



Prashant Kumar, Forest Fu

Systems Engineering and Marketing

摘要

汽车行业中的电动汽车 (EV) 和混合动力电动汽车 (HEV) 数量正在不断增加。车载充电器是 HEV 和 EV 整体电子设备中的重要部件之一，用于为高压电池充电。在车载充电器电路设计中，隔离式辅助电源包含电路的主要部分。这些充电器用于为栅极驱动器提供所需的电源。在车载充电器的功率因数校正 (PFC) 和直流/直流转换器级中，栅极驱动器的隔离式辅助电源有多种可能的架构。这些架构还会影响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 引言.....	1
1.1 低压隔离式辅助电源.....	2
1.2 高压隔离式辅助电源.....	3
2 隔离式辅助电源集中式架构.....	3
3 隔离式辅助电源半分布式架构.....	5
4 采用直流/直流转换器模块的分布式架构.....	6
5 使用栅极驱动器驱动变压器的隔离式辅助电源.....	8
6 隔离式辅助电源架构中的冗余.....	8
7 总结.....	9
8 术语.....	9

插图清单

图 1-1. 车载充电器通用电路.....	2
图 2-1. 具有三个隔离式辅助电源器件的集中式架构.....	3
图 2-2. 采用两个隔离式辅助电源器件的集中式架构.....	4
图 2-3. 采用单个隔离式辅助电源器件的集中式架构.....	4
图 3-1. 隔离式辅助电源半分布式架构.....	5
图 4-1. 组合使用反激式和推挽式器件与直流/直流模块的架构.....	6
图 4-2. 采用自举方法的隔离式辅助电源架构.....	7
图 4-3. 使用全分布式架构的隔离式辅助电源.....	7
图 5-1. 使用栅极驱动器驱动变压器以生成隔离式辅助电源的架构.....	8

表格清单

表 1-1. 德州仪器 (TI) 低压隔离式辅助电源拓扑和相关器件.....	2
表 1-2. 德州仪器 (TI) 高压隔离式辅助电源拓扑和相关器件.....	3
表 4-1. 德州仪器 (TI) 集成变压器设计.....	6

1 引言

隔离式辅助电源为 HEV 和 EV 中的不同栅极驱动器电路供电。可以使用不同的拓扑来设计隔离式辅助电源。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。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，但有时低压和高压电池都用于在系统中提供冗余。冗余电源可以使整个系统实现更高的功能安全性。

图 1-1 展示了具有 PFC、直流/直流初级和直流/直流次级的通用车载充电器电路。开关命名为 PFC_HS_1、Pri_HS_1、Sec_HS_1 等。此命名规则的第一部分指示开关属于车载充电器的 PFC 级、直流/直流初级还是直流/直流次级。第二部分显示了电路使用高侧开关还是低侧开关。第三部分显示了高侧或低侧开关编号。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。本文档的各图中使用此命名规则来描述不同的隔离式辅助电源架构。

