

通过电气化减少排放

交通运输实现可持续能源消耗的途径

概述

本白皮书中介绍了电力电子器件在重型车辆电气化的应用，通过由能源产生、储存、运输和消耗组成的价值链，有助于减少交通中的排放，如图 1 所示。

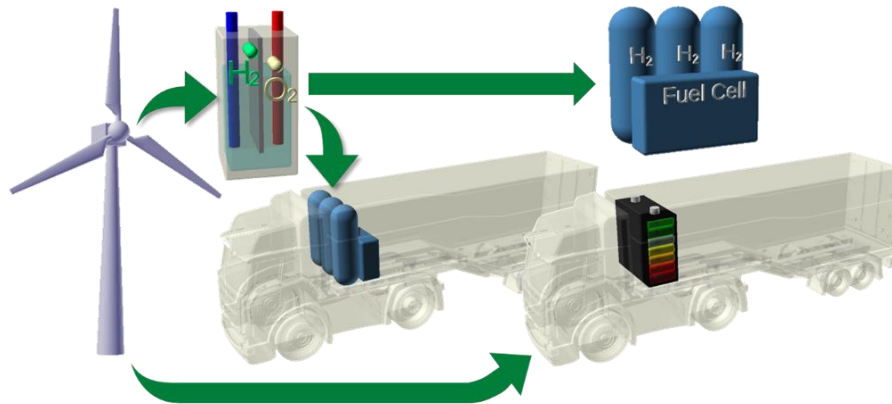


图 1. 基于清洁、可再生能源的电气化运输

针对受众

本文档适用于对公共汽车和卡车等电动重型车辆感兴趣的人员，以及希望深入了解保持货物和人员流动所需的基础设施的人员。

联系方式

有关此主题的更多信息，请联系 Littelfuse 功率半导体产品和应用专家团队：

- 北美 - NA_PowerSemi_Tech@Littelfuse.com
- 中美洲和南美洲 - CSA_PowerSemi_Tech@Littelfuse.com
- 欧洲、中东和非洲 - EMEA_PowerSemi_Tech@Littelfuse.com
- 亚洲、澳大利亚和太平洋岛屿 - APAC_PowerSemi_Tech@Littelfuse.com

目录

1. 简介	3
2. 电气化运输的价值链	4
3. 储能	5
4. 车辆及其驱动系统	5
5. 用例 1 - 车队运营和停车场充电	9
6. 用例 2 - 即时充电	12
6.1. 受电弓即时充电	12
6.2. 使用无线电力传输 (WPT) 的即时充电	13
7. 用例 3 - 个人长途运营	15
7.1. stack 扩展	16
8. 用例 4 - 建筑机械	17
9. 结论	19
10. 参考文献	19

图列表

图 1. 基于清洁、可再生能源的电气化运输	1
图 2. “重型车辆”应用概述	3
图 3. 从发电到消耗的 Littelfuse 功率半导体	4
图 4. 电动汽车的简化框图	5
图 5. 电动汽车驱动系统的典型架构	6
图 6. 基于燃料电池的电动汽车驱动系统框图	6
图 7. 基于燃料电池的能量转换系统	7
图 8. B12C 整流拓扑, 也称为 B6C-2P	8
图 9. 配备充电基础设施的现代公交车站	9
图 10. 为电动货车充电, 圣潘克拉斯车站, 伦敦 1917	9
图 11. 双向充电原理图以及合适的器件	10
图 12. 使用太阳能和储能的车队运营整体方法	11
图 13. 自上而下的即时充电受电弓	12

图 14. 大功率感应充电系统的总体外观	13
图 15. WPT 系统的一般架构.....	13
图 16. 串联补偿谐振 WPT 架构	14
图 17: 大功率乘用车和商用车充电的工作面积比较	15
图 18. MW 级直流充电的架构	16
图 19. 基于桥式晶闸管的 MW 级直流充电.....	16
图 20. 控制开关磁阻电机 (SRM) 的功率架构和示意图	17
图 21. MW 级应用中的大功率驱动系统.....	18

1. 介绍

据估计，卡车、公共汽车和工程车辆（也称为重型车辆）产生了 25% 的交通排放和约 6% 的欧洲整体温室气体^[1]。

由于线上业务活动的增长，可以观察到跨洲长途业务的相应增长和城市内配送的增加，不止欧盟，根据美国交通局公布的数据[2]，美国的卡车每年行驶约 2960 亿公里，燃烧 1130 亿升汽油，进而产生了多达 2.94 亿吨的二氧化碳。

在立法和更严格的排放要求的推动下，车队运营商越来越多地转向零排放车辆。增强公共交通以减少全球所有主要城市的私家车数量被认为是减少大都市排放的另一个基石。在这里，运营零排放汽车也是目标选择，最好与绿色、可再生能源相结合。

为 3.5 吨级以上的车辆电气化是一项多学科的任务，也是功率半导体的一项特殊挑战。与设计运行时间约为 8000 小时的典型乘用车相比，卡车或公共汽车的使用寿命要长得多——无论是使用寿命还是正常运行时间。通用要求的目标是一年 360 天、每天 8 到 10 小时的运行时间。预计每天行驶多达 400 公里，在 15 年的服务中总计超过 200 万公里。在这方面，城市交通中使用的公交车同样具有挑战性，因为单日也需要行驶 200–300 公里，但持续性的启停运营模式本身就带来了进一步的挑战。

