

可实时调节的栅极电流控制芯片解决了电力驱动中的 dv/dt 问题

Wolfgang Frank, 德国英飞凌 AG, Wolfgang.frank@infineon.com

André Arens, 德国英飞凌 AG, Andre.arens@infineon.com

Stephan Hörold, 奥地利德国英飞凌 AG, Stephan.hoerold@infineon.com

摘要

对于电力电子的 EMI 特性, 调整续流二极管和 IGBT 之间电流的切换速度起着重要作用([1][6])。高 dv/dt 表示电机绕组绝缘及电机轴承承受很大压力 ([7]和[8]), 并且它通常会对电源产生传导和辐射干扰。许多用于对 IGBT 开通进行速度控制的产品都是已知的 ([2]、[3]和[4]) 并且解决方案导致出现大型的复杂控制单元。本文说明了新型栅极驱动芯片([5])的优点, 此芯片提供用于和开关波形相关的集电极发射极电压瞬态 dv_{CE}/dt 的在线调整功能。还说明了此芯片面向应用中的新设计折衷。

1. 简介

采用脉冲宽度调制技术工作的现代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[9]、PCB 布局劣化以及电机轴承退化。快速开关器件可以保证开关损耗越来越低。另一方面, 如果某个产品完全使用所提供的开关性能, EMI 问题和负面影响会不断增加。通过设计栅极电阻包含可选栅极-发射极电容器, 来解决开关性能与 EMI 之间的折衷问题是目前的技术。此过程会产生确定的负面影响, 此影响必须同时涵盖低负载工作和高负载工作。但是, 固定的栅极电阻会导致性能下降, 并进而导致效率下降。需要可调节的栅极电阻来填补此空缺。

本文中使用了最近提出的关于 IGBT 的栅极电流控制开通的概念[5], 此概念现在作为英飞凌的 EiceDRIVER™系列中的集成芯片实现。本文研究了从二极管到 IGBT 的电流切换期间的 dv_{CE}/dt 和 di/dt 瞬态。说明了芯片的作用并详细阐述了用于控制开通期间 IGBT 的电流和电压的压摆率的芯片功能。还说明了用于高效控制现代电力电子系统 (例如三电平逆变器) 的许多创新型附加功能。实际测量证明了在线调整压摆率控制的优势。另外, 还阐述了在 3 电平逆变器中使用的用于过流和退饱和检测的特定芯片功能。

2. 引脚配置和聚类

开通栅极电流控制芯片在输入侧提供了两种不同的电压域。5 V 电源域 (深蓝色) 为芯片的主要部分以及无铁芯变压器绝缘层供电。这包含端子 VCC1、GND1、SIGI 和 SIGO。

另外，还有包含端子 /FLT、RDY1、RDY2、PADP、INP、INN、EN、PADN 及 SPEED（绿色阴影）的控制域，可以为其提供电压电平 3.3 V、5 V 和 15 V。这不仅允许将此器件设计到具有 3.3 V 和 5 V 电平的噪声适中的环境内，还允许使用 15 V 电平的控制信号将器件设计到噪声嘈杂的环境内。此电压域由端子 PADP 和 PADN 供电。