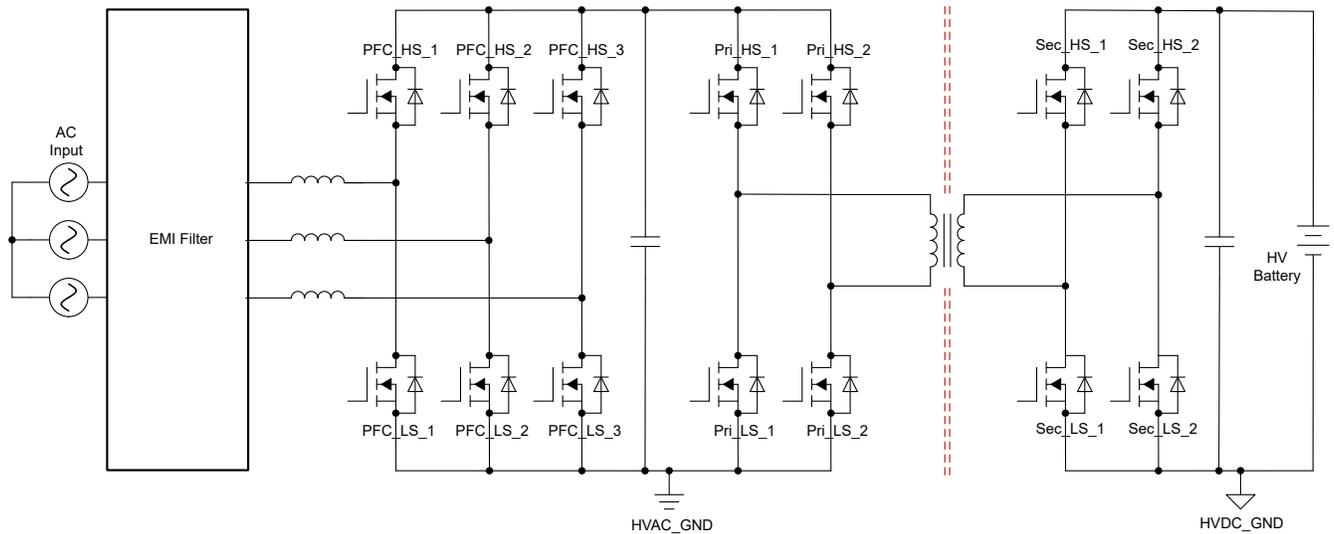


图 1-1. 车载充电器通用电路

1.1 低压隔离式辅助电源

在 HEV 和 EV 中，低压隔离式辅助电源电路通常使用 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，这些架构仍然可以用于 48V 低压电池设计。在本例中，一种选择是使用转换器来降低电压，以便使用相同的器件，另一种选择是让器件支持专为 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，输入电压范围要求分别进一步降低和提高。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，需要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 ⁽¹⁾	4.5V、65V ⁽¹⁾	4.5V、26.4V ⁽¹⁾
P_{OUT} 最大值	高达 9W	高达 7.5W ⁽¹⁾	高达 30W ⁽¹⁾	高达 2.5W ⁽¹⁾
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	视所用变压器而定			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 UCC1434x-Q1 UCC1524x-Q1

(1) 取决于器件的型号。

1.2 高压隔离式辅助电源

在 HEV 和 EV 中，高压隔离式辅助电源电路使用高压电池作为电源。作为高压电池，400V 和 800V 电压电池在 HEV 和 EV 中最为常见。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。支持宽输入电压范围的需求与低压电池类似：高压电池的 SOC 和负载突降场景。根据电池的 SOC，需要支持更宽的输入电压范围。例如，400V 电池的常用电压范围为 240V 至 450V，800V 电池的常用电压范围为 550V 至 950V。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。从技术角度以及尽可能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	UCC28C5x-Q1	UCC28700-Q1	UCC28730-Q1	UCC28740-Q1	UCC28781-Q1
开关类型	硬开关式	谷底开关	谷底开关	谷底开关	零电压开关 (ZVS)
反馈稳压 ⁽¹⁾	初级、次级 (光耦合器)	初级	初级	次级 (光耦合器)	次级 (光耦合器)
典型功率级别	20W - 100W	2W - 50W	2W - 50W	2W - 50W	50W - 150W

(1) 初级侧调节从设计中移除了光耦合器。

2 隔离式辅助电源集中式架构

在该架构中，使用单级辅助电源架构，其中辅助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，可使用单个或多个器件来实现这种架构。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。

图 2-1 展示了三个具有多绕组变压器的隔离式器件如何用于 PFC、直流/直流初级和直流/直流次级隔离式辅助电源。对于每一级，低侧栅极驱动器共享变压器的同一输出绕组提供的电源；而每个高侧栅极驱动器都有一个单独的变压器输出绕组。

