

细说车载充电机的功能与趋势

作者：Marc Bracken，汽车系统技术营销工程师，安森美(onsemi)

车载充电机(OBC)为电动汽车(EV)的高压直流电池组提供了从基础设施电网充电的关键功能。当将电动汽车通过合适的充电线(SAE J1772, 2017)连接到支持的2级电动汽车供电设备(EVSE)时，OBC就会处理充电。车主可使用特殊的电缆/适配器连接到墙插进行1级充电而将其作为“应急电源”，但这样提供的功率有限，因此所需的充电时间更长。

OBC用于将交流电转换为直流电，但如果输入的是直流电，就不需要这种转换(图1)。当将直流快速充电桩连接到车辆时，这就会绕过OBC而将快速充电器直接连接到高压电池。

OBC在纯电动汽车(BEV)、插电式混合动力汽车(PHEV)和潜在的燃料电池汽车(FCEV)中都有所使用。这三种电动汽车(EV)统称为新能源汽车(NEV)，但对系统级充电功能的要求各不相同(表1)。

接受交流电输入并将其转换为直流电输出的核心功能，为高压电池组充电提供了适当的电压和电流。一般而言，这种功能由于只提供从电网到汽车的输电，因此是单向的。OBC单元会根据整个电池的健康状况和电荷状态，改变电压和电流(图2)。

OBC的设计约束包括交流输

入、目标输出功率水平、电池组电压、冷却方法、空间约束，以及设计是单向供电还是双向供电。此外，在许多情况下，这类模块在功能安全上必须支持汽车安全完整性等级(ASIL)的B级或C级。

考虑到OBC的整体硬件功能模块，设计人员应解决以下问题：

- 对交流电源输入进行交流整流和功率因素校正(PFC)。
- 初级侧DC-DC。
- 次级侧整流(无源或有源)。
- 如果是双向的，还要进行次级DC-DC控制。
- 电压、电流和温度诊断。
- 用于通信和诊断的车载网络(IVN)。
- 与电动汽车供电设备(EVSE)的通信。
- 交流电源、12V电池和高压电池之间的隔离，这是个非常重要的安全要求。

本文重点探讨以上前四项(用粗体标记)大功率路径部分。

交流整流和PFC有助于最大程度降低无功功率，同时最大程度提高实际输电并在AC-DC转换模式下运行(图3)。在OBC等大功率系统中如果没有PFC，输电效率就不高，热负载就会增加。在OBC设计方面，这个模块的版本最多，因为根据交流电源输入、输出功率、能效和成本目标，它有许多的实现方式。

OBC的功率因数(PF)规格在整个工作范围内通常能达到 $PF \geq 0.9$ ，而在典型工作范围内则能达到 $PF \geq 0.98$ 。高PF值可尽可能增加充电能力，同时也能尽可能减少线路/电网电流和视在功率需求。未来，业界将更多地关注与线路/电网谐波含量有关的各种改进，以及轻载条件下的改进模式。OBC中的PFC控制器用于执行以下功能：

- 使输入相电流与输入相电压保

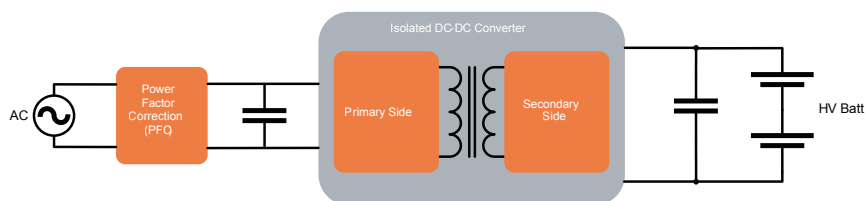


图1: OBC电源路径功能块。

OBC Parameters	BEV	PHEV or FCEV
Output Power	< 11kW today, migration to 22kW for faster charging	< 7.2kW, possible migration to higher power for faster charging
AC Input	1-phase / 3-phase	1-phase / 3-phase
DC Fast Charge Bypass	Yes	Limited offerings, may see more in the future.
Cost	Higher	Lower
Battery Pack Voltage	<=400V today, some 800V, wider adoption of 800V	<=400V

