

에너지 계량 시 절연 전류 감지를 위한 신호 체인 비용 및 정확도 최적화

Dr. Ralph Oberhuber

Precision analog-to-digital converters

머리말

TI가 태양광 및 풍력과 같은 소스를 통해 보다 지속 가능한 에너지 그리드로 이동함에 따라 개선이 필요한 영역을 찾아내고, 사용 방식을 최적화하고, 비용을 절감하기 위해 에너지 계량 장치가 개별 전력 소비에 대한 상세한 정보를 파악해야 할 필요성이 대두됩니다. 에너지 계량 서브시스템이 필요한 전자 완제품의 유형에는 스마트 전기 계량기, 전기 자동차(EV) 충전소, 전원 공급 장치 및 전력 분배 장치, 스마트 가전 제품, 가로등 및 건물 자동화 설비가 포함됩니다. 이들 제품의 수가 방대해지면서 가능한 한 최저의 비용을 달성해야 할 필요성이 커지고 있으며, American National Standards Institute(미국 국립 표준 협회) C12(미국) 또는 Measuring Instruments Directive(측정 기기 지침)(유럽)과 같은 지역 계량 표준은 정확도와 안전성에 대한 엄격한 기준이 요구됩니다[1], [2].

그림 1은(는) 단순하게 하나의 위상만 보여주는 에너지 계량 애플리케이션 내부의 일반적인 신호 체인을 보여줍니다. 아날로그-디지털 컨버터(ADC)는 각 위상의 전압 및 전류를 동시에 측정하고 디지털화합니다. 그런 다음, 디지털

신호 처리는 활성 및 반응 전력 그리고 에너지, 라인-라인 전압, 기본 전력 및 에너지, 고조파와 같은 계측 매개 변수를 추출합니다[3].

신호 체인의 기본 구성 요소는 다음과 같습니다.

- 라인 전압 감지 프론트 엔드(그림 1의 A).
- 전류 측정 센서(B)
- 전류 센서와 ADC 사이의 프론트 엔드 및 신호 조절기(C).
- ADC(D).
- 디지털 신호 처리 하드웨어(E).
- 갈바닉 절연(F).

라인 전압 감지 프론트 엔드는 대부분의 경우 간단한 저항 분할기[3]를 사용하여 구현되지만, 다른 모든 구성 요소를 선택할 수 있는 다양한 옵션이 있습니다. 이러한 각 신호 체인 구성 요소는 성능, 크기 및 비용 사이에 반비례 관계가 존재합니다. 이 문서에서는 전류 측정 센서 및 신호 컨디셔닝과 더불어 ADC 측면에서 성능과 비용을 관계를 중점적으로 알아봅니다.

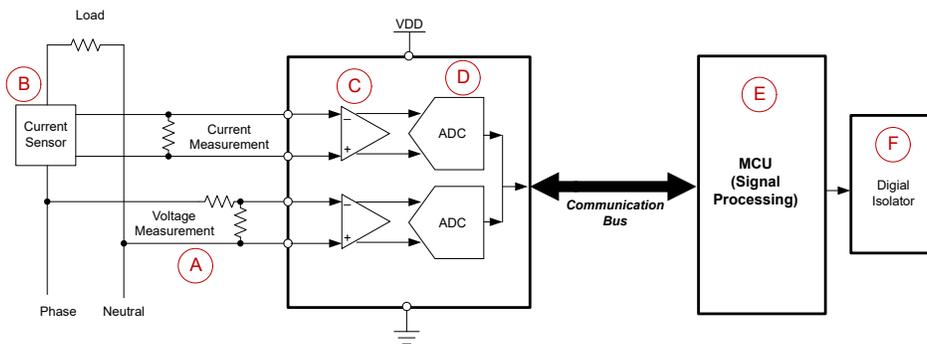


그림 1. 에너지 계량 서브시스템 신호 체인.

