

创新型 IGBT 驱动器芯片解决了栅极电阻的选择难题

使用电机连线电感、dv/dt 滤波器或正弦波滤波器可以帮助使变频逆变器及其快速开关 IGBT 适用于电机。通常，这比根据应用需求来单独选择适当的栅极电阻来对逆变器自身的应用需求容易得多。但是，这会导致 dv/dt 滤波器价格上升、损耗增大并且变速驱动的尺寸增大。本文说明了通过智能选择兼具更低 EMI 和更高效率的 IGBT 栅极驱动器芯片来实施易用性修改的巧妙方法。

Wolfgang Frank 博士，德国英飞凌科技 AG

采用脉冲宽度调制技术工作的现代变频逆变器对电机驱动应用带来了许多负面影响。这些副作用包括非密封绕组和密封绕组中的绕组绝缘性能下降（尤其是密封绕组）、使用屏蔽电缆工作的逆变器性能下降[1]以及电机轴承退化。尤其是电机轴位的电压反射呈现倍压效应，根据图 1 所示已能够在几米长的电缆后测量此效应。由于此倍压效应会在每次导通 IGBT 时出现，因此绕组绝缘性能会随时间变化而降低，并最终缩短电机的寿命。

一种简单的对策是使用 dv/dt 滤波器。但是，实施此类滤波器会导致出现损耗[2]，尤其在较低的电机功率范围内此损耗非常大。这将对变速驱动的效率产生负面影响。有研究表明，与驱动的成本相比，滤波器或用于限制 dv/dt 的其他对策的成本更高[3]。滤波器由电感器、电容器和电阻构成。因此，电感器存在无功压降，此压降会降低电机电压。通常，此类滤波器还是逆变器开关频率的限制因素。对于大多数 dv/dt 滤波器来说，高达 16 kHz 的开关频率很困难，并且在电机电流频率和温度方面，还必须考虑滤波器的减额值。

图 1: 根据电缆长度和功率晶体管的上升时间的电机对每单元过电压[2]

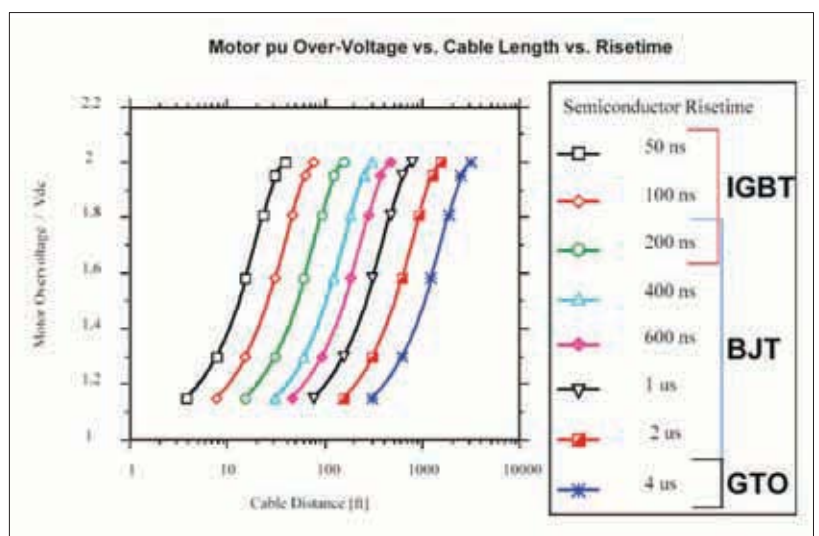
用于导通的栅极电阻的选择难题

导通栅极电阻的正确选择在变频器的 EMI 特性中起显著作用。由于现代 IGBT 具备出色的开关特性，因此设计工程师希望利用其快速开关能力。另一方面，当相对较低的二极管正向电流切换到 IGBT 时，功率二极管有加速关断电流的趋势。

