



机器人电子书

在 48V 架构中使用高密度功
率转换器构建更好的机器人

VICOR

目录

3 引言

4 案例研究

物流机器人

配送机器人

收割机器人

安防巡检机器人

OLogic 现场打印机器人

Saab Seaeye 全电动工作级水下机器人

18 技术文章

为什么要选择电源模块,而不是分立式电源解决方案?

高性能电源模块封装的特性

高密度、模块化供电网络优化移动机器人性能

40 工具

电源系统设计工具

白板工具

机器人电子书简介

在快速发展的机器人世界中,供电已经成为了决定这些设备性能、效率和可靠性的关键因素。传统的分立式电源解决方案往往无法满足现代机器人技术的苛刻要求,如紧凑的尺寸、高效率和散热管理。

Vicor 高性能电源模块为这些挑战提供了革命性的解决方案。通过结合先进的电源架构、卓越的散热管理和无与伦比的效率, Vicor 电源模块使机器人工工程师能够在 48V 架构中使用高密度电源转换来设计和构建更强大、更敏捷、更可靠的机器人。

本电子书为开发更好的的供电网络、满足当今机器人电源系统需求提供了指南。从案例研究开始,您将看到其他公司是如何利用 Vicor 技术来克服设计的挑战。

接下来,深度技术文章和白皮书将指导您了解电源模块相比传统分立式电源解决方案的主要优势,封装如何影响供电网络 (PDN), 满足各类机器人电源系统需求的不同方案,以及高密度、高性能电源模块如何缩短产品上市时间。

最后,本电子书还提供了一系列先进在线工具的链接,以帮助您轻松使用和集成这些创新电源模块。

无论您是想改进产品特性和功能、为满足未来需求进行扩展,还是缩短产品上市时间,本电子书都将通过优化供电网络的方法,帮助您找到改进设计的途径。

Vicor 提供更好的供电方案,助力实现更远的续航里程、更长的运行时间、更高的载荷与功能,同时加速产品上市进程。

案例研究

案例研究：物流机器人



高效电源模块实现系统运行时间最大化，提升工作效率



客户所面临的挑战

自主移动机器人 (AMR) 和无人搬运车 (AGV) 等物流机器人在大型仓储环境中执行库存管理和订单履行任务，具有不同的尺寸和功能特点。这些机器人使用 24V 至 72V 电池供电，需要随时充电，因此电源转换效率、体积和重量都至关重要。随着导航、传感和安全要求的不断提高，电源转换面临更大挑战。其主要目标包括：

- 可扩展的电源，使平台能够迅速适应不同应用场景
- 高效率运行，延长运行时间
- 支持多种负载端电压需求，无需增加重量



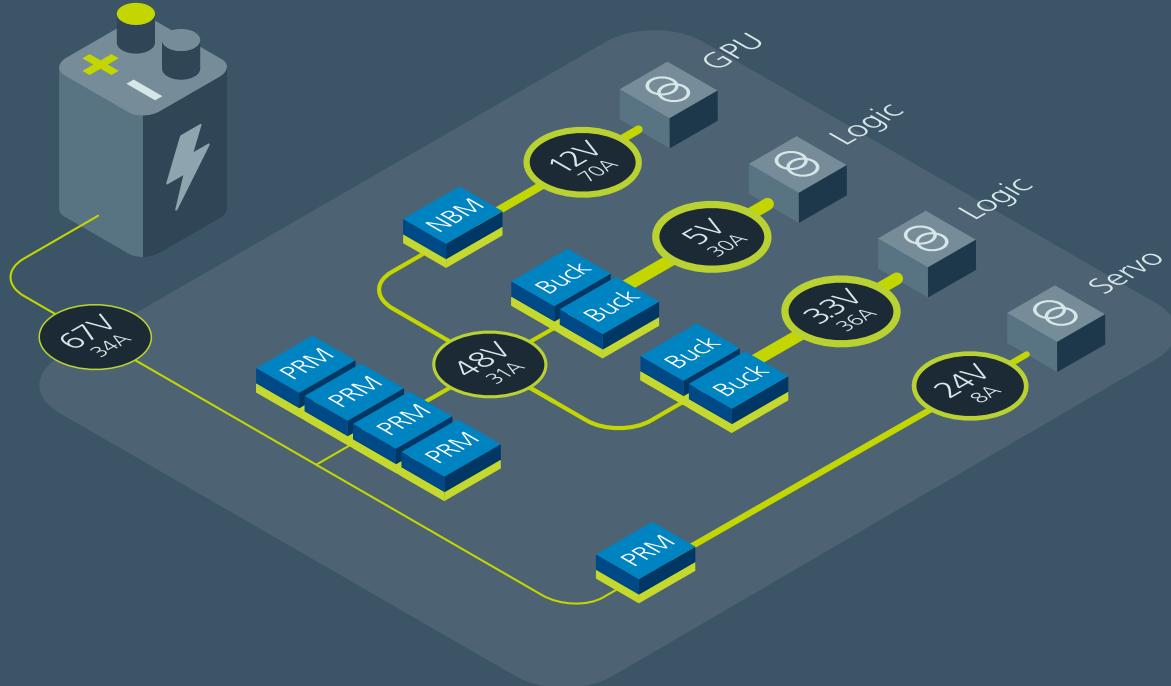
Vicor 解决方案

物流机器人的核心任务是高效工作，同时在障碍物众多的仓库中安全移动。Vicor 高性能电源模块有效节省重量和板载空间，为各类配件预留更多空间以确保安全运行。通过简单更换或添加模块，供电网络可轻松重新配置，适应不同平台的各种功率需求。其主要优势包括：

- 零电压开关拓扑结构实现 97.4% 的高效率
- 电源模块可根据多样化功率需求灵活扩展
- 紧凑的高密度电源模块优化空间利用

67V 电池供电机器人的供电网络

PRM™ 电源模块是一款高性能升降压稳压器，能以 96% 至 98% 的效率创建 24V 至 48V 的中间母线，为伺服电机和其他下游电源模块供电，包括固定比率 NBM、ZVS 降压和 ZVS 升降压稳压器。所有模块都支持并联，以实现更高功率转换。



PRM™ 稳压器

非隔离稳压

输入: 48V (36 – 75V)

输出: 48V (5 – 55V)

功率: 高达 600W

峰值效率: 98%

小巧至 22.0 x 16.5 x 6.73 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/prm



NBM™ 母线转换器

非隔离固定比率

输入: 36 – 60V

输出: 7.2 – 15.3V

功率: 高达 2400W

峰值效率: 98%

小巧至 23 x 17 x 5.2 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/nbm



ZVS 降压稳压器

非隔离稳压

输入: 12V (8 – 18V),
24V (8 – 42V), 48V (30 – 60V)

输出: 2.2 – 16V

电流: 高达 22A

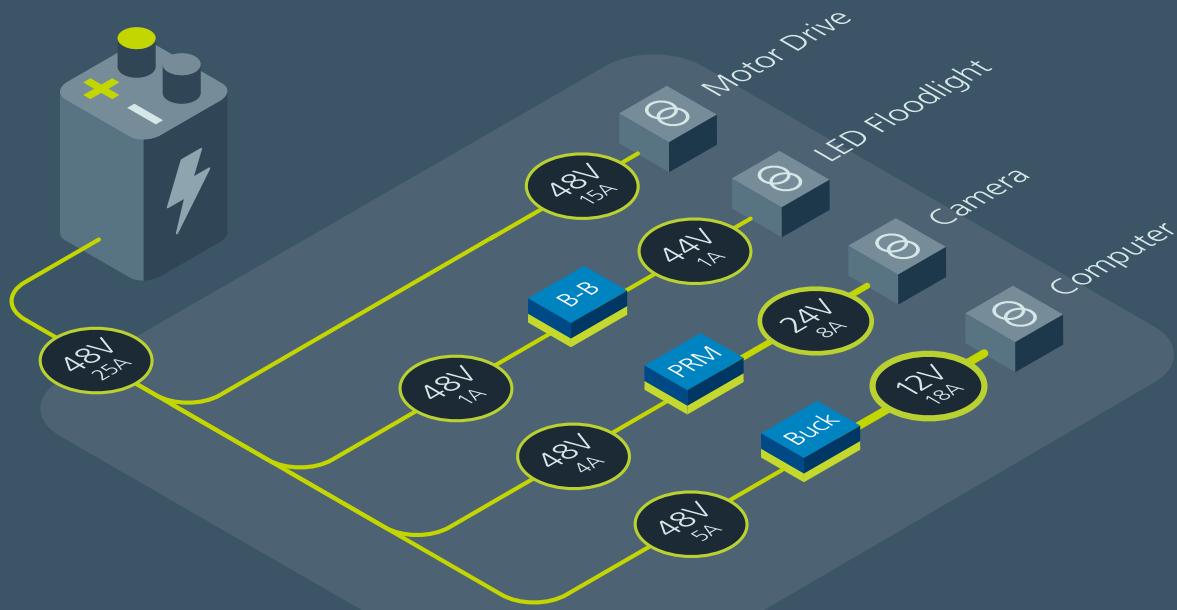
峰值效率: 98%

小巧至 10.0 x 10.0 x 2.56 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/buck

使用 24 至 48V 电池的机器人供电网络

另一种电源总成架构强调使用从电池到负载点的直接转换。PRM™、ZVS 降压和 ZVS 升降压稳压器支持这些应用。其中一个例子是 PI3740 ZVS 升降压稳压器，它采用 $10 \times 14 \times 2.5\text{mm}$ SiP 封装，峰值效率高达 96%，可提供超过 100W 的功率。



ZVS 升降压稳压器

非隔离稳压

输入: 8 – 60V

输出: 10 – 54V

功率: 高达 150W 持续电流

效率: 超过 97%

10 x 14 x 2.56 毫米

vicorpower.cn/zh-cn/buck-boost



ZVS 降压稳压器

非隔离稳压

输入: 12V (8 – 18V),
24V (8 – 42V), 48V (30 – 60V)

输出: 2.2 – 16V

电流: 高达 22A

峰值效率: 98%

小巧至 10.0 x 10.0 x 2.56 毫米

vicorpower.cn/zh-cn/buck



PRM™ 稳压器

非隔离稳压

输入: 48V (36 – 75V)

输出: 48V (5 – 55V)

功率: 高达 600W

峰值效率: 98%

小巧至 22.0 x 16.5 x 6.73 毫米

vicorpower.cn/zh-cn/prm

案例研究：配送机器人



轻巧高效的电源模块延长配送路线 并节省空间以装载更多货物



客户所面临的挑战

这一类自主机器人的核心任务是完成杂货、外卖食品和网购商品的最后一公里配送。尽管载重大小和重量各不相同，但这些机器人通常需要具备较长的运行时间，一般由 48V 至 100V 的电池供电。配送机器人配备了各种传感器、摄像头和 GPS 技术，以确保安全高效地在周围环境中导航。这些机器人依赖电池供电，这给它们的作业范围带来了挑战。其主要目标包括：

- 延长配送范围和运行时间
- 提供紧凑轻巧的解决方案以节省空间
- 支持多种负载端电压需求



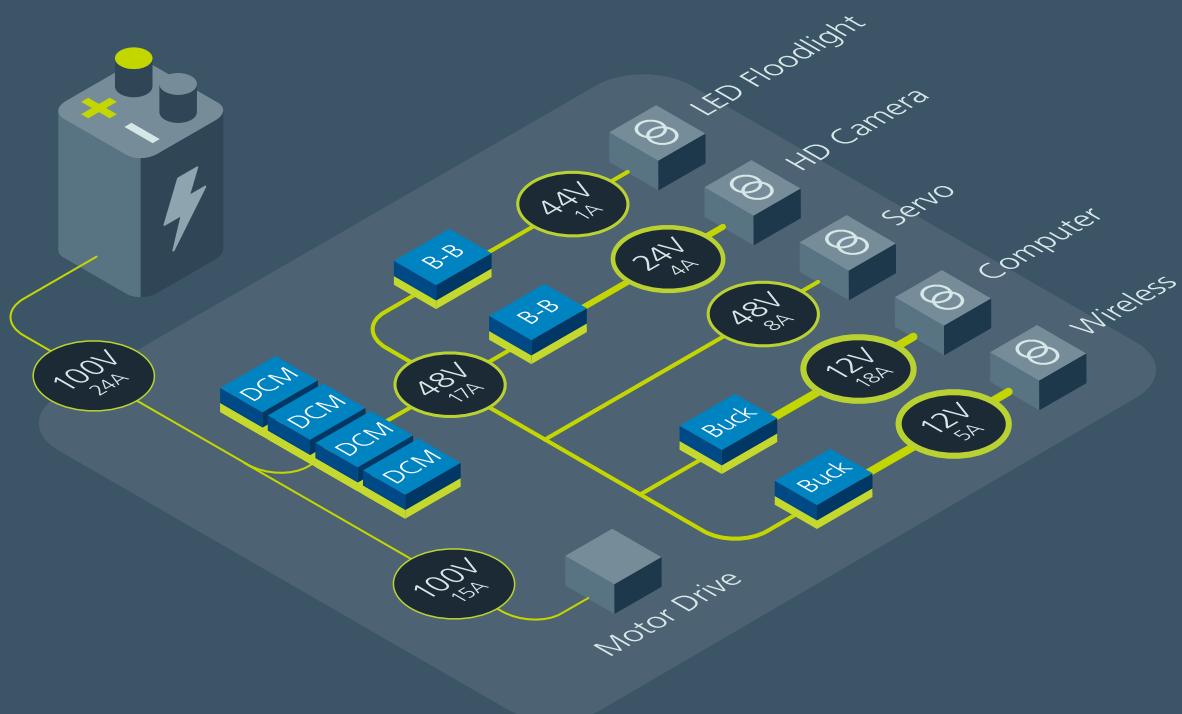
Vicor 解决方案

Vicor 的高性能电源模块减少了机器人板载空间占用和重量，为传感器和导航系统留出更多空间，使配送机器人能够携带更大负载和物品。Vicor 电源模块的高效率水平延长了机器人运行时间，使其能够安全到达更远的目的地。其主要优势包括：