表1: 电动汽车OBC系统级要求。

持一致。

- 减少从交流电源吸收的峰值电流。
- 尽可能减少线路/电网电流总谐波失真(THD)。
- 确保输入电流尽可能接近正弦波形。

在图4中, 电压和电流都是正弦波并且同相位。这能够尽可能减少无功功率分量、热负荷和谐波, 从而提供最大数量的实际输电。

虽然在一般应用中可以使用无源PFC, 但由于OBC需要满足更高的功率水平、空间限制、散热要求和功率因素等目标, 因此这类系统的实际实现需要使用有源PFC(图5)。

OBC常见的有源PFC方案包括(表2):

- 传统升压
- 传统升压、2通道交错式
- 无桥升压
- 图腾柱
- 维也纳整流器
- 3臂或4臂电桥(3相图腾柱)

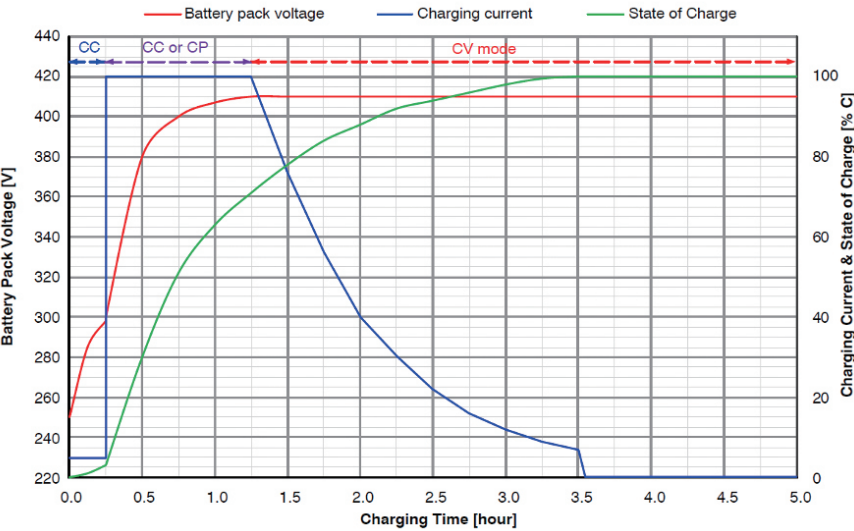


图2: 410V锂离子电池组的典型充电曲线。(图片来源: 安森美TND6318-D文档“On Board Charger (OBC) LLC Converter”)

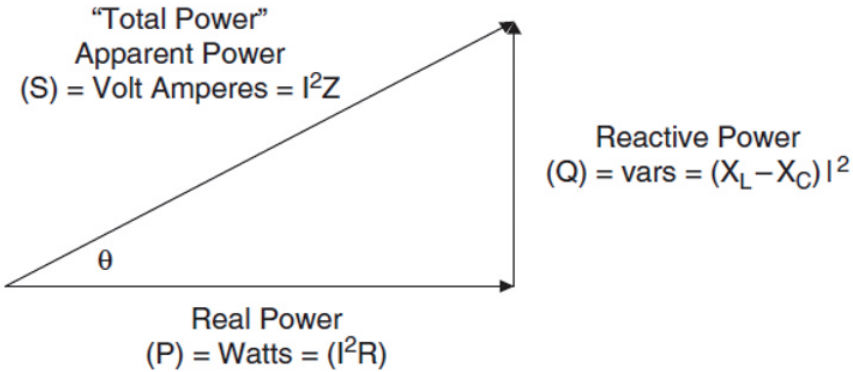


图3: 功率三角形。(图片来源: 安森美AN-42047文档“Power Factor Correction (PFC) Basics”)

