

Technical White Paper

适用于 **HEV/EV** 单级车载充电器的隔离式偏置电源架构



Prashant Kumar, Forest Fu, Jose Maroto

摘要

与具有 PFC ( 功率因数校正 ) 和 DC-DC 转换器级的传统双级车载充电器 (OBC) 相比，单级拓扑目前正在成为电动汽车 (EV) OBC 的首选，因为它具有更高的功率密度、更小的尺寸和可能更低的成本。矩阵转换器通常是单级 OBC 的常用拓扑。在 OBC 设计中，隔离式辅助电源包含电路的主要部分，主要用于为栅极驱动器提供所需的电源。本文提出了可提供高效隔离式辅助电源的架构，尤其适用于单级 OBC。在包含隔离式辅助电源的单级车载充电器中，栅极驱动器有多种架构可供选择。这些架构还会直接影响单级车载充电器中隔离式辅助电源所用拓扑和相关器件的选择。

内容

1 简介.....2

1.1 低压隔离式辅助电源.....2

1.2 高压偏置电源.....3

2 背对背 FET 的共源极配置中的偏置电源.....3

3 背对背及双向 FET 的共漏极配置中的偏置电源.....4

3.1 隔离式辅助电源集中式架构.....5

3.2 隔离式偏置电源半分布式架构.....5

3.3 采用 DC-DC 转换器模块的偏置电源.....6

4 使用栅极驱动器驱动变压器的隔离式辅助电源.....7

5 隔离式辅助电源架构中的冗余.....8

6 总结.....8

7 术语.....8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

隔离式辅助电源为 HEV 和 EV 中的不同栅极驱动器供电。可以使用不同的拓扑来设计隔离式辅助电源。一般而言，常用的拓扑包括反激式、推挽式、LLC 谐振和集成变压器模块。每种拓扑都具有特定的优势，但同时也存在各种权衡和挑战。拓扑的选择在很大程度上取决于隔离式辅助电源的整体架构。不同的 Si、SiC、GaN、IGBT 开关（以及可能的其他开关）需要不同的输入电压范围来提供栅源电压（ $V_{GS}$ ）。因此，隔离式辅助电源架构和器件选型也取决于设计中使用的开关。

隔离式辅助电源从 HEV 或 EV 的低压电池或者高压电池获取电能。根据电源不同，隔离式辅助电源可分为两类：低压隔离式辅助电源和高压隔离式辅助电源。隔离式辅助电源电路可以直接连接到电池，也可以使用前置稳压器连接到电池。是否需要前置稳压器，取决于器件是否具有宽输入电压范围。尽管低压电池常用于为隔离式辅助电源供电，但有时候低压和高压电池都可在系统中提供冗余。冗余电源有助于满足整个系统更高功能安全等级的要求。

矩阵转换器通常是单级 OBC 的常用拓扑。因此，本文主要重点介绍矩阵转换器隔离式辅助电源的架构。图 1-1 展示了采用通用矩阵转换器的单级 OBC，其中交流是初级侧和高压直流侧级。开关命名为 HS\_1、LS\_1、HS 偏置、LS 偏置、SW1、不同颜色框中的 SW2、SW3 及 N（中线）。彩色框表示同一盒中开关的栅极驱动器可以从隔离式辅助电源的同一输出共享，因为这些开关对  $V_{GS}$  具有相同的基准。照此考虑上述每个开关的栅极驱动器以及栅极驱动器的隔离式辅助电源的相同命名规则。本文档中各图使用此命名规则描述了不同隔离式辅助电源的不同架构。

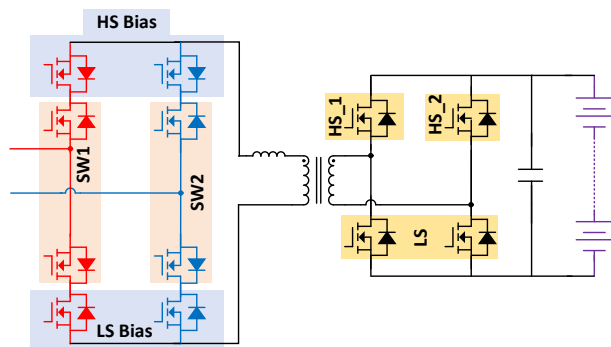


图 1-1. 单相拓扑  
(共漏极)

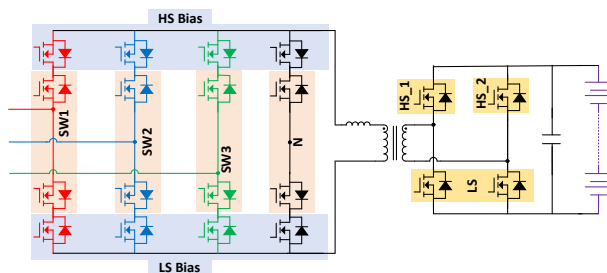


图 1-2. 三相拓扑  
(共漏极)