- 模块化设计满足灵活的设计需求
- 紧凑的高密度电源模块优化可用设计空间
- 高效的解决方案延长电池续航时间

供电网络

DCM™ 转换器系列可适应这类应用需求，支持 43-154V 的输入电压范围。DCM3623 能够将电池电压转换为稳压的 24V 或 48V 配电，用于伺服驱动器、其他负载和下游转换器。DCM3623 采用 36.38 x 22.8 x 7.26mm 封装，能以 90% 的能效提供 240W 的功率输出。在建立 24-48V 电压轨后，通常可以使用 ZVS 降压或降压-升压稳压器为低压电压轨供电。



DCM™ DC-DC 转换器

隔离稳压

输入: 9 - 420V

输出: 3.3, 5, 12, 13.8, 15, 24,
28, 36, 48V

功率：高达 1300W

峰值效率·96%

小巧至 24.8 x 22.8 x 7.21 毫米

[vicorpower.cn/zh-cn/dcm](http://www.vicorpower.cn/zh-cn/dcm)



ZVS 升降压稳压器

非隔离稳压

输入: 8 - 60V

输出: 10 – 54V

功率: 高达 150W

效率: 超过 97%



ZVS 降压稳压器

非隔离稳压

输入: 12V (8 – 18V),
24V (8 – 42V), 48V (30 – 60V)

输出: 2.2 – 16V

电流: 高达 22A

峰值效率·98%

小巧至 $10.0 \times 10.0 \times 2.56$ 毫米

vicorpower.cn/zh-cn/buck

案例研究：收割机器人



采用坚固可靠、高效率的电源模块，最大限度延长恶劣环境下运行时间



客户所面临的挑战

收割机器人是设计用于农场执行各种任务的机器，通常可以自主运行。它们配备了传感器、摄像头和 GPS 系统来进行导航并感知周围环境。这些大型机器人车辆或设备通常由 400V 或更高电压的 DC 电源供电。其主要目标包括：

- 提高生产力
- 高功率密度，支持更高的输入电压
- 坚固可靠的设计，确保持续运行



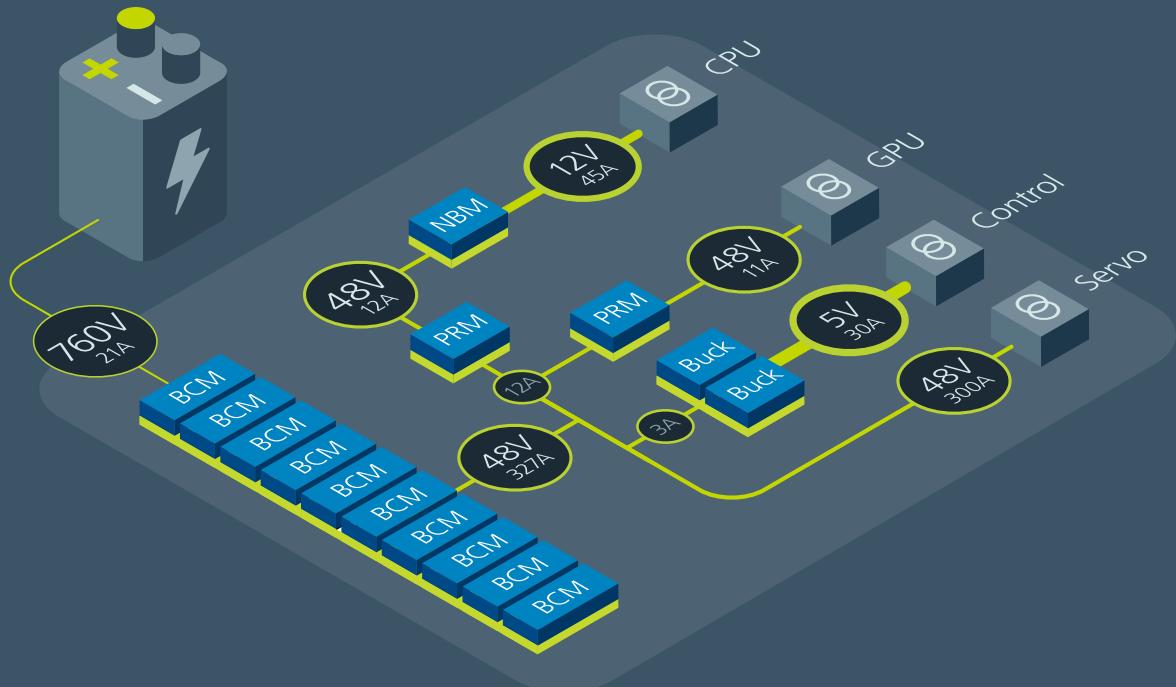
Vicor 解决方案

Vicor 固定比率电源模块能够安全地将这些应用中常用的 400V 或 800V 电池电压转换为 48V 安全超低电压，输出功率可达 1600W 以上。这些模块具有很高的效率，配合下游 Vicor 的负载端 (PoL) 转换器和稳压器，可大幅降低功耗并简化散热管理从而提高生产力和可靠性。其主要优势包括：

- 将高压高效转换为安全的 48V 安全超低电压 (SELV)
- 坚固耐用、高度一体化的电源模块，确保高可靠性
- 更高的效率可降低功耗

供电网络

在这类设计中, Vicor BCM® 转换器系列可以将高压电池电压转换为安全的标称 48V。以 BCM4414 为例, 其封装仅为 111 x 36 x 9mm, 却能以超过 97% 的能效提供超过 1600W 的功率输出。BCM 是一种固定比率转换器, 输出电压为输入电压的 1/16。根据需要, 可以使用 Vicor NBM™、PRM™、ZVS 降压和 ZVS 升降压稳压器等固定比率或负载端稳压转换器为各个下游低压电压轨供电。



BCM® 母线转换器

隔离固定比率

输入: 800 – 48V

输出: 2.4 – 55.0V

电流: 高达 150A

峰值效率: 98%

尺寸 22.0 x 16.5 x 6.7 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/bcm



PRM™ 稳压器

非隔离稳压

输入: 48V (36 – 75V)

输出: 48V (5 – 55V)

功率: 高达 600W

峰值效率: 98%

小巧至 22.0 x 16.5 x 6.73 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/prm



NBM™ 母线转换器

非隔离固定比率

输入: 36 – 60V

输出: 7.2 – 15.3V

功率: 高达 2400W

峰值效率: 98%

小巧至 23 x 17 x 5.2 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/nbm



ZVS 降压稳压器

非隔离稳压

输入: 12V (8 – 18V),
24V (8 – 42V), 48V (30 – 60V)

输出: 2.2 – 16V

电流: 高达 22A

峰值效率: 98%

小巧至 10.0 x 10.0 x 2.56 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/buck

案例研究：安防巡检机器人



紧凑型电源模块为先进传感器预留空间，提升安全性和性能



客户所面临的挑战

机器人能够到达人类无法抵达的地方，能确保人员安全，维护设施的安全。巡检机器人能够更频繁地监测基础设施，在问题发生前及时补救，从而挽救生命、节约时间和成本。有些带供电线缆的机器人在 400V 高压环境下工作，需要将电压转换至 12V 并提供 1.5kW 的电力输出。其主要目标包括：

- 高效设计，延长运行时间
- 可在高温下运行
- 支持多种负载端电压需求



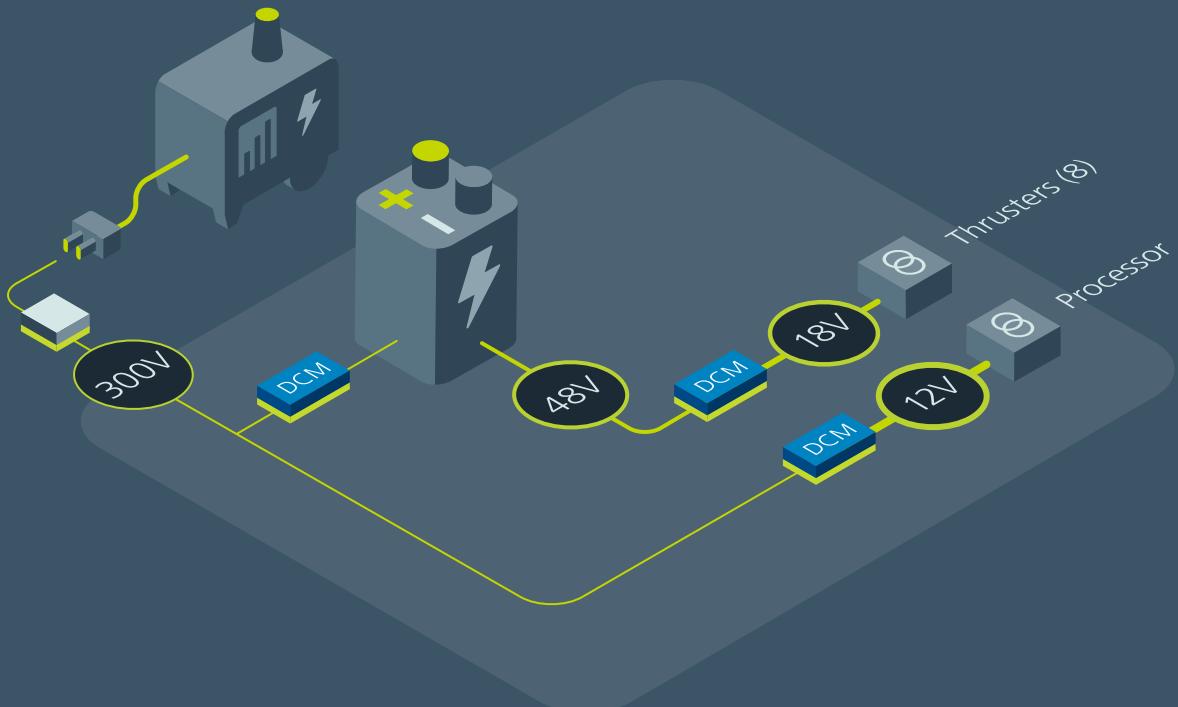
Vicor 解决方案

安防机器人需要支持多种传感器和执行器以实现高效且有效的监测，Vicor DCM™ 电源模块具备出色的散热性能和超高功率密度，可为各类负载端提供所需电压。Vicor DCM 的高功率密度特性有助于简化线缆布线和组装，同时提升电池效率、性能表现和续航时间。其主要优势包括：

- 更高功率密度和效率，延长运行时间
- DCM 采用先进封装和拓扑结构，优化热负载管理
- DCM 易于并联，便于系统扩展

供电网络

在此案例中,一个 DCM4623 隔离型稳压 DC-DC 转换模块将 300V 的系线电压转换为 12V, 为控制器供电;另一个模块提供 48V 母线,再使用 DCM3623 模块将电压降至 18V,为推进器组件供电以驱动机器人。此模块化供电网络的体积不到两部手机大小,却能以 92% 的效率提供 1.5kW 的功率输出。



