

超大功率电推进电源处理单元关键技术研究^{*}

王少宁, 王润福, 陈昶文, 张余强

(兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 针对深空探测等空间任务对超大功率 (10~100kW) 电推进系统的需求, 通过对国内外超大功率电推进技术的调研, 提出了一种 50kW 超大功率霍尔电推进系统电源处理单元 (Power processing unit, PPU) 设计方案, 重点对核心的阳极电源关键技术进行研究, 提出了四管 Buck-Boost 变换器和三相 LLC 谐振变换器级联的设计方案。

关键词: 超大功率; 电推进; 霍尔推力器; 电源处理单元; 谐振变换器

中图分类号: V439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 10-210114-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210114

Key Technology of Super Power Electric Propulsion Power Processing Unit

WANG Shao-ning, WANG Run-fu, CHEN Chang-wen, ZHANG Yu-qiang

(Lanzhou Institute of Space Technology Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Aiming at the requirement of super power (10~100kW) electric propulsion system for deep space exploration and other space missions, through investigation and research of super power electric propulsion technology at home and abroad, a 50kW super power electric propulsion system Power Processing Unit (PPU) design scheme is put forward, and the four tube Buck - Boost converter and three-phase LLC resonant converter topology are used to design the anode power which is the core of PPU.

Key words: Super power; Electric propulsion; Hall thruster; Power processing unit; Three-phase resonant converter

1 引 言

随着空间技术的发展,深空探测活动将是未来航天领域发展的必然选择,超大功率电推进系统则是深空探测的重要技术支撑^[1]。目前,欧美以及俄罗斯等国家正在积极准备载人登月、火星探测等空间任务,我国在未来中长期科技发展规划中,已将月球探测和载人航天列为重大专项之一。为支持未来空间探测技术的发展,各种新型推进技术快速发展,电推进由于比冲高、寿命长等优点,已经在卫星平台上得到广泛的工程应用,在通信卫星领域,是否采用电

推进技术已经成为衡量卫星先进性的标志性指标,深空探测也以电推进技术作为任务可行性的支撑技术,其他诸如无拖曳控制、高精度的姿态和轨道控制也对电推进技术提出了广泛的应用需求。目前的推力器能够提供的推力有限,已经不能满足远距离深空探测任务对大推力的需求,亟需开展超大功率、高比冲、大推力、高效率的电推进系统研发,以满足探测器大范围轨道间转移飞行器以及超大型空间运输平台需求。

电源处理单元 (Power processing unit, PPU) 是电推进系统的主要组成部分,推力器所需的各路供电

^{*} 收稿日期: 2021-03-02; 修订日期: 2021-04-26。

通讯作者: 王少宁, 博士, 研究员, 硕士生导师, 研究领域为宇航供电技术和电推进系统电源处理单元技术。

引用格式: 王少宁, 王润福, 陈昶文, 等. 超大功率电推进电源处理单元关键技术研究[J]. 推进技术, 2022, 43(10): 210114. (WANG Shao-ning, WANG Run-fu, CHEN Chang-wen, et al. Key Technology of Super Power Electric Propulsion Power Processing Unit[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(10):210114.)

均由PPU对航天器一次母线电源进行功率变换后获得。由于深空探测任务对大推力的需求,因此需开展超大功率电推进研究以保持电推进的优势并突破推力限制,随着电推进所需功率的增加,必然要求PPU功率也要大幅增加以满足推力器的功率需求。因此开展超大功率电推进系统PPU的研究具有重要意义。

本文对现阶段国内外超大功率电推进技术进展进行了介绍,针对目前技术最为成熟的霍尔电推进技术,提出了一种50kW超大功率霍尔电推进系统PPU设计方案,重点针对PPU阳极电源的关键技术进行了分析研究,提出了设计方案。

2 超大功率电推进技术发展

目前超大功率电推进主要有离子电推进、磁等离子动力电推进(MPD)、变比冲磁等离子电推进(VASIMR)、霍尔电推进四种方案^[2-4]。

2.1 国外技术进展

在几十千瓦量级的电推进领域,由于空间电荷饱和效应的存在,离子推力器单位面积所能产生的推力较小,推力器结构尺寸过大,离子推力器本身的栅极结构限制了其向大功率和大推力发展,技术成熟度相对较低。在NASA资助下,波音公司的EDD, Aerojet,科罗拉多州立大学和密西根大学正在进行3种离子推力器研制计划,其中,NEXIS(Nuclear electric xenon ion system)和HiPEP(High power electric propulsion)计划都采用核电源与电推进相结合的核电离推进系统。目前核电推进NEXIS-65离子推力器的地面试验性能达到功率27kW、推力500mN、比冲8700s、效率78%。HiPEP矩形栅离子推力器的地面试验性能达到功率34kW、推力600mN、比冲9500s、效率78%。此外,俄罗斯和德国联合研制的RIT-45的预期性能为功率35kW、推力0.75N、比冲70000s。英国火星空间公司的DS3G大功率离子推力器预期性能为功率25kW、推力0.45N、比冲10000s。

