

모터 컨트롤의 위치 센서 선택

머리말

요즘은 "센서리스"가 대세인데, 아직도 모터에 위치 센서가 존재하나요? 이 질문에 대해 충분히 설명하려면 다소 복잡하지만, 결론적으로 위치 센서는 여전히 필수적입니다. 전통 공구 같은 분야에서는 회전각 센서 없이도 작동하는 센서리스 설계가 있는데, 브러시리스 DC 모터의 블록 정류 방식이나 브러시리스 AC 모터의 FOC 방식이 그 예입니다. 하지만 산업용 및 휴머노이드 로봇, 자율 모바일 로봇, 선형 모터 전송 시스템과 같은 완제품에는 회전각 또는 선형 위치 센서가 절대적으로 필요합니다.

브러시리스 모터 컨트롤과 함께 위치 센서 사용

위치 센서는 브러시리스 DC 또는 브러시리스 AC 모터의 스테이터 전류를 정류하는 데 사용될 뿐 아니라, 속도 및 위치 제어에도 사용됩니다. 산업용 다중 축 로봇에는 모터 샤프트와 로봇 축 사이에 기어가 하나 포함될 때가 많습니다. 모터 샤프트와 결합된 회전각 센서는 로터 각도를 감지할 뿐만 아니라, 모터 샤프트의 회전 수도 계산하여 해당 로봇 축의 등가 절대각 위치를 제어해야 합니다. 인코더의 유형은 애플리케이션에 따라 다릅니다.

중분 및 절대 인코더

중분 인코더는 일반적으로 ABZ 디지털 또는 아날로그 단방향 인터페이스를 사용하며, 2개의 직각 위상 인코딩된 디지털 펄스 트레인 신호(A와 B) 또는 2개의 아날로그 Sin/Cos 신호(A와 B)를 통해 약 10비트에서 최대 28비트의 높은 분해능으로 저지연 상대각 측정이 가능합니다. 선택 사항인 인덱스(Z 또는 I)를 사용하면 절대적인 기계 각도 정보도 얻을 수 있습니다. 중분 인코더는 시동 시 절대각을 제공하지 않으며, 인덱스가 발생하기 전까지 최대 1회전을 해야 합니다. 따라서 이러한 인코더는 지연이 매우 짧아야 하지만(<1μs) 시동 시 절대각이 필요하지 않은 가변 속도 애플리케이션에 잘 어울립니다.

반대로, 절대 단일 또는 다중 회전 인코더의 경우 시동 시점에 절대각 위치를 제공합니다. 이러한 인코더는 공급업체별 프로토콜과 함께 양방향 RS-485 인터페이스를 제공하고, 시간 트리거 방식 각도 측정을 지원하며 회전 속도

및 회전 횟수와 같은 정보도 제공합니다. 각도 분해능은 보통 10비트~>30비트이며, 지연은 최저 10μs라서 광범위한 산업용 애플리케이션에 부합합니다. 위치 분해능은 보통 데이터 형식이며, 디지털 인터페이스를 통해 전송됩니다. 예를 들어 20비트 정수 형식의 각도는 분해능이 360/2²⁰입니다. 여기서 0h = 0도이고, 0xFFFF = 360도-360/2²⁰입니다. 전반적인 시스템 잡음이 양자화 잡음보다 현저히 높으며, ENOB(유효 비트 수)로 이 효과를 나타냅니다.

방정식 1에서 도 단위로 측정된 각도의 표준 편차를 사용해 각도의 ENOB를 계산했습니다.

$$ENOB [bit] = (20 \cdot \log_{10}(360/\text{stdev}(\text{angle})) - 1.76)/6.02 \quad (1)$$

각도 잡음 신호의 제곱평균제곱근 값은 표준 편차(1 시그마)와 동일합니다. 그림 1에서는 각도 정확도를 보여줍니다. 여기서 관련 각도 오차는 표준 편차보다 큼니다. 각도 정확도는 피크 잡음(일반적으로 6시그마 값 사용)뿐만 아니라 1회전에 걸친 비선형성에도 영향을 받습니다.

