

全面保护型半桥功率 IC 赋能电机集成逆变器

Navitas 的 GaNSense™ 技术能有效降低逆变器与电机集成系统的尺寸与功耗

作者：Navitas 半导体工业与消费高级总监 Alfred Hesener

电机驱动系统：实现“Electrify Our World™”的下一代解决方案

电机驱动系统消耗了欧洲近 50% 的电力 [1]，因此政府制定了相关法规和标准，以确保尽可能高效地使用电力，同时尽量减少对电网的影响和扰乱。目前变速驱动系统（VSD：Variable Speed Drives）在工业领域中应用广泛，与传统的恒速感应电机系统相比，它们可降低高达 90% 的能耗 [2]，同时具有减小电机尺寸、提高动态性能和可靠性等优势。

IEC 61000 等标准旨在支持电网中电气设备的抗扰度和辐射等方面，因为电机驱动器呈现的大感性负载会显著影响本地电网的稳定性。为了满足这些标准的要求，电机驱动系统中已经采用了包括有源功率因数校正（PFC：Power Factor Correction）在内的多种技术，将失真波形调制回正弦波，以最大化电网供电的有效功率。

GaN 有效提升系统性价比

GaN 器件作为一种宽禁带半导体，与传统 Si 基半导体的同等级产品相比，它具有卓越的性能，其中包括开关速度提高 20 倍和功率密度提高 3 倍以上等优势。将 GaN 功率器件集成到 PFC 和电机驱动系统的逆变级中，可显著降低功耗和减小系统尺寸，从而实现逆变器与电机的紧凑集成。本文将详细介绍 Navitas 创建的 400 W 电机集成逆变器参考设计方案。

GaN FET 不存在任何反向恢复电荷，可实现极快的开关速度，因此开关损耗比 Si 基 IGBT 和 MOSFET 低 4~5 倍，总功率损耗可以降低约 50%。功耗降低意味着器件发热量的减少，从而有效减小散热器的尺寸，甚至在某些低功耗驱动器中可以弃用散热器。散热器级别机加工铝的成本在 2021 年达到了 13 年来的最高水平，价格约为 8 美元/kg，因此最大限度地减小散热器尺寸可以显著降低总系统成本。此外，由于系统重量减轻，运输成本也将随之降低。

极低的开关损耗和无反向恢复损耗相结合，使开关频率有了新的自由度，而且变频器也实现了热设计优化。电机集成逆变器的工作条件很严酷，除了振动和强磁场外，环境温度可能会升高，这使得功率器件的冷却变得棘手，因此最好采用不会产生大量热量的功率器件开始。

高集成度有效提高电机驱动器的效率、控制性能和鲁棒性

GaNSense™ 技术将 GaN 功率器件优异性能与相关驱动、保护和动态感测等功能集成在一起，使其成为高可靠性电机驱动应用的理想选择。经过优化的栅极驱动电路具有相应的稳压电路和包括过温和过流检测在内的保护电路，具有自主的自我保护功能。所有这些功能都是完全集成的，从而具有卓越的性能和最高的可靠性。输入信号可以采用简单的数字信号控制，无需外部元件进而缩小 PCB 面积，从而可以将紧凑型电机驱动器安装在电机外壳中，这对于电机驱动系统小型化非常有利。

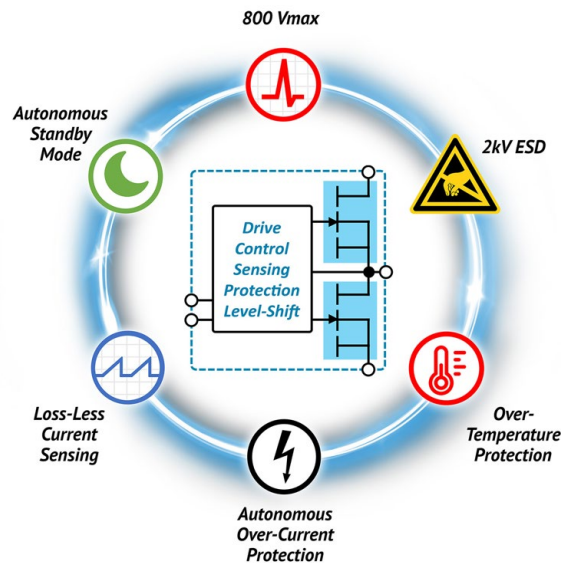


图1 采用 Navitas GaNSense™ 技术的高集成度 GaNFast IC 简化框图

与分立 Si 基器件或分立 GaN 器件相比，GaNSense™ 技术可以在 30 ns 内实现检测和保护，比 Si 基器件或 GaN 分立器件快 6 倍，从而提高系统可靠性，更多细节请参考在应用笔记 AN015 中的说明。