磁等离子体动力学推力器适用于上百千瓦甚至兆瓦级推进任务^[5]。目前,开展MPDT研究的国家主要包括日本、美国、俄罗斯、意大利等。在NASA的先进电推进技术计划中,普林斯顿大学和JPL正在联合研制下一代锂推进剂外加场磁等离子体动力学推力器(AF-MPDT),它属于MPD的一种形式,又称为洛伦兹力加速器。设计参数为功率245~250kW、效率60%~63%、比冲6200s。MPDT用洛伦兹力加速等离子体,内阴极和同轴阳极之间的等离子体放电提供稳态工作高电流,AF-MPDT通过引入外加磁场进一

步提高性能。意大利ALTA空间中心在欧空局和欧盟的共同支持下正在开展大功率AF-MPDT技术研究。考虑到高温超导技术的发展,研究人员提出了利用超导磁体产生外加场的超导磁等离子体动力推力器(SC-MPDT)新技术,目前正在进行可行性论证和方案设计。意大利ALTA的MPDT预期性能为功率100kW、推力2.5N、比冲2500s。

可变比冲磁等离子体发动机的一个重要特点是无阴极,减少了等离子体侵蚀,降低了对复合材料的要求,是一种适合于大功率和长寿命工作的新型电推进系统^[6]。2006年,美国Ad Astra火箭公司使用氟和氧气工质对VX-50推力器进行了大功率实验。2008年,VX-200推力器取得了突破性成果,以氧气为工质,实现了全功率30kW工作,比冲可在3000~30000s之间转换,能量转换效率高达67%。2009年5月,研制出VX-200空间试验原型机,可实现从近地轨道到月球轨道的变轨,被美国AIAA列为2009年十大航天新兴项目之一。

在几十千瓦量级的大功率电推进领域,霍尔电推进技术成熟度最高。霍尔推力器结构简单,工作可靠,中小功率霍尔推力器已得到了广泛的空间应用,大功率霍尔推力器研究也在不断深入。GRC的NASA-457在50kW设计点的性能为:电压500V,电流100A,比冲2724s,效率63%。设计改进后的NASA-457M对应9~72kW功率,比冲2000~3000s,实现了72kW下推力基本达到3N的水平,对应工作点电压为650V,电流111A,总功率73201W,推进剂流率102.7mg/s。SNECMA公司的PPS-20K的性能为功率20kW、推力1N、比冲2500s、质量25kg。俄罗斯SPT-290的额定工作性能为功率30kW、推力1.5N、比冲3300s、寿命27000h。

2.2 国内技术进展

相比国外,我国电推进领域的空间应用起步较晚。近年来国产电推进系统相继搭载卫星进行了空间验证,也开始了超大功率电推进的研发工作,研究方向以霍尔电推进为主。其中兰州空间物理技术研究所进行了50kW级霍尔推力器研究,原理样机已经开展点火实验,并与哈尔滨工业大学成立联合实验室共同开展高新能超大功率霍尔推力器研究工作。北京控制工程研究所与北京航空航天大学合作开展大功率MPD推力器研究,目前也处于原理样机阶段。上海空间推进技术研究所开展了20kW和50kW级大功率霍尔推力器研究工作,目前研制的20kW磁屏蔽霍尔推力器进行地面点火实验,实测推力达到1N。

3 超大功率PPU组成及功能

霍尔电推进系统PPU供电电源共包括4路输出供电,分别为:加热电源、励磁电源、触持及点火电源、阳极电源。PPU与霍尔推力器供电系统连接关系如图1所示。

加热电源为恒流源,主要作用为阴极加热丝提供直流供电进行加热,直到阴极温度被加热到上千摄氏度,使阴极发射体开始热电子发射。加热电源输出电流范围为4~10A,输出功率约200W。加热电源输出功率较小,通常采用半桥功率变换方式。

