

高精度霍尔电流传感器助力功率系统的性能和效率提升

唐钊

模拟信号链-传感器事业部

随着自动化和智能化在世界范围的普及，电动车、工业自动化等产业进化推动了市场对高压功率系统的需求，人们对这些功率系统的效率和性能的要求也越来越严苛。如何高效、精确的控制、监测和保护这些需要长时间运转的系统变成了很多工程师的痛点，而这之中，隔离电流检测又是最重要的一环。实现隔离电流检测的方法有很多种，这当中当然要考虑包括隔离等级、性价比、效率、方案体积等多方面因素，也同时催生了不同方案的创新升级——基于霍尔效应的隔离电流传感器是当中独特的方案之一。

系统效率的提升尤为关键

对高压系统需求的增长带来更多的能源消耗，而成本、监管和如功率密度等技术上的局限都对效率提出了更高的要求。很多系统比如电动车、工业马达、甚至于一些家电都会在交直流转换（AC-DC）或储能的过程中造成不同程度的能源浪费。以 2020 年美国数据中心和服务器的耗电量为例，这些设备预计全年会消耗美国 23% 的总耗电量，而它们的效率大概在 65% 左右。即使它们的效率提高仅 0.5%，也可节省大概 8 亿 5 千万千瓦时的电量，这相当于美国大约 8 万户家庭一年的用电总量。效率提升的意义由此可见一斑！

常用的储能和交直流转换系统，如不间断电源（UPS）和 AC-DC 转换器，都要通过隔离电流检测来实现闭环控制和诊断报错功能；最常见的就是功率因数校正（Power Factor Correction, PFC）电路。图 1 是一个 PFC 电路的框图，由图可见在 AC 端需要做隔离电流检测来监测和保护系统。变压器是由这里检测到的电流控制的，因此电流检测的精度和产品生命周期内的稳定性在很大程度上会直接影响变压器的效率和功率因数。

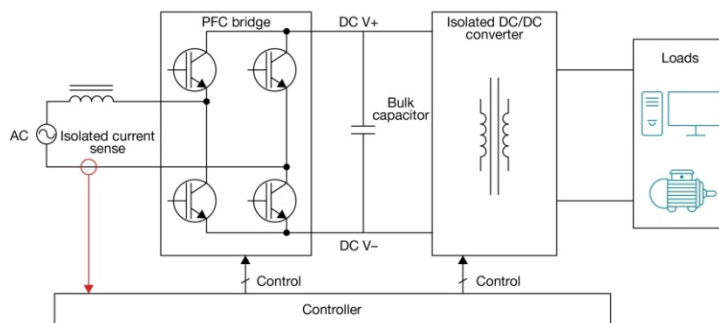


图 1：带隔离电流检测的 PFC 电路框图

性价比一直是传统的隔离电流检测的痛点之一。传统的基于霍尔效应的开环电流传感器实现起来很容易，也不需要再外加分立元件，成本上有优势；但这些方案的不足之处在于温漂很大，测量不够精确。而基于隔离分流电阻、或闭环磁传感器的方案，精度很高，但实现起来需要更复杂的电路和分立元件，成本也很高。德州仪器（TI）最新推出的 [TMCS1100](#) 和 [TMCS1101](#) 系列产品则完美地解决了这一问题。这一系列产品既保留了开环霍尔电流传感器易于使用的特点和成本优势，同时借用 TI 在高精度模拟信号

链方面的专长采用了零温漂的内部信号链设计，使得电流检测可达到总误差在整个温度范围内小于 1% 的精度。表 1 针对不同的隔离电流检测方案做了一个简单的对比。

	基于隔离分流电阻的方案	基于闭环电磁传感器的方案	开环霍尔电流传感器	
			市面其他产品	TMCS1100 系列
方案尺寸	-	--	++	++
所需分立元件个数	1 to 3	2 to 5	0	0
方案成本	-	--	++	++
方案精度	++	++	-	+
失调电流和灵敏度随温度和时间的漂移	++	+++	--	+