其结果是产生强烈的高频振荡（如图 2 a)所示）以及较高的 dv/dt。这些振荡甚至可能损坏二极管或 IGBT。因此，一些 IGBT 具有防止出现此类损坏不产生振荡的集成栅极电阻。

图 2 的第二个图片 b)说明了使用导通栅极电阻 1.5Ω（而不是图 2 a)的测量中的 0Ω）时同一正向电流的切换。栅极电阻中的这一很小的差异对开关特性产生巨大的影响。所有振荡已消失并且导通稳定。

为了避免出现 EMI，硬件工程师通常会选择较大的栅极电阻。但是，其缺点在于，较大的栅极电阻会降低 IGBT 在较高的集电极电流下的开通速度。集电极它可以缓慢地导通 IGBT，而在较高的集电极电流级别下也可以快速导通 IGBT。可以通过用户控制的电流源提供 11 种不



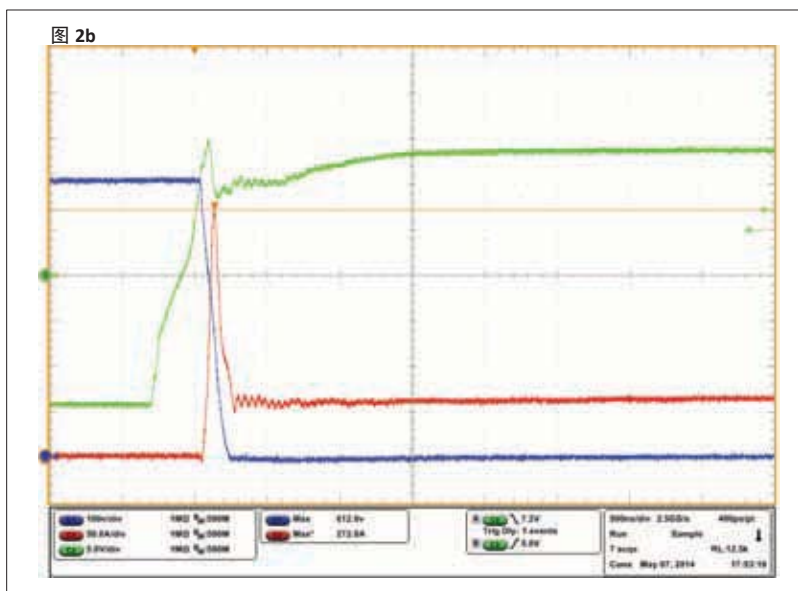
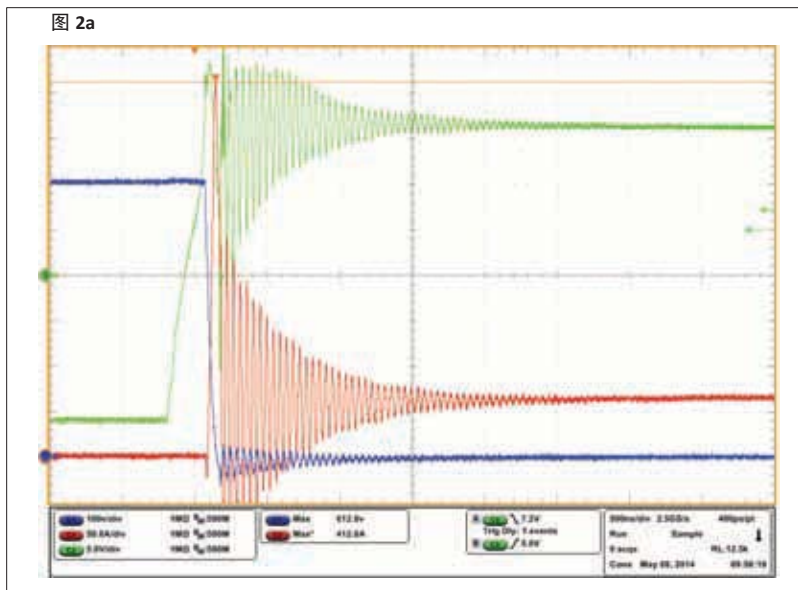


