

开发适合工业风扇电机应用的 全新 1 200 V/10 A SPM[®] 智能功率模块

Seung-Hyun Hong, Kang-Yoon Lee, Sang-Min Park, Ki-Nam Song, Tae-Sung Kwon, Sung-Il Yong
(飞兆半导体公司)

摘要: 讨论了全新的 1 200 V/10 A SPM[®] 智能功率模块。它是经过全面优化的智能型集成式 IGBT 逆变模块,提供良好的热性能和可靠的特性,适合工业风扇电机应用。它利用全新开发的 NPT 沟道 IGBT 以及先进的 STEALTH[™] 续流二极管和内置自举二极管。HVIC、多功能 LVIC 以及内置的热敏电阻为整个系统提供良好的可靠性能。该模块还利用 DBC 基板的技术优势,实现更佳的热性能。

Development of new 1 200 V/10 A SPM[®] smart power module for industrial fan motor applications

Seung-Hyun Hong, Kang-Yoon Lee, Sang-Min Park, Ki-Nam Song, Tae-Sung Kwon, Sung-Il Yong
(Fairchild Semiconductor)

Abstract: This paper discusses the new 1 200V/10 A SPM[®] smart power module. It is fully optimized intelligent integrated IGBT inverter module that offers good thermal performance and reliable characteristics for industrial fan motor applications. It utilizes newly developed NPT trench IGBT with the advanced STEALTH[™] freewheeling diode, and built-in bootstrap diode. HVICs, multi-function LVIC, and built-in thermistor provide good reliable characteristics for the entire system. This module also takes technical advantage of DBC substrate for the better thermal performance.

电机是家用电器主要的耗能部件。如今,随着政府法规不断强制要求降低能耗,电机驱动应用中的变频驱动技术也越来越受到青睐。适合变频电机驱动应用的功率模块同样也是当今趋势的一部分,这是因为它具有节省空间以及易于装配等优势。

我们全新开发了 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品的传递模塑封装,其作为高效的集成式解决方案,可专门满足工业风扇电机应用的要求。本文详细介绍集成式 IGBT/FWD 的设计问题、封装结构、电气特性,以及热性能和可靠性。

1 电路结构和封装设计

1.1 电路结构

全新 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品具有 80 mm×33 mm 大小的模块。内部电路由高侧的三个 1 200 V/10 A NPT 沟道 IGBT、低侧的三个 1 200 V/10 A NPT 沟道感测 IGBT、

六个先进的 1 200 V STEALTH[™] 续流二极管、三个自举二极管、三个 1 200 V HVIC、一个多功能 LVIC 以及一个热敏电阻组成,如图 1 所示。所有元器件均专为工业风扇电机应用而全新开发。为避免低侧 IGBT 的大功率损耗,全新 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品采用感测 IGBT,它具有电流镜发射极,可提供小电流。它无需在低侧 IGBT 的主发射极上连接检测电阻便能轻松测量过载电流和短路电流。内置的高速三合一 HVIC 允许使用单电源,无需光耦合器。1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品提供两个主要的保护功能:控制电源欠压保护和短路电流保护。由于内置的热敏电阻具有过温监控功能,因此它还能提供更高的系统可靠性。除基本的三相变频拓扑之外,内置自举二极管还实现了更高的集成度,为系统电路板设计节省了空间。自举二极管采用阳极开路配置,从而可通过外部自举电阻控制自举电容的初始充电电流。

