

电网一二次设备融合中 EVT 的隔离采样方案

Cheney Hu, Rayna Feng

Shenzhen OEM Team

摘要

随着智能电网的不断发展，电子式电压互感器（下文简称 EVT）依靠其小体积，低成本，抗外部磁干扰及磁芯饱和的特点，开始在新智能电网设备中逐渐普及。

现阶段 EVT 中最常见的类型为“阻容分压型”电子式电压互感器。通过不断的技术演进，该类型 EVT 在体积，精度等方面已基本满足应用需求，但其阻容分压的拓扑结构决定了其非隔离和弱带载能力的特点，这就需要有合适的后级隔离采样方案来与其匹配，实现整个模拟输入前端系统的隔离，稳定且高精度的采样。

本文主要介绍的是基于 TI 最新的高集成度隔离运放 AMC3330 和阻容分压型 EVT 的小尺寸、低成本、高精度隔离采样系统方案。

Contents

1. EVT 现状及特点分析	2
2. EVT 隔离采样方案系统架构介绍.....	3
2.1 系统架构简介	3
2.2 系统规格计算	4
3. 方案功能简介与设计要点	4
3.1 AMC3330 简介与设计要点	4
3.2 LM2904B/OPA2197 简介与设计要点	6
3.3 TPS65131 简介与设计要点	7
4. 仿真与测试	8
5. 总结	10
6. 参考文献	10

Figures

Figure 1. 暂态电荷现象时的电压	2
Figure 2. 阻容分压型 EVT 原理示意图	2
Figure 3. 隔离采样模拟前端系统框图	3
Figure 4. AMC3330 功能框图与参考设计	5
Figure 5. AMC3330 输入滤波	6
Figure 6. AMC3330 后级差分转单端电路	6
Figure 7. TPS65131 芯片框图	7
Figure 8. EVT 隔离采样系统 TINA 仿真原理图	8
Figure 9. 采样误差仿真	9
Figure 10. 评估板测试数据	9

1. EVT 现状及特点分析

基于国标 GB/T 20840.7 -2007（电子式电压互感器）中提出的在一次侧开关操作过程中，暂态滞留电荷所导致的测量误差的问题（详细可参阅‘GB/T 20840.7 -2007: 附录 C.4’或下图），现阶段 EVT 多采用阻容分压型拓扑来加速滞留电荷放电以降低该测量误差：