可使用方程式 1 计算从隔离式辅助电源到每个单通道隔离式栅极驱动器或双通道隔离式栅极驱动器的一个通道的功率要求。电源要求可能会因为开关频率、隔离式栅极驱动器驱动的开关的栅极电荷、开关的栅源电压等而异。如果隔离式偏置输出用于为多个隔离式栅极驱动器供电，则对隔离式辅助电源所需的总功率输出求和。例如，如果辅助电源输出为四个单通道隔离式栅极驱动器供电，则总功率要求为使用方程式 1 计算出的  $P_{reqd}$  的四倍。

$$P_{reqd} = V_{GS} \times Q_g \times f_{sw} + V_{DD} \times I_{DD} \quad (1)$$

### 1.1 低压隔离式辅助电源

在 HEV 和 EV 中，低压偏置电源电路通常使用 12V 电池作为电源。尽管有些系统采用 48V 低压电池，但本文重点介绍 12V 电池系统。但是，这些架构仍然可用于 48V 低压电池设计。例如，在 48V 低压电池设计中，一个用例是使用转换器将电压从 48V 降至 24V、15V 或 12V，以使用与 12V 电池相同的隔离式辅助电源器件。或者，另一个用例是采用隔离式偏置电源器件，此类器件支持为 48V 电池设计的输入电压范围。

考虑到 12V 低压电池的荷电状态 (SOC)，隔离式辅助电源需要支持更宽的输入电压范围（例如：8V 至 16V）。在冷启动和负载突降情况下，输入电压的范围要求分别进一步降低或进一步提高。12V 低压电池的宽输入电压范围可能存在差异，具体取决于 OEM。并非所有类型的拓扑和相关器件都可以支持这种宽输入电压范围。因此，在一些设计中，必须在低压电池和隔离式辅助电源之间放置一个前置稳压器，以调节隔离式辅助电源器件的输入电压。

表 1-1. 德州仪器 (TI) 低压隔离式辅助电源拓扑和相关器件

参数	开环 LLC	推挽	初级侧稳压反激式	完全集成的模块 (全桥 + 变压器)
$V_{IN}$ 最小值和最大值	9V、34V	3V、36V <sup>(1)</sup>	4.5V、65V <sup>(1)</sup>	4.5V、26.4V <sup>(1)</sup>
$P_{OUT}$ 最大值	高达 9W	高达 7.5W <sup>(1)</sup>	高达 30W <sup>(1)</sup>	高达 2.5W <sup>(1)</sup>
$V_{OUT}$ 稳压	非稳压	非稳压, $V_{IN}$ 受控	稳压	稳压
开关频率	0.1-1.2MHz	0.1-2MHz	20-350kHz	11-15MHz
隔离	取决于所用变压器			高达 5kV, 基础型或增强型
支持器件	UCC25800-Q1	SN6501-Q1 SN6505-Q1 SN6507-Q1	LM518x-Q1 LM2518x-Q1 LM515x-Q1 LM34xxx-Q1	UCC1413x-Q1 UCC1414x-Q1 UCC1424x-Q1 UCC1524x-Q1 UCC34141-Q1 UCC35131-Q1
优点	高效率 低 EMI 高 CMTI	宽 $V_{in}$ 范围 高压线路调整	高效率 宽 $V_{in}$ 范围 高负载和线路调整	无需外部变压器 坚固耐用、可承受振动 小尺寸、高度低
挑战	前置稳压器的要求	在低 $I_{out}$ (50mA) 下效率低	反激式变压器隔离栅上的寄生电容	低效率 功率限制

(1) 取决于器件的型号。

## 1.2 高压偏置电源

在 HEV 和 EV 中, 高压偏置电源电路使用高压电池作为电源。作为高压电池, 400V 和 800V 电压电池通常是 EV 中最常见的电池。连接高压电池的隔离式辅助电源需要支持更宽的输入电压范围。HV 电池的宽输入电压要求范围类似于不同 SoC 以及负载突降情况下 LV 电池的宽输入电压要求范围。根据电池的 SoC, 必须支持更宽的输入电压范围。例如, 400V 电池通常考虑 240V 至 450V 的电压范围, 800V 电池通常考虑 550V 至 950V 的电压范围。但是, 此电压范围可能会因 OEM 要求而异。

尽管高压电池可用作隔离式辅助电源的主要电源, 但大多数情况下该电池用于提供冗余。从技术角度以及设法降低成本的角度来看, 通常选择反激式拓扑来实现如此大和宽的输入电压范围。

表 1-2. 德州仪器 (TI) 高压隔离式辅助电源拓扑和相关器件

器件	UCC28C56H-Q1	UCC28700-Q1	UCC28740-Q1 UCC28730-Q1	UCC28781-Q1
开关类型	硬开关式	谷底开关	谷底开关	零电压开关 (ZVS)
反馈稳压 <sup>(1)</sup>	初级   次级 (光耦仿真器)	初级	初级   次级 (光耦仿真器)	次级 (光耦仿真器)
集成式高压启动	否	否	是	否
典型功率级别	20W - 100W	2W - 65W	2W - 65W	50W - 150W
拓扑	反激式	反激式	反激式	反激式
设计资源	UCC28C56EVM-066	不适用	PMP23431   PMP41009	UCC28781EVM-053