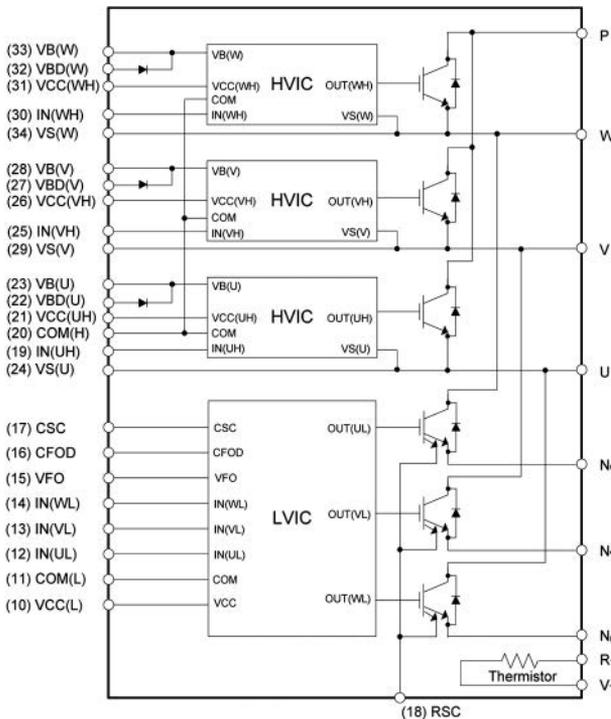


图1 内部等效电路

1.2 封装设计

1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品的封装结构由 DBC 基板、引线框架以及周围的 EMC 材料组成；功率器件和控制 IC 便装入这些材料中。功率器件焊接在 DBC 基板上，每一个控制 IC 均安装在引线框架上。DBC 基板的覆铜表面裸露在外，以便与外部散热器相接触。周围的 EMC 材料由传递模塑工艺制成，且模塑封装具有螺栓孔，供外部散热器固定时使用，从而增强散热性能。1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品中全新开发了 EMC，可实现 200 μm 的最大器件平坦度以及 1.5 N·m 的最大安装扭矩。采用 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品进行设计时，应考虑引脚至散热器的隔离距离。如图 2 所示，对于受限型散热器而言，引脚至散热器的电气间隙和爬电距离分别是 3.80 mm 和 7.52 mm。凭借这一先进的封装技术可实现紧凑的封装尺寸以及良好的可靠性。

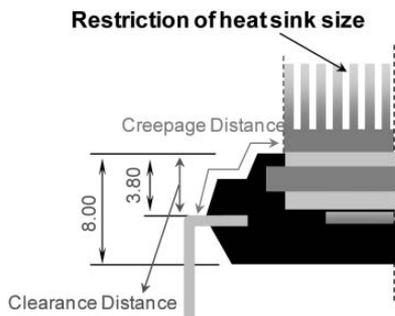


图2 隔离距离

2 性能特性

2.1 IGBT 和 FWD

1 200 V NPT 沟道 IGBT 和先进的 1 200 V STEALTH[™]

续流二极管专为所有驱动条件下的工业风扇电机应用而优化。

1 200 V/10 A NPT 沟道 IGBT 的典型集电极至发射极电压为 2.0 V ($I_c=10\text{ A}, T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$), 以及 2.45 V ($I_c=10\text{ A}, T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$)。该器件设计为具有关断损耗与导通压降之间良好的性能权衡取舍关系、出色的短路 SOA 特性以及开关波形平滑且不会因 dV/dt 快速变化而产生 EMI 噪声等主要特性。全新开发的 STEALTH[™] 续流二极管具有低正向压降和高击穿电压以及软恢复特性。该续流二极管经过优化, 不仅在高频硬开关条件下具有低损耗特性, 同时在典型工作条件下还表现出低反向恢复电流以及出色的软恢复特性。图 3 显示开启和关断开关波形 ($V_{DC}=600\text{ V}, I_c=10\text{ A}, V_{CC}=15\text{ V}, T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$)。 $V_{DC}=600\text{ V}, V_{CC}=15\text{ V}, T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的开关损耗如图 4 所示。1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品还具有出色的短路耐受时间性能 ($V_{DC}=600\text{ V}, V_{CC}=15\text{ V}, T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$), 如图 5 所示。

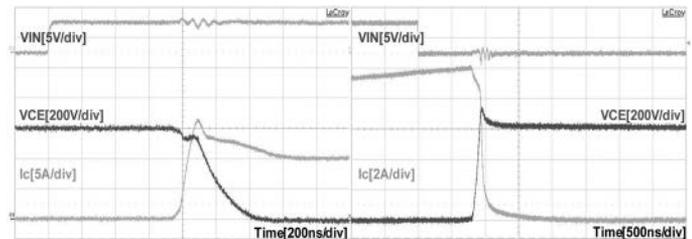


图3 开关波形 ($V_{DC}=600\text{ V}, I_c=10\text{ A}, V_{CC}=15\text{ V}, T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$)