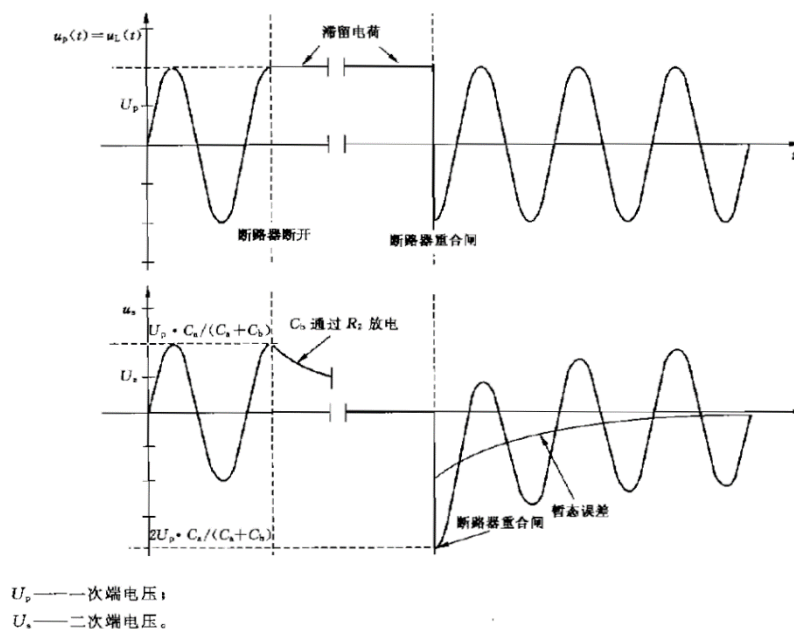


Figure 1. 暂态电荷现象时的电压

现常见的阻容分压型 EVT 简要原理示意图如下：

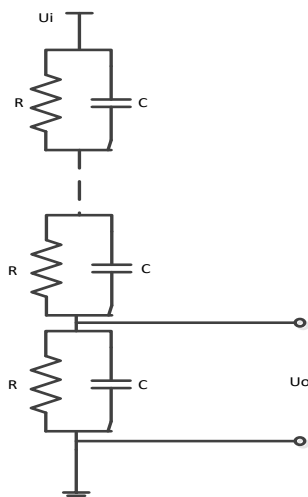


Figure 2. 阻容分压型 EVT 原理示意图

如上图可知，受限于 EVT 高输入电压 U_i ，其内部 RC 分压线路的阻抗较大，故现市面上常见 EVT 产品，输出端大多要求 $1M\Omega$ 以上或更高（部分推荐 $10M\Omega$ 以上）的额定负荷。

同时“阻容分压型”EVT 的输出与一次侧是非隔离的，且依据 GB/T 20840.7-2007，其额定输出电压 U_s 为：1.625V, 2V, 3.25V, 4V, 6.5V, 最大输出电压为 $1.2U_s$ 。

基于如上信息，为更广泛的适应不同输出电压范围的 EVT，同时提高采样精度，可靠性以用于不同要求的终端设备，理想的 EVT 后级模拟前端的系统规格推荐如下：

- 10M Ω 以上输入阻抗
- 支持 $7.8V_{rms}$ 以上的 AC 电压输入
- AFE 部分采样误差 < 0.3%
- 支持通道与通道间隔离采样

2. EVT 隔离采样方案系统架构介绍

2.1 系统架构简介

为了实现电力系统的安全可靠运行，在传输和配变电等过程中，均需要对电网一次侧的电压/电流进行隔离采样以用于监测、控制、保护等，常见的终端产品包含继电保护、FTU、DTU 等等。

如下图（3）提供了一种 EVT 后级模拟前端的解决方案，包含：隔离采样、差分转单端、及模数转换三个子系统。

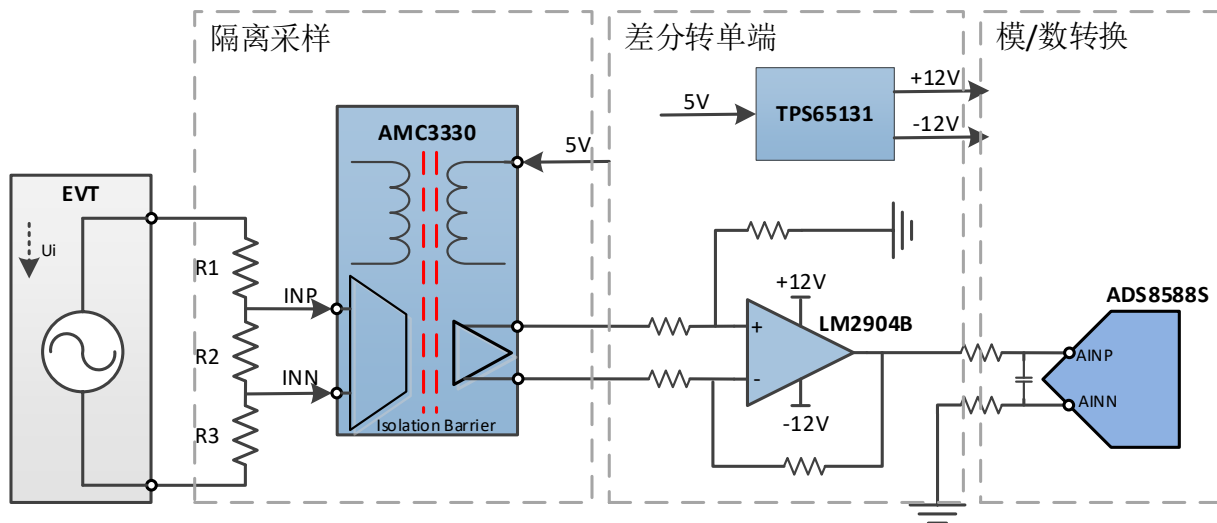


Figure 3. 隔离采样模拟前端系统框图

其中隔离采样模块基于 TI 的高集成度隔离运放 AMC3330, 原边的 EVT 输出电压先通过电阻分压网络，将幅值调整至 AMC3330 输入电压范围内（ $\pm 1V$ ），再由 AMC3330 放大 2 倍后在副边隔离输出。原副边隔离供电已由 AMC3330 集成，无需外加且便于多通道应用时实现通道间的隔离。

