참고 자료

Analog Engineer's Circuit
프론트 엔드 게인 단계를 지원하는 절연 전류 감지 회로

TEXAS INSTRUMENTS

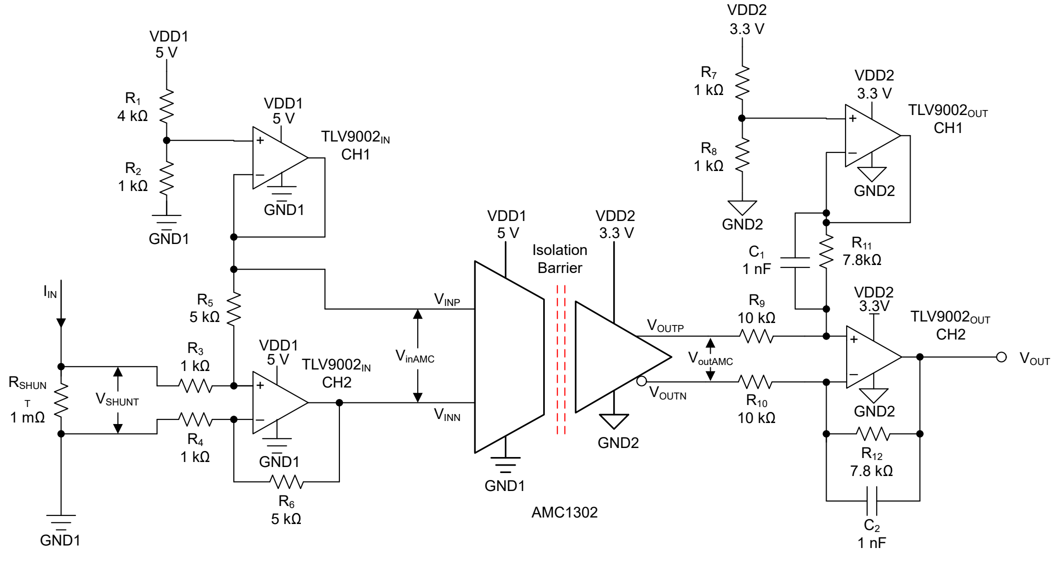
Data Converters

설계 목표

전류 소스(공칭)		전류 소스(단락)	입력 전압		출력 전압	전원 공급 장치	
$I_{IN\ MIN}$	$I_{IN\ MAX}$	I_{SHORT}	$V_{SHUNT,\ MIN}$	$V_{SHUNT,\ MAX}$	V_{OUT}	V_{DD1}	V_{DD2}
±10 mA	±10 A	±200 A	±10μV	±10 mV	55 mV ~ 3.245 V	5 V	3.3 V

설계 설명

일부 애플리케이션에는 회로 차단기와 같이 높은 단락 전류를 견디면서 작은 정격 전류를 측정하기 위한 회로가 필요합니다. 이 회로 설계 문서는 최대 ±200A의 단락 회로 전류를 견디면서 ±10mA에서 ±10A의 정격 부하 전류를 정확하게 측정할 수 있는 절연 전류 감지 회로를 설명합니다. 이 회로의 목적상 출력은 MSP430에 통합된 것과 같은 3.3V 단일 종단 ADC와 함께 사용된다고 가정합니다. 측정할 라인 전류와 ADC 사이의 절연은 절연 증폭기(AMC1302)를 사용하여 이루어집니다. 1mΩ 션트 저항을 사용하면 예상되는 최소 공칭 전류가 ±10-μV 신호를 생성하는데, 이 신호는 델타-시그마 모듈레이터 데드 존으로 인해 제로 전압 입력 부근까지 정확하게 해석하기에 너무 작습니다. 이 문제를 해결하기 위해 회로는 2채널 연산 증폭기(TLV9002)를 사용하여 5V/V 게인으로 신호를 증폭하고 공통 모드 전압을 1V로 설정합니다. 이렇게 하면 최소 공칭 전류가 데드 존을 벗어날 수 있을 뿐만 아니라 최대 공칭 전류가 절연 증폭기의 전체 스케일 선형 입력 범위와 일치하게 상승합니다. 절연 증폭기의 전체 스케일 선형 입력 범위는 ±50mV이며, 출력 공통 모드 전압 1.44V와 고정 내부 게인 41V/V에서 차동 출력 스윙은 ±2.05V입니다. 절연 증폭기의 출력 측에 두 번째 2채널 연산 증폭기(TLV9002)가 사용되며, 여기서 첫 번째 채널은 단일 종단 공통 모드 전압을 1.65V 로 설정하는 데 사용되고, 두 번째 채널은 절연 증폭기의 차동 출력 신호를 3.3V 단일 종단 ADC와 함께 사용할 수 있는 단일 종단으로 변환합니다.