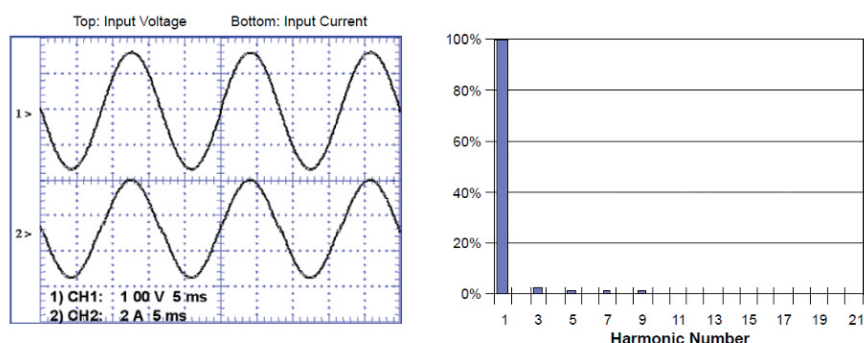
随着OBC输出功率的增加,推荐使用可减少电源路径中二极管数量的PFC拓扑,或使用几乎没有反向恢复特性的SiC肖特基二极管。设计人员还可转用SiC MOSFET,这样就可以使PFC级在更高的频率下开关,同时处理更高的系统电压,从而增加效率和能量密度。

电源路径的下一个模块是初级侧DC-DC转换器(表3)。该电路用于

将来自PFC的高压直流链路转换为适当的电压而用于充电。输出电压和电流将根据电池组的状态而变化。在单向设计中,这一DC-DC的典型实现是LLC,但也会有PSFB(移相全桥)版本。对于双向设计,实现方式则是CLLC或双有源桥(DAB),而随着双向功能的发展,使用这些架构的方案也有望增多。SiC MOSFET由于可实现更高的电压和更低的开关损耗,

因此成为了这种情况的理想选择。

次级侧则可以使用二极管进行无源整流、使用功率开关进行同步整流、支持CLLC的全桥设计(双向)或双有源桥的后半部分(双向)(表4)。无源整流不需要控制,但只支持电网到车辆单向供电。对于更高的效率或800V电池组的情况, SiC二极管则提供了最佳解决方案。在单向设计中可使用超级结MOSFET(有效率损失)或SiC MOSFET进行同步整流,但在许多情况下,与二极管解决方案相比,这类解决方案较贵。对于双向功能,则会使用全桥或多臂半桥解决方案设计。根据系统的功率水平、电压和效率目标,会使用超级结MOSFET或SiC MOSFET。SiC MOSFET可在所有方案中提供更高效率并更易于处理800V系统,而对于400V系统,要实现成本优化,则可使用超级结MOSFET进行处理。



$$\text{功率因素是个比值: } PF = \frac{\text{实际功率}(W)}{\text{视在功率}(VA)}$$

图4: 采用PFC的典型小功率电路。(图片来源: 安森美HBD853/D文档“Power Factor Correction(PFC) Handbook”)