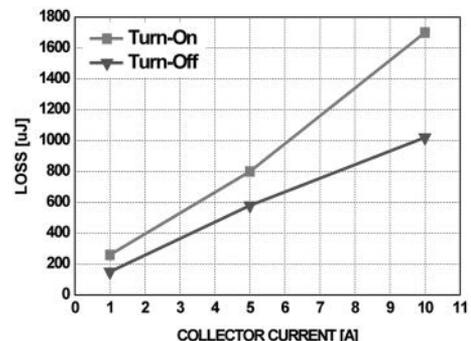


图4 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品的开关损耗 ($V_{DC}=600\text{ V}, V_{CC}=15\text{ V}, T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$)

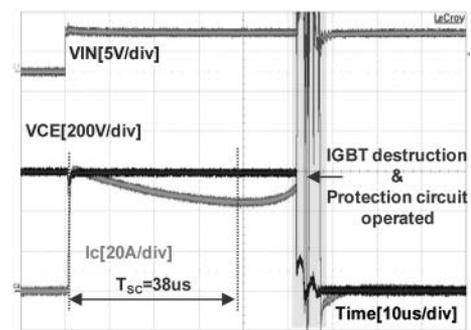


图5 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品的损坏短路波形 ($V_{DC}=600\text{ V}, V_{CC}=15\text{ V}, T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$)

2.2 驱动 IC

HVIC 和 LVIC 已设计为所需的功能最少, 这两者因性价比高而特别适合工业风扇电机驱动应用的变频器

驱动。设计考虑因素有：通过精湛的工艺技术缩小芯片尺寸、由 3.3 V/5 V 进给微控制器直接驱动高电平有效接口、低功耗、更好的抗噪性、稳定性好可耐受温度变化。HVIC 内置的高压电平转换功能这一特性，可将微控制器的 PWM 输出直接传输至高侧功率器件，如图 6 所示。HVIC 通常因其信号由脉冲信号以及 S-R 锁存传输而对外部噪声敏感^[1]。进行驱动 IGBT 的开关操作时，如果产生的 dV_s/dt 很高，那么 LDMOS 的寄生电容会得到大电流充电，R1 和 R2 上因而会产生更多压降，从而导致异常触发 S-R 锁存器。为了克服噪声敏感问题，我们已开发出具有独特拓扑的增强型噪声消除器，如图 6 所示。V/I 转换器可将电平转换器的输出转换为电流信息。对于具有高 dV/dt 的共模噪声，V/I 转换器可提供相同的输出。正常工作时，V/I 转换器输出相互之间有所不同，这是因为两个 LDMOS 中只有一个可在电平转换器的正常工作状态下运行。因此，要确定 V/I 转换器输出是否由噪声决定并不困难。一旦噪声消除器辨认出共模噪声，它就会吸收 V/I 转换器的输出。然后，I/V 转换器重构电压信号，该信号在 VB 和 VS 供电轨之间摆动；供电轨是 V/I 转换器的电流输出。第二个噪声消除器可消除高频噪声，从 I/V 转换器输出的信号中含有该噪声。最终，放大信号发送至 S-R 锁存器。

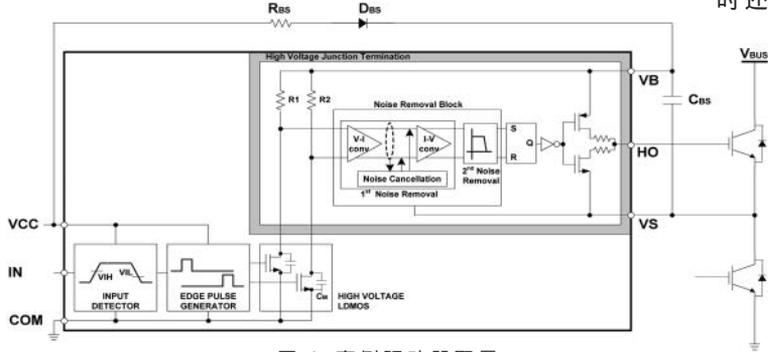


图 6 高侧驱动器配置

V/I 和 I/V 转换的另一个优势，是允许的负 V_s 电压不再由电路的阈值电平决定。得益于其独有的拓扑，Fairchild HVIC 允许高达 $V_s = -10$ V 的静态负操作（ V_{IS} 约为 15 V 时），以及高达 $V_s = -200$ V 的动态负操作，如图 7 所示。针对高 dV/dt 噪声，它还具有高达 50 V/ns 的良好抗噪性能，如图 8 所示。