差分转单端模块则由运放（图中为 LM2904B，也可依系统规格需求选择其他型号），以及 TPS65131 的正/负输出电源组成，该模块完成将 AMC3330 的差分输出信号转换为单端信号的功能。

最后单端/伪差分输入的 ADC（图中为 ADS8588S，也可可依系统规格需求选择其他型号），完成对该采样信号的模/数转换，再送至后级主控芯片处理。

2.2 系统规格计算

参考图（3）及章节 1 中规格指标计算如下：

AFE 部分的输入阻抗为：

$$R_{in} = R_1 + R_3 + R_2 \parallel R_{AMC3330_in}$$

因 $R_{AMC3330_in} > 100M\Omega$ ，一般远大于 R_2 ，故此时输入阻抗：

$$R_{in} \approx R_1 + R_2 + R_3$$

取总阻值 $> 10M\Omega$ 的电阻分压网络，同时合适的分压比令 $\pm 7.8V_{rms}$ 输入电压在 R_2 的分压 $< \pm 1V$ ，这样可令系统满足章节一中规格要求的 a, b 两项。

系统采样误差方面，电力设备一般会在工作温度范围内对其增益、输入偏置电压等直流误差进行校准，故此处我们分各项直流误差校准前后两种情况，分别计算系统整体误差如下：

校准前：

$$\begin{aligned} e_{system_non-calibration} &= \sqrt{\begin{aligned} &Gain_{error_AMC}^2 + Gain_{error_OPA}^2 + Gain_{error_ADC}^2 + V_{inoff_AMC}^2 + V_{inoff_OPA}^2 + V_{inoff_ADC}^2 + INL_{AMC}^2 \\ &+ INL_{ADC}^2 + V_{offdrift_AMC}^2 + V_{offdrift_OPA}^2 + V_{offdrift_ADC}^2 + INL_{drift_AMP}^2 + INL_{drift_ADC}^2 \end{aligned}} \\ &= 0.97\% \end{aligned}$$

校准后：

$$\begin{aligned} e_{system_calibrated} &= \sqrt{INL_{AMC}^2 + INL_{ADC}^2 + INL_{drift_AMC}^2 + INL_{drift_ADC}^2} \\ &= 0.06\% \end{aligned}$$

如上参考 AMC3330 和 ADS8588S 的参数可知，校准后 AFE 部分系统误差约为 0.06%，同样满足章节一中规格要求的 c 项。

同时 AMC3330 自身 6000- V_{PK} 的加强隔离结构，也使整个系统得以满足章节一中规格要求的 d 项。

综上所述，该方案在满足 EVT 输入，隔离采样系统规格要求的前提下，相较于传统互感器（PT）方案，同时在整体成本，体积和抗磁干扰方面有明显优势。

3. 方案功能简介与设计要点

3.1 AMC3330 简介与设计要点

AMC3330 是 TI 发布的一款集成隔离 DC-DC 变换器的精密隔离运算放大器，其主要特点如下：

- 输入阻抗最小值可达到 $0.1G\Omega$ ，使 AMC3330 可以直接与高阻抗信号源相连

- 集成隔离 DC-DC 变换器，仅需单路 3.3V 或 5V 供电即可工作，不需要设计额外的隔离电源
- 内置增强型电容隔离栅，隔离耐压达到 $4250V_{RMS}$ （典型值），可有效保护低压侧器件
- 非线性度失真 $< \pm 0.02\%$ ，温漂 $0.4 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ （典型值）

