

# 无刷直流电机逆变器的 软开关技术

贺虎成 刘卫国 著



 科学出版社

# 无刷直流电机逆变器的软开关技术

贺虎成 刘卫国 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地论述了无刷直流电机逆变器的软开关技术,全书共4章,第1章简要介绍了无刷直流电机研究的热点问题和软开关逆变拓扑的发展;第2章分析了两种谐振直流环节软开关逆变器的推导过程及其工作原理;第3章分析了三种谐振极软开关逆变器的推导过程及其工作原理;第4章分析了无刷直流电机逆变器的能耗问题。

本书可作为电力电子与电力传动、电机与电器和运动控制等相关研究方向的高等院校师生和技术研发人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

无刷直流电机逆变器的软开关技术 / 贺虎成, 刘卫国著. —北京: 科学出版社, 2016.5

ISBN 978-7-03-047673-9

I. ①无… II. ①贺… ②刘… III. ①无刷电机-直流电机-逆变器-开关-研究 IV. ①TM33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 049558 号

责任编辑: 祝 洁 杨 丹 霍明亮 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 红叶图文

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年5月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016年5月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 226 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

大功率无刷直流电机的发展与电力电子器件、专用集成电路、稀土永磁材料、数字处理技术、新型控制技术及电机理论的发展紧密结合，体现着当今应用科学的许多新成果，显示出广泛的应用前景和强大的生命力。然而，无刷直流电机通常采用硬开关逆变器驱动，硬开关逆变器的系统效率较低，散热器的体积和重量较大，而且硬性通断产生的过高电压电流变化造成系统严重的电磁干扰，影响电机的绝缘寿命和系统的可靠性。将高频软开关技术与电机驱动控制相结合，成为解决该问题的重要途径。因此，加强对基于软开关逆变技术的无刷直流电机驱动系统的研究，解决理论和应用中的关键技术，具有重要的理论意义和工程价值。

软开关一般是指功率器件在无电压和电流重叠情况下的开关过程，包括零电压开关、零电流开关和零电压且零电流开关，有时将接近零电流条件或零电压条件的开关过程也称为软开关。因为功率器件的缓冲电路在一定程度上也能改善电路的运行环境，所以一些学者也将其归类于软开关技术。本书中的软开关技术主要是指通过添加辅助有源开关电路改善电路性能的功率变换技术。

本书作者对无刷直流电机逆变器的软开关技术进行了深入系统的研究，并将其研究成果整理成书，书中的许多概念、拓扑结构、分析方法和数学推导是首次提出的，难免存在不妥之处，恳请电力电子与电力传动界的各位同行批评指正，提出宝贵意见和建议。

本书共4章，刘卫国撰写了第1章，并完成全书的审稿工作。贺虎成撰写了第2~4章，并负责统稿和定稿工作。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金、陕西省自然科学基金、陕西省教育厅科研计划项目的资助；在课题的研究过程中，西安科技大学电气与控制工程学院、西北工业大学稀土永磁电机及控制技术研究所和天水长城电工起重电气有限公司总经理李正正提供了帮助和支持，在此一并表示感谢！

# 目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 无刷直流电机	3
1.1.1 无刷直流电机的原理	3
1.1.2 无刷直流电机研究的热点问题	5
1.2 软开关逆变技术	6
1.2.1 硬开关逆变器的主要问题	7
1.2.2 软开关辅助电路的基本结构	7
1.2.3 三相软开关逆变器的发展	9
1.2.4 应用于无刷直流电机的软开关逆变器	16
第 2 章 谐振直流环节软开关逆变器	20
2.1 三辅助开关谐振直流环节软开关逆变器	20
2.1.1 工作原理解析	21
2.1.2 相平面分析	32
2.1.3 软开关条件	36
2.1.4 电路元件设计规则	42
2.1.5 谐振直流环节逆变器驱动无刷直流电机的控制逻辑	43
2.1.6 仿真与实验结果分析	48
2.2 两辅助开关谐振直流环节软开关逆变器	61
2.2.1 工作原理解析	61
2.2.2 仿真分析	68
2.3 本章小结	72
第 3 章 无刷直流电机专用谐振极软开关逆变器	74
3.1 TPWM_TON 控制谐振极软开关逆变器	74
3.1.1 工作原理解析	75