(1) 初级侧调节从设计中移除了光耦仿真器。

## 2 背对背 FET 的共源极配置中的偏置电源

图 2-1 展示了共源极配置中的背对背 FET。共源极配置总共需要 11 个隔离式偏置电源输出, 其中 8 个在交流侧, 3 个在 HV 电池侧。在共源极配置的交流侧进行的背对背切换操作可以共用同一套隔离式偏置电源输出。在共源单级 OBC 配置中, 隔离式偏置电源与双级 OBC 类似, 但存在一些差异。例如, 在单级 OBC 中不存在主直流侧, 而且低侧开关也不存在共用同一偏置电源输出的情况。有关具有 PFC 和 DC-DC 两级结构的双级 OBC 的隔离式偏置电源架构的详细说明, 请参阅 [适用于 HEV 和 EV 车载充电器的隔离式偏置电源架构](#) 技术白皮书。

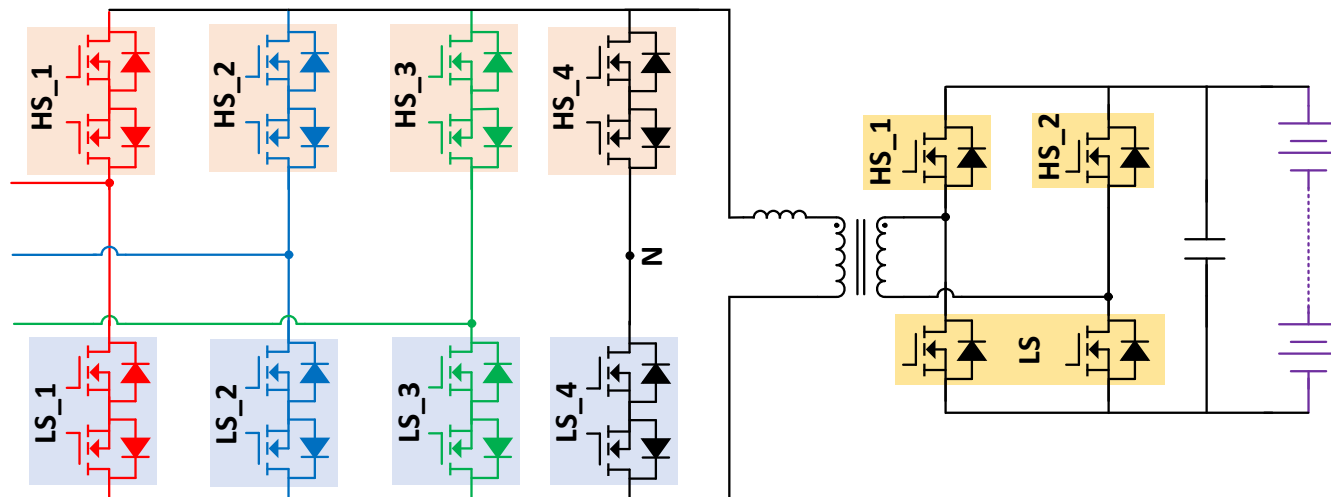


图 2-1. 具有共源极配置的 3 相单级 OBC 的方框图

### 3 背对背及双向 FET 的共漏极配置中的偏置电源

背对背 FET 及双向开关的共漏极配置极大地影响了单级 OBC 初级侧隔离式辅助电源的架构。开关没有共源极，因此无法使用相同的隔离式辅助电源输出为两个 FET 供电。在双向开关中，可以使用两个单通道栅极驱动器或一个双通道栅极驱动器独立驱动单个封装内的两个 FET。因此，双向开关需要两个不同的隔离式辅助电源。在图 3-1 中，相同颜色阴影 FET 可以共享相同的隔离式辅助电源输出。