一辆电动重型车辆包含了许多高可靠性的子系统。图 2 重点介绍了电力电子器件的应用，有助于深入了解其中的子系统。

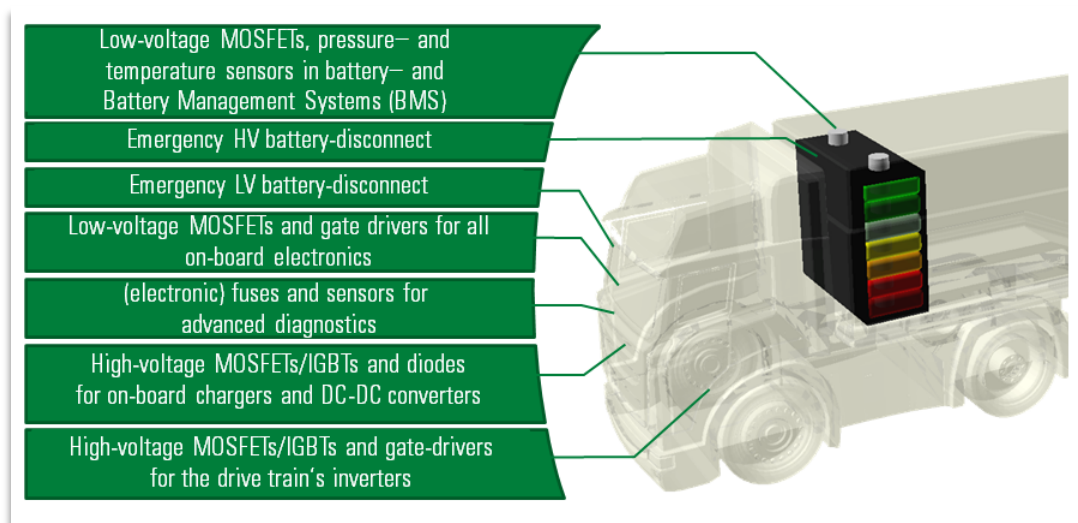


图 2. “重型车辆”应用概述

电池在过去十年中经历了快速的发展，现在已经成为一种可靠的电气化解决方案，即使对于电动重型车辆也是如此。在过去十年[3]。由于新材料和生产工艺以及制造能力的提高，预计将进一步下降。与此同时，能量密度不断增长，技术突破的新闻也被频频报道。

电池充电循环次数非常重要，它反映了电池的使用寿命。从以前的铅蓄电池的几百次循环能力，到现代的锂电池可以达到几千次循环能力。全球制造商正在努力进一步的改进，并且已经宣布了可实现超过 10,000 次循环和高达 1 kWh/ kg 的能量密度的技术^[4]。

所有这些都助于使电池变得越来越有吸引力，即使是用于远距离运营。充电时间的合理性在很大程度上取决于车辆的使用情况。

对于为当地客运运营的公交车，最常见的选择是在轮班或夜间休息期间在停车场充电。这里，“合理”是指公交车在停车场闲置的几个小时。在专用站点充电也可成为一种选择。因为只有几分钟的可用时间，充电功率需要更高才能向电池注入足够的能量。由于几个站点都可以充电，因此可以考虑与站点充电相结合。

对于用于物流运营的卡车，暂停几个小时充电是不能容忍的。在这种情况下，充电必须在休息时间进行，由于法律要求，司机无论如何都必须遵守这一点。未来无人驾驶的自动驾驶卡车甚至不需要休息，最理想的是从技术上尽可能缩短充电时间。

因此，支持此类车辆运营的基础设施也需要被视为价值链的一部分。

2. 电气化运输的价值链

从可再生能源系统的发电到电解、驱动系统、充电和车载应用，在此价值链中可以找到功率范围从几瓦到几兆瓦的设计。相互连接的部分如图 3 所示。



图 3. 从能源生产到消耗的 Littelfuse 功率半导体

它们的共同点是需要高效、可靠的电力电子器件。在这种苛刻的环境中，Littelfuse 产品涵盖了控制、保护、传感器和电力电子器件，能够安全有效地处理能量传输，如图 3 所示。

3. 储能

储能为移动应用提供的电能方式有以下三种，每一种方式都有其优缺点。

- 1) 电场中能量的直接存储是在电容器中完成的。电容器可以以非常高的速率充电和放电，从而提供巨大的功率密度。此外，电容器不会像电池那样受到充电的影响，并且可以轻松实现数百万次充电循环。根据 $E_c = \frac{1}{2} C \cdot U^2$ ，存储的能量由电容器的容量和允许的电压定义。从技术上讲，高压电容器容量较低，因此电容器与电池组合以提供峰值功率，而电池则充当主要的能量存储装置。
- 2) 从化学上讲，能量储存在电池中。所涉及的化学过程是关于给定电池化学物质的充放电能力的限制因素。现代锂离子电池每公斤可储存高达 0.2–0.3 千瓦时，目前在大多数移动应用中受到青睐。关于循环稳定性，目前使用的化学方法可以实现数千次充放电循环。
- 3) 作为能量载体的氢可以从化学过程中获得，并进行纯化。电解法将水分离成氧气和氢气，提供了一种使用可再生能源来支持该过程的方法。在所谓的燃料电池中，氢气和氧气会依次反应并产生电能。今天可用的大部分氢气是使用蒸汽转化制氢，从石油或天然气中提取的。

4. 车辆及其驱动系统

图 4 所示的方框图，从技术上讲，重型车辆中的驱动系统与电动乘用车中使用的驱动系统没有太大区别。

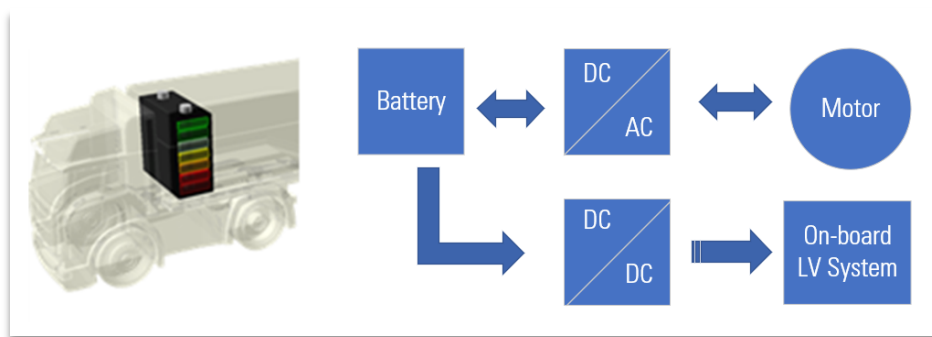


图 4. 电动汽车的简化框图

与乘用车相比，有两个主要区别，持续的功率输出的能力超过了乘用车；使用寿命也是如此，通常情况下，一辆乘用车的使用寿命应为 6000–8000 小时，而卡车和公共汽车的使用寿命预计是其十倍。