3.1.2	谐振电路参数设计	88
3.1.3	控制算法	90
3.1.4	仿真和实验结果分析	93
3.2	HON_LPWM 控制谐振极软开关逆变器	101
3.2.1	工作原理解析	101
3.2.2	参数设计和控制算法	109
3.2.3	仿真分析	113
3.3	HPWM_LON 控制谐振极软开关逆变器	117
3.3.1	工作原理解析	118
3.3.2	参数设计和控制算法	125
3.3.3	仿真分析	126
3.4	本章小结	130
<b>第 4 章</b>	<b>无刷直流电机逆变器的能耗分析</b>	<b>132</b>
4.1	功率器件的损耗计算模型	132
4.1.1	通态损耗	132
4.1.2	开关损耗	133
4.2	永磁无刷直流电机本体的数学模型	134
4.3	硬开关逆变器的能耗分析	136
4.3.1	无刷直流电机的 PWM 调制过程	136
4.3.2	无刷直流电机的运行特性	139
4.3.3	无刷直流电机的动态数学模型	139
4.3.4	逆变器的动态数学模型	140
4.3.5	无刷直流电机系统的动态数学模型	141
4.3.6	无刷直流电机硬开关逆变器的损耗计算模型	141
4.4	三辅助开关谐振直流环节逆变器的能耗计算	142
4.4.1	三相逆变桥的损耗	142
4.4.2	辅助开关管的损耗	142
4.4.3	辅助二极管的损耗	145
4.4.4	逆变器的总损耗	149
4.5	TPWM_TON 控制谐振极软开关逆变器的能耗计算	149
4.5.1	逆变桥开关的损耗	150
4.5.2	辅助单元的损耗	150

4.5.3 逆变器的总损耗	151
4.6 HON_LPWM 和 HPWM_LON 控制谐振极软开关逆变器的能耗 计算	152
4.6.1 逆变桥开关的通态损耗	152
4.6.2 辅助单元的损耗	152
4.6.3 逆变器的总损耗	155
4.7 无刷直流电机逆变器能耗计算的仿真分析	156
4.7.1 硬开关逆变器的损耗仿真结果	156
4.7.2 三辅助开关谐振直流环节逆变器的损耗仿真结果	160
4.7.3 TPWM_TON 控制谐振极软开关逆变器的损耗仿真结果	165
4.7.4 HON_LPWM 控制谐振极软开关逆变器的损耗仿真结果	171
4.7.5 比较分析	176
4.8 本章小结	178
参考文献	180

# 第1章 概述

电机及其驱动系统作为当今世界应用最为广泛的机电能量转换装置，其应用范围已遍及世界经济的各个领域以及人们的日常生活之中<sup>[1-6]</sup>。随着全球范围的能源危机和科学技术的进步，经济发展对电机及其驱动系统提出了更高的要求，传统类型电机已不能满足社会发展的需求，开发高效节能、运行可靠的新型电机及其驱动系统逐渐成为研究的热点。

随着电机理论、电力电子及微电子技术、永磁材料技术、计算机技术以及控制理论等的发展与进步，永磁无刷电机作为一种新型特种电机迅速发展起来，并得到了广泛的关注和重视。永磁无刷电机按照反电势波形的不同分为正弦波无刷电机和梯形波(或方波)无刷电机。正弦波无刷电机反电势波形接近正弦波，一般称为永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)。梯形波无刷电机反电势波形接近梯形波，一般称为无刷直流电机(brushless DC motor, BLDCM)。