에너지 계량에 사용되는 전류 센서 요소 비교

표 1에는 에너지 계량 애플리케이션에 사용되는 3가지 전류 감지 기술의 성능 이점, 과제 및 비용이 요약되어 있습니다. 전류 변압기는 넓은 동적 범위, 내구성 및 낮은 삽입 임피던스(비침습형 전류 측정) 때문에 가장 인기 있는 센서입니다[4]. 하지

만 비용은 모든 전류 감지 기술 중 가장 높을 것입니다. 션트 저항(션트)은 자기 내성, 작은 크기 및 비용 절감을 고려할 때 매우 매력적이지만, 자체 발열로 인해 높은 전류에서 정확도가 낮아집니다[5].

Rogowski 코일은 이 두 센서에 대한 흥미로운 대안을 제공하며, 특히 인쇄 회로 보드(PCB) 코일을 벌크 Rogowski 코일과 비교할 때 저렴한 옵션입니다[6].

센서 유형	전류 변압기	Rogowski 코일	션트
블록 다이어그램			
전송 기능	$V_{out} = \frac{I_{line} R_{burden}}{N_{turns}}$	$V_{out} \propto \frac{dI_{line}}{dt}$	$V_{out} = I_{line} R_{shunt}$
장점	<ul style="list-style-type: none"> 절연 제공 높은 선형성 높은 내구성 높은 정밀도 	<ul style="list-style-type: none"> 절연 제공 포화 불가능 소형 폼 팩터(PCB) 높은 선형성 빠른 응답 시간 낮은 전력 손실 	<ul style="list-style-type: none"> 절연되지 않음 항자성 소형 폼 팩터
과제	<ul style="list-style-type: none"> 포화 가능 부담 저항의 전력 손실 위상 보정 필요 크기와 무게 	<ul style="list-style-type: none"> 통합 필요 DC 측정 불가능 PCB 코일의 민감도가 낮을 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 저항은 자체 발열 시 달라질 수 있음 과부하 신호의 안정성이 낮음
비용	<ul style="list-style-type: none"> ≥ \$0.21(실드 미포함) ≥ \$0.26(실드 포함) 	<ul style="list-style-type: none"> 일부 PCB 코일의 경우 < \$0.10 벌크 코일의 경우 ≥ \$0.10 	<ul style="list-style-type: none"> ≥ \$0.10(망간)

표 1. 전류 센서 비교.

PCB Rogowski 코일은 비용이 저렴하고 설치가 유연하기 때문에 저비용 에너지 계량 애플리케이션에 적합합니다[7], [8]. PCB Rogowski 기반 계량 설계의 이점과 과제를 분석하고 지역 계량 표준을 준수하면서 가능한 한 낮은 비용으로 구현하기 위해 신호 체인을 최적화하는 방법을 살펴보겠습니다.

에너지 계량 및 ADC 잡음 성능 비교에 사용되는 PCB Rogowski 코일의 민감도

PCB Rogowski 코일 민감도는 일반적으로 암페어당 마이크로볼트 단위로 정의되며 지오메트리(회전 수, 코일 치수), 코어 물질(있을 경우), 전류 주파수 및 환경 요소(온도, 습도, 외부 자기장)[9]에 따라 달라집니다. 일반적인 민감도는 암페어당 수십에서 수백 마이크로볼트에 달합니다[9].

주거용 전기 계량기가 2% 정확도로 250mA RMS(평균 제곱근) 위상 전류를 측정하려면 이러한 민감도는 일반적인 정확도 요구 사항입니다[1]. 예를 들어, 200μV/A Rogowski 코일의 경우 ADC 입력의 신호는 이 위상 전류에 대해 200μV/A × 0.250A = 50μV에 지나지 않습니다. 2%의 정확도로 이 신호를 측정하는 데 필요한 ADC 성능(즉, 유효 해상도를 결정하는 잡음)은 방정식 1이(가) 정의하는 대로 불과 0.02 × 200μV/A × 0.250A = 1μV입니다.

$$V_{nADC} = tol \times k \times I_{phase-rms} \quad (1)$$

여기서 V_{nADC} 는 요구되는 ADC의 잡음 수준이고, tol 은 특정 위상 전류에서 지정된 측정 정확도(%)이며, $I_{phase-rms}$ 는 암페어이고, k 는 암페어당 마이크로볼트 단위의 Rogowski 코일의 민감도 상수입니다.