基于上述特点，AMC3330 非常适用于高阻抗分压电阻网络中非地参考电压信号的隔离采样。

同时 AMC3330 的典型应用可参考如下 Figure. 4，需要注意的是：

1. AMC3330 的高侧地（HGND）不需要连接到地平面，此处 HGND 仅为参考地，对于非地参考电压信号，也可以将 HGND 与输入 INN 相连。
2. AMC3330 的供电引脚周围需要正确设计耦合电容，具体可参考下图。

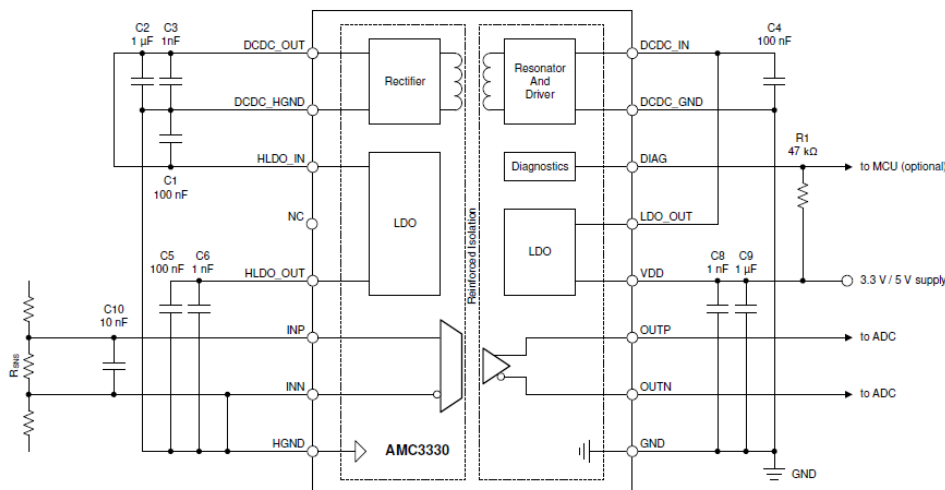


Figure 4. AMC3330 功能框图与参考设计

3. 为了提高输入信号的信噪比，在 AMC3330 的输入前级需要设计 RC 滤波电路：
 - 由于 AMC3330 内部的 $\Delta \Sigma$ 调制器的采样频率为 20MHz，因此该 RC 滤波电路的截止频率应小于 2MHz。
 - 同时 EVT 隔离采样时，考虑到保留交流信号的谐波分量（如常见的 50Hz 交流/100 次谐波），该截止频率建议大于 15KHz。
 - 在 AMC3330 前级为电阻分压网络的应用中，可结合分压电阻，如下图用一个电容实现该 RC 低通滤波。

$$f_c = 1/2\pi(R_{total} - R_{SNS}) \times C_{f_in}$$

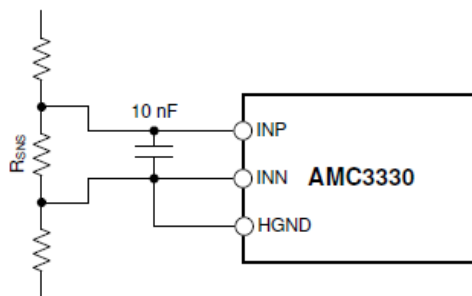


Figure 5. AMC3330 输入滤波

另外，当 AMC3330 的差分输入信号（ $V_{INP}-V_{INN}$ ）电压在 $\pm 1V$ 以内时，AMC3330 的非线性度失真 $< 0.02\%$ ；当差分输入信号的电压在 $\pm 1V$ 到 $\pm 1.25V$ 之间时，AMC3330 的线性度开始变差；当差分输入信号的电压超过 $\pm 1.25V$ 时，AMC3330 的输出将被钳制。