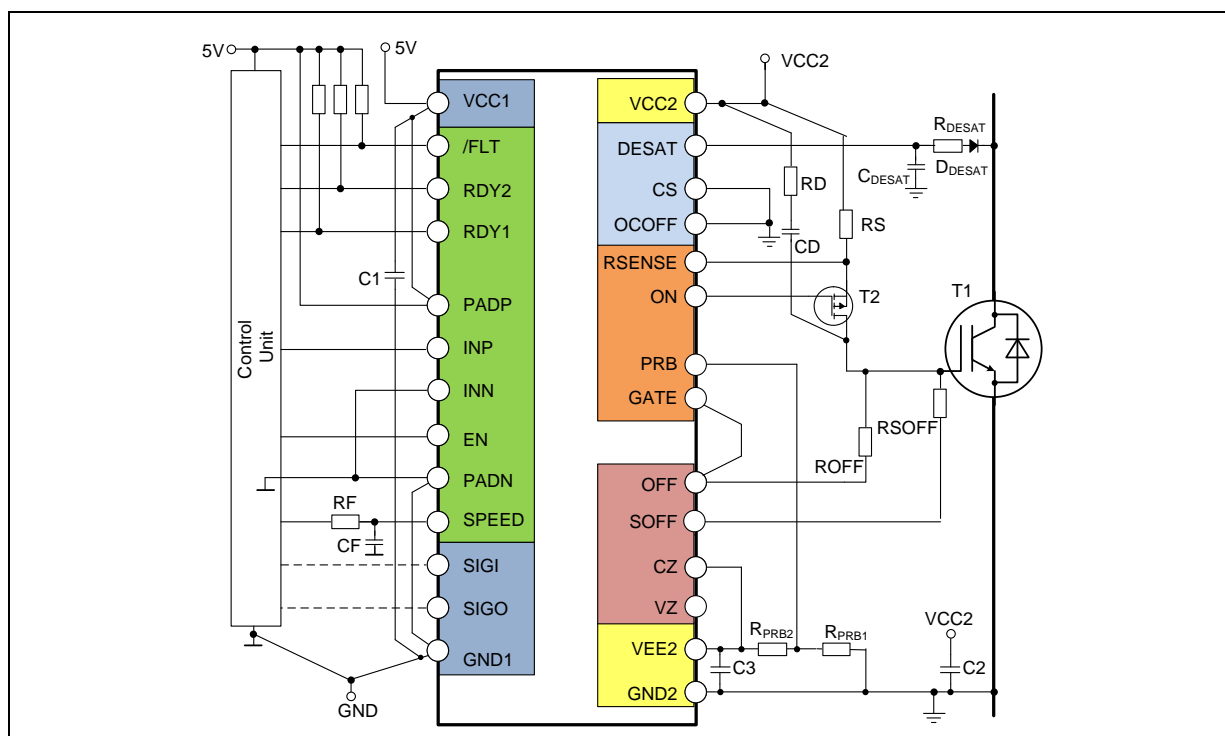


图 1：具有栅极电流控制功能的新 EiceDRIVER™ 芯片在典型应用中的引脚配置

输出侧的电源端子为 VCC2、GND2 和 VEE2（黄色阴影）。输出侧允许使用双极栅极电压电源，以避免出现由 dv/dt 触发的寄生导通。红色阴影端子 RSENSE、ON、PRB 和 GATE 属于栅极电流导通控制环路。浅蓝色阴影区域包含端子 DESAT、CS 和 OCOFF，这些端子是分别用于短路检测、由电流取样电阻或通过 IGBT 进行的过流检测及支持三电平逆变器的专用保护端子。

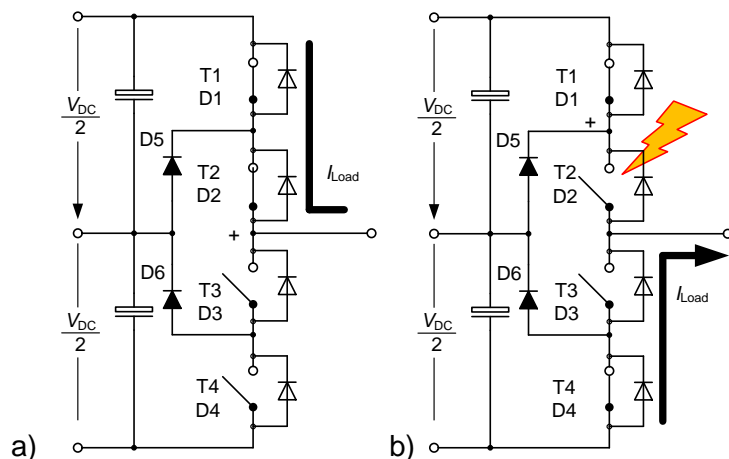
外部端子的关断聚类（紫色阴影）包含两级关断功能（端子 CZ 和 VZ）、关断端子 OFF 以及软关断端子 SOFF。仅当对输出侧发生退饱和的过流时，后者才会触发。

