

### 三相电能计量趋势：创新的隔离式ADC架构支持利用分流电阻进行三相电能计量

作者：Petre Minciunescu, ADI公司系统工程师

#### 内容提要

传统三相电表使用电流互感器(CT)检测相电流和零线电流。CT的优势之一是能够在数百伏的电力线与电表地(通常连接到零线)之间提供固有的电隔离。CT可以实现良好的线性度；通过调整匝数比和负载电阻，可以灵活地测量各种类型的电流。然而，CT用于电表时也有一些缺点。首先，外部直流磁场可能会使CT的磁芯饱和。现在，非常强大的稀土直流磁体很容易为普通民众所获得并应用于窃电。其次，电源电子设备也能使CT饱和，例如用于分布式太阳能发电的直连逆变器，它在线路上产生直流电流。制造商可以通过屏蔽和使用直流兼容CT来克服这两种影响，但这会增加成本。有人说，无论是哪种CT，都可以找到一个永磁体来干扰它。第三，CT会引入一个与线电流频率相关的测量相位延迟。如果应用仅关注线电流的基波成分，那么补偿此延迟相对容易。然而，测量谐波成分日益变得重要，而要补偿基波和所有谐波的总延迟则非常困难。

其它电流传感器在三相电表应用中使用较少，包括罗氏线圈等di/dt传感器或霍尔效应传感器。虽然这些传感器在某些应用中具有优势，但也存在特殊的困难。例如，罗氏线圈具有出色的线性度，可以检测非常高的电流，但难以制造，而且难以实现良好的抗扰度，不适合精确的低电流测量。在防窃电方面，罗氏线圈也容易受交流磁场干扰。霍尔效应传感器要求对温度失调进行主动补偿，而且本身很容易受磁场影响。

#### 分流电阻与三相电能计量

近年来，在成本、磁场抗扰度和尺寸等因素的推动下，分流电阻在单相电表中的使用迅速增加。许多情况下，单相电表以线电压为基准，因而无需额外的隔离。在三相电表中，必须在各分流电阻与电表内核之间提供一个隔离栅，这是严重的挑战。热量也是一个问题，迫使分流电阻一般只能用于最大电流不超过120 A的电表。

我们先考虑一个三相系统的A相及其负载。假设利用分流电阻来检测相电流(图1)。

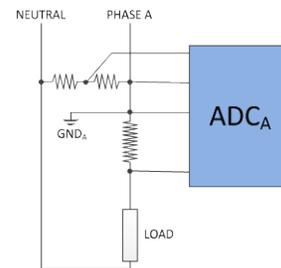


图1. 利用分流电阻检测相电流时的A相电流和电压检测

这恰好是一个单相电表配置：分流电阻位于电力线上，一个分压器检测相至零线电压。分流电阻和分压器上的电压由一个模数转换器(ADC)检测。地为分流电阻与分压器共用的极点。单相电表大部分用于住宅，其最大电流一般低于120 A。这一限制加上低成本要求，使得分流电阻成为单相电能计量中使用最广泛的电流传感器。