尽管如此，商用车辆中使用的大多数电机都是永磁同步电机，由 2-电平逆变器控制，如图 5 所示。

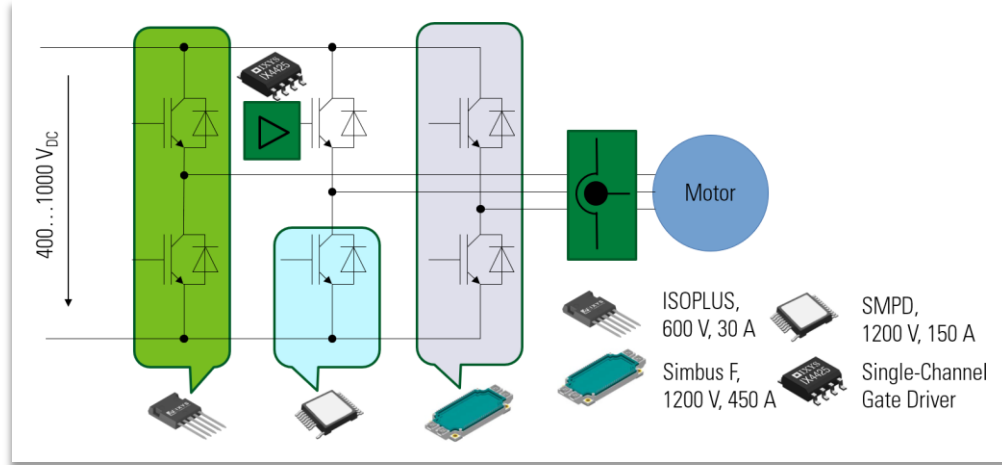


图 5. 电动汽车驱动系统的典型架构

在图 6 扩展方框图中，将氢燃料电池用作电源。在这里，大型储罐存储氢气。在加速过程中仍需要电池来提供峰值功率，并在能量回收过程中储存能量。

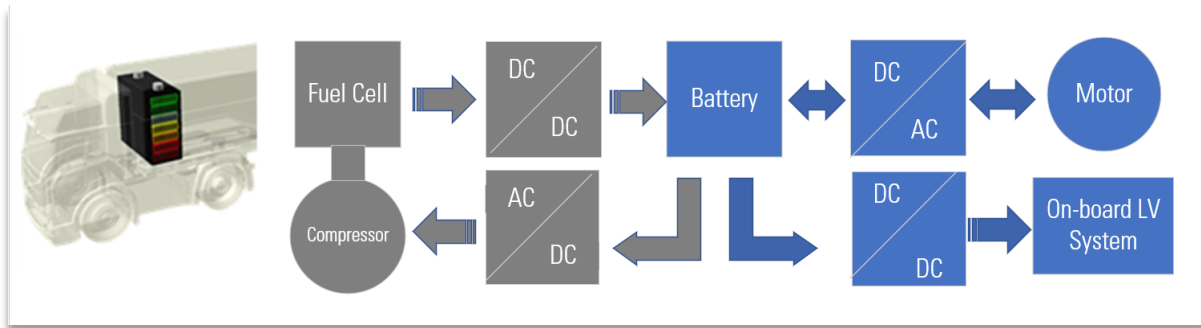


图 6. 基于燃料电池的电动汽车驱动系统方框图

此外，在构成燃料电池和电池之间接口的 DC-DC 转换器中还需要更多的电力电子器件。

基于燃料电池的驱动系统，一个重要部分是压缩机，它将空气泵入燃料电池中，这种空气含有平衡氢和氧所必需的氧气。

仔细观察燃料电池的细节，就可以解释压缩机带来的挑战。图 7 是利用氢气进行能量转换的示意图。

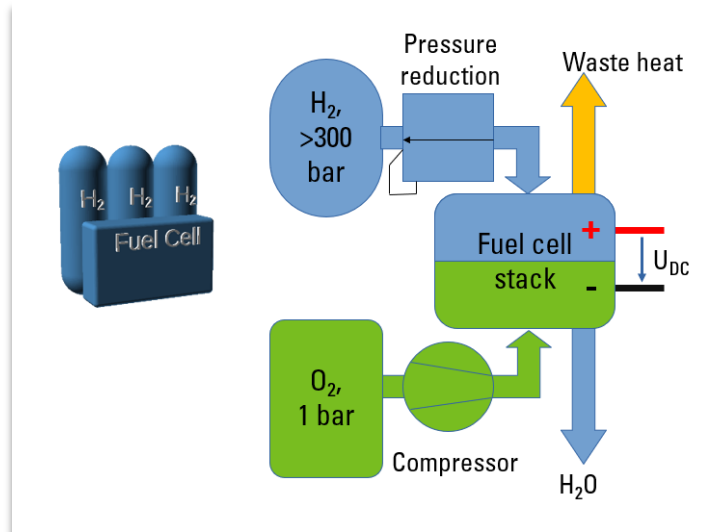


图 7. 基于燃料电池的能量转换系统

根据燃料电池内所需气体的平衡，可以估算出实现 150 千瓦持续工作所需的气流：

- 1 公斤 H₂ 和 8 公斤 O₂ 产生约 20 kWh 电能
- 每小时需要 7.5 公斤 H₂ + 60 公斤 O₂
- 1 平方米的空气重 1.2 公斤，含有 0.24 公斤的氧气

由此，每小时必须向燃料电池供应 250 m³ 的大气空气。由于燃料电池的负载变化相当快，因此压缩机需要具备快速启动能力，通常需要在几分之一秒内从零加速到 100% 的速度。由于这些要求，驱动压缩机的逆变器的额定功率通常为 20–40 kW。

为了真正将基于燃料电池的车辆视为一项绿色技术，必须利用可再生能源制造氢气。从石油或天然气中提取氢气在技术上是一种选择，但这种所谓的灰氢会导致大量产生二氧化碳作为副产品。

目前正在考虑将风能和太阳能等可再生能源的电能与电解相结合，将水分离成氢气和氧气。特别是当用于消耗多余的电能时，它提供了一种支持电网稳定并产生氢气作为副产品的选项。世界各地的许多国家都提出了将氢的使用作为减少温室气体排放的基石的计划。