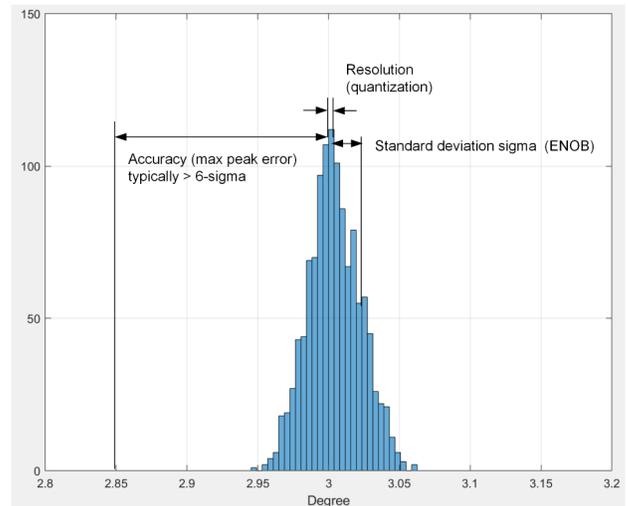


그림 1. 정적 각도 분포.

FOC 모터 컨트롤 기법과 인코더 요구 사항

그림 2에 표시된 FOC 방법은 영구 자석 동기 모터를 사용해 토크를 최대화하기 위해 로터 자속 각도에 따라 결과적인 스테이터 전류 벡터를 제어하는 고성능 기법입니다. FOC를 사용하면 정지 상태에서 고속 작동까지 빠른 과도

응답으로 부드러운 토크를 구현할 수 있습니다. 로터 자기장 각도를 정확하고 짧은 지연으로 측정하면 스테이터 3상 전류(i_u, i_v, i_w)를 로터 자기장 지향 좌표 체계로 분해할 수 있으며, 여기서 i_q 는 토크 생성 전류와 동일하고 i_d 는 약계자 전류와 동일합니다.

휴머노이드 로봇과 같은 최종 장비에서, 절대적 회전각은 보통 1도에서 0.1도의 정확도, 12비트에서 15비트의 ENOB, 8kHz~32kHz의 샘플 레이트로 측정됩니다. 회전각은 모터-위상 전류와 동시에 감지됩니다. $20\mu s$의 짧은 지연으로 각도를 측정하기 때문에 MCU(마이크로컨트롤러)가 컨트롤 알고리즘을 실행하고 다음 PWM 사이클에 맞춰 PWM(펄스 폭 변조)을 업데이트할 만큼 충분한 시간이 확보됩니다.

회전각 센서는 모터 하우징에 통합할 수도 있고(대부분의 휴머노이드 로봇에서처럼), 모터 샤프트에 장착하기 위한 별도의 하우징에 통합할 수도 있습니다. 두 경우 모두 고온에서 작동해야 하며, 보통 주변 온도 최고 125C에 상당함

니다. 휴머노이드 로봇에서는 제어 MCU가 회전 인코더가 가까이에 위치하므로, TI의 TMAG6180-Q1 AMR(이방성 자기저항) 센서와 같은 360도 각도 센서가 비용 효율적이고 저지연 인터페이스를 제공합니다.

선형 모터 기반 전송 시스템은 회전 모터와는 달리 절대적 선형 위치 감지가 필요하지만, 최대 토크를 위해 여전히 FOC를 적용합니다. 지연이 <math><100\mu s</math>인 12비트 위치 분해능이면 대개 충분합니다.

또한, 산업 기계에서 IEC 62061 또는 ISO 13849 기능 안전성을 달성하려면 SIL(안전 무결성 수준) 또는 PL(성능 수준)에 따라 결정되는 안전 인증 인코더가 필요하며, 위치 센서를 통한 추가 진단으로 무작위 하드웨어 오류를 감지해야 합니다. 자동차 애플리케이션에서 ISO 26262에 따라 설계된 시스템은 시동 시 진단을 실행하는 반면, 산업용 시스템은 24시간 연중무휴로 작동하는 경우가 많아 정상 작동 중에도 지속적인 진단이 필요합니다.

