# 基于模块化磁集成DC-DC的SPS高压功率变换关键技术研究

王磊，张东来

哈尔滨工业大学（深圳），深圳 518055

**摘　要：**针对空间太阳能电站高效率、高功率密度和高可靠性高压电能变换、超大功率电力传输与管理的需求，本文以空间高压大功率电力变换系统的电路拓扑、结构优化设计以及高压固态断路器为研究对象，首先分析了常见的空间太阳能电站的电源管理和分配方式，提出一种新型混合式电源系统结构，构建了适用于空间太阳能电池阵的电力传输母线结构，并提出采用模块化多变换器串并联组合策略，实现了太阳能电池分阵和子阵高变比、低损耗、高功率密度的大功率电力变换和高效率的功率输出。提出一种新型软开关隔离全桥变换器，并进行变换器模块化磁集成研究、空间温度场分析和散热设计研究，仿真和实验样机验证了该方案可以实现高效率高压变换，最后，针对没有可适用于宇航的高压开关器件的问题，提出了一种基于低压开关器件模块化串并联的高压固态断路器理论，实现了空间电站高压继电器的设计，为进一步开展空间大功率高压电力变换系统的优化设计，提供了理论基础和工程实践，推动了大功率空间发电站电力变换与电源管理的发展。

**关键词：**空间太阳能电站，高压变换，IPOS组合，均流控制，模块化DC-DC，高压固态断路器

## 0　引言

受困于全球性的环境与能源危机，各国政府越来越多的将目光和精力聚焦于能源的可持续发展和利用。太阳能资源以其丰富、清洁、取之不竭的特点，得到了全球范围学者和研究人员的青睐，在地面光伏发电和光热发电领域取得了诸多研究成果和应用。空间环境的太阳能辐射强度可数倍于地面，尤其在地球同步轨道，99% 的时间内可稳定接收较强的太阳能辐射[1-3]。因此很多国家和学者先后提出建设空间太阳能电站 (SPS-Solar Power Satellite) 的构想，但由于空间太阳能电站过于庞大，其重量、体积、面积均受发射能力的严格限制，且空间环境下的装配和维护、电源管理、热控、能量传输控制等均非常复杂和困难，至今仍未有国家能够建立起一个完整的试验系统。

随着科技发展的日新月异，近些年空间太阳能电站概念再次受到国际的广泛关注，美国计划于 2020 年实现 10MW 系统的空间验证，日本也提出在 2030 年实现 1GW 商业系统运行的技术路线图。此外，欧洲航天局 (ESA) 于 2002 年 8 月组建了欧洲空间太阳能电站研究网[4]。我国亦同步启动了空间太阳能电站的预研，发电功率以 GW 级为目标，较之目前卫星电源高出 6 个数量级。

现有文献 [5-8] 关于空间太阳能技术的研究重点多集中在高效多层太阳能电池、薄膜太阳能电池、高效微波转化器、轻型大型空间结构等先进技术上，而针对空间环境下的电源架构及管理、高效率高压变换技术却鲜有涉及，而空间环境下的电力变换系统，由于受制于特殊的辐射环境，可适用的开关管器件电压等级多在 400V 以下，考虑 2 倍降额，目前的宇航器件适用于 200V 以下的母线，而空间太阳能电站的功率高达 GW 级，其母线电压可达数 KV，因此深入研究与此电压等级配套的空间高压直流变换技术及电源管理技术，对整个空间太阳能电站系统有着至关重要作用。

基于此，本文面向太空发电站高压变换和超大功率电力传输与管理需求，开展适用于空间环境的大功率高压、高效、高功率密度电力变换技术研究。首先分析了两种常见的空间太阳能电站的电源管理和分配方式，对比其优缺点，构建出三种适用于空间太阳能电池阵的电力传输母线结构，在此基础上，提出基于太阳能电池分阵和子阵供电的高压变换拓扑和结构，采用模块化多变换器串并联组合策略，实现高压变比、低损耗、高功率密度的大功率电力变换和高效率太阳能发电阵的最大功率输出。通过对有源双向全桥、普通移相全桥、LLC 谐振变换器等拓扑进行仿真比较，优化拓扑方案设计。最后，进行了高压变换拓扑

模块化设计、变换器空间散热设计研究，依托地面环境设计制作了可适用于空间环境的多模块组合高压样机，并提出可以保证每一个子模块在复杂工况下都能够均衡稳定运行的策略，实验验证了采用低压模块化多变换器串并联组合系统，可以实现高效率高压变换，为进一步开展空间大功率高压电力变换系统的设计和实验，提供了理论基础和工程实践，推进了 MW 级空间发电站电力变换与电源管理系统的研究进展。

## 1　空间太阳能电站的电源管理和分配方式

### 1.1　集中式 PMAD

集中式 PMAD 如下图 1 所示，首选将太阳能电池阵列发出的电能汇聚到一个连接点，然后根据需求集中进行大功率变换，然后通过直流母线传输到各个微波或激光发射装置。

集中式 PMAD 的优点是集中发电、变电和供电，系统效率较高，且可以通过灵活扩展电站规模实现较大功率空间太阳能电站系统。但该方案需远距离输电，导线过重且损耗大，需要研制特殊的超导材料和先进的超导传输方式。

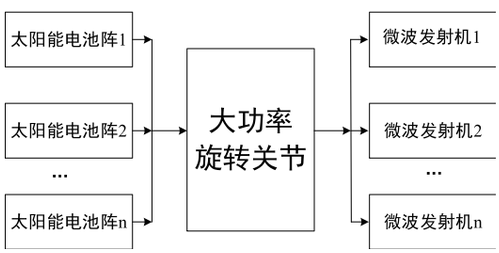



**图 1　集中式电源管理与分配方式**

**Fig.1 Centralized power management and distribution mode**

### 1.2　分布式 PMAD

分布式 PMAD 如下图 2 所示，该模式下，每个太阳能电池子阵产生的电能可直接进行变换，并通过母线传输到发射旋转接口，其主要适合于聚光空间太阳能电站概念。

分布式 PMAD 的优点是无需采用大功率旋转机构，单点不易失效，系统可靠性较高，太阳能电池阵列从发电到调节，仅需要很短的电力传输路径，所需导线少，损耗小。其缺点是为了实现系统的高效率，必须采用聚光系统，系统控制复杂，难以提供 LEO 到 GEO 轨道运输所需的大功率电能，且太阳能电池阵的面积受发射天线面积限制，系统功率的扩展很难。

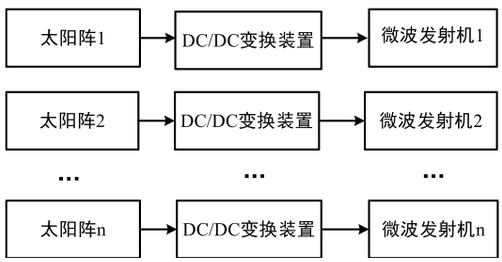



**图 2　分布式电源管理与分配方式**

**Fig.2 Distributed power management and distribution mode**

### 1.3　改进型电源系统结构

基于上述两种电池管理和功率分配技术的固有缺陷，本文提出改进型 PMAD 策略如下图 3 所示，该方案拟将太阳能电池阵列分成子阵列和分阵列两种基本形式，其中每 10 个光伏电池通过串并联组成一个电池子阵，子阵输出的功率经由一个集中的高压变换单元，将发出的高压电能汇聚到一个分布式旋转接点，每个旋转接点可同步连接 10 个电池子阵，形成一个光伏电池分阵单元，所有分阵电源通过传输母线并分配到各个微波装置，该方案与集中式 PMAD 的不同之处在于，每个太阳能电池子阵和与之相匹配的高压变换单元为一个独立的分布式系统，且高压变换单若干个模块化 DC-DC 变换器串并联组合而成，具备冗余和备份功能，可有效避免单点失效，提高了整个系统的可靠性，同时具备分布式 PMAD 方案中缩短电力的传输距离、改善电力损耗的优点。

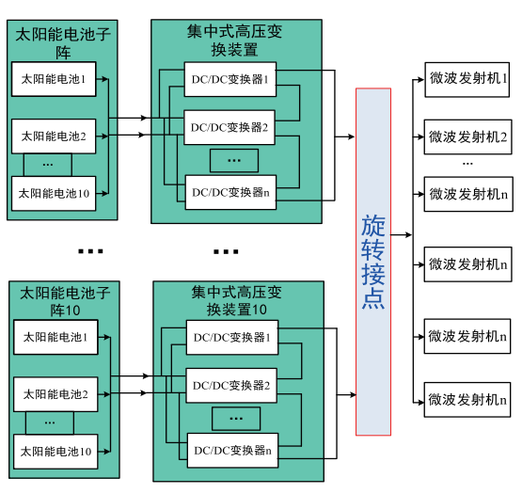



**图 3　新型混合式电源管理与分配方式**

**Fig.3 A new hybrid power management and distribution mode**

## 2 太阳能电池阵电力传输母线拓扑结构

基于上文所提新型混合式电源管理与分配方式，需要研究各个分布式旋转接点与光伏电池分阵单元的连接方式，以及从分阵电源到各微波装置的传输母线的架构，本文结合空间电站各项要求，对空间太阳能发电母线系统进行深入分析，并主要考虑从多个太阳能电池分阵输出端，到发射天线供电接入端的输电拓扑，首先假设各个太阳能电池分阵均通过高压变换单元，然后连接导电旋转关节输出高压大功率电能，且所有太阳能电池分阵按照两两一对、南北对称的分置于微波发射天线两侧，组成一个独立旋转体，并通过发射天线两侧的供电接入端为发射天线及相关设备供电，有以下三种电池阵列的电力传输母线拓扑方案。

### 2.1 单环路拓扑结构

该方案的核心思想是将所有太阳能电池分阵的输出均接入传输主母线，主母线通过 2 个接入端连接微波发射天线，结构如下图 4 所示。该方案的主要优点是可靠性高，任何分阵的失效均不影响整个供电母线的工作（功率会下降），南北电池分阵也可以进行重构，但缺点是传输主母线长度长，电流大；主母线的局部故障将引起整个电力系统较大的功率损失。

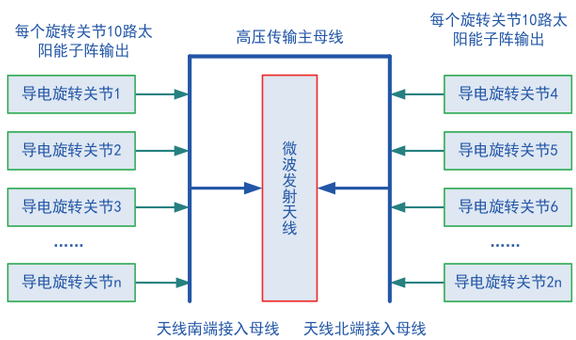



**图 4 电力传输母线拓扑结构 1**

**Fig.4 Power transmission bus topology 1**

### 2.2 双母线拓扑结构

该方案的核心思想是将南北对称的太阳能电池分阵的输出分别接入南、北传输主母线，南北传输主母线分别通过南北 2 个接入端连接微波发射天线，结构如下图 5 所示。该方案的优点是可靠性非常高，分阵的失效不影响传输主母线的工作（功率会下降）；但存在传输主母线长度长，电流大；主母线的局部故障将引起整个电力系统较大的功率损失；南北电池分阵不可以进行重构等缺点。

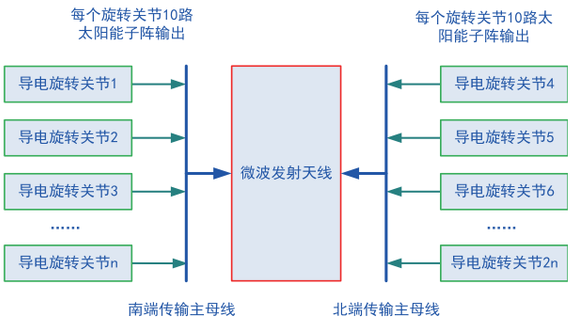



**图 5 电力传输母线拓扑结构 2**

**Fig.5 Power transmission bus topology 2**

### 2.3 多母线拓扑结构

该方案的核心思想是将南北分置的太阳能电池分阵的输出分别对应多条母线分别通过南北 2 个接入端连接微波发射天线，结构如下图 6 所示。该方案的主要优点是可靠性非常高，各母线的故障仅影响对应分阵的输出，不会引起整个电力系统较大的功率损失；各传输母线长度与位置相对应，电流较小；缺点是需要多根传输母线，重量大；占用体积大、安装复杂；南北电池分阵不可以进行重构。

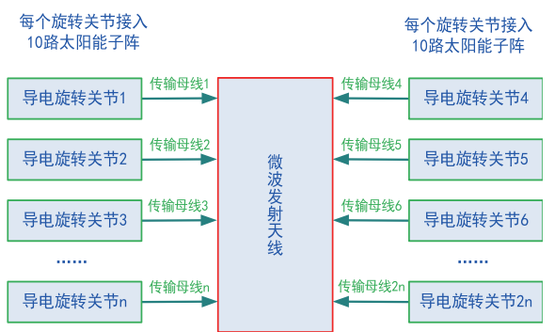



**图 6 电力传输母线拓扑结构 3**

**Fig.6 Power transmission bus topology 3**

## 3 太阳能电池分阵的供电拓扑及高压变换方案研究

在本文所提混合式空间太阳能电源管理与分配方式中，每个旋转接点同步连接 10 个电池子阵，形成一个光伏电池分阵单元，并输出 KV 等级高压，经旋转接点并入直流母线电网，因此，必须构建太阳能电池分阵的供电拓

扑结构，深入研究太阳能电池子阵到分阵的 KV 级高压变换技术。由于目前适用于宇航环境的开关器件，在考虑降额的情况下，其电压等级多在 200V 以下，因此，本文所述的一个太阳能电池分阵由 10 个 100V 输出的电池子阵组成，经过高压变换输出 1000V 高压，再经由导电旋转关节输出至直流母线。

### 3.1 基于太阳能电池分阵的整体高压变换方案

该方案的电池分阵供电拓扑结构如下图 7 所示，首先将 10 个太阳能电池子阵的输出汇聚，经过一个分阵高压变换单元将电压升高到 1000V，之后根据导电旋转关节的需求，分多路接入导电旋转关节，其优点是，只需要一台大功率高压变换单元；高压变换单元安装在 SADA 附近，力学特性较好；但缺点是可靠性低，高压变换单元的失效将导致整个分阵失效；最大功率跟踪效率低；电池子阵大电流输出电缆距离较长。

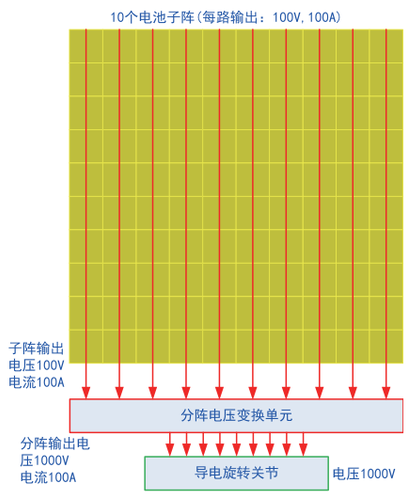



**图 7 基于太阳能电池分阵的高压变换拓扑结构**

**Fig.7 High voltage conversion based on solar cell array**

### 3.2 基于太阳能电池子阵的高压变换方案

该变换策略的拓扑结构如图 8 所示，具体是将每个太阳能电池子阵的输出经过一个子阵高压变换单元将电压升高到 1000V，之后根据导电旋转关节的需求，分多路接入导电旋转关节，其优点是可靠性高，单台高压变换单元的失效仅影响独立的子阵，不会引起整个分阵失效；最大功率跟踪效率高；电池子阵大电流输出电缆距离较短；缺点是需要 10 台大功率高压变换单元；高压变换单元如安装在子阵附近，力学特性差。

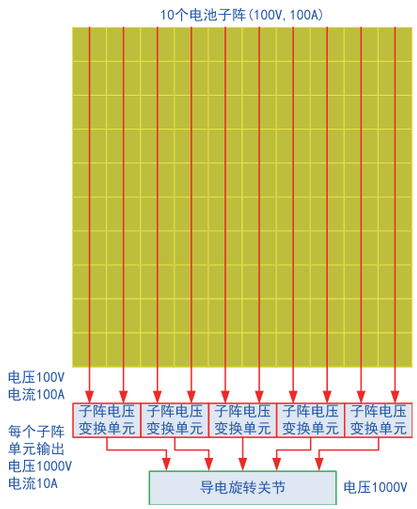



**图 8 基于太阳能电池子阵的高压变换拓扑结构**

**Fig.8 High voltage conversion topology based on solar cell sub array**

### 3.3 太阳能电池子阵输出串并联的高压变换策略

该高压变换器方案的核心思想是模块化多变换器的串并联组合升压，即将每个太阳能电池子阵的输出经过一个子阵控制单元（模块化 DC-DC 变换器）实现约 100V 稳压输出，之后将 10 个子阵控制单元进行串联，实现 1000V 高压，之后接入分阵调节单元，根据导电旋转关节的需求，分多路接入导电旋转关节，其拓扑结构如下图 9 所示。其

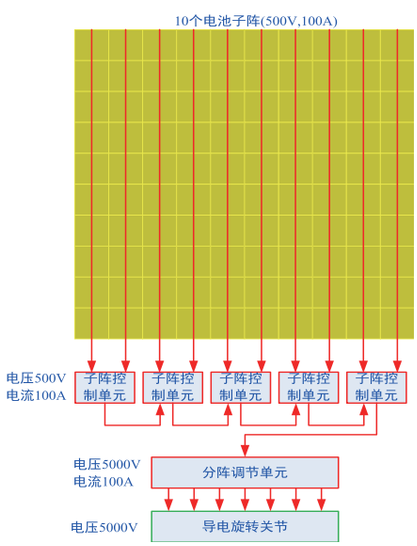



**图 9 基于太阳能电池子阵输出串并联的高压变换拓扑结构**

**Fig.9 High voltage transformation topology based on output series parallel connection of solar cell sub array**

优点是通过串联实现高压输出，不需要高压变换单元；子阵控制单元较易实现；但缺点是需要 10 台子阵控制单元和 1 台分阵调节单元；可靠性低，单台子阵控制单元的失效将影响到整个电力回路，将引起整个分阵失效；为了维持 10 台子阵控制单元的电压一致，最大功率跟踪效率低。

## 4　高压变换单元的模块化多变换器及其串并联组合控制研究

分析上文三种拓扑构架可知，太阳能电池分阵高压变换单元，有共同的核心需求，即可实现 100V 升 1000V 的高压直流变换器，而考虑到可适用于航空的开关器件的耐压水平较低，不能满足高压场合的使用条件，为了实现低压功率器件在高压电能变换中的应用，最优化的方案是采取上文 3.3 节所提出的通过模块化多变换器的串并联技术实现高压变换，即通过将单个直流变换器模块的输入和输出进行相互串联或并联来分担负载功率，从而降低功率器件电压和电流应力，现在该技术已较为成熟。

### 4.1　输入独立、输出串联 DC/DC 的组合升压变换策略

针对空间太阳能电站的电池分阵对输出高电压、大电流的要求，本文首先提出基于多模块 DC-DC 变换器输入独立、输出串联的组合升压策略，其拓扑架构如下图 10 所示，即输入侧采用独立输入，太阳能电池子阵的输出经过独立的 DC/DC 模块变换后，将输出端串联得到高电压，输出电流等于各个模块的输出电流。

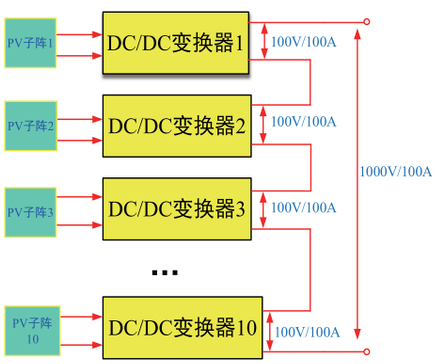



**图 10　输入独立、输出串联组合变换器拓扑**

**Fig.10 Input independent and output series converter topology**

该方案结构简单，且由于输入侧独立控制，易于实现输出均流和均压控制，也因此 DC/DC 变换器易于选择，才根据设计应用中电压等级不同，任意选择正激变换器、移相全桥变换器、双有源桥变换器以及 LLC 谐振变换器等。但此方案亦存在可靠性不高的致命性缺陷，即当任意一路或多路变换器模块因故障切除时，前级与之相连的 PV 支路，此时相当于输出断路，直接降低整个分阵发电效率；或当某一路传输效率由于 PV 板老化等问题，输出功率很低时，整个高压变换装置输出效率都会被拉低。因此需要进一步对输入独立、输出串联结构进行优化设计，以提高其可靠性。