无刷直流电机的控制比永磁同步电机简单，控制系统成本低。永磁同步电机采用矢量控制或直接转矩控制进行调速，两种方法都需要进行坐标变换。

无刷直流电机不仅保留了传统直流电机的各种优点，如机械特性和调节特性好、起动转矩大、控制简单、过载能力强、动态特性好等，而且克服了传统直流电机的许多缺点。传统直流电机使用机械换向装置，其成本高，故障多，维护困难，经常因碳刷产生的火花而影响可靠性，并对其他设备产生电磁干扰，机械换向器的换向能力也限制了电机的容量和速度；此外，损耗存在于电机转子，散热困难，温度的升高限制了电机转矩重量比的进一步提高<sup>[7-10]</sup>。无刷直流电机通过电子换向器替代了机械换向装置，电枢绕组通常嵌在定子槽中，有着明显的技术优势。

与传统的电励磁同步电机相比，无刷直流电机具有效率高、结构简单、体积小、功率因数高、转矩重量比高、转动惯量低、易于散热等优点，而且不会出现“失步”现象<sup>[11]</sup>。



无刷直流电机与交流异步电动机相比,交流异步电动机虽然具有结构简单、工作可靠、寿命长、制造容易、保养维修方便、价格低廉等优点,但交流异步电动机的控制和驱动电路比较复杂,动态响应、低速性能不好,而且该电动机比永磁电机效率低,低速运行时效率更低,发热严重等技术问题也比较明显<sup>[12-16]</sup>。

无刷直流电机与开关磁阻电机相比,开关磁阻电机虽有结构简单、运行可靠等优点,然而开关磁阻电机缺点亦很明显:转矩脉动大,噪声大;此外,相对永磁电机而言,功率密度和效率偏低;另一个缺点是要使用位置传感器,增加了结构复杂性,降低了运行可靠性<sup>[17-21]</sup>。

无刷直流电机依靠永磁体建立进行机电能量转换所必需的气隙磁场,省去了励磁装置、简化了电机结构、减轻了电机重量,在节约能源、降低能耗方面具有明显优势,在各个领域具有广阔的应用前景<sup>[22-26]</sup>。尤其在对电机及其驱动系统效率和功率密度要求较高的应用场合,永磁电机的优秀品质将更为突出,例如作者承担的科研课题“近空间高速飞行器飞行控制动力系统关键技术研究”得到了国家自然科学基金重大研究计划面上项目(90716026)的资助。近空间飞行器的能源流程主要由原始能源部分、储能部分和耗能部分组成,其中,原始能源部分主要是白天的太阳能经太阳能电池转换得到的电能;储能部分主要由燃料电池、锂电池构成,在夜间和原始电能不足时给耗能部分供电。耗能部分主要是飞行器的动力装置,一般由功率变换器、电机及螺旋桨等组成<sup>[27-29]</sup>。近空间飞行器特殊的工作场所和能源结构决定了其原始电能相对有限,为了达到能量供求平衡,降低其能耗部分的功率损耗将是一条关键途径。而能量的大部分是由动力装置消耗的,因此提高动力装置的效率对近空间飞行器的性能提升至关重要。由于永磁电机的众多优点,在近空间飞行器动力装置中,世界上大多数国家都采用永磁无刷直流电机<sup>[30-34]</sup>。由此可见,永磁无刷直流电机及其驱动系统的开发研制对于提高能源利用效率、缓解能源危机具有重要意义。

尽管永磁无刷直流电机具有上述诸多优点,但也有其不足之处。永磁无刷直流电机通常采用硬开关逆变器驱动,硬开关逆变器存在的一些问题严重地影响了无刷直流电机系统性能的进一步提升。将高频软开关技术与电机驱动控制相结合,成为被国内外电工界专家认可的解决该问题的重要途径。因此,本书以无刷直流电机为应用对象,以软开关逆变技术为重点进行了研究。本章讨论了无刷直流电机的工作原理及研究的热点问题,总结了软开关逆变拓扑的发展历

程及研究现状。

## 1.1 无刷直流电机

目前，无刷直流电机的发展已与大功率开关器件、专用集成电路、稀土永磁材料、数字处理技术、新型控制技术及电机理论的发展紧密结合，体现着当今应用科学的许多新成果，显示出广泛的应用前景和强大的生命力。