LVIC 负责提供所有保护功能，及其到微控制器的反

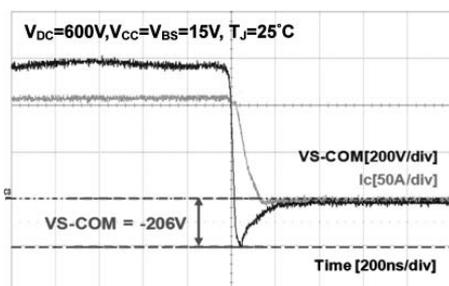


图 7 动态负操作波形

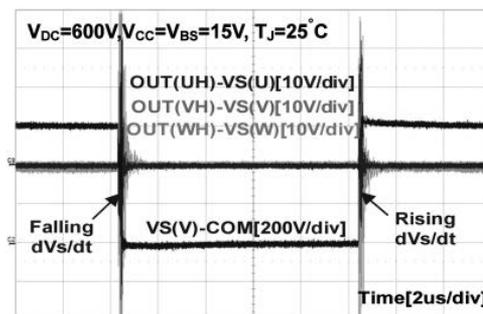


图 8 dV_s/dt 波形

馈。其保护电路监控控制电源电压、LVIC 温度以及外部感测电阻两端的电压，以便检测过量电流。如果检测到保护性操作，则低侧的三个 IGBT 关断，故障信号发送至微控制器。该 LVIC 还可根据 C_{FOD} 值提供各种故障持续时间的支持。如果 C_{FOD} 引脚为开路，则可以保证 50 μ s 的最小值。集成式 3.3 V/5 V CMOS/TTL 兼容型施密特触发器输入调理电路可实现与微处理器的直接连接。采用 5 k Ω 电阻，将 HVIC 和 LVIC 的输入拉低至地，使微处理器驱动。

2.3 热性能

器件的功率载荷能力取决于器件的热传递能力。这款建议模块不仅利用 DBC 基板提供良好的热性能，同时还适配应用提供工作频率选择。根据图 9 中热阻测量结果，IGBT 的结至外壳热阻低于 1.33 $^{\circ}$ C/W，FWD 低于 2.30 $^{\circ}$ C/W。

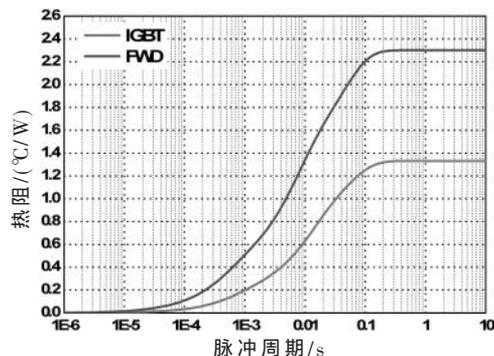


图 9 结至外壳热阻 IGBT 和 FWD 特性

单个 IGBT 的功率损耗由 IGBT 和 FWD 的导通损耗以及开关损耗组成。稳态关断期间的损耗可忽略，因为其数值非常小，并且对器件温度升高的影响很小。导通损耗取决于饱和电压等器件的直流电气特性。因此，它是导通电流与器件结温的函数。另一方面，开关损耗由电路的动态特性决定，比如开/关时间和过压/过流。因此，为了获得精确的开关损耗，我们应当考虑直流母线电压、施加的开关频率和功率电路布局以及电流和温度。有关电机控制应用中根据 PWM 变频系统计算导通和开关损耗的详细公式，请参考文献[2]和[3]。图 10 显示 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品与竞争型 1 200 V/10 A 产品的单个 IGBT 功率损耗特性比较结果。这些数值来源于典型实验数据。应注意，PWM 调制指数 $MI=1.0$ 、 $PF=$

