

# 4mA~20mA 루프 전원 공급 트랜스미터 설계

**Ahmed Noeman**  
System Engineer  
SEM FAC, Freising

## 머리말

모든 공정 제어 시스템에서 센서 트랜스미터는 압력과 온도의 데이터를 유량 및 레벨로 수집하여 이 정보를 PLC(Programmable Logic Controller) 또는 분산 제어 시스템으로 전달합니다.

이 트랜스미터는 컨트롤러에 데이터를 전송하기 위해 4mA~20mA 신호에 의존합니다. IO-Link 및 Profibus와 같은 표준이 등장하고 있지만 4mA~20mA는 장거리 복구 성능, 안정성, 잡음에 대한 내성 및 모든 PLC 시스템과의 범용 호환성을 제공합니다.

이 문서에서는 카탈로그 반도체 제품을 사용하여 이 트랜스미터 유형을 구현하기 위한 4mA~20mA 트랜스미터 구조, 작동 원리 및 설계 대안을 소개합니다.

## 4mA~20mA 트랜스미터 기본 사항

4mA~20mA 송신기는 4, 3, 2 와이어 등 전원과 와이어 수에 따라 분류됩니다. 이 글에서는 2선 유형에 대해 중점적으로 다룹니다.

**그림 1**의 2선 필드 트랜스미터는 필드 공급 장치 및 아날로그 입력 모듈에 연결하여 전류 루프를 형성합니다. 필드 트랜스미터의 첫 번째 서브시스템은 감지 서브시스템으로, 물리적 센서에 연결하여 출력을 조정하며, 신호를 선형화 및 보정을 포함한 처리를 위해 디지털 코드로 변환합니다. 두 번째 서브시스템은 전송 서브시스템으로, 루프에서 전력을 추출하여 트랜스미터에 전원을 공급하고, 디지털 신호를 다시 아날로그 신호로 변환하여 처리 데이터를 전송하고, 루프 전류를 제어합니다. 트랜스미터는 루프 내에서 전류를 조정하여 전압 제어 전류 소스 역할을 하여 신호를 전송합니다.

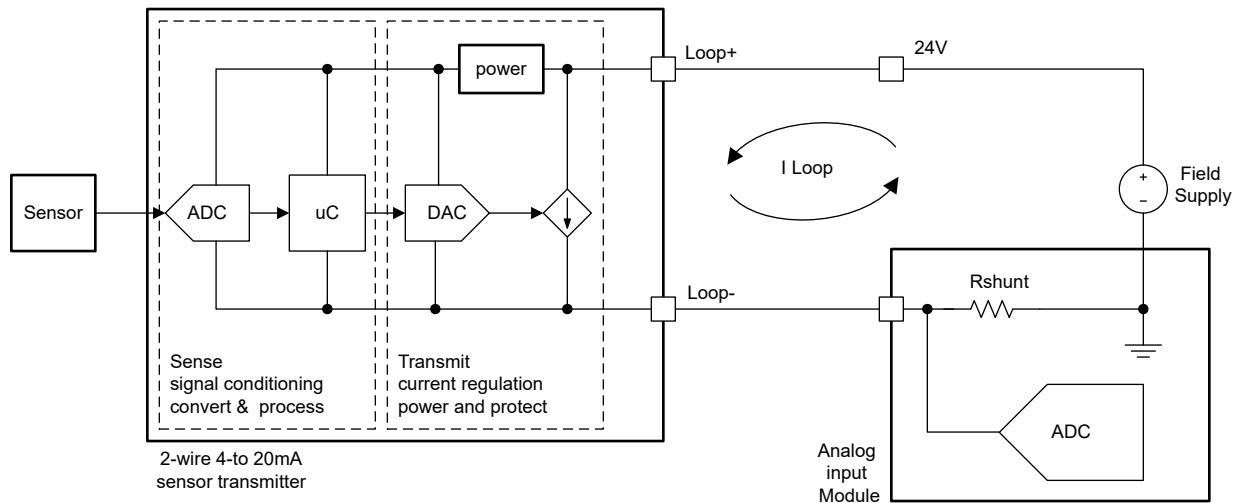


그림 1. 일반 2선 4mA~20mA 센서 트랜스미터.