所有三相都复制这一方案，各ADC有其自己的地(图2)。

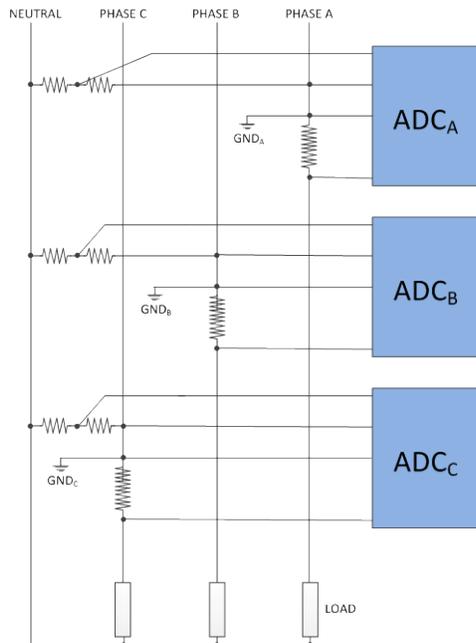


图2. 利用分流电阻检测相电流时的三相电流和电压检测

管理所有活动的微控制器(MCU)与零线处于相同的电位，为了在ADC与MCU之间进行通信，必须隔离数据通道。这样，每个ADC都有其自己的隔离电源(图3)。

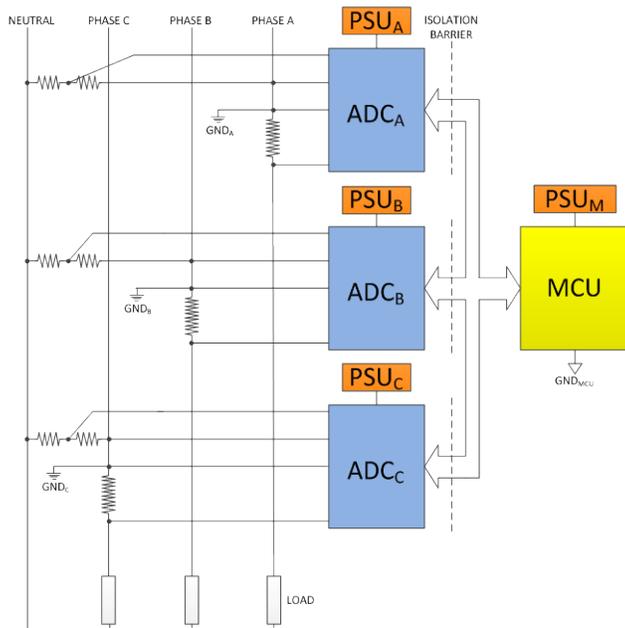


图3. 具有分流电阻、独立电源和隔离通信的三相电表

这种电表架构已在使用：双通道ADC利用光耦合器或芯片级变压器，跨越隔离栅将信息串行传输到MCU。隔离电源利用独立器件或采用芯片级变压器的隔离DC-DC转换器来构建。

理想情况下，所有相电流和电压都应同步采样，以便利用瞬时值进行全面的三相分析。但是，各相的ADC读数完全独立，因为不存在ADC同步。这是这种架构的第一个局限。使用电流互感器或罗氏线圈的电表则不存在这种问题，因为它们可以使用一个计量模拟前端(AFE)来同时读取所有相电流和电压。

这种架构的另一个问题是高器件数：一个MCU、三个ADC、三个多通道数据隔离器以及四个电源。使用CT的电表不存在这个问题，因为电路板通常具有一个MCU、一个计量AFE和一个电源。

那么，如何构建一款具有分流电阻的优势，器件数对于这种架构而言最少(即一个MCU、一个电源和三个ADC)，并且能对所有相电流和电压同步采样的电表呢？

### 隔离式ADC架构

答案是构建一种集成至少两个ADC、一个隔离式DC-DC转换器和数据隔离器，并能使属于不同芯片的ADC同步采样数据的芯片(图4)。MCU的电源VDD也为此芯片供电。采用芯片级变压器技术的隔离式DC-DC转换器为ADC的第一级提供隔离电源。一个ADC检测分流电阻上的电压，另一个ADC利用分压器检测相至零线电压。由分流电阻极点之一所确定的地就是芯片隔离侧的地。ADC为sigma-delta型，仅第一级放在芯片的隔离侧。第一级输出的位流经过芯片级变压器，后者是隔离数据通信通道的一部分。芯片的非隔离侧收到位流，滤波后将其变为24位字，然后通过SPI串行端口提供给外部。

芯片级变压器技术对这种新型ADC架构的贡献最大。与光耦合器相比，ADI公司获得专利的*iCoupler*®数字隔离器更可靠、尺寸更小、功耗更低、通信速度更快、时序精度更佳。但这还不够。隔离式sigma-delta调制器上

市已久，采用光耦合器或芯片级变压器。芯片级变压器技术的最重要贡献是伴随*isoPower*®隔离式DC-DC转换器，它可以与ADC、数字模块、隔离数据通道一同集成到一个表贴薄型封装中。