DCM™ DC-DC 转换器

隔离稳压

输入: 9 – 420V

输出: 3.3, 5, 12, 13.8, 15, 24,
28, 36, 48V

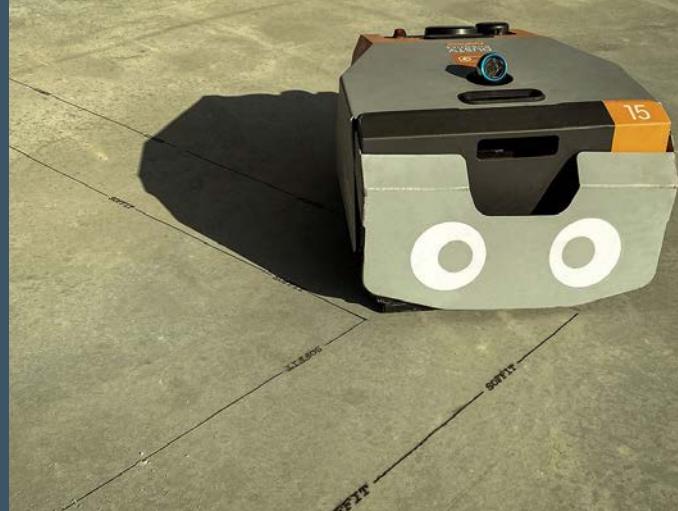
功率: 高达 1300W

峰值效率: 96%

小巧至 24.8 x 22.8 x 7.21 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/dcm

案例研究：
OLogic 现场打印机器人



推动下一代机器人技术革命



客户所面临的挑战

设计下一代改变世界的机器人需要多学科的专业知识——电子、机械、软件和动力系统工程。新型移动机器人需具备更大载荷、更长续航时间和更高效率，这些关键指标正是其核心竞争力所在。而对于移动机器人而言，电源往往是制约下一代创新的关键瓶颈。尺寸、重量与能效是电源设计的核心要素，它们直接决定着机器人的性能表现。OLogic 的主要目标包括：

- 延长运行时间，提高生产效率
- 提升精度，消除错误和昂贵的返工
- 提升工作现场安全性



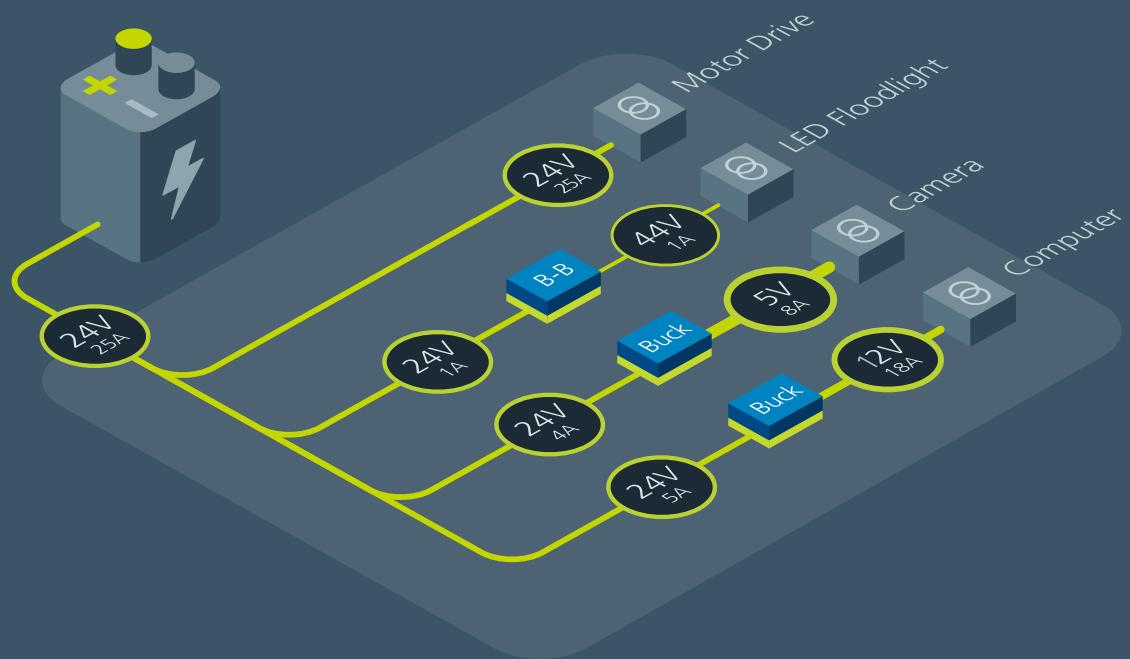
Vicor 解决方案

移动机器人需要小巧、轻便和高效的电源，以最大限度地提高性能。与分立电源设计相比，用电源模块设计一个供电网络更容易，也更具可扩展性。OLogic 选用 Vicor 电源模块，因其具备高功率密度、高效率及易用性优势。通过与 Vicor 合作，这些打印机器人成功消除了传统耗时耗力的施工图纸地面转印流程。其主要优势包括：

- 紧凑型高密度电源模块优化可用设计空间
- 轻松实现串联使用，速度提升 5 倍同时精度近乎完美
- 高效的解决方案延长可用电池寿命

功率密度和效率是机器人投资回报率 (ROI) 的关键

OLogic 意识到只有利用 Vicor 电源模块宽广的工作范围,他们才能设计出工作效率和散热效率很高的 PDN。Vicor 模块,如 ZVS 降压稳压器,提供 200 至 300 瓦的功率和 97% 的效率,具备极高的成本效益。



ZVS 降压稳压器

非隔离稳压

输入: 12V (8 – 18V),
24V (8 – 42V), 48V (30 – 60V)

输出: 2.2 – 16V

电流: 高达 22A

峰值效率: 98%

小巧至 10.0 x 10.0 x 2.56 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/buck



ZVS 升降压稳压器

非隔离稳压

输入: 8 – 60V

输出: 10 – 54V

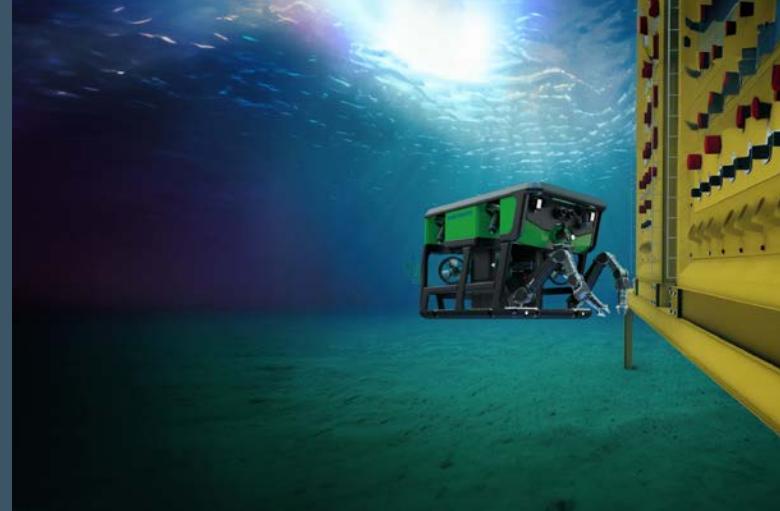
功率: 高达 150W 持续电流

效率: 超过 97%

10 x 14 x 2.56 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/buck-boost

案例研究:Saab Seaeye 全电动
工作级水下机器人 (eWROV)



更高的功率密度提升有效载荷和整 体机动性



客户所面临的挑战

设计远程任务困难重重,包括检查水下油气管道、高压电缆、风力涡轮机以及其他关键基础设施等。水下机器人必须具备卓越的机动性并且能够承载巨大的有效载荷才能适应多样化的任务需求。同时,水下机器人供电系统的散热问题极具挑战,必须保持紧凑、轻量化的设计。Saab Seaeye 的主要目标包括:

- 增强机动性,精准操控
- 提升载荷,扩展 eWROV 功能
- 优化热管理,最大限度减少系统过早的故障



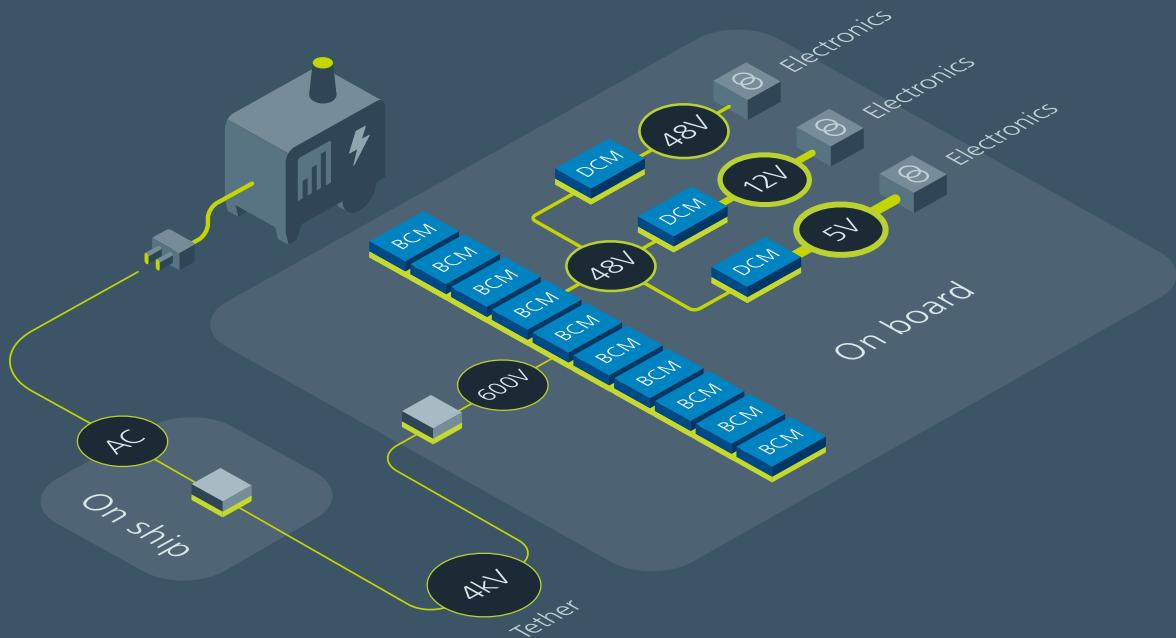
Vicor 解决方案

Vicor 解决方案提供的性能相当于 250 马力的海底液压载具。与传统液压水下机器人不同,全电动工作级水下机器人 (eWROV) 系统无需大量液压油,减少环境风险。Vicor 电源模块利用低温海水在狭小、封闭的空间内对流来冷却电源系统。其主要优势包括:

- 更高电压可使连接线缆更轻便,提升灵活性
- 超高的功率密度实现先进的功能
- 优化的热特性最大限度降低过热影响

轻量化、高功率密度的电源解决方案提升了水下机器人 (ROV) 的深海工作能力

Vicor 提供广泛的高热效能电源模块,使 Saab 能够根据行业标准的 24V 和 48V 供电电压定制供电网子系统,满足机载计算机、传感器、摄像头、照明和导航设备的需求。紧凑的电源设计可以节约全电动工作级水下机器人内部的空间,以集成更多电子元器件,提高整体性能和数据传输速度。