English Document: SBAA568
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

설계 노트

1. AMC1302는 낮은 전력 소비, 해상도, ±50mV 전체 스케일 입력 전압 범위로 인해 절연 증폭기로 선택되었습니다.
2. TLV9002는 낮은 비용, 낮은 오프셋, 작은 크기, 듀얼 채널 패키지로 인해 연산 증폭기로 선택되었습니다.
3. VDD1 및 VDD2 모두에 대해 낮은 임피던스, 저잡음 소스를 선택하십시오. 이는 $TLV9002_{IN}$, $TLV9002_{OUT}$ 및 AMC1302에 공급을 제공하고 단일 종단 출력에 대한 공통 모드 전압을 설정하는 데 사용됩니다.
   - VDD1은 GND1로 참조되고 VDD2는 GND2로 참조됩니다.
4. 가장 높은 정확도를 위해 온도 계수가 낮은 정밀 션트 저항을 사용하십시오.
5. 예상되는 공칭 및 단락 입력 전류 레벨에 맞는 션트 레지스터를 선택하십시오.
   a. 연속 작동의 경우, IEEE 표준에 따라 정상 조건에서 션트 저항을 정격 전류의 3분의 2 이상으로 작동하지 마십시오. 엄격한 전력 손실 요구 사항을 가진 애플리케이션의 경우 션트 저항을 더 줄이거나 정격 와트를 늘려야 할 수 있습니다.
   b. 단락 전류의 경우 션트 저항 데이터 시트에서 단기 과부하 사양을 확인하십시오. 전류는 공칭 전력 손실의 5배인 경우가 많습니다.
   c. 전력 손실 계산에 대한 도움이 필요하면 절연 증폭기 전류 감지 Excel 계산기를 참조하십시오.
6. 적절한 저항 분할기 값을 사용하여 $TLV9002_{IN}$와 $TLV9002_{OUT}$의 채널 1 모두에서 공통 모드 전압을 설정하십시오. 절연 증폭기의 입력 공통 모드 사양을 위반하지 않아야 합니다.
7. $TLV9002_{OUT}$의 채널 2에서 게인 설정 저항에 적절한 값을 선택하여 단일 종단 출력이 적절한 출력 스윙을 갖도록 하십시오.

설계 단계

1. 최대 공칭 전류를 기준으로 적절한 션트 저항 값을 결정합니다.

$$R_{SHUNT} = \frac{V_{inMax}}{I_{inMax}} = \frac{50\ mV}{10\ A} = 5\ m\Omega$$

2. 이 션트 저항은 200A의 단락 전류를 견딜 수 있어야 하므로 6단계에서 보상되는 션트 저항을 5배 더 줄입니다. 최대 공칭 전류 작동 중 션트 저항 전력 손실을 파악합니다.

$$Power\ R_{SHUNT} = I_{inMax}{}^2 \times R_{SHUNT} = 100\ A^2 \times 1\ m\Omega = 0.1\ W$$

   최소 공칭 전류 작동 중 션트 저항 전력 손실을 파악합니다.

$$Power\ R_{SHUNT} = I_{inMin}{}^2 \times R_{SHUNT} = 0.1\ mA^2 \times 1\ m\Omega = 0.1\ \mu W$$

3. 단락 중 션트 저항 전력 손실을 파악합니다. 선택한 단기 과부하 사양(일반적으로 공칭의 5배)이 단락으로 인한 전력 손상을 견딜 수 있는지 확인합니다.

