

工业电机驱动中的栅极驱动和电流反馈信号隔离

Dara O'Sullivan
Nicola O'Byrne

in 分享至LinkedIn

✉ 电子邮件

摘要

二十多年来，电机电能效率一直是全球能源监管机构关注的重点。这是全球共同努力的一部分，旨在通过增加电能利用率以及使用可再生能源，达到最大程度减少碳排放的目的。早期的电机效率法规是自愿的，但很快这些法规就变成强制性的了，并且每5至10年就会提高最低能效水平要求。鼠笼式感应电机(SQIM)自人类普及用电之后便一直是工业的主力军，因为它在直接连接三相交流电源后即可开始工作。当前的IEC标准依据功率额定值将这些电机的效率分为各种等级，范围从标准效率(IE1)到超顶级效率(IE4)。今天，IE3顶级效率在世界上最大的工业区内是强制标准，这些地区包括欧盟、美国、中国和日本。厂商并没有抗拒这一变化，因为在电机的寿命期间，电机的资本投入只是电费的一小部分。哪怕将顶级效率电机替换为15 kW超顶级效率IE4电机，其额外的成本也会在两年内通过节约的电费收回。电机效率要求的这种趋势迫使很多设备制造商抛弃直接离线电机，转而使用基于逆变器的解决方案。这些解决方案的各种架构以及驱动和信号隔离要求是本文所要讨论的主题。

SQIM制造商目前为止一直将更为严格的法规视为市场机遇。顶级效率和超顶级效率电机的材料、设计、制造成本相比标准效率电机更高，但市场售价也更高。然而，最新的效率分类等级IE5和IE6将对电机制造商造成不少困扰。电机专家相信，要设计线路连接式的SQIM来满足高于IE4的效率等级——尤其是较低功率范围(de Almeida)——将会是十分困难且成本高昂的。极有可能只有逆变器连接式电机才能满足IE5或更高的效率等级。永磁同步电机(PMSM)通常用于超高效率应用，但稀土转子磁体的成本和获取性是个问题。最新的轴向电机设计中使用铁氧体磁珠或新的磁体材料，这些材料是为满足不断增长的电动汽车市场而

开发，可缓解这些问题。此外，人们正在考虑针对IE5效率等级驱动(ABB)采用同步磁阻电机(SRM)。SRM既没有转子绕组也没有磁体，能以较低的成本实现高效率，框架尺寸与同等功率额定值的SQIM相当。

逆变器 and 隔离

这种使用效率更高电机的趋势推动了基于IGBT的频率逆变器需求，可将整流市电输入转换为驱动电机的各种频率电压。逆变器控制型电机的输出扭矩或速度经优化后匹配轴负载，可最大程度降低能耗和电机运行温度，改善电机可靠性。此外，其附加控制功能有：状态监控、功率计量和工厂网络连接，可提高过程效率和可靠性。隔离技术是驱动系统中的关键因素，因为它能安全地将控制器用户界面与连接逆变器的危险高电压相隔离。

有多种高等级因素会影响特定驱动中的隔离要求和架构，这些因素包括：电机驱动性能等级、通信接口的复杂性、控制器架构以及系统内的电压水平，如图1所示。

很多情况下，关键的隔离节点是栅极驱动器和电机相位电流检测电路。这两处均涉及与开关高电压有关的控制或测量信号，并且至少包含某种形式的电平转换，很多时候还包括隔离(功能隔离或安全隔离)，以便施加或提取以地为参考的信号。

参见图2中的概念图；该图描述了单个逆变器相位臂，并标出了高端栅极驱动器信号和相位分流检测信号的电平转换和潜在的信号隔离要求。

隔离式栅极驱动器

由图2还能看出一个隔离栅极驱动器的基本要求，包括：逻辑电平开关信号的功能或安全隔离，以及可驱动IGBT栅极电压通过开启和关断阈值的输出驱动器(以便在最短时间间隔内开关IGBT，从而最大程度减少设备的导通损耗、开关损耗和EMI)。在三相逆变器中，IGBT以相反方向进行控制，以便高端和低端IGBT始终无法同时导通，哪怕时间很短。这就要求在高端和低端开关信号之间插入一个小的死区时间片段。最大程度缩短这