表 1: 不同隔离电流检测方案之对比

TI 的 [1 千瓦氮化镓图腾柱电源参考设计](#) 使用 TMCS1100 做电流检测，在将系统尺寸做小的同时达到 0.98 的功率因数和大于 99% 的效率。同时 TMCS1100 的低温漂特性也将整个系统的总谐波失真降低了最多 5%。

回到文章开头美国服务器的例子，TMCS1100 系列通过自身的电气隔离（Galvanic Isolation）将设备与交流电网隔离开来，在不增加成本的情况下能达到小于 0.5% 的检测温漂从而提高效率。这样一级一级的 UPS、转换器等设备累加起来，节省的能源和成本是相当可观的。

电气化边界的拓展成为可能

电气化在提升产品性能、可靠性和优化成本上有独一无二的优势，但同时这些系统也对方案的尺寸和隔离等级提出了新的需求。很多现有的系统在高压设计上由于需要很多器件同时完成隔离和电气设计，占用了大量的电路板面积和设计空间。霍尔电流传感器是一个集隔离与传感于一体的单芯片方案，很多产品都采用 5mmX6mm 的 8 引脚 SOIC 小封装，这让这一类方案在产品体积上有很大的优势。但市面上 8 引脚 SOIC 封装的霍尔传感器一般都只有 400V 的工作隔离电压，这在很多应用场景是不能满足需求的。比如对一个 400V 的高压电池来说，有负载时它的瞬态电压有可能达到 600V。又比如 240V 的交流电在整流后再经过一次升压，得到的直流电就可能从 340V 升到 600V。太阳能逆变器也是同理。图 2 展示了几个高压超过 400V 的应用实例。

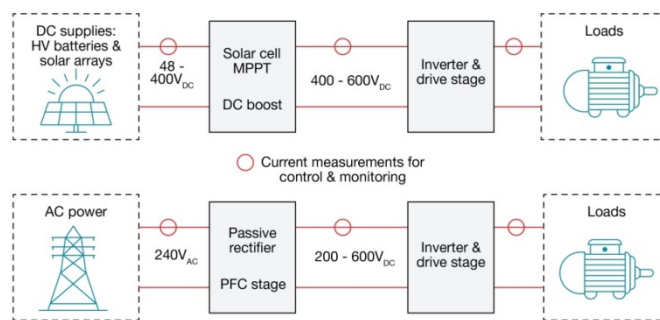


图 2: AC 整流器、太阳能逆变器示例

TI 的 TMCS1100 和 TMCS1101 系列产品通过在同样的 8 引脚 SOIC 封装内实现 600V 的工作隔离电压，解决了其他霍尔电流传感器这一常见的问题。TMCS1100 系列产品提供了比业界标准（如 UL-1577 和

DIN VDE V 0884-11) 更高的隔离电压和高压持续时间的余量 (margin)，从而使得产品设计者无需为了更高的余量增加设计的体积和成本。

我们通常使用经时击穿 (Time-Dependent Dielectric Breakdown, TDDB) 来描述一个器件的使用寿命和其所承受的电压的关系。图 3 是 TMCS1100 系列产品的 TDDB 曲线，由图可见其工作寿命区间远超 VDE 标准的 26 年 + 20% 的电压余量。这一超长的使用寿命特性，与 3kVrms/60s 的基础隔离、8 引脚 SOIC 封装一道，使得这一系列产品成为直接接入电网、高储能等高压系统的理想器件。