为保证 AMC3330 的线性度，差分输入信号的电压范围需控制在 $\pm 1V$ 以内，且输入脚不能浮空。

3.2 LM2904B/OPA2197 简介与设计要点

LM2904B 是 TI 的一款宽压版本的通用运算放大器，单位增益带宽为 1.2MHz，具有较低的失调电压和静态电流。

对于非全差分输入的 ADC 来说，需要在 AMC3330 的后级设计差分转单端电路。以选取运算放大器 LM2904B（或依系统规格需求选择其他型号）为例。

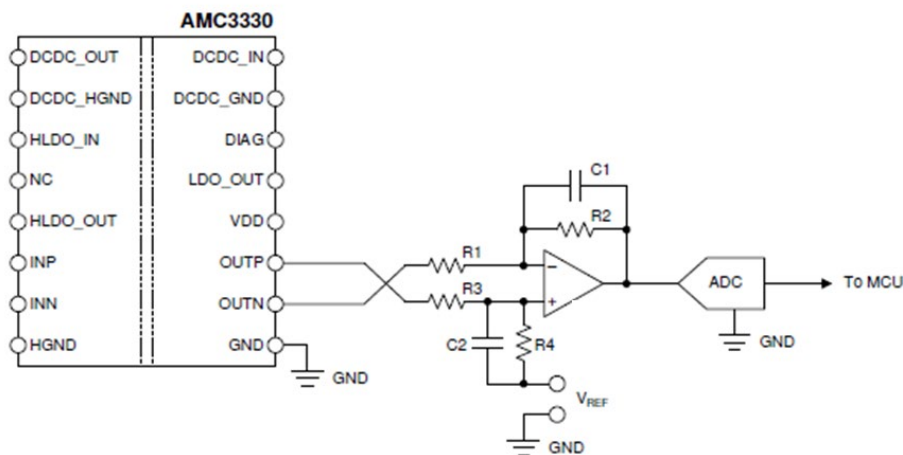


Figure 6. AMC3330 后级差分转单端电路

1. 确定运放增益：

如图.6 通常取 $R1=R3$, $R2=R4$ ，此时运放输出

$$V_o = (V_{OUTP} - V_{OUTN}) \times \frac{R_2}{R_1} + V_{ref}$$

可根据后级 ADC 的输入电压范围，选取合适的 $R1/R3$, $R2/R4$ 值来设定增益。

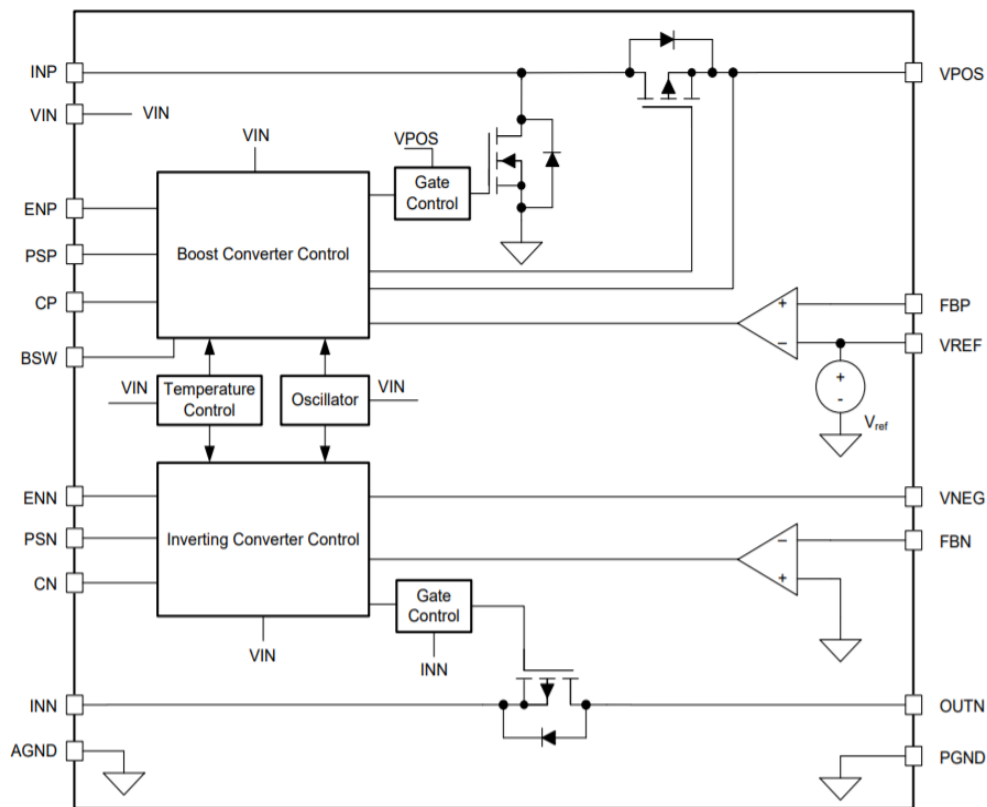
$$\text{CMRR}_{dB} \cong 20 \log_{10} \left(\frac{1+G}{\alpha \times \varepsilon} \right)$$

