



Prashant Kumar, Ivana Santrac

Systems Engineering and Marketing

摘要

汽车行业正在从内燃机过渡到电动汽车 (EV) 和混合动力汽车 (HEV)。EV 和 HEV 系统的关键部件之一是牵引逆变器。牵引逆变器从高压 (HV) 电池获取直流电，并向电机提供受控交流电。与电源开关和栅极驱动器一样，隔离式辅助电源是牵引逆变器电路中的主要组成部分。隔离式辅助电源的主要功能之一是为栅极驱动器提供所需的电源。隔离式辅助电源有多种可能的架构。这些架构还会影响拓扑和相关器件的选择。

内容

1 引言	2
1.1 低压隔离式辅助电源	3
1.2 高压隔离式辅助电源	3
2 前置稳压器要求	4
2.1 采用低压电池时的前置稳压器	4
2.2 采用高压电池时的前置稳压器	5
3 全分布式架构	6
4 半分布式架构	7
5 集中式架构	8
6 隔离式辅助电源架构中的冗余	8
6.1 无冗余	8
6.2 为所有器件提供冗余	9
6.3 仅为低侧提供冗余	9
6.4 仅为高侧提供冗余	10
7 总结	10
8 术语	10

插图清单

图 1-1. 牵引逆变器方框图	2
图 2-1. 全分布式架构中的单前置稳压器	4
图 2-2. 全分布式架构中的两个前置稳压器	5
图 2-3. 采用高压电池时的前置稳压器	5
图 3-1. 全分布式架构	6
图 4-1. 仅限低侧的半分布式架构	7
图 4-2. 高侧和低侧半分布式架构	7
图 5-1. 集中式架构	8
图 6-1. 使用 LV 和 HV 电池时无冗余	8
图 6-2. 全分布式架构中为所有器件提供的冗余	9
图 6-3. 在全分布式架构中仅在低侧提供冗余	9
图 6-4. 全分布式架构中仅在高侧提供的冗余	10

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.....3
 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 2-1. 德州仪器 (TI) 前置稳压器器件.....4
 表 3-1. 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。

隔离式辅助电源从低压 (LV) 电池或 HEV/EV 的高压电池获取电能。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 LV 电池通常用作隔离式辅助电源的电源，但 LV 和 HV 电池通常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 显示了牵引逆变器方框图。