**그림 2**에서, N-채널 P-채널 N-채널(NPN) 트랜지스터 소스를 사용하고 전류를 조정하며, 베이스 채널은 DAC(디지털-아날로그 컨버터)로 구동되는 증폭기를 통해 제어됩니다.

다. 넓은 입력 전압 저손실(LDO) 레귤레이터는 루프 전압을 트랜스미터 공급 수준으로 낮추며 여러 구성 요소에 전원을 공급합니다. DAC에 통합 레퍼런스가 없는 경우 전압

레퍼런스를 사용할 수 있으며, HART(Highway Addressable Remote Transducer) 지원 트랜스미터에는 HART 모뎀이 필요합니다.

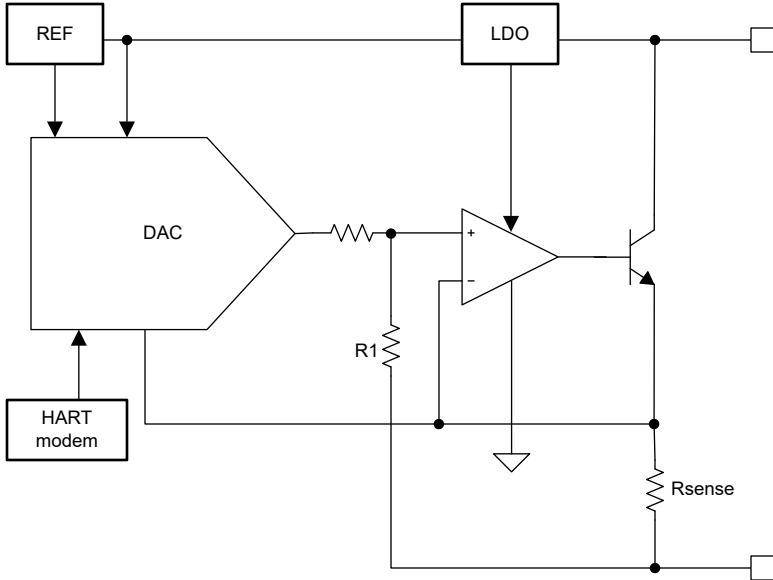


그림 2. 2선 4mA~20mA 트랜스미터 회로.

작동 원리는 아주 간단합니다. 연산 증폭기의 두 입력을 가상 로컬 접지로 유지합니다. R1이 유지하는 전압이 무엇이든 Rsense도 유지됩니다. Rsense는 적절한 스케일링을 통해 R1 전류의 스케일링된 버전을 전달합니다. Rsense 전류가 필드 트랜스미터의 거의 전체 전류임을 고려할 때(그림 2에 나와 있지 않은 감지 부품의 경우에도) DAC 출력은 전체 트랜스미터 전류를 제어합니다. NPN 트랜지스터와 증폭기 루프는 필요한 출력 전류를 달성하기 위해 트랜스미터 자체에서 사용하는 모든 전류를 보완하기 위해 필요한 전류를 바이패스합니다.

### 4mA~20mA 트랜스미터 설계 측면

4mA~20mA 트랜스미터 설계 고려 사항은 다음과 같습니다.

- 저전력 작동.
- 작은 풋프린트.
- 전체 산업용 온도 범위에서 정확도 및 저잡음.
- HART 프로토콜 지원.
- 저비용.

### 성능 메트릭 설계

다음과 같은 트랜스미터 성능 메트릭을 평가할 수 있습니다.

**루프 준수 전압**은 트랜스미터가 작동하는 루프 전압의 범위입니다. 주로 LDO 제한에 의해 결정되며 보호 장치를 포함한 루프 내의 시리즈 요소의 영향을 받습니다. 일반적인 루프 준수 전압 범위는 12V~36V입니다.