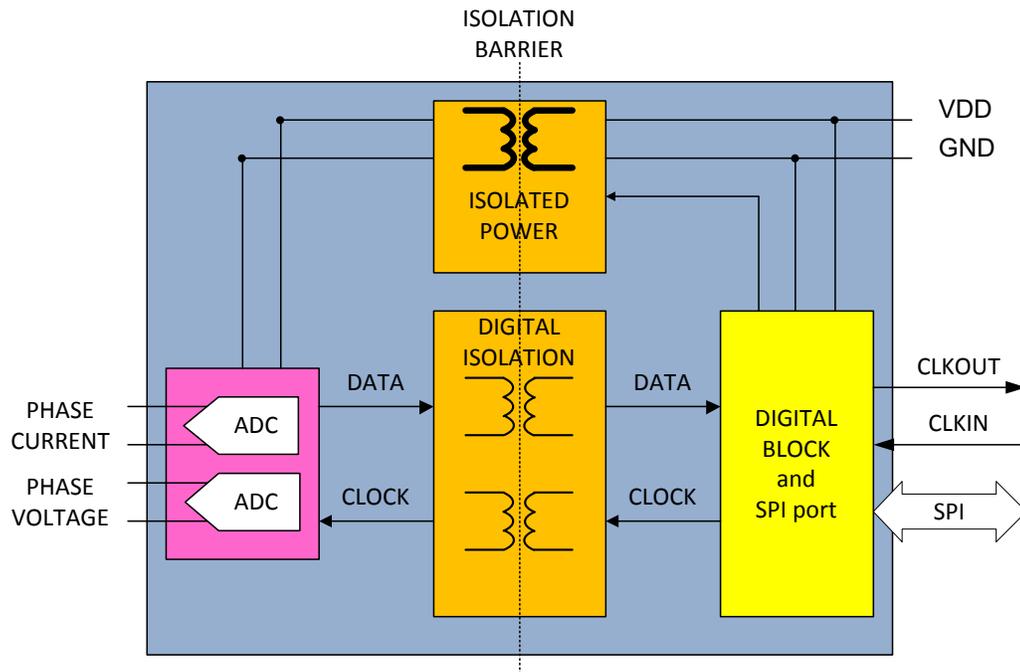


图4. 新型ADC架构包括双通道ADC、数据隔离和一个隔离式DC-DC转换器

芯片级变压器的核心是空气，因此iCoupler数字隔离器和isoPower隔离式DC-DC转换器根本不受永磁体的影响，使得电表这一侧完全不受直流磁场干扰。这种变压器对交流磁场同样具有高抗扰度。线圈面积非常小，要影响isoPower线圈运行，必须产生一个10 kHz、2.8 T的磁场。换言之，为了影响芯片级变压器的行为，必须让69 kA的10 kHz电流通过一根导线，并让该导线与芯片相隔5 mm。

信息利用极高频PWM脉冲传输到隔离栅另一侧。由此产生的高频电流会在电路板中传播，引起边沿和偶极子辐射。隔离式DC-DC转换器的负载仅由sigma-delta ADC的第一级构成，其幅度是已知的。因此，线圈是针对已知负载进行设计，从而可以降低一般与DC-DC转换器相关的辐射，并且无需四层电路板。使用这种架构的IC时，电表制造商可以使用两层电路板，并通过所需的CISPR 22 Class B标准。

为使与MCU的接口尽可能简单，芯片的数字模块对来自第一级的位流进行滤波，并通过简单的从机SPI串行端口提供24位ADC输出。电表每一相都有一个隔离式ADC，因此获得一致ADC输出的挑战仍未解决。如果采用同一时钟工作，则所有相上的ADC第一级可以在同一时刻采样。如果图4中的CLKIN信号产生自MCU，则这很容易实现。另一个方案是使用一个晶振为一个芯片产生时钟，然后利用缓冲CLKOUT信号为所有其它隔离式ADC提供时钟。控制所有隔离式ADC以在同一时刻产生ADC输出。现在，电表就能利用分流电阻检测电流，执行精确、全面的三相分析。