따라서 이 예에서 ADC의 총 잡음(양자화 잡음과 백색 잡음)은 1μV 미만이어야 합니다.

1μV ADC 잡음 요구 사항을 텍사스 인스트루먼트(TI) ADS131M08[10]과 같은 정밀 ADC 사양과 비교하면, 의도한 성능 수준을 달성하려면 ADC 샘플의 추가적인 평균화가 필요할 수 있다는 점이 분명해집니다. 표 2은(는) 이러한 평균화를 보여주며, OSR(오버샘플링 비율)에 의해 정의된 다양한 게인 설정과 데이터 전송률에 대한 RMS 마이크로볼트 단위의 총 ADC 잡음도 보여줍니다. 1의 게인과 4kSPS 샘플 레이트(OSR = 1,024)의 경우 ADC 잡음은 약 5μVrms 입니다. 평균화 시간을 두 배로 늘리기 위해 √2의 계수로 잡음이 향상됨에 따라 1μV 미만의 ADC 잡음의 요구 사항을 달성하려면 16ms 이상의 시간이 필요합니다. 이는 일반적으로 20ms의 업데이트 속도를 요구하는 대부분의 에너지 계량 시스템에 허용되는 수준입니다[1]. 이러한 유형의 평균화는 델타-시그마 ADC의 내부 오버샘플링 비율(OSR) 기능과 외부 사후 평균화를 사용하여 ADC 내부 오버샘플링의 조합으로 실질적으로 구현할 수 있습니다.

표 2에서 제안하는 또 다른 옵션은 입력[10]에 대한 잡음을 감소시키기 때문에 ADC 내부의 프로그래머블 게인 증폭기(PGA)에 대해 더 높은 게인을 선택하는 것입니다. 또는 ADC에 도달하기 전에 외부 게인 단계를 사용하여 신호를 사전 조절할 수도 있습니다. 하지만 외부 게인 단계는 신호 체인의 비용을 크게 증가시킵니다.

평균화 시간 (ms)	OSR	데이터 전송률 (kSPS)	잡음(μVrms), 게인 1	잡음(μVrms), 게인 128
16	65,392	0.0625	0.95	0.07
8	32,696	0.125	1.34	0.10
4	16,384	0.25	1.90	0.42
2	8,192	0.5	2.39	0.57
1	4,096	1	3.38	0.77
0.5	2,048	2	4.25	1.00
0.25	1,024	4	5.35	1.20
0.125	512	8	7.56	1.69
0.0625	256	16	10.68	2.40

표 2. ADC 잡음 성능 및 속도, 평균화 시간 및 OSR 비교.

Rogowski 코일 기반 전류 센서를 위한 ADC 신호 체인의 민감도 분석

저비용 PCB Rogowski 전류 센서를 사용하는 시스템의 주요 문제는 센서 출력의 신호 진폭이 일반적으로 매우 작다는 것입니다. 대부분의 경우 몇 마이크로볼트밖에 되지 않습니다. 계량 표준에 따른 정확도 요구 사항을 충족하도록 신호 체인을 신중하게 설계해야 합니다. 이러한 작은 신호의 신호 조절에는 내부 게인이 있는 고해상도 ADC를 선택하거나 센서와 ADC 사이에 외부 게인 단계를 계단식으로 배열하여 상당한 차동 게인을 포함해야 합니다. 외부 게인 단계를 추가하는 것은 총 비용이 증가하기 때문에 해로운 경우가 많습니다. 따라서 외부 게인 단계가 필요한 솔루션과 이를 언제 피할 수 있는지 정량화하는 것이 더 합리적입니다.