### 1.1.1 无刷直流电机的原理

稀土永磁无刷直流电机系统由永磁电机本体、转子位置传感器及控制器等组成。电机转子由稀土永磁材料制成，定子上嵌放有三相电枢绕组，通过逆变器连接到直流电源。定子绕组采用位置传感器实现电子换向，代替有刷电机的电刷和换向器，位置信号经换相运算后得到合适的换相逻辑，换相逻辑参与控制综合后生成逆变器的驱动信号，逆变器将直流电能变换后加到无刷直流电机的本体，各相依次通电，和转子磁极主磁场相互作用，产生转矩，使电机转子转动。

图1-1是稀土永磁无刷直流电机系统图。控制电路对转子位置传感器检测到的信号与脉宽调制信号进行逻辑组合与变换，然后将输出信号经过隔离驱动电路，送至逆变器各功率开关管，从而控制电机各相绕组按一定顺序工作，在电机气隙中产生跳变式旋转磁场。下面以星型三相六状态无刷直流电机为例对其工作原理作简单分析。

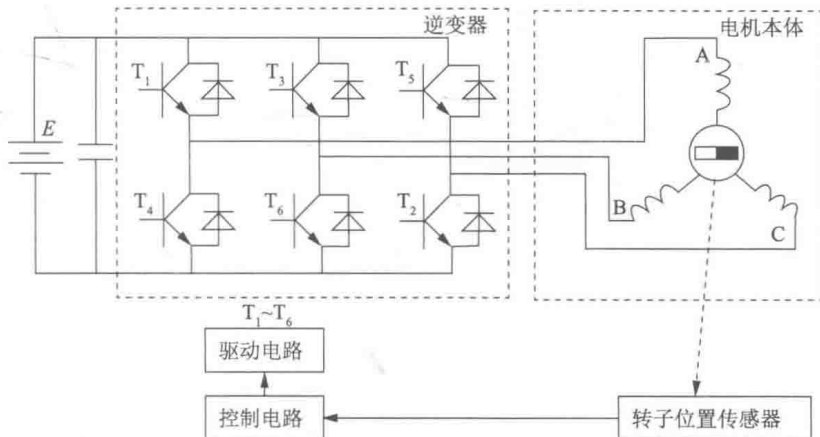


图 1-1 稀土永磁无刷直流电机系统图

图1-2 所示为稀土永磁无刷直流电机工作原理示意图。当转子位于图1-2(a)中所示位置时,位置传感器输出转子磁极信号,磁极位置信号经过控制电路逻辑变换后驱动逆变器,使功率开关管  $T_1$ 、 $T_6$  导通,即 A、B 两相绕组通电,电流方向为 A 进 B 出,电枢绕组在空间的合成磁场为  $F_a$ ,方向如图1-2(a)所示。电枢绕组合成磁场  $F_a$  与永磁转子磁场  $F_r$  相互作用,使转子按顺时针方向旋转,在此过程中电流流路径为:电源正极→ $T_1$  管→A 相绕组→B 相绕组→ $T_6$  管→电源负极。当转子转过  $60^\circ$  电角度到达图1-2(b)中的位置时,位置传感器输出信号,经逻辑变换后使开关管  $T_6$  关断,  $T_2$  导通。此时  $T_1$  仍保持导通,绕组 A、C 通电,电流方向 A 进 C 出,电枢绕组在空间合成磁场为图1-2(b)中  $F_a$ ,电枢磁场与永磁转子磁场相互作用使转子继续沿顺时针方向旋转,电流流路径为:电源正极→ $T_1$  管→A 相绕组→C 相绕组→ $T_2$  管→电源负极。当电动机转子沿顺时针每转过  $60^\circ$  电角度时,功率开关管的导通逻辑为: $T_1T_2 \rightarrow T_2T_3 \rightarrow T_3T_4 \rightarrow T_4T_5 \rightarrow T_5T_6 \rightarrow T_6T_1 \rightarrow \dots$ ,则转子在定子电枢绕组合成磁场和永磁转子磁场的相互作用下沿顺时针方向连续转动。