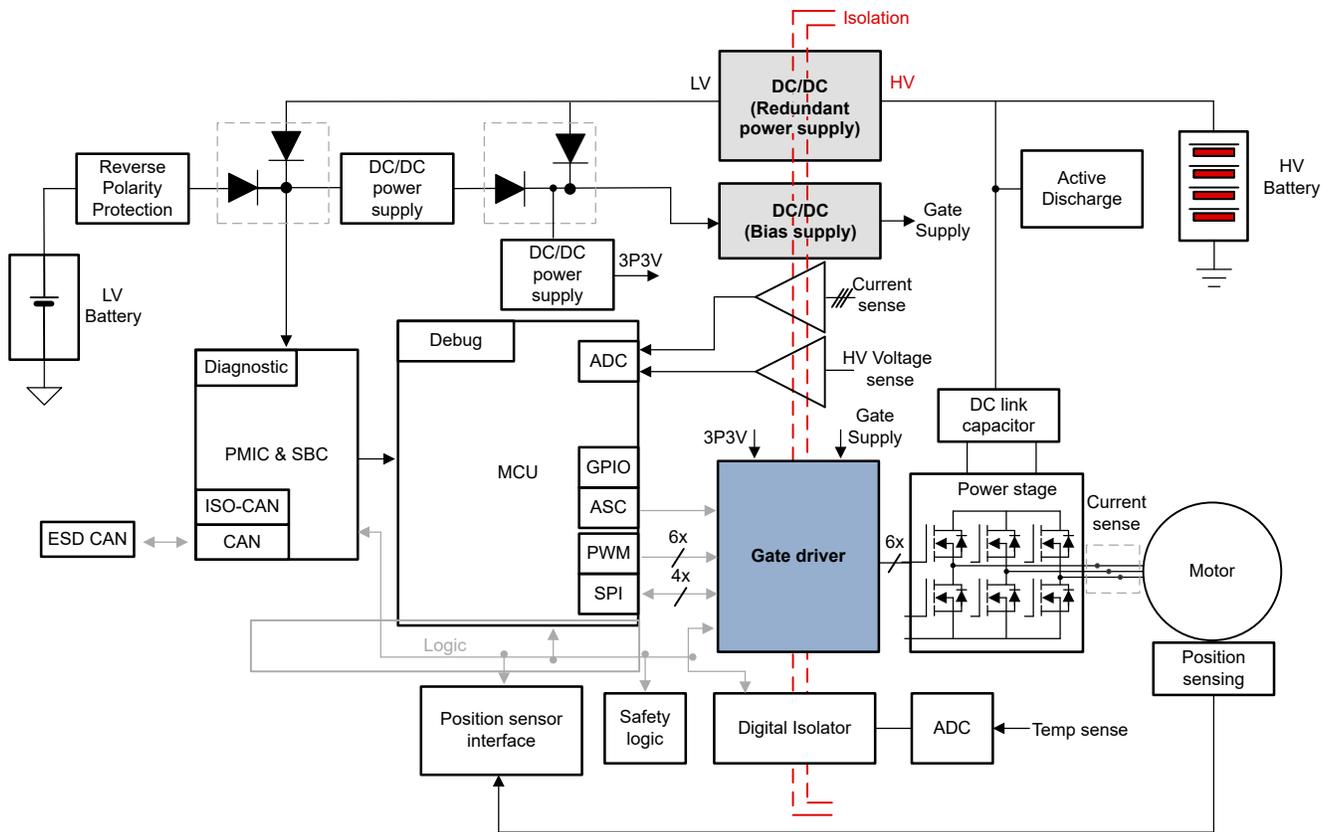


图 1-1. 牵引逆变器方框图

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 LV 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 LV 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 LV 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 LV 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 LV 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

高压隔离式辅助电源电路在 HEV 和 EV 中将 HV 电池用作电源。作为 HV 电池，400V 和 800V 电压电池在 HEV 和 EV 中最为常见。连接 HV 电池的隔离式辅助电源需要支持更宽的输入电压范围。宽输入电压范围支持的需求与 LV 电池类似：HV 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 HV 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 前置稳压器要求

隔离式辅助电源器件是否需要前置稳压器电路，取决于电路是否在宽输入电压范围内工作。以 12V LV 电池为例，输入电压范围在 8V 至 16V 之间（视 SOC 而定）时，用于辅助电源的器件必须在这整个电压范围内正常工作。否则，就需要一个前置稳压器。除了辅助电源器件是否具有宽输入电压范围外，线性调整率和负载调整率等其他因素也会影响对前置稳压器电路的需求。

节 2.1 介绍了包含前置稳压器使用的不同辅助电源架构。为了清晰起见，在节 3 以后，方框图中不包括前置稳压器。由于在同一架构中可使用多种拓扑和多种相关器件，因此并不总是需要前置稳压器。

表 2-1. 德州仪器 (TI) 前置稳压器器件

	LM5155x-Q1 控制器	LM5156x-Q1 控制器	LM5157x-Q1 转换器	LM5158x-Q1 转换器
输入电压范围	3.5V - 45V	3.5V - 60V	2.9V - 45V	3.2V - 60V
输出电流	1.5A 峰值标准 MOSFET 驱动器	1.5A 峰值标准 MOSFET 驱动器	最大 6.5A	最大 3.2A

2.1 采用低压电池时的前置稳压器

使用 12V LV 电池时，最常用作前置稳压器的转换器是单端初级电感器转换器 (SEPIC)、降压/升压转换器和反激式转换器。这些转换器适用于宽输入电压范围，并提供稳定的输出电压作为隔离式辅助电源器件的输入。这些前置稳压器的输出电压轨通常与栅极驱动器的隔离式辅助电源一起用于为系统的其他部分（如传感器、通信设备等）供电。

2.1.1 单前置稳压器架构

由于高侧和低侧辅助电源器件均只有一个前置稳压器，因此使用单前置稳压器是一种具有成本效益的选择。然而，如果前置稳压器电路中出现任何问题，使用单前置稳压器可能会导致单点故障。从功能安全角度来看，这并不总是合适的选择。