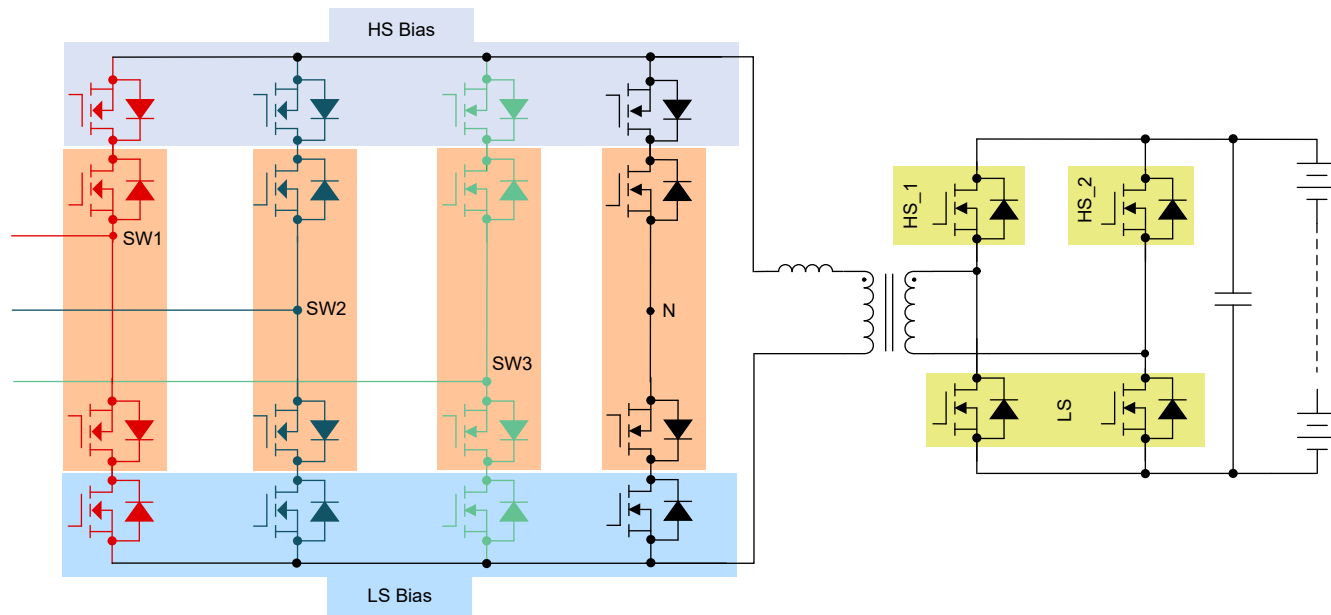


图 3-1. 具有共漏极配置的 3 相单级 OBC 的方框图

共漏极配置总共需要九个隔离式辅助电源输出，其中六个在交流侧，三个在 HV 电池侧。顶部四个 FET 和底部四个 FET 具有共源极，且可共享相同的隔离式偏置电源输出。同样，开关节点处的两个 FET (SW1、SW2、SW3、N) 也具有一个共源极，使 FET 能够共享同一个隔离式辅助电源输出。

共漏极配置 (在双向开关的情况下更常见) 需要的隔离式辅助电源输出比节 2 中所示的共源极配置少两个。在共源极架构中，两个电源开关紧密背靠背放置。因此，由于 PCB 布局中的寄生效应，共源极架构在两个背靠背开关栅极的  $V_{gs}$  差异方面遇到的问题较少。但是，在共漏极配置中，请更加注意这些开关栅极处  $V_{gs}$  的差异，尤其是在 SW1、SW2、SW3 和 N 的情况下，因为开关节点 (具有共源极) 在两个开关之间可能具有更高的寄生效应 (例如杂散电感)。

### 3.1 隔离式辅助电源集中式架构

在该架构中，使用单级偏置电源，其中偏置电源器件直接与低压电池连接。该连接支持宽输入电压范围并在闭环运行期间工作。根据额定功率，可使用单个器件或多个器件来实现这种类型的架构。多绕组变压器用于为不同的栅极驱动器提供隔离式输出。可使用同一变压器输出绕组为共享同一接地端的低侧栅极驱动器提供隔离式辅助电源。如图 3-2 所示，6 绕组变压器可用于在交流侧提供隔离电源。如果 6 绕组变压器的设计过于复杂，也可以使用多个变压器，其次级侧采用 2 绕组或 3 绕组，以降低变压器设计的复杂性。