与安装在散热器上的传统低精度温度传感器相比，在功率开关上集成温度控制可提供更高的精度和实时监测。这对于不易维修的电机集成驱动系统至关重要，尤其是在需要最高可靠性和较长正常运行时间的工业环境中。内置的过温保护电路将在超过设定温度时关断 GaN IC，从而实现系统的快速保护。

GaNSense™ 技术中无损耗电流检测的优势消除了对大体积且昂贵的分流电阻器的需求，从而显著减小了系统尺寸和降低成本，同时又维持了快速过流保护，能够实现工厂自动化中工业电机驱动器所需的系统鲁棒性。

此外，总体元件数量的减少可以显著降低时间故障（FIT：Failures in Time）率，提高系统可靠性。Navitas 于近期宣布对其产品提供 20 年受限质保，这也是业界厂商首次强调其产品卓越可靠性。

Navitas 推出了全新半桥拓扑结构 GaN 功率 IC 系列产品，如表 1 所示。由于该系列 GaN 功率半桥 IC 产品引脚兼容且具有不同 RDSON 值，因此设计中可轻松实现向上或向下功率扩展。

Part #	Type	$V_{DS(Cont)}$ (V)	$V_{DS(Tran)}$ (V)	$R_{DS(on)}$ (mΩ, typ)	Package	Status
NV6247	Half-Bridge	650	800	160/160	PQFN 6x8	Production
NV6245C	Half-Bridge			275/275	PQFN 6x8	Engineering

表 1 Navitas 半桥结构 GaN 功率 IC 产品阵容

上述所有全新半桥产品均采用节省空间的 PQFN 封装，可实现与 PCB 良好的热连接以及低寄生电感和电阻，并展现出与 Navitas 单一功率器件相同的鲁棒性和可靠性，特别是高瞬态电压能力（连续 650V 及瞬时 800V）。该系列产品享有 Navitas 最近承诺的 20 年受限质保，有关产品性能和鲁棒性的更多信息，请在 www.navitassemi.com 参见各自的数据手册[3]和应用笔记 AN-018 [5]。

电机集成逆变器参考设计

GaN 功率 IC 在半桥拓扑中的适用性使紧凑型电机逆变器能够得以轻松实现，如下图 2 所示。

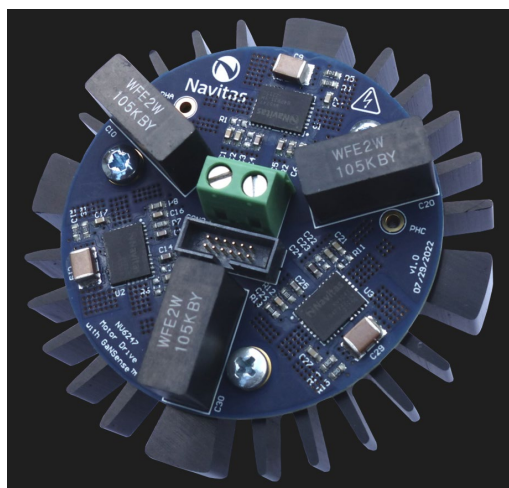


图 2 连接到 BLDC 电机背面的 400W 电机逆变器直径 56mm 的功率级 PCB

上述逆变器由 Navitas 的 3 个半桥 GaN 功率 IC 即包含输入逻辑电路、电平转换器、稳压器和栅极驱动器、电流和温度检测电路以及自举电源的全新 NV6247 组成，因此外部元件数量非常少。

逆变器 3 个桥臂其中 1 个的原理图如图 3 所示，图中给出其中第 2 相的电路，3 相的电路都是相同的。电路主要元件是集成了半桥配置中的两个功率开关器件、栅极驱动器及其稳压器以及 PWM 输入逻辑电路的 NV6247，其内置自举电路用于为 P 侧驱动器提供栅极驱动电源，其内部还内置一个电平转换器，因此输入信号可以接地参考，使该器件成为最佳意义上的数字可控功率级。