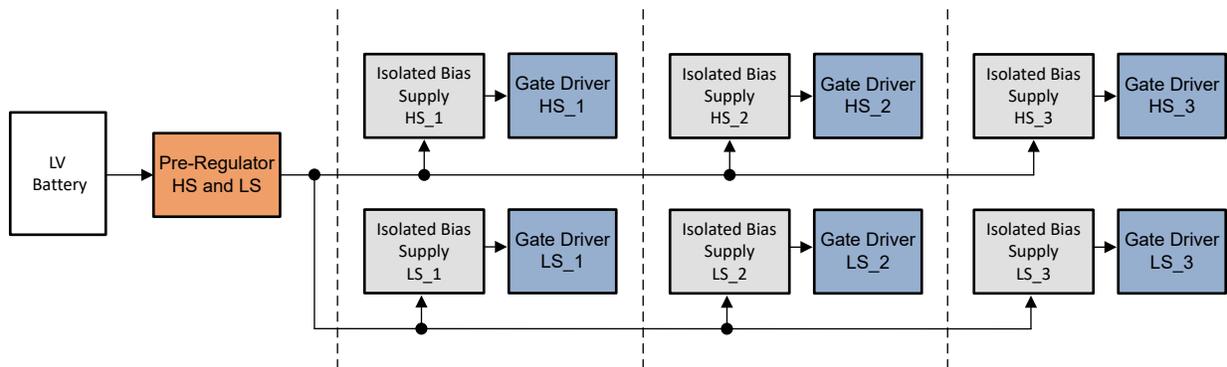


图 2-1. 全分布式架构中的单前置稳压器

2.1.2 多前置稳压器架构

在具有多个前置稳压器的架构中，将用于高侧和低侧辅助电源器件的前置稳压器分开。从功能安全的角度来看，这种架构可能更好。如果其中一个前置稳压器电路出现问题或故障，另一个前置稳压器电路仍可为低侧或高侧栅极驱动器供电。在所有低侧或所有高侧栅极驱动器继续受控制时，可实现安全状态。从电源角度来看，此类架构有助于在发生不利事件时实现车辆的安全状态。

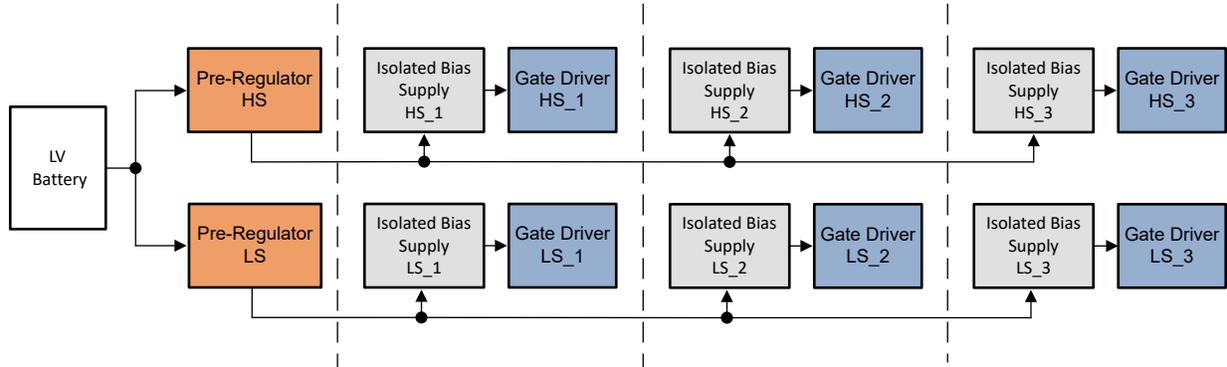


图 2-2. 全分布式架构中的两个前置稳压器

2.2 采用高压电池时的前置稳压器

与 400V 或 800V 电池连接的反激式转换器或控制器有两种不同的使用方式。一种是用作产生特定电压轨 (12V、15V、24V 等) 的前置稳压器，另一种是直接用作栅极驱动器的隔离式辅助电源 (图 6-1)。在用作前置稳压器时，HV 反激式的输出电压用作栅极驱动器隔离式辅助电源器件的输入电压，如图 2-3 所示。