电解是一种直流驱动的应用。单个电解槽的正向电压低于 2V，但在工业制氢中需要数千安培的电流。最普遍的兆瓦级整流方案是图 8 所示的 B12C 拓扑。

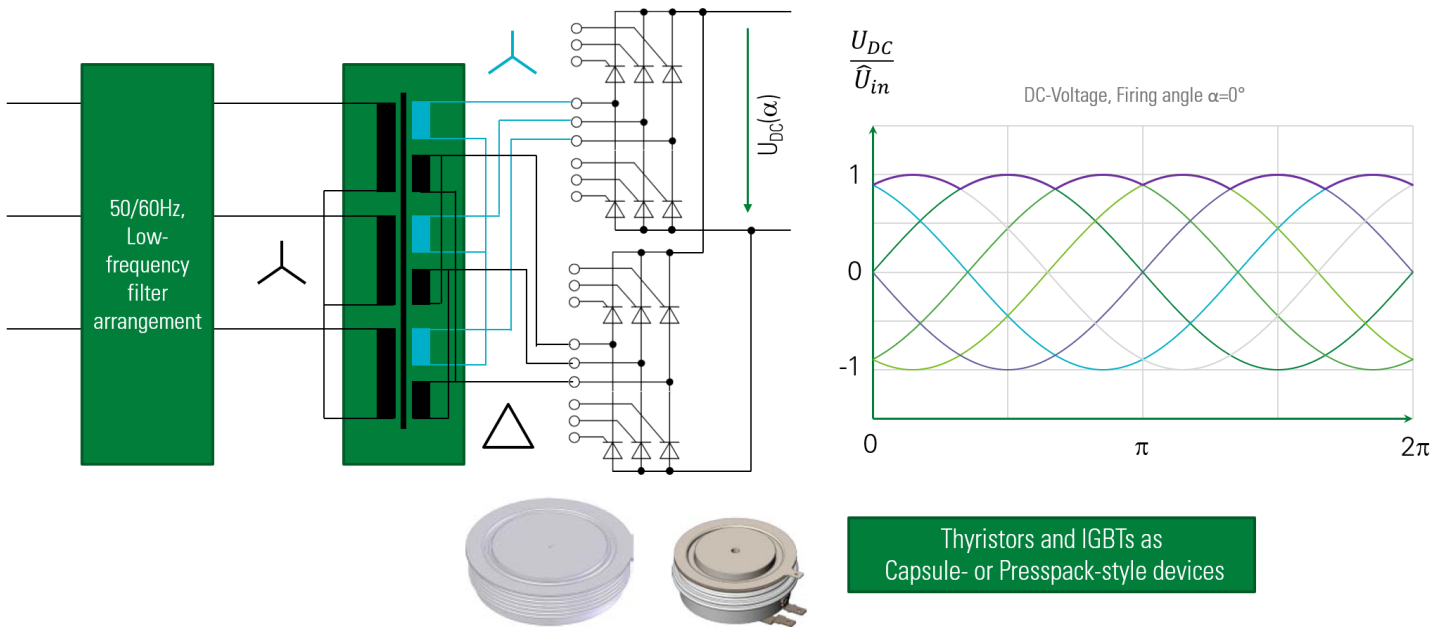


图 8. 具有 B12C 的整流器拓扑，也称为 B6C-2P

B12C 拓扑也被认为是两个 B6C 的并联，被称为 B6C-2P，即使没有滤波，也能在直流侧实现非常低的纹波。单级 AC-DC 能量转换也实现了高效率。

使用的相应电力电子器件是压接式的晶闸管或 IGBT，通常安装在 stacks 中。由于 IGBT 的额定电流高达 4500 A，晶闸管的额定电流甚至超过 8000 A，这些器件可轻松满足大电流要求。此外，压接式的器件具有短路故障特性，在串联冗余应用中，可提高系统的可靠性。

5. 用例 1 - 车队运营和停车场充电

现代电池技术和功率半导体解决方案能够设计高效的基础设施。图 9 描述了停车场充电的现代版本，而图 10 则提供了 100 多年前的场景。



图 9. 具有充电基础设施的现代公交车站



图 10. 1917 年伦敦圣潘克拉斯车站为电动货车充电

停车场充电是当地车队运营的首选方案，尤其是公共汽车和运输车辆。它们在相当固定的路线上运行，并在夜间闲置数小时。

截至 2021 年，普通电动公交车的电池容量在 250 至 500 kWh 之间，使其能够在不充电的情况下运行一班。停车场的充电器只需为一辆车充电一夜。即使在 6 小时内充电 80% 的 500 kWh 的情况下，70 kW 的功率也足够了。当然，对于整个停车场来说，这要乘以同时要充电的车辆数量。

充电桩的典型原理图包括 AC-DC，隔离的 DC-DC，如图 11 所示。

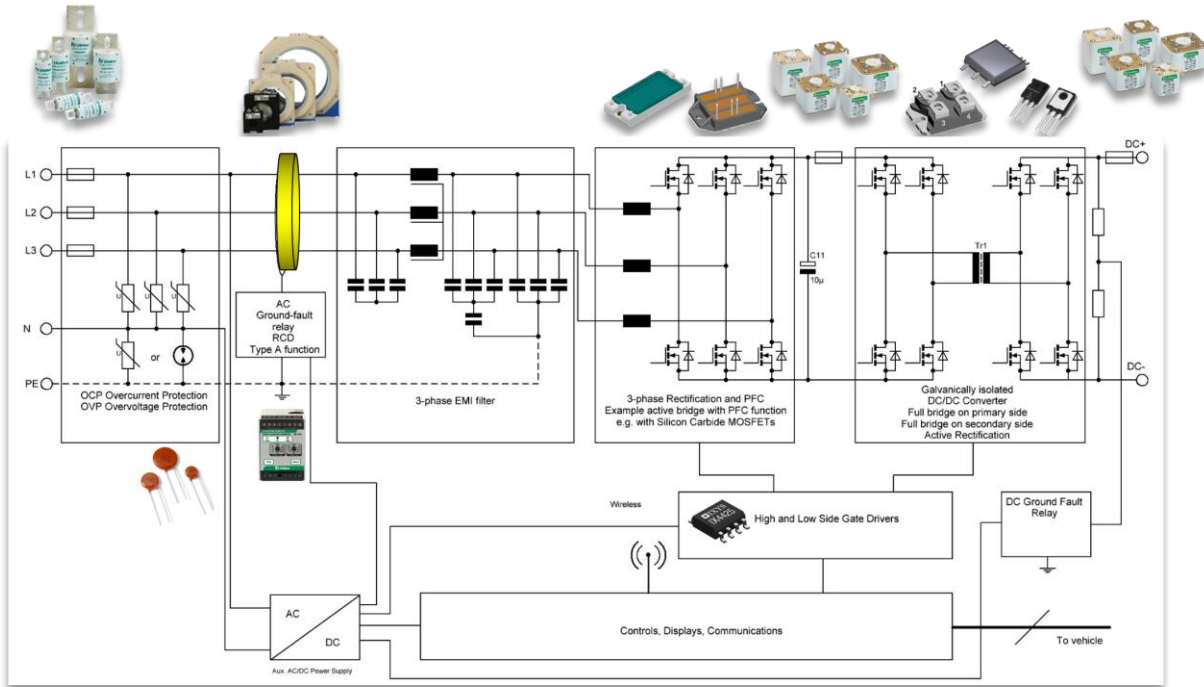


图 11. 双向充电原理图以及合适的器件

充电桩通常采用模块化构建，这些模块可以并联以增加输出功率。常见设计是每个模块的功率为 15–60 kW，器件的选择因输出功率要求和散热方式而异。10–15 kW 强制风冷模块广泛采用分立器件制造，但功率级别较高的液冷式充电桩使用功率模块。除了增加输出功率外，并联模块还可以用作冗余，以使系统能够以较低的功率运行，而不是在单个模块出现失效的情况下使整个系统瘫痪。