$$Power\ R_{SHUNT} = I_{inShort}{}^2 \times R_{SHUNT} = 40{,}000\ A^2 \times 1\ m\Omega = 40\ W$$

   전력 손실이 5배 감소된 션트 저항을 선택합니다. 따라서 단기 과부하 요구 사항이 40W인 경우 션트 $P_{dissipation}$ = 8W입니다. 자세한 내용은 *절연 전류 감지에 대한 설계 고려 사항* 아날로그 디자인 학술지를 참조하십시오.
4. $TLV9002_{IN}$의 채널 1은 $TLV9002_{IN}$ 채널 2의 단일 종단 출력의 1V 공통 모드 전압을 설정하는 데 사용됩니다. 채널 1의 1V 출력도 AMC1302의 양의 입력으로 전송됩니다. 5V 공급에서 간단한 저항 분할기를 사용하여 5V를 1V로 나눌 수 있습니다. R_1에 4kΩ을 사용하면 다음 방정식을 사용하여 R_2를 계산할 수 있습니다.

$$R_2 = \frac{V_{CM} \times R_1}{V_{DD} - V_{CM}} = \frac{1.00\ V \times 4000\ \Omega}{5.00\ V - 1.00\ V} = 1000\ \Omega$$

English Document: SBAA568
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

5. $TLV9002_{IN}$의 채널 2는 최대 공칭 전류 범위를 측정할 때 AMC1302의 전체 스케일 입력 전압 범위가 활용되도록 션트 저항기의 전압을 증폭하는 데 사용됩니다. 션트 저항이 1mΩ이고 최대 공칭 전류가 ±10A인 경우 션트 레지스터의 출력 전압은 ±10mV입니다. AMC1302의 최대 입력 전압은 ±50mV이므로 션트 레지스터의 출력은 5V/V까지 증폭해야 합니다. R3|R4를 1kΩ에서 유지하면 R5|R6의 저항 값은 다음 방정식으로 찾을 수 있습니다.

$$Gain\left(V/_V\right) = \frac{R_{5,6}}{R_{3,4}};\ R_{5,6} = Gain\left(V/_V\right) \times R_{3,4} = 5\ V/_V \times 1\ k\Omega = 5\ k\Omega$$

6. AMC1302 입력의 절대 최대 전압 제한이 선택한 션트 저항에 따라 단락 중에 위반되지 않는지 확인합니다. 200A 단락 회로 전류가 발생하면 AMC1302에 1V 차동 전압이 적용됩니다. 입력 공통 모드가 1V로 설정되어 있기 때문에 GND1을 기준으로 AMC1302의 음극 입력에 최대 2V가 적용됩니다.

$$V_{inAMC} = 200\ A \times 0.001\ \Omega \times 5\ V/_V = 1\ V$$

AMC1302의 절대 최대 입력 전압은 고압측 공급 전압보다 500mV 더 큽니다(*AMC1302 정밀, ±50mV 입력, 강화 절연 증폭기* 데이터 시트에 명시되어 있음). 5V 고압측 공급 전압에서는 절대 최대 입력 전압 정격이 위반되지 않습니다.

7. $TLV9002_{OUT}$의 출력 채널 1은 $TLV9002_{OUT}$ 채널 2의 단일 종단 출력의 1.65V 공통 모드 전압을 설정하는 데 사용됩니다. 3.3V 공급을 사용하면 간단한 저항 분할기를 사용하여 3.3V를 1.65V로 나눌 수 있습니다. R_7에 1kΩ을 사용하고, R_8은 다음 방정식을 사용하여 계산할 수 있습니다.

$$R_8 = \frac{V_{CM} \times R_7}{V_{DD} - V_{CM}} = \frac{1.65\ V \times 1000\ \Omega}{3.3\ V - 1.65\ V} = 1000\ \Omega$$

8. TLV9002는 레일 투 레일 연산 증폭기이지만, TLV9002의 출력은 공급 레일에서 최대 55mV만 스윙할 수 있습니다. 이 때문에 $TLV9002_{OUT}$의 단일 종단 출력은 55mV에서 3.245V(3.19V_{pk-pk})로 스윙할 수 있습니다.
9. AMC1302의 V_{outp} 및 V_{OUTN} 출력은 2.05V_{pk-pk}이고, 180도 이상이며, 1.44V의 공통 모드 전압을 가집니다. 따라서 차동 출력은 ±2.05V 또는 4.1V_{pk-pk}입니다.