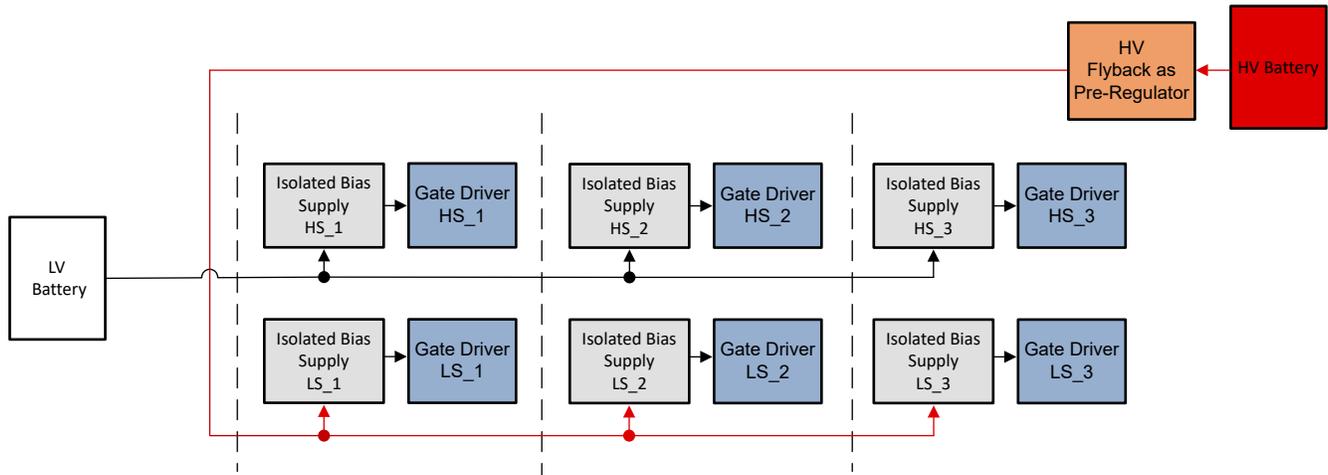


图 2-3. 采用高压电池时的前置稳压器

3 全分布式架构

在牵引逆变器的全分布式架构中，每个栅极驱动器都由单独的隔离式辅助电源器件供电。这意味着，6 个栅极驱动器需要 6 个隔离式辅助电源器件。尽管这种架构未必是具有成本效益的选项，但使用多个电源器件有助于提高系统的安全性。

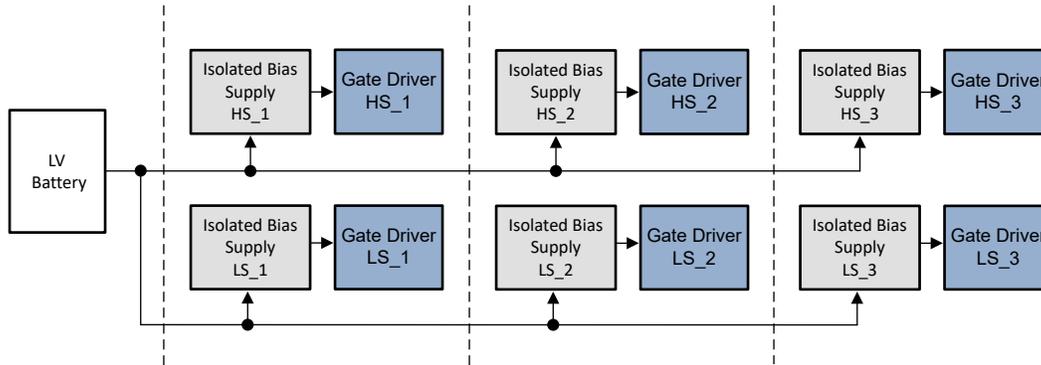


图 3-1. 全分布式架构

对于全分布式架构，使用集成式直流/直流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。此外，这些集成直流/直流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 提供多种型号的集成直流/直流模块。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。图 1-1 显示了所有型号和技术规格。