图 2: 10%标称电流级别下低电流的切换 (a: $R_{Gon} = 0\Omega$, b: $R_{Gon} = 1.5\Omega$; $V_{DC} = 600V$; $I_c = 60A$; $-15V < V_{ge} < 15V$) 及集电极-发射极电压 (蓝色)、集电极电流 (红色) 和栅极-发射极电压 (绿色) 与标准栅极驱动器

可以使用新的栅极驱动器芯片 EiceDRIVER™ 1EDS20I12SV 来解决上述难题。当此芯片在较低的集电极电流级别下工作时，具有控制电流源电路的闭合

环路来控制栅极电流，此环路由 p 沟道 MOSFET 和电流检测电阻构成。在开通阶段，电流源非常精确 (误差为 $\pm 10\%$)。

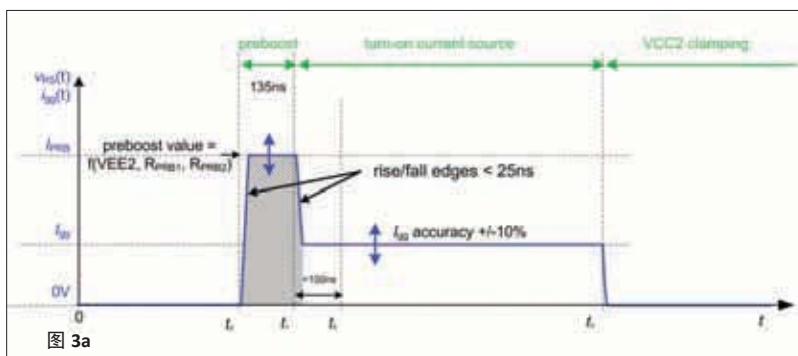


图 3: 导通过程的三个阶段，包含(a)栅极电流 (蓝色) 和电压 (绿色) 的理论波形以及(b)速度级别 1-11 的栅极电流测量波形的示例

同级别来实现这一点。可以由系统控制逐脉冲实时选择这些级别。

开通过程期间的栅极电流控制芯片

新 EiceDRIVER 最具创新性的特性是其栅极电流控制功能。根据图 3 a)所示，它将导通过程分为三个阶段：第一阶段 (t_0 到 t_1) 是从负电压充电至范围 $V_{ge} = 0$ 中的某个预定值。此阶段称为预升压阶段，其持续时间为固定持续时间 $t_{PRB} = 135 ns$ 。可以针对每种 IGBT 类型调整此阶段的预升压电流级别 I_{PRB} 。第二阶段 (t_1 到 t_3) 是开通控制阶段。可以在 11 个不同值中调整瞬时恒定栅极驱动电流 I_{ge} 。IGBT 栅极电压在此时间内超过米勒电压电平。器件的实际应用通常建议使用低于预升压电流 I_{PRB} 的导通栅极电流 I_{ge} 。尽管如此，也可能获得高于预升压电流 I_{PRB} 的导通电流 I_{gg} 。如图 3 b)所示。最后，IGBT 的栅极电容充电完成，从而与第 3 阶段 ($t > t_3$) 中所需的栅极电压电平相关联。

通过在第 2 阶段中选择合适的电流级别，所使用的栅极驱动器芯片能够控制 IGBT 的 $dvCE/dt$ 瞬态。导通延迟时间 $t_{d(on)}$ 是恒定且可预测的。这会对 IGBT 死区时间和电机电流控制环路的设计产生影响，从而提供额外的改进可能性。