励磁电源为恒流源,主要作用为磁线圈提供励磁电流,控制推力器内磁场大小,在推力器环形通道内将形成正交电磁场,阴极发射的电子进入通道后,在正交的电磁场作用下形成轴向漂移,也称霍尔漂移,大量电子在环形通道内的漂移运动形成了霍尔电流。励磁电源的输出电流范围为10~20A,电流需要连续可调节,输出功率约1kW。励磁电源可采用全桥变换方案,同时采用软开关控制方式,减小功率管损耗,该方案技术成熟,已在宇航PPU中广泛应用。

触持及点火电源为双模式电源,阴极点火电源主要作用为在阴极与触持极之间产生高压单次脉冲,使阴极和触持极之间起弧产生放电,触持电源是在阴极与触持极间建立阴极电子发射电场,维持阴极的稳定持续放电状态。触持及点火电源对应推力器工作的启动模式和触持模式:启动模式为稳压输出280~320V,限流115~150mA,功率约50W;触持模式为稳流输出2~6A可调,稳流阶段功率最大约

200W。

阳极电源为稳压源,主要作用是将电离的工质引出,从而产生推力,阳极电源输出电压通常为600~1200V可调,输出功率达到50kW,是PPU中输出电压最高,功率最大的电源,占整个PPU输出功率的98%以上,是PPU设计的核心和难点,也是实现PPU高功率密度、高效率和小型化的关键。

4 超大功率PPU关键技术研究

与输出功率达到50kW的电推进系统相比,目前国内航天器执行的最高100V的母线电压已不能满足超大功率负载的需求。美国的超大功率航天器已计划将母线电压提高到300~400V,专门用于超大功率电推进系统供电,用于电推进的母线电压直接从航天器太阳帆板获取,采用非调节方式将电压可以提高到300~400V,这样可以显著降低母线端电流,显著降低超大功率电推进系统供电所造成的母线传输损耗。母线电压按照300V计算,母线电流将降低到133A,同时,采用非调节母线省掉了需要处理几十千瓦功率的PCDU,为整星减轻重量,降低功耗。高压母线是未来超大功率航天器的必然发展趋势,PPU适应高压母线设计是发展的必然,故PPU阳极电源的设计需满足300~400V的高压母线,同时阳极电源还需要承担输出电压600~1200V可调,功率要达到50kW。因此高压、宽范围母线和超大功率变换是PPU设计的两个技术难点,也是PPU需解决的关键技术。