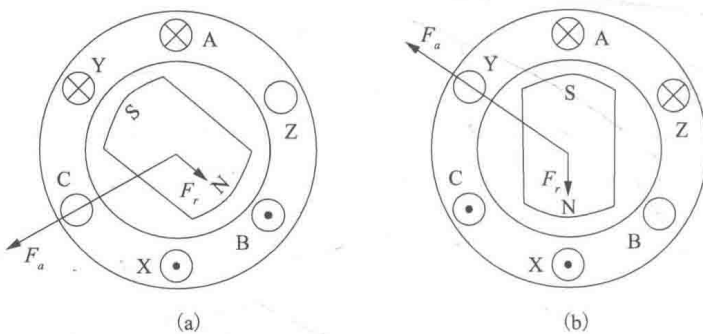


图 1-2 稀土永磁无刷直流电机工作原理示意图

在图1-2 中由(a)~(b)的  $60^\circ$  电角度范围内,转子磁场顺时针连续转动,而定子电枢绕组合成磁场  $F_a$  在空间保持如图1-2(a)中的方向不变,只有当转子磁场转够  $60^\circ$  电角度到达图1-2(b)中  $F_r$  的位置时,定子电枢绕组合成磁场才从图1-2(a)中  $F_a$  的位置顺时针跃变至图1-2(b)中  $F_a$  的位置。可见定子电枢绕组合成磁场在空间不是连续旋转的磁场,而是一种跳跃式旋转磁场,每个步进角是  $60^\circ$  电角度。

当转子每转过  $60^\circ$  电角度时, 逆变器开关管之间就进行一次换流, 定子磁状态就改变一次。可见, 无刷直流电机有 6 个磁状态, 每一状态都是两管导通, 每管导通中流过电流的时间相当于转子旋转  $120^\circ$  电角度。

### 1.1.2 无刷直流电机研究的热点问题

#### 1. 转矩脉动问题

无刷直流电动机存在较大的低速转矩脉动, 影响了电机的控制精度和伺服性能, 同时也会引起电机的振动和噪声。因此, 如何抑制和削弱转矩脉动, 使其能在高精度运动控制系统中得到应用, 具有重要的现实意义。针对这一问题, 人们从电机本体和电机控制算法两方面出发提出了多种转矩脉动控制方法。随着电机电磁场仿真计算技术、电机设计技术和电机控制技术的不断发展, 如何抑制和削弱转矩脉动方面的研究将会不断深入<sup>[35-44]</sup>。

#### 2. 先进控制策略的应用研究

控制算法是实现无刷直流电机系统高性能的关键技术之一。无刷直流电机驱动系统具有多变量、非线性、强耦合等特点, 系统动、静态性能的保证很大程度上取决于控制策略和算法设计的可行性。同时, 现代工业对电机控制系统精度和性能的要求也越来越高, 传统的控制算法在系统模型不确定和存在大的扰动时, 已很难取得较好的控制效果。随着电力电子技术和数字处理技术的快速发展, 一些先进控制策略已可用于无刷直流电机的控制, 来提高无刷直流电机系统的性能。模型参考自适应控制、鲁棒控制、滑模变结构控制、遗传算法、小波分析、模糊理论和神经网络技术对无刷直流电机的控制都获得了较好的效果<sup>[45-53]</sup>。

#### 3. 无位置传感器控制

无刷直流电机需要转子位置传感器提供的位置信号来保证定子磁场和感应电动势相位的同步。而转子位置传感器使电机结构复杂、体积重量增大、成本增加、可靠性降低。如何不用位置传感器检测或观测转子位置进行电机控制, 一直是无刷直流电机系统研究的热点<sup>[54-63]</sup>。