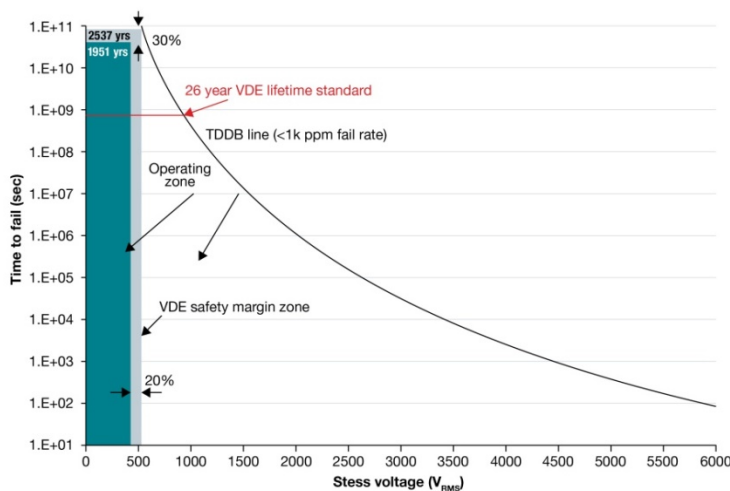


图 3: TMCS1100 经时击穿 (TDDB) 曲线

功率系统性能的进一步提升

电力系统都需要精确的反馈回路来达到最优的系统性能。以电机控制系统为例 (如图 4 所示)，为了精确的控制电机扭矩、转速等参数，电机控制算法需要实时并准确的获得电机相电流的信息。这一电流反馈回路必须 1) 与高压总线隔离，2) 能够抑制电机驱动的 PWM 电压对电流检测输出端的影响，同时 3) 满足电机相与相之间电流测量的精度和匹配程度等需求。

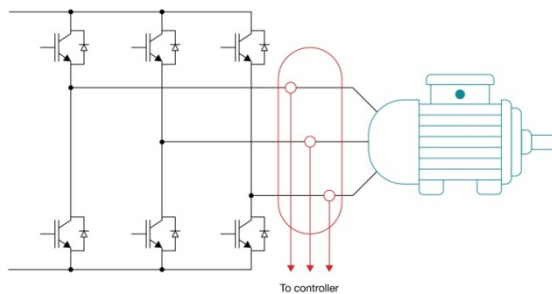


图 4: 三相电机的相电流检测

上面提到的三个考量因素当中，电流测量的精度和匹配程度是现有开环霍尔电流传感器的一大挑战，而其中重要的一个制约因素就是温漂。由于布板等各种现实因素的制约，不同电机的相与相之间所处的实际环境温度可能不同，这就可能导致每一相本身的电流测量出现偏差，而相与相之间的差别可能更大。针对现有的霍尔电流传感器的这一制约条件，一种常见的做法是做温度补偿和多点校准，而无论是哪一种解决方法都会带来额外的成本负担。

TI 的 TMCS1100 系列产品在 -40°C 到 125°C 的整个温度范围内，可以达到 $<0.3\%$ 的灵敏度温漂（sensitivity drift）和 $0.04\text{mA}/^{\circ}\text{C}$ 的失调电流温漂（offset drift），使得这一系列产品可以广泛应用在不同的环境当中。低温漂、低失调电流（ 6mA ）、高线性度（ 0.05% ）这些特性的组合，使 TMCS1100 成为高精度电流测量的一个理想选择。表 2 和图 5 以 TMCS1100A2QDR 为例，示例了如何通过其高精度特性，来实现 $<0.5\%$ 的全量程误差。

灵敏度温漂 (sensitivity drift), $-40^{\circ}\text{C} \rightarrow 125^{\circ}\text{C}$	$< 0.3\%$
失调电流 (offset), 25°C	6 mA
失调电流温漂 (offset drift), $-40^{\circ}\text{C} \rightarrow 125^{\circ}\text{C}$	$0.04\text{mA}/^{\circ}\text{C}$
灵敏度老化漂移 (sensitivity lifetime and aging drift)	$<0.5\%$
线性度 (linearity)	0.05%

表 2: TMCS1100 精度参数

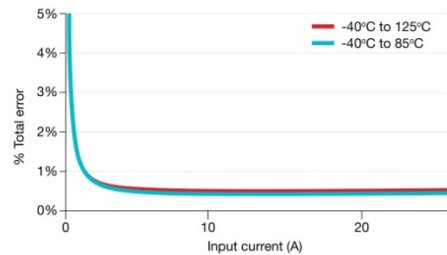


图 5: TMCS1100 总误差曲线

在实现高精度测量的同时，TMCS1100 在整个产品周期内的稳定性也比同类产品高约 3 倍；产品周期测试显示，其灵敏度随时间的漂移在 0.5% 以内。这一稳定特性，结合之前提到的温漂和精度，使得之前无法用简单的开环霍尔电流传感器实现的高精度测量从此成为可能。