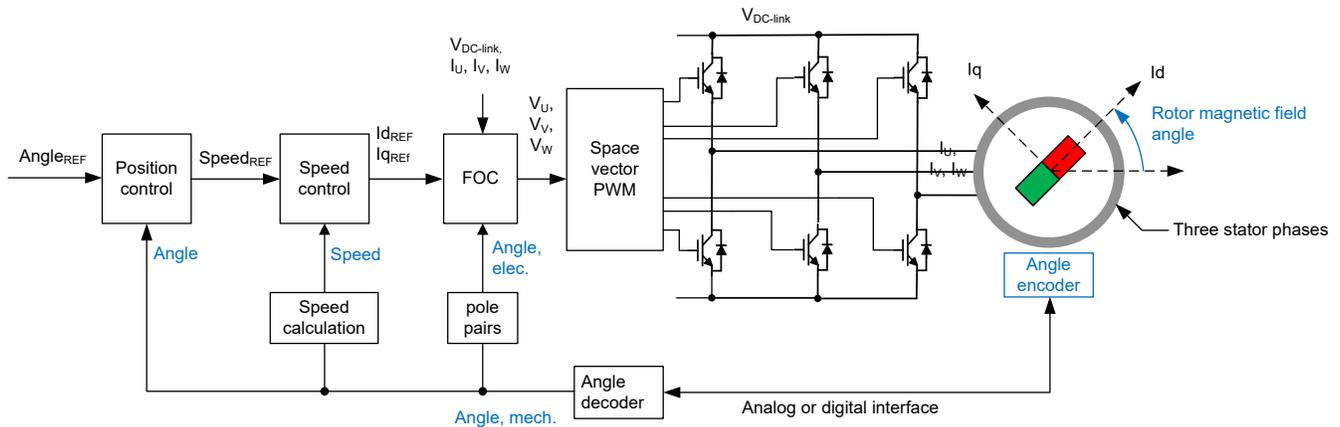


그림2. 캐스케이드 위치, 속도 및 FOC.

위치 센서 기술

위치 센서의 유형은 크게 광학, 자기, 유도성 또는 정전식으로 나눌 수 있습니다. 광학 센서는 일반적으로 가장 높은 분해능을 제공하며(단, 자기 및 유도성 센서가 더 높은 신뢰성을 가짐), 전체 시스템 비용이 더 낮을 수 있습니다. 산업용 또는 차량용 시스템에서는 인접한 배선에 큰 전류가 흐르므로, 표유 자기장에 영향받지 않는 유도성 센서와 같은 기술이 필요합니다. 정전식 센서는 보통 유도성 센서나 자기 센서보다 분해능이 낮고 덜 보편적입니다.

비용에 민감하면서 가혹한 환경(예: 모터 통합으로 인한 고온)에서 작동하는 시스템을 위해 TI는 자기 및 유도성 위치 센서를 제공합니다.

자기 위치 센서

자기 인코더를 사용하면 비용 효율적인 방식으로 회전 또는 선형 이동을 감지하면서, 분진이나 유분, 수분을 포함할 수 있는 가혹한 환경에서 내성을 제공합니다. 자기 위치 센서는 자기장 변동을 감지해 이를 전기 신호로 변환하고 출력 신호를 생성합니다. 자기 위치 센서 기술에는 홀 효과,

AMR, TMR(Tunneling Magnetoresistance) 및 GMR(Giant Magnetoresistance) 등이 있습니다. 표 1에 각 센서의 장단점을 나열했습니다.

매개 변수	홀 효과(자속 집중기 미포함)	홀 효과(자속 집중기 포함)	AMR	GMR	TMR
작업 영역	-	-	포화도	포화도	포화도
비용	가장 저렴	>홀	>홀	>홀 및 AMR	가장 고가
측정한 각도	XYZ	XYZ	XY	XY	XY
각도 범위 (도)	0~360	0~360	0~180 (TMAG618 0-Q1은 360까지 확대)	0~360	0~360
지연	높음	높음	낮음	낮음	낮음
각도 오차 (도)	<1.2 1	<1 1	<0.6 1	>1 2	<0.6 2
자속 밀도 범위(자기 공극 거리를 제한함) (밀리테슬라 (milliTeslas) 단위)	0~300	0~70	>20~무제한 (TMAG618 0-Q1은 최대 1,000까지 허용)	20~120	20~120

표 1. 자기 센서 기술 비교: 주요 특징 및 사양.

1. 게인 및 오프셋 보정 이후입니다.

2. 게인, 오프셋 및 직각성 보정 이후

3D 홀 효과 선형 센서를 사용한 선형 위치 예시

5m/s~15m/s로 빠르게 이동하는 페이로드 캐리어가 있는 선형 모터 전송 시스템에서는 지연 시간 <math><100\mu\text{s}</math>, 샘플 레이트

TMAG5170 3D 홀 효과 센서는 정확도, 짧은 지연 시간과 보드 배치 유연성이라는 3가지 주요 장점을 제공합니다. 전체 온도 범위에서 민감도 오차 드리프트가 2.8% 미만입니다. 10MHz SPI는 짧은 지연 시간을 가능하게 합니다. 또한 온보드 3D 센싱 요소가 있어 구성 가능한 XY, YZ 또는 XZ 센싱 방향을 지원하므로 센서를 자석에 상대적으로 배치할 때 유연성이 강화됩니다.

