
	<b>全桥三电平直流变换器</b>	233
16.1	引 言	233
16.2	工作原理	233
16.2.1	3L 模式	234
16.2.2	2L 模式	237
16.3	开关管实现 ZVS 的情况	239
16.3.1	3L 模式	239
16.3.2	2L 模式	240
16.4	参数设计	241
16.4.1	变压器匝比 $K$ 和 $T_{\text{zero}}$ 的选择	241
16.4.2	输出滤波电感的选择	242
16.4.3	阻断电容的选择	243
16.5	纹波电流的比较	245
16.5.1	滤波电感电流纹波比较	245
16.5.2	输出电流纹波比较	245
16.6	实验结果	246
	本章小结	250
<b>第 17 章</b>	<b>复合式全桥三电平 LLC 谐振变换器</b>	251
17.1	引 言	251
17.2	工作原理	252
17.2.1	3L 模式	253
17.2.2	2L 模式	257
17.3	H-FB TL LLC 变换器的特性	260
17.3.1	电压传输比	260
17.3.2	输出滤波器和输入电流纹波的比较	262
17.3.3	开关管实现 ZVS 的条件	263
17.4	参数设计	263
17.4.1	谐振网络特征频率的选取	264
17.4.2	变压器原副边匝比的选取	264
17.4.3	谐振电容 $C_r$ 的计算	264
17.4.4	谐振电感 $L_r$ 的计算	265
17.4.5	励磁电感 $L_m$ 的计算	265

17.5 实验结果 .....	265
本章小结 .....	267
<b>第 18 章 软开关全桥三电平直流变换器 .....</b>	<b>269</b>
18.1 引 言 .....	269
18.2 全桥 TL 变换器的最佳控制方式 .....	269
18.2.1 基于 A、B 两点电压波形相同的控制方式 .....	270
18.2.2 最佳控制方式 .....	273
18.3 右桥臂中续流二极管和飞跨电容的作用 .....	275
18.3.1 关断差异 .....	275
18.3.2 开通差异 .....	278
18.4 软开关全桥三电平变换器 .....	278
本章小结 .....	279
<b>第 19 章 零电压开关组合式三电平直流变换器 .....</b>	<b>281</b>
19.1 引 言 .....	281
19.2 组合式三电平直流变换器的推导 .....	282
19.3 工作原理 .....	285
19.4 变换器的特点 .....	287
19.4.1 开关管的电压应力与电流应力 .....	287
19.4.2 实现 ZVS 的条件 .....	287
19.4.3 占空比丢失 .....	289
19.4.4 输入输出电压关系 .....	290
19.4.5 输出滤波电感和两个变压器的变比 .....	290
19.4.6 输出整流管电压应力 .....	293
19.5 参数设计与实例 .....	294
19.5.1 计算 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $L_f$ 、 $L_{eq}$ 和 $L_r$ .....	294
19.5.2 实现 ZVS 的负载范围 .....	295
19.6 实验结果 .....	296
本章小结 .....	300
<b>结束语 .....</b>	<b>301</b>
<b>附 录 CDR ZVS PWM 半桥 TL 变换器工作在 DCM 时</b>	
$I_{Lf-min-DCM}$ 、 $I_{Lf-max-DCM}$ 和 $I_G$ 的推导 .....	303
<b>参考文献 .....</b>	<b>307</b>

# 第 1 章 概 述

## 1.1 三电平逆变器的发展概况

### 1.1.1 二极管箝位型三电平逆变器

电力电子变换器广泛应用于电能变换、电力拖动等领域。图 1.1 所示为一个常用的三相逆变器,其中 O 点是输入电压的中点。以 O 点为参考点,当某相的上管导通、下管截止时,其输出为  $+V_{in}/2$ , 定义为  $+1/2$  电平;当上管截止、下管导通时,其输出为  $-V_{in}/2$ , 定义为  $-1/2$  电平。也就是说,每相可以得到  $+1/2$  和  $-1/2$  两个电平。该逆变器称为两电平逆变器。

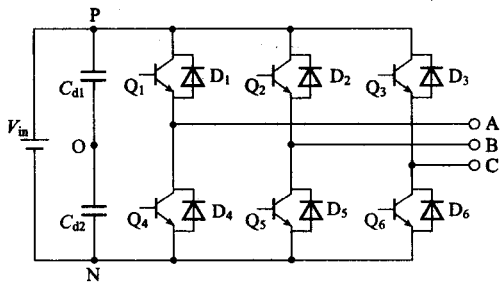


图 1.1 三相逆变器

1980 年,日本的 Akira Nabae 等人在 IEEE 工业应用年会 (IAS) 上提出了中点箝位 (Neutral Point Clamped, NPC) 逆变器的概念,该论文 1981 年发表在 IEEE 工业应用期刊上<sup>[1]</sup>。NPC 逆变器如图 1.2 所示,其中  $C_{d1}$  和  $C_{d2}$  为输入分压电容。对比图 1.1 所示的三相逆变器,它在每相逆变桥中增加了两只功率管和两只二极管。以 A 相为例,  $Q_{11}$  和  $Q_{14}$  是主开关管,  $Q_{12}$  和  $Q_{13}$  是增加的辅助开关管,  $D_{15}$  和  $D_{16}$  是增加的辅助二极管。当  $Q_{11}$  和  $Q_{12}$  导通、 $Q_{13}$  和  $Q_{14}$  截止时, A 相得到  $+1/2$  电平;当  $Q_{11}$  和  $Q_{12}$  截止、 $Q_{13}$

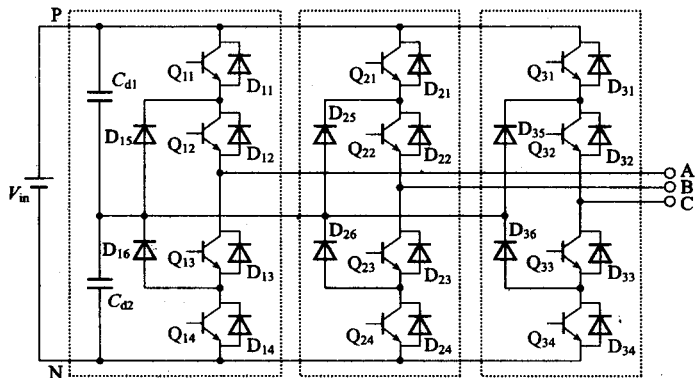


图 1.2 三相中点箝位逆变器

和  $Q_{14}$  导通时, A 相得到  $-1/2$  电平; 当  $Q_{12}$  和  $Q_{13}$  导通、 $Q_{11}$  和  $Q_{14}$  截止时, A 相得到零电压, 定义为零电平。由于该逆变器的每相电压可以被增加的开关管和二极管箝在中点(O 点)电压, 因此称之为中点箝位逆变器。NPC 逆变器的每相可以得到  $+1/2$ 、 $-1/2$  和 0 三个电平, 因此又称它为三电平(Three-Level, TL)逆变器。为了与后来发展出来的其他 TL 逆变器相区别, 该逆变器又称为二极管箝位型 TL 逆变器。

二极管箝位型 TL 逆变器的优点可以概括如下:

(1) 每相输出电压可以得到  $+1/2$ 、 $-1/2$  和 0 三个电平, 与两电平逆变器相比, 其输出电压的谐波含量可以大幅度降低。

(2) 每只开关管的电压应力降低为输入电压的一半。因此该逆变器适用于高输入电压的场合。

### 1.1.2 飞跨电容箝位型三电平逆变器

将图 1.2 中的 A 相单独取出来分析, 如图 1.3 所示。这里假设相电流  $i_a$  流出桥臂中点, 当  $Q_{11}$  和  $Q_{12}$  导通时, A 相输出电压为  $+V_{in}/2$  (图 1.3(a)); 当  $Q_{11}$  关断时, 箝位二极管  $D_{15}$  导通, 将  $Q_{11}$  两端的电压箝在  $V_{in}/2$  (图 1.3(b)); 当  $Q_{12}$  也关断时, 如果回路中存在寄生参数如线路电感, 那么  $Q_{12}$  两端的电压可能会超过  $V_{in}/2$  (图 1.3(c))。对于  $Q_{13}$  和  $Q_{14}$  来说, 其情况类似, 即  $Q_{14}$  两端的电压可以被  $D_{16}$  箝在  $V_{in}/2$ , 而  $Q_{13}$  两端的电压无法被箝在  $V_{in}/2$ 。也就是说, 二极管箝位型三电平逆变器只能保证桥臂外边的两只开关管的电压箝在  $V_{in}/2$ , 而里面的两只开关管的电压无法被箝在  $V_{in}/2$ 。当  $i_a$  流进桥臂中点时, 其工作原理与前面的分析类似, 这里不再赘述。

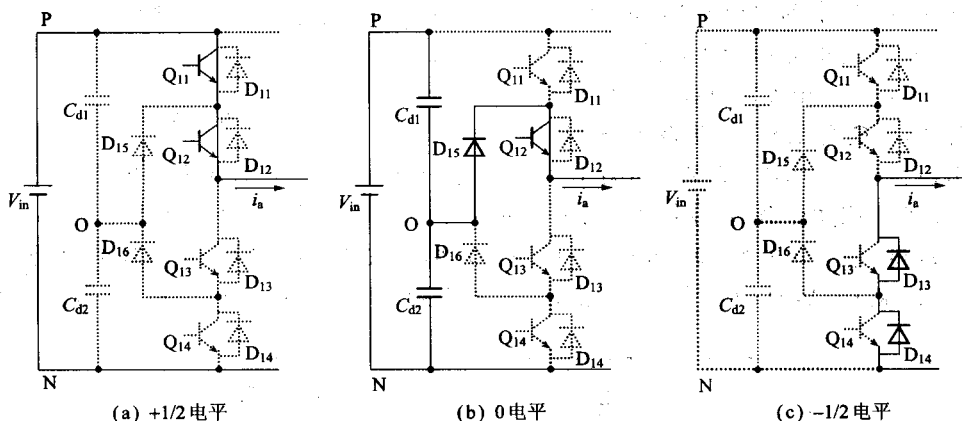


图 1.3 二极管箝位型 TL 逆变器的三个工作模式

为了解决这个问题, 法国的 Meynard T A 和 Foch H 在 1992 年的 IEEE 电力电子专家会议(PESC)上提出了飞跨电容箝位型三电平逆变器<sup>[2]</sup>。图 1.4 给出了三相飞跨电容箝位型 TL 逆变器的电路图, 其中  $C_{fly1}$ 、 $C_{fly2}$  和  $C_{fly3}$  为飞跨电容, 在稳态工作时, 其电压为  $V_{in}/2$ 。与二极管箝位型 TL 逆变器比较, 飞跨电容型 TL 逆变器没有箝位二极管和输入分压电容。

取其中的 A 相来分析(图 1.5), 当上面的两只开关管导通时, A 相电压  $v_{AN} = V_{in}$ ; 当  $Q_{11}$  截止、 $Q_{12}$  导通时, 飞跨电容  $C_{fly1}$  向负载供电,  $v_{AN} = v_{C_{fly1}} = V_{in}/2$ ; 当  $Q_{11}$  导通、 $Q_{12}$  截止时, 输入电源与  $C_{fly1}$  电压之差向负载供电,  $v_{AN} = V_{in} - v_{C_{fly1}} = V_{in}/2$ ; 当下面的两只开关管

导通时,  $v_{AN}=0$ 。也就是说, 每相电压可以得到三个电平:  $1/2$  和  $0$ 。

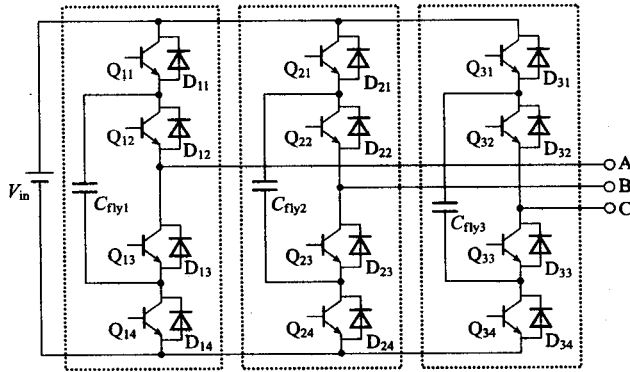


图 1.4 飞跨电容箝位型 TL 逆变器

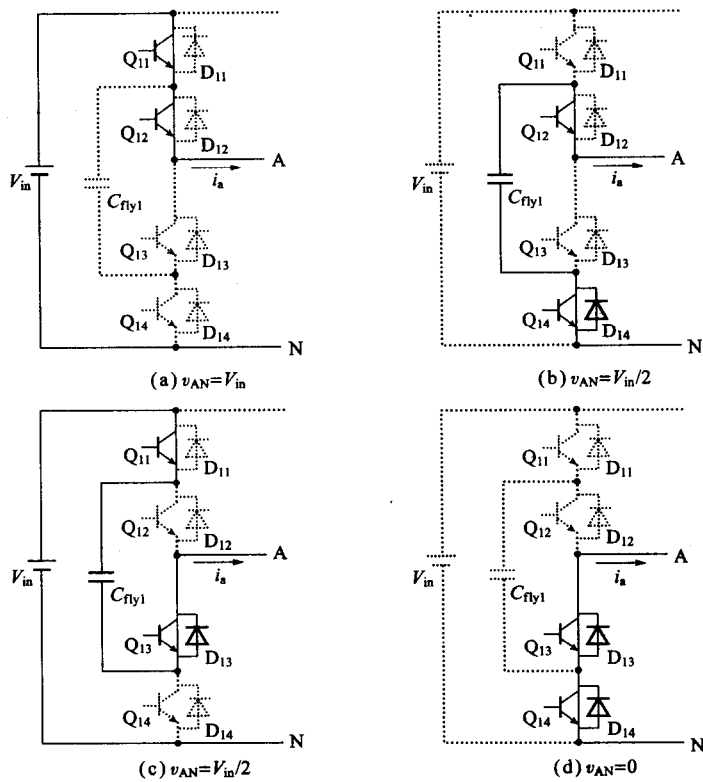


图 1.5 飞跨电容箝位型 TL 逆变器的四个工作模式

飞跨电容箝位型 TL 逆变器具有与二极管箝位型 TL 逆变器同样的优点, 即开关管的电压应力为输入电压的一半, 输出电压的谐波含量可以大幅度降低。

这里要说明的是, 二极管箝位型 TL 逆变器中, 外面的两只开关管必须分别先于对应的里面的两只开关管关断, 否则开关管的电压应力无法箝在  $V_{in}/2$ 。而对于飞跨电容箝位型 TL 逆变器而言, 外面的两只开关管和里面的两只开关管分别为互补导通, 外面的开关管和里面的开关管的开关次序没有限制。



### 1.1.3 级联型多电平逆变器

在三电平逆变器的基础上,可以推广得到多电平逆变器。随着电平数的增加,二极管箱位型多电平逆变器的箱位二极管数量快速增加,而且输入分压电容存在电压均衡的问题。对于飞跨电容箱位型多电平逆变器而言,电平数增加,飞跨电容的数量也快速增加,同时飞跨电容电压也存在均衡的问题。

级联型多电平逆变器<sup>[3]</sup>不存在二极管箱位型多电平逆变器和飞跨电容箱位型多电平逆变器的问题。图 1.6 给出了级联型五电平逆变器的电路图,每相由两个全桥单元级联而成,由于每个全桥单元均有独立的直流电压源,所以各个单元之间不存在均压问题,每只开关管的电压应力均为全桥单元输入电压,同时不需要箱位二极管或飞跨电容。

如果是级联型三电平逆变器,则每相只需要一个全桥单元。

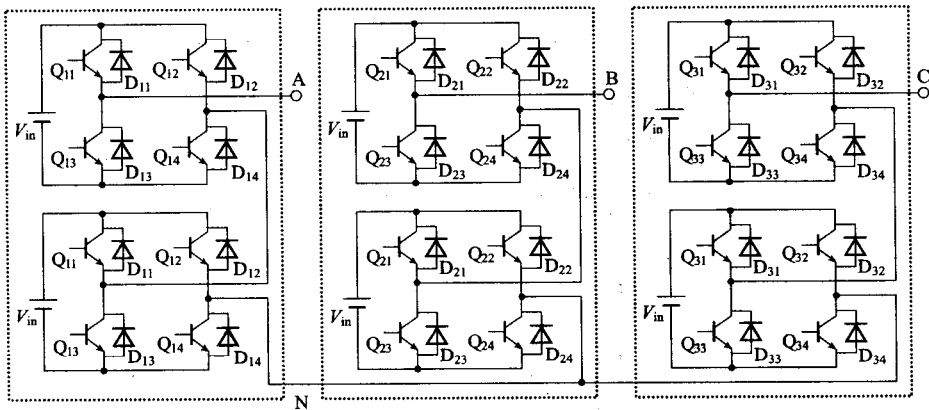


图 1.6 级联型五电平逆变器

### 1.1.4 混合箱位型三电平逆变器

混合箱位型三电平逆变器<sup>[4]</sup>如图 1.7 所示,它采用二极管和飞跨电容同时箱位,解决了里面两只开关管电压应力过高的问题。

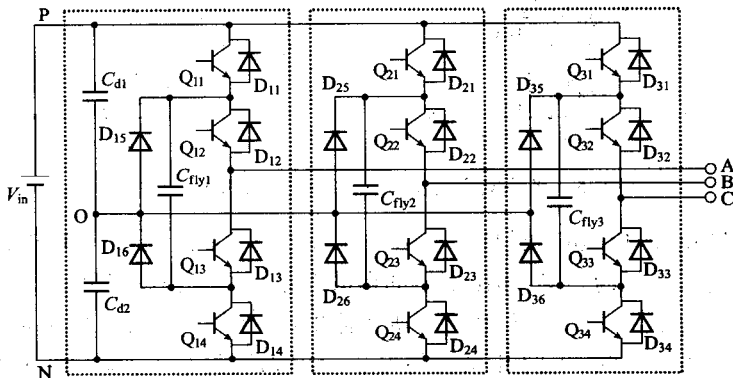


图 1.7 混合箱位型三电平逆变器