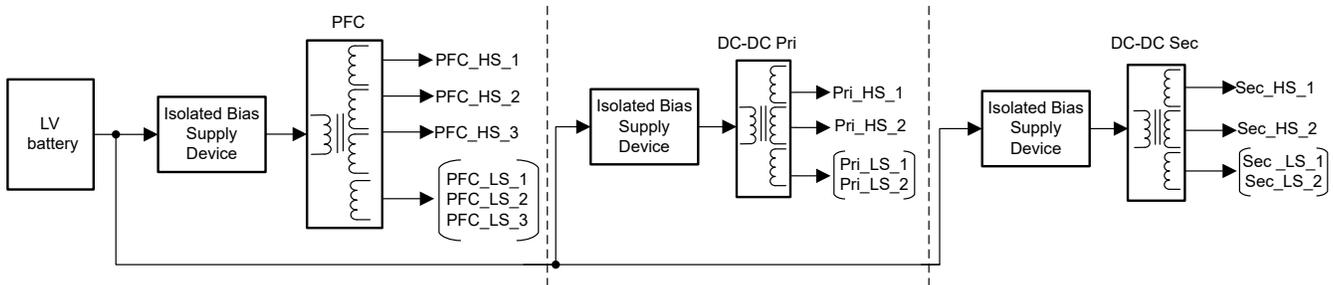


图 2-1. 具有三个隔离式辅助电源器件的集中式架构

图 2-2 展示了如何使用两个具有多绕组变压器的隔离式器件。第一个隔离式辅助电源器件中，PFC 和直流/直流初级共享变压器的同一输出绕组提供的电源，因为它们共享同一接地端。每个高侧栅极驱动器都有一个单独的变压器输出绕组。第二个隔离式辅助电源器件的运行模式与前一种情况类似。变压器中有六个输出绕组用于 PFC 和直流/直流初级。变压器绕组数量越多，变压器的设计就越复杂，输出调节方面的挑战也越多。此外，在用于为低侧所有五个栅极驱动器供电的一个输出绕组上，负载比分别为每个高侧开关供电的其他五个绕组更高。

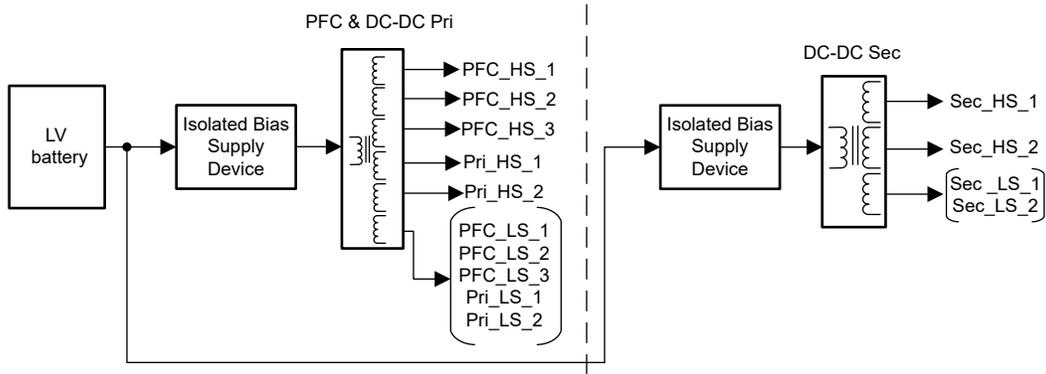


图 2-2. 采用两个隔离式辅助电源器件的集中式架构

图 2-3 使用具有多绕组变压器的单个隔离式器件。要从单个隔离式辅助器件供电，需要变压器的九个输出绕组。变压器的七个输出绕组用于七个高侧栅极驱动器，一个绕组用于 *PFC* 和 *直流/直流初级* 的五个低侧栅极驱动器，一个绕组用于 *直流/直流次级* 的两个低侧栅极驱动器。变压器输出绕组多会导致变压器设计复杂，并增加输出调节方面的挑战。此外，变压器输出绕组上的负载不同；因此，在变压器设计过程中必须考虑该因素。在这种辅助电源架构中，用于布线的 PCB 布局非常复杂，因为从变压器输出到 *PFC* 和 *直流/直流级* 的栅极驱动器需要拉出很长的迹线。在为车载充电器的栅极驱动器提供所需的足够功率的情况下，相比具有内部 FET 的转换器，具有外部 FET 的控制器器件是更好的选择。

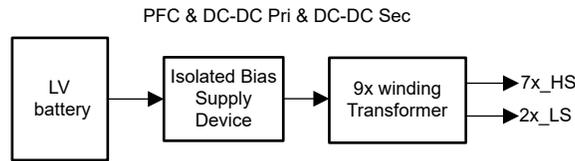


图 2-3. 采用单个隔离式辅助电源器件的集中式架构

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：LM5155x-Q1、LM5156x-Q1、LM34xx-Q1
- 反激式转换器：LM518x-Q1、LM2518x-Q1
- 推挽式转换器：SN6507-Q1

隔离式辅助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。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中运行。

3 隔离式辅助电源半分布式架构

在半分布式架构中，使用两级辅助电源架构。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栅极驱动器提供隔离式辅助电源。在这种情况下，不仅可以使使用闭环器件，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。