此外，这款 IC 还包括多种感测功能。首先流过 N 侧 GaN 功率 FET 的电流在内部检测，然后在电流检测输出引脚（CS）上转换为电流信号，其次可以通过栅极驱动器上的电路检测器件结温，并在过温时用于关断功率器件。

这款 IC 外围引脚包括高边 GaN 功率 FET 漏极引脚（VIN，连接到 VBUS）、半桥中点开关节点引脚（VSW，连接到 PHB）、低边 GaN 功率 FET 源极和 IC GND 引脚（PGND）、低边 IC 电源引脚（VCC）、低边栅极驱动电源引脚（VDDL）、低边开通 dV/dt 控制引脚（RDDL）、低边 5V 电源引脚（5VL）、低边参考 PWM 输入引脚（INL，INH）、低边电流检测输出引脚（CS）、自动待机使能输入引脚（/STBY）、高边电源引脚（VB）、P 侧高边栅极驱动电源引脚（VDDH）和高边 5V 电源引脚（5VH）。IC 的低边外围元件包括连接在 VCC 引脚和 PGND 引脚之间的 VCC 电源电容（CVCC）、连接在 VDDL 引脚和 PGND 引脚之间的 VDDL 电源电容（CVDDL）、连接在 VDDL 引脚和 RDDL 引脚之间的开通 dV/dt 设置电阻（RDDL）、连接 CS 引脚和 PGND 引脚之间的电流检测幅度设置电阻（RSET）、5VL 引脚和 PGND 引脚之间连接的 5V 电源电容（C5VL），以及自动待机使能引脚（/STBY）连接到 PGND 引脚以启用自动待机模式或连接到 5VL 以禁用自动待机模式。IC 的外围元件包括连接在 VB 引脚和 VSW 引脚之间的 VB 电源电容（CVB）、连接在 VDDH 引脚和 VSW 引脚之间的 VDDH 电源电容（CVDDH）以及连接在 5VH 引脚和 VSW 引脚之间的 5V 电源电容（C5VH）。必须谨慎选择高边 VB、5VH 和 VDDH 旁路电容，以适应高边唤醒时间、高边保持时间和待机功率等各种系统考虑因素。在电路图右侧可以看到 VBUS 阻隔电容，PCB 中允许使用薄膜电容或电解电容，它们的目的是抑制由电源中的寄生电感和开关动作而可能产生的任何类型的振铃，因为该电路板是为直流输入而设计的。R17 和 C18 可用于抑制开关节点上可能由长电缆及其电感引起的振铃，并且是可选的。