4.1 阳极电源拓扑设计

阳极电源的设计核心是高效率,软开关技术能

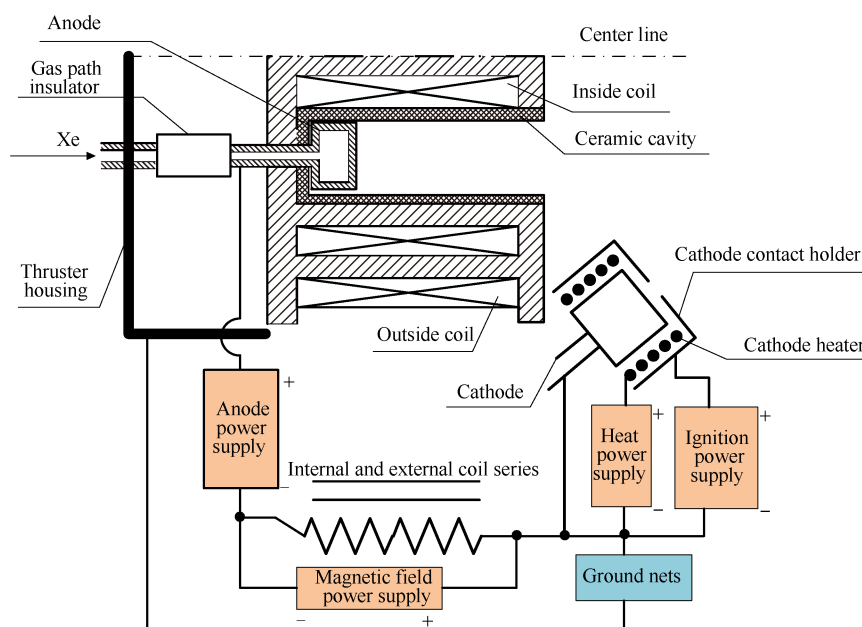


Fig. 1 Hall thruster power supply system connection diagram

显著提高变换器的效率,是国内外 PPU 大功率变换的主流技术。目前常用的软开关技术是移相全桥软开关技术^[7-9],对全桥功率变换器,通过移相控制可以利用电路寄生参数实现开关管的软开关,减少开关损耗,显著提高变换器效率。移相全桥(PSFB)变换器分两种类型:零电压开关(ZVS)变换器和零电压零电流开关(ZVZCS)变换器。应用 ZVS 变换器主要矛盾有:漏感越大,滞后桥臂实现 ZVS 越容易,但占空比丢失越严重,环流损耗越大,整流二极管关断时振荡越严重。可以采用辅助电路的拓扑,实现全负载范围类的软开关,并减少占空比丢失。但需要在次级增加耗能的钳位电路,以降低 MOSFET 和整流管损耗和电应力。应用 ZVZCS 变换器主要矛盾有:漏感越大,滞后桥臂零电流通断效果越好,但初级电流复位到零越困难,占空比丢失越严重。PPU 阳极电源是典型的升压变换器,在升压变换器中初级电流大,初级环流造成的损耗非常可观,因此不适宜用 ZVS 变换器。ZVZCS 变换器在副边通常采用 DDC 钳位电路,构成全桥拓扑的一部分,实现了 MOSFET 的 ZVZCS 和整流二极管的 ZCS,但是箝位二极管仍工作在硬开关状态,器件功耗大,反向电压应力高,同时带来输出整流电路复杂。

通过分析对比,超大功率、高电压输出的阳极电源,采用 LLC 全桥软开关功率变换技术更具优势。由于阳极电源输出功率大,输出电压范围宽,通常设计为多个模块串并联输出,实现大电流和高电压输出。推力器在启动时阳极电源存在较大的启动电流冲击现象,且推力器稳态工作时阳极电流也存在电流振荡现象,因此对均流的动态特性要求较高,所以稳压源并联需要设计均流控制电路,同时需要考虑模块之间的故障隔离问题。为了降低阳极电源的功率密度和器件应力,此处阳极电源设计为由 4 个功率为 13kW 的模块通过输出并联组成,阳极电源总功率可达到 52kW。

LLC 谐振变换器可以在全负载范围内实现开关管的零电压开关(Zero Voltage Switching, ZVS)和输出整流二极管的零电流开关(Zero Current Switching, ZCS),已广泛应用于中大功率场合。然而,当输入电

压和负载变化范围较大时,LLC 谐振变换器的开关频率变化范围较宽,难以优化设计谐振元件参数。为此,可让 LLC 谐振变换器工作在定频模式,用于实现电气隔离和电压匹配,即工作在直流变压器(DC Transformer, DCX)形式,此时其工作在最优状态,称之为 DCX-LLC 谐振变换器。为了调节输出电压,可加入一个非隔离型 DC/DC 变换器作为初级变换,它将宽范围的输入电压转化为恒定的电压,由此构成了初级变换+LLC 谐振变换的两级变换器^[10],如图 2 所示。在输入电压变化范围较宽的场所,这种两级式结构得到广泛应用,此处选用两级式变换器作为阳极电源单个电源模块的主要结构,将 4 个相同设计的模块进行并联即可实现阳极电源 50kW 的功率输出。

4.2 基于软开关的四管 Buck-Boost 变换器^[11-12]

由于 PPU 供电来自航天器高压母线,电压为 300~400V,兼顾考虑开关管电流应力和两模块串并联的需求,设计初级变换的输出电压为 300~600V。采用升降压变换器作为初级变换,兼顾宽范围输入电压和输出电压的需求。具有升降压功能的非隔离型直流变换器主要包括 Buck-Boost, SEPIC, Cuk, Zeta 和双管 Buck-Boost 变换器等。Buck-Boost 与 Cuk 的输出电压与输入电压极性相反,其辅助电源和驱动电路较复杂。Zeta 与 Sepic 的输出电压与输入电压同极性,但电感和电容等无源元件较多,电路结构比较复杂,不利于提高功率密度。且这 4 种变换器的开关器件电压应力较高。相比之下,双管 Buck-Boost 变换器具有结构简单、无源器件较少、输入输出电压极性相同且开关管电压应力低的特点,具有显著优势。在大电流应用场合,为了提高变换器的变换效率,可以采用同步整流技术,即采用 MOSFET 替代续流二极管,此即四管 Buck-Boost 变换器,如图 3 所示。