以 $G=5$, $CMRR_{typ} = 70\text{dB}$ 为例, $\varepsilon = \frac{1+G}{\frac{CMRR_{dB}}{20}} = \frac{6}{\frac{70}{0.33 \times 10^{20}}} = 0.0057$

3. 验证稳定性:

常用优化措施包括：在 R2/R4 上并联 C_f 以提升相位裕度，输出避免直接连大的容性负载以减少振荡/优化稳定性等。

TPS65131 是一款单输入，正/负双轨输出的 DC-DC 转换器，芯片中同时集成了 Boost 和 Buck-Boost 两部分来分别实现正压和负压的输出，具体框图如下：



整体而言，TPS65131 的主要特点如下：

- 高集成度和 1.25MHz_{min} 的开关频率，易于实现小尺寸，低成本的正/负轨输出电源。

- 每路输出独立的过压，过流等保护功能可提高系统可靠性。
- 集成 PFET，可实现 Boost 部分的输入/输出完全隔离以减小待机功耗

同时因 Boost 和 Buck-Boost 部分集成的均为 $1.8A_{min}$ 的开关管，故设计时需留意在输出同幅值的正/负电压时，两路的工作电感（开关）电流及最大输出电流也不同，以 $V_{in} = 5V, V_o = \pm 12V$ 举例如下：

以效率为 80% 和满载电感纹波电流 $\Delta I = 0.5I_{IN_average}$ 进行估算，则：

$$I_{SW(L)_P} = \frac{V_{POS}}{V_i \times 0.64} \times I_{POS}$$

$$I_{SW(L)_N} = \frac{V_{IN} - V_{NEG}}{V_i \times 0.64} \times I_{NEG}$$

得知：

$$I_{POS_MAX} = \frac{I_{SW(L)_P_MAX} \times V_i \times 0.64}{V_{POS}}$$

$$I_{NEG_MAX} = \frac{I_{SW(L)_N_MAX} \times V_i \times 0.64}{V_{IN} - V_{NEG}}$$