表 3-1. 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

还有其他一些拓扑可用于完全分布式的架构类型。这些拓扑的典型示例包括 LLC 谐振、PSR 反激式（初级侧调节反激式）和推挽式。这些拓扑的优势之一是能够输送比集成式直流/直流模块更多的电力。这在下一部分进行了更加详细的讨论。

4 半分布式架构

在半分布式架构中，多个栅极驱动器由单个隔离式辅助电源器件供电。这种架构可以节省为每个栅极驱动器提供单独器件的成本，但同时，一个器件发生故障会导致多个栅极驱动器的供电中断。

在半分布式架构中，有两种不同的可能性。图 4-1 展示了半分布式架构的第一种类型。在此架构中，使用三个独立的隔离式辅助电源器件为高侧栅极驱动器供电，例如使用三个集成直流/直流模块。另一方面，所有低侧栅极驱动器都使用单个隔离式辅助电源器件供电。一些可能的设计包括基于 LLC 谐振 (UCC25800-Q1)、PSR 反激式 (LM518x-Q1、LM2518x-Q1、LM515x-Q1、LM34xxx-Q1) 和推挽式 (SN650x-Q1) 拓扑的器件，可为多个栅极驱动器提供所需电源，从而使这些器件成为半分布式架构的理想选择。在使用一个器件为多个栅极驱动器供电时，变压器的次级侧 (Pri:Sec = 1:3) 具有多个绕组，例如，三个栅极驱动器需要三个次级绕组。

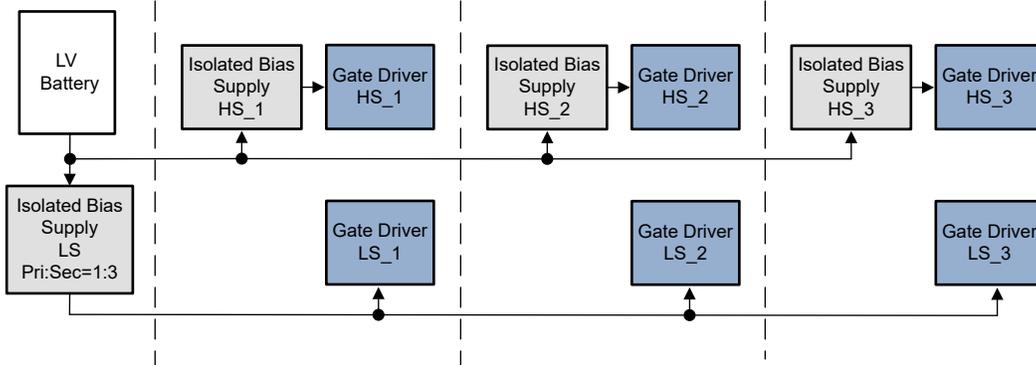


图 4-1. 仅限低侧的半分布式架构

图 4-2 展示了第二种半分布式架构，其中高侧和低侧栅极驱动器均使用两个单隔离式辅助电源电路供电。在每个电路 (高侧和低侧) 中，都有一个具有多个次级绕组的变压器。此架构仅需要两个隔离式辅助电源器件，这是一个具有成本效益的选择。与具有公共接地的低侧不同，高侧电压基准是悬空的。因此，由于交叉耦合等原因，很难实现高侧多绕组变压器的稳定性。

