

# DC-DC 转换器在 MEMS 集成中的应用与分析

王石峰<sup>1,2</sup> 江启山<sup>1,2</sup> 丁学用<sup>1,2</sup> 乔姗<sup>3</sup> 孙景伟<sup>1,2</sup>

1 三亚学院新能源与智能网联汽车学院 2 三亚学院海洋通信研究所

3 三亚学院信息与智能工程学院

DOI:10.12238/pe.v2i5.9908

**[摘要]** 针对变电站高压电气设备的高性能电源和低待机功耗,本文在微机电系统(MEMS)集成与封装中提出了一种适用于两相DC-DC转换器的具有偏移校正功能的增强型电流均衡技术,将DC-DC转换器的相数扩展到四相,以提高负载能力,并针对极轻负载下的四相功耗提出了一种特殊的静态功耗优化技术。DC-DC转换器提供低功率工作模式,并通过磁滞逻辑确保平滑的模式切换;同时,提出了一种改进的高精度电流镜采样技术,结合自适应导通时间控制,主从式电流。与功率级损耗相比,控制电路可忽略不计。这些损失因情况而异。根据实际应用,详细分析和解释了通用阻抗变换器的元件选择条件和参数设计规则;并对电路进行了仿真验证;在实现类似研究的类似性能的同时,转换器仅消耗7pA的静态电流。与传统的同步整流相比,本文提出的自适应同步整流方案在20.60%的负载条件下,可以实现3%的最大效率提高。

**[关键词]** DC-DC转换器; MEMS; 集成封装; 应用与分析

**中图分类号:** TP62+2 **文献标识码:** A

## Application and analysis of DC-DC converter in MEMS integration

Shifeng Wang<sup>1,2</sup> Qishan Jiang<sup>1,2</sup> Xueyong Ding<sup>1,2</sup> Shan Qiao<sup>3</sup> Jingwei Sun<sup>1,2</sup>

1 School of New Energy and Intelligent Networked Automobile, University of Sanya

2 Ocean Communication Research Institute, University of Sanya, Sanya

3 School of Information and Intelligence Engineering, University of Sanya, Sanya

**[Abstract]** This paper proposes an enhanced current balancing technique with offset correction function in the integration and packaging of Micro-electromechanical Systems (MEMS) for high-voltage electrical equipment in substations. The technique extends the number of phases of DC-DC converters to four phases to improve load capacity, and proposes a special static power optimization technique for four phase power consumption under extremely light loads. The DC-DC converter provides a low-power operating mode and ensures smooth mode switching through hysteresis logic; at the same time, an improved high-precision current mirror sampling technology is proposed, combined with adaptive on-time control, "master-slave" current. The control circuit is negligible compared to the power stage losses. These losses vary in different situations. According to the actual application, the conditions of component selection and the rules of parameter design of general impedance converters are analyzed and explained in detail; and the circuit is simulated and verified; while achieving similar performance of similar studies, the converter consumes only 7pA of quiescent current. Compared with traditional synchronous rectification, the adaptive synchronous rectification scheme proposed in this paper can achieve a maximum efficiency improvement of 3% under the condition of 20.60% load.

**[Key words]** DC-DC converters; MEMS; Integrated packages; Application and analysis

电力电子技术广泛应用于各种类型的电力变换器中,其核心是电力变换器的控制电路。随着半导体技术的不断发展,电力电子控制电路已经从原来的分立元件发展到现在的集成电路,构成了一种重要的半导体芯片<sup>[1]</sup>。电源管理芯片的分类包括许

多细分领域。研究人员以变电站高压电气设备中的中央处理器的电源为切入点,分析了不同电压输入/输出范围的多相直流。对直流变换器芯片的几个关键技术进行了研究<sup>[2]</sup>。体二极管的导通和关断过程是存在的,双向DC-DC变换器的应用会引入新的损

耗[3], 而对此类变换器的控制和驱动的优化设计一直未能获得更好的解决方案, 因此, 研究RC-IGBT(反向导通IGBT)双向DC-DC转换器的优化驱动方法可以为双向DC-DC换流器场景中的RC-IGBT二极管特性问题提供有效的解决方案, 有助于确保此类转换器的可靠性。

同时, 为了增强DC-DC转换器在弱电网中的表现, 国内外学者还提出了基于模拟同步发电机同步原理的功率同步控制(PSC)策略。无论是下垂控制还是功率同步控制, 它们都基于一阶系统的原理, 具有相似的动态响应特性, 为电力系统的稳定性和可靠性提供了重要保障。此外, 面对高比例电力电子设备所带来的电网频率稳定性挑战, 2008年的VSYNC项目小组提出了虚拟同步发电机(VSG)的概念, 旨在通过模拟同步发电机转子的动态特性来改善电网频率的稳定性。2016年由美国可再生能源国家实验室NREL工程师B. Johnson提出了虚拟振荡器控制(VOC), 以及2020年皇家理工学院L. Harefors提出基于功率同步控制和电压源型变流器的混合同步控制。