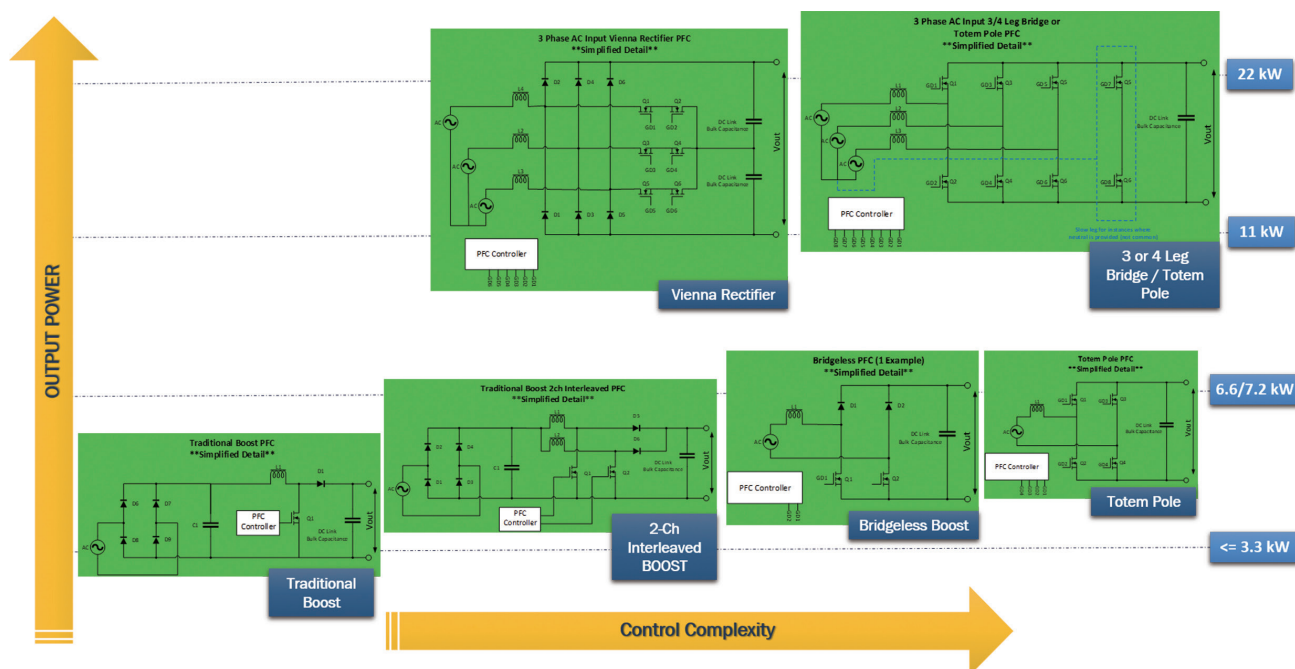


图5: 针对OBC系统功率水平的典型PFC拓扑。

PFC Topology	Common Technology Usage
Traditional Boost	Super-Junction MOSFET + SiC Diode Hybrid IGBT (Co-Packaged SiC Diode) + SiC Diode IGBT (Co-Packaged Si Diode) + SiC Diode
2-Ch Interleaved Boost	Super-Junction MOSFET + SiC Diode Hybrid IGBT (Co-Packaged SiC Diode) + SiC Diode IGBT (Co-Packaged Si Diode) + SiC Diode
Bridgeless Boost	Super-Junction MOSFET + SiC Diode
Totem Pole	SiC MOSFET *Maximum efficiency for high power* Hybrid IGBT (Co-Packaged SiC Diode)
Vienna	Super-Junction MOSFET + SiC Diode SiC MOSFET + SiC Diode
3- or 4-Leg Bridge	SiC MOSFET *Maximum efficiency for high power* Hybrid IGBT (Co-Packaged SiC Diode)

表2: PFC典型器件技术。

OBC的额定输出功率往往与车辆中所使用的电池组的大小相关。OBC对于BEV中较大的电池要能提供较大的输出功率,而对于PHEV中较小的电池则应提供较小的输出功率。这种平衡可以防止对系统进行过度设计,并有助于优化充电时间和成本。

在电池组的额定容量方面, BEV有多种选择。车辆的物理尺寸、成本目标和预期性能(如续航能力)都会影响这一性能。在全球范围内, 跨多个细分汽车市场的轻型乘用车, 其电池组容量可能从30kWh到105kWh不等(根据Electric Vehicle Database 2021年的数据)。对于属于卡车或大型运动型多用途车(SUV)细分市场

的轻型乘用车, 其电池组容量达到110kWh至150kWh以上则更为常见(根据Electric Vehicle Database和福特汽车公司2021年各自的数据)。预计有两款新车的电池容量将接近200kWh(根据Electric Vehicle Database 2021年和Engineering Explained 2020年的数据)! 电池组的额定容量正在增加, 以期提供更高续航能力或满足新的汽车细分市场需求, 同时还在业内更广泛地采用800V规格, 以便加快充电速度。

PHEV和FCEV的电池组容量从5kWh到25kWh不等。由于PHEV还依赖于电池组以外的额外动力源, 其容量比一般的BEV要低得多。PHEV使用内燃机(ICE), 而FCEV则使用氢燃