站点式储能有助于减少电网负载压力，在能源需求高峰期间，可以为电网提供支持。负载平衡和定时充电也可以成为一种选择。在夜间能源需求低谷时充电。从整体上看，停车场和更大的工业区都可以成为太阳能发电站。在具有固定时间表的车队中，并非所有车辆都必须同时充满电。车辆之间的能量共享是可能的，并且那些未计划投入使用的车辆也可以贡献其存储的能量。在图 12 中可以看到一个潜在的场景。



图 12. 使用太阳能和储能的车队运营整体方法

图 12 所示的项目已经建成并投入使用^[6]，还有更多项目正在建设中^[7]。

早在 2014 年，在纽约进行的电动公交车试验^[8]表明，与柴油或 CNG 驱动的同类产品相比，电动公交车每英里的行驶成本降低了 1 美元以上。

另一种独特的情况出现在美国。在这里，超过 480,000 辆校车在使用中，被公认为是全国最大的公共交通工具。这些公交车每年^[9]。通常情况下，他们在上午运行一次，下午运行第二次，中间不会开车。假设每辆电动公交车^[6]，这将类似于具有 96 GWh 存储容量的分散式储能。尤其是在暑假期间，这些公交车连续 100 天不服务，而且由于夏季空调使用量的增加，正好可以在能源需求高的时候提供电网支持。截至 2021 年年中，现任美国政府已经宣布了针对这一特定车队的零排放政策。

6. 用例 2——即时充电

沿着预先确定的路线运营车队，可以通过更频繁地即时充电来扩展行驶里程。这就是所谓的即时充电，如果它以完全自动化的方式进行，则效果最佳。

这种充电方式预定有两种基本的解决方案。

6.1. 受电弓的即时充电

受电弓是一种机械系统，它允许大型电触点移动更长的距离并安全地接触它们的对应物。受电弓广泛用于有轨电车和铁路应用，是经过了的可靠性验证的技术。根据安装位置，受电弓可以分为自上而下和自下而上的系统。自下而上的系统安装在车辆上并与车站接触，而自上而下的机械装置是车站的一部分，下降到车辆上。如图 13 所示。给出了如何设置受电弓充电的示例。



图 13. 自上而下的即时充电受电弓

与停车场充电相比，即时充电需要更高的功率，因为在单个站点停留的时间有限，通常为 125–250 kW 的功率。充电站和车辆的电池管理系统之间的充电电压和电流需要相匹配。由于涉及到高功率，通过受电弓充电始终是直流充电，直接接入车辆电池。

对于未来的安装方式，受电弓被视为预定的解决方案，特别是对于自动驾驶汽车，因为不涉及需要精确处理的插头或电线。该系统可以轻松处理不同高度的车辆，并且可以在构造上允许车站和车辆之间的错位。

6.2. 使用无线电力传输 (WPT) 的即时充电

无线充电在智能手机等移动设备中也很流行，可以升级功率以满足大规模能量传输的需求。SAE J2594 中描述了车辆规模系统的无线电力传输。如图 14 所示。示意了 WPT 系统。