为了进一步提高四管 Buck-Boost 变换器的功率密度,需要通过提高开关频率来减小滤波电感和滤波电容等无源器件的体积。但是,当开关管工作在硬开关状态时,其开关损耗会随着开关频率的升高而增加,导致变换器效率降低,故为了降低开关损

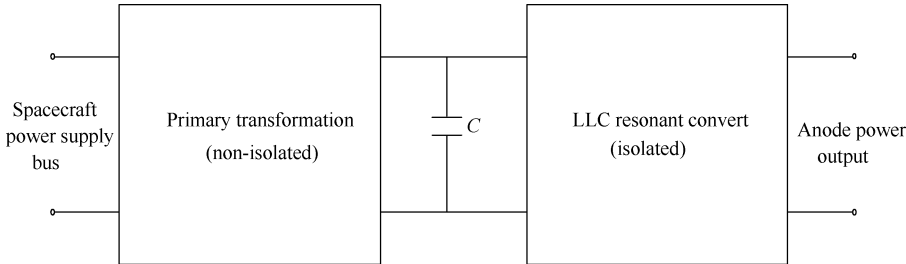


Fig. 2 Two-stage converter based on primary transformation +LLC resonant transformation

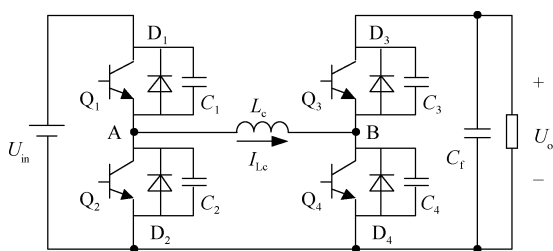


Fig. 3 Four-tube buck-boost converter

耗,有必要实现开关管的ZVS。本文提出一种可以在全输入电压和负载范围内实现开关管ZVS的前提下保证电感电流有效值最小的控制方式,该控制方式在不同工作情况下,开关管 Q_1 和 Q_4 的占空比以及移相占空比均发生改变,故称其为PWM加移相控制策略。在这种控制方式中,包含三个自由度,分别为左右两个桥臂主开关管 Q_1 和 Q_4 的占空比 d_{y1} 和 d_{y2} ,以及 Q_2 关断时刻超前于 Q_4 关断时刻的时间所对应的占空比,即移相占空比,用 d_θ 表示。为了实现开关管的ZVS,并使电感电流的有效值最小,四管Buck-Boost变换器的最优控制策略如下:

- (1)在每个开关周期的开始处,关断 Q_2 ,开通 Q_1 。
- (2)当 I_{Lc} 下降到 $-I_{ZVS}$ 时,关断 Q_3 ,开通 Q_4 。
- (3)重载时, Q_3 与 Q_2 同时关断,且保证此时 I_{Lc} 下降到 $-I_{ZVS}$ 。当负载减小时,减小 d_{y2} ,增大 d_{y1} ,使 I_{Lc} 平行下移。
- (4)轻载时, Q_3 在 Q_2 之前关断。如果 $U_{in} < U_o$,则当 I_{Lc} 下降 I_{ZVS} 时,关断 Q_1 ,开通 Q_2 ;如果 $U_{in} > U_o$,则当 I_{Lc} 上升到 I_{ZVS} 时,关断 Q_4 ,开通 Q_3 。当负载减小时,应增加 d_{y2} ,减小 d_{y1} ,而当减小至空载时, Q_1 和 Q_4 应同时关断。

为了更加清楚地描述上述控制方法的主要控制原理,图4给出了负载由重载变化时四管Buck-Boost变换器的主要波形。可以看出,在不同的输入电压和负载电流的情况下,开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 的占空比相位和脉宽均发生改变,但是,在该过程中,电感电流的最小值基本保持不变,也就是维持开关管实现ZVS的最小电流基本不变。

4.3 基于LLC的超大功率软开关变换技术

LLC谐振变换器可以在全负载范围内实现原边开关管的ZVS和副边二极管的ZCS,其副边二极管无反向恢复的问题^[13];另一方面,LLC谐振变换器原边开关管的关断电流很小,开关管的关断损耗较小,并且开关管的 dv/dt 较小,具有良好的电磁兼容性能。受益于全负载范围内的软开关特性,LLC谐振变换器可以工作在更高的开关频率下,随着宽禁带器件的快速发展和应用,在高电压和大功率的应用场合中,采用大功率的碳化硅器件,可以将开关频率工作在上百千赫兹甚至兆赫兹,这样可以大幅度减小无源器件的体积,提高变换器的功率密度。