料电池。当电池组容量下降到某个水平以下或有其他条件需要时, ICE或燃料电池可以提供动力来驱动发电机, 从而为电池充电。对于短距离行驶, 这类电动汽车能够实现全电动驱动, 但它的续航里程远不及BEV。这类电动汽车将有更多转移到15kWh以上的电池容量, 以便增加纯电动续航里程。

BEV的电池容量比PHEV要大得多, 这会影响OBC的设计和选择, 以及车辆充电时间。下面来考虑下这样一种场景: 有两辆不同的汽车(BEV和PHEV)使用相同版本的OBC充电, 并插入到相同功能的EVSE中。如果BEV的电池容量是PHEV的4倍, 那么BEV的充电时间则大概是PHEV的

DC-DC Topology	Common Technology Usage
LLC	SiC MOSFET *Maximum efficiency* Super-Junction MOSFET
CLLC (Bidirectional)	SiC MOSFET *Maximum efficiency* Super-Junction MOSFET
PSFB	Super-Junction MOSFET Hybrid IGBT (Co-Packaged SiC Diode) IGBT (Co-Packaged Si Diode)
DAB (Bidirectional)	SiC MOSFET *Maximum efficiency* Super-Junction MOSFET

表3: DC-DC器件选择。

4倍。这种简化的观点没有考虑到充电算法的许多复杂性，但就本文的讨论用此进行估计足矣。如果两个电池组都耗尽了电量，则BEV的充电时间会更长。充电时间是OEM和客户的主要考虑因素，它会影响最终用户的满意度。有助于改善充电时间的方案包括增加OBC的功率输出、提高OBC的效率，以及增加电池组和相关OBC的系统电压。所有这些方案都有助于减少充电时间，从而改善最终用户的体验。

OBC的架构和功率水平正在发生快速转变。随着电动汽车采用率的持续增长，对非常灵活的OBC设计的需求比以往任何时候都更加重要。

关键系统考虑因素：

- 电动汽车电池组的能量密度正在增加。
- 消费者需要更快的充电时间。

- OBC正在向更高的功率水平迁移。
- OBC必须满足400V和更广泛采用的800V电池系统的需求。
- 为了增加最终用户的功能，需要提供可选的双向功能，从而支持电网到车辆和车辆到电网输电。
 - 由于车主可以在停电的情况下用电动汽车为自己的家庭供电，或者与电力公司合作为电网基础设施供电(从而获得报酬)，因此他们将从中受益。

PFC主要考虑因素：

- 基于SiC的图腾柱PFC可提高系统效率并应对更高的电压，同时使图腾柱拓扑与维也纳架构一起在单相和三相解决方案当中获得流行。
- 基于超级结MOSFET或SiC MOSFET以及SiC二极管的维也

纳整流PFC可提高系统效率。

初级侧/次级侧的关键考虑因素：

- 初级侧DC-DC采用SiC MOSFET可提高能效。
- 对于单向设计，在次级侧采用SiC二极管可提供最佳效率。
- 对于CLLC和DAB拓扑，在次级侧采用SiC MOSFET更容易实现双向功能。

为了进一步缩短充电时间，对于较小能量密度的电池组，OBC模块的输出功率将开始增加。另一个可能性则是增加对直流快速充电的支持，从而帮助PHEV在几分钟内充满电。对于更大的电池组，例如BEV中所用的电池组，其趋势则是转向11kW和22kW的OBC，同时继续支持快速充电桩和更高的电压。

最后，一级供应商正在将HV-LV

Secondary Topology	Common Technology Usage
Unidirectional	SiC Diode *Maximum efficiency*
Unidirectional Synchronous	SiC MOSFET *Maximum flexibility & efficiency* Super-Junction MOSFET
Bidirectional (CLLC or DAB)	SiC MOSFET *Maximum flexibility & efficiency* Super-Junction MOSFET