从而 $V_{in} = 5V, V_o = \pm 12V$ 时， I_{POS_MAX} 约为 0.48A，而 I_{NEG_MAX} 约为 0.34A。

其他元器件如输入电容，输出电容，续流二极管，前馈电容等可参照 TPS65131 规格书进行设计选择。

4. 仿真与测试

下文将先使用 TI-TINA 软件，基于图.8 原理图，对上述提及的隔离采样系统方案在 $-40 \sim 80^\circ C$ 环境下的精度进行仿真评估。

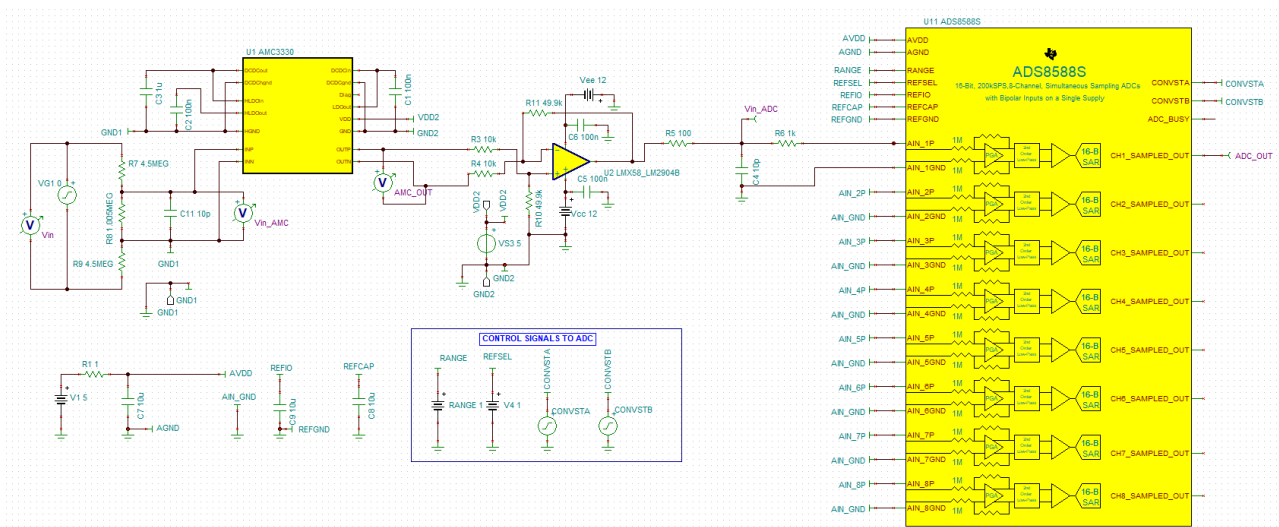


Figure 8. EVT 隔离采样系统 TINA 仿真原理图

上图中，考虑 AMC3330 输入阻抗为 100~1000Mohm，此时输入电阻分压网络增益约为 1/10，结合 AMC3330 自身增益为 2，单端转差分运放增益设为 5，以令 ADC 采样值 1:1 还原输入电压信号。

此时再在 -40~60°C 范围内每间隔 20°C 取一个温度点，对输入信号 V_{in} 在 0~10 V_{DC} 内扫描，观测此时 ADC 采样值与实际输入信号间的电压误差，结果如下：

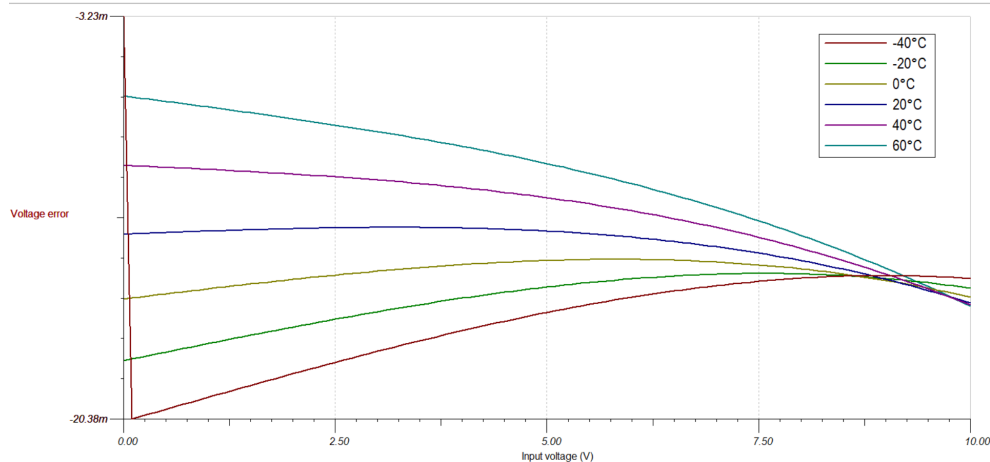
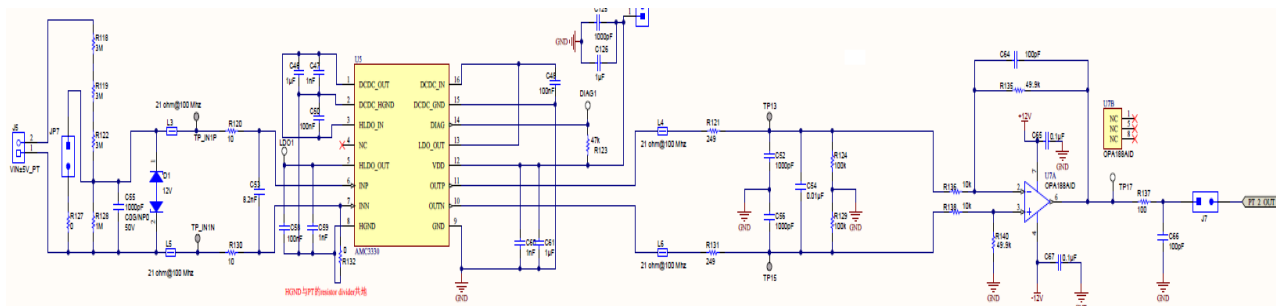