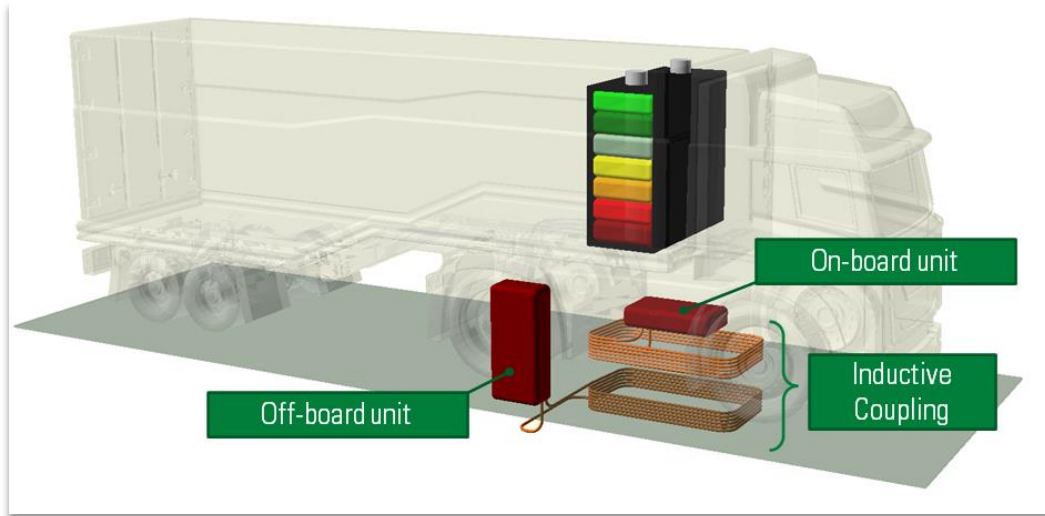


图 14. 大功率感应充电系统总体外观

WPT 系统本质上由两个独立的部分组成，它们通过变化的磁场交换能量。错误!未找到引用源。。

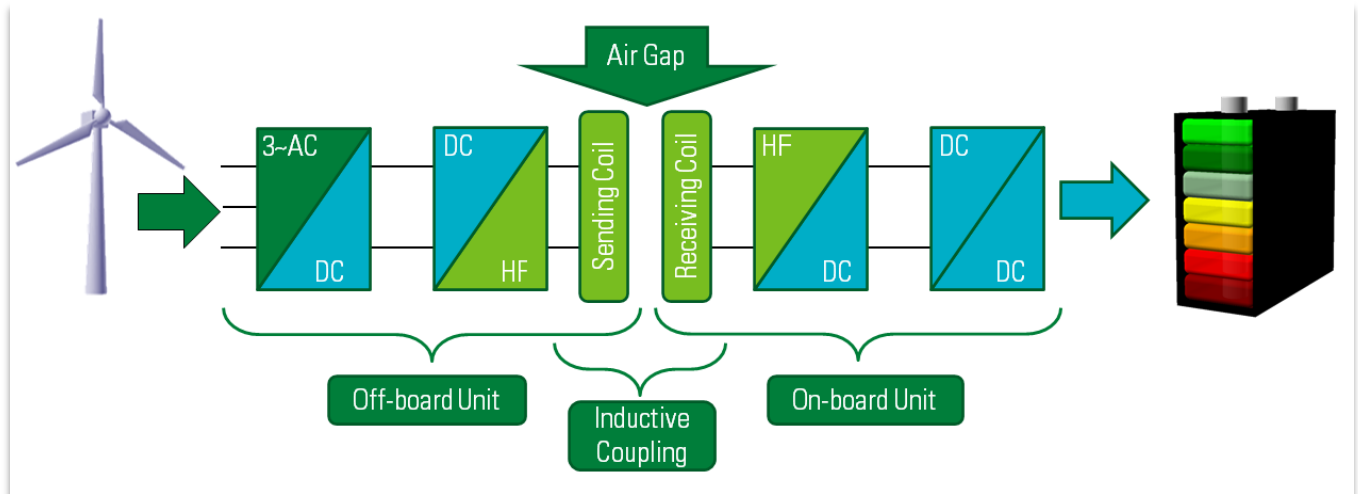


图 15. WPT 系统的一般架构

无线电力传输标准要求发送方和接收方之间的互操作性，尽管它们的额定功率水平不同。这导致要求优化为 7.7 kVA 的发送设备必须与 3.3 kVA、11.1 kVA 或 22 kVA 的接收器保持兼容。很明显，对于不同的功率等级，发送和接收线圈具有不同的几何形状，而在同一功率等级中，发送和接收线圈可以共享相同的几何形状。由于互操作性要求，必须容忍接收和发送线圈的非对称线圈布置。

为了防止过多牺牲传输效率，SAE J2594 设定了传输效率至少达到 80% 的目标。

为了满足这一要求，如图 16 所示。所示的串联谐振电路成为一种常用方法，工作在 80–140 kHz 的频率范围内。

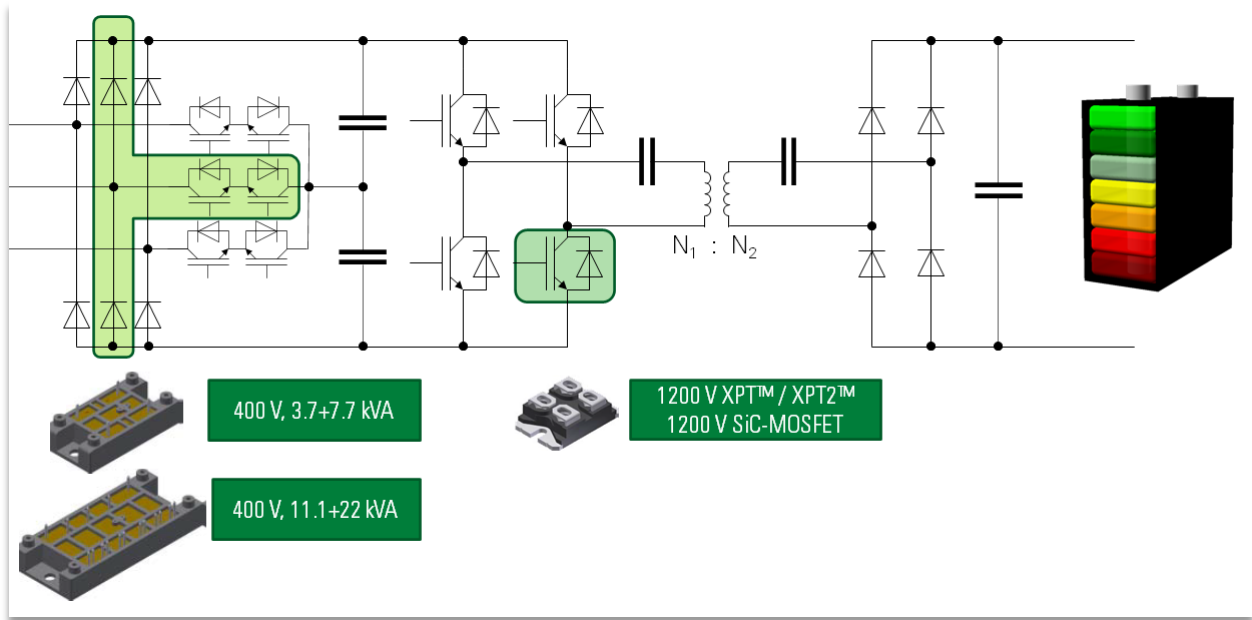


图 16. 串联谐振 WPT 架构

可以考虑多种输入整流拓扑，包括低成本的二极管整流器或晶闸管。由于出色的 EMI 性能、减少了滤波所需的工作量以及可调节的直流母线电压，Vienna 整流器是一种常见的解决方案。

采用 80–140 kHz 的高开关频率来驱动标准要求的发送线圈，可以选择低开关损耗的 IGBT 或碳化硅 MOSFET 作为 DC–DC 转换级。

感应充电器需要安装在车辆可以跨越的地方。因此，感应充电主要适用于半公共区域。例如，机场的行李运输车可以受益于无线电力传输，因为它适合这种功率等级和地形条件。

除了技术挑战外，无线电力传输还有一个独特的要求。发送线圈和接收线圈之间的间隙可以达到几十厘米，这足以容纳异物甚至活体。必须注意，充电过程中线圈之间不能有导电部件，因为感应能量可能导致金属物体产生热能，甚至熔化。宠物和小动物等活体也是如此。充电期间的磁场产生的热能可能超过活体可承受的极限，并造成严重损伤。

7. 用例 3 - 个人长途运营

像长途物流一样，在随机路线上行驶也需要类似的单独大功率充电。这种大功率充电需要成为现有基础设施的一部分，以便将电动客车无缝集成到移动领域。

欧洲目前为客车推出的 350 千瓦充电器仍需要 2 小时的休息时间，以便为更大的客车的 500 至 600 千瓦时电池组充电。高达 800 千瓦的功率已经被宣布了，但参与定义充电标准的 CharIn 组织已经推出了商用车大功率充电标准（HPCCV）。

使用高达 1500 V 的直流电压和高达 3000 A 的最大充电电流，超过 2 MW 的功率充电成为可能。如图 17 所示。比较了商用车充电与乘用车充电的规模。