**해상도**는 트랜스미터가 생성할 수 있는 고유한 전류 출력 값의 개수로, DAC 기본 해상도에 직접 연결됩니다. 상업용 4mA~20mA 트랜스미터는 12비트와 16비트 사이의 해상도를 지원합니다.

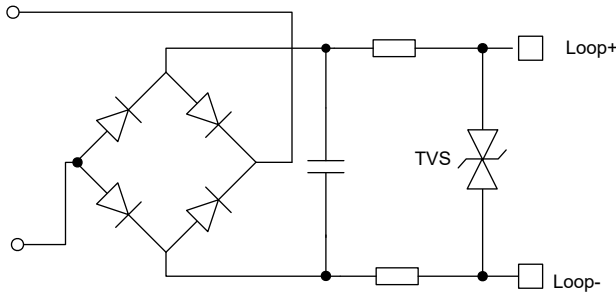
**선형성 오류**는 대부분 DAC의 통합형 비선형성에 의해 결정되며, 이는 전체 출력 범위의 최대 오류(최소 유효 비트 [LSB])입니다.

**잡음**은 출력 잡음 전류의 루트 평균 제곱(RMS)으로 측정됩니다. 이 잡음은 출력 레벨 중 일부를 구분할 수 없게 만들어 유효 해상도를 줄일 수 있습니다. 여기서 효과적인 해상도는 잡음 성능을 측정하는 것입니다. 16비트 분해능 시스템의 경우 신호 대역폭에 따라 13비트와 15비트 사이의 유효 해상도가 예상됩니다.

**정확도**는 이상적인 전류 값으로부터의 전류 출력의 편차를 측정합니다. 여기에는 오프셋 오류, 게인 오류 및 비선형성 오류의 RMS 합과 이러한 값의 온도 드리프트가 포함됩니다. 총 미조정 오류는 부정확성의 수준을 나타냅니다.

**동적 성능**에는 신호 대역폭과 송신기 안정성이 포함됩니다. 대역폭은 루프를 통해 전송할 수 있는 최대 전류 신호 대역폭을 나타냅니다. 이 대역폭은 DAC 정착 시간 및 증폭기 회로 대역폭, 그리고 바이패스 트랜지스터의 트랜스컨덕턴스에 의해 결정됩니다. 변형 저항을 사용하면 트랜지스터 트랜스컨덕턴스( $g_m$ )의 변화에 대한 종속성이 제거됩니다. 종종 증폭기 회로도 외부적으로 보상됩니다. 안정성은 루프 및 보상 커패시터 값의 대역폭과 관련이 있습니다. 루프의 임계 노드에서 커패시턴스를 줄이면 안정성이 보장됩니다. 루프 안정성과 그 요구 사항에 대한 자세한 분석은 [DAC161S997 데이터 시트](#)를 참조하십시오. HART 지원 트랜스미터의 경우 외부 구성 요소의 대역폭을 줄이면 HART 신호 간섭을 방지할 수 있습니다.

**회로 보호**는 역방향 루프 극성 및 서지 이벤트와 같은 비정상적인 조건으로부터 트랜스미터를 보호합니다. 역극성은 다이오드에 의해 차단됩니다. 송신기를 역방향 극성으로 작동하는 경우 **그림 3**에 나와 있는 정류기 브리지를 사용하십시오. 서지 방지에는 고전압 이벤트 동안 전류를 제한하기 위해 과도 전압 억제기 다이오드(예: **TVS3301**)와 패시브 요소가 필요합니다. 이러한 보호 요소는 작동 중에 약간의 여유분을 필요로 하며 최소 준수 전압을 높입니다.