쿼드 3D 홀 효과 센서를 지원하는 정확한 저지연 선형 위치 감지 레퍼런스 설계에서는 25mm 간격으로 배치된 **TMAG5170**을 사용해 정밀하고 지연이 짧은 선형 위치 감지를 제공합니다. C2000™ MCU가 샘플 레이트 $\geq 8\text{kHz}$ 로 TMAG5170 센서 4개 전체에서 자기장 Z 및 X 데이터를 읽고 움직이는 자석의 위치를 오차 $<0.15\text{mm}</math>, 지연 $<57.5\mu\text{s}</math>로 계산합니다.$$

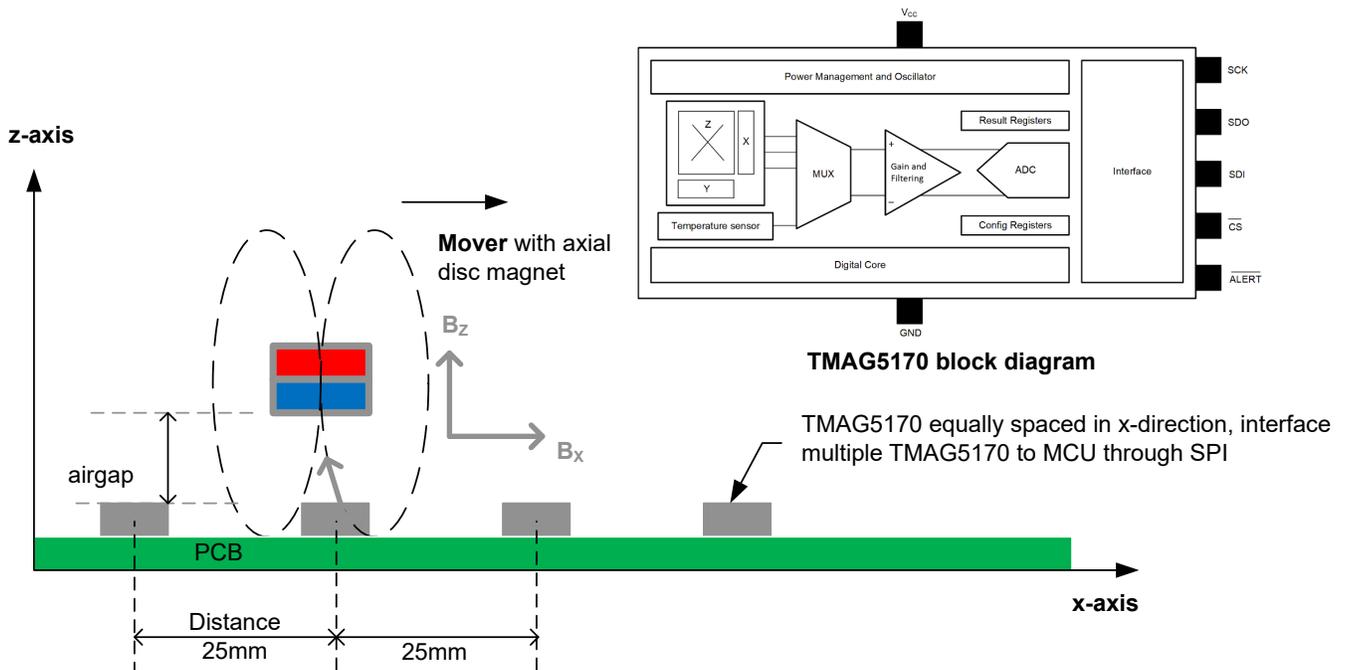


그림 3. 선형 모터 전송 시스템의 TMAG5170.

AMR 센서를 사용한 회전각 예시

AMR 센서는 자기저항 Wheatstone 브리지 4개로 구성되며, 두 브리지 출력 단자 간의 전압 차이가 외부 자기장의 세기를 반영합니다.

홀 효과 센서와 비교하여 AMR 센서는 더 높은 주파수에서 작동 가능하며, SNR(신호 대 잡음 비율)이 더 높습니다. GMR 및 TMR 센서와 비교할 때 AMR 센서의 직교성 오차는 상대적으로 무시할 수 있는 수준입니다. 정확도가 높은 인코더가 필요한 서보 드라이브와 같은 애플리케이션의 경우, AMR 센서가 선호될 때가 많습니다. 자기장 허용성이 높아 전반적으로 우수한 내성을 제공하기 때문입니다.