Figure 9. 采样误差仿真

另外，用如下 ‘AMC3330 + 单端转差分’ 参考评估板，将其输出接至 ADS8588SEVM-PDK，再实际测试其在 -10 V_{ac} /50Hz~+10 V_{ac} /50Hz 输入下，ADC 采样值与输入信号间的误差：



未校准前，误差测试数据如下(0.7%~0.9%)，与理论计算值接近。

V_{in}	V_{ADC}	error
9.305	9.372	0.71%
8.621	8.690	0.79%
7.732	7.798	0.85%
6.384	6.443	0.92%
5.689	5.737	0.84%
4.127	4.161	0.82%
3.311	3.339	0.83%
2.069	2.087	0.86%
1.616	1.631	0.86%
0.000	0.000	0.00%
-1.162	-1.172	0.85%
-1.976	-1.993	0.85%
-3.070	-3.095	0.81%
-4.468	-4.504	0.81%
-5.322	-5.362	0.75%
-6.472	-6.526	0.83%
-8.575	-8.640	0.75%
-9.682	-9.757	0.77%

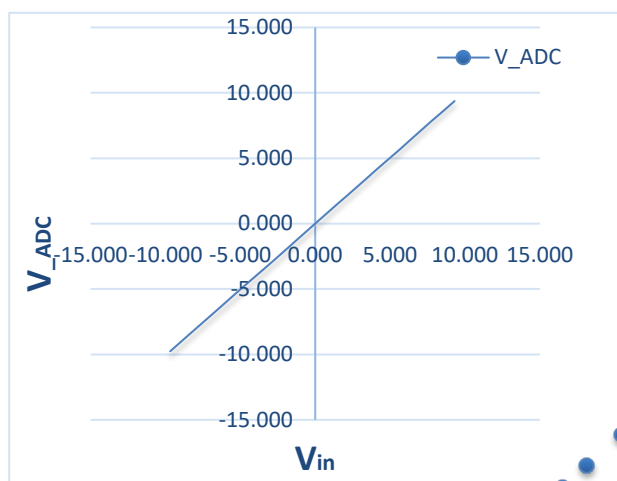


Figure 10. 评估板测试数据

同时，若对如上 ADC 采样值进行两点校准的话，其采样精度可实现 $\leq \pm 0.15\%$ ，可满足章节一中所列精度要求若进行多点校准的话，整体采样精度可更高。

5. 总结

本文介绍了一种基于 TI 隔离运放 **AMC3330** 实现的：高集成度、高输入阻抗、良好线性度及高精度的隔离采样模拟前端方案，在逐渐普级的智能电网 **EVT** 应用，甚至需增强隔离的 **ECT** 应用以及其他类似的应用场景上，该方案相较传统的电磁互感器、线性光耦等方案，在性能和成本等方面均有很大提升，有助于实现更高性价比的终端产品。

6. 参考文献

1. GBT 20840.7-2007 互感器 第 7 部分：电子式电压互感器
2. TIDA-010065: High-Efficiency, Low-Emissions, Isolated DC/DC Converter Based Analog Input Module Reference Design
3. SBASA34A: AMC3330 datasheet
4. SLOS068X: LM2904B datasheet
5. SLYY137: Analog engineer's circuit cookbook: OP Amps
6. SLVS493D: TPS65131 datasheet

重要声明和免责声明

TI 提供技术和可靠性数据（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，不保证没有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、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(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。这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

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 © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司