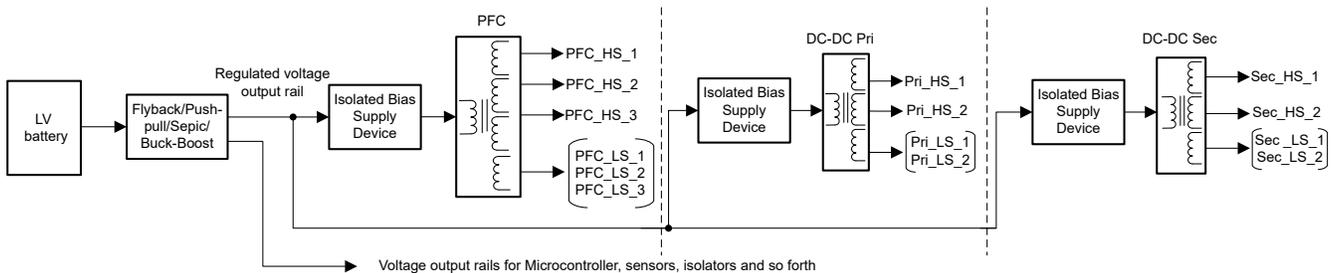


图 3-1. 隔离式辅助电源半分布式架构

对于第一级，可以使用反激式和推挽式器件作为隔离式拓扑之选，如集中式架构部分所述。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：LM5155x-Q1、LM5156x-Q1、LM34xx-Q1
- 反激式转换器：LM518x-Q1、LM2518x-Q1
- 推挽式转换器：SN6507-Q1、SN6505-Q1
- SEPIC：LM5155x-Q1、LM5156x-Q1、LM5157x-Q1、LM5158x-Q1
- 降压/升压：TPS55287x-Q1、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。LLC 谐振拓扑利用高 CMTI 能力的优势，非常适合用来设计使用高压摆率和高频率运行的 GaN 开关的车载充电器。

4 采用直流/直流转换器模块的分布式架构

对于分布式架构，使用直流/直流集成变压器模块可能是更好的选择。这些集成模块具有集成变压器，可在 11MHz 至 15MHz 的极高频率范围内进行开关。使用集成变压器模块无需外部变压器，从而减小了整个系统的尺寸和高度。集成变压器可更好地抵抗振动。此外，这些直流/直流集成模块只需要很少的外部分立式元件，因此从设计和布局角度来看，这种架构更简单。

TI 提供多种型号的直流/直流集成模块。借助这些型号，可根据系统中输入电压轨的可用性和所需的输出电压灵活地选择合适的器件。表 4-1 展示了所有型号和技术规格。

表 4-1. 德州仪器 (TI) 集成变压器设计

器件型号	隔离强度	V_{IN} V_{OUT} 标称值	V_{IN} 范围	V_{OUT} 范围	典型功率
UCC14240-Q1 UCC14241-Q1	基础型 (3kV _{RMS}) 增强型 (5kV _{RMS})	24V _{IN} 25V _{OUT} ,	21V - 27V	15V - 25V	2.0W
UCC14140-Q1 UCC14141-Q1	基础型 (3kV _{RMS}) 增强型 (5kV _{RMS})	12V _{IN} 25V _{OUT}	10.8V - 13.2V 8V - 18V	15V - 25V 15V - 25V	1.5W 1.0W
UCC14340-Q1 UCC14341-Q1	基础型 (3kV _{RMS}) 增强型 (5kV _{RMS})	15V _{IN} 25V _{OUT}	13.5V - 16.5V	15V - 25V	1.5W
UCC14130-Q1 UCC14131-Q1	基础型 (3kV _{RMS}) 增强型 (5kV _{RMS})	12 - 15V _{IN} 12 - 15V _{OUT}	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 _{RMS}) 增强型 (5kV _{RMS})	24V _{IN} 25V _{OUT}	21V - 27V	15V - 25V	2.5W

在车载充电器的全分布式架构中，架构的设计有几种不同的方式。是否要求前置稳压器，以便为直流/直流集成模块提供稳压轨，取决于栅极驱动器的电源要求。如表 4-1 中所述，在输入电压范围很宽的情况下，直流/直流集成模块直接连接到电池时会发生功率降额。

如图 4-1 所示，每个高侧栅极驱动器使用一个单独的直流/直流集成模块，而低侧栅极驱动器使用反激式或推挽式器件（使用多绕组变压器）供电。对于低侧，可以使用变压器的同一输出绕组为共享同一接地的多个栅极驱动器提供辅助电源。