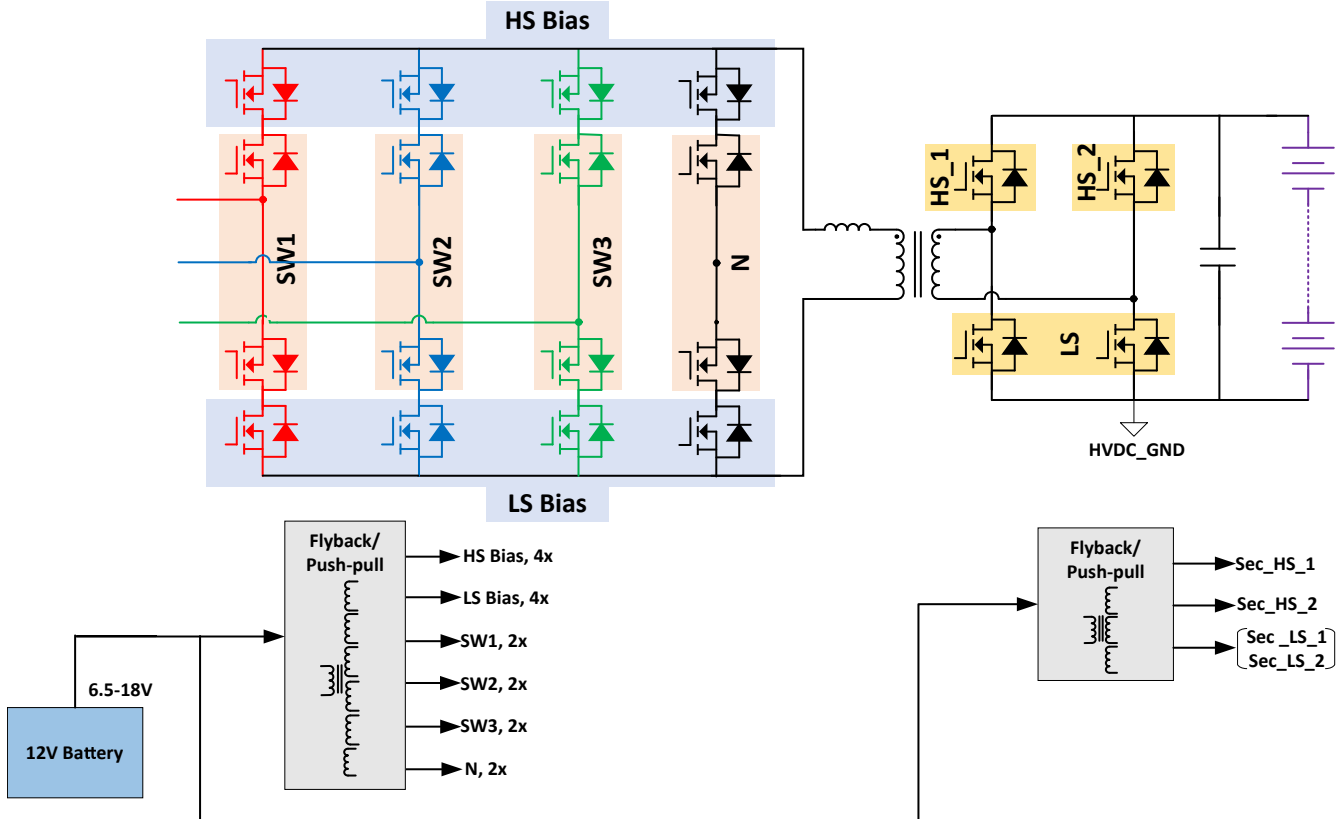


图 3-2. 具有共漏极配置的单级 OBC 中的集中式偏置电源架构

集中式辅助电源架构优先选择以下拓扑和相关器件：

- 反激式控制器：[LM5155-Q1](#)、[LM5156-Q1](#)、[LM515x-Q1](#)、[LM3481-Q1](#)
- 反激式转换器：[LM5180-Q1](#)、[LM2518x-Q1](#)
- 推挽式转换器：[SN6507-Q1](#)

隔离式偏置电源的不同拓扑具有特定的优势和取舍。反激式器件有助于在宽电压输入范围内实现高效率、高负载调整和高线路调整精度等优势。紧密耦合反激式变压器设计具有低漏电感，但这种设计的缺点是变压器隔离栅两端的寄生电容相对较高。由于变压器的寄生电容高，有时需要在 EMI 滤波器设计中采取适当的措施来抑制 EMI 和 CMTI。推挽式器件提供不错的效率、高 CMTI、低 EMI 等优势。在推挽拓扑结构中，输出侧需要一个额外的电感器来控制占空比，以支持在宽输入电压范围内运行。

### 3.2 隔离式偏置电源半分布式架构

在半分布式架构中，使用两级隔离式偏置电源。第一级使用宽输入电压范围的器件生成稳压轨。第二级使用其他器件为隔离式栅极驱动器提供隔离式偏置电源。在这种情况下，对于隔离式偏置电源，不仅可以使用闭环器件，还可以使用开环器件，因为第一级输出了稳压轨。常见的情况是，第一级期间使用的器件还会生成其他需要的电压轨，为车载充电器电路的微控制器、传感器、隔离器（等器件）供电。根据要求，第一级可选择隔离式（反激式或推挽式）或非隔离式（SEPIC 或降压/升压）拓扑。