**그림 3.** 2선 트랜스미터의 일반적인 보호 섹션.

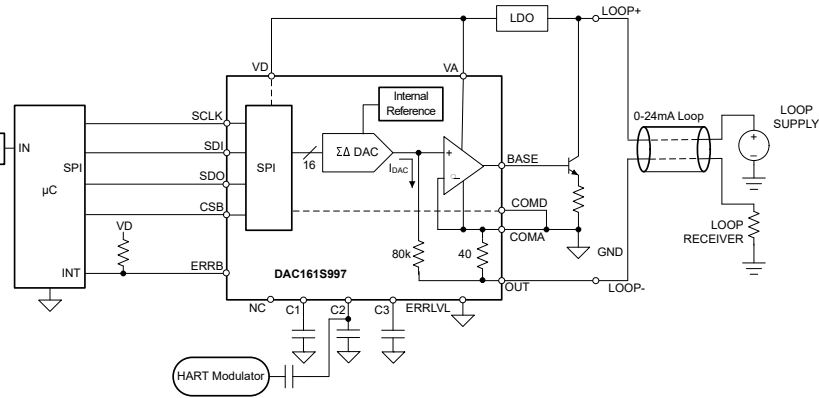
### 트랜스미터 회로 구현

**그림 2**의 블록 다이어그램 구현의 차이는 통합 접근 방식에 있습니다. 바이패스 트랜지스터는 더 나은 열 관리를 위해 항상 개별 구성 요소입니다. 다음 구현은 모두 **DAC8740H**와 같은 HART 모뎀을 추가하여 HART 프로토콜을 지원할 수 있습니다.

### 전용 루프 컨버터

한 가지 방법은 통합된 전압 레퍼런스 및 출력 증폭기와 함께 **DAC161S997 데이터 시트**와 같은 DAC를 사용하는 것입니다. 이 솔루션은 **그림 4**에 나와 있는 것처럼 DAC, 넓은 입력 전압 범위의 LDO, NPN 트랜지스터로 구성됩니다. 이 구현은 보정 없이 130µA의 전류 소비 및 탁월한 정확도를 가지고 있습니다. **DAC161S997**에는 낮은 공급 또는 높은 전류 부하의 경우 전류 루프 오류를 감지하고 4mA 미만의 오류 저전류를 신호를 보내는 진단 기능이 있습니다.

이 설계는 단순하며, 루프 안정성을 보장하고 돌입 전류를 제한하는 몇 가지 외부 구성 요소를 가지고 있습니다. 이 접근 방식의 최대 작동 온도는 105°C입니다

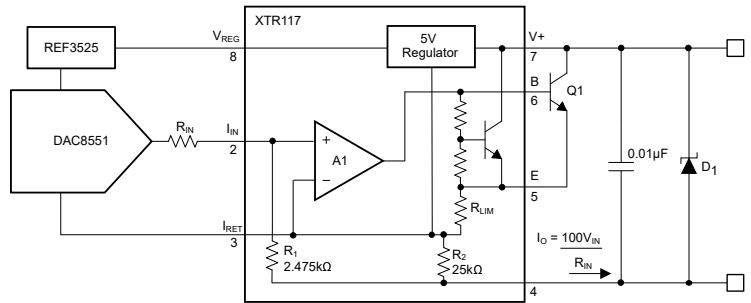


**그림 4.** DAC161S997을 사용하는 2선 4mA~20mA 트랜스미터.

### 루프 트랜스미터 장치

또 다른 구현에서는 **DAC8551**과 같은 저전력 DAC와 통합 LDO, 전압 레퍼런스, 출력 증폭기가 있는 **XTR115** 같은 전용 루프 트랜스미터를 사용합니다. 이 접근 방식은 잡음을 최소화하고 게인 오류가 1% 미만입니다.

제한 사항이 몇 가지 있습니다. **XTR115** 작동 온도는 85°C로 제한되며, 통합 LDO의 최대 입력은 36V입니다. 대안으로 **XTR117**은 더 작은 패키지로 제공되어 더 낮은 정동작 전류를 소비하며, 최대 125°C의 온도에서 작동합니다 **XTR117**의 통합 LDO는 최대 40V까지 작동합니다. **XTR117**은 전압 레퍼런스를 통합하지 않으므로 외부 레퍼런스를 세는 동안 **그림 5**에서 볼 수 있듯이 LDO, DAC, 전압 레퍼런스라는 세 가지 장치 솔루션이 됩니다.