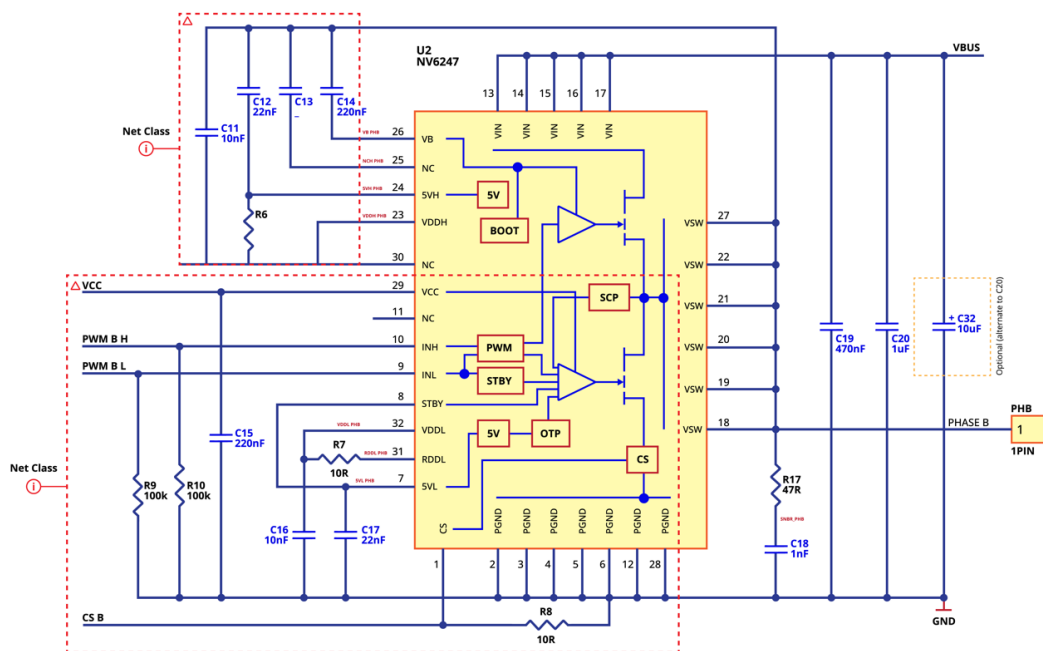


图3 逆变器单一桥臂的原理图

(除 GaN 功率 IC 外，外部元件很少)

值得注意的是，该 IC 中功率器件的开关速度可以通过外部电阻（本例中为 R7）进行调整。虽然降低开关速度确实会增加开关损耗，但影响并不大，因为开关损耗本身就非常低。这样一来，开关速度可以调整到电机需要的任何范围，并且可以调整产生的 EMI 以符合所有必需的规定，且可以缩小 EMI 滤波器组件的尺寸，经验表明这个电阻选为 50 Ω 是一个很好的起点。

CS 引脚上的电阻 R8 可由微控制器及其 ADC 输入根据需要设置，以适当调整电压。但是如果该引脚上的电压超过 1.9V，则会触发过流保护。需要注意的是，CS 引脚上电阻的选择既会影响功率级电流对应的电压，也会对过流保护功能产生影响。

自动待机模式旨在降低 NV6247 在没有开关动作时的功耗。如果在超过 ~90 μs 内未检测到更多输入脉冲，IC 将自动进入低功耗待机模式，从而将禁用栅极驱动和其他内部电路，并将 VCC 电源电流降低到更低水平。当 INL 脉冲重新启动时，IC 将在 INL 引脚输入信号的第 1 个上升沿延迟（通常约为 450 ns）后唤醒，并再次进入正常工作模式。

性能测试结果

上述逆变器是在 Navitas 应用工程实验室设计和生产制造的，并可提供完整的设计文档。逆变器与 BLDC 电机和机械负载一起在如下工作条件下进行了测试：直流输入电压 300 V、环境温度 25 °C 及开关频率为 20 kHz 的 FOC（磁场定向控制）算法。从 PCB 到环境的热阻测量为~12.5 K/W。图 4 给出了最终的逆变器效率曲线，此时仅考虑电输出功率与输入功率而不考虑电机效率，在输出功率 300 W 时的效率接近 99%。虽然逆变器的效率通常比电机效率高得多，但了解逆变器中产生的损耗仍然很重要，以便相应地设计冷却系统。满载时功耗为<3 W，散热器体积可以大大减小，系统的散热设计也容易得多，最终避免了通常与安装大型散热器相关的大量手动组装工作。图 4 中两条曲线对应于不同转换速度设置（红色=20 V/ns，蓝色=40 V/ns），结果差异相当小。