#### 4. 弱磁控制

永磁无刷直流电机采用永磁体作为磁源,是其效率高、出力大、体积小的核心原因。但永磁体固有励磁磁场不可控的特点,使其相对于他励电机而言,少了一个重要的控制变量;而且稀土永磁体产生磁场较强,难以通过常规方法使其减弱,大大限制了在需要宽调速范围领域中的应用。因此,针对稀土永磁无刷电机弱磁调速的研究,成为当今电机领域研究的难点和热点。如果弱磁运行得到解决,加上其非弱磁运行的优点,那么稀土永磁无刷电机的应用将会大大扩展和加强<sup>[64-72]</sup>。

#### 5. 成本问题

随着永磁无刷直流电机系统控制技术的日益成熟,高昂的成本已成为其推广应用的主要障碍之一。在不影响性能的前提下,尽可能地降低成本也是当前永磁无刷直流电机研究的一个热点问题<sup>[73-78]</sup>。

#### 6. 逆变器的高效运行问题

在永磁电机本体进行高效率设计后,制约永磁电机驱动系统高效运行的主要障碍为逆变器的性能。逆变器的高效运行对无刷直流电机在散热条件恶劣和能量相对有限的应用场合而言,影响更为重大。因此,针对稀土永磁无刷电机高效逆变技术的研究,成为永磁无刷电机研究的重要问题。一些学者提出用同步整流技术来减小 MOSFET 续流二极管的通态损耗<sup>[79-81]</sup>,但其对大功率永磁无刷直流电机驱动系统而言,并不适合,大功率场合选择 IGBT 是更为合理的。将软开关技术与电机驱动控制相结合,成为解决逆变器高频高效运行的重要途径,引起了广泛的关注和研究<sup>[82-161]</sup>。

### 1.2 软开关逆变技术

随着微电子技术、超大规模集成电路、半导体物理的发展,对电力电子装置的要求也越来越高。其中,高效率、小体积和低电磁干扰成为电力电子技术发展的首要目标。小体积要求装置具有高密度结构,高密度结构将使敏感设备的抗电磁干扰能力下降,同时,高密度结构将使装置的散热问题更加严重。通过高频化可以减小电力电子装置的体积和去除音频噪声,然而,随着开关频率的提高,功率器件的开关损耗将急剧上升。反过来,功率器件损耗的增加将产生大量的热量,过多的热量将需要更大体积的散热器。此外,损耗增加引起的温升将降低电力电

子装置的可靠性。因此,低效率和高电磁干扰成为电力电子装置高频化后的主要问题,而软开关技术被认为是解决该问题的有效途径。

### 1.2.1 硬开关逆变器的主要问题

相对于三相电流源逆变器,电压源逆变器在总的成本、效率和暂态响应等方面具有更大的优势,在电机驱动领域得到了广泛的应用和研究。然而,硬开关电压源逆变器在发展过程中仍然有许多问题需要解决<sup>[85-90]</sup>。

(1) 功率损耗。电力电子变换器中,功率损耗主要来源于开关器件的通态损耗和开关损耗,高频化对系统的通态损耗影响并不大。开关损耗主要产生于半导体开关器件开通和关断瞬间,尽管开关时间非常短,但高电压、大电流仍将产生严重的开关损耗。

(2) 器件应力。硬开关电路中,开关轨迹要穿过伏安特性的有源区,增加了器件的电应力。长时间的高电压和大电流开关操作将会降低器件的可靠性。

(3) 电磁干扰问题。快速器件开关过程中大的  $du/dt$ 、 $di/dt$  以及寄生电路振荡将会产生严重的电磁干扰问题,影响控制电路和周围敏感设备的正常工作。

(4) 电机绝缘问题。加在电机定子绕组绝缘层上的高  $du/dt$  可能会产生很大的位移电流,导致电机绝缘降低。

此外,电机支承座电流问题和电机终端过电压问题依然存在。当逆变器的开关频率提高以后,这些问题将更加严重。为减小开关损耗,提高功率器件的可靠性,人们采用了缓冲电路。但缓冲电路只是将开关损耗转移到了缓冲电路,电力电子变换器的效率仍未有改善。为了克服这些缺点,20世纪80年代以来,软开关技术得到了广泛的研究并取得了迅速的发展。