표 3은(는) 외부 게인 단계의 효과를 분석하기 위해 세 가지 Rogowski 코일을 도입합니다.

- 코일 A는 PCB Rogowski 코일 센서[11]를 사용한 고정밀 AC 전류 측정 레퍼런스 설계를 기반으로 하며 약 20μV/A의 민감도를 가진 PCB Rogowski 코일입니다.
- 코일 B는 약 100μV/A의 민감도를 가진 또 다른 독점 Rogowski 코일입니다.

- 코일 C는 시중에서 판매되는 벌크 Rogowski 코일 (Pulse PA3209NL)[12]이며 약 500 μ V/A의 민감도를 가집니다.

번호	코일 유형	출처	민감도(μ V/A)	비용
A	PCB	TI 레퍼런스 설계	20	낮음
B	PCB	독점	100	중간
C	벌크	펄스 PA3209NL	500	높음

표 3. 신호 체인 분석 중에 특성 분석된 Rogowski 코일.

그림 2에는 민감도 분석을 위한 측정 설정이 나와 있습니다. 표 3에서 볼 수 있듯이, 개별 Rogowski 코일의 출력은

4개의 점퍼로 TI INA188 기반 게인 단계[13]를 선택하거나 우회할 수 있는 신호 컨디셔닝 인터페이스 보드와 연결됩니다. 게인 정의 저항 R_G (그림 2 참조)는 390 Ω 이며, 선택적 외부 게인 128을 산출합니다.

계측 증폭기(INA) 인터페이스 보드의 출력은 독립형 ADC[3]를 사용한 3상 전류 변압기 전자 계량기 레퍼런스 설계의 위상 1 전류 입력에 연결됩니다. 이 레퍼런스 설계에는 전류 변압기에 연결할 때만 필요하고 이 분석에서는 물리적으로 제거된 부담 저항 R37 및 R38이 포함되어 있습니다. 전자 계량기 레퍼런스 설계의 ADC는 1~128의 내부 게인 옵션을 지원하는 고정밀 8채널 동시 샘플링 델타-시그마 ADC인 TI ADS131M08입니다.

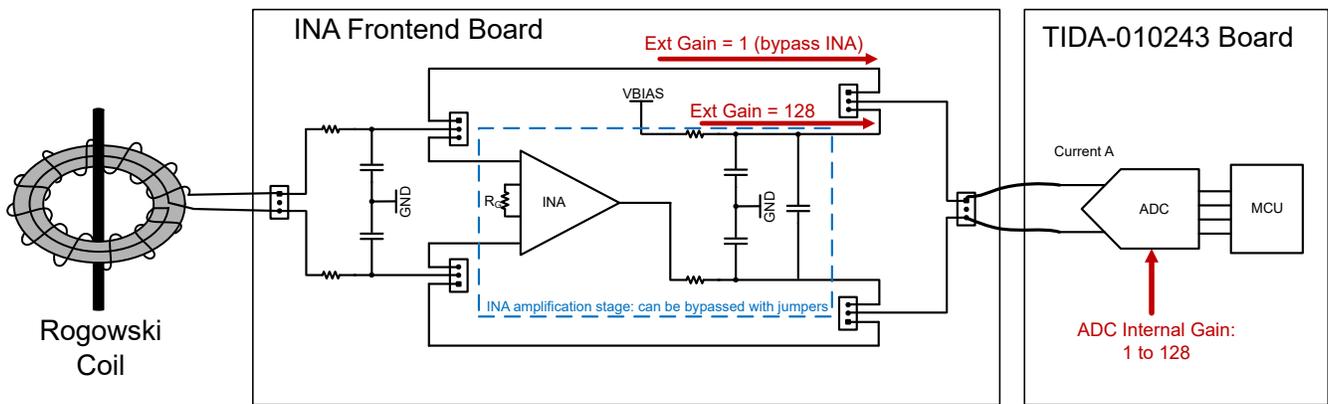


그림 2. 신호 체인 분석을 위한 측정 설정.