BCM® 母线转换器

隔离固定比率

输入: 800 – 48V

输出: 2.4 – 55.0V

电流: 高达 150A

峰值效率: 98%

尺寸 22.0 x 16.5 x 6.7 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/bcm



DCM™ DC-DC 转换器

隔离稳压

输入: 9 – 420V

输出: 3.3, 5, 12, 13.8, 15, 24,
28, 36, 48V

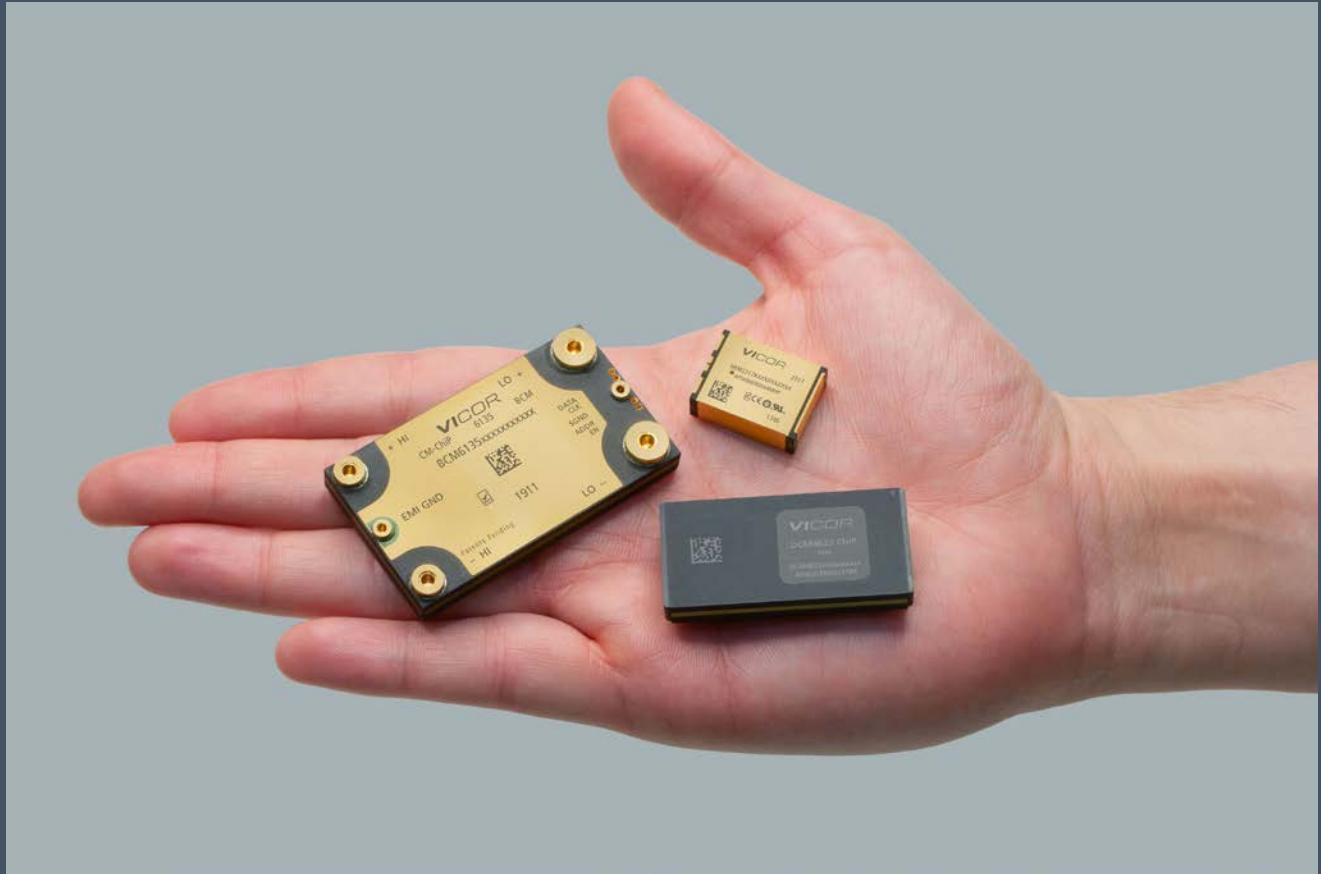
功率: 高达 1300W

峰值效率: 96%

小巧至 24.8 x 22.8 x 7.21 毫米

vicorpowers.cn/zh-cn/dcm

技术文章



文章

为什么要选择电源模块，
而不是分立式电源解决方案？

VICOR

设计供电网络 (PDN) 时,决定使用电源模块还是分立式电源解决方案,需要仔细考虑设计变量。了解使用电源模块的优势,特别是 Vicor 提供的高密度模块相对于自研分立式解决方案的优势非常重要。通过审视可靠性、可扩展性、尺寸、重量和电源设计专业技术要求等因素,我们将解释设计选项之间的差异,还将总结模块化方法为电源系统设计带来的优势。

开发供电网络时,少即是多

电源模块的故障点较少,因为设计组件较少。与分立式设计相比,电源模块需要的连接较少,从而降低了装配时出现质量缺陷的可能性。此外,由于装配环节较少,因此操作人员对电路板的处理需求也减少了,从而降低了制造过程中静电放电 (ESD) 损坏的风险。这些因素有助于提高可靠性,因此电源模块是电源系统设计更可靠的选择。

灵活扩展,高枕无忧

Vicor 电源模块不仅小巧,而且功率密度大(图 1)。鉴于大多数电源设计都必须适应非常有限的空间,因此小型电源模块可提高灵活性。紧凑的设计提供了扩展和适应电源需求变化的能力,无需昂贵且耗时的重新设计。通过重复使用预审合格的模块,设计人员可避免与完全重新设计相关的额外测试、重新认证以及采购工作。电源模块的灵活性和可扩展性可使设计修改快速高效地实施,从而缩短开发周期并节省开发成本。这最终将转化为更快的上市时间。

摆脱产品生命周期困境

在评估电源模块和分立式设计之间的选择时,考虑产品的整个生命周期至关重要。进行分立式设计时,设计、测试和验证的负担会完全落在内部电源设计团队身上。此外,从第三方机构获得必要的认证以及

管理复杂的制造和采购流程还会带来重大风险和潜在的延迟。任何扩展需求可能都需要完全重新设计,从而进一步延长开发时间。

相比之下,使用电源模块可简化供应链物流并减轻对机构的压力。这些预审合格的模块,如 Vicor 模块,经过了彻底测试和质量控制,可确保其可靠性和合规性。



图 1:Vicor 电源模块小巧、功率密度大,支持多种可用的输入和输出电压;数百个组件紧密地排列在一个小型封装中;采用不同的组合提供隔离、稳压、转换和变压功能。

此外,随着电源需求的增加,重复使用相同的模块可实现无缝的可扩展性,无需大量重新设计工作。

电源模块可提供一种更简单的电源系统设计方法,所需的专业知识更少。凭借小型化的外形和高功率密度,它们将占用更少的物理空间,从而可为 PCB 上的其它组件留出更多空间(图 2)。这些模块的高效率还可简化热管理,进而降低散热解决方案的复杂性。这种简洁可带来更便捷的设计迭代、更新及整体系统维护。

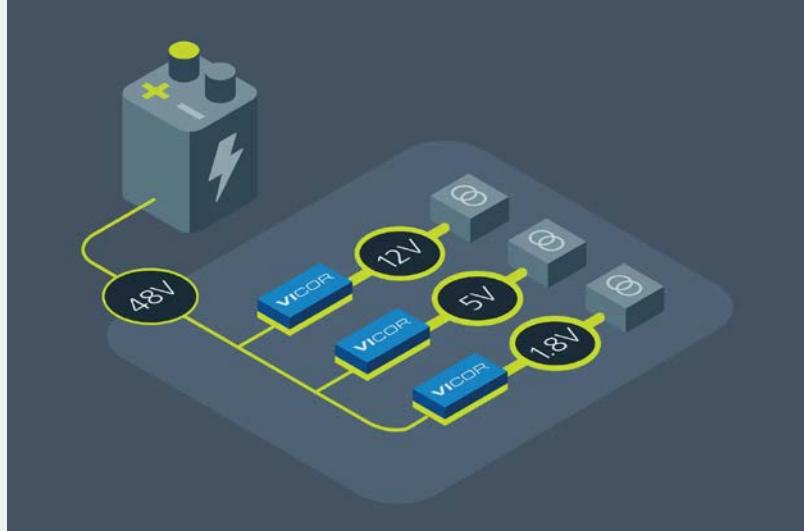


图 2:简单的模块化方法不仅灵活,而且可轻松扩展,优化供电网络所需的专业知识较少。



图 3:分立式解决方案有更多的组件需要管理,增加了设计复杂性。

另一方面,分立式电源解决方案会带来复杂的局面,在整个设计过程中需要大量的专业知识、时间和精力。这些解决方案涉及许多组件的采购、验证和集成(图 3)。即使是细微的设计修改,也需要频繁接触的沟通,可能会打乱项目进度并带来不必要的风险

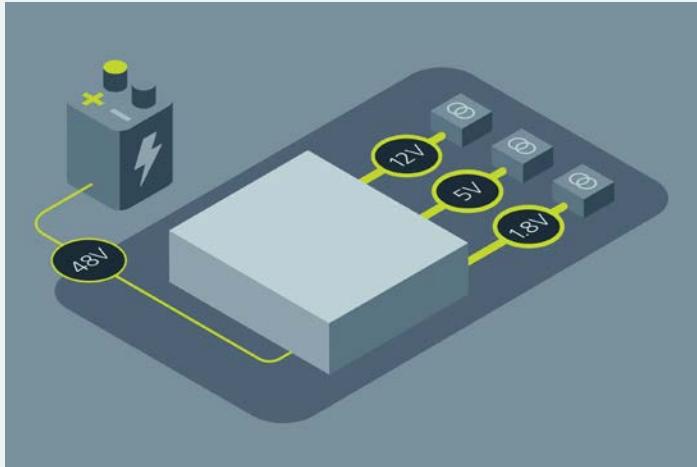


图 4: 银盒是非常不错的即插即用解决方案,但通常很笨重、缺乏灵活性。

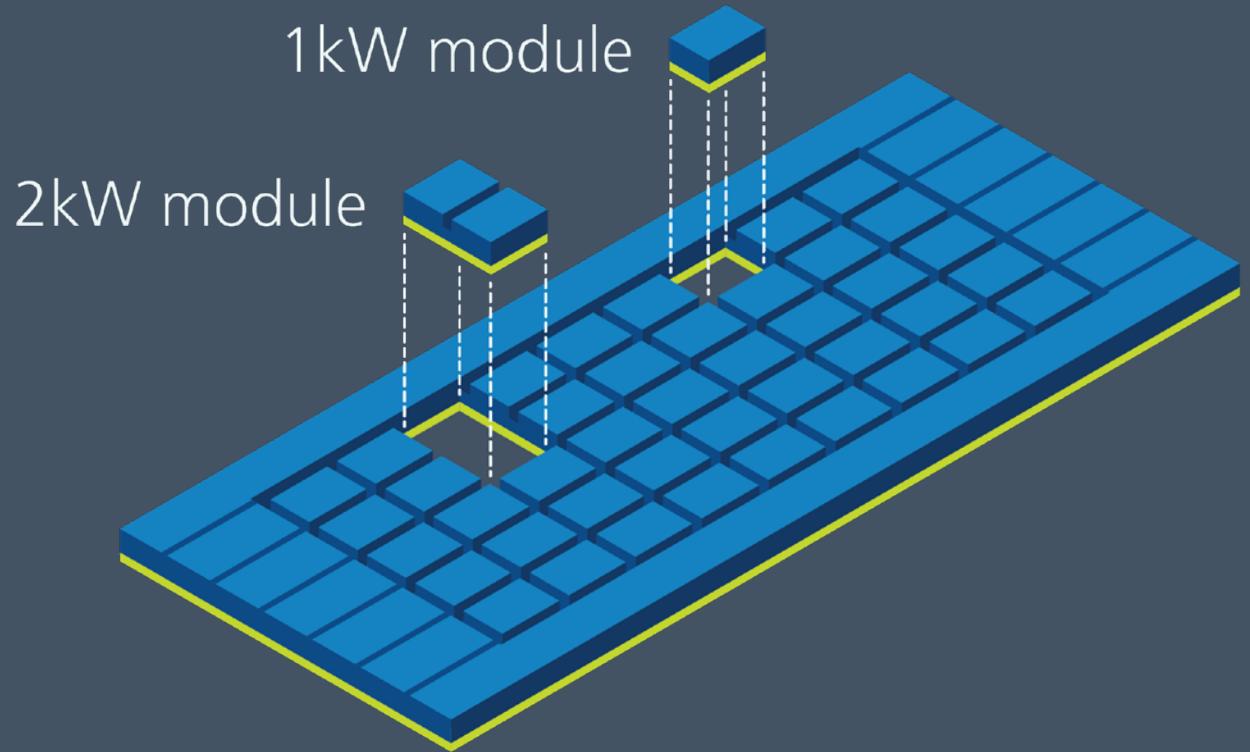
在涉及到增加更多负载或调整电源及电压水平时,分立式设计还会受到缺乏灵活性的影响(图 4)。额外的电压布线会消耗宝贵的空间并增加系统重量,因为需要更大的外盒和线缆。此外,这些分立式解决方案还很容易受到噪声影响和外部干扰,从而影响其整体性能和可靠性。

总结

总之,在评估电源系统设计选项时,电源模块比分立式电源解决方案多几个明显的优势。Vicor 的电源模块,具有先进的拓扑、小型化和和散热良好的封装,与其它分立式设计或银盒选项相比,提供了卓越的功率密度、效率和可靠性。

电源模块的使用简化了设计过程,减少组件数量以及可能出现的技术设计错误,并加速了新产品的上市进程。此外,模块化方法可实现轻松的扩展和高度的灵活性,在电源需求改变时,无需耗时的重新设计。

有了预审合格模块的保证、简化的供应链物流以及轻松重复使用模块和快速扩展 PDN 的能力,电源系统设计人员可集中精力进行创新优化,不必纠结于复杂的自研分立式解决方案。选择 Vicor 高密度电源模块,工程师不仅可实现高效、可靠、可扩展的供电网络,同时还可节省宝贵的时间和资源,加速产品上市进程。