### 1.2.2 软开关辅助电路的基本结构

硬开关逆变器在功率器件上的电压和电流都不为零时强迫器件实现开关过程,引起了上述诸多问题。与硬开关逆变器相反,软开关逆变器的功率器件在零电压条件(ZVS)或零电流条件(ZCS)进行通断工作,理论上开关损耗为零。所以,软开关技术可以改善功率器件的运行环境,提高器件运行的可靠性,降低系统的功率损耗,提高装置的效率和逆变器的功率密度,减少音频噪声<sup>[91, 92]</sup>。

功率器件在开关过程中电压和电流的重叠仅靠器件自身是不能解决的，必须通过外加电路来改善器件的运行环境。常用的辅助电路基本结构有三种，如图 1-3 所示， $u_{ce}$  为开关 V 的端电压； $i_c$  为开关 V 的电流； $i_D$  为开关反并联二极管的电流。

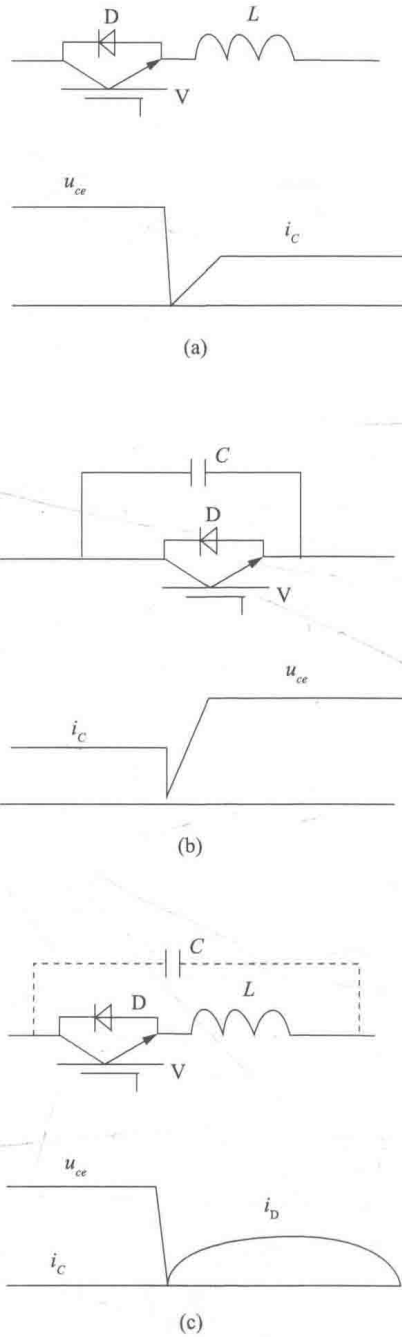


图 1-3 软开关辅助电路基本结构

### 1. 串联电感-零电流开关基本结构

串联电感-零电流开关基本结构如图1-3(a)所示,在功率器件回路串入一个电感,当功率器件开通时,由于电感电流不能突变,减缓了器件中电流的快速上升,软化了功率器件的开通过程。为了确保功率器件的安全运行,必须在关断前将电感储存的能量完全释放。

### 2. 并联电容-零电压开关基本结构

并联电容-零电压开关基本结构如图1-3(b)所示,在功率器件两端并联一个电容,当功率器件关断时,由于电容电压不能突变,减缓了器件两端电压的快速上升,软化了功率器件的关断过程。为了确保功率器件的安全运行,必须在开通前将电容储存的能量完全释放。

### 3. 反并联二极管

反并联二极管如图1-3(c)所示,通过附加电感电容的谐振工作,先使与功率开关反并联的二极管处于导通状态,此时功率开关处于零电压、零电流状态,这时功率器件进行开关操作则为ZVS且ZCS。