近年来, 电力电子的各个领域都有了新的发展。在功率电子器件方面, 功率半导体器件可分为硅基半导体、氮化镓半导体和极宽带隙半导体。在直流变换器的设计方面, 除了实现预定的功能外, 要实际应用于电子设备, 还必须满足某些条件, 这就是我们通常所说的性能要求。这些创新控制策略都是随着新能源发电逐渐替代火/水电机组使得大电网对新能源参与系统调频、调压、阻尼的需求日益迫切而提出的构网控制策略, 不仅促进了分布式电源的灵活接入和电网的稳定运行, 还为微电网和分布式能源系统的设计和优化提供了新的理论支持和技术路线。随着电力系统向更加清洁化和智能化的方向发展, 这些控制策略的研究和应用将仍然是电力电子和电网技术发展的重要领域。

### 1 DC-DC转换器静态功耗

电路的规格应与5V输出的输出电压一致, 并定义轻负载的电流为0.1A, 重负载的电流可达1A。因此, 该电压转换器的输出功率可以达到5W的最大功率输出, 并且在电压调节的容差范围内, 它可以承受3%的纹波电压的波动。当输入电压从15V下降到0V时, 所需的时间就是下降时间, 并分别测量了两个转换器在轻负载和重负载下的情况, 如图所示: 其中, 显示了传统的DC-DC转换。设备在轻负载和重负载下的上升时间分为约100ms和125ms。对于下降时间, 在轻负载下, 由于能量存储元件的放电, 下降时间长, 而在重负载下, 因为电能由负载加载。末端吸收快, 因此秋季时间短。

与传统的DC-DC转换器相比, 可以看出, 无感DC-DC转换器的效率不是很理想, 因为输出电流是由通用阻抗转换器电路提供的, 该电路本身是由运算放大器组成的线性电路。虽然效率达不到预期, 但组成无感DC-DC转换器的组件可以集成, 因此其最大的特点是有可能实现整个电压转换器电路的集成, 从而达到小型化的目的。

### 2 微机系统停机电路的设计

本文显示了计算机系统关闭时传导干扰的测试结果。在低

频带(小于6.5MHz)和7.5MHz-10MHz频带中, 前级AC/DC转换器是DC-DC系统中共模干扰的主要来源; 由于输出功率、电感器的高频传输线效应和输出负引线电感的串联谐振导致后级DC-DC转换器的共模干扰在7.1MHz处具有最大值。根据选线表, 可以使用1股AWG10漆包线, 也可以使用2股AWG13漆包线并联缠绕。共模电感器通常用单股线缠绕, 不仅成本低, 而且由于高频趋肤效应导致的交流铜损耗, 有助于衰减高频噪声。

为了增加绕组匝数, 减少绕组的分布电容, 使用与功率电感器相同的绕组方法, 并联缠绕2股AWG13漆包线。功率电感器采用等效单层绕组方式, 可以降低其寄生等效并联电容, 显著提高其高频阻抗特性(+19dB), 并抑制其与Boost输入负引线的寄生电感的串联谐振效应, 从而抑制特定频带中的共模传导干扰。

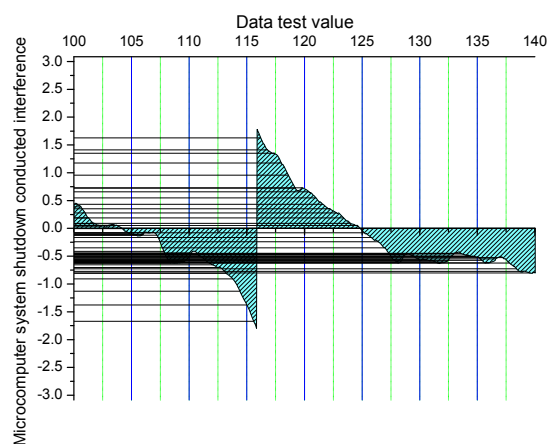


图1 微机系统停机干扰试验

工作模式识别环节主要基于通过双磁滞环节获得的电感电流方向信息, 结合常规PWM信号, 图1获得上下管的当前工作状态, 从而设计出所需的驱动控制内容。RC-IGBT管的工作模式分为IGBT模式和二极管模式两种。在分析RC-IGBT功率管的各种状态时, 需要考虑动态过程的影响。在IGBT模式下, RC-IGBT功率管需要在原有的几个状态的基础上增加一段IGBT死区阶段, 等待管去饱和阶段。这些措施包括: 在给定的输入和输出降压比下, 将占空比加倍; 大多数电源开关的最大漏源电压仅为 $V_{IN}/2$ ; 每当转换器通电时, 内部预充电电路将首先对能量转移电容器CT1和CT3充电, 直到电容器两侧的电压达到输入电压V的一半, 然后连接电源开关。直流PWM变换器的分析方法是所提出的简化的三端PWM开关模型, 该模型仅由有源开关SW和无源开关VD组成。