图5显示一款采用三个隔离式ADC的三相电表。该电表仅有一个电源为MCU和隔离式ADC供电。MCU利用SPI接口从各IC读取ADC输出。

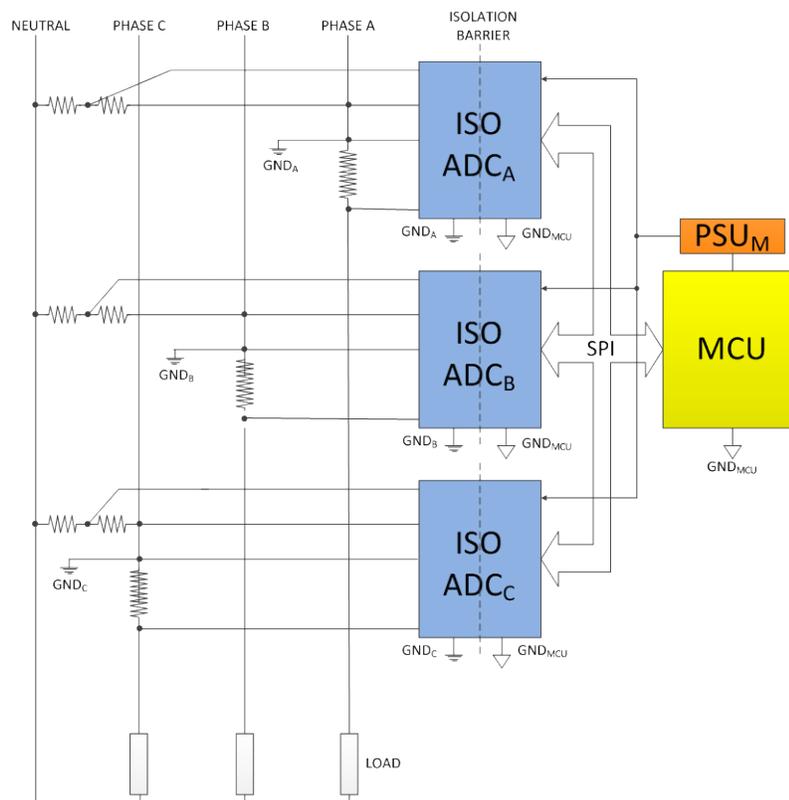


图5. 采用新型隔离式ADC的三相电表

上面的说明假设利用外部MCU执行计量计算。对于希望解决方案包括计量计算的电表制造商，可以将隔离式

ADC耦合到一个IC以执行所有计量计算，如图6所示。

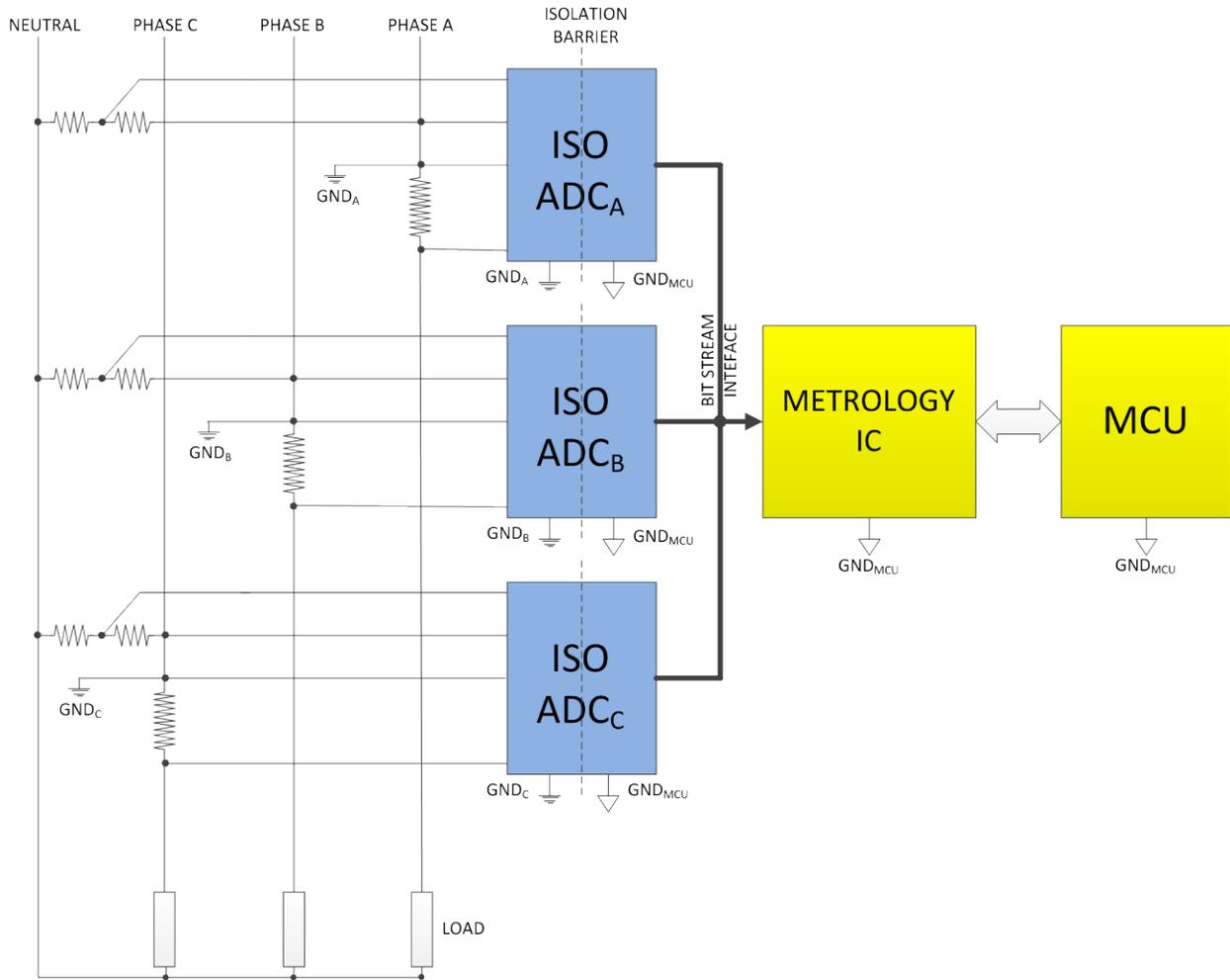


图6. 采用新型隔离式ADC和计量IC的三相电表

### 基于此架构的新产品

此架构已被ADI公司的一系列新产品采用：[ADE7913](#)、[ADE7912](#)、[ADE7933](#)和[ADE7932](#)。图7显示了ADE7913的框图。它与图4非常相似，但有一个额外ADC通道用于检测与温度传感器复用的辅助电压。该辅助电压可以是断路器上的电压，温度传感器可用于校正分流电阻的

温度变化。ADE7912是一个变体，无辅助电压测量功能，但有温度传感器。

ADE7933和ADE7932将SPI接口替换为位流接口，其余特性分别与ADE7913和ADE7912相同。它们就是图6所示的隔离式ADC。图中的计量IC已通过[ADE7978](#)实现。

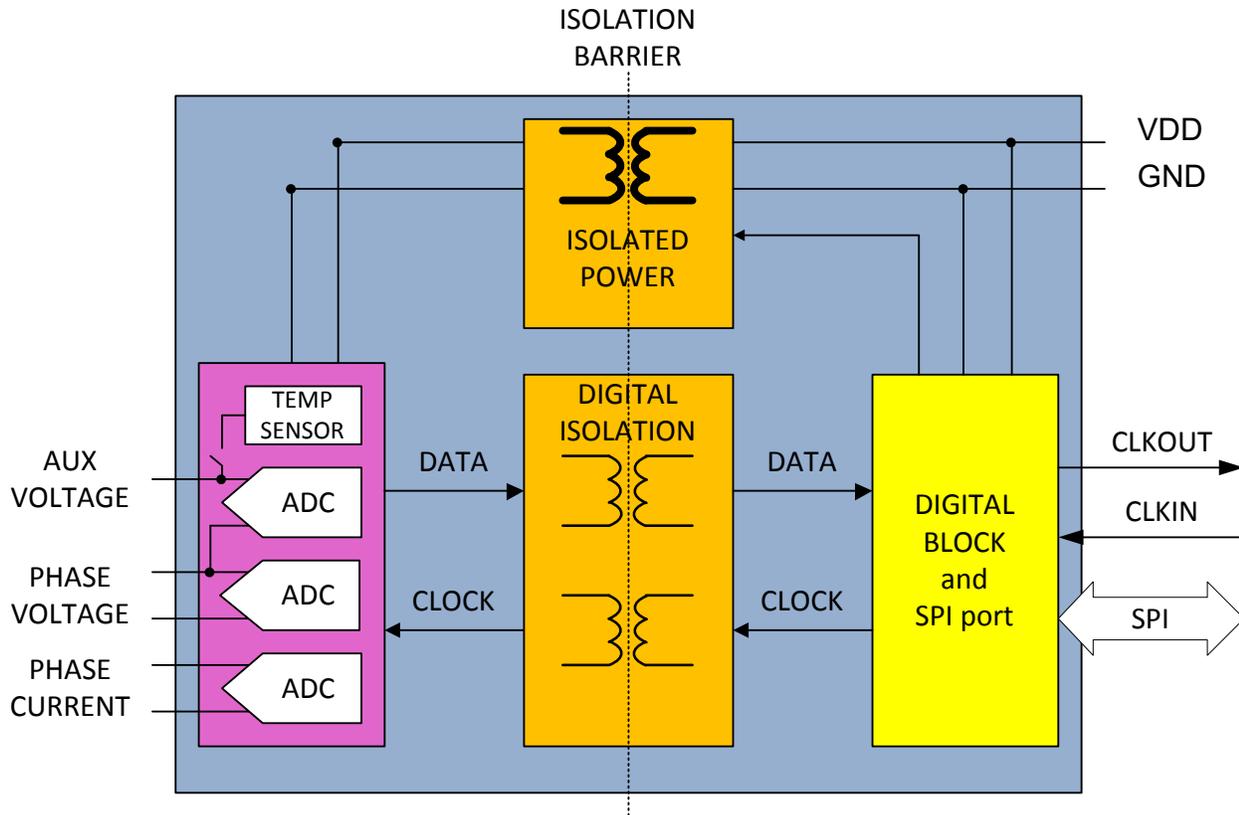


图7. 基于此架构的新型ADE7913隔离式ADC

## 结束语

本文说明了一种新型隔离式ADC架构。它包含一个isoPower隔离式DC-DC转换器，利用MCU电源为隔离栅另一侧的多通道sigma delta ADC第一级供电。ADC输出的位流经过iCoupler数据隔离器，由数字模块接收。此模块对其进行滤波，产生24位ADC输出，可利用简单的SPI接口读取。一个ADC可以测量经过一个分流电阻的电流，第二个ADC可以利用分压器测量相至零线电压，第三个ADC可以测量辅助电压或温度传感器。它支持三相电表使用分流电阻，确保完全不受直流和交流磁场干扰，执行电流检测时不会产生任何相移，同时可降低系统总成本。小尺寸解决方案确保电路板非常小，只需安装非常少的器件。集成式isoPower芯片级变压器针对已知ADC负载而设计，辐射降至最低，并通过测试，利用两层电路板即可达到CISPR 22 Class B标准。

当然，使用分流电阻的电流检测并不局限于电能计量应用，电能质量监控、太阳能逆变器、过程监控和保护设备均可受益于这种新型ADC架构。

## 作者简介

Petre Minciunescu博士是ADI公司电能计量部门(美国马萨诸塞州威明顿)的系统工程师。他于2000年加入ADI公司，在电机控制和DSP部门担任多项系统工程师职务。他于1988年毕业于罗马尼亚布加勒斯特理工学院，获电气工程学位，并于1996年获得意大利都灵米兰理工大学博士学位。

## 资源

分享本文

facebook

twitter