白皮书作者:Phil Davies, 公司副总裁

高性能电源模块封装的特性

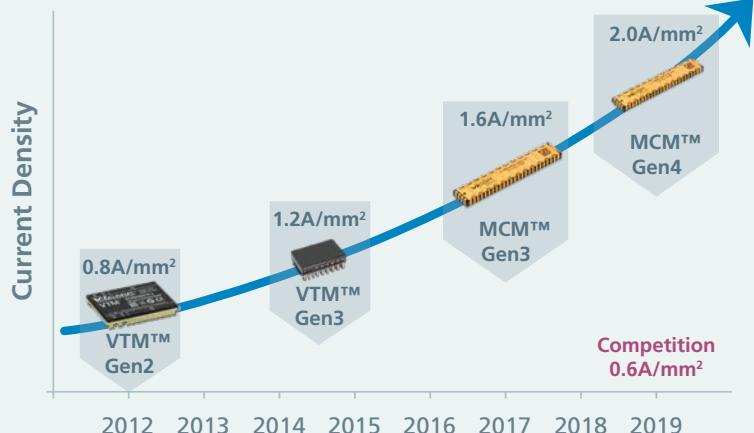
VICOR

从第一款砖型解决方案到今天的转换器级封装 (ChiP™), Vicor 一直在不断创新, 为电源系统工程师提供更高性能的解决方案。这些创新是坚定不移地发展以下四项基本技术所获得的成果: 供电架构、控制系统、拓扑与封装。

自公司创立以来, 第四项技术(电源模块封装)一直是 Vicor 独具特色的差异化技术。实现高性能电源模块封装涉及多个特性, Vicor 在每个特性发展方面都始终处于行业领先地位:

- 高功率密度和高电流密度
- 高散热性能
- 集成型磁性组件
- 兼容大批量 PCB 装配技术
- 自动化、可扩展的大批量制造

图 1: 四大创新技术的不断发展, 每隔两年半, 功耗就会降低 25%, 因此显著提高了功率密度和电流密度。



大电流与高功率密度

Vicor 电源模块封装发展的每一步都采用了新材料、有源及无源组件，而且最值得一提的是，基于更高开关频率对磁性结构进行了改进。更高频率主要通过改进 Vicor 专有控制 ASIC 中整合的拓扑和控制系统来实现的。近期推出的这些 ASIC 的第 4 代 (Gen4) 产品已分别实现 10kW/in^3 和 2A/mm^2 的功率密度和电流密度，带来了全新系列的 AC、DC 高功率前端转换器和负载点 (PoL) 电流倍增器。这些最新一代模块化电源解决方案正在改变大量产业架构和设计供电网络 (PDN) 的方式。

散热良好的封装

在电源模块内的多层电路板上放置组件的设计复杂。需要特殊材料实现最佳热传导，以便在紧凑封装的空间内控制大电流和高电压的流动，同时最大限度降低功耗。在装配平面磁性组件时电路板的作用也至关重要，因为这可能是主要的功耗源。

多年来，电源模块开发领域经历了重大的创新。2015 年，Vicor 推出了最新 ChiP™ 封装，支持组件双面放置，提高了功率密度。ChiP 实现了双面散热，可最大限度提高性能和功率额定值。两年后，镀铜 ChiP 的推出，进一步提升了 ChiP 封装技术，采用缠绕式铜套显著简化了热管理。

Vicor 高电压、高功率固定比率转换器充分利用散热良好的 ChiP 封装，通过基座贴装和通孔电路板贴两种装封选项，为 800V 至 400V 的双向转换提供高达 50kW 的阵列，同时效率高达 98.8%。

“Vicor 固定比率转换器充分利用散热良好的 ChiP 封装，通过基座贴装和通孔电路板贴装两种封装选项，为 800V 至 400V 的双向转换提供高达 50kW 的阵列，同时效率高达 98.8%”

集成型磁性组件

材料科学在提高电源封装性能方面发挥着巨大作用，特别是在开关频率为多兆赫的时候。在电源模块的几个磁性组件中，一部分与主电源开关的栅极驱动器电路有关，属于超小型低功耗装配件。栅极驱动器变压器在最大限度降低栅极驱动器损耗过程中发挥着重要作用，多年来在不断地研究中得到了优化。

转换器或稳压器的主蓄能铁芯在模块的整体性能中发挥着重要作用，而且这也是功耗的主要源头之一。不断优化铁芯、铁芯绕组和 PCB 材料成分，提高开关频率和功率级并降低输出电阻，不仅可降低功耗，而且还可提高效率。通过把蓄能电感器或变压器集成到电源模块内并最大限度提高其性能，不仅将电源系统设计人员从难度大、耗时长的电源转换器磁性组件的优化中解放出来，而且还能缩小电源系统的整体空间占用。Vicor 一个能获得所有这些重要设计要素的电源模块系列是电流倍增器，现主要为高性能计算应用中的一些最高级 GPU 和 AI 处理器供电。Vicor VTM™、MCM™ 和 GCM™ 不仅能提供超过 1,000 安培的电流，同时还能直接把 48V 转换成 1V 以下的电压。这些器件中集成的平面磁性组件经过 20 多年的优化，电流倍增器现在能达到 2A/mm^2 的电流密度，其在不久的将来还将得到进一步提升。

与大批量 PCB 装配技术兼容

世界各地的大批量承包制造商 (CM) 都使用表面贴装回流焊。Vicor 最新 SM-ChiP 是一款电镀覆盖压模封装，旨在满足印刷电路板表贴装附件需求，与 CM 制造技术和设备兼容。通过焊接 (连接) 端到分布于模块四周的城堡型电镀引脚及接续的封装主体电镀表层，来实现电气和散热连接。SM-ChiP 封装兼容铅锡和无铅焊料合金，以及水溶性和免洗助焊剂。此外，他们能被拾取贴装到 PCB 上。此外，Vicor 还提供详细的 [SM ChiP™ 回流焊建议](#)，以确保成功实施。

“Vicor 最新
SM-ChiP™ 是一款电
镀覆盖压模封装，旨
在满足印刷电路板表
面贴装附件需求，与
CM 制造技术及设备
兼容。”

电源模块的大批量自动化生产

Vicor 最初的 VI Chip 封装也是一种覆盖压模封装，但制造使用的是单个空腔构造。相比之下，最新 ChiP™ 从标准尺寸面板切割而成，能充分利用模块内 PCB 的双面安装有源及无源组件。

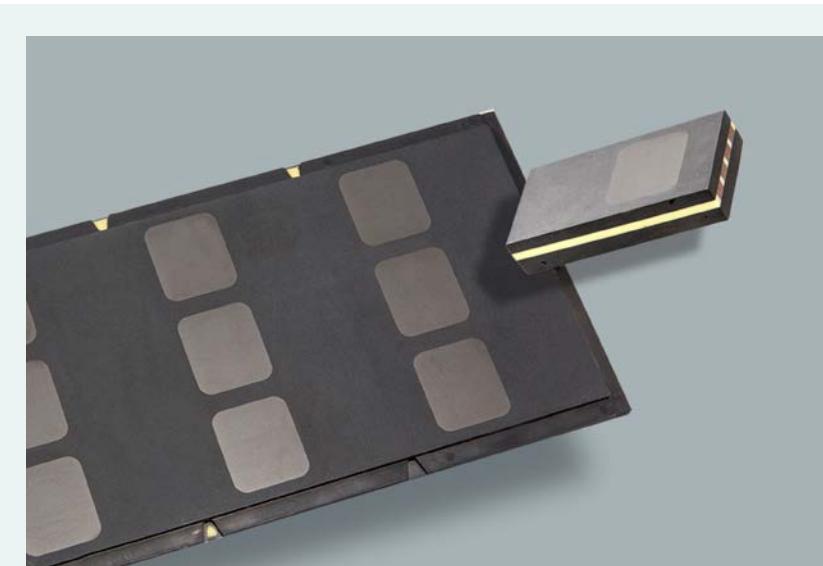
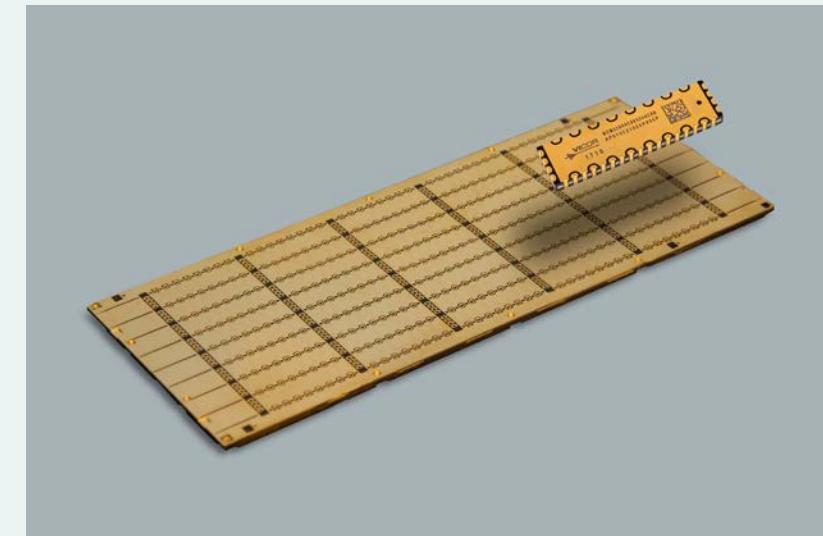


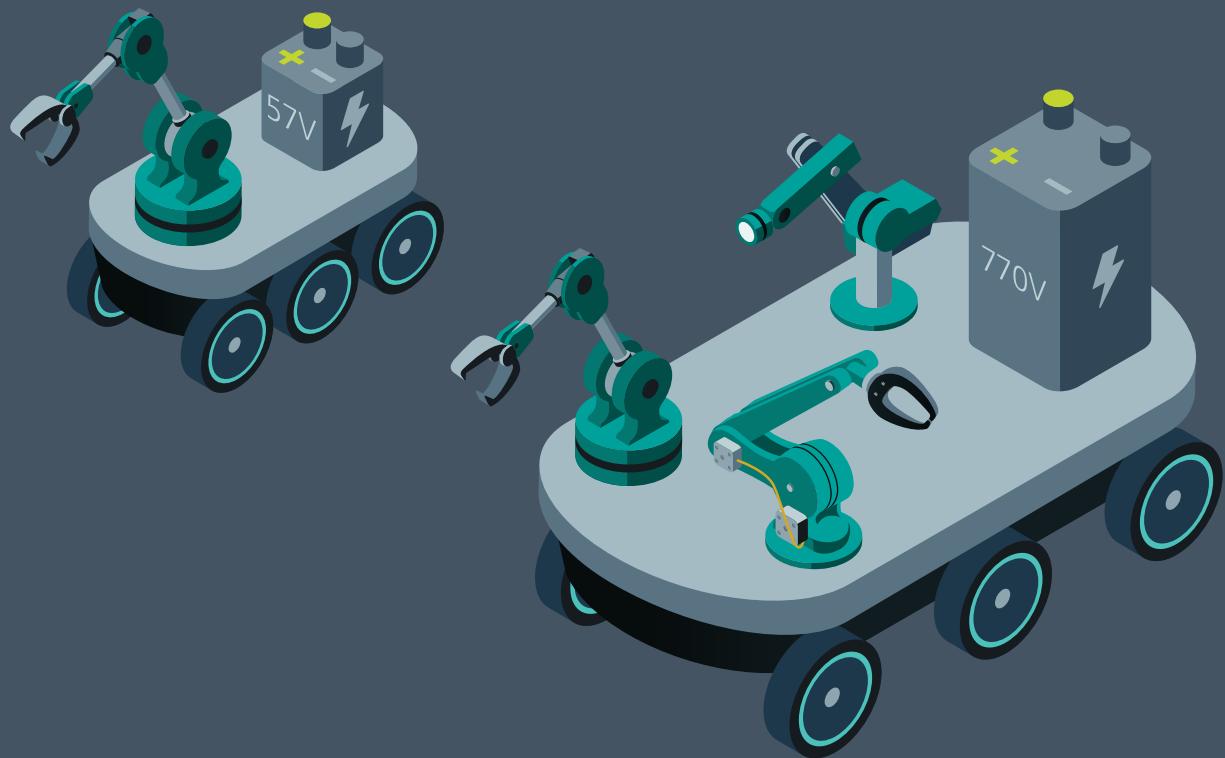
图 2：最新面板制造工艺是电源行业的又一项创新。ChiP 均从相同尺寸的面板切割而来，支持自动化大批量制造流程。



这种封装的热管理需要双侧散热，才能最大限度提高性能和功率密度。从面板制造切割 ChiP 与从晶圆制造切割硅芯片的方法类似，无论模块功率、电流或电压水平怎样，ChiP 都是从相同尺寸的面板切割而来，实现了精简的、大批量和高度扩展的生产操作。

结论

Vicor 始终处于提供高性能模块化供电网络 (PDN) 的最前沿, 不断推动包括供电架构、控制系统、拓扑和封装在内的四项技术的发展。对于客户在高性能计算、电动汽车、卫星通信和工业应用领域的高级系统开发, 这四大技术都是实现其所需性能的关键。然而, 电源模块封装汇集了所有创新元素, 是材料科学和大量独创技术令关键的密度和效率性能指标得以实现。