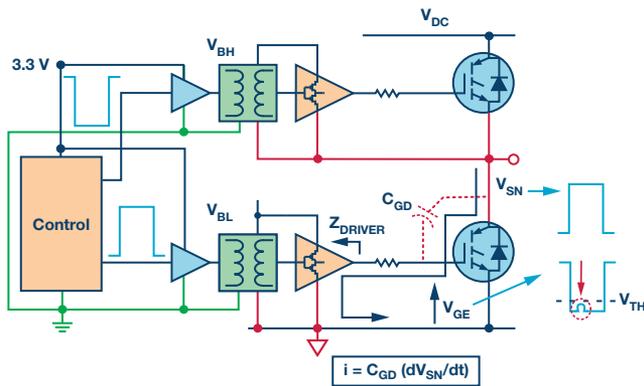


图3. IGBT开关的米勒效应

一般而言，有两种方法可以解决逆变器IGBT的感应导通问题——使用双极性电源和/或额外的米勒箝位。在栅极驱动器隔离端接收双极性电源的能力为感应电压瞬变提供了额外的裕量。例如，-7.5 V负电源轨表示需要大于8.5 V的感应电压瞬变才能感应杂散导通。这足以防止杂散导通。另一种方法是在完成关断转换后的一段时间内降低栅极驱动器电路的关断阻抗。这称为米勒箝位电路。容性电流现在流经较低阻抗的电路，随后降低电压瞬变的幅度。针对导通与关断采用非对称栅极电阻，便可为开关速率控制提供额外的灵活性。所有这些栅极驱动器功能都对整个系统的可靠性与效率有正面影响。

电机驱动中的过流保护通常在多个等级内部署。驱动保护方案中可能包含持续过流和瞬时过流的区别，而这些过流事件具有不同的跳变电平和时间常数。这类过流保护通常基于电流测量进行部署。对于极快速和可能会有灾难性后果的过流事件中(比如逆变器输出短路)，在栅极驱动器中集成快速响应保护机制可能会非常有用。IGBT导通时，通过监控IGBT集电极发射极电压便可实现去饱和保护。IGBT饱和时，通态电压是IGBT内电流电平的函数，并且该保护功能可以设计成触发一次故障，然后在通态

电压升高至超出可接受电平时快速关断IGBT。有一段短暂的消隐时间，期间保护电路不监控IGBT的通态电压。这是为了防止导通时由于集电极发射极电压瞬变和/或导通事件中的瞬变过流而引起误触发。

ADI隔离式栅极驱动器ADUM4135集成双极性电源能力、米勒箝位、非对称导通和关断输出。此外，传播延迟和更重要的传播延迟偏斜典型值分别为业界领先的50 ns和15 ns。降低死区时间对系统的影响如图4所示；图中，低电机速度的逆变器输出线对线电压以两个不同的死区时间水平表示。与光耦合器技术有关的更高死区时间要求导致更高的电机电压和电流失真。这样便会增加扭矩纹波和振动从而导致性能下降，并且由于谐波损耗增加而降低效率。这些失真效应在逆变器应用中尤为明显，控制环路性能相对较低；然而，哪怕在高性能驱动以及高带宽电流和速度控制中，死区时间相关的失真也会成为极低速性能的限制因素。

隔离电流检测

对于分流式测量而言，电机相位电流检测节点与栅极驱动器输出连接相同的电路，如图2所示。因此，它们具有相同的隔离电压和开关瞬变。相位电流检测对于高性能闭环电机控制而言极为重要，并且不容易在恶劣、充满电气噪声的环境中实现高保真测量。在较高功率系统中，使用自身提供隔离功能的隔离电流传感器(比如电流互感器或霍尔效应传感器)；而在较低功率系统中，趋势是使用带有隔离式Σ-Δ型调制器(比如ADI AD7403)的分流电阻。以前的系统通常使用去饱和和栅极驱动器功能来实现短路过流保护(如上文所述)，而之后基于隔离式调制器的电流检测方案可能通过快速粗调数字滤波器直接实现此功能(O'Byrne)。这便要求隔离式调制器响应和栅极驱动器的低传播延迟同时具备精确时序；ADI的*iCoupler*®技术可以做到这一点，而传统基于光耦合器的解决方案容易受到较长的传播延迟影响。