   $TLV9002_{OUT}$의 출력 제한 내에서 유지하려면 AMC1302의 출력을 3.2/4.1배 감쇠해야 합니다. $R_9 = R_{10}$ 및 $R_{11} = R_{12}$인 경우, 차동에서 단일 종단 단계로의 다음 전송 기능을 사용하여 R_{11} 및 R_{12}를 계산할 수 있습니다.

$$V_{OUT} = (V_{OUTP} - V_{OUTN}) \times \left(\frac{R_{11,12}}{R_{9,10}}\right) + V_{CM}$$

10. $TLV9002_{OUT}$의 이전에 계산된 출력 스윙을 사용하고 R_9 및 R_{10}을 10kΩ으로 설정하면, R_{11} 및 R_{12}는 다음 방정식을 사용하여 7.8kΩ으로 계산할 수 있습니다.

$$3.2 = (2.465\ V - 415\ mV) \times \left(\frac{R_{11,12}}{10\ k\Omega}\right) + 1.65$$

표준 0.1% 저항 값을 사용하면 7.8kΩ 저항을 사용할 수 있습니다. 이는 TLV9002의 제한 내에서 최대 출력 스윙을 제공합니다.

11. 커패시터 C_1과 C_2를 저항 R_{11} 및 R_{12}와 병렬로 배치하여 고주파 신호를 제한합니다. $R_{11} = R_{12}$이고 $C_1 = C_2$일 때 차단 주파수는 다음 방정식을 사용하여 계산할 수 있습니다.

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R_{11,12} \times C_{1,2}}$$

$C_1 = C_2 = 1nF$이고 $R_{11} = R_{12} = 7800\Omega$일 때 차단 주파수는 20.414kHz로 계산할 수 있습니다.

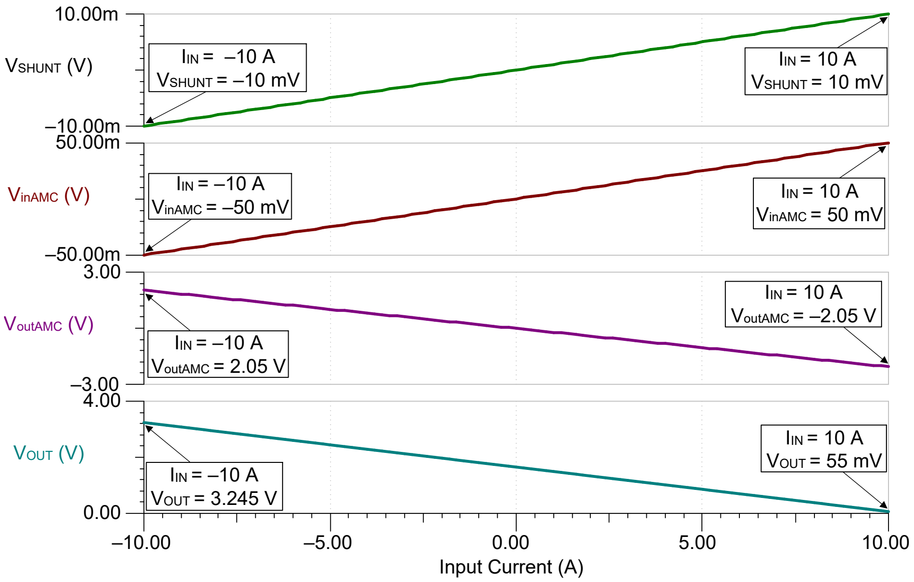
$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 7800\ \Omega \times 1\ nF} = 20.414\ kHz$$