白皮书

高密度、模块化供电网络 优化移动机器人性能

VICOR

固定比率的高效率降压及升降压转换器增大工作范围、延长持续时间并提高有效负载

可通过对供电网络 (PDN) 的优化设计，提高移动机器人的工作范围、生产力和灵活性。由于电池电源电压的变化以及各种各样的负载，其可能是诸如大功率 AI 计算系统、电机驱动器、传感器、通信系统、逻辑电路板和处理器等典型系统的一部分，因此这种 PDN 中有复杂的电源系统设计和架构注意事项。此外，在开发使用大功率开关稳压器的密集系统时，也会自然而然地产生 EMI 注意事项。因此，[机器人电源系统](#)面临许多独特的挑战，需要全新的方法来应对。

使用 Vicor 高密度、高性能电源模块的模块化 PDN 设计方法可应对这些挑战。了解基本工程原理以及超级计算应用的经验，探索如何利用 [Vicor 固定比率电源转换器](#)宽输入范围的高效率零电压 (ZVS) 降压或升降压稳压器来提高高级机器人电源系统的性能和设计灵活性。

要考虑的两种方法：

在高达 75V 的供电网络中，依据 IEC 的 $110V_{DC}$ SELV(安全超低电压) 范围内使用宽输入电压范围的降压及升降压稳压器。这允许低电压机器人功率转换级比它们的隔离 DC-DC 对应级小，和 / 或适应在更大或更小平台上使用的更高或更低电池电压。

- 使用[固定比率转换器](#)来有效提高或降低电源电压，并在相同的 PDN 内增强其动态响应能力，或使其适应更高电压的电源。

这两种电源拓扑的各种[供电网络架构](#)可为设计人员实现符合其设计目标的移动系统提供多种选项。

模块化方法的尺寸、重量及性能优势

为高级机器人设计电源系统时，针对每个所需的负载电压简单地重复使用可靠的 DC-DC 转换器极具诱惑力，因为这种需求以全新的有效载荷形式出现，无论是为 LIDAR、GPU、伺服驱动器供电，还是为 LED 探照灯等恒流负载供电，都是如此。不断发展的系统复杂性也适时表明了需要对电源需求和架构进行更全面的了解。为使用最新电源转换器技术设计电源系统提供了显著的尺寸、重量、性能及成本优势。只有在负载容限范围大、电池电压范围窄以及隔离层数量少的情况下，在最大功率持续时间短以及待机时间长的系统中，这些优势才会增加。使用更高效率的更新非隔离降压或升降压转换器，即使输入电压高于 24V，也可提高整体系统性能。

固定比率转换器支持低阻抗路径和快速瞬态响应。这些产品的智能布置有助于电机驱动器等负载快速提取电流，消除了稳压 DC-DC 转换器固有的响应延迟，以及长距离低压线缆上的压降。

这两种方法都能实现本文将探讨的全新架构解决方案。

探索典型的机器人系统需求

考虑两个机器人平台，它们的电池电源和各种高功率负载如图 1 所示。为了简单起见，该电池可作为第一款支持 15-S LiFePO4 和 57V 浮动电压的电池，就像用于带操作器或其它伺服驱动器的越野“最后一英里”送货机器人一样；与基于 24V 或 48V 的系统相比，57V 可提高能量密度。想象一下，如果还要求在一个更大的平台上安装相同或更强大的“大脑和肌肉”，比如自动驾驶卡车或带 200-S 电池（支持 770V 浮动电压）的收割机机器人，或者从头设计，该怎么办。

负载要求如下：

- 有发电功能的 48V 和 / 或 24V 伺服驱动器
- 12V GPU 及 CPU 电路板、50A 以上的电流
- 电流为几十安培的 5V 和 3.3V 电轨
- 其它外设所需的任何较低功耗的辅助电压

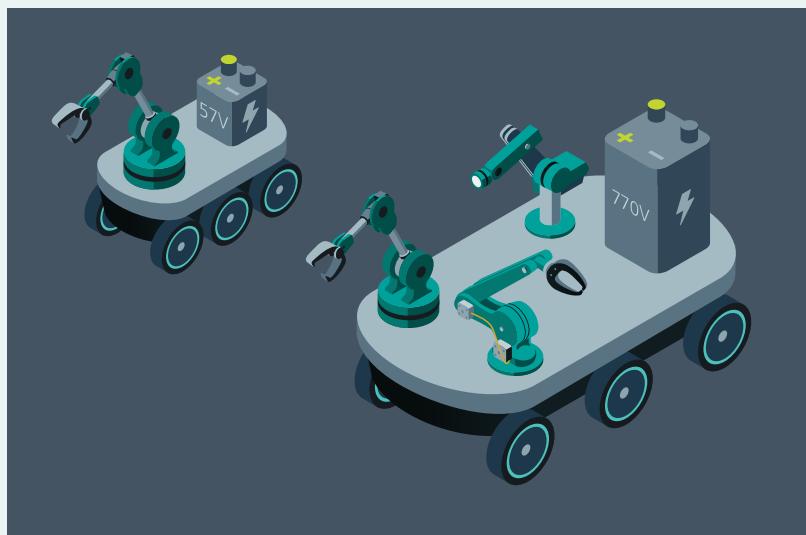


图 1：这两个机器人平台的规模大不相同，但它们的供电网络却有很多共同之处。模块化方法有助于高度灵活地完成初始设计，通常能加速交付后续电源系统设计。

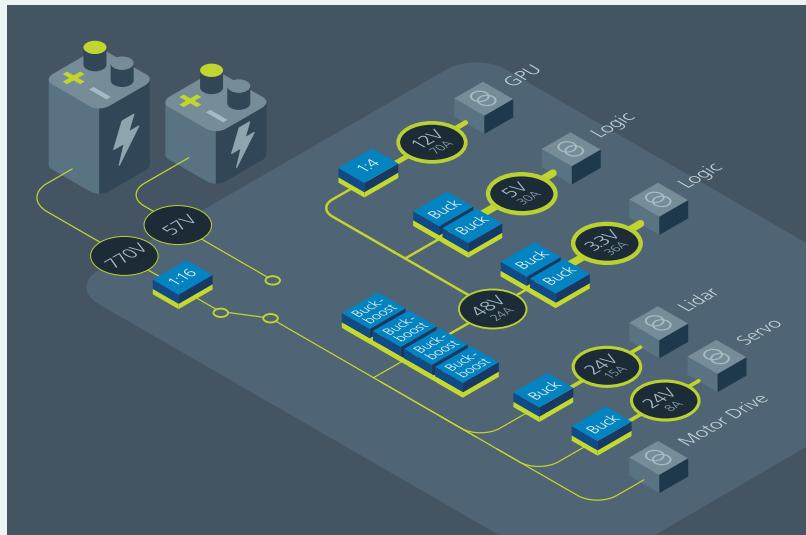


图 2：由 110V_{DC} SELV（安全超低电压）电池或 770V 较大车辆电池（降压至大约 48V）供电的较低电压电源供电网络。

从负载需求反向推理,可构建一个电源树,展示如何产生每一组所需的电压(图 2)。这种方法可帮助设计人员优化设计中的稳压级、隔离级及变压级数量。这可减少与不必要复杂架构、噪声、稳定性问题及不良压降有关的损耗,带来一个可扩展、通用的简单高效电源解决方案。

低压电源:高效率、宽输入范围的降压和升降压转换器

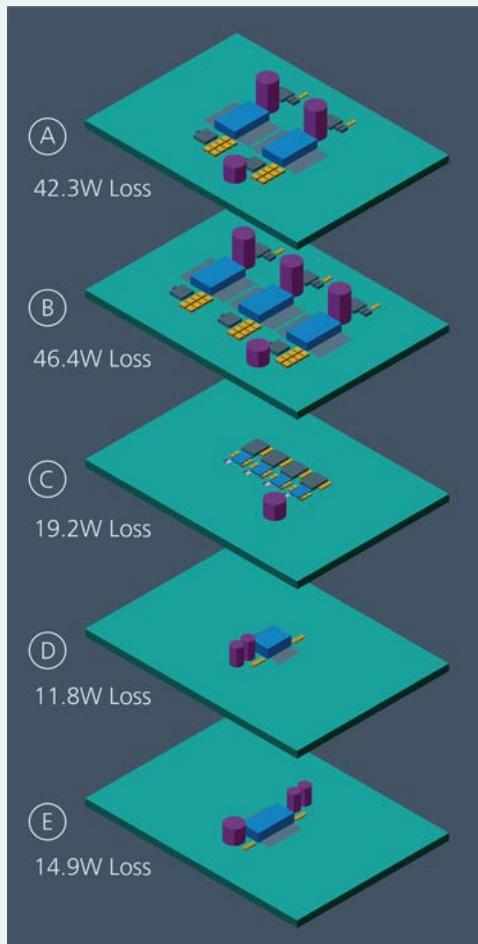


图 3:600W、48 - 12V 解决方案可扩展,包括所需的外部组件。(A) 2 个 36 - 75V、320W 隔离式稳压模块。(B) 3 个 43 - 154V、240W 宽范围隔离稳压模块。(C) 4 个 30 - 60V、216W、18A 降压转换器。(D) 1 个 40 - 60V、750W 固定比率转换器。(E) 1 个 40 - 60V、750W 升降压 + 固定比率。使用生产单元测量的功耗。

从 24 或 57V 电池等超低电压电源供电时(图 2),所有负载通常都连接至电池负极,无需隔离式 DC-DC 转换器。更好的设计将采用现代高压降压转换器,在待机功耗下提供 96 ~ 97% 的效率,延长电池使用寿命。如果输入输出电压比允许降压转换器在占空比最有效点附近工作,共模 EMI 噪声就会非常小。在本示例中,最佳降压工作需要将大约 57V 的电池电压降至大约 12V。

许多基于 MOSFET 的硬开关降压转换器在使用 24V 以上电压(而非较低的 V_{IN})供电时,由于开关损耗,会出现过热,其“97% 的效率”是指定的。例如,从 24V 平台升级到 48V 或 57V 时,开关损耗将呈指数级增长,而且与 V_{IN} 成正比,产生的热量显著增加。降低开关频率,不仅可降低损耗,而且还可最大限度降低接通时间问题,但这会增大输出电感器及电容器的尺寸。

在这里,48V 背板在其它高功率计算及汽车应用中的迅速采用,为同理改进机器人系统提供了模型。因此,一些制造商已针对超过 48 至 12V 的输出将降压转换器的效率提高到真正的 96 — 97%,而且对于低至 2.5V 的输出而言,结果类似。

图 3 从所提供的选择的角度,显示了在 80% 负载的相同条件下,使用 40 至 60V 输入的几款 600W、12V 转换器的典型效率、损耗和尺寸:

- 解决方案 A:一款 ZVS 隔离式反激转换器,是众多设计人员开发时的共同首选
- 解决方案 B:另一款 ZVS 隔离式反激转换器,针对较宽输入电压范围提供更高电压的晶体管。这可能对覆盖多个输入电压平台非常实用
- 解决方案 C:一款具有低开关损耗、无变压器损耗的同步 ZVS 降压转换器

- 解决方案 D: 将 V_{in} 降低 $\frac{1}{4}$ 的正弦振幅转换器 (SAC™) (一种固定比率 DC-DC 转换器)。该解决方案由于其高带宽和无稳压原因, 只需很少的存储元件
- 解决方案 E: 一款与解决方案 D 相同的 SAC 解决方案与升降压转换器合封, 增加了稳压器损耗, 但在 40 - 60V 的较窄输入下, 效率仍能与 $\frac{1}{4}$ 瓦型 DC-DC 产品相媲美, 尽管其尺寸仅为 1/16

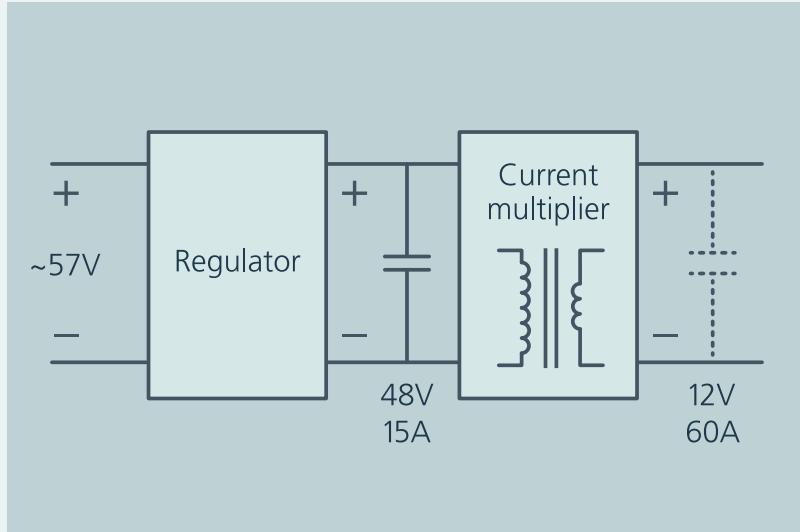


图 4:由两个转换级组成的 720W(1kW 峰值)48 - 12V 降压转换器的示意图。

对于比典型降压转换器在不降低开关频率、增大体积, 也不过多影响性能的情况下, 能处理的更大的电压差, 可采用数据中心应用中常用的模块化两级 DC-DC 方案 (分式电源) (图 4)。36 - 75V 升降压稳压器在效率为 96 - 98% 时, 在 97.8% 4:1 电流倍增器 (以下讨论的固定比率转换器) 的输入端设置精确的 48V 电压, 以实现更小的空间和高动态性能、高可靠性和高效率。可从电流倍增器的输出获得稳压器反馈, 改进稳压。在 60V 以上选择 75V 额定值, 因为在电机驱动环境中, 电源电压可能会出现超过 60V 的峰值, 如下文所述。