芯片通过电流级别超过标称电流 (例如，15%到 20%) 时的开通过程不再趋向于发生振荡。如果在上述工作区中使用了较小的栅极电阻，将实现更低的损耗。

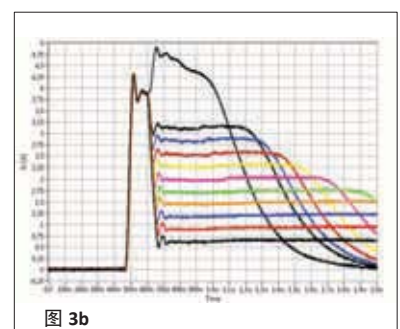


图 3b

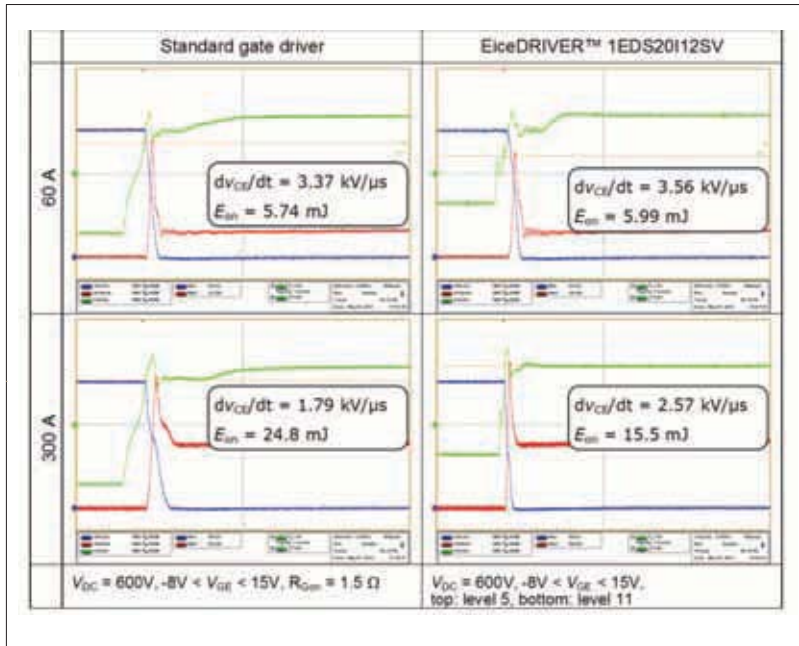


图 4: 1EDS0I12SV 优势明显, 开通损耗比栅极驱动器设计中的标准栅极驱动器高 40%, 示例显示集电极-发射极电压 (蓝色)、集电极电流 (红色) 和栅极-发射极电压 (绿色)

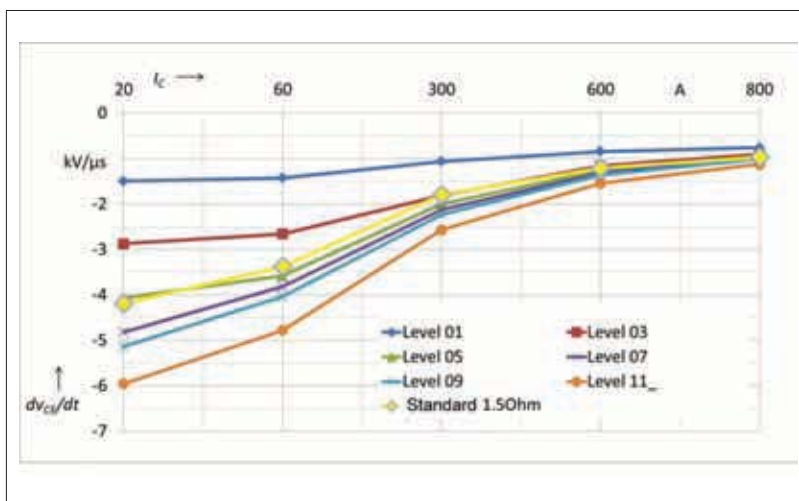
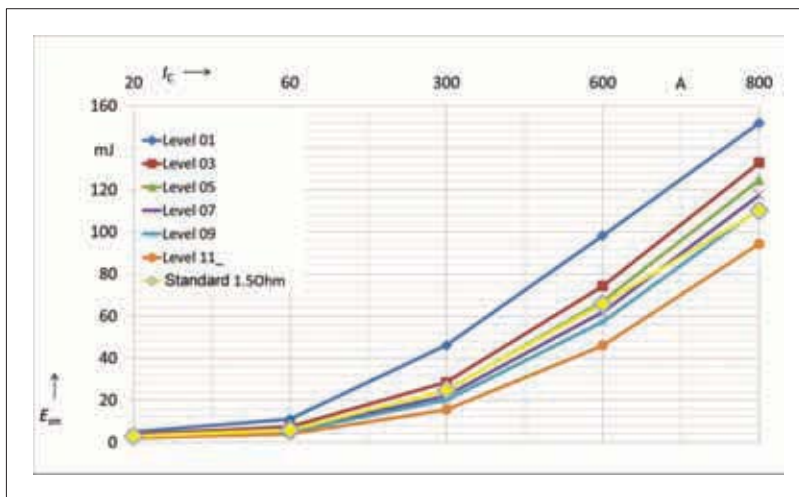