典型应用电路表明，栅极电流控制环路的附加电路仅需要数量有限的几个元器件。与使用栅极电阻控制和外部升压器电路进行栅极电流放大的现有的栅极驱动电路相比，上述电路甚至具有相同的复杂性。

3. 三电平逆变器支持（NPC 1 拓扑结构）

NPC 1 拓扑结构中的三电平逆变器的主要优势为，可以选择击穿电压低于总直流母线电压的 IGBT。可以为直流环节电压（例如， $V_{DC} = 800\text{ V}$ ）选择击穿电压为 650 V 的 IGBT。此类 IGBT 提供更高的开关和导通性能。但是，在过载条件下，会出现与阻断电压相关的临界情况，如图 2 所示。许多栅极驱动器芯片提供了保护功能（例如，退饱和检测），这会导致此特殊晶体管自动关断。

根据图 2 a)所示, 当晶体管 T1 和 T2 导通时, 将对负载施加正的直流母线电压。在晶体管 T2 处检测到过载并且驱动器芯片自动将 T2 关断时, 会出现临界情况。这表示, 电流将切换到二极管 D3 和 D4。现在, 相电压为负的直流母线。因此, 晶体管 T2 将面对全部直流母线电压, 因为晶体管 T1 仍然处于导通状态。根据图 2 b)所示, 此电压会击穿该晶体管。



根据图 2 c)所示, 此情况下的安全状态为控制相的零电压。在此情况下, 驱动器芯片必须检测过载情况, 但不会自动关断晶体管 T2。

上述栅极电流控制芯片提供了通过将端子 OCOFF 上拉至输出电源电压 VCC2 来抑制自动短路关断机制的选项。仅将故障信号传输到控制侧, 以便应用控制可以正确及时地管理此情况。因此, 根据图 2 所示, T1 和 T4 的两个控制芯片默认情况下将关断, 而 T2 和 T3 的栅极驱动器芯片将分别等待指令。在该情况下, 可以通过停止使用激活功能来关断 T2 和 T3。这也将导致软关断。

4. 开通过程期间的栅极电流控制芯片

最具创新性的特性是栅极电流控制功能。根据图3 a)所示, 新栅极电流控制芯片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 $t_{PRB} = 135ns$ 。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) 是栅极控制阶段。可以在11个不同值中调整瞬时恒定栅极驱动电流 I_{gg} 。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_{gg} 。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, 栅极充电完成, 达到第3阶段 (t_3 到 t_4) 中所需的栅极电压电平。

通过在第2阶段中选择合适的电流级别, 所使用的栅极驱动芯片能够控制IGBT的 dv_{CE}/dt 瞬态。因此, 与纯电阻栅极控制相比, 使用可调节的栅极电流源时栅极电阻的选择更宽泛, 前者仅对栅极电阻施加恒定栅极电压。请注意, 导通延迟时间 $t_{d(on)}$ 现在是非常恒定且可预测的。这会对死区时间设计产生影响, 此时间现在可以更短。

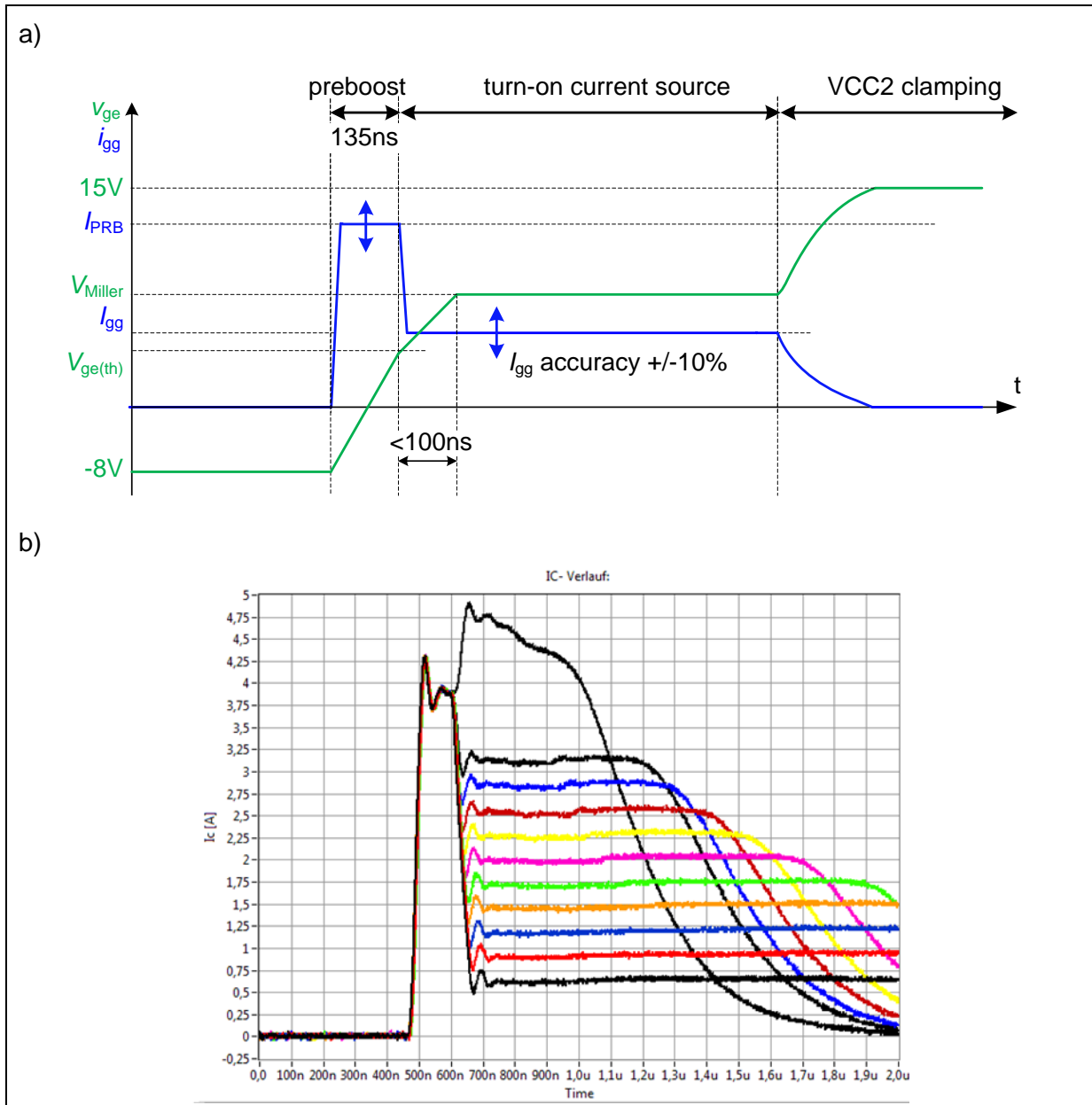


图 3： 导通过程的三个阶段，包含(a)栅极电流（蓝色）和电压（绿色）的理论波形以及(b)速度级别 1-11 的栅极电流测量波形

此芯片通过闭环电流源电路来控制栅极电流，此电路由p沟道MOSFET和电流检测电阻构成。在导通阶段，电流源非常精确（误差为 $\pm 10\%$ ）。此解决方案的成本低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EiceDRIVER™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的一系列模块电流级。

5. 导通时栅极电流控制芯片对瞬态集电极-发射极电压的影响

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范例。控制栅极电流使晶体管到续流二极管的转换电压更平稳。如第4段所讨论的那样，另一个优势在于，导通传输延时的可预测性高于纯电阻导通。

图4显示 dv_{CE}/dt 速率范围相对于各种速度设置和温度的变化。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，同时具备在工作期间在线更改 dv_{CE}/dt 速率的优势。出于此原因，切换速度现在不限于单根曲线，而是可以覆盖某个区域的可能 dv_{CE}/dt 值。

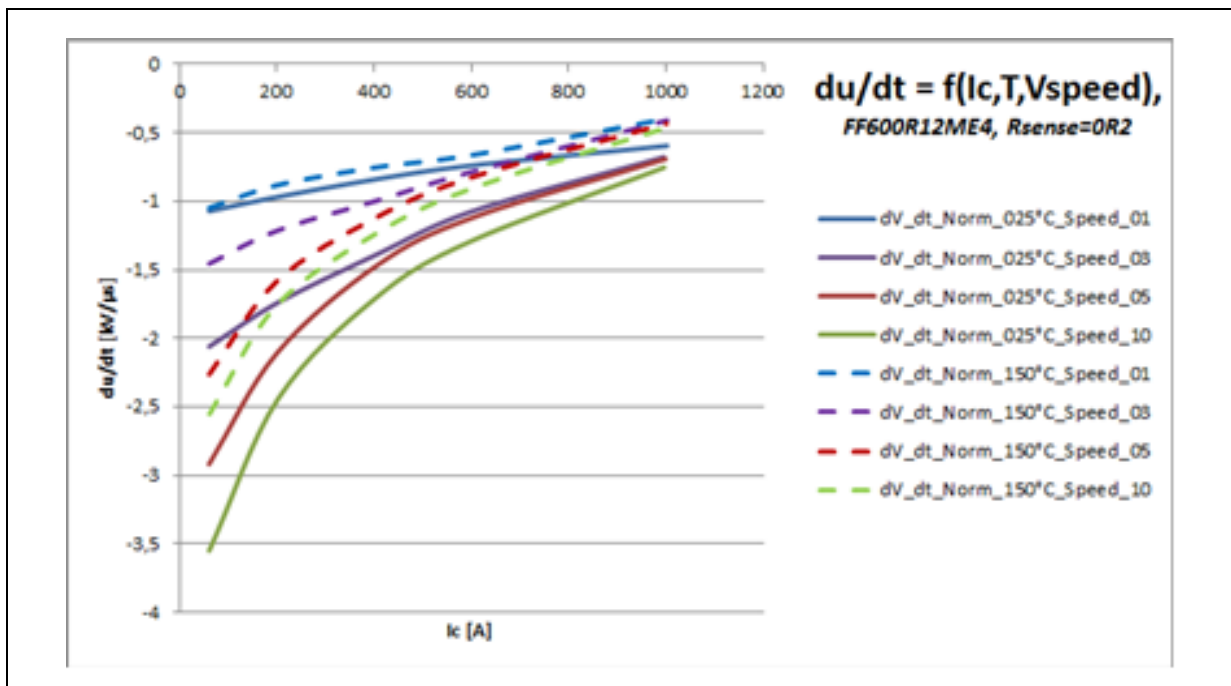


图 4：在 IGBT 结温 25°C 下，栅极电流控制芯片在速度阶梯 1、3、5 和 10 上的 dv_{CE}/dt 范围覆盖情况

dv_{CE}/dt 具有的新可调节性对电机绕组和电机轴承的寿命非常重要。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([10])。控制 dv_{CE}/dt 表示，可以减少甚至不用降低 dv_{CE}/dt 的对策（例如，滤波器），这是通向系统成本降低的重要一步。另外，电机的维护周期可能会更长。图 4 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。

6. 应用测试

图5中显示了可实时调节的闭环栅极电流控制的特性。所应用的各个速度阶梯以“x”表示，并且幅度对应于端子SPEED的电压。不难看出，速度阶梯符合电机电流的正弦波形。因此，开关速度和开关损耗随电机电流变化而变化：较高的电机电流与相对较低的开关损耗相关。但是，可以看到存在一定偏差。与低速度阶梯的时间间隔相比，较高的速度阶梯的时间间隔更短。导致此情况的原因是，将速度阶梯传输到控制芯片中输出阶段的过程存在延迟。此延迟定