固定比率转换器:高性能电压变压 / 隔离

正弦振幅转换器 (SAC™) 等固定比率转换器, 与降压转换器或隔离 DC-DC 转换器相比, 可提供最高的效率性能。顾名思义, 它们以 $K = V_{out} / V_{in}$ 的固定比率将输入电压 (V_{in}) 转换为输出电压 (V_{out}), 没有对其进行稳压。在没有任何控制环路延迟的情况下, 输入电压的任何波动都会导致按 K 缩放的输出波动。

从概念上讲, SAC 转换器的内部工作有三级:

1. 输入侧开关级, 将 DC 输入转换为正弦信号。
2. 理想的变压器级, 按输入端和输出端的匝数比调节 AC 电压 / 电流。
3. 输出侧同步整流器, 将正弦变压器输出转回 DC。

通过在开关级使用零电流、零电压开关 (ZCS / ZVS) 技术, 可在固定比率转换器中实现高达 98% 的效率, 从而不仅可最大限度降低开关损耗, 而且还可实现比硬开关转换器高很多的开关频率(通常在几 MHz 范围内)。随后将按比例减少无功组件和 EMI 滤波器, 这不仅可降低空间占用, 而且还可显著提高功率密度。

固定比率转换器与 AC 变压器类似, AC 变压器自身基本都是用于电网配电的固定比率转换器。变压器有助于在世界各地进行实际配电。采用比电源和负载电压几倍高的电压来远距离传输功率, 明显会降低在这些高电压下传输的电流, 这不仅产生了轻量级低成本的传输线路, 而且还带来了只有负载点附近低压线缆的短时间运行。模

拟跨越多个点, 因为固定比率转换器也可高效实现电池升压的双向工作/重新生成, 为许多较高电压负载供电, 这实际可创建一个虚拟的较高电压电池和/或传输线路。它还允许应用在高压电池或母线中重新生成制动能量。固定比率转换器不仅可轻松并联, 而且天生就能使用 Droop 均流方法, 均流精度主要看每个并联支路的阻抗。

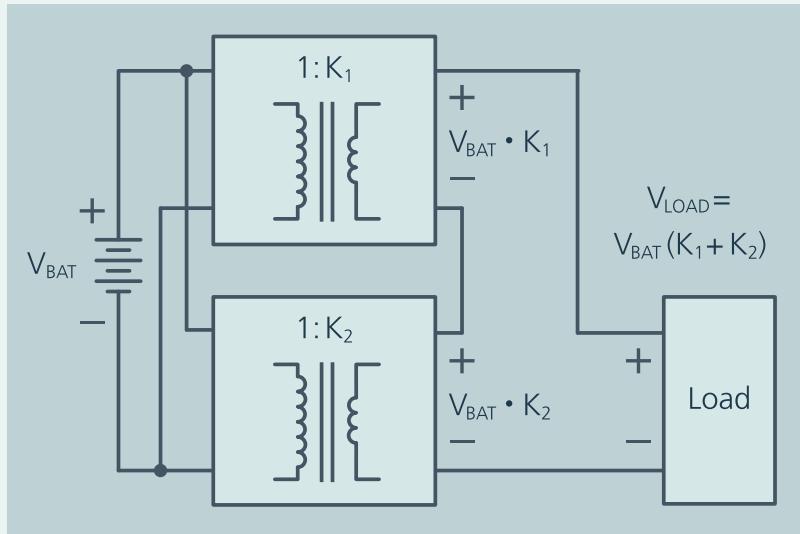
许多 DC-DC 转换器等隔离式固定比率转换器能够与输出串联(图 5), 从电池生成多个独立输出, 不仅无需在移动设

图 5: 输入并联、输出串联的隔离式固定比率转换器, 可叠加其输出电压。

备中提供辅助电池, 而且还可在简化机器人框架设计的同时, 减少转换器数量并减轻系统重量。例如, 假设一款 400V 系统需要低阻抗 12V 及 24V 电压轨。两款输出串联的隔离式 1:32 转换器可能会通过使用串行连接或其中点创建两个母线, 带来无限可能。

阻抗反射可降低有效电源阻抗

固定比率转换器从一次到二次反射阻抗, 类似于联网 AC 变压器。这在机器人应用中非常有优势, 因为当阻抗在变压器上反射时, 其量级将按其转换比的平方扩展。



阻抗反射可降低有效电源阻抗

固定比率转换器从一次到二次反射阻抗, 类似于联网 AC 变压器。这在机器人应用中非常有优势, 因为当阻抗在变压器上反射时, 其量级将按其转换比的平方扩展。

即使在低电压系统中,如最初示例中的两个移动机器人,也可利用阻抗反射效应来最大限度提高储能元件(如大型旁路电容器、EMI滤波器和其它电路参数等)的效用。考虑在大型机器人框架间配送高电压,然后将其转换为低电压用于诸如伺服驱动器或人工智能处理器等高动态负载的770V自动驾驶汽车系统:从负载角度回顾电源,除了所有配电阻抗外,电池阻抗似乎都会远远低于实际阻抗。

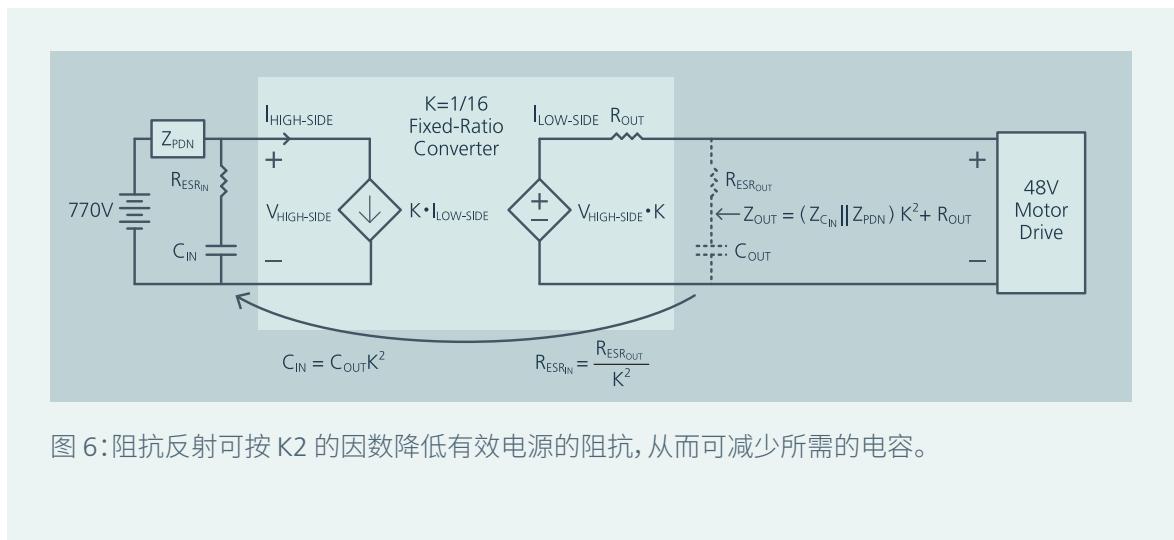


图 6: 阻抗反射可按 K^2 的因数降低有效电源的阻抗,从而可减少所需的电容。

使用 $K = 1 / 16$ 固定比率转换器 (BCM4414) 将 770V 电池电压转换为大约 48V 时,其结果是降低电源阻抗,因此输入电容降低了 256 倍,如图 6 所示。鉴于 R_{ESR} 额定电压、使用寿命和性能,这种输入电容器的物理尺寸只是等效输出电容器尺寸的一小部分,而等效输出电容器的尺寸与转换器本身的尺寸相当。使用稳压 DC-DC 转换器,这在一定程度上是可以实现的。与固定比率转换器相比,这些转换器的稳压环路的带宽要低很多。这些相关延迟加上与许多转换器断续导电模式相关的延迟,有效增加了其阻抗,限制了相关作用。

对于这些高度动态的强大负载,降低电阻及电感阻抗,可改善动态与静态性能。电机通常使用具有高瞬态电流变化的高频率脉冲驱动,因此明显的电源阻抗将使在其终端提供的电压和电流失真。同样,广泛 PDN 内的寄生电感会限制提供给电机绕组的电流,从而限制转矩。

机器人应用注意事项

轻量级低阻抗线束的稳定配电网络

随着电源需求的增加,由于以上原因,我们需要将简单的原理用于配电路由及线束,利用所讨论的转换器探索更高电压的配电(转换至接近负载的负载电压),以便较低电流减少配电损耗、(动态)压降以及 EMI 干扰。此外,低电感布局与布线(利用在相邻 PCB 层上提供密闭环路、双绞线或路由的磁场抵消)可能也有帮助。转换器一般需要其电源的 AC 阻抗比负载阻抗(达到其控制环路的带宽)小 10 倍,特别是在动态负载限制压降时,如图 8 示例所示,这符合稳定性分析的 Middlebrook 标准。因此,在优化安培容量的线规时,其 AC 阻抗可通过在转换器的输入端提供适当大小的电容器来降低,也可降低较长线路运行时的 AC 流耗和干扰。

效率和电池使用寿命

在电池使用寿命方面, DC-DC 转换器的损耗似乎可以忽略不计, 因为这些损耗通常比其负载低一个数量级, 但当相关负载处于睡眠模式时, 它们可能会欺骗性地以空载损耗的形式累加。正如所有数据表显示的那样, 基于变压器的 DC-DC 转换器在启用运行其控制并磁化 / 消磁主要开关变压器时, 通常会消耗大量的电源;它们可以轻松累加至其全部电源容量的 0.5 - 1%。一些稳压转换器在空载时功耗甚至更大, 因此需要(或构建)一个为最大负载百分之几的预加载来稳定输出。

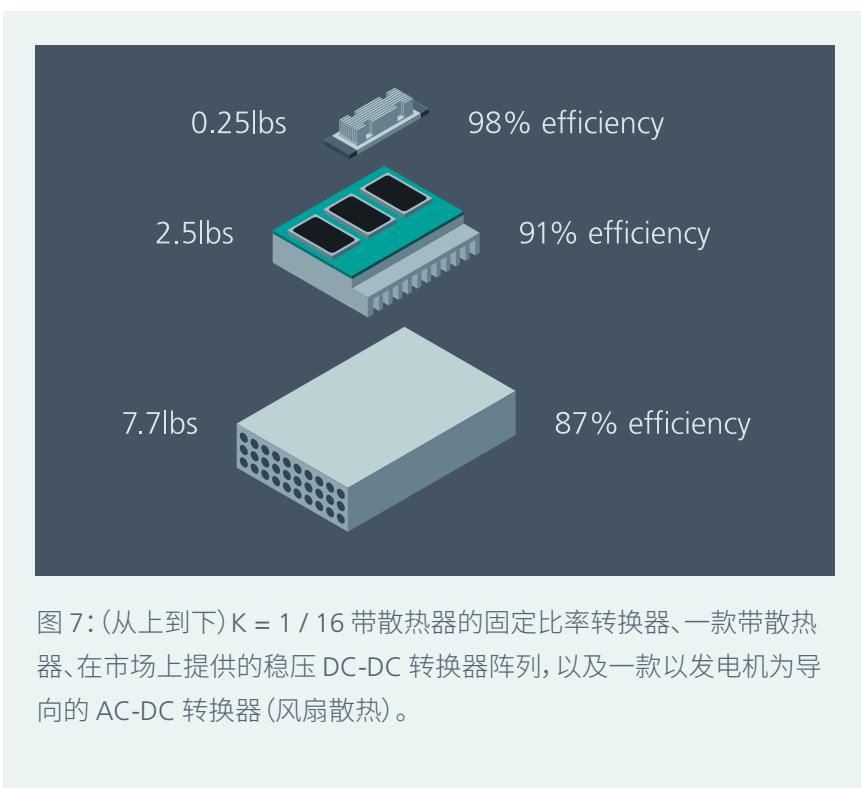
不需要时, 禁用这些转换器及其负载, 可能是一个很好的选项, 但即使禁用, 功耗可能也会很大。

尽可能少选基于变压器的转换器, 理想情况下每个隔离层都需要一个, 然后再部署降压或升降压转换器, 为相同的返回路径提供额外的输出, 这样可相应减少空闲损耗。

由于采用脉冲跳变或更高级技术, 许多降压或升降压转换器的静态电流都以毫安为单位。

固定比率还是稳压转换?