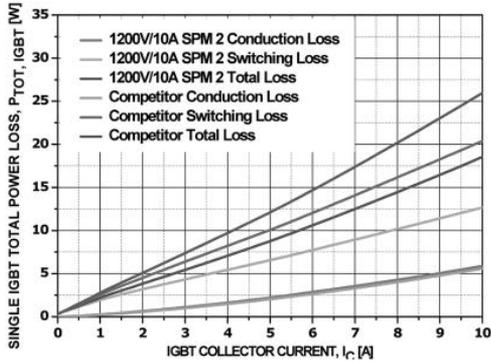


图 10 1 200 V/10 A 功率损耗比较

0.9、 $V_{DC}=600\text{ V}$ 、 $V_{CC}=15\text{ V}$ 、 $T_J=150\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $f_{sw}=16\text{ kHz}$ 、正弦输出电流是所有计算中的公共仿真参数。该结果表明 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品相比竞争型产品具有更低的功率损耗。

2.4 可靠性

对于要求高可靠性的工业风扇电机应用,在 $-40\text{ }^\circ\text{C}\sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的极端温度下执行最多 1 000 次循环的温度周期寿命测试,以及最多 100 000 次循环的电源周期寿命测试。使用水冷法进行电源周期寿命测试评估, ΔT_J 等于 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。针对每次可靠性测试,监控 1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品的 $V_{ce(sat)}$ 。在 1 000 次循环的温度周期测试以及 100 000 次循环的电源周期寿命测试期间, $V_{ce(sat)}$ 分布达到了低于 3% 的漂移,如图 11 和图 12 所示。

显然,这种良好的耐受性是因为它具有坚固的封装结构,该结构针对工业风扇电机应用而设计。

本文概述了全新 1 200 V/10 A SPM[®] 智能功率模块。该模块提供高效率、更高可靠性、简单结构以及高性价比等大量优势。1 200 V/10 A SPM[®] 2 产品为工业风扇电机应用提供了出色的解决方案。

参考文献

[1] Tae-Sung Kwon, Steve Han, Elvis Ma 和 Sung-II Yong. 家

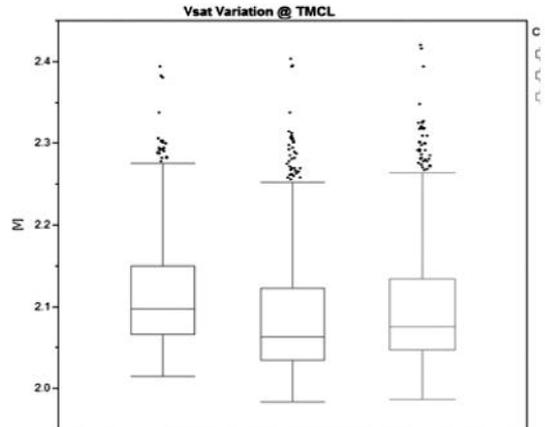


图 11 温度周期寿命分布

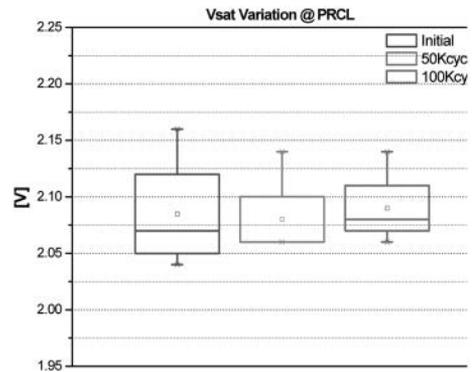


图 12 电源周期寿命分布

用电器电机驱动应用中的新一代智能功率模块. PCIM Europe, 2011: 748-753.

[2] CASANELLAS F. 使用 IGBT 的 PWM 逆变损耗. Proc. Inst. Elect. Eng. - Elect. Power Applicat. 1994, 141(5): 235-239.
 [3] BERRINGER K, MARVIN J, PERRUCHOUD P. 交流变频器中的半导体功率损耗. IEEE IAS '95, 1995: 882-888.
 [4] Tae-Sung Kwon, Sung-II Yong. 适合最高 1kW 电机驱动应用的全新智能功率模块. Journal of Power Electronics[J]. 2009, 9(5): 456-463.