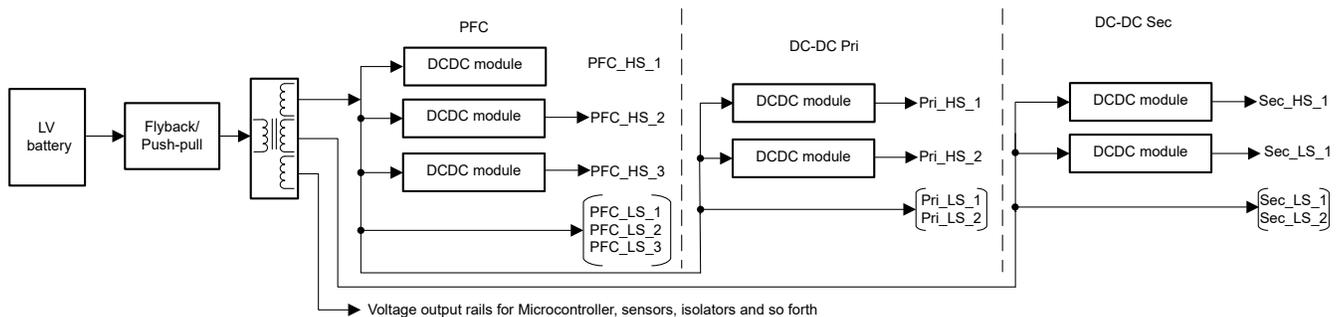


图 4-1. 组合使用反激式和推挽式器件与直流/直流模块的架构

高侧的隔离式辅助电源可以使用自举方法实现。如图 4-2 所示，使用自举电路生成高侧栅极驱动器的隔离式辅助电源。在使用直直/直直模块的情况下，每个直直/直直模块可用于直接为低侧供电，也可借助自举方法为高侧供电。使用自举方法还可实现反激式、推挽式等其他拓扑。对于高开关频率的设计，尤其是使用 GaN 开关时，自举二极管中的功率损耗可能会导致热挑战。因此，在低开关频率的设计中，自举方法更为合适。

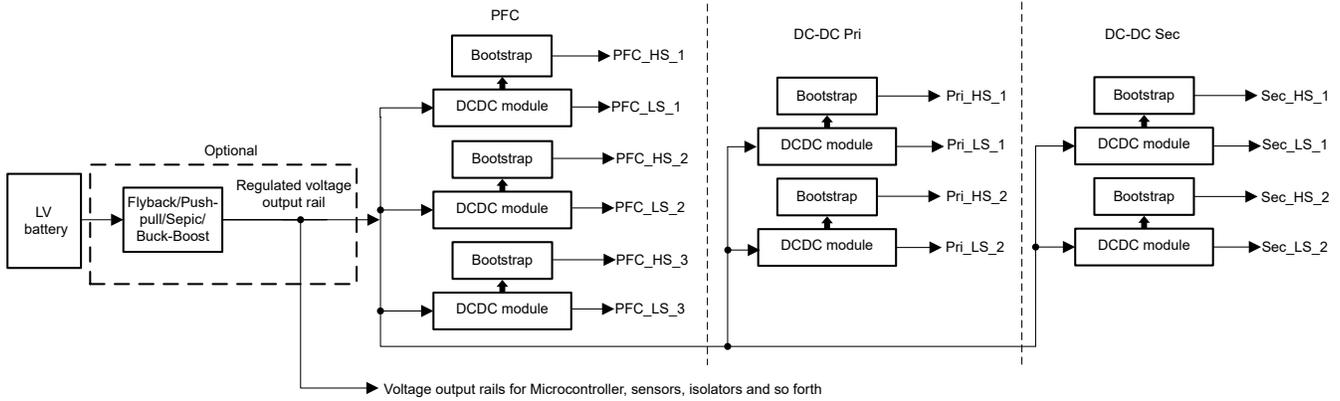


图 4-2. 采用自举方法的隔离式辅助电源架构

图 4-3 展示了一个全分布式架构，它也可用于栅极驱动器的隔离式辅助电源。尽管从安全角度来看这种方法是不错的，拥有设计工作简单等优点，但由于器件数量多，此类架构的成本很高。