在超大功率的应用场合中,为了减小器件的电流应力,可以采用多变换器并联结构。但是,并联工作的LLC谐振变换器很难实现均流,本文提出三相LLC谐振变换器^[14-15],它既保留了单相LLC谐振变换器的优点,还可以合理分配变压器原副边的接法,实现各相之间的均流。三相LLC谐振变换器电路拓扑如图5所示。其中,三相LLC谐振变换器的变压器采用原边星型-副边星型的接法,在参数有偏差的情况下,可以自动实现相间均流;另外,三相LLC谐振变换

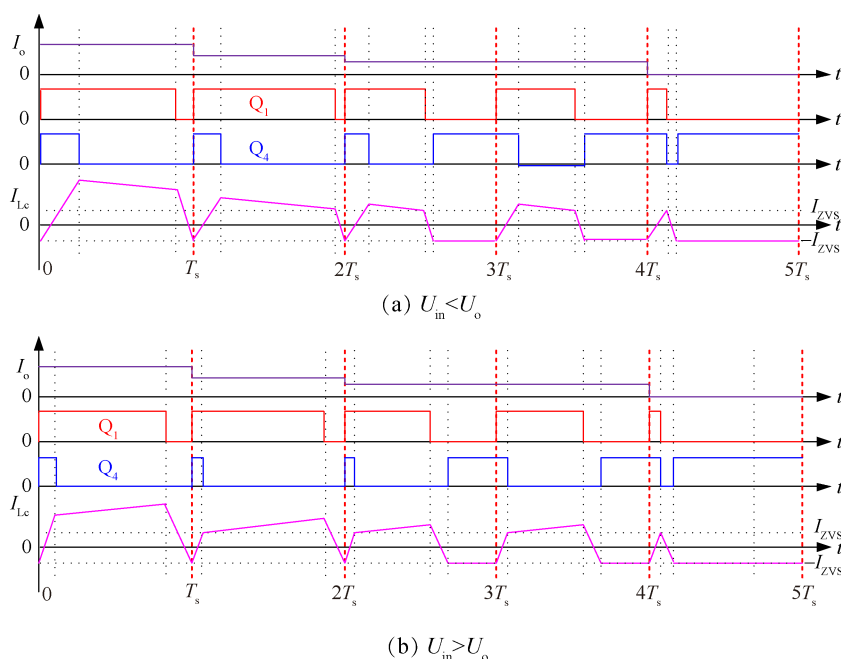


Fig. 4 Mode switching process of a four-tube buck-boost converter with load changes

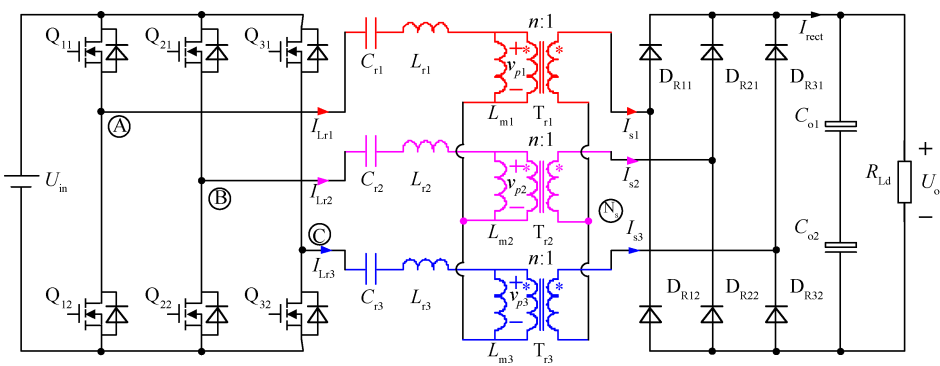


Fig. 5 Circuit topology of three-phase LLC resonant converter

器采用交错控制的方法,即三相之间交错 120° ,可以减小输出电流脉动,从而减小输出滤波电容的体积。

LLC 谐振变换器器三相之间交错 120° ,可以将整个开关周期分成 6 个时间段,其主要波形如图 6 所示。由于在每个时间段内变换器的工作状态类似,为分析方便,仅给出一个模态的工作原理:

(1) $[t_0, t_1]$:该时段内, Q_{11}, Q_{22} 和 Q_{31} 导通, L_{r1}, C_{r1} 支路和 L_{r3}, C_{r3} 支路并联,再和 L_{r2}, C_{r2} 串联谐振工作,副边整流管 D_{R11}, D_{R22} 和 D_{R31} 导通,变压器 T_{r1}, T_{r2} 和 T_{r3} 原边电压分别被钳位到 $U_o/3, U_o/3$ 和 $-2U_o/3$,原边向副边传递能量,励磁电流 I_{Lm1} 和 I_{Lm3} 线性上升,励磁电流 I_{Lm2} 线性下降。

(2) $[t_1, t_2]$:在 t_1 时刻,谐振电流 I_{Lr3} 与励磁电流 I_{Lm3} 相等,副边整流管 D_{R31} 电流自然到零,实现零电流关断,变压器 T_{r3} 原边不再向副边传递能量。此后, L_{r1}, C_{r1} 支路和 L_{r3}, C_{r3} 支路并联,再和 L_{r2}, C_{r2} 串联谐振工作,副边整流管 D_{R11} 和 D_{R22} 导通,变压器 T_{r1} 和 T_{r2} 原边电压分别被钳位到 $nU_o/3$ 和 $-2nU_o/3$,励磁电流 I_{Lm1} 线性上升,励磁电流 I_{Lm2} 线性下降,由于励磁电感 L_{m3} 较大,可以认为 L_{r3}, C_{r3} 和 L_{m3} 支路的电流近似不变。

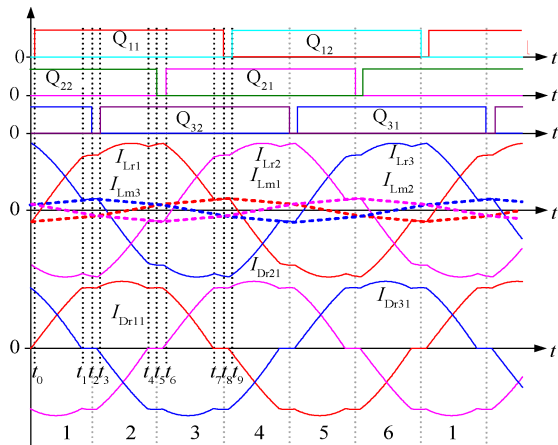
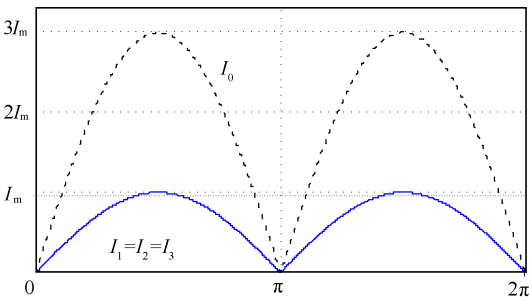


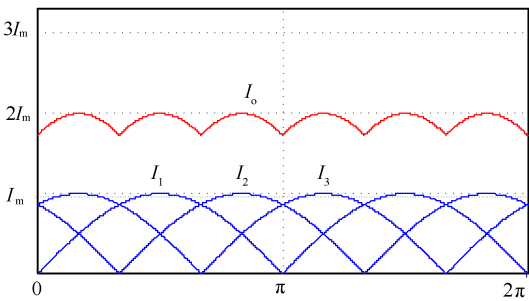
Fig. 6 Circuit topology and operating waveform of three-phase LLC resonant converter

(3) $[t_2, t_3]$:在 t_2 时刻, Q_{31} 关断,结电容 C_{31} 被励磁电流 I_{Lm3} 充电,同时结电容 C_{32} 被放电。由于 C_{31} 和 C_{32} 的缓冲作用,开关管 Q_{31} 和 Q_{31} 实现软关断。到 t_3 时刻, C_{32} 两端电压下降到零,其反并二极管自然导通,此时可以零电压开通 Q_{31} 。

从上述分析可以看出,三相 LLC 谐振变换器变压器原副边均采用星形接法,当谐振参数出现偏差时,三相谐振电流之和为零,通过电路约束可以自动实现均流。另一方面,三相 LLC 谐振变换器采用交错控制,采用交错控制前后副边输出电流的波形如图 7 所示。可以看出,通过采用交错驱动,输出电流的脉动频率变为原来的三倍,同时,输出电流的脉动幅值也大大减小,这可以大幅减小输出滤波电容的值,从而提高系统的功率密度。



(a) Non-interleaving control



(b) Interleaving control

Fig. 7 Output current of the front and rear side using interleaving control to control