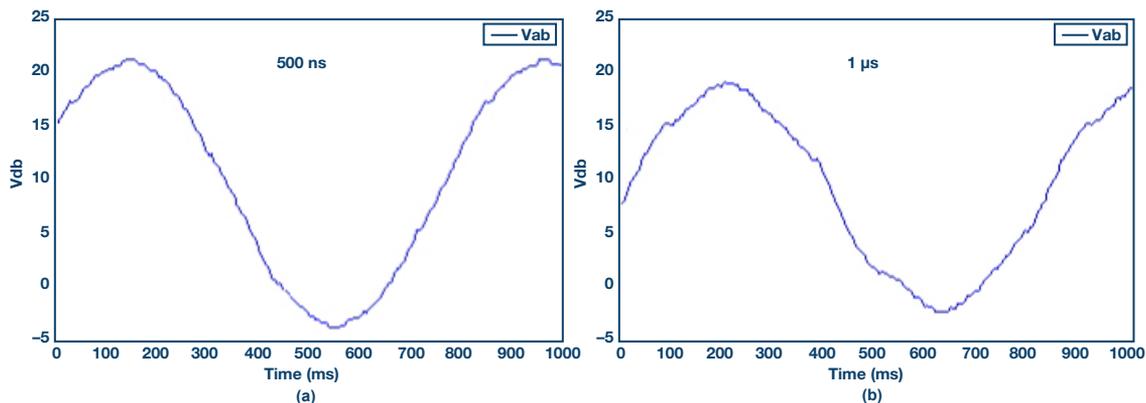


图4. (a) 500 ns死区时间以及(b) 1μs死区时间测得的线对线电机电压

法规环境

开发出符合所需性能的驱动架构之后，系统必须设计并符合业界电气安全标准。要选择合适的隔离元件，必须了解栅极驱动器和电流检测节点的隔离要求。每个节点都可以采用安全隔离(加强)、基本绝缘或功能绝缘。任意单个节点的要求可以是安全绝缘以防止电击，也可以采用隔离以保护低压电路，或者采用隔离来实现数据完整性和降噪，如图1所示。系统级要求可以通过使用多个隔离栅实现。IEC61800-5-1是已实施很长时间的系统级电机驱动标准，驱动设计必须满足该系统绝缘标准。

无论何种标准，都不涉及元件评估。IEC61800-5-1建议使用支持系统标准要求的元件级标准。IEC60747-5-5针对基于光耦合器的元件，而VDE-0884-10是IEC60747-5-5的非光隔离器版本，针对数字隔离器，于2006年开始实施。之后开发了VDE-0884-11并于2014年认证通过，包含额外的寿命特性要求。该标准作为IEC60747-17提交给IEC认证，通常需要三年。在此期间，VDE-0884-11可用作IEC的等效标准，如图5所示。

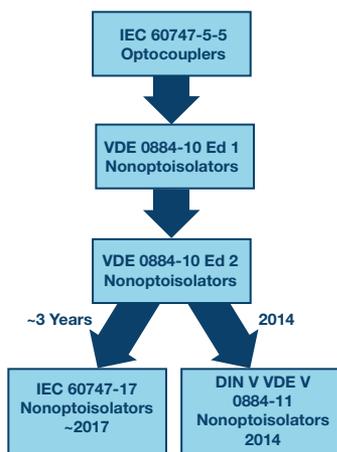


图5. 非光隔离器标准的演进

结论

新的电机能效国际法规加速了从固定速度、直接在线感应电机到逆变器控制式机器的转变。通常要求至少采用IGBT栅极驱动和某种形式的电流检测来保护从简单的开环逆变器到驱动和伺服中的高保真电流控制。这些电路的技术要求正不断将重点放在精确时序和精确测量上，以及可靠性和鲁棒性上。在法规框架内实现系统设计部署对于信号隔离提出了重大挑战。

参考文献

ABB. “ABB’s new SynRM² Motor Technology will Deliver IE5 Efficiency Without Rare Earth Magnets (ABB的SynRM²电机技术无需稀土永磁体将能提供IE5效率)。” ABB 新闻稿。2014年4月3日。

de Almeida, A.T. F. J. T. E. Ferreira和 G. Baoming. “Beyond Induction Motors—Technology Trends to Move Up Efficiency (超越感应电机——提升效率的技术发展趋势)。” IEEE工业应用汇刊，第50卷，第3期，2014年5/6月。

O’Byrne, N. “适用于工业运动控制的测量技术”。ADI公司，2014年。

O’Sullivan, D和M. Moroney. “利用数字隔离器技术增强工业电机控制性能”。ADI公司，2014年。

在线支持

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

ezchina.analog.com



全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210 室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区
上地东路 5-2 号
京蒙高科大厦 5 层
邮编: 100085
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What’s Possible is a trademark of Analog Devices. TA13151sc-0-10/15(A)

analog.com/cn



超越一切可能™