### 4.2　改进型输入独立、输出串联组合变换器方案

针对上述输入独立、输出串联拓扑可靠性不高的缺陷，下图 11 提出基于 IPOP 的改进型输入独立、输出串联方案来保障系统可靠性，如图中所示，改进方案采用两个 IPOP 的 DC/DC 变换器替换原方案中单个 DC/DC 变换器，以改善系统的冗余度，提高可靠性，与此同时，IPOP 的两个模块化变换器可采用交错并联磁集成技术，抑制电流纹波，提高动态响应，并提高 IPOP 模块的功率密度。但该改进型方案同样存在明显缺点，即每个分阵高压变换单元需要多达 20 个 DC/DC 模块，增加了整个装置的体积和重量，恶化系统整体的功率密度。

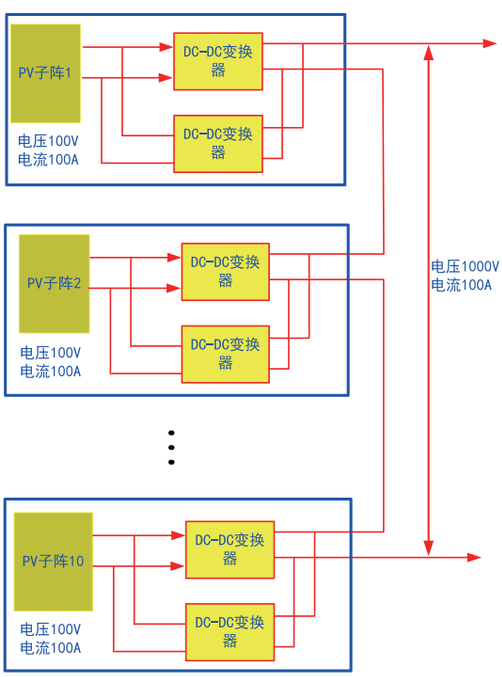



**图 11　基于 IPOP 的改进型输入独立、输出串联拓扑**

**Fig.11 Improved input independent and output series topology based on IPOP**

### 4.3 输入独立、输出串联组合变换器方案

图 12 所示为四种基本的模块化多变换器串并联组合系统，根据其联结方式不同，串并联组合系统可以分为四类，输入串联输出串联 (Input-series output-series，ISOS)、输入串联输出并联 (Input-series output-parallel，ISOP)、输入并联输出并联 (Input-parallel output-parallel，IPOP) 和输入并联输出串联 (Input-parallel output-series，IPOS)，其中 IPOS 组合变换器可适用于大功率高输出电压的场合。

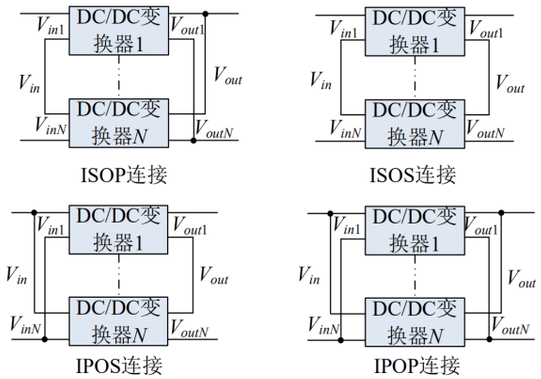



**图 12 多模块串并联系统**

**Fig.12 Multi module series parallel system**

基于此，本文提出采用 IPOS 型组合变换器构建空间太阳能电站高压变换装置如下图 13 所示，IPOS 模块采取输入并联结构，将光伏电池子阵的能量汇聚后，整体输入 IPOS 变换器单元，输出侧串联输出高压，相较于上述两种输入独立、输出串联方案，IPOS 组合变换器具备更多的优势：

(1) 首先，当单个 PV 板故障或老化深时，由于输入并联，通过均流控制，不会造成单个 DC/DC 模块的输出功率大幅度降低，单个甚至多个 PV 板的损坏与老化失效对整个装置的影响较小，保证了高压变换装置运行的可靠性。

(2) 其次，IPOS 型组合变换器具备良好的均压均流特性，即只要保证 IPOS 的输入均流，即可实现组合变换器的输出均压，易于设计控制环路。

(3) IPOS 型组合变换器系统具备冗余和备份功能，可针对单个变换器设计合适的裕量，当单个或多个 DC/DC 发生故障时，可切除故障模块，输入能量通过其余变换器升压实现高压输出，保证了系统的可靠性。

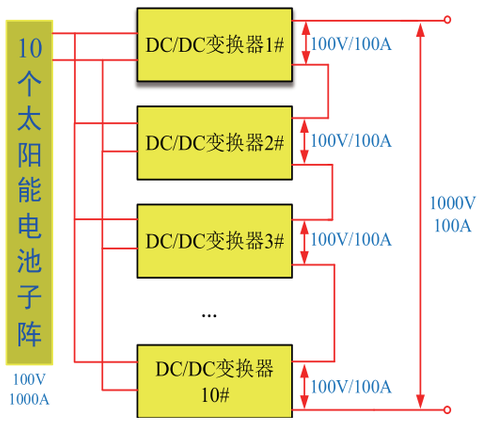



**图 13 IPOS 组合变换器**

**Fig.13 IPOS converter**

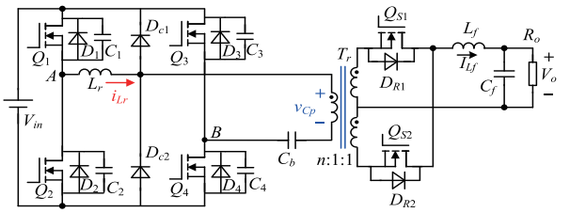
### 4.4 模块化 DC-DC 变换器拓扑研究

由上文三种模块化多变换器串并联组合高压变换的特性和优缺点的对比分析，本文选择稳定性、可靠性与高效率、高功率密度兼顾的输入并联、输出串联组合变换器升压方案，其相较于改进型输入独立、输出串联方案，整个高压变换单元所需变换器模块的数量大大降低，可有效改善系统级的功率密度，且同样具备易于实现输入均流、输出均压的控制特性。

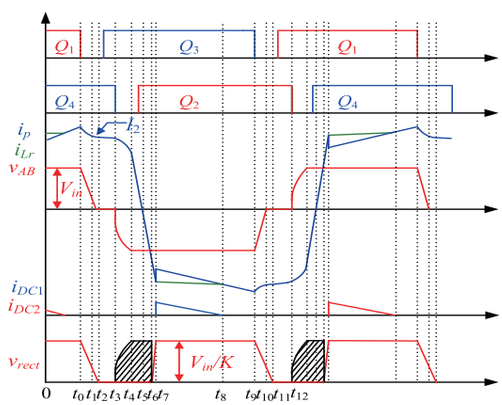
下面研究适用于空间大功率高压电力变换的模块化拓扑，根据空间电站典型的功率和电压等级，以及特殊应用环境，必须采用高效率隔离型变换拓扑，本文提出一种采用 SiC 的移相全桥 ZVS 变换器拓扑，作为输入独立、输出串联高压电力变换单元的基本模块，如下图 14(a) 所示，该拓扑为两级隔离结构，前级为 ZVS 移相全桥单元，后级采用全波整流技术，拓扑采用同步整流技术，其主要波形如下图 14(b) 所示，变换器采用模块化设计，其前级开关管采用 SiC MOSFET，改善开关损耗并降低体积，而高频变压器和滤波电感采用薄膜磁集成技术和阵列式集成磁件，磁芯采用纳米晶，以最大程度改善变换器的功率密度。

变换器一个开关周期的工作模态如下图 15 所示，以开关模态 0 和开关模态 1 为例，变换器 $t_0$ 时刻之前，$Q_1$ 和 $Q_4$ 导通，$Q_{S1}$ 导通，$Q_{S2}$ 截止，$t_0$ 时刻关断 $Q_1$，原边电流给 $C_1$ 充电，同时给 $C_3$ 放电，$V_{AB}$ 下降，此时主开关管关断，副边电流经二极管 $D_{S1}$、$Q_{S2}$ 放电，至 $t_1$ 时刻，电容 $C_1$ 的

电压上升到 $V_{in}$，$C_3$ 的电压下降到零，二极管 $D_3$ 导通。考虑其余模态的分析方法类似，因篇幅有限，此不再赘述。



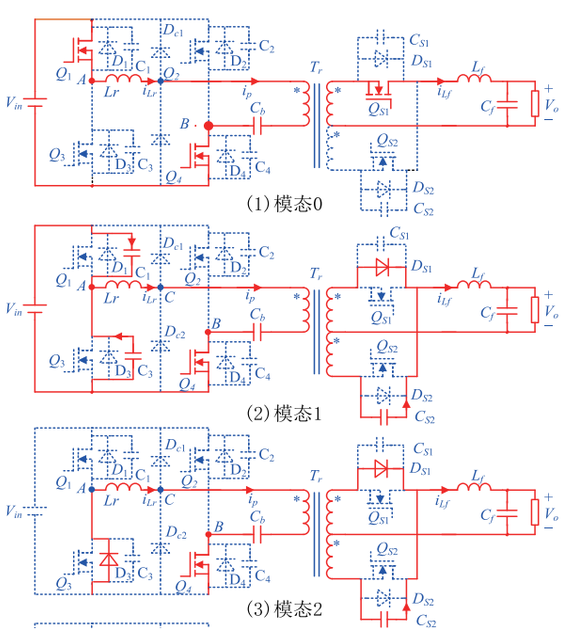

（a）拓扑结构




（b）主要波形

**图 14　本文所提新型隔离全桥软开关拓扑及其主要工作波形**

**Fig.14 The topology and main waveform of new full bridge ZVS converter**



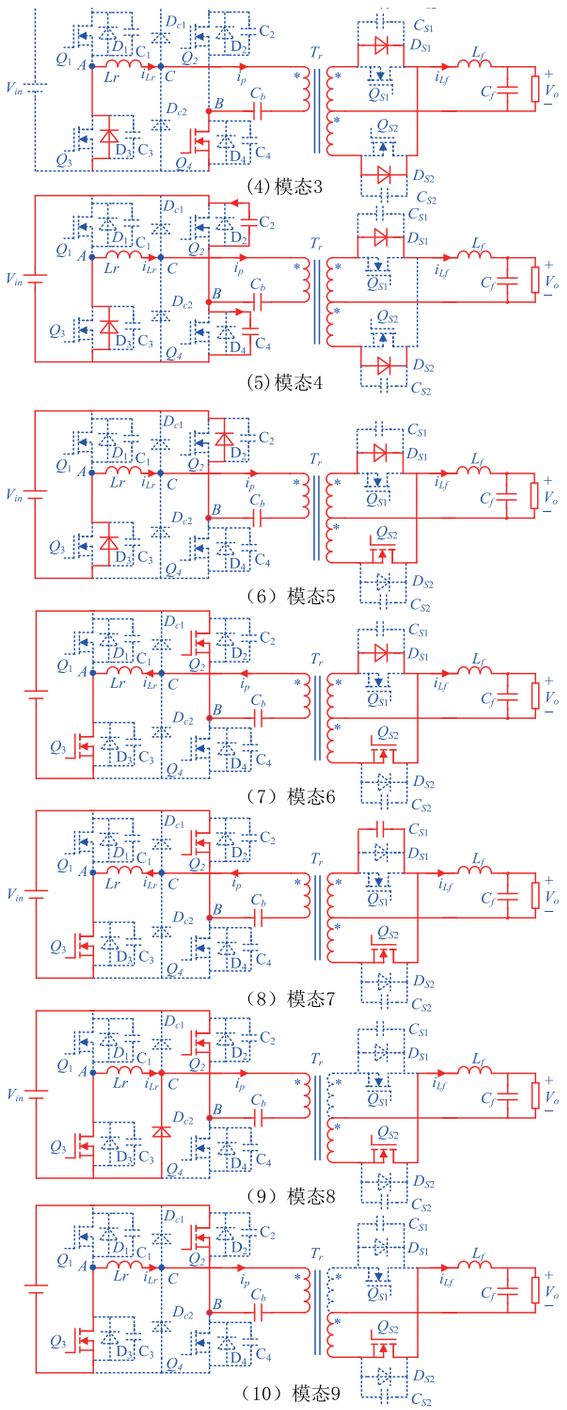




**图 15　变换器一个开关周期内各工作模态的等效电路**

**Fig.15 The equivalent circuits under various switch modes**

## 4.5　模块化 DC-DC 变换器拓扑研究

由于发射成本高昂且技术复杂，空间太阳能电站的高压变换系统和多模块变换器单元需要满足高功率，考虑到

平面变压器和平面磁集成技术已经趋于成熟，而上文所提拓扑的谐振电感和变压器可借助磁集成技术实现电感器与变压器集成，即利用变压器的漏感实现谐振电感、并将输出滤波电感进行磁件集成设计，减小变换器无源器件的体积，可考虑采用阵列式磁芯结构，如下图 16 所示构建多磁路组合的变压器和电感集成磁件，增加了集成灵活性，增加了磁芯的散热面积，降低了磁芯的热损耗，图 17 所示为传统 EE 型整体磁芯分割成阵列磁性过程，图 18 所示变压器薄膜化平面磁集成技术的实施过程，即通过磁芯切割和绕组等效，将变压器高度打薄，实现薄膜化封装，下图 19 所示为采用 PCB 基板和薄膜集成磁技术的一体化封装，将阵列式薄膜化集成磁件、薄膜电容和平面变压器技术进行无源器件封装，最大程度提高功率密度和散热效果，进一步的，再采用无源器件和有源器件混合封装的模块化设计，实现无源器件和有源器件通过 PCB 工艺进行一体化封装，可最大程度实现高功率密度模块化电源设计。

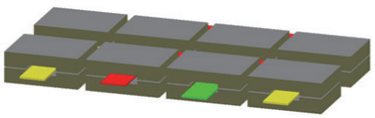


**图 16 阵列式磁芯结构示意图**

**Fig.16 Schematic diagram of array core structure**

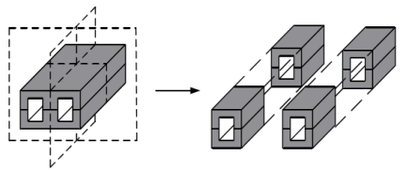


**图 17 传统 EE 型整体磁芯分割成阵列磁芯过程**

**Fig.17 Magnetic process of traditional EE monolithic core divided into array**

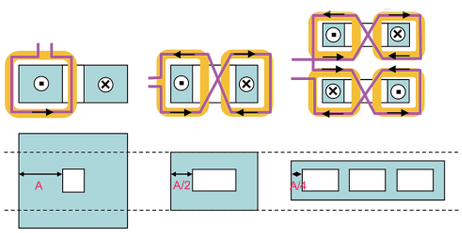



**图 18 变压器薄膜化平面磁集成技术的实施过程**

**Fig.18 Implementation process of transformer thin-film planar magnetic integration technology**

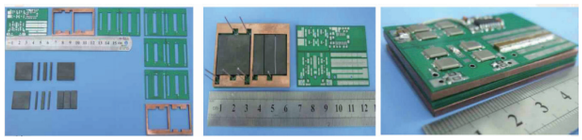


**图 19 PCB 基板和薄膜集成磁技术的一体化封装**

**Fig.19 Integrated packaging of PCB substrate and thin film integrated magnetic technology**

## 4.6 模块化 DC-DC 变换器散热器优化设计

此外，还需要考虑变换器的散热器体积设计，散热器的的热阻模型如下图 20 所示，图 21 所示为散热器总热阻的影响参数，图 22 所示为散热器重量和压降的影响参数。

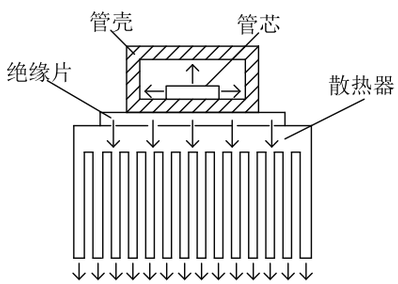



**图 20 散热器的的热阻模型**

**Fig.20 Thermal resistance model of radiator**

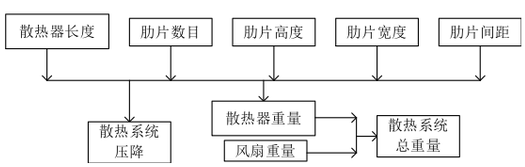



**图 21 散热器总热阻的影响参数**

**Fig.21 The influence parameters of the total heat resistance of the radiator**

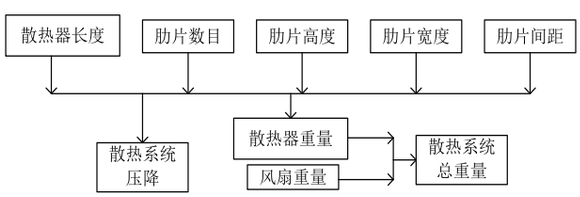



**图 22 散热器重量和压降的影响参数**

**Fig.22 The influence parameters of the weight and pressure drop of the radiator**

取 SiC 器件的结温为 200℃，考虑地面理想情况，以自然冷却为主建立机箱尺寸模型，机箱内部包括散热器、基板和温度控制平台，散热器温控平台最高 60℃，电源最高为 80℃；基于此边界条件，取环境温度为 15℃，机箱外表面与空气自然对流换热，换热系数为 15W/(m2.K)，散热器为铝型材散热器；以变换器 500W 输出为例，可取基板长 0.27m，宽 0.22 米，散热器肋片高度为 0.1m，散热器肋片厚度为 0.0025,共有 21 片肋片。气流的雷诺系数为 0，采用 Icepak 软件计算，并以温度云图显示如下图 23 所示。

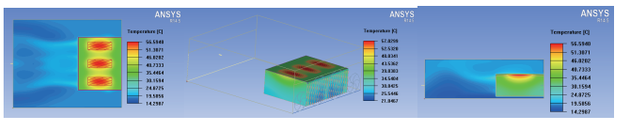


**图 23 散热器温度云图**

**Fig.23 Radiators temperature cloud map**

可以看出散热片中心最高温度为 57℃，满足空间电源温控平台 60 度要求，变换器及其器件寿命得到有效保证。

## 5 高压固态断路器设计

受空间复杂环境的影响，空间高压继电器设计困难。如此大功率下当出现故障要求立即关断时，基于物理拉弧等问题的存在，继电器无法完成立即隔离故障点的要求。

因此本文提出如下图 24 所示的基于开关器件串联均压的高压固态断路器理论,但由于空间太阳能功率为 GW 等级，因此为了降低空间能量传输过程中的损耗，势必需采用高压（5000V 等级）配电方式。而目前没有可以满足上述电压等级要求的宇航级功率器件，因此，考虑宇航系统对抗辐射的

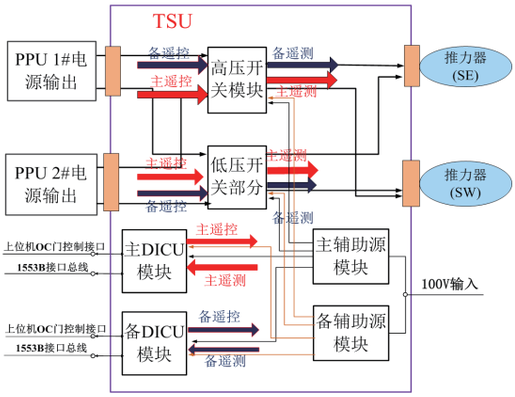



**图 24 高压固态断路器结构组成框图**

**Fig.24 Structure block diagram of high voltage solid state circuit breaker**

特殊需求，只能较成熟低压开关器件设计空间电站的高压开关模块，此为高压固态断路器的设计和实现的关键。

下图 25 所示为高压电子开关设计原则的示意图，其设计核心思想为采用多个半导体器件串联，并联提高功率和电压等级，通过磁变压器实现弱电对强电的隔离驱动。该策略具备可靠、控制驱动简单、重量轻、体积小。

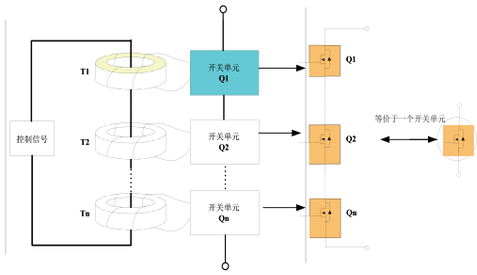



**图 25 高压电子开关实现示意图**

**Fig.25 Schematic diagram of a high voltage electronic switch**

自动均流和三重均压防护等优势，可满足空间电站在宇航环境下的特殊需求。

下图 26 所示为本文提出的基于无源缓冲技术的串联半导体器件均压策略，即，通过在 MOSFET 的 D-S 之间并联无源器件以降低开关管的电压变化率，从而达到 MOS 串联电压均衡的目的。其特点为：采用在开关器件的 D-S 之间并联无源阻、容的方式，以降低开关管的电压变化率，达到电压均衡的目的。

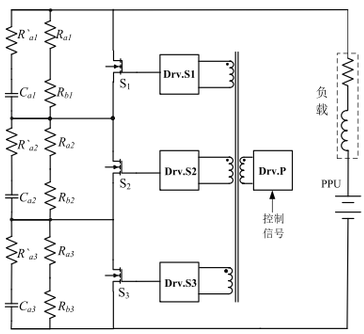



**图 26 基于无源缓冲技术的串联半导体器件均压策略**

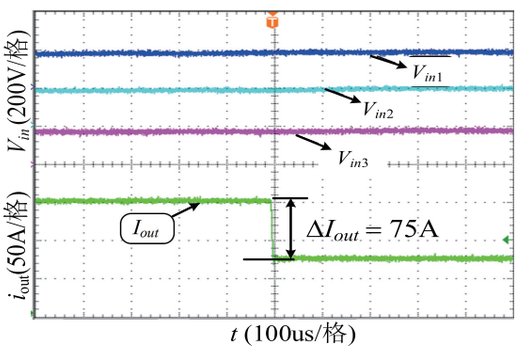
**Fig.26 Voltage balancing strategy for series semiconductor devices based on passive buffer technology**

## 6 实验研究

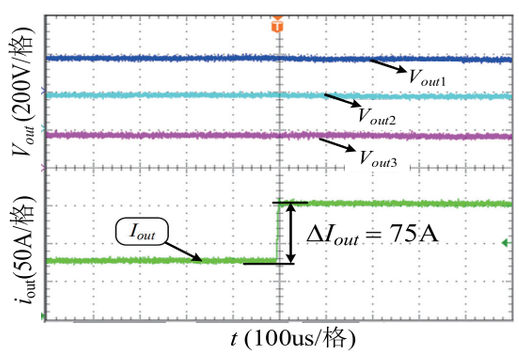
### 6.1 输入并联、输出串联的高压电力变换方案实验研究

为验证理论分析的正确性和仿真的准确性，基于上文图14所提新型拓扑和阵列式薄膜集成磁技术，设计并制作三个模块化变换器，组成IPOS的高压变换单元，并采用主从结构设计均流控制策略，即设模块1为主模块，模块2和模块3为从模块，考虑空间环境下开关器件耐压水平多在200V以下，设计三个IPOS模块的输出电压均为200V，输出电流50A，且在各模块非故障的情况下，变换器输出电压增益为1，即单个变换器工作于不升压模式，仅依靠输出侧串联完成升压输出，而当变换器出现故障模块时，余正常变换器单元工作于升压变换模式，保持输出恒定的高电压。

图27所示为三个变换器模块输入、输出侧稳态电压波形，以及负载突变的暂态输出电流波形，分析图中电流波形可知，当负载扰动时，输出电流从半载到满载，以及从满载到半载的动态性能良好，变换器可以持续输出电流，保持连续工作，且输入和输出电压均无波动，输出均压效果好，可以较好的平抑后级母线波动，支撑直流母线的稳定性。




(a) 各模块输入电压和输出电流满载 - 半载暂态波形

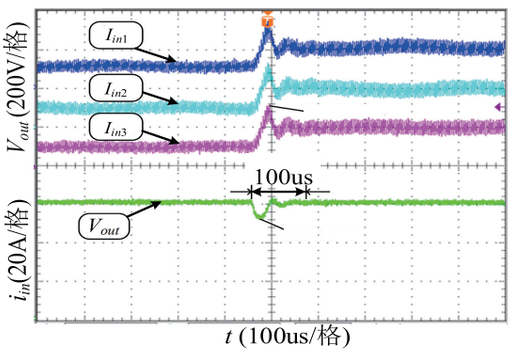



(b) 各模块输出电压和输出电流半载 - 满载暂态波形

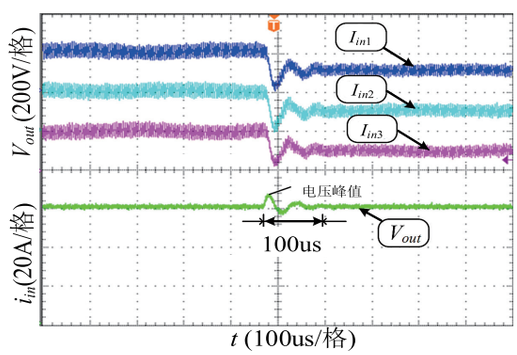
**图27 负载突变时，变换器稳态电压和暂态电流波形**

**Fig.27 Steady state voltage and transient current waveform when load is changed**

由于IPOS系统稳态控制的核心是保证输入电流均流，下面采用电阻性负载，进行负载扰动测试，图28所示为当负载突变时，各模块的输入电流暂态波形、总输出电压稳态波形，分析实验结果可知，三个模块DC-DC变换器在动态扰动时，依然能够实现均流效果，且三个模块输入电流的超调量和超调时间基本一致，显示出系统的可靠性，同时，总输出电压达到理想的高电压要求，且输出电压暂态响应时间约等于100us，仅有微小超调，可保证高压母线的稳定性。




(a) 负载突增时电流和电压波形




(b) 负载突减时电流和电压波形

**图28 负载突变时，各变换器模块的暂态输入电流和总输出电压波形**

**Fig.28 The transient input current and the total output voltage waveform when the load is suddenly changed**

空间太阳能电站系统不同于地面光伏电站，其维护成本高昂，在轨维修和模块替换不易实施，因此高压变换系统的各单元模块应具备可靠的冗余和备份能力，即变换器应具备在电池子阵发生故障，输入电压突增、突减，以及单个或多个变换器模块发生故障，输入电流突增时，依然能够保持整个分阵高压变换单元各模块均压，且持续稳定输出所需高

电压的能力。基于此，进行输入电压阶跃实验，设计输入电压由 200V 突变至 300V，以模拟太阳能电池子阵的输出电压突变情况，测试此时输入电流均流情况和输出侧升压情况，实验波形如下图 29 所示，分析可知，当输入电压发生突变时，输入侧依然保持均流，输出侧自然均压，且各变换器工作于降压模式，实现串联输出所需要的电压值，证明了 IPOS 组合变换器方案可适用于空间太阳能电站的升压变换场合。

根据空间太阳能电站的运行要求，当 IPOS 高压变换单元发生模块故障时，应具备迅速切除故障模块功能，各变换器输入电流动态增加，且保持均流，开始工作于升压模式，实现串联输出电压不变，下图 30 所示为 IPOS 实验系统稳态运行时，假设模块 2 突然故障并瞬时切除，其余模块的输入电流波形和总输出电压波形，分析波形可易知，当模块 1 切除时，输出高电压保持不变，无超调，模块 2 和 3 的输入电流保持均流，实现了整个 IPOS 高压变换系统的持续良好运行。

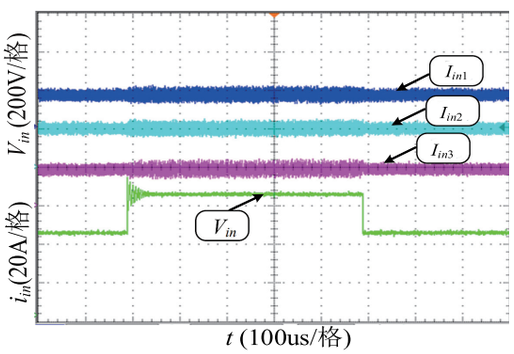



**图 29 输入电压突变时，各变换器模块的输入均流波形**

**Fig.29 The input current waveform when the input voltage is abrupt**

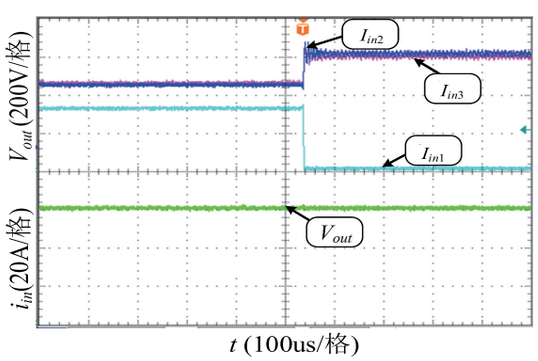



**图 30 模块切除时的输入均流和输出电压实验波形**

**Fig.30 Experimental waveforms of input current and output voltage during module reselection**

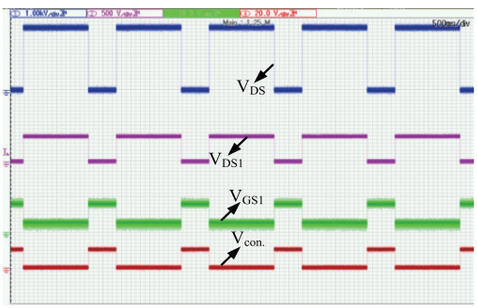
## 6.2 高压开关方案实验研究

目前宇航硅级 MOSFET 最高耐压 500V~600V，未达到设定的损耗，需要用来串并联的 MOSFET 数量多，远超设计范围。

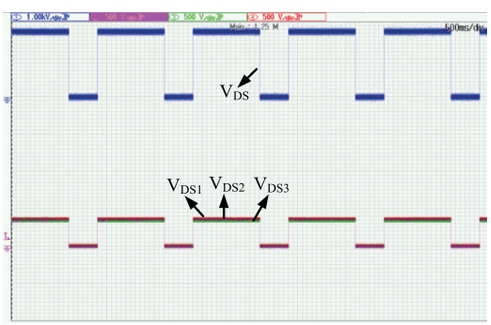
因此本文选用 CREE 公司的 SiC 型 MOSFET，型号：C2M0025120D，电流：60A，电压：1200V，导通电阻：25mΩ。直接选用裸芯片进行集成。

另，查询到的欧洲、日本新型的电推进已经采用了 SiC 型 MOSFET，型号发射中。已进行了 600kRadSi 的辐照实验，按元器件中心要求，正在对单粒子进行摸底。3 串 3 并单相阻断高压开关模块如果发生单粒子击穿，仍能正常工作。

下图 31（a）为 2000V 输入电压下、导通、闭合指令反复切换的实验波形，可知控制信号与开关动作保持高度的一致性。31（b）为 2000 输入电压下、开关进行反复切换时串联 3 个 MOS 管的均压波形，可知在高速切换条件下，3 个 MOS 管的均压情况一致。




**（a）2000V 输入电压下、导通、闭合指令反复切换的实验波形**




**（b）2000 输入电压下、开关进行反复切换时串联 3 个 MOS 管的均压波形**

**图 31 高压开关实验**

**Fig.31 High voltage switch experiment**

## 7 结论

论文针对空间太阳能电站大功率高压、高效、高功率密度电力变换技术进行了以下研究：

首先，根据空间太阳能电站高效率、高功率密度和高可靠性高压电能变换、超大功率电力传输与管理的需求，进行了空间高压大功率电力变换系统的电路拓扑和结构的优化设计，提出一种新型混合式电源系统结构，构建了适用于空间太阳能电池阵的电力传输母线结构；其次，提出采用模块化多变换器串并联组合策略，实现了太阳能电池分阵和子阵高变比、低损耗、高功率密度的大功率电力变换和高效率的功率输出；最后，提出一种新型软开关隔离全桥变换器，并进行变换器模块化磁集成研究、大功率控制技术、高效软开关技术研究、以及空间温度场分析和散热设计研究，并通过仿真和实验样机验证了模块化多变换器IPOS系统可以实现高效率高压电力变换，针对没有可适用于宇航的高压开关器件的问题，提出了一种基于低压开关器件模块化串并联的高压固态断路器理论，实现了空间电站高压继电器的设计，为进一步开展空间大功率高压电力变换系统的优化设计，提供了理论基础和工程实践，推动了大功率空间发电站电力变换与电源管理的发展。

## 参考文献

[1] 侯欣宾．不同空间太阳能电站概念方案的比较研究 [J]. 太阳能学报，2012,33(12):63-69. [Hou Xin-bin. Analysis and Comparison of various SPS concepts[J].Acta Energiae Solaris Sinica,2012,33(12):63-69.]（中文期刊）

[2] 侯欣宾．空间太阳能电站及其对微波无线能量传输技术的需求 [J]. 空间电子技术，2013, 11 (3) :1-5.[1] [Hou Xin-bin. SPS and technology Requirement for the MPT[J]. Space Electronic Technology,2013, 11(3): 1-5.]（中文期刊）

[3] 侯欣宾，王立．空间太阳能电站技术发展现状及展望 [J]. 中国航天，2015,(2): 12-15. [ Hou Xin-bin, Wang Li. Present situation and Prospect of SPS technology development [J]. Aerospace China,2015,(2):12-15.]（中文期刊）

[4] 侯欣宾，王 立，张兴华，等．多旋转关节空间太阳能电站概念方案设计 [J]. 宇航学报，2015，36 ( 11) : 1332 — 1338.[ Hou Xin-bin, Wang Li,ZHANG Xing-hua, et al. Concept Design on Multi-Rotary Joints SPS [J].Journal of Astronautics,2015, 36 ( 11) : 1332 — 1338.]（中文期刊）

[5] NRC. Electric Power from Orbit: A critique of a satellite power system[M]. Washington D C: National Academy Press, 1981.

[6] Sasaki S, Tanaka K, Higuchi K, et al. A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS [J]. Acta Astronautica, 2006, 60: 153 — 165.

[7] Sysoev K V, Pichkhadze M K, Feldman I L, et al. Concept development for a space solar power station [J]. Solar System research, 2012, 46( 7) : 548 — 554.

[8] Peter E G. Power from the Sun: its future [J]. Science, 1968,162: 867 - 886.

[9] Siri K, Conner K A, Truong C H. Uniform Voltage Distribution Control for Paralleled-Input, Series-Output Connected Converters[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, 2005: 1-11.

[10] Hou X B, Wang L, Gao J. Analysis and comparison of various SPS concepts [C]. The 62nd International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa, October 3 — 7, 2011.

[11] Shi J J, Liu T J, Cheng J, et al. Automatic Current Sharing of an Input-Parallel Output-Parallel (IPOP)-Connected DC - DC Converter System with ChainConnected Rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 2997-3016.

[12] ShiJ J, Luo J, He X N. Common-Duty-Ratio Control of Input-Series Output-Parallel Connected Phase-Shift Full-Bridge DC - DC Converter Modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3318-3329.

[13] 谷宇，张东来，邢浩江．分布式空间太阳能电站与能量传输技术研究 [J]. 电力电子技术，2015,49(10):48-51. [GU Yu , ZAHNG Dong-lai, XING Hao-jiang. Research on distributed SPS and energy transmission technology [J].Power Electronics, 2015,49(10):48-51.]（中文期刊）