그림 3 및 **그림 4**은(는) MTE의 PTS3.3C 소스 제너레이터 및 레퍼런스 계량기 사용하여 100mA~10A의 50Hz 라인 전류에 대해 측정된 전류 정확도를 보여줍니다. [3]과(와) 동일한 테스트 절차를 사용하여 전류 및 에너지 샘플은 20ms 동안 평균을 계산했습니다. [11]에 설명된 절차에 따라 디지털 도메인에서 Rogowski 신호 통합을 구현합니다. 이에 대한 대안은 [14]에 제시된 아날로그 능동 통합이지만, 이 두 방법이 일반적으로 유사한 결과를 나타내므로 이 기법은 분석에서 무시되었습니다.

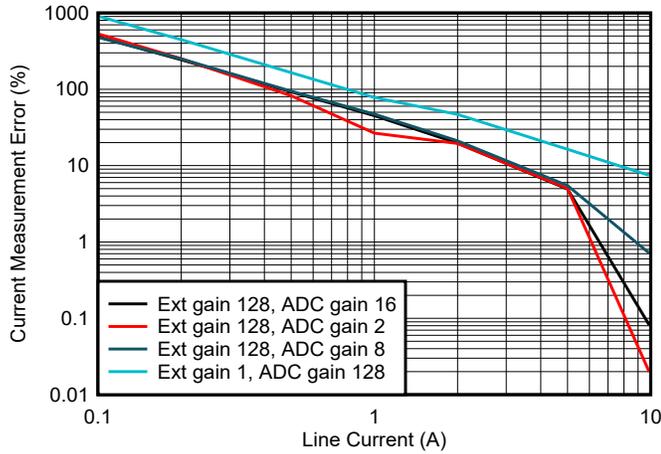


그림 3. 다양한 게인 설정으로 20µV/A 코일에 대해 측정된 전류 정확도.

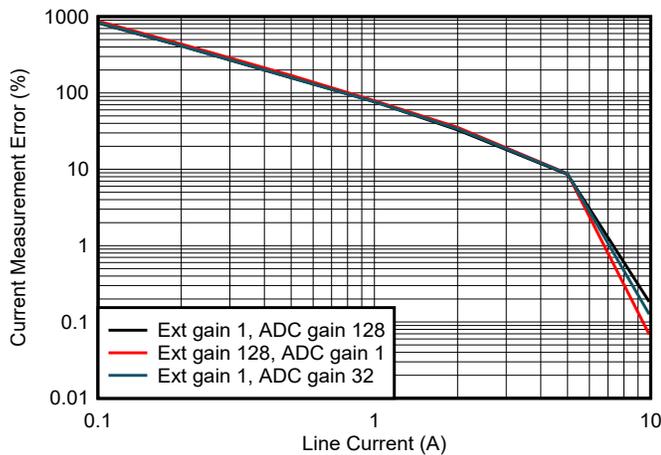


그림 4. 다양한 게인 설정으로 100µV/A 코일에 대해 측정된 전류 정확도.

민감도가 매우 낮은 PCB 코일의 경우(예: 20µV/A), INA 단계를 계단식으로 배열하여 128의 외부 게인을 사용할 경우 상당한 개선이 이루어집니다(**그림 3** 참조). ADS131M08의 내부 PGA 게인(128의 게인 경우에도)만으로는 앞서 설명

한 것처럼 작은 입력 신호를 양자화 잡음 수준보다 높게 증가시킬 수 없습니다.