**그림 5.** XTR117을 사용하는 2선 4mA~20mA 트랜스미터.

### MCU 통합 DAC

비용에 민감한 애플리케이션은 아날로그 리소스가 포함된 MCU를 사용할 수 있습니다. MSPM0G MCU는 통합 12비트 DAC, 내부 레퍼런스 및 출력 증폭기를 포함한 트랜스미터 단계 구현을 지원합니다. LDO는 **그림 6**에서 보듯이 필요한 유일한 외부 장치입니다. MCU의 디지털 프로세스에서 아날로그 기능을 구현하면 전용 아날로그 장치 대비 상

대적으로 높은 전력 소비를 자랑합니다. 이 접근 방식은 매우 낮은 비용으로 11비트의 유효 해상도를 필요로 하는 애플리케이션에 매력적입니다. VREF 핀을 접지 대신 내부 레퍼런스 음극 핀으로 사용하면 성능을 개선할 수 있습니다. VREF 핀을 분리하면 아날로그 레퍼런스에서 디지털 잡음을 격리합니다.

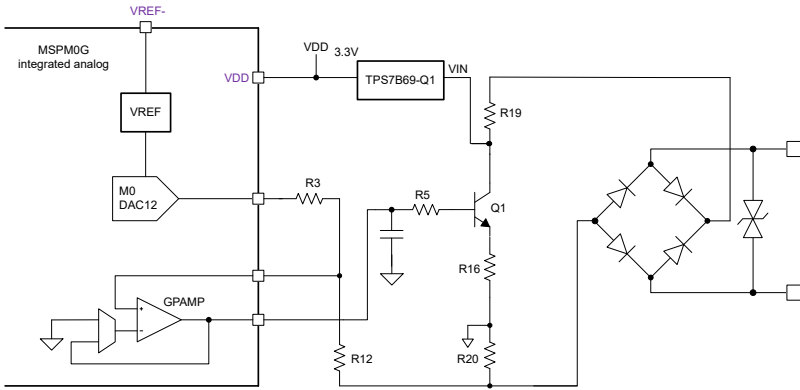


그림 6. MSPM0G을 사용하여 구현된 2선 4mA~20mA 트랜스미터.

### PWM 기반 DAC

MCU(통합 DAC 없음)를 사용하는 더 일반적인 접근 방식은 PWM(펄스 폭 변조)에 의존하여 DAC 출력을 생성하는 것입니다. 간단한 PWM DAC는 10비트~12비트의 해상도를 제공합니다. 그러나 2경로 PWM 및 활성 리플 제거와 같은 고급 기술을 통해 16비트 분해능 DAC를 실현할 수 있습니다.

높은 유효 해상도를 달성하기 위해서는 전압 레퍼런스 전원 로직 게이트를 사용하여 PWM 신호가 버퍼링됩니다. MCU는 루프 전류에 디지털 잡음 주입을 방지하기 위해 적절한 바이패스가 필요합니다. 그림 7에 나와 있는 구현 방법은 저전력이고 온도에 따라 안정적이며 매우 낮은 비용으로 13비트 이상의 유효 해상도를 달성합니다.