高压系统监测和诊断的完善

随着“智能工厂”的普及和算力的高速增长，对系统能耗、性能、设备安全和老化程度、运行状态等特性的检测和诊断正变得愈发重要。由于系统的复杂度越来越高，如图 6 所示的分布式多点电流检测可高效的实现这一目标。但正如任何电子电力系统一样，复杂度越高、监测点越多，需要做的折衷考虑也就越多：测量精度、成本、设计尺寸、所用传感器的数量和性能等等都是需要考虑的因素。前文我们已经介绍过 TMCS1100 在各方面的特性和与同类产品的比较，它的测量准确度和易于使用的特性使其在这种监测和诊断的应用中可以提供更好的折衷和性价比。



图 6: 分布式多点电流检测在智能工厂中的应用

另一种监测场景是需要多个设备当中对单一设备进行系统监测（如数据中心和通信设备等应用中），从而达到全系统负载平衡和优化的目的。这里的主要挑战是在不同环境下，当系统受环境本身的影响而表现不一致时，监测系统自身能够不受影响，从而真正检测在不同环境下整个系统的响应特性。图 7 展示了 TMCS1100 在不同环境温度下，由于其极低的温漂，针对不同负载可以达到 <math><0.5\%</math>的全量程误差的测量精度。

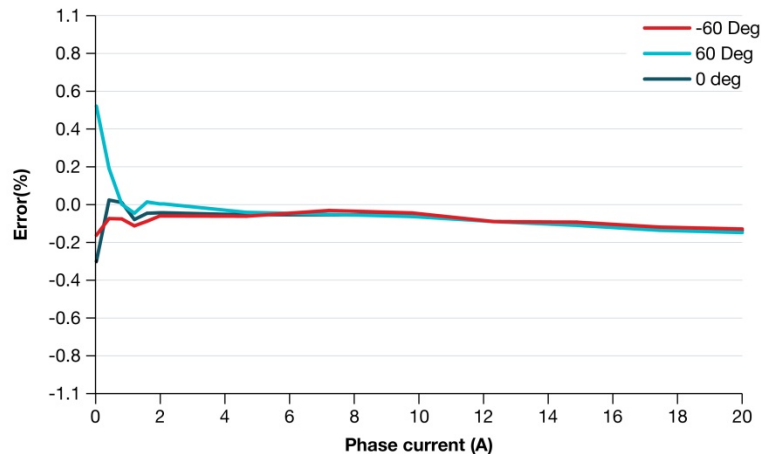


图 7: TMCS1100 在功率测量中的精度曲线

整体而言，电流传感器的低温漂和高精度可以使系统监测、诊断和保护得以检测到更小的系统性能变化，从而增强系统的稳定性和可靠性。也是出于同样的原因，这一类产品也将越来越多的出现在大功率功能安全的冗余设计中，进一步提高系统的稳定性。

总结

基于霍尔效应的隔离电流传感器一直以来都在高压系统的电流检测当中扮演重要的角色，其应用简单直接，但市场上的传统产品由于其精度、温漂、隔离等级等特性的限制，在具体设计上都需要工程师做一定程度的权衡与取舍。TI 的 TMCS1100、TMCS1101 系列产品通过提升隔离等级、采用高精度信号链设计、极低的温漂等特性，在传统产品的易用性基础上将性能提升了一个等级。这一升级对高压电机、自动化控制、分布式传感器、功率系统等领域的性能提升，将产生广泛而深远的影响。

其他相关资料:

- [1-kW, 80 Plus titanium, GaN CCM totem pole bridgeless PFC and half-bridge LLC reference design](#)
- [In-phase current-sense reference design for 230-VAC motor drives using hall-effect current sensors](#)
- [How to use Hall-effect current sensors in telecom rectifiers and server PSUs](#)
- [How current sensors help monitor and protect the world's wireless infrastructure](#)
- [Enabling Precision Current Sensing Designs with Non-Ratiometric Magnetic Current Sensors](#)
- [Low-Drift, Precision, In-Line Isolated Magnetic Motor Current Measurements](#)

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的TI 产品；(2) 设计、验证并测试您的应用；(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn 上或随附TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司