100µV/A 이상의 민감도로 PCB 코일을 사용하는 경우(**그림 4** 참조) 내부 게인 또는 외부 게인 중 어떤 것을 선택하더라도 유사한 오차가 나타나며, 이는 센서 출력 진폭이 이제 관련 위상 전류 범위의 양자화 잡음 수준보다 훨씬 더 높다는 의미입니다. 결과 오차의 절대값은 0.5% 이하의 정확도를 목표로 하는 일부 수익 등급 에너지 계량 시스템에서 허용 가능한 값보다 높습니다. 이렇게 증가된 오차는 단일 지점(게인) 보정인 이 설정에 적용된 간단한 보정 절차의 결과입니다. 일반적인 계량 설계에서 최대 3개의 보정 단계(오프셋 보정, 게인 보정 및 위상 보정)를 적용하면 절대 오차를 더 줄일 수 있습니다.

그림 5 및 **그림 6**은(는) 표 3에 나열된 세 가지 코일에 대한 Rogowski 코일 민감도의 측정 오차의 종속성을 보여줍니다.

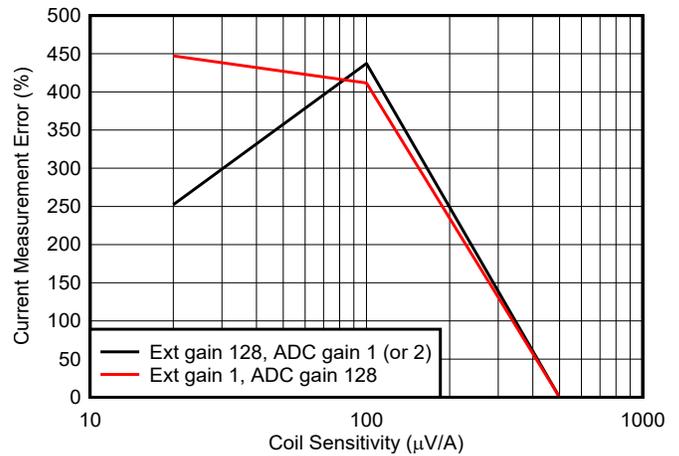


그림 5. 200mA의 라인 전류에서 3개의 코일에 대해 측정된 전류 정확도.

작은 위상 전류(200mA, **그림 5**) 및 중간 레벨 위상 전류(5A, **그림 6**)의 경우 모두 20µV/A Rogowski 코일은 외부 게인 단계를 채택하여 상당한 개선(오차 감소)을 달성합니다. 예상대로 더 큰 라인-전류 값(5A, **그림 6**)을 감지하면 모든 오차가 더 작은 값으로 조정됩니다. 100µV/A 및 500µV/A Rogowski 코일의 경우 내부 ADC 게인을 사용할 때와 128의 외부 게인을 적용할 때를 비교하면 비슷한 정확도가 나옵니다.

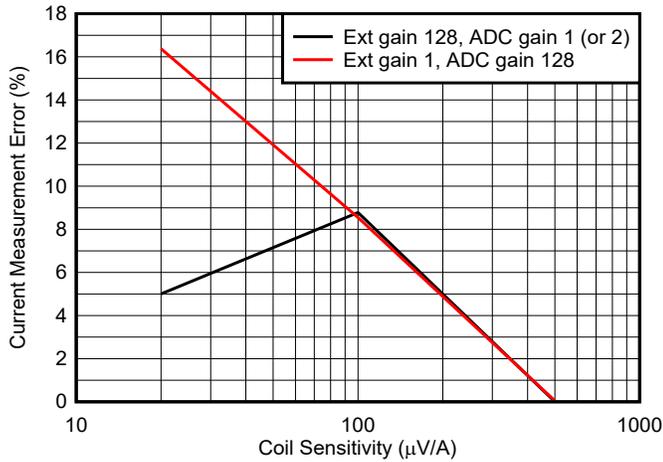


그림 6. 5A의 라인 전류에서 3개의 코일에 대해 측정된 전류 정확도.