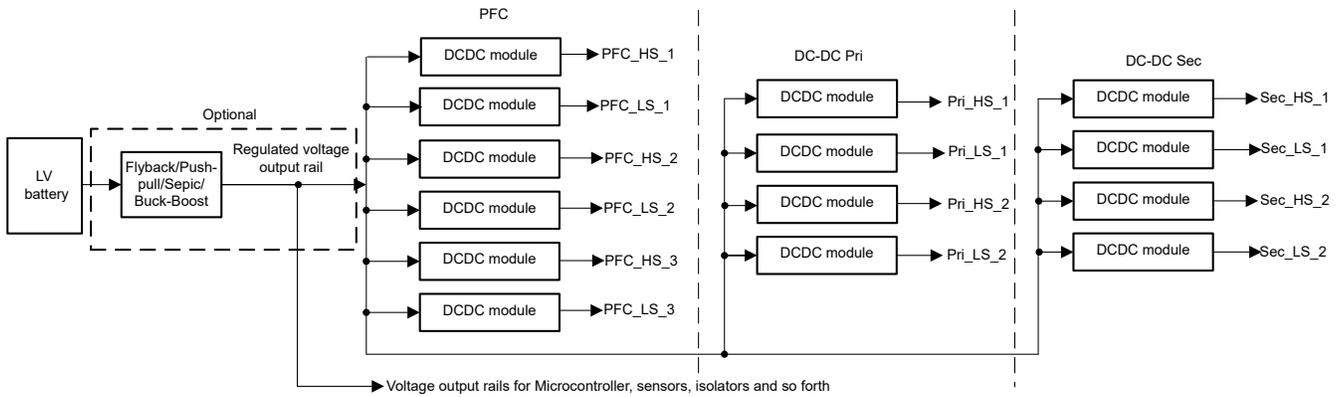


图 4-3. 使用全分布式架构的隔离式辅助电源

5 使用栅极驱动器驱动变压器的隔离式辅助电源

图 5-1 展示了如何使用栅极驱动器来驱动变压器，从而生成隔离式辅助电源。在这种方法中，特定占空比的 PWM 信号会馈入栅极驱动器，由栅极驱动器驱动变压器生成隔离式辅助电源。时钟、微控制器或特定 IC (等) 可用作 PWM 发生器。但是，本文前面的架构中提到的几种器件目前已经上市，专用于隔离式辅助电源应用。与使用栅极驱动器驱动变压器以生成隔离式辅助电源的方法相比，这些架构更受欢迎。

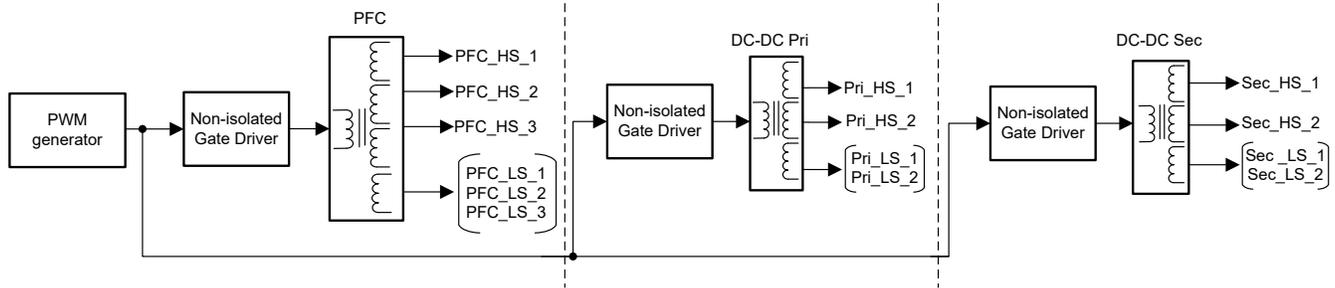


图 5-1. 使用栅极驱动器驱动变压器以生成隔离式辅助电源的架构

6 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。为了使整个系统更可靠，可以在隔离式辅助电源中提供冗余。这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。从功能安全的角度来看，冗余架构具有更高的可靠性，但该设计会额外增加系统的成本。[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。

7 总结

隔离式辅助电源是车载充电器电路的重要组成部分。本文中展示了车载充电器的几种隔离式辅助电源架构，以及一些常用架构。根据所选的架构，下一步是选择拓扑（反激式、推挽式、LLC 谐振、集成直流/直流模块等）和相关器件。在决定要使用哪种类型的架构和拓扑时，设计复杂性、功能安全要求和成本是主要考量因素。

8 术语

AC	交流
DC	直流
EV	电动汽车
FET	场效应晶体管
HEV	混合动力汽车
HS	高侧
LDO	低压降稳压器
LLC	电感器-电感器电容
LS	低侧
OEM	原始设备制造商
PFC	功率因数校正
Pri	初级
PSR	初级侧调节
Sec	次级
SEPIC	单端初级电感转换器
SOC	荷电状态
V_{IN}	输入电压
V_{OUT}	输出电压

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司