## 1.2.3 三相软开关逆变器的发展

软开关一般是指功率器件在无电压和电流重叠情况下的开关过程,包括零电压开关、零电流开关和零电压且零电流开关,有时将接近零电流条件或零电压条件的开关过程也称为软开关。因为功率器件的缓冲电路在一定程度上也能改善电路的运行环境,所以一些学者也将其归类于软开关技术。本书所指的软开关技术主要是指通过添加辅助有源开关电路改善电路性能的功率变换技术。

20世纪80年代,美国弗吉尼亚电力电子中心(VPEC)的李泽元教授等研究人员首先提出谐振开关-软开关概念,并先后推出了准谐振变换器、多谐振变换器等一系列电路,在直流变换器中得到了成功的应用。然而,在DC-AC变换器中,由于多个功率器件工作状态的相互影响,使软开关技术在逆变器中的应用遇到了较大的困难。

1986年,美国威斯康星(Wisconsin)大学的Divan博士提出了“谐振直流环



节逆变器”，为软开关技术在逆变器中的应用研究奠定了基础，引起了电力电子和运动控制界的广泛关注。此后，软开关技术、逆变技术和电机控制技术的集成研究，成为学术界非常活跃的研究方向之一。

目前，国内外应用于交流电机驱动的软开关电压源逆变器主要包括两种类型：谐振直流环节逆变器和谐振极逆变器<sup>[93]</sup>。

谐振直流环节逆变器的谐振网络连接在输入直流电源和逆变桥之间，其基本结构如图1-4所示，谐振发生在直流环节，使得直流母线的电压或电流变成周期性的过零脉冲序列，给逆变桥开关集中提供一个零电压开关或零电流开关条件。

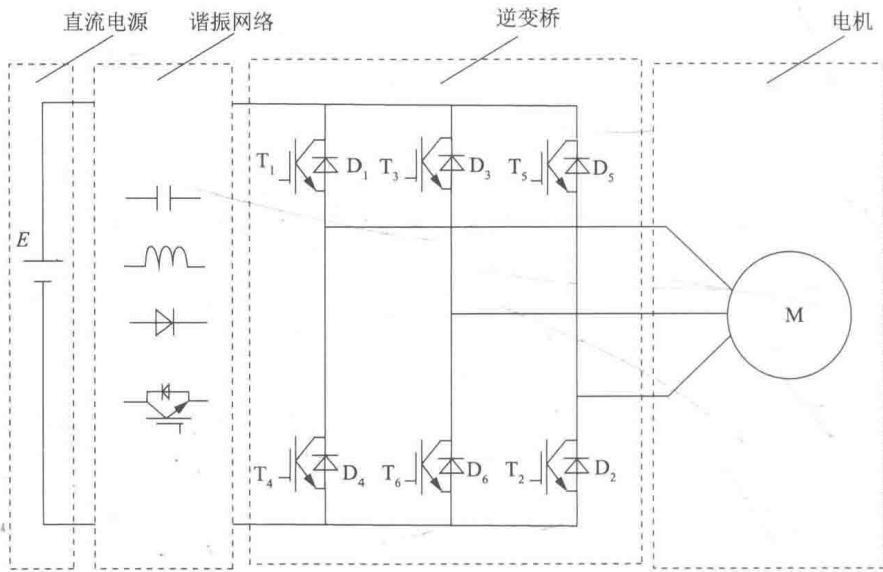


图 1-4 谐振直流环节软开关逆变器的基本结构

谐振直流环节软开关逆变器的研究已经产生了许多拓扑和控制方法。谐振直流环节逆变器<sup>[94]</sup>(RDCLI)的电路如图1-5所示，在原有硬开关三相逆变器的逆变桥与输入直流电源之间加入谐振电感和谐振电容构成的辅助谐振电路，功率流向逆变桥必须经过谐振电路，通过谐振使得谐振电容电压周期性地返回零点，为三相逆变桥的功率开关器件提供软开关动作条件。谐振直流环节逆变器电路简单，附加成本较低。有许多文献对该电路拓扑进行了应用研究，并取得了一定的成果<sup>[95-100]</sup>。