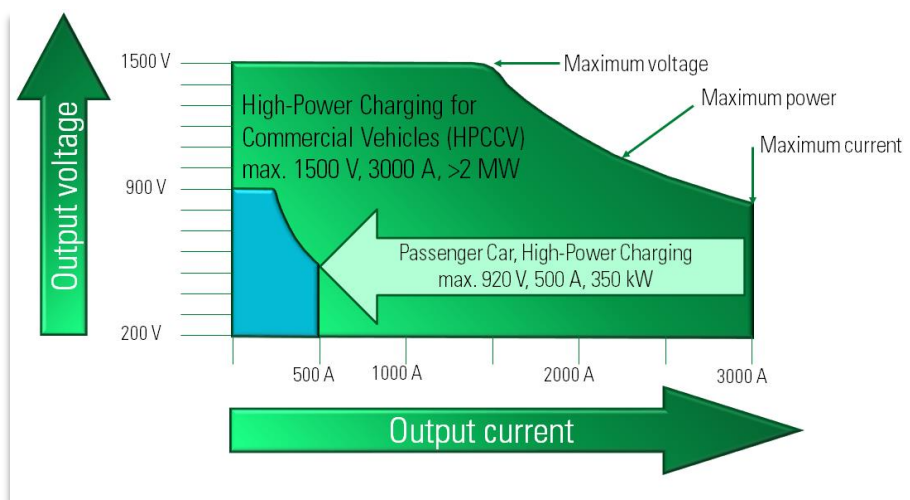


图 17：大功率乘用车和商用车充电桩的工作面积比较

在 2 兆瓦功率充电时，可以在大约 15 分钟内提供 500 千瓦时的电能，再行驶 300 公里，这完全可以满足司机为遵守法律要求而必须做的休息时间。然而，400 V 的城市低压三相电网将无法支持这一级别的电力。

在这种情况下，需要考虑以中压电网供电的本地电源。尽管使用储能电池进行缓冲是一种潜在的选择，但成本较高。

使用中压电网可以为兆瓦级充电桩提供两种最有希望的选择。

7.1. 扩展的 stack

一种基于 350 千伏安乘用车充电站的方案，如图 11 所示，可以在功率上进行扩展，以满足兆瓦充电应用。几个子系统并联在一起，形成一个充电站，提供所需的输出功率。如果构建 250 kVA 到 500 kVA 的子系统，则需要 4 到 8 个单元的 stack，如图 18 所示。

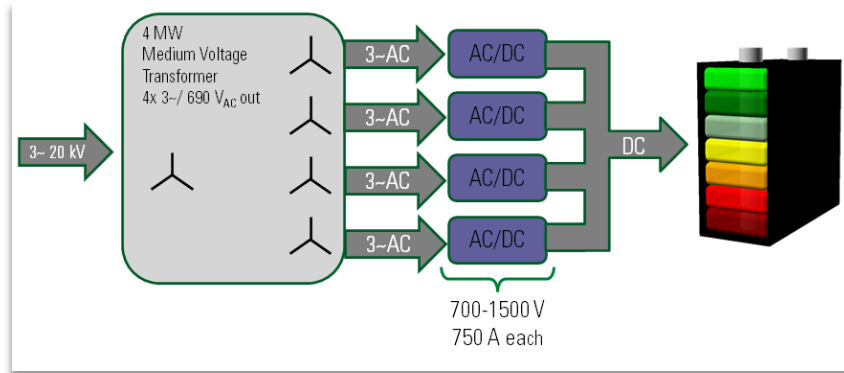


图 18. 兆瓦级直流充电站的架构

兆瓦领域还提供了进一步的选择，因为电池和电网之间的隔离变压器，后级 AC-DC 可以不需要隔离变压器。

与扩展为乘用车充电的架构相比，可以采用类似电解中常用方法。请记住，基于晶闸管的 B6C 电桥仅在降压模式下运行，中压输入变压器需要采用不同的匝比和绕组方案进行设计，如图 19 所示。

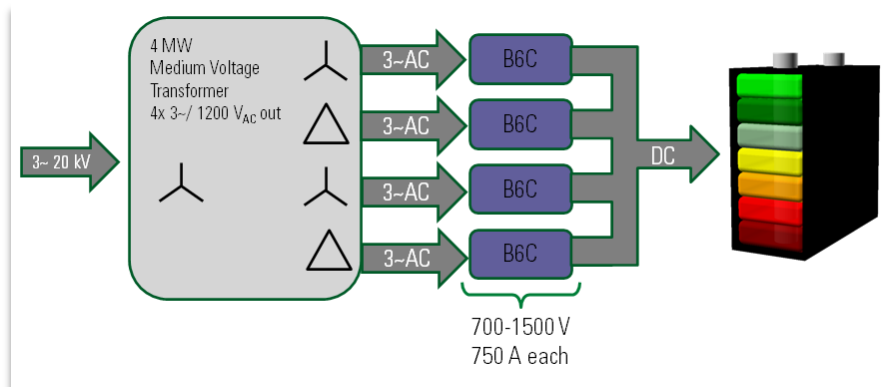


图 19. 基于桥式晶闸管的兆瓦直流充电

尽管如图 8 中给出的用于电解的单个 B12C 结构仅有两个 B6 桥在技术上是足够的，但这样的系统将只有有限的冗余选项。

消除各个转换器的隔离级，可提高效率并最大限度地减少每千瓦安装的成本，压接式 stack 也减少了空间需求。

为电动重型车辆供电的其它解决方案不在本白皮书的范围内，包括运行期间的动态无线充电^[10]和通过架空线供电^[11]

用例 4——建筑机械

除公交车和卡车外，城市建筑工地的挖掘机、履带式装载机或推土机等工程车辆在恶劣环境中作业时，对驾驶员或乘客的舒适度要求较低。因此，开关磁阻电机 (SRM) 可以替代驱动系统中的永磁同步电机 (PMSM)。

这种电机类型是同步电机，但不需要永磁体；机械设计更简单，因此 Nm/\$ 的比率更好。转矩密度略低于永磁同步电机的转矩密度，但转子表面没有磁铁，因此可以获得更高的转速。

顾名思义，SRM 的特点是类似于步进电机的操作模式。由于可感知的振动和可听见的噪音，它们不是将驾驶舒适性放在更高优先级的应用中的主要选择。

在电子方面，SRM 是具有三个独立绕组的三相电机，需要独立供电。这台机器的扭矩只取决于电流的幅度。与 PMSM 相比，电流方向无关紧要。因此，驱动 SRM 的电力电子模块仅由高压侧和低压侧斩波器组成，如图 20 所示。

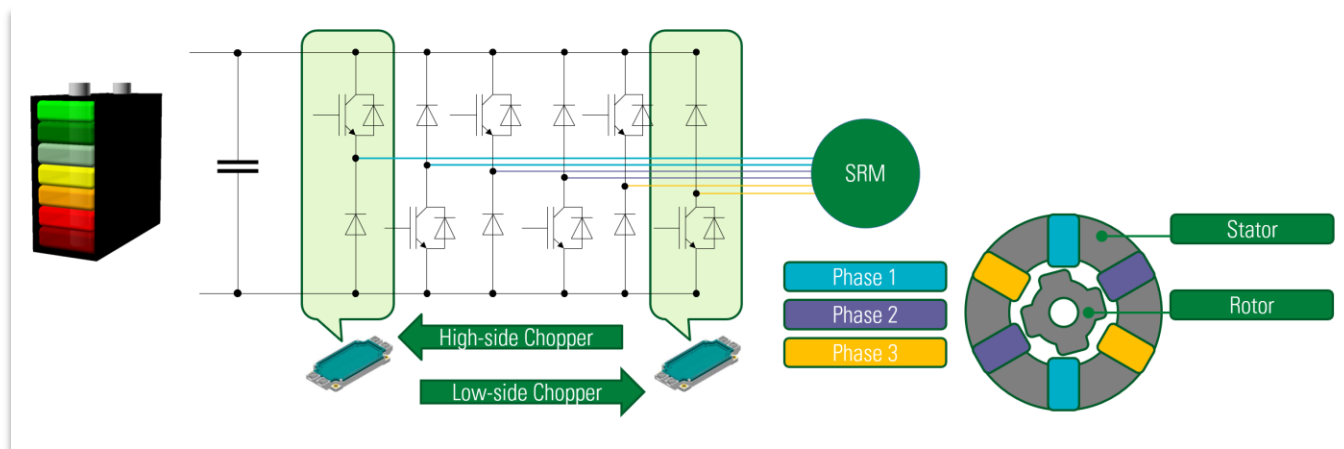


图 20. 控制开关磁阻电机 (SRM) 的功率架构和示意图

大型工矿企业中的矿车是一类特殊的工程车辆。自 20 世纪 70 年代以来，这些自重数百吨、有效载荷相同的车辆一直是柴油-电动混合动力车^[12]。他们巨大的驱动系统可以达到超过 3500 马力的输出功率。

由于每天长时间不间断的运行，这种特殊级别的工程车辆具有类似于机车的驱动系统。工作电压没有标准化，最高可达 2.5 kV。构建功率转换器的合适功率器件压接式 IGBT 和 GTO，图 21 给出了概述。

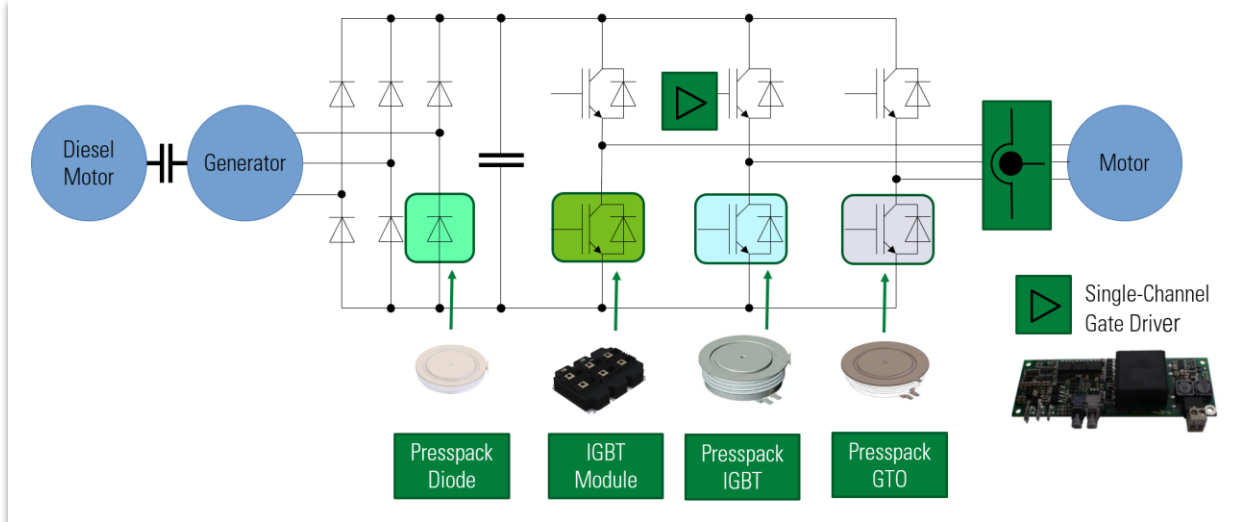


图 21 . 兆瓦级应用中的大功率驱动系统

8. 结论

公交车、卡车和工程车辆等重型车辆的电动化并没有一种万能的解决方案，因为需求差异太大。然而，常见的场景与解决方案是类似的。根据不同的重型车辆的应用，Littelfuse 可提供各种电力电子器件，涵盖千瓦级到兆瓦级的应用。

9. 参考文献

- [1] European commission, https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en, visited May 12th, 2021
- [2] US Bureau of Transportation Statistics, <https://www.bts.gov/browse-statistical-products-and-data/freight-facts-and-figures/combination-truck-fuel-consumption>, visited May 12th, 2021
- [3] Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-17/this-is-the-dawning-of-the-age-of-the-battery>, visited May 12th, 2021
- [4] INNOLITH AG Hirzbodenweg 95, 4052 Basel, Switzerland, <https://innolith.com/technology/>, visited May 12th, 2021
- [5] Thomas Built Buses Delivers Its 50th Electric School Bus, <https://insideevs.com/news/506038/thomas-50th-electric-school-bus/>, visited June 8th, 2021
- [6] Buses Go Truly Zero Emission with Solar Power, <https://goexplorer.org/buses-go-truly-zero-emission-with-solar-power/>, visited June 9th, 2021
- [7] Qatar home to region's first ever solar-powered bus depot, <https://www.dohanews.co/qatar-home-to-regions-first-ever-solar-powered-bus-depot/>, visited June 9th, 2021
- [8] BYD and New York Metropolitan Transportation Authority (MTA) Complete a Successful Pilot of BYD All-Electric Bus, <https://www.businesswire.com/news/home/20140108006692/en/BYD-York%C2%A0Metropolitan-Transportation-Authority-MTA-Complete-Successful#.UtRaL2RDv4V>, visited June 9th, 2021
- [9] New York School Bus Contractors Association NYSBCA, <https://www.nysbca.com/fastfacts.html>, Visited May 12th, 2021
- [10] KAIST rolling out dynamic wireless charging in buses in South Korea, <https://www.greencarcongress.com/2013/08/kaist-20130808.html>, visited June 11th, 2021
- [11] eHighway – Electrification of road freight transport, <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/road/ehighway.html>, visited June 11th, 2021
- [12] Terex 33-19 "Titan", https://en.wikipedia.org/wiki/Terex_33-19_%22Titan%22, visited June 11th, 2021