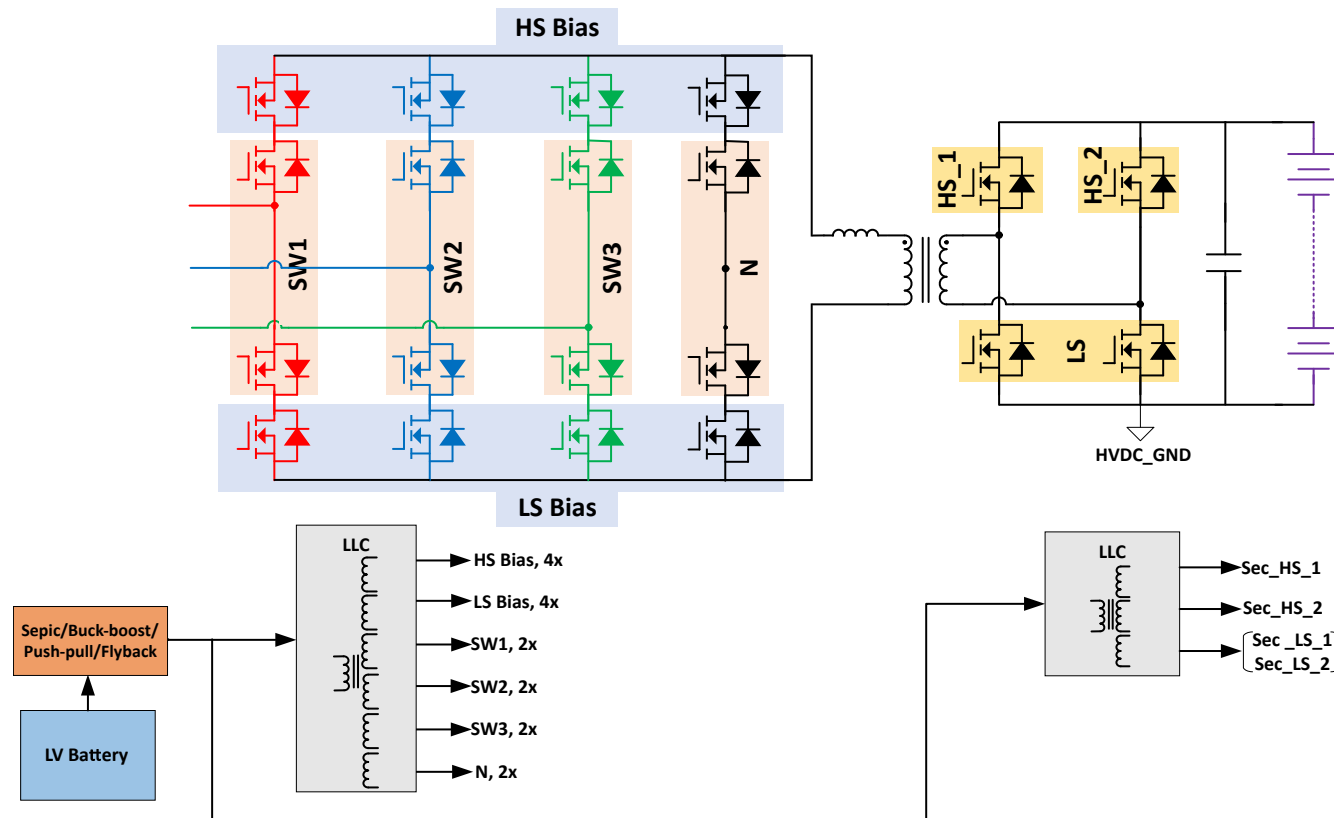


图 3-3. 具有共漏极配置的单级 OBC 中的半分布式辅助电源架构

对于第一级，可以按照集中式架构部分中提到的方式，使用反激式和推挽式器件选择隔离式拓扑。对于非隔离式拓扑，可选择 SEPIC 和降压/升压转换器。对于第二级，可选择闭环或开环隔离式辅助电源器件。以下拓扑和相关器件可用作半分布式辅助电源架构的优先选项：

- LLC 谐振转换器：[UCC25800-Q1](#)
- 反激式控制器：[LM5155-Q1](#)、[LM5156-Q1](#)、[LM515x-Q1](#) 以及 [LM3481-Q1](#)
- 反激式转换器：[LM5180-Q1](#) 和 [LM2518x-Q1](#)
- 推挽式转换器：[SN6507-Q1](#) 和 [SN6505D-Q1](#)
- SEPIC：[LM5155-Q1](#)、[LM5156-Q1](#)、[LM5157-Q1](#) 和 [LM5158-Q1](#)
- 降压/升压：[TPS55287-Q1](#)、[TPS55289-Q1](#) 和 [LM51xx-Q1](#)

UCC25800-Q1 是一款基于 LLC 谐振开环运行的变压器驱动器器件，可产生隔离式辅助电源。该器件具有多种优点，包括良好的效率、低 EMI、高 CMTI 等。由于是开环运行，所以该器件更偏向于稳压轨。由于 LLC 中的漏电感是动力总成的一部分，因此该拓扑可支持使用漏电感更高的变压器，同时相应地减小变压器隔离栅上的寄生初级-次级电容。这些特性有助于改善 EMI 性能和提高 CMTI。这种增加的 CMTI 的一个优点是，LLC 谐振拓扑现在是使用具有高转换速率的 GaN 开关和高频操作的车载充电器设计的绝佳选择。

### 3.3 采用 DC-DC 转换器模块的偏置电源

在分布式架构中，使用具有集成变压器的 DC-DC 转换器模块可能是一个有益的选择，因为更小的尺寸和更高的功率密度是设计的主要关注点。这些模块在 11MHz 至 15MHz 的极高频范围内进行开关，这可以减小内置变压器的尺寸、高度和重量，从而减少 PCB 所需的空间。这些集成式 DC-DC 转换器具有高集成度，省去了许多外部元件，并可帮助设计人员通过更简单的 PCB 布局实现抗振动稳健型设计。集成模块在闭环控制下运行，提供严格稳压输出，这在  $V_{gs}$  范围较窄的双向 GaN 开关情况下颇具优势。

TI 提供多种型号的直流/直流集成模块。借助这些型号，用户可以灵活地选择适合系统可用输入电压轨和系统所需输出电压的器件。表 3-1 展示了所有型号和技术规格。

表 3-1. 德州仪器 (TI) 集成变压器 DC-DC 转换器模块

器件型号	隔离强度	V <sub>IN</sub>   V <sub>OUT</sub> 标称值	V <sub>IN</sub> 范围	V <sub>OUT</sub> 范围	典型功率
UCC14240-Q1 UCC14241-Q1	基础型 (3kV <sub>RMS</sub> ) 增强型 (5kV <sub>RMS</sub> )	24V <sub>IN</sub>   25V <sub>OUT</sub>	21V - 27V	15V - 25V	2.0W
UCC14140-Q1 UCC14141-Q1	基础型 (3kV <sub>RMS</sub> ) 增强型 (5kV <sub>RMS</sub> )	12V <sub>IN</sub>   25V <sub>OUT</sub>	10.8V - 13.2V 8V - 18V	15V - 25V 15V - 25V	1.5W 1.0W
UCC14340-Q1 UCC14341-Q1	基础型 (3kV <sub>RMS</sub> ) 增强型 (5kV <sub>RMS</sub> )	15V <sub>IN</sub>   25V <sub>OUT</sub>	13.5V - 16.5V	15V - 25V	1.5W
UCC14130-Q1 UCC14131-Q1	基础型 (3kV <sub>RMS</sub> ) 增强型 (5kV <sub>RMS</sub> )	12 - 15V <sub>IN</sub>   12V - 15V <sub>OUT</sub>	12V - 15V 10V - 18V 15V - 18V 14V - 18V	12V - 15V 10V - 12V 15V - 18V 10V - 18V	1.5W、 1.0W、1.5W 1.0W
UCC15240-Q1 UCC15241-Q1	基础型 (3kV <sub>RMS</sub> ) 增强型 (5kV <sub>RMS</sub> )	24V <sub>IN</sub>   25V <sub>OUT</sub>	21V - 27V	15V - 25V	2.5W
UCC34141-Q1	增强型 (5kV <sub>RMS</sub> )	12V <sub>IN</sub>   25V <sub>OUT</sub>	8V - 20V 5.5V - 8V	V <sub>DD-COM</sub> 15V - 20V V <sub>EE-COM</sub> - 2V - (-)8V	1.5W >0.3W
UCC35131-Q1	增强型 (5kV <sub>RMS</sub> )	12V <sub>IN</sub>   12V - 20V <sub>OUT</sub>	10.8V - 13.2V 8V - 20V 5.5V - 8V	V <sub>DD-COM</sub> 15V - 20V V <sub>EE-COM</sub> - 2V - (-)8V	2.0W 1.5W >0.3W

是否要求前置稳压器，以便为 DC-DC 集成模块提供稳压轨，取决于隔离式栅极驱动器的电源要求。如表 3-1 中所述，在输入电压范围很宽的情况下，DC-DC 集成模块直接连接到电池时会发生功率降额。