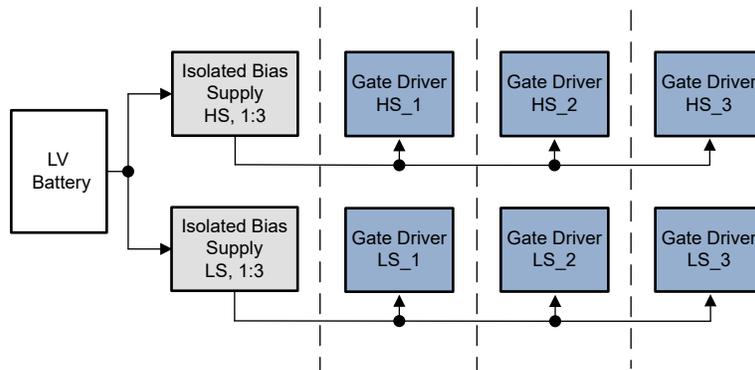


图 4-2. 高侧和低侧半分布式架构

5 集中式架构

在集中式架构中，所有高侧和低侧栅极驱动器均使用单个隔离式辅助电源器件供电。这可能是最具有成本效益的设计。另一方面，该器件中的故障会导致单点故障，所有栅极驱动器同时失去电源。此类架构的另一个挑战是设计具有 6 个次级绕组的变压器 (Pri:Sec = 1:6)，以及 PCB 布线较长而导致的复杂 PCB 布局。因此，在这种架构中很难实现严格的电压调节。集中式架构在牵引逆变器中不常用。

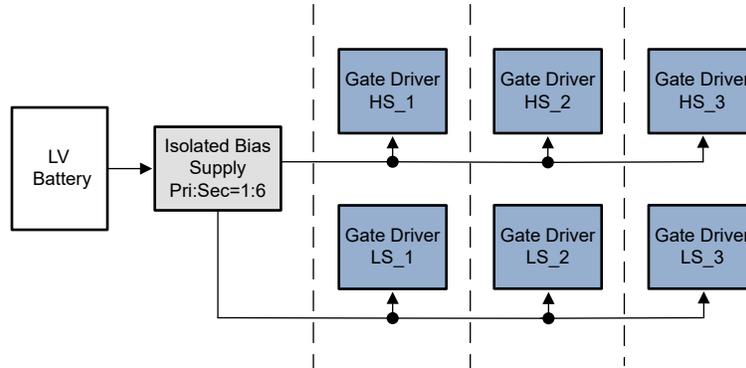


图 5-1. 集中式架构

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。为了使整个系统更加可靠，需要冗余电源。这意味着隔离式辅助电源同时通过 HV 和 LV 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。根据功能安全概念，仅向一侧提供冗余电源就足以实现安全状态。

6.1 无冗余

图 6-1 显示了使用 LV 和 HV 电池为隔离式辅助电源器件供电的架构。低侧栅极驱动器由 HV 电池供电，高侧栅极驱动器由 LV 电池供电。也可以实现与此相反的组合。在这两种情况下，栅极驱动器都没有冗余，但高侧和低侧栅极驱动器同时失去电源的风险较低。如果失去一个电池的连接或电源，低侧或高侧栅极驱动器仍可供电。