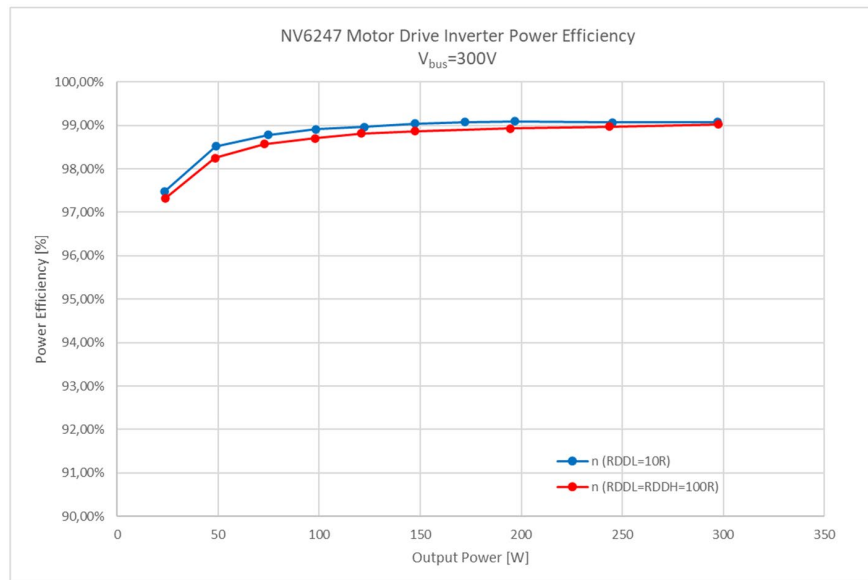


图 4 整个输出功率范围内逆变器的效率接近 99%

图 5 展示了在 300W 输出负载下运行逆变器时 PCB 整体温度分布。环境温度为 25° C 时，封装表面温度保持在 60° C 以下，考虑到损耗非常低，这并不奇怪。由于 PQFN 封装功率开关与 PCB 的热连接良好，因此最大功率输出受到 PCB 允许温度（通常为 105° C）的热限制。GaN 功率开关本身确实可以承受更高的温度，因此这种设计既具有出色的可靠性，又具有出色的鲁棒性，适用于可能会使功率开关温度非常迅速地升高的输出短路或转子失速等异常工作条件，直到控制器或内置过温保护电路可以做出反应。

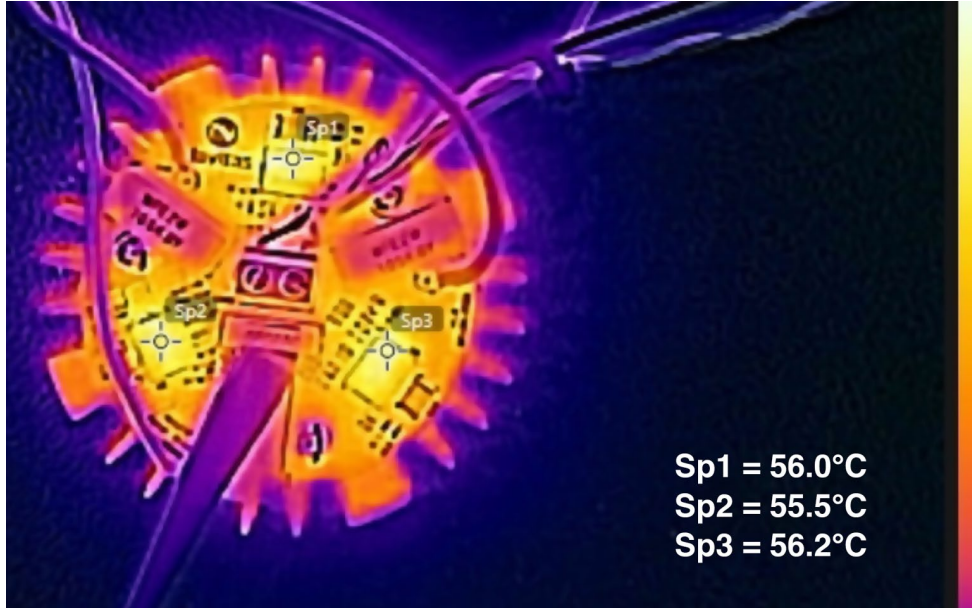


图 5 逆变器电路板热扫描图像

(有益于逆变器的低损耗，电路板表面温度相对较低)

总结：GaNSense™ 半桥 IC 可提高效率并降低成本

不同电机系统有着不同的具体要求，但整体趋势是相同的：更高的效率、更好的性能和更低的成本。GaNSense™ 半桥功率 IC 可实现更高的系统效率和性能，同时降低整个系统的总成本。

GaNSense™ 半桥功率 IC 提供了最高级别的集成度，内置驱动、电源、保护和检测等多项功能，使电机集成逆变器具有出色的性能和可靠性。

参考文献:

[1] ec.europa.eu, “Electric motors and variable speed drives”

[2] Engie, “5 Reasons to Install Energy-Saving VFDs”

[3] www.navitassemi.com

[4] Navitas Semiconductor, Application note AN-015, Dec 2021

[5] Navitas Semiconductor, Application note AN-018, Dec 2021

[6] Navitas Semiconductor, “GaNFast™ Power IC Solutions for EV, Solar & Industrial”, Bodo's Wide Bandgap Event, Dec 2021