图 5: 在 IGBT 结温 25°C 下, 1EDS-SRC 栅极电流控制芯片在速度级别 1、3、5、7、9 和 11 上相对于标准驱动器的 dv_{ce}/dt 范围 (底部) 和开通损耗 E_{on} 示例

此解决方案的性价比高于使用双极晶体管的类似方案。另外, p 沟道 MOSFET 提供了双极晶体管无法实现的轨到轨功能。此驱动器芯片可以并行控制多达三个 p 沟道 MOSFET (BSD314SPE), 这涵盖了最高达 900A、1200V 模块的一系列电流级。

开通时栅极电流控制芯片对瞬态集电极-发射极电压的影响

EiceDRIVER 1EDS20I12SV 的控制栅极电流的可调节性使设计工程师可以更改与二极管的开关速度相关的特性。现在, 变频器在低负载条件下的出色 EMI 可以与高负载条件下的高效率结合在一起, 如图 4 所示。另一个优势在于导通传导延时。与纯电阻导通相比, 此解决方案的导通传输延时的可预测性更高。

标准栅极驱动器使用模块数据表的栅极电阻值。对于英飞凌科技的 FF600R12ME4, 此值为 1.5Ω 。在 50% 标称电流下, 所选 1.5Ω 产生的开通损耗为 $E_{on} = 24.5 \text{ mJ}$ 。另一方面, 1EDS20I12SV 在低电流条件下显示出相似的开关特性。开通损耗及开通电压瞬态 dv_{ce}/dt 几乎相同。在高电流条件下的优势显而易见。所产生的开通损耗更低, 为 $E_{on} = 15.5 \text{ mJ}$ 。此值比标准栅极驱动器的开通损耗低 40%。因此, 使用新的栅极驱动器芯片可以显著提高整体效率。

详尽阐述了栅极驱动器设计示例, 以便更详细地研究 EiceDRIVER 的各种速度级别根据集电极电流变化的关系。由于栅极电流控制环路允许多种自由度, 因此, 1EDS20I12 可能具有更大的优势。

图 5 底部显示 dv_{ce}/dt 速率范围相对于各种速度设置和集电极幅度的变化。可以看出, 栅极电流控制芯片的控制范围足够覆盖使用常用固定栅极电阻控制的控制范围, 同时可以实现在工作期间逐脉冲更改 dv_{ce}/dt 速率的优势。出于此原因, 切换速度不限于单根曲线。实际上, 它现在甚至可以覆盖所有可能的 dv_{ce}/dt 值。 dv_{ce}/dt 区域可以在“标称” dv_{ce}/dt 线之上或之下, 此线与 dv/dt 或正弦波滤

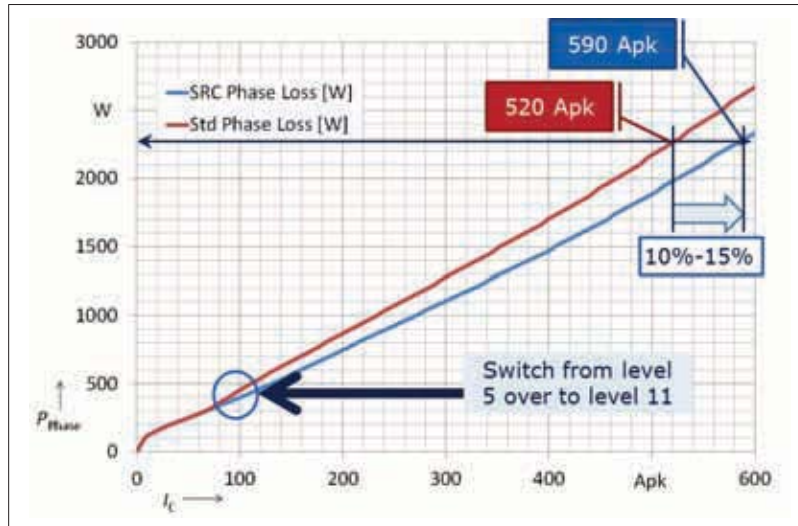


图 6: 计算得出的每阶段功率损耗显示输出电流和压摆率控制 (蓝色) 比标准驱动器 (红色) 增加 10% - 15% ($V_{ce}=600\text{ V}$, $-8\text{ V} < V_{ce} < 15\text{ V}$, $f_s=15\text{ kHz}$)

功率以及相对于在使用标称栅极电阻 1.5Ω 时得到的。图 5 证明, 根据应用的瞬时电气条件, 现在可以通过设置切换速度来保持在应用中 dv_{ce}/dt 的临界值之下。

图 6 表示, 根据图 5 所示内容, 使用 EiceDRIVER 1EDS20I12SV 时 EconoDUAL3 类型 FF600R07ME4 的已计算功率损耗改进仅对级别 5 (电流低于 100 A 峰值) 和级别 11 (瞬时电流超过 100 A 峰值) 有效。

不难发现, 压摆率控制 EiceDRIVER 芯片在使用同一模块时的电流比标准驱动器电路大约高 10% - 15%。

因此, 芯片 1EDS20I12SV 可以通过缩小尺寸 (例如, 散热器尺寸) 来降低系统成本。由于新驱动器芯片旨在实现更高功率密度, 因此显而易见它可以实现目标。

结论

本文讨论了创新型 EiceDRIVER™ 1EDS20I12SV 栅极电流控制芯片的优势, 此芯片使用闭环栅极电流控制进行导通。讨论了提高应用的功率密度。

波器相比的优势。可以在应用工作期间实时逐脉冲调整开通特性。开关测试示例显示, 栅极驱动器芯片可以控制一系列集电极-发射极瞬态电压 dv_{ce}/dt 。在所讨论的示例中, 在较低的集电极电流下得到从 $1.5\text{ kV}/\mu\text{s}$ 到最高 $6\text{ kV}/\mu\text{s}$ 的值; 使用常用栅极电阻控制时, 上述结果仅优于一条平衡线。这可以帮助缩小电机和 EMI 滤波器的尺寸, 甚至可以不再需要这些滤波器。通过使用此芯片, 可以显著降低系统成本, 同时提高系统效率。

逆变器损耗计算显示, 使用 EiceDRIVER™ 1EDS20I12SV 时输出电流大约增加 10% - 15%。此优势可用于提高逆变器的输出

文献

[1] J.O.Krah, et al.: „Besonders energieeffizienter, motorintegrierter Umrichter mit SiC-MOSFETs“; Proceedings of SPS/drives/IPC conference, Nuremberg, Germany, 2013

[2] MTE corporation: „dV-dT Filter Selection Brochure DV-PSL-E“; MTE Corporation, USA, 2012

[3] Gambica: „Variable speed drives and motors“; Technical report No.1, 3rd edition, GAMBICA Association Limited, London, Great Britain, 2006