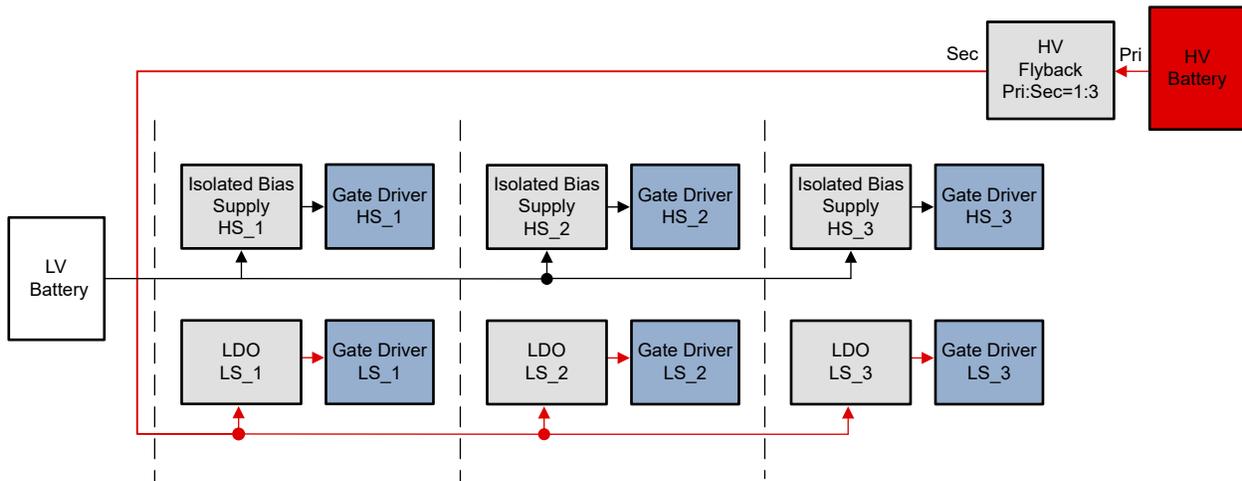


图 6-1. 使用 LV 和 HV 电池时无冗余

6.2 为所有器件提供冗余

在此类架构中，LV 和 HV 电池均用于为系统中的所有栅极驱动器供电，从而为所有栅极驱动器提供冗余。在这种冗余架构中，如果 LV 或 HV 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 LV 电池供电，而 HV 电池用于提供冗余。从功能安全的角度来看，这种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。

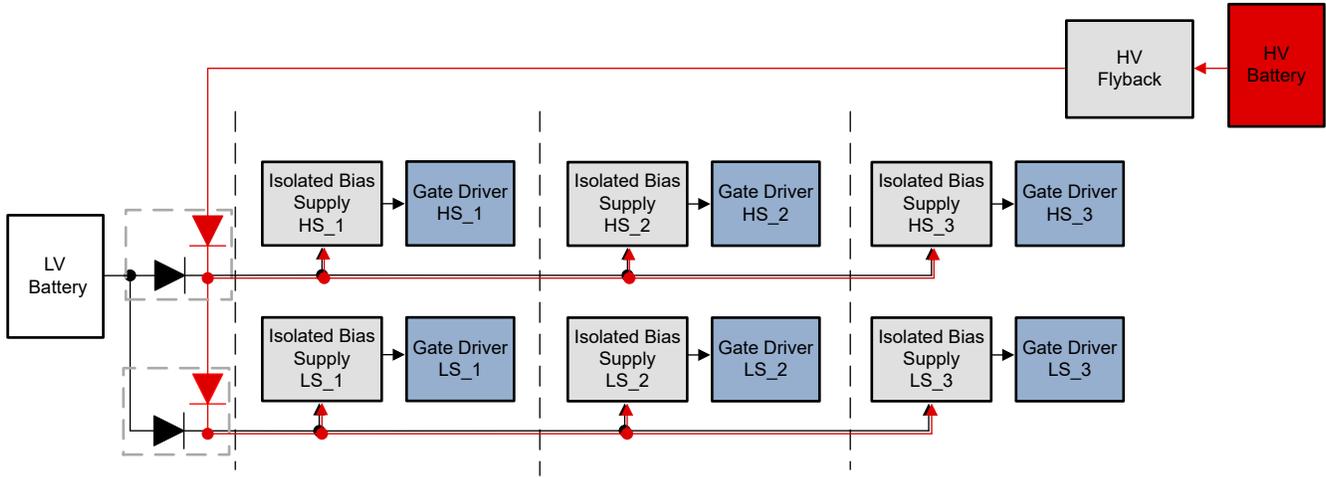


图 6-2. 全分布式架构中为所有器件提供的冗余

6.3 仅为低侧提供冗余

图 6-3 显示了低侧栅极驱动器同时由 LV 和 HV 电池供电。在该方法中，LV 电池用作主电源，而 HV 电池用于为低侧栅极驱动器提供冗余。另一方面，高侧栅极驱动器仅由 LV 电池供电。为低侧或高侧栅极驱动器提供冗余有助于实现一种可能的安全状态（例如：主动短路）。如果 LV 电池出现故障，低侧栅极驱动器仍由 HV 电池供电。与以前的架构（所有栅极驱动器均具有冗余电源）相比，这种架构更具成本效益，可能足以满足功能安全要求。