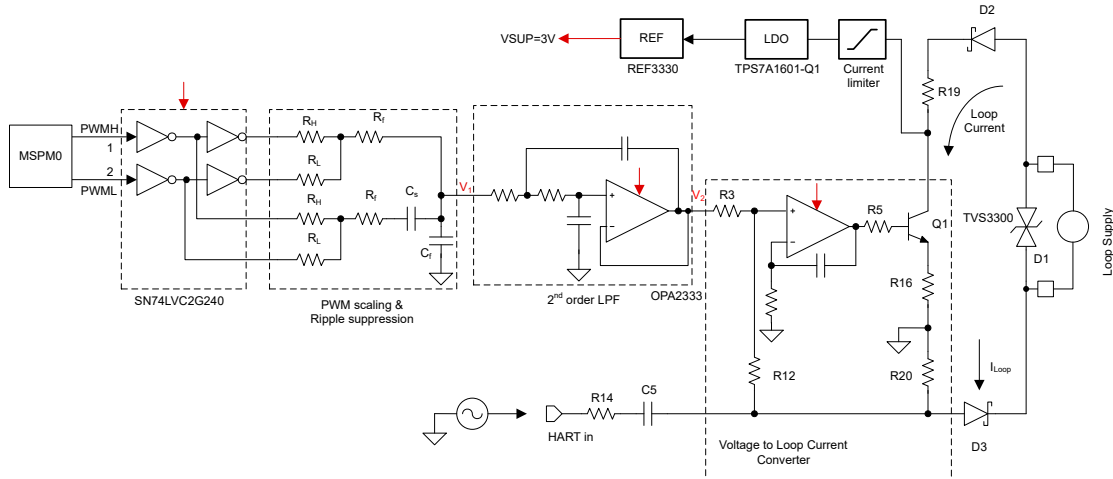
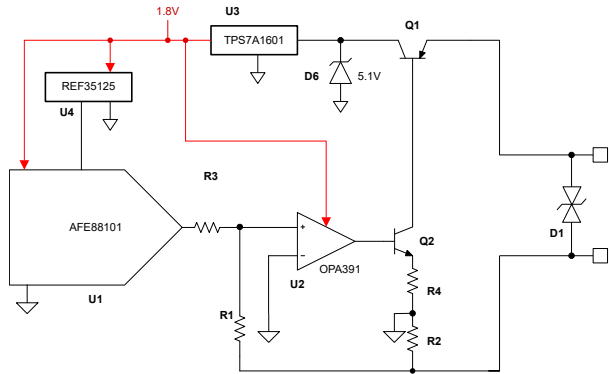


그림 7. PWM DAC를 사용하여 구현된 2선 4mA~20mA 트랜스미터.

### 독립형 저전력 DAC

저전력, 독립형 DAC를 사용하여 그림 8에서 AFE88101과 같은 4mA~20mA 트랜스미터를 구동하면 최고의 해상도와 선형성 성능을 구현할 수 있습니다. 전력을 더 줄이기 위해 REF35125 같은 저전력 전압 레퍼런스를 통해 전류를 180µA까지 낮출 수 있습니다. 또한 AFE88101은 12비트 ADC 및 정의된 안전 모드를 비롯한 광범위한 진단 기능을 갖추고 있습니다.

AFE881H1은 AFE88101과 핀 대 핀으로 호환되며, 소형 HART 지원 트랜스미터용 통합 HART 모뎀이 포함되어 있습니다. AFE881H1은 HART가 활성화되면 저전류 소비를 지원합니다. HART 모뎀은 일반적으로 작동 중에 10µA를 소비하므로 저전력 HART 지원 트랜스미터에 적합한 장치입니다. AFE88101의 또 다른 특징은 1.8V 로직과 호환되어 저전압 디지털 작동이 가능하고 MCU 입력/출력 측에서 전력을 더욱 절감할 뿐만 아니라 전자기 방출을 줄인다는 점입니다.



**DAC8311** DAC, LDO 및 외부 저전력 레퍼런스의 저가형 모델은 130 $\mu$ A의 전류로 실행되면서도 합리적인 성능을 달성합니다.

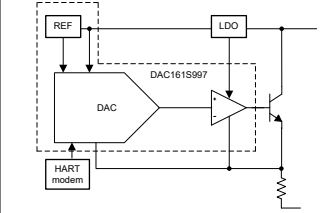
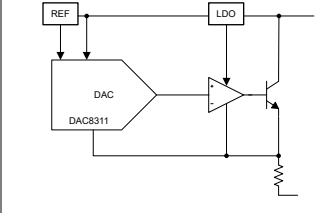
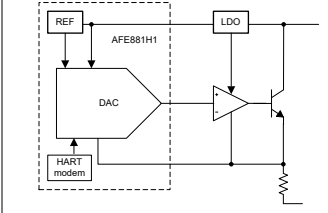
그림 8. AFE88101을 사용하여 구현된 2선 4mA~20mA 트랜스미터.

### 구현 비교

표 1 및 표 2에서는 각 구현, 제안된 BOM(재료 사양서) 및 예상 성능을 보여줍니다. 성능 수치는 제한된 측정을 기준으로 합니다.