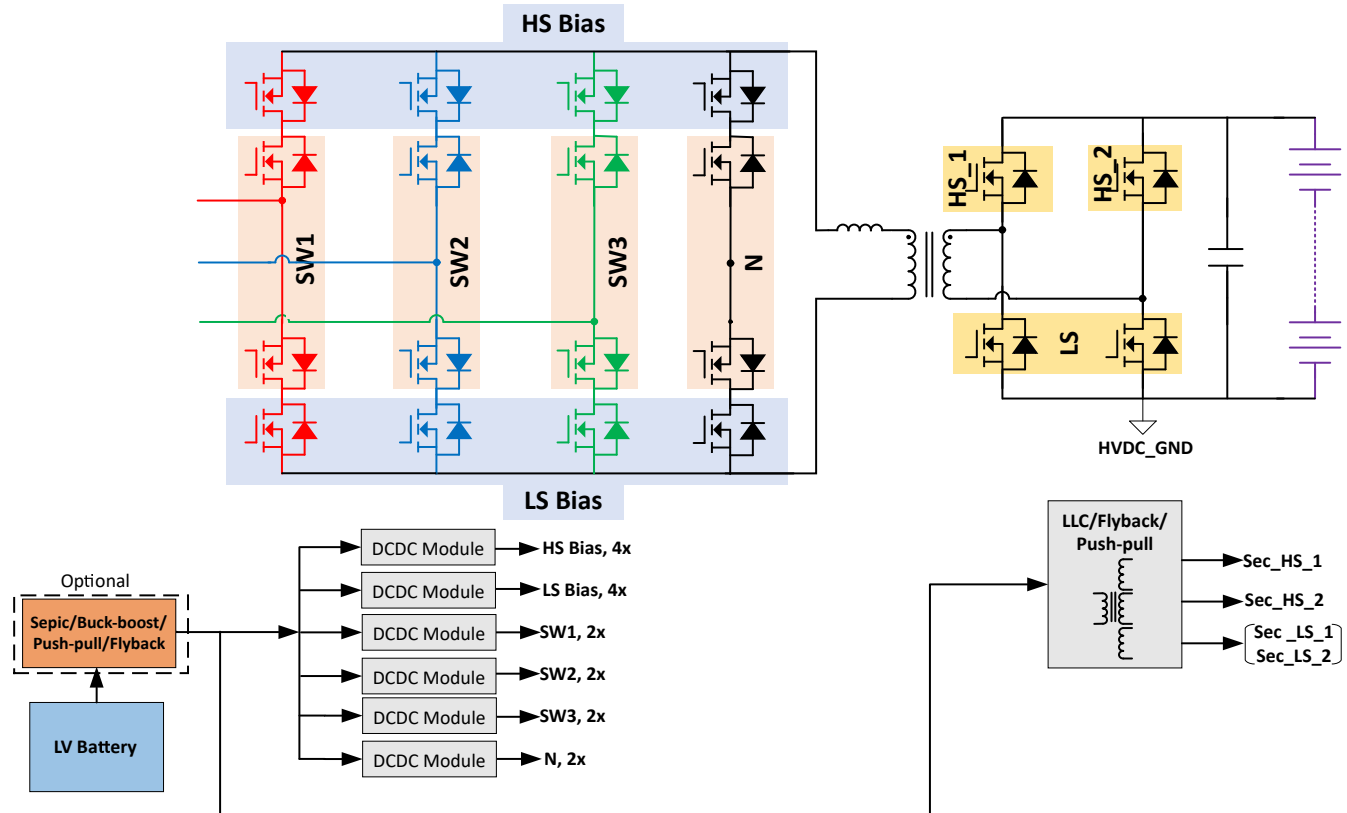


图 3-4. 采用 DC-DC 模块且具有共漏极配置的单级 OBC 中的偏置电源架构

#### 4 使用栅极驱动器驱动变压器的隔离式辅助电源

对于隔离式辅助电源生成，栅极驱动器可以驱动变压器（通常是 UCC27624-Q1 等低侧栅极驱动器）。在该方法中，使用时钟、微控制器等附加器件生成特定占空比的 PWM 信号，然后该信号驱动变压器产生隔离式辅助电

源。但是，本文前面提到的架构专门针对隔离式辅助电源应用，相较于使用栅极驱动器驱动变压器以产生隔离式辅助电源的方法，这些架构更受欢迎。

以下器件可用作 PWM 发生器和非隔离式栅极驱动器的首选器件来驱动变压器，从而为隔离式栅极驱动器生成隔离式偏置电源：

- PWM 控制器：[UC2843A-Q1](#)、[UCC28C56H-Q1](#)、[TPS40210-Q1](#) 和 [LM25037-Q1](#)
- 栅极驱动器：[UCC27624-Q1](#) 和 [UCC27524A-Q1](#)

## 5 隔离式辅助电源架构中的冗余

功能安全是汽车行业的一个重要话题。从功能安全的角度来看，冗余架构具有更高的可靠性，但该设计可能会额外增加系统的成本。但是，隔离式辅助电源中的冗余可以使整个系统更可靠。这种冗余意味着隔离式辅助电源同时通过高压和低压电池供电。冗余可以提供给所有器件，也可以仅提供给低侧或高侧器件。在这种冗余架构中，如果低压或高压电池发生故障，所有栅极驱动器仍由另一个电池供电。一般来说，栅极驱动器主要使用低压电池供电，而高压电池用于提供冗余。

高压隔离式辅助电源部分中提到的器件是通过高压电池提供冗余的理想选择。

## 6 总结

随着当前市场趋势从两级车载充电器转向单级车载充电器，隔离式辅助电源的架构也随着这一趋势不断发展，尤其是在具有共漏极的双向开关的情况下。本文总结了单级 OBC 的隔离式辅助电源的几种可能架构，包括一些最常用的架构。根据所选的架构，本文研究了选择拓扑（反激式、推挽式、LLC 谐振、集成 DC-DC 模块等）和相关器件的后续步骤。在要使用的架构类型和拓扑的决策过程中，设计复杂性和成本以及功能安全要求发挥着至关重要的作用。

## 7 术语

<b>AC</b>	交流
<b>CAN</b>	控制器局域网
<b>DC</b>	直流
<b>EV</b>	电动汽车
<b>FET</b>	场效应晶体管
<b>HEV</b>	混合动力汽车
<b>HS</b>	高侧
<b>LDO</b>	低压降稳压器
<b>LLC</b>	电感器-电感器电容
<b>LS</b>	低侧
<b>OBC</b>	车载充电器
<b>OEM</b>	原始设备制造商
<b>PFC</b>	功率因数校正
<b>PMIC</b>	电源管理集成电路
<b>Pri</b>	初级
<b>PSR</b>	初级侧调节
<b>Sec</b>	次级
<b>SEPIC</b>	单端初级电感转换器
<b>SOC</b>	荷电状态
<b>V<sub>GS</sub></b>	栅源电压
<b>V<sub>IN</sub></b>	输入电压
<b>V<sub>OUT</sub></b>	输出电压



## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月