如果负载的输入电压范围等于或大于电源的输入电压范围, 固定比率转换器由于其尺寸、效率和性能原因, 可能是最好的选项。



一个 770 - 48V 1.5kW 固定比率转换器(图 7)的损耗大约是一个稳压 DC-DC 正向转换器损耗的 1/2 - 1/3, 因为稳压 DC-DC 正向转换器有稳压级, 在变压器中有额外的损耗。一个不太合适但很实用的比较是, 之前从车辆 AC 发电机提供相同驱动的 AC-DC 转换器, 整流器和典型 PFC 升压级会产生额外的损耗。这进一步说明了在建筑物、大型设备或机器人车辆中使用 DC 电网的优势。

后两项最新开发相比之下分别可达 94% 和 91%, 但固定比率转换器没有相同的稳压功能或相关损耗。

高动态负载

直接从电池给电机驱动器供电时,电池及线缆阻抗会导致压降,而且这些阻抗也会限制电流。压降和电流限制都与线规和负载距离电源的距离有数学关系。

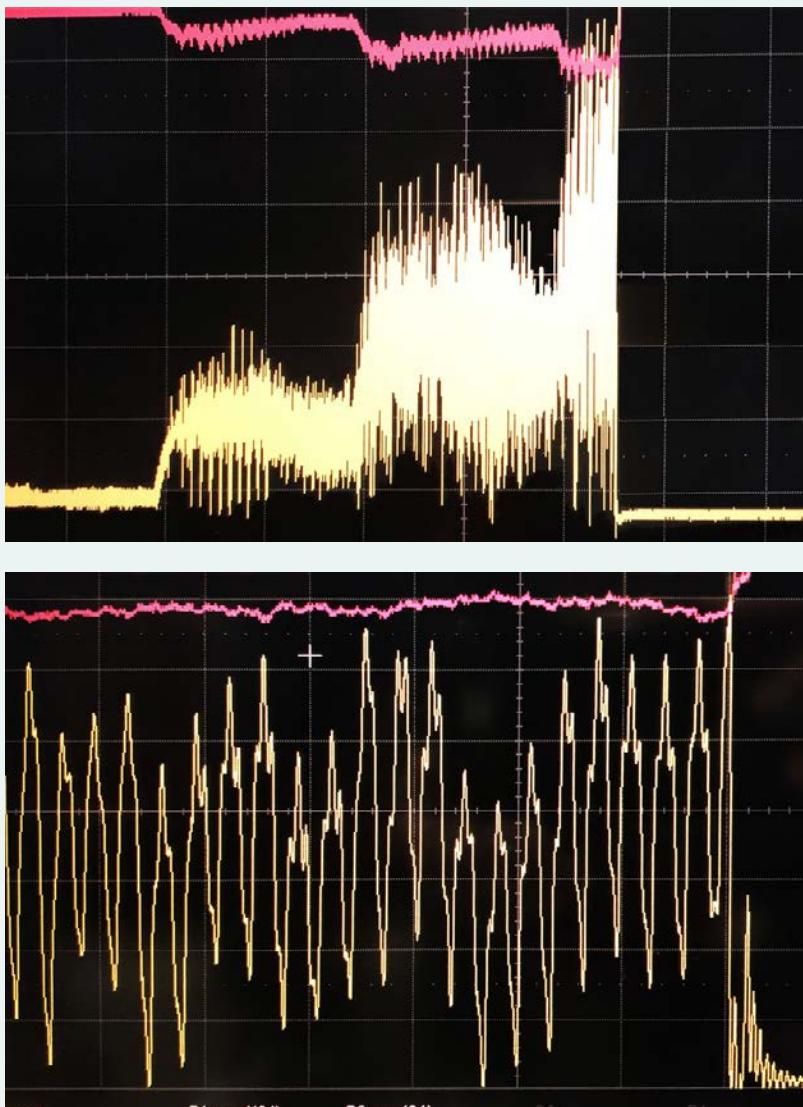


图 8: (左) 20ms / div 的 770V 输入端的示波器图像、在 100V / div 时为【红色】、2A / div 的电流【黄色】，通过一个 6kW【峰值 8kW】固定比率转换器加速 48V 电机，显示加速步骤和 PWM 脉冲；(右) 100μs / div 的峰值详细信息。

使用固定比率转换器降低负载位置出现的有效电源阻抗,但这也会提高转换器位置出现的、最终将出现在电源位置的峰值电流。为防止过流及短路故障,在转换器中构建的保护可能会由高动态负载触发,设计时应加以考虑。

例如,如图 8 所示、为 4 个 35A、 $K = 1 / 16$ 固定比率转换器供电的 770V 输入电压和电流(如图 7 所示)。将图 6 作为框图,
 $R_{\text{OUT}} = 3.5\text{m}\Omega$ 、 $Z_{\text{PDN}} = 10\Omega$ (包含可忽略的电池阻抗),为 48V 电机驱动器供电。

将转换器布置在电机驱动器附近,使其仅在 $10 / 256 =$ 约 $40\text{m}\Omega$ 时,出现 10Ω 阻抗源,共 $43.5\text{m}\Omega$,包括无 48V 线缆的 R_{OUT} 。源出的峰值电流为 14.7A,因为除了平均电流外,低阻抗转换器还提供 PWM 电流峰值,需要将其指定为 4 - 5A 的更高峰值电流容量。

图 9 是阻抗反射的作用。在输出端使用一个 $10\mu\text{F}$ 、 $30\text{m}\Omega R_{\text{ESR}}$ 输入电容器,而不是庞大的 10mF 、 $3\text{m}\Omega R_{\text{ESR}}$ 电容器。这将电源线上的输入纹波电流从 11 降到了 $1A_{\text{p,p}}$,大大降低了 AC 阻抗从 10Ω 降至大约 1Ω 带来的损耗。通过小型输出 LC 滤波器将峰值电流降至 9.75A,高于转换器 8.75A 的连续电流限制,但完全在 14A 的短期电流限制范围内。

电容性负载

启动时, 电机驱动器和计算电路板充当大电容负载。计算卡可能有大量的板载降压转换器, 每一个都配有大容量输入电容器和 / 或额外的 LC 滤波器。为其供电的 DC-DC 转换器需要有一个指定的容许外部负载的宽范围电容, 或者在后面布置某种形式的预充电电路, 以支持大电容负载, 这是使用固定比率转换器为电机驱动器供电经常出现的情况。

此外, 这也是设计后期经常忽视的项目。一些稳压器, 特别是升降压稳压器, 也针对电池充电进行了精心设计, 支持单独的电流控制环路和 / 或可调软启动时间, 允许它们与海量负载电容联用。

能源再生与输入电压注意事项

在动态运行或制动时, 电机驱动器可作为发电机 (8)。在我们的 57V 示例中, 主电机驱动器的再生反向电流将通过连接线束给电池充电, 沿着路径提高其电压, 使其与相关阻抗成比例, 可能会达到 60V 以上。随后, 任何由它供电的 DC-DC 转换器的电压都不要额定为通用 60V, 而是更高。

此外, 图 6 中的原理图也适用于其中由双向转换器为这种电机驱动器供

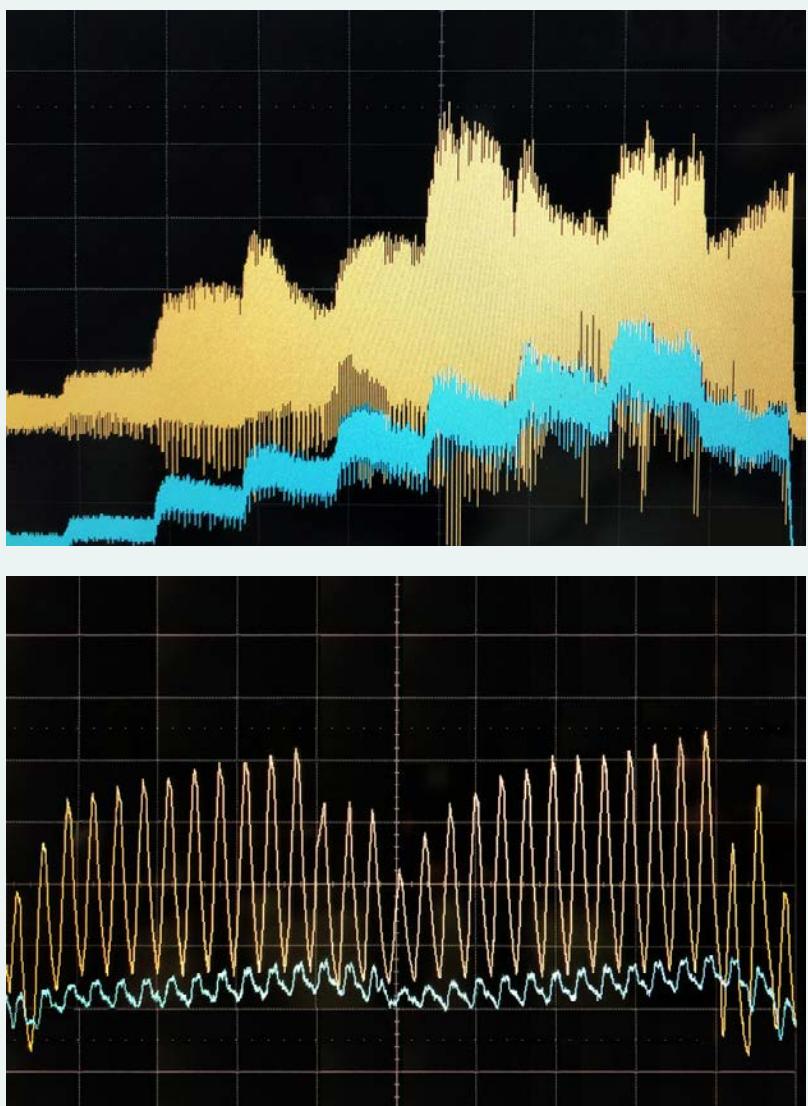


图 9:40A / div 时, 转换器输出为 $180A_{PK}$ (黄色); 2A / div 的输入电流 (蓝色)。通过输入端布置的电容减少纹波。(左) 20ms / div
(右) 0.1ms / div。

电的配电网络, 如图 8 中的示例所示。再生能量可通过该转换器提高与 Z_{OUT} 成比例的低电压及高电压端电压。如果转换器为单向, 这种再生能源就会被阻塞, 只能给输出电容器 C_{OUT} 充电。因此, 再生能源及其产生的电压上升应该受到限制, 如果可能的话, 应保持在转换器和 C_{OUT} 的最大输出电压规范范围内, 也可实施一个制动电路来吸纳该能量。

摘要

为了优化性能，扩大工作范围并提高生产力和灵活性，我们鼓励机器人系统设计人员绘制其应用的电源树，权衡不同类型的转换器组合及 PDN 设计策略。在整个平台上配送较高电压并在负载点附近将其变为所需的电压，非常有优势。

创造性地使用 Vicor 高密度、高性能固定比率转换器模块和降压和 / 或升降压稳压器模块，可通过高效轻量级的供电为每个负载实现最佳性能。将这些技术结合起来，就可对具有适度宽输入范围的高效率、非隔离式终端功率级执行标准化。这些可通过配置适当传输比的固定比率转换器连接至较高电压电池架构。

曾在 2020 年 12 月发表于 IEEE Power Electronics，题为“重新构思移动机器人的供电网络”。

工具

此部分简述了 Vicor 工具, 这些工具为新手以及有经验的工程师提供了一个数位化的工作区, 他们可以设计和测试电源模块解决方案, 以最适配他们的应用需求。

电源系统设计工具

电源系统设计工具是一款对用户实用的软件, 新手或有经验的系统设计师都可以利用它来构建端到端的供电网络。该工具利用 Vicor 的电源组件设计方法, 产生优化的解决方案, 而无需产生耗费时间的试验和错误。电源系统设计工具还提供了比传统方法快 75% 的服务, 并允许用户导出最终 BOM。

白板工具

白板是拥有具有方便使用工作区的在线工具, 用户可以使用它来分析和优化不同电源链的性能。用户能够利用高密度、高效率的 Vicor 电源模块为其应用需求找到最佳解决方案。此外, 用户可以为电源设计的每个组件设定工作条件, 并获得单个组件和系统整体的损耗分析。



www.vicorpowers.com 客服: vicorchina@vicorpowers.com 技术支持: chinaapps@vicorpowers.com

©2024 – 2025 公司版权所有。Vicor 名称是 Vicor 公司的注册商标。所有商标、产品名称、徽标和品牌均为其各自所有者的财产。版本 Rev 1.4 8/2025