	MSPM0 DAC12	M0을 사용한 PWM	XTR117
BOM	MSPM0G, TPS7B69, DAC8740H	TPS7A1601, REF3330, TLV2333, DAC8740H	XTR117, DAC8551A, REF3525
규정 준수(볼트)	40	60	40
분해능(bit)	12	16	16
선형성(LSB)	2	<6	8
유효 해상도(비트)	11	13.4	14
정확도	1% 최대 눈금, 6 $\mu$ A	1% 최대 눈금, 6 $\mu$ A	0.7% 최대 눈금, 20 $\mu$ A
전류( $\mu$ A)	425	240	440
온도( $^{\circ}$ C)	125	125	105
장점	저렴한 비용	저비용, 고해상도, 저전력	고해상도

표 1. 4mA~20mA 트랜스미터에 대한 설계 옵션, 제안된 BOM 및 성능(M0, XTR117을 사용한 MSPM0 DAC12, PWM).

	DAC161S997	DAC8311	AFE881H1
			
BOM	DAC161S997, TPS7A1601, DAC8740H (1)	DAC8311, REF3525, OPA391, TPS7B69, DAC8740H	AFE88101 (1), REF35125, OPA391, TPS7A1601
규정 준수(볼트)	60V	40	60
분해능(bit)	16	14	16
선형성(LSB)	5	4	4
유효 해상도(비트)	13.4	13.4	16
정확도	1 $\mu$ A에서 0.01%	0.15%	0.07%
전류( $\mu$ A)	130	130	180(240 w/intREF)
온도( $^{\circ}$ C)	105	125	125
규정 준수(볼트)	초저전력, 고해상도, 높은 정확도	초저전력, 저비용	높은 해상도 및 정확도, 저전력, 저전압

**표 2. 4mA~20mA 트랜스미터의 설계 옵션, 권장 BOM 및 성능(DAC161S997, DAC8311, AFE881H1).**

(1) DAC8740은 최대 전력 다운 전류는 180 $\mu$ A, 크리스탈 오실레이터를 사용하여 활성 시 약 300 $\mu$ A입니다. 그러나 AFE881H1 HART 모델은 평균적으로 10 $\mu$ A를 소비합니다. HART를 활성화한 경우 해당 전류를 추가합니다.

**결론**

이 선택 절차를 통해 4mA~20mA 트랜스미터를 설계할 때 올바른 구현을 결정하는 데 도움이 됩니다.

- 안전 시스템을 구축하고 있으며 가장 높은 정확도와 가장 낮은 잡음 성능이 필요하거나 200 $\mu$ A 미만의 전력을 지원하는 HART 지원 트랜스미터를 찾는 경우, **AFE88101**과 **AFE881H1**이 가장 먼저 선택되어야 합니다.
- **DAC161S997** 구현은 가능한 최소 전력과 공간을 제공하며, 그 다음은 **DAC8311** 구현, 그리고 전력 소모보다 성능이 우선할 경우 **XTR117** 구현을 제공합니다.

- 최저 비용을 원하는 경우 MSPM0G 구현을 선택합니다. 성능이 만족스럽지 않을 경우 비용 최적화된 다음 솔루션이 PWM 솔루션입니다.

**관련 웹사이트**

- [4~20mA 전류 루프 트랜스미터 레퍼런스 설계](#)
- [FSK 모듈화를 통한 싱글 전류-루프를 사용한 듀얼 센서 측정 레퍼런스 설계](#)
- [2와이어, 4-20mA 트랜스미터, EMC/EMI 테스트를 거친 레퍼런스 설계](#)
- [필드 트랜스미터용 고성능 16비트 PWM-4~20mA DAC](#)
- [필드 트랜스미터를 위한 고성능 PWM DAC 설계](#)
- [AFE881H1을 사용하는 초저전력, 저전압, 2선, 4~20mA 루프 트랜스미터](#)
- [HART 모델을 갖춘 고정밀, 루프 전원 공급, 4mA~20mA 필드 트랜스미터 레퍼런스 설계](#)

**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](https://www.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