결론

100µV/A 이상의 Rogowski 코일의 경우 외부 게인 단계가 필요하지 않으므로 에너지 계량 신호 체인 솔루션의 비용이 절감됩니다. 100µV/A 미만의 Rogowski 코일의 경우 TI ADS131M08 또는 이와 유사한 ADC를 사용할 때 주거용 전기 계량 정확도를 충족하려면 외부 게인이 필요할 수 있습니다. 또는 추가 회로를 사용하지 않도록 잡음이 더 낮고 비용은 더 높은 ADC를 고려할 수 있습니다.

참고 자료

- Kelechava, Brad. **ANSI C12.20-2015 – Electricity Meters – 0.1, 0.2, and 0.5 Accuracy Classes**. American National Standards Institute 블로그, 2017년 5월 8일.
- Directive 2004/22/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004 on Measuring Instruments (<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2004L0022:20130101:en:PDF>). Document 32004L0022. 유럽 연합(EU): 브뤼셀, 벨기에. 2004년 3월 31일.
- 텍사스 인스트루먼트, n.d. **독립형 ADC를 지원하는 3상 전류 변압기 e-미터 레퍼런스 설계** 텍사스 인스트루먼트 레퍼런스 설계 번호 TIDA-010243. 2025년 3월 14일에 액세스함.
- Blue Jay. n.d. **What Are Advantages and Disadvantages of Current Transformer?** 2025년 1월 21일에 액세스함.

- Maniar, Krupal. **HEV/EV에서 션트 기반 및 홀 효과 기반 절연 전류 센싱 솔루션 비교**. 텍사스 인스트루먼트 애플리케이션 요약, 문서 번호 SBAA293C, 2018년 6월.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Power System Relaying Committee (PSRC). **Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying**. IEEE PSRC Special Report, 2010년 9월.
- Aim Dynamics. **Rogowski Coils vs. Current Transformers**. Aim Dynamics 블로그 게시물, 2023년 7월 24일.
- Brooks, Chris. **Why Choose Rogowski Coils?** Setra 블로그 게시물, 2017년 2월 13일.
- Salomon, Victor. **2상 Rogowski 코일 기반 전력 계량기 아날로그 프론트엔드 회로**. 텍사스 인스트루먼트 아날로그 엔지니어 회로, 문서 번호. SBAA385A, 2020년 7월.
- 텍사스 인스트루먼트, n.d. **ADS131M08 24비트, 32kSPS, 8채널, 동시 샘플링, 델타 시그마 ADC**. 2025년 1월 21일에 액세스함.
- 텍사스 인스트루먼트, n.d. **PCB Rogowski 코일 센서를 사용하는 고정밀 AC 전류 측정 레퍼런스 설계**. 텍사스 인스트루먼트 레퍼런스 설계 번호 TIDA-01063. 2025년 3월 14일에 액세스함.
- Pulse Electronics. n.d. **PA3209NL** 사이드윈더 전류 센서. 2025년 3월 19일에 액세스함
- 텍사스 인스트루먼트, n.d. **INA188 36V, 제로 드리프트, 레일 투 레일 출력 계측 증폭기**. 2025년 1월 21일에 액세스함.
- 텍사스 인스트루먼트, n.d. **릴레이 및 차단기용으로 향상된 정확도를 지원하는 Rogowski 코일 레퍼런스 설계용 능동 통합기**, 텍사스 인스트루먼트 레퍼런스 설계 No. TIDA-00777. 2025년 3월 19일에 액세스함.

중요 알림: 이 문서에 기술된 텍사스 인스트루먼트의 제품과 서비스는 TI의 판매 표준 약관에 의거하여 판매됩니다. TI 제품과 서비스에 대한 최신 정보를 완전히 숙지하신 후 제품을 주문해 주시기 바랍니다. TI는 애플리케이션 지원, 고객의 애플리케이션 또는 제품 설계, 소프트웨어 성능 또는 특허권 침해에 대해 책임을 지지 않습니다. 다른 모든 회사의 제품 또는 서비스에 관한 정보 공개는 TI가 승인, 보증 또는 동의한 것으로 간주되지 않습니다.

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated