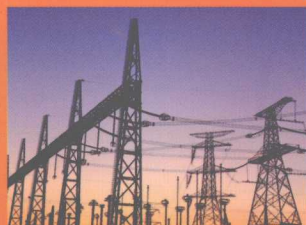
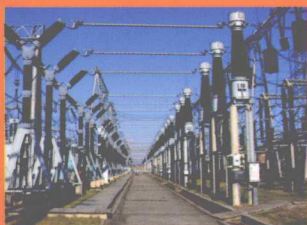


多电平交-交直接变换 技术及其应用

李 磊/著



科学出版社

多电平交-交直接变换 技术及其应用

李 磊 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

多电平交-交直接变换器具有功率变换级数少、无直流环节、双向功率流、开关管电压应力可降低、输出波形质量高等优点,适用于输入和(或)输出电压高的中大功率交流电能变换场合,对这类变换器及其应用技术的研究具有重要意义。

本书共 19 章,第 1 章系统阐述了多电平变换技术的发展和应用;第 2~5 章提出并详细论述了非隔离式三电平交-交直接变换器;第 6~8 章提出并研究了组合式三电平交-交直接变换器;第 9~13 章提出并系统阐述了 Buck 型高频隔离式三电平交-交直接变换技术;第 14~17 章分别提出了 Boost 型、Buck-Boost 型、Cuk 型和 Sepic 型高频隔离式三电平交-交直接变换技术,并进行了详细分析;第 18 章系统介绍了多电平交-交直接变换器的拓扑推导方法;第 19 章对多电平交-交直接变换器的应用进行了分析。

本书是一部关于多电平交-交直接变换及其应用技术的专著,集理论性与应用性于一体,并具有较强的创新性,可作为高等院校电力电子及相关专业硕士生、博士生及教师的参考书,也可供从事电力电子技术研究与开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多电平交-交直接变换技术及其应用/李磊著. —北京:科学出版社,2015
ISBN 978-7-03-046472-9

I. ①多… II. ①李… III. ①交流-变换器-研究 IV. ①TM933.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 282641 号

责任编辑:裴 育/ 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

北京市通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 12 月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:348 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

三电平逆变器具有开关管电压应力可降低、输出电压谐波小等优点,自 1980 年由 A. Nabae 等提出后,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交-交直接变换器,可以得到三电平和多电平交-交直接变换器,同样具有降低开关管电压应力、提高输出波形质量等优点,同时保留了交-交直接变换器的功率变换级数少、双向功率流、无需中间直流环节的电解电容、可靠性高等特点,适用于输入和(或)输出电压高的中大功率交流电能变换场合。因此,研究多电平交-交直接变换及其应用技术具有十分重要的意义。

自 2005 年在南京理工大学工作以来,作者开始研究三电平(three-level, TL)和多电平(multi-level, ML)交-交直接变换技术,并得到了国家自然科学基金的资助。经过不断研究,作者的研究小组提出了 ML 交-交直接变换技术中的一系列新概念,创造性地构造了完整、统一的 ML 交-交直接变换系统,又先后得到了江苏省自然科学基金和国家自然科学基金的资助。ML 交-交直接变换技术的研究受到了很多同行的关注,他们鼓励作者将研究成果整理成书。作者于今年年初开始本书的整理工作,直到八月份才完成。可以说,本书是作者研究小组近八年研究成果的总结,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 19 章,第 1 章系统阐述 ML 变换技术的发展和应用;第 2 章将 TL 和 ML 的概念引入非隔离式交-交直接变换器中,提出一族输入输出非共地的 TL 交-交直接变换器,并对控制原理和工作原理进行分析;第 3 章对输入输出非共地的 TL 交-交直接变换器进行改进,提出一族输入输出共地的 TL 交-交直接变换器,并对其进行原理分析和仿真验证;第 4 和 5 章分别对 Buck-Boost 型和 Zeta 型 TL 交-交直接变换器的控制策略、工作原理、参数设计进行分析,并进行实验验证;第 6 章提出一族输入输出非共地的组合式 TL 交-交直接变换器,并在此基础上提出改进的输入输出共地的拓扑族;第 7 章对输入输出非共地的组合式 TL 交-交直接变换器的控制原理、工作原理进行分析,并进行仿真验证;第 8 章对 Buck TL-Boost 型组合式 TL 交-交直接变换器的控制策略、工作原理、参数设计进行分析,并进行实验验证;第 9 章提出有源箝位单元,并在此基础上提出 Buck 型高频隔离

式 TL 交-交直接变换器的电路结构与拓扑族;第 10~13 章系统分析单端式、推挽式、半桥式和全桥式 Buck 型高频隔离式 TL 交-交直接变换器的控制原理、工作原理、参数设计,并给出仿真和实验验证;第 14~17 章提出 Boost 型、Buck-Boost 型、Cuk 型和 Sepic 型高频隔离式 TL 交-交直接变换器的电路结构与拓扑族,并对控制原理、工作原理和参数设计进行分析,给出仿真和实验验证;第 18 章对 ML 交-交直接变换器的拓扑推衍方法进行研究,系统提出交-交直接变换器的 TL 拓扑和 ML 拓扑,并对其中的 Buck-Boost 型高频隔离式 TL 拓扑进行理论分析和实验验证;第 19 章对 ML 交-交直接变换器的应用进行分析,并给出动态电压调节器和静止同步补偿器两个应用实例的实验结果。

在 ML 交-交直接变换及其应用技术的研究过程中,作者的很多学生先后参与了研究工作,分别是韦徽、杨君东、仲庆龙、唐栋材、杨开明、朱玲、胡伟、赵勤、周振军、许奕伟、付正洲、王涛、朱劲松、刘娇娇、汤迪霏。他们努力、勤奋,勇于创新,付出了大量劳动和心血,为课题的研究作出了重要贡献。我们共同承受研究中的艰难,分享成功的快乐,可以说,本书是我们的呕心沥血之作。在本书的写作过程中,陈博洋、刘志祥、师贺、管月、马爱华同学负责书稿的绘图、排版和校阅等工作,付出了大量的辛勤劳动。在此对他们表示衷心感谢。

在研究期间,作者得到了南京航空航天大学阮新波教授极大的支持和鼓励,在此向阮新波教授表示诚挚的谢意。

本书内容涉及的研究工作得到了国家自然科学基金、江苏省自然科学基金的大力资助,在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了科学出版社的大力支持,特此致谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

李 磊

2015 年 8 月

于南京理工大学

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 ML 逆变技术的发展概况	1
1.2 ML 直-直变换技术的发展概况	4
1.3 ML 交-交变换技术的发展概况	5
1.4 ML 交-交直接变换技术的应用	10
本章小结	11
第 2 章 输入输出非共地的 TL 交-交直接变换器	13
2.1 引言	13
2.2 拓扑族	13
2.3 Buck 型 TL 交-交直接变换器	15
2.3.1 工作原理	16
2.3.2 外特性	22
2.4 Boost 型 TL 交-交直接变换器	23
2.4.1 CCM 时的工作原理	23
2.4.2 DCM 时的工作原理	27
2.4.3 控制特性	29
2.5 Buck-Boost 型 TL 交-交直接变换器	31
2.5.1 CCM 时的工作原理	31
2.5.2 DCM 时的工作原理	36
2.6 Cuk 型 TL 交-交直接变换器	37
2.6.1 CCM、 $D \geq 0.5$ 时的工作原理	37
2.6.2 CCM、 $D < 0.5$ 时的工作原理	40
2.7 Sepic 型 TL 交-交直接变换器	43
2.7.1 CCM、 $D \geq 0.5$ 时的工作原理	44
2.7.2 CCM、 $D < 0.5$ 时的工作原理	46
本章小结	49
第 3 章 输入输出共地的 TL 交-交直接变换器	50
3.1 引言	50
3.2 拓扑改进	50

3.3 输入输出共地的 Buck 型 TL 交-交直接变换器	54
3.3.1 工作原理	54
3.3.2 输入输出关系	56
3.3.3 仿真验证	56
3.4 输入输出共地的 Boost 型 TL 交-交直接变换器	57
3.5 输入输出共地的 Cuk 型 TL 交-交直接变换器	60
3.5.1 工作原理	60
3.5.2 仿真分析	62
3.6 输入输出共地的 Sepic 型 TL 交-交直接变换器	64
3.6.1 工作原理	64
3.6.2 仿真分析	66
本章小结	67
第 4 章 输入输出共地的 Buck-Boost 型 TL 交-交直接变换器	68
4.1 引言	68
4.2 电路拓扑	68
4.3 工作原理和外特性	69
4.3.1 CCM 时的工作原理	69
4.3.2 DCM 时的工作原理	70
4.3.3 外特性	70
4.4 控制策略	71
4.4.1 控制原理	71
4.4.2 箝位电压控制方案	72
4.5 原理实验	74
本章小结	76
第 5 章 输入输出共地的 Zeta 型 TL 交-交直接变换器	77
5.1 引言	77
5.2 拓扑结构	77
5.3 工作原理	78
5.4 非互补控制策略和稳态工作特性	79
5.4.1 非互补控制策略	79
5.4.2 稳态工作特性	81
5.5 输出滤波器前端电压频谱结构	85
5.6 原理样机设计和实验结果	87
5.6.1 指标要求与参数选取	87
5.6.2 感性负载实验结果	87

5.6.3 容性负载实验结果	89
5.6.4 样机的性能指标和测试结果	90
本章小结	94
第 6 章 组合式 TL 交-交直接变换器	95
6.1 引言	95
6.2 交流开关单元及延拓	95
6.3 电路拓扑族	96
6.3.1 基本的 TL 交-交直接变换器拓扑族	96
6.3.2 组合式 TL 交-交直接变换器拓扑族	97
6.4 输入输出共地的拓扑族	99
本章小结	101
第 7 章 输入输出非共地的 Buck TL-Boost 型组合式 TL 交-交直接变换器	102
7.1 引言	102
7.2 工作原理和基本关系	102
7.2.1 工作原理	103
7.2.2 输出和输入电压的基本关系	106
7.3 控制设计	106
7.3.1 分压电容均压策略	106
7.3.2 控制电路原理框图	107
7.4 仿真实验	108
本章小结	110
第 8 章 输入输出共地的 Buck TL-Boost 型组合式 TL 交-交直接变换器	111
8.1 引言	111
8.2 电路拓扑	111
8.3 工作原理	112
8.4 输出和输入电压的基本关系	114
8.5 控制方案	115
8.6 主要参数设计	116
8.6.1 电容参数设计	116
8.6.2 储能电感参数设计	118
8.7 实验验证	118
8.7.1 实验波形	119
8.7.2 输入侧功率因数	122
8.7.3 总谐波失真度	122

8.7.4 变换效率	124
本章小结	125
第9章 Buck型高频隔离式TL交-交直接变换器	126
9.1 引言	126
9.2 电路结构与拓扑族	126
9.2.1 电路结构	126
9.2.2 电路拓扑族	127
本章小结	130
第10章 单端正激型高频隔离式TL交-交直接变换器	131
10.1 引言	131
10.2 电路拓扑	131
10.3 控制原理	132
10.4 稳态分析	133
10.4.1 工作模式	133
10.4.2 稳态原理	134
10.4.3 外特性	136
10.5 磁复位需满足的条件	138
10.6 输出滤波器前端电压谐波分析	140
10.7 原理实验	141
本章小结	145
第11章 推挽全波型高频隔离式TL交-交直接变换器	146
11.1 引言	146
11.2 电路拓扑与控制策略	146
11.3 稳态原理	147
11.4 输出电压与滤波电感电流的定量表达式	150
11.5 外特性	151
11.5.1 理想情形	151
11.5.2 实际情形	153
11.6 实验研究	153
11.6.1 实验波形	153
11.6.2 实验数据	155
本章小结	158
第12章 半桥全波型高频隔离式TL交-交直接变换器	159
12.1 引言	159
12.2 电路拓扑	159

12.3 控制原理与稳态分析	160
12.3.1 控制原理	160
12.3.2 稳态原理	160
12.3.3 外特性	164
12.4 输出滤波器前端电压频谱结构分析	165
12.5 仿真分析	166
本章小结	168
第 13 章 全桥全波型高频隔离式 TL 交-交直接变换器	169
13.1 引言	169
13.2 电路拓扑	169
13.3 控制原理	170
13.4 稳态原理	171
13.5 输出电压与滤波电感电流的定量表达式	176
13.6 外特性	177
13.6.1 理想情形	177
13.6.2 实际情形	179
13.7 仿真实验	179
本章小结	181
第 14 章 Boost 型高频隔离式 TL 交-交直接变换器	182
14.1 引言	182
14.2 电路拓扑族	182
14.3 控制策略	184
14.4 工作原理	186
14.4.1 工作模态分析	186
14.4.2 实际的等效电路建模	188
14.4.3 开关管电压应力分析	189
14.5 原理实验	189
本章小结	192
第 15 章 Buck-Boost 型高频隔离式 TL 交-交直接变换器	193
15.1 引言	193
15.2 电路结构及其拓扑族	193
15.3 控制原理	195
15.4 稳态分析	196
15.4.1 工作模式分析	196
15.4.2 稳态原理	198
15.4.3 外特性	199

15.5 仿真分析	202
本章小结	204
第 16 章 Cuk 型高频隔离式 TL 交-交直接变换器	205
16.1 引言	205
16.2 电路拓扑	205
16.3 工作原理与基本关系	205
16.4 控制设计	209
16.5 实验验证	210
本章小结	214
第 17 章 Sepic 型高频隔离式 TL 交-交直接变换器	215
17.1 引言	215
17.2 电路拓扑和工作原理	215
17.3 稳态工作特性与控制原理	218
17.3.1 稳态工作特性	218
17.3.2 控制原理	220
17.4 实验验证	221
本章小结	224
第 18 章 ML 交-交直接变换器的拓扑推导方法	225
18.1 引言	225
18.2 模块法	225
18.3 级联法	227
18.3.1 基本单元	227
18.3.2 ML 交-交直接变换器拓扑	228
18.4 回路法	231
18.4.1 回路法在 Buck 型变换器中的应用	231
18.4.2 回路法在 Boost 型变换器中的应用	232
18.4.3 回路法在 Buck-Boost 型变换器中的应用	232
18.4.4 回路法在 Buck-Boost 型高频隔离式变换器中的应用	233
18.4.5 回路法在 Cuk 型高频隔离式变换器中的应用	234
18.4.6 回路法在 Sepic 型高频隔离式变换器中的应用	235
18.4.7 回路法在 Zeta 型高频隔离式变换器中的应用	236
18.5 基于回路法的 Buck-Boost 型高频隔离式 TL 交-交直接变换器	237
18.5.1 电路拓扑	237
18.5.2 四种工作模式	238
18.5.3 外特性	239
18.5.4 实验验证	242
本章小结	244

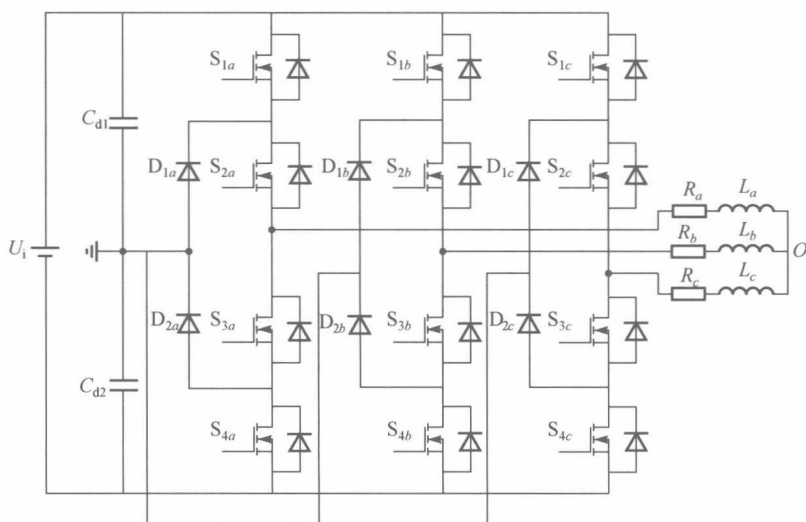
第 19 章 ML 交-交直接变换器的应用	245
19.1 引言	245
19.2 动态电压恢复器	245
19.2.1 工作原理	245
19.2.2 原理实验	248
19.2.3 基于 ML 交-交直接变换技术的动态电压恢复器	249
19.3 静止同步补偿器	252
19.3.1 控制原理	252
19.3.2 系统设计与实验结果	253
本章小结	258
参考文献	259

第 1 章 概 述

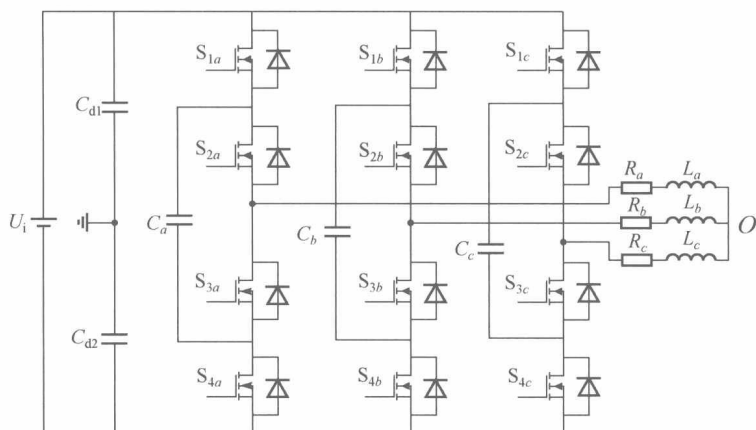
1.1 ML 逆变技术的发展概况

电力电子变换器广泛应用于电能变换、电力拖动等领域,电力电子变换技术也在不断地发展之中。1980 年,日本学者 A. Nabae 等在 IEEE 工业应用年会(IAS)上提出了多电平(ML)逆变器的概念,之后,ML 逆变器就以其独特的优点受到广泛的关注和研究^[1]。ML 逆变器具有诸多优点:对于 n 电平的逆变器,每个功率器件承受的电压仅为母线电压的 $1/(n-1)$,从而使得能够用低压器件来实现高压大功率输出;输出电压波形由于电平数目多,使波形畸变(THD)大大减小,改善了装置的电磁干扰(EMI)特性;使功率管关断时的 du/dt 应力减少,在高压大电机驱动中,可有效防止电机转子绕组绝缘击穿。因此,ML 逆变器在高电压大功率的变频调速、有源电力滤波装置、高压直流(HVDC)输电系统和电力系统无功补偿等方面有着越来越广泛的应用。

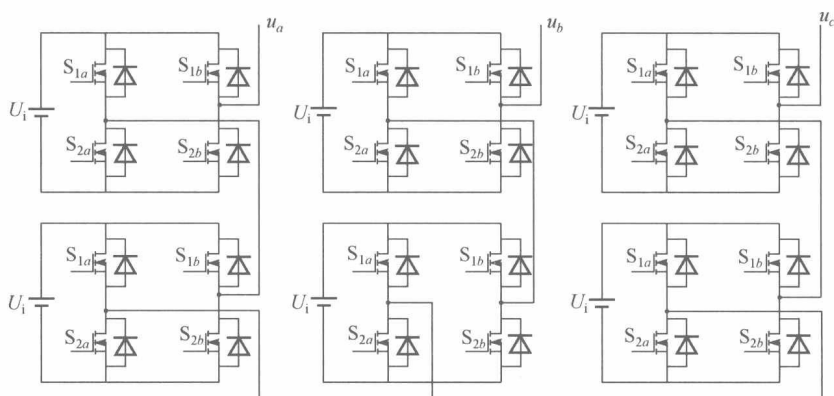
国内外学者对 ML 逆变技术已做了很多的研究,取得了丰硕的研究成果,提出了不少拓扑结构和控制方法。主要的拓扑类型有二极管中点箝位型、飞跨电容型^[2]、独立直流电源级联型和混合级联型^[3]、混合箝位型 ML 逆变器^[4],如图 1.1 所示。



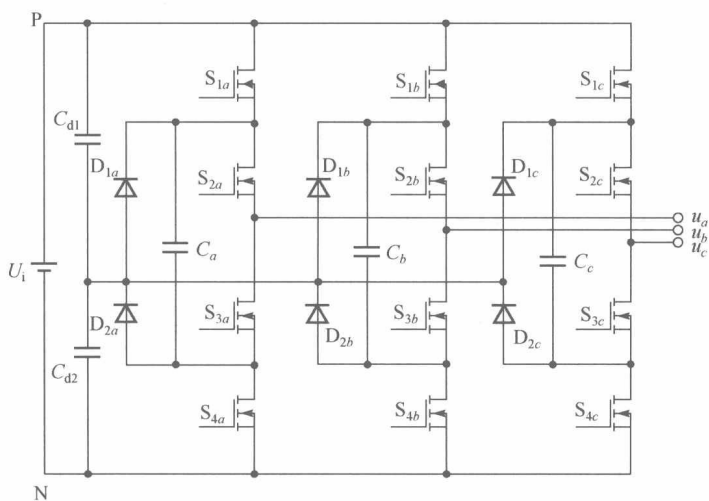
(a) 二极管中点箝位型TL逆变器



(b) 飞跨电容型TL逆变器



(c) 独立直流电源级联型五电平逆变器



(d) 混合箱位型TL逆变器

图 1.1 ML 逆变器的主要拓扑类型

(1) 二极管中点箝位型三电平(TL)逆变器,如图 1.1(a)所示。其优点是便于双向功率流和功率因数控制,缺点是存在输入电容的均压问题。

(2) 飞跨电容型 TL 逆变器,如图 1.1(b)所示。由于采用了箝位电容取代箝位二极管,可以省掉大量的箝位二极管,但是引入了不少飞跨电容,对高压系统而言,电容体积大、成本高、封装难。此外,输出相同质量波形时,随着开关频率的增高,该拓扑的开关损耗增大,效率随之降低。该拓扑也存在电容均压问题。

(3) 独立直流电源级联型五电平逆变器,如图 1.1(c)所示。其优点是相同数量电平输出时,使用二极管数量少于二极管中点箝位型拓扑。由于采用的是独立的直流电源,不存在电压不平衡的问题。其主要缺点是采用多路的独立直流电源,增加了拓扑的复杂性和成本。

(4) 混合级联型 ML 逆变器,是独立直流电源级联型的改进型,两者的结构基本相同,不同之处在于独立直流电源级联型的直流电源电压均相等,而混合级联型的直流电源电压不相等。

(5) 混合箝位型 TL 逆变器,如图 1.1(d)所示。它采用了二极管和飞跨电容同时箝位,解决了功率开关的电压应力过高的问题。

ML 逆变器主要的控制方法有阶梯波脉宽调制法、特定消谐波 PWM 法、ML 载波 PWM 法、ML 空间矢量 PWM 法、Sigma-delta 调制法(SDM 法)等。

(1) 阶梯波脉宽调制法就是用阶梯波来逼近正弦波,是一种比较直观的方法。

(2) 特定消谐波 PWM 法也称作开关点预制的 PWM 方法,这种方法以阶梯波脉宽调制法为基础,其原理是在阶梯波上通过选择适当的“凹槽”,有选择性地消除特定次谐波,从而达到提高输出波形质量的目的。

(3) ML 载波 PWM 法虽然来源于两电平的 SPWM 技术,但是由于 ML 逆变器特殊的结构,其载波技术又不同于两电平的载波技术。ML 逆变器中由于开关管多,所以载波和调制波都不止一个,每一个载波和调制波都有多个控制自由度,这些自由度包括频率、幅值和偏移量等。通过自由度的不同组合,将会产生大量载波 PWM 技术。其中最具有代表性的主要有三种,即分谐波 PWM 法、开关频率优化 PWM 法、三角载波移相 PWM 法。

(4) ML 空间矢量 PWM 法和两电平空间矢量 PWM 法一样,都是建立在空间矢量合成概念上的 PWM 方法。为了减少谐波,一般是用落在特定小三角形内的三个定点的电压矢量来合成空间矢量。

(5) SDM 法是一种在离散脉冲调制系统中合成电压波形的技术。该方法的控制部分主要有三个环节,即误差的积分环节、量化环节、采样环节。

1.2 ML 直-直变换技术的发展概况

ML 直-直变换技术是在 ML 逆变技术的基础上发展起来的^[5~13]。1992 年, Meynard 和 Foch 提出飞跨电容箝位型 ML 逆变器的同时^[2], 也提出了几种非隔离的飞跨电容型 ML 直-直变换器。同年, 巴西的 Pinheiro 和 Barbi 在 IEEE 工业电子、控制、仪器和自动化(IECON)会议上提出了 TL 直-直变换器的概念, 研究成果发表在 IEEE 工业电子等期刊和会议上^[14~17]。南京航空航天大学的阮新波教授对 TL 直-直变换器及其软开关技术进行了系统、深入、全面的研究, 取得了诸多创新性研究成果^[18,19]。

TL 直-直变换器的拓扑结构, 可以根据二极管箝位型 TL 逆变器的工作原理, 从中提取出 TL 开关单元, 并将其应用到直-直变换器拓扑中, 再经过适当的简化等方法, 可构成 TL 直-直变换器拓扑族。TL 开关单元的提取过程, 如图 1.2 所示。为了使两电平逆变器桥臂中的功率开关的电压应力减小为原来的一半, 可用两个串联的功率开关代替原来的单个功率开关。为了解决串联的两个功率开关的均压问题, 引入了箝位二极管, 将每个功率开关两端的电压控制为输入电压的一半, 这样就得到了二极管箝位型 TL 逆变器中的 TL 桥臂, 如图 1.2(a)所示。从 TL 桥臂中, 可以提取出正向连接 TL 开关单元和负向连接 TL 开关单元, 如图 1.2(b)和图 1.2(c)所示。

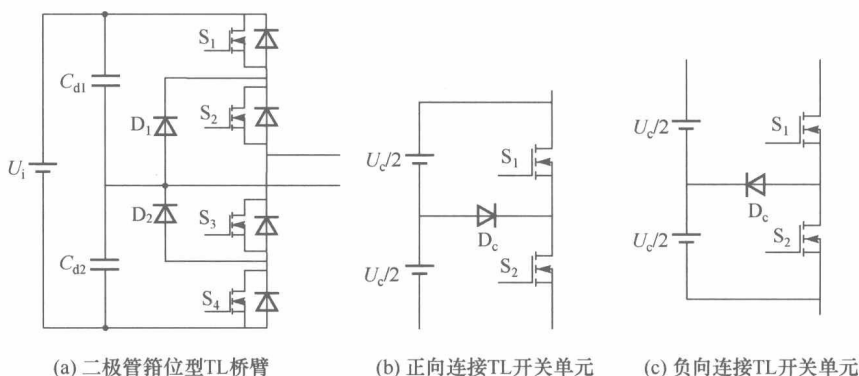


图 1.2 TL 开关单元的提取

基于 TL 开关单元思想, 可对两电平直-直变换器的拓扑结构进行改进, 便可得到一系列的 TL 拓扑。改进过程如下: 首先将两电平直-直变换器拓扑结构中的功率开关用两个串联的功率开关代替, 然后寻找箝位电压源, 方法是将拓扑结构中电势差最大的两点之间加入两个串联的分压电容, 再用箝位二极管连接两个串联电容和串联功率开关的中点, 箝位二极管的方向由变换器工作电流的流向决定, 最

后经过化简即可得到 TL 直-直变换器拓扑族。其中, Buck 型非隔离式和高频隔离式 TL 直-直变换器的电路拓扑如图 1.3 所示。

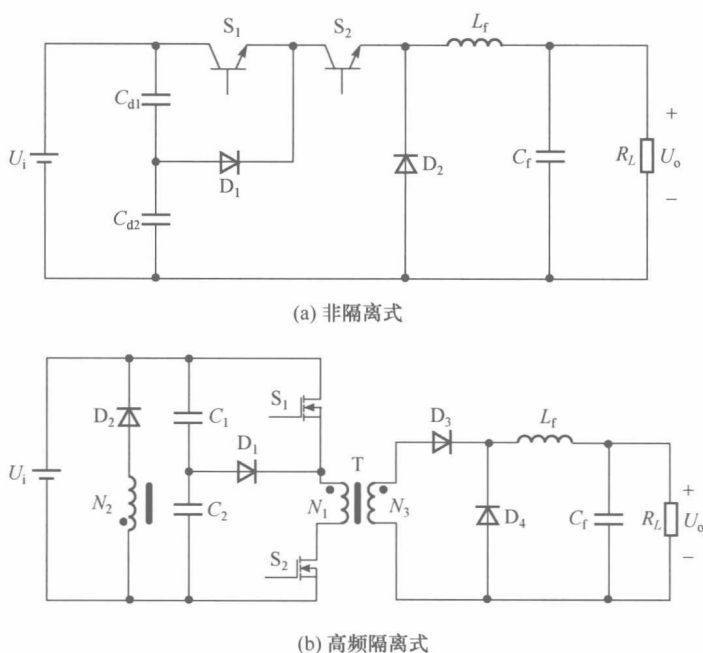


图 1.3 Buck 型 TL 直-直变换器的电路拓扑

TL 直-直变换器最大的优点是可以降低功率开关的电压应力,因此适用于输入和(或)输出电压较高的场合^[20,21]。而有些变换器如 Buck、Boost、Buck-Boost、Cuk、Sepic 和 Zeta 型等 TL 直-直变换器,还可以大大减小储能元件电感、电容等的大小,从而改善变换器的动态性能,减小体积和重量。TL 直-直变换器不仅可以广泛应用于通信电源、功率因数校正等场合,还可以应用于船舶、高速电气铁路、城市轨道交通等高电压场合和低压大电流等场合^[18]。

1.3 ML 交-交变换技术的发展概况

近年来,随着电力电子技术的发展,交-交变换技术的应用领域不断向高电压、大容量电能变换拓展,如电力电子变压器、正弦交流调压器、交流斩波器和柔性交流输电系统(FACTS)控制器等。在高压电能变换领域中,现有器件的电压等级往往不能满足装置的需要,而且高压器件的价格也比较昂贵。ML 技术是解决这一问题的有效方法。同时,ML 变换器采用较多的电平数去逼近所希望的波形,从而可以大大减小滤波器的体积和重量、提高输出波形质量。