此外,对于三相 LLC 谐振变换器来说,由于需要三个变压器,采用三个独立的磁性元件增加整个变换器中磁件的数量和损耗,同时磁件参数的一致性也难以保证。通过磁集成的方式,可以将三个独立的变压器集成到同一个磁芯中。在三相变压器中,由于三相的电压激励互相交错 120° ,三相磁通也交错 120° ,公共磁柱中的三相磁通之和相互抵消。特别的,当公共磁柱中的三相变压器中的磁通之和恒等于零时,还可以省略磁芯中的公共磁柱,这样大大减小了磁性元件的体积和损耗。

5 结 论

超大功率霍尔推力器 PPU 的设计难点在于其阳极电源的设计,采用四管 Buck-Boost 级联三相 LLC 谐振变换器的拓扑结构作为阳极电源设计方案,可以有效解决目前 PPU 设计采用的移相全桥软开关技术带来的高损耗、高电压应力等问题,在大幅提高转换效率的同时还提高了 PPU 整机的功率密度。

此外,超大功率 PPU 的拓扑结构采用硅基半导体器件会大大增加电路设计的难度和复杂度,而正在兴起的以碳化硅(SiC)为代表的第三代宽禁带半导体功率器件,具有耐高压、大功率、开关速度快等优越特性^[16-17],如果能解决其目前存在的单粒子性能薄弱问题,将极大推动超大功率电推进技术的快速发展。

致 谢:感谢兰州空间技术物理研究所二次电源事业部给予的设备支持和各位同事给予的帮助。

参考文献

- [1] 李 永,丁凤林,周 成. 深空探测推进技术发展趋势[J]. 深空探测学报, 2018, 5(4): 323-330.
- [2] 康小录,张 岩,刘 佳,等. 大功率霍尔电推进研究现状与关键技术[J]. 推进技术, 2019, 40(1): 7-17. (KANG Xiao-lu, ZHANG Yan, LIU Jia, et al. Research Status and Key Technologies of High-Power Hall Electric Propulsion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(1): 7-17.)
- [3] 吴佳芮,周昂扬,魏吉文,等. 50kW 大功率霍尔电推进 PPU 阳极电源设计[J]. 载人航天, 2020, 26(4): 123-129.
- [4] 杭观荣,梁 伟,张 岩,等. 大功率等离子体电推进研究进展[J]. 载人航天, 2016, 22(2): 175-185.
- [5] 汤海滨,王一白,魏延明. 磁等离子体动力推力器回顾和认识[J]. 推进技术, 2018, 39(11). (TANG Hai-bin, WANG Yi-bai, WEI Yan-ming. Review and Recognition of Magnetic Plasma Dynamic Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(11).)
- [6] 任军学,刘 宇,王一白. 可变比冲磁等离子体火箭原理与研究进展[J]. 火箭推进, 2007, 33(3).
- [7] 武海霞,嵇保健. 等离子体污水处理高压直流电源研究[J]. 电力电子技术, 2013(5): 74-75.
- [8] 张小勇,张 庆,饶沛南,等. LLC 谐振全桥软开关 DC/DC 变换器研究[J]. 机车电传动, 2019(3): 95-98.
- [9] 张立新,王旭东,李 鑫,等. 基于半桥 LLC 谐振式通信电源的设计[J]. 电气传动, 2016(5): 34-37.
- [10] 陈乃铭. 航天用宽输入宽输出电压范围的两级式直流变换器研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [11] 李海燕,竺绿园. 一种高频高效的四开关 Buck-Boost 变换器控制策略[J]. 机电工程, 2017(11): 87-93.
- [12] 任小永,唐钊,阮新波,等. 一种新颖的四开关 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 15-19.
- [13] 陈启超,王建勋,纪延超. 基于 LLC 谐振变换器的电力电子变压器[J]. 电力系统自动化, 2014(3): 41-46.
- [14] 庞云亭,韦统振,张国驹,等. 基于 SiC-MOSFET 的三相谐振 LLC 变换器设计[J]. 电力电子技术, 2020, 54(10).
- [15] 胡高平. 面向高压大功率场合的三相三电平 LLC 谐振直流变换器研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [16] Chen C, Luo F, Kang Y. A Review of SiC Power Module Packaging: Layout, Material System and Integration[J]. *CPSS Transactions Actions on Power Electronics and Applications*, 2017, 2(3).
- [17] 顾占彪,李志斌,石伟杰,等. 宽禁带器件在 1kV 高频直流谐振变换器中的应用与对比[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 150-161.

(编辑:朱立影)