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

설계 시뮬레이션

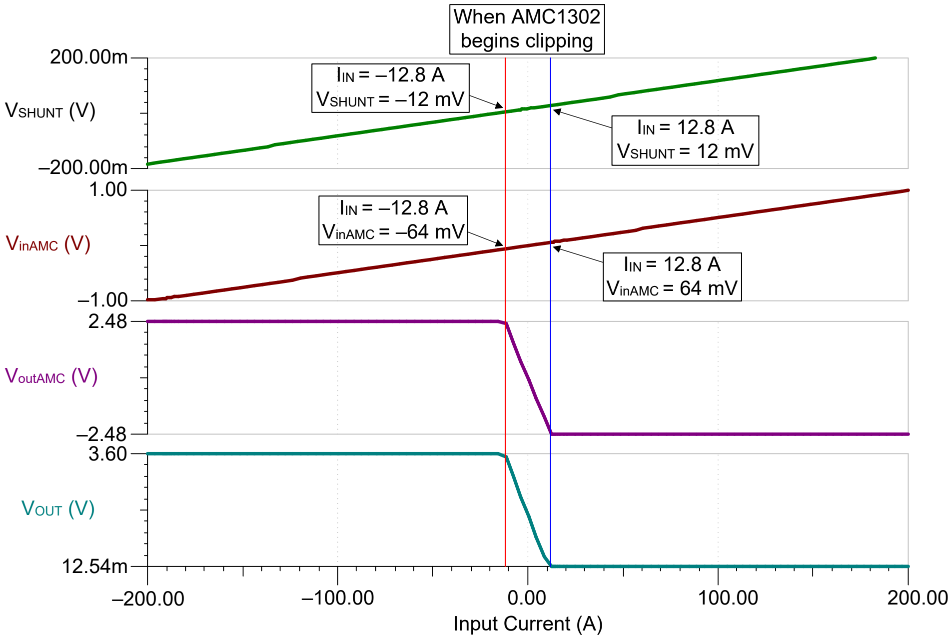
DC 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과는 션트 전체 전압의 시뮬레이션된 DC 특성, AMC1302의 차동 입력/출력, -10A에서 10A까지 TLV9002 증폭기의 단일 종단 출력을 보여줍니다.



시뮬레이션 결과

단락 이벤트 시뮬레이션은 입력과 출력이 ±200A에서 어떻게 반응하는지 시연하여 단락 이벤트 중 회로를 시뮬레이션합니다. 그래프에서 빨간색과 파란색 선은 AMC1302의 출력이 클리핑을 시작하는 지점을 표시합니다. 이 지점에서 회로의 목적은 단락 이벤트 후 작동을 계속하는 것입니다. *설계 단계* 섹션에서 이 이벤트 중에 손상을 피하기 위해 AMC1302 고압측의 게인 및 션트 저항 값을 선택했습니다. 다음 시뮬레이션에서 선택한 이 값을 검증합니다. 단락 이벤트 시 AMC1302에 들어가는 최대 입력 전압은 ±1V로, 부품의 최대 정격 절대값보다 낮습니다. 따라서 시뮬레이션에서 단락 이벤트 이후에도 회로가 계속 작동하는 것을 확인할 수 있습니다.