义为最长 $120\mu\text{s}$ 。可以将此延迟视为某种死区时间。因此，可以通过设置端子SPEED的预测性设置来更正此延迟。

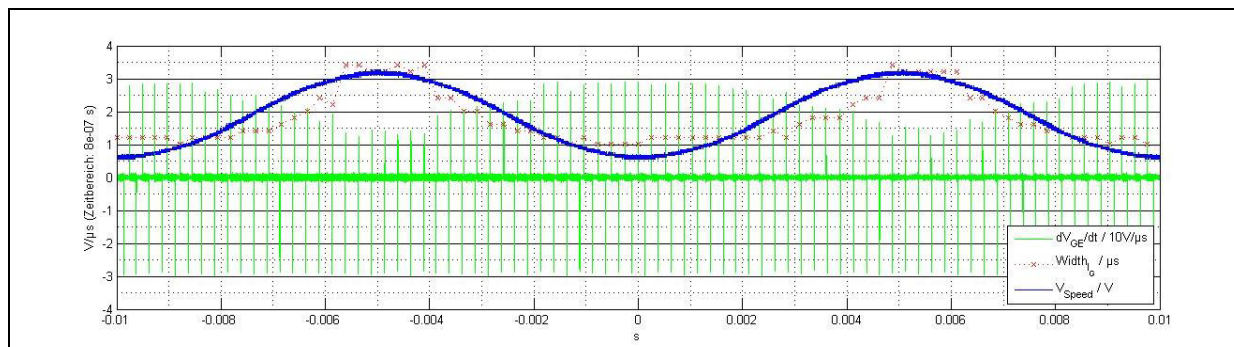


图 5: 应用测量 (集电极-发射极电压 $100\text{V}/\text{div}$ (绿色)、集电极电流 $10\text{A}/\text{div}$ (红色))

7. 结论

本文讨论了新型栅极电流控制芯片概念的优势，此芯片使用闭环环路栅极电流进行开通控制。可以在芯片工作期间实时调节开通属性。开关测试示例显示，栅极驱动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 $1\text{kV}/\mu\text{s}$ 到最高 $3.5\text{kV}/\mu\text{s}$ 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。此结果可以帮助缩小电机和 EMI 滤波器的尺寸或彻底省略这些滤波器，从而可以显著降低系统成本。

另外，通常使用的栅极电阻驱动的 IGBT 显示随集电极电流变化的开通传输延时也随之有很大的变化。在此处表明，开通过程现在可以预测开通传输延时，并且独立于集电极电流。

8. 参考资料

- [1] E.R.Motto, J.F.Donlon: Speed Shifting Gate Drive for Intelligent Power Modules; Proceedings of the Advanced Power Electronic Conference 2006, USA, 2006
- [2] Y. Lobsiger, J.W.Kolar: Closed-Loop IGBT Gate Drive Featuring Highly Dynamic di/dt and dv/dt Control; Proceedings of ECCE 2012 conference; Ort, Land, 2012.
- [3] Y. Lobsiger, J.W.Kolar: Closed-Loop di/dt & dv/dt Control and Dead Time Minimization of IGBTs in Bridge Leg Configuration; Proceedings of the 14th IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL 2013), Salt Lake City, USA, 2013.
- [4] V. John, B.S.Suh, T.A.Lipo: High-Performance Active Gate Drive for High-Power IGBT's; IEEE transactions on industry applications, Vol. 35, No.5, USA, 1999
- [5] A. Arens, et al.: Get tuned – A new generation of driver IC including safe isolation by coreless transformer technology; Proceedings of PCIM Europe 2013; Nuremberg, Germany, 2013.
- [6] F. Hille, W. Frank: A new high voltage diode technology with reduced switching losses and improved softness; Proceedings of PCIM Europe 2007, Nuremberg, Germany, 2007.
- [7] A. v.Jouanne, P. N:Enjeti: "Design considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects of long Motor leads in ASD applications"; IEEE transactions on industry application, Vol. 33, No.5; 1997
- [8] A. v.Jouanne, H. Zhang, A. Wallace: „An evaluation of mitigation techniques for bearing currents, EMI and over-voltages in ASD applications"; IEEE 1997

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

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