为了说明本文研究的非隔离DC-DC系统交流电网侧屏蔽电缆对高压电池侧传导干扰特性的影响, 测试了不使用输入屏蔽电缆(相当于隔离)的DC-DC系统。控制电路包括输出采样网络、误差放大器、补偿器、脉宽调制器和电源开关。在不增加额外抑制装置的前提下, 通过改变功率电感器的缠绕方式, 可以改善功率电感器的高频阻抗特性, 在1MHz至30MHz的频率范围内, 可以显著抑制DC-DC模式下多路转换器的网侧传导干扰。然而, DC-DC电网侧传导干扰总体上不满足CISPR32中的B类限制, 因此需要增加滤波器以进一步抑制DC-DC电网一侧传导干扰。

### 3 设备集成和封装仿真

本文主要通过仿真分析不同去饱和延迟对输出电压的影响,并比较添加载波不对称调制后和添加去饱和脉冲前的输出电压波形,验证其对死区的抑制作用。一般情况下,RC-IGBT的开关频率低于传统IGBT,因此开关频率设置为2kHz,降压比芯片的输入电压 $V$ 范围为10至12V, GaN电源开关完全导通时栅极驱动高电压。电平为4至6V,范围包括 $V_{rN}/2$ 。当驱动高电压侧的上功率管S1A、S2A、S3A和S4A时,需要浮动电压源以确保驱动电路的正常工作。

使用相对于 $V_s$ 电压浮动的自举浮动电源。它的电平产生方法类似于电荷泵:每当占空比信号驱动高侧电源开关关闭时, $V_s$ 电压就会下降。在添加非对称载波调制后,与不添加去饱和脉冲时相比,电压纹波显著降低,并且添加了去饱和过程,使得RC-IGBT体二极管在关断时的损耗更低,并且功耗降低。

### 4 示例应用和分析

从DC-DC电网侧传导干扰特性的理论分析可以看出,AC电网侧的传导干扰特性主要取决于前一级的AC/DC转换器,而前一级AC/DC转换器的传导干扰特征在很大程度上取决于输入功率电感。通过改善输入功率电感器的高频阻抗特性,可以抑制DC-DC电网侧的高频(1MHz-30MHz)传导干扰,降低电网侧滤波器的高频衰减要求。通过在DC-DC输出端添加小封装X电容器以降低负引线的寄生电感,该方案可以显著抑制后级DC-DC转换器在7.15MHz频带中的传导干扰尖峰。常用的方法是电压型和电流型控制。在这里,我们将重点介绍基于电压的控制方法。电压型控制方法的基本原理是将误差放大器的输出信号与固定频率的三角波进行比较,以产生用于控制的PWM信号。

### 5 结论

本文通过对反向电感电流检测机制的分析,提出了一种低成本自校准零电流开关;通过对传输延迟引起的异常驱动信号的分析,完善了高可靠性电源开关管驱动逻辑。这适用于变压器具有反馈绕组并且使用捕获二极管的情况,即输出变压器具有反馈线圈并且二极管提供反馈电压。一次侧控制器采用上述恒流控制器的高压功率管集成和高压电源方案,使一次侧的控制器具有简单的外围电路,而二次侧控制器集成了同步整流器

控制器,以提高器件的反激转换效率。将18BCD工艺带出试验结果与实验结果进行比较,验证了两相DC-DC变换器各种特性的影响。

(1) 本文是海南省教育厅项目资助2024年度海南省高等学校科学研究项目“高压电气设备脆弱性的可视化技术研究”(项目编号: Hnky2024ZD-18)的研究成果。(2) 本文是三亚学院虚拟教研室试点建设项目(SYJZXN202303)的研究成果。

#### [参考文献]

[1]Guo X, Xun Q, Li Z, et al. Silicon carbide converters and MEMS devices for high-temperature power electronics: A critical review[J].Micromachines,2019,10(6):406.

[2]Dinulovic D, Shousha M, Haug M, et al. Microfabricated magnetics on silicon for point of load high-frequency DC-DC converter applications[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2019,55(5):5068-5077.

[3]Touhami M, Despesse G, Hilt T, et al. Piezoelectric materials for the dc-dc converters based on piezoelectric resonators [J].Workshop on Control and Modelling of Power Electronics (COMPEL).IEEE,2021:5-8.

#### 作者简介:

王石峰(1983--),男,汉族,黑龙江省人,博士研究生,高级工程师,电气智能,三亚学院新能源与智能网联汽车学院 三亚学院海洋通信研究所。

江启山(2000--),男,汉族,福建省人,硕士研究生在读,微电子技术,三亚学院新能源与智能网联汽车学院 三亚学院海洋通信研究所。

丁学用(1979--),男,汉族,河南省人,硕士研究生,教授,通信与信息系统,三亚学院新能源与智能网联汽车学院 三亚学院海洋通信研究所。

乔姗(1988--),女,汉族,山东省人,本科,助教,人工智能技术,三亚学院信息与智能工程学院。

孙景伟(1992--),男,汉族,海南省人,硕士研究生,讲师,电路与系统,三亚学院新能源与智能网联汽车学院 三亚学院海洋通信研究所。