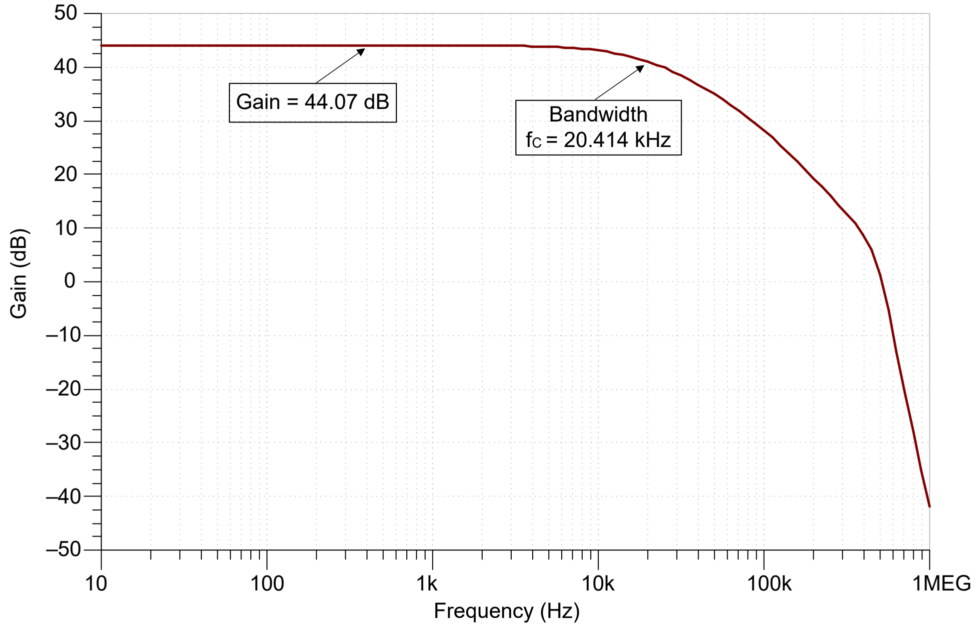


단락 이벤트 시뮬레이션

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

폐쇄형 루프 AC 시뮬레이션 결과

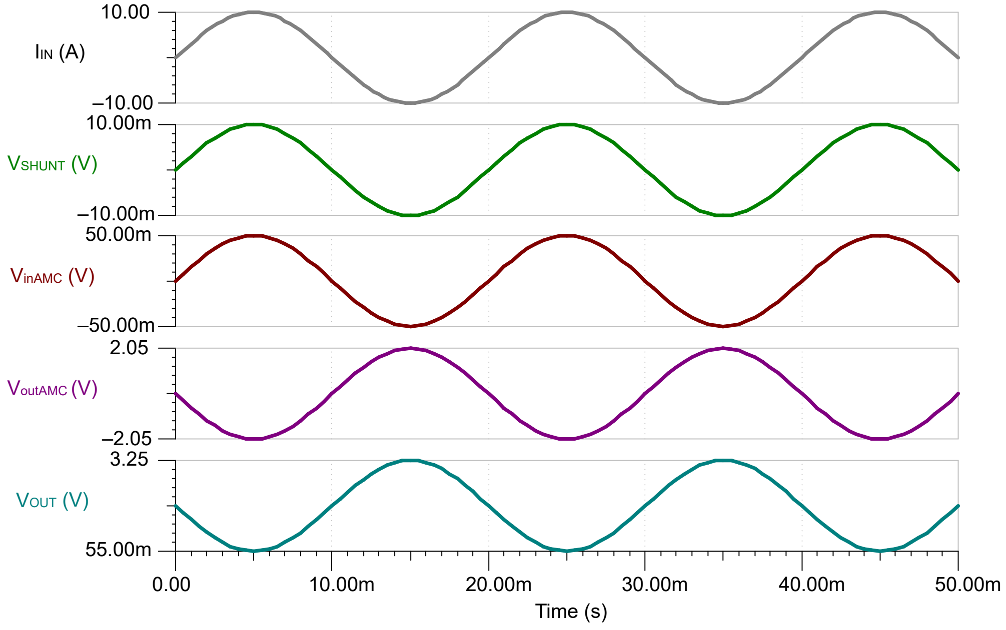
AC 시뮬레이션은 단일 종단 출력의 AC 전송 특성을 보여줍니다. 이 시뮬레이션은 주파수가 11단계의 두 번째 방정식으로 계산된 차단 주파수에 근접하여 초과함에 따라 예상되는 게인(dB)을 보여줍니다. 아날로그 프론트 엔드의 게인은 5V/V이고, AMC1302의 게인은 41V/V이고, 차동-단일 종단 변환의 게인은 0.78V/V입니다. 따라서 44.07dB의 게인이 예상되며, 이는 다음 그림에 나와 있습니다.



AC 시뮬레이션

사인파 시뮬레이션 결과

사인파 시뮬레이션은 -10A~10A 진폭의 사인파에 대한 응답인 션트의 출력, AMC1302의 차동 입력 및 출력, TLV9002의 단일 종단 출력을 보여줍니다. AMC1302의 차동 출력은 예상한 대로 ±2.05V_{pk-pk}이며 단일 종단 출력은 3.19V_{pk-pk}이고 스윙은 55mV~3.245V입니다.