表4: 次级侧器件选择。

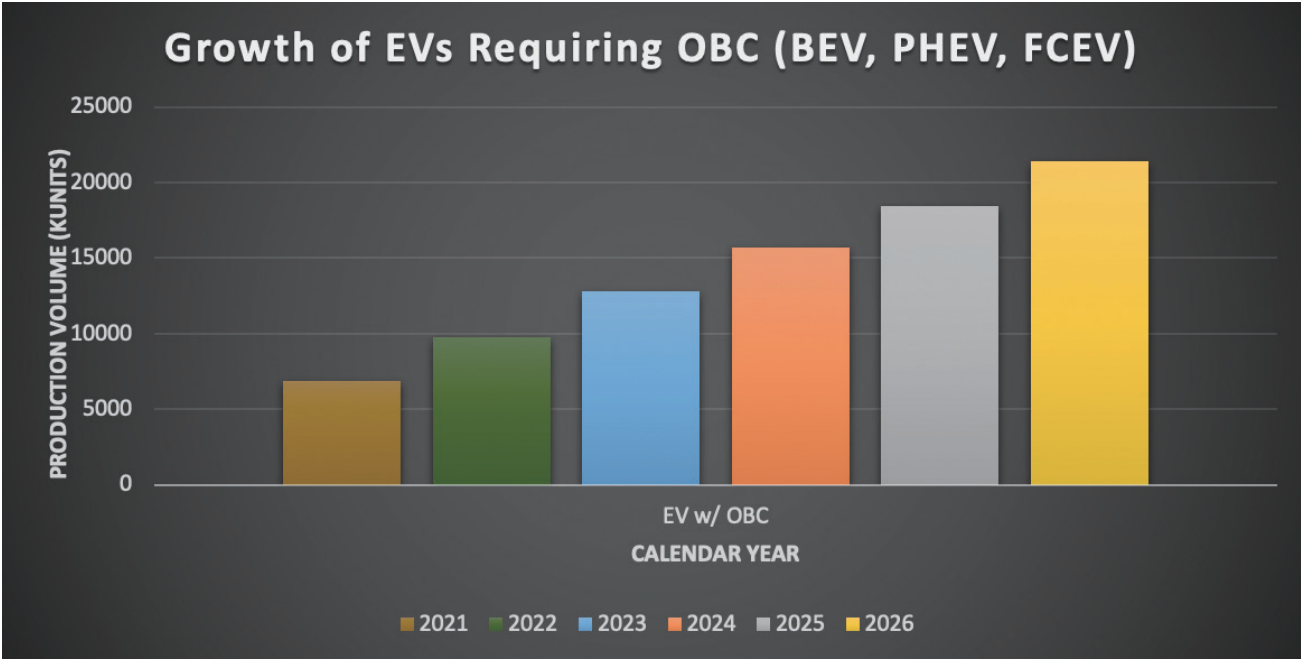


图6: 需要OBC的车辆增长。

DC-DC模块功能集成到OBC中。这种集成的模块设计被称为组合充电器单元(CCU)，它提供了"2模块合一"，同时提高了高压电源网和12V电源网之间的系统级效率。

支持使用OBC的电动汽车架构(BEV、PHEV和FCEV)在2021年约占电动汽车总销量的46%，到2026年则将占电动汽车总销量的57%。OBC

5年的复合年增长率(CAGR)预计为25.6%，2026年的数量估计为2140万台(根据Strategy Analytics 2020年的数据)(图6)。

对逆变器中所用的电力电子器件来说，必须要满足最大功率密度、高效率、供应链稳定性和长期可靠性等各种要求。安森美为从3.3kW到22kW的汽车OBC功率级和高达800V

的电池电压提供可扩展技术。产品组合包括SiC MOSFET、带有共同封装SiC二极管的混合IGBT、超级结MOSFET、汽车电源模块(APM)、SiC二极管、栅极驱动器、稳压电源和车载网络(IVN)解决方案。与安森美的合作使客户能够为各种电动汽车应用设计灵活的OBC和基础设施充电解决方案。 EDN