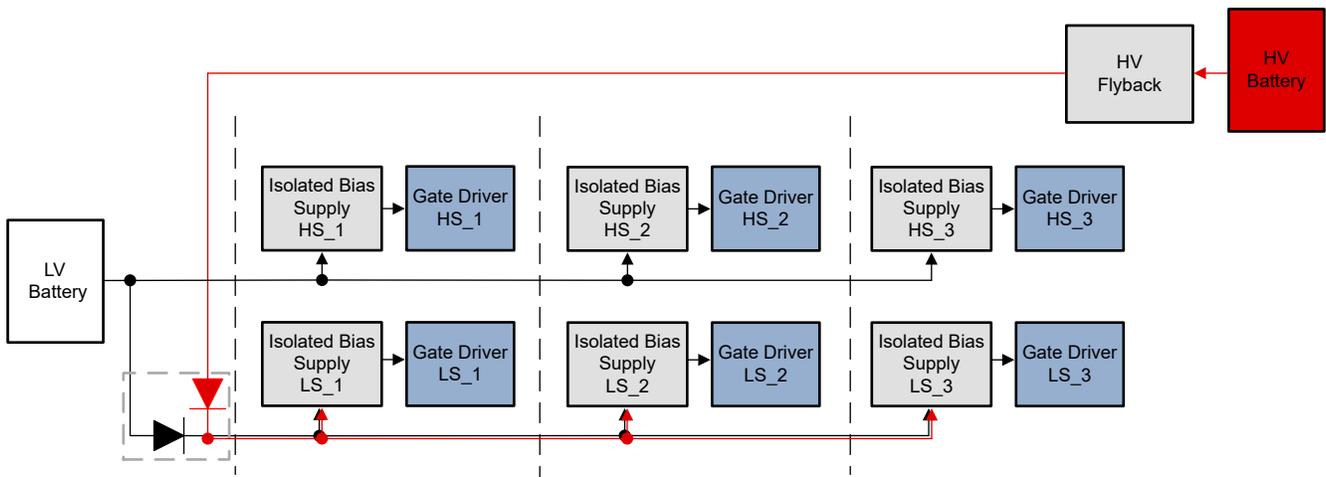


图 6-3. 在全分布式架构中仅在低侧提供冗余

6.4 仅为高侧提供冗余

与仅为低侧栅极驱动器提供冗余类似，也可以仅为高侧栅极驱动器提供冗余。图 6-4 显示了这种类型的架构。

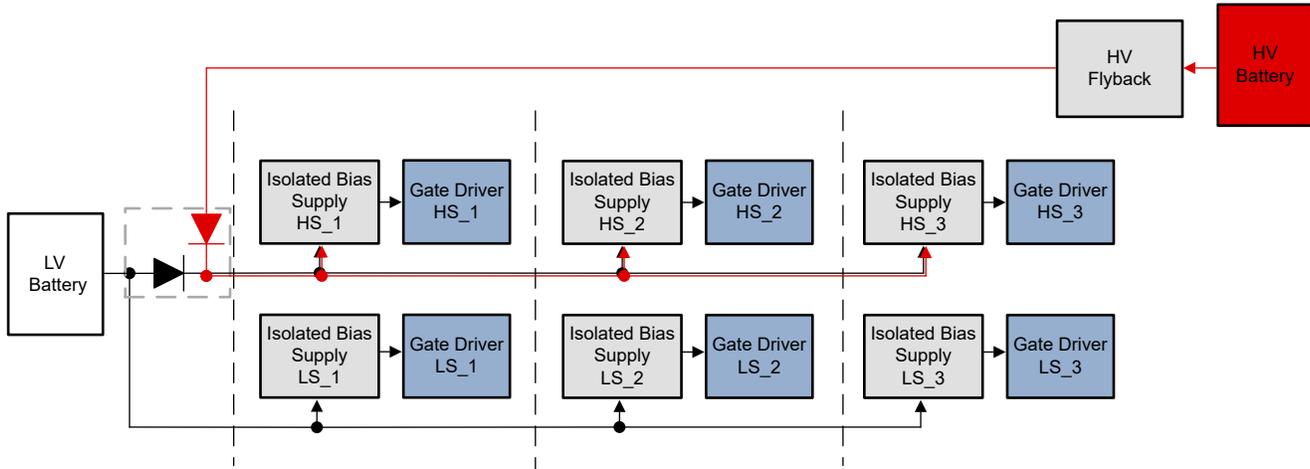


图 6-4. 全分布式架构中仅在高侧提供的冗余

7 总结

隔离式辅助电源是每个牵引逆变器系统中的重要组成部分。本文中展示了牵引逆变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
HV	高压
HS	高侧
LDO	低压降稳压器
LLC	电感器-电感器电容
LS	低侧
LV	低压
OEM	原始设备制造商
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