사인파 시뮬레이션

English Document: SBAA568
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

설계 레퍼런스

차동에서-단일 종단 출력으로의 변환에 대한 자세한 내용은 TI의 포괄적인 회로 라이브러리에 대한 *아날로그 엔지니어의 회로 안내서* 및 *차동 출력(절연) 증폭기에서 단일 종단 입력 ADC로 인터페이싱* 애플리케이션 요약을 참조하십시오.

주요 절연 증폭기 설계

AMC1302	
작동 전압	1500 V_{RMS}
게인	41 V/V
대역폭	280 kHz TYP
선형 입력 전압 범위	±50 mV
입력 저항	4.9kΩ(일반)
입력 오프셋 전압 및 드리프트	±50μV(최대), ±0.8μV/°C(최대)
게인 오류 및 드리프트	±0.2%(최대), ±35ppm/°C(최대)
비선형성 및 드리프트	0.03%(최대), 1ppm/°C(일반)
절연 과도 과전압	7071 V_{PEAK}
CMTI(공통 모드 과도 내성)	100kV/μs(최소)

대체 절연 증폭기 설계

AMC3302	
작동 전압	1200V_{RMS}
게인	41 V/V
대역폭	334 kHz TYP
선형 입력 전압 범위	±50 mV
입력 저항	4.9kΩ(일반)
입력 오프셋 전압 및 드리프트	±50μV(최대), ±0.5μV/°C(최대)
게인 오류 및 드리프트	±0.2%(최대), ±35ppm/°C(최대)
비선형성 및 드리프트	±0.03%(최대), 1ppm/°C(일반)
절연 과도 과전압	6000 V_{PEAK}
CMTI(공통 모드 과도 내성)	95kV/us(최소)

AMC1202	
작동 전압	1000 V_{RMS}
게인	41 V/V
대역폭	280 kHz TYP
선형 입력 전압 범위	±50 mV
입력 저항	4.9kΩ(일반)
입력 오프셋 전압 및 드리프트	±50μV(최대), ±0.8μV/°C(최대)
게인 오류 및 드리프트	±0.2%(최대), ±35ppm/°C(최대)
비선형성 및 드리프트	±0.03%(최대), 1ppm/°C(일반)
절연 과도 과전압	4250 V_{PEAK}
CMTI(공통 모드 과도 내성)	100kV/μs(최소)

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

중요 알림 및 고지 사항

TI는 기술 및 신뢰성 데이터(데이터시트 포함), 디자인 리소스(레퍼런스 디자인 포함), 애플리케이션 또는 기타 디자인 조언, 웹 도구, 안전 정보 및 기타 리소스를 "있는 그대로" 제공하며 상업성, 특정 목적 적합성 또는 제3자 지적 재산권 비침해에 대한 묵시적 보증을 포함하여(그러나 이에 국한되지 않음) 모든 명시적 또는 묵시적으로 모든 보증을 부인합니다.

이러한 리소스는 TI 제품을 사용하는 숙련된 개발자에게 적합합니다. (1) 애플리케이션에 대해 적절한 TI 제품을 선택하고, (2) 애플리케이션을 설계, 검증, 테스트하고, (3) 애플리케이션이 해당 표준 및 기타 안전, 보안, 규정 또는 기타 요구 사항을 충족하도록 보장하는 것은 전적으로 귀하의 책임입니다.

이러한 리소스는 예고 없이 변경될 수 있습니다. TI는 리소스에 설명된 TI 제품을 사용하는 애플리케이션의 개발에만 이러한 리소스를 사용할 수 있는 권한을 부여합니다. 이러한 리소스의 기타 복제 및 표시는 금지됩니다. 다른 모든 TI 지적 재산권 또는 타사 지적 재산권에 대한 라이선스가 부여되지 않습니다. TI는 이러한 리소스의 사용으로 인해 발생하는 모든 청구, 손해, 비용, 손실 및 책임에 대해 책임을 지지 않으며 귀하는 TI와 그 대리인을 완전히 면책해야 합니다.

TI의 제품은 ti.com에서 확인하거나 이러한 TI 제품과 함께 제공되는 TI의 판매 약관 또는 기타 해당 약관의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다.

TI는 사용자가 제안했을 수 있는 추가 또는 기타 조건을 반대하거나 거부합니다.

주소: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated

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 © 2024, Texas Instruments Incorporated