TMAG6180-Q1 2D AMR 각도 센서는 자기장을 측정해 그러한 자기장에 비례하는 차동(또는 단일 종단) 전압 출력 2개를 도출합니다. TMAG6180-Q1은 지연이 $2\mu\text{s}$로 짧아 고속 이동으로 인해 발생하는 각도 오차를 최소화하기도 합니다. 통합형 홀 효과 스위치가 디지털 사분면 출력을 2개(Q0, Q1) 도출하여 각도 감지 범위를 360도까지 확대합니다. 사인 및 코사인 파형과 함께 Q0, Q1 디지털 출력이 있으면 절대 회전각을 결정하는 데 충분합니다. **그림 4**은 (는) TMAG6180-Q1의 기능 블록 다이어그램이고, **그림 5**에는 출력 파형을 표시했습니다.

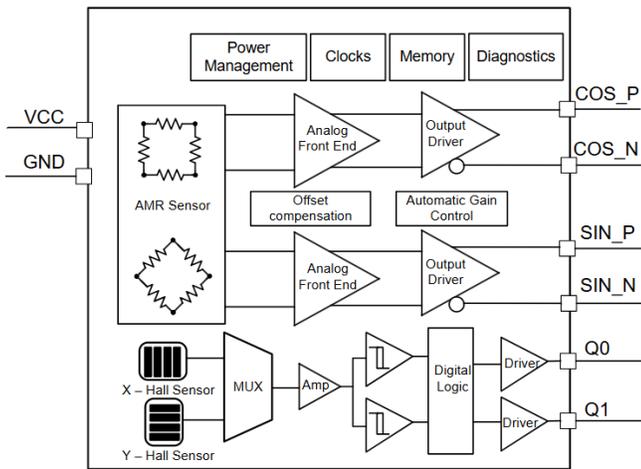


그림 4. TMAG6180-Q1 블록 다이어그램.

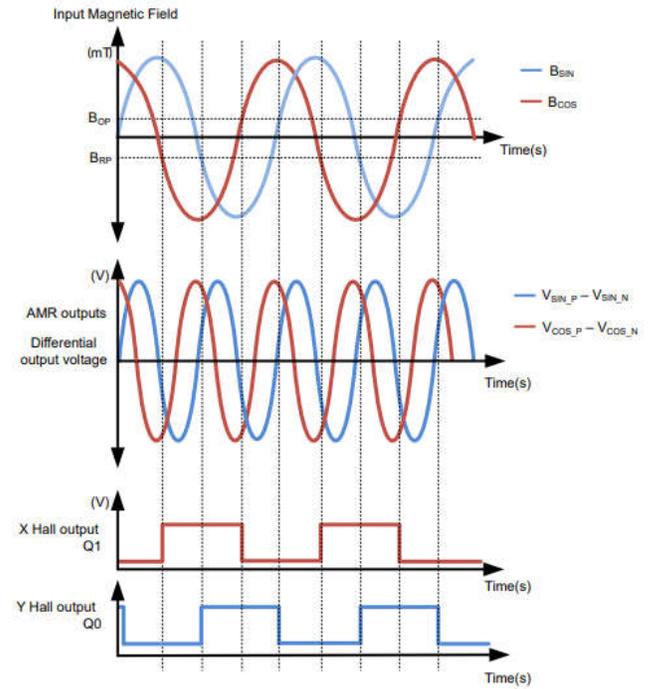


그림 5. TMAG6180-Q1 출력 파형.

정확도를 개선하려면 MCU에 고속, 고 ENOB ADC(아날로그-디지털) 컨버터를 통합해야 하고, 유한 임펄스 응답 필터와 같은 디지털 필터를 실행하여 신호-체인 잡음을 제거할 수 있어야 하며, 기계적 허용 오차와 신호 체인의 게인 및 오프셋 불일치로 인한 오류를 제거하기 위한 추가적인 보상 알고리즘도 있어야 합니다. **AMR 센서를 지원하는 고분해능, 저지연, 콤팩트 절대각 인코더 레퍼런스 설계**는 TMAG6180-Q1 및 **MSPM0G3507** MCU를 사용한 소형 폼 팩터(직경 3cm) 레퍼런스 설계로, 최대 128배 오버샘플링이 가능한 통합 듀얼 12비트 ADC와 수학 가속기를 탑재하여 효율성을 높이고 시스템 비용을 절감합니다. 이 시스템은 15.4 ENOB에 해당하는 94.7dB SNR의 각도 측정을 실현하며, 각도 오차는 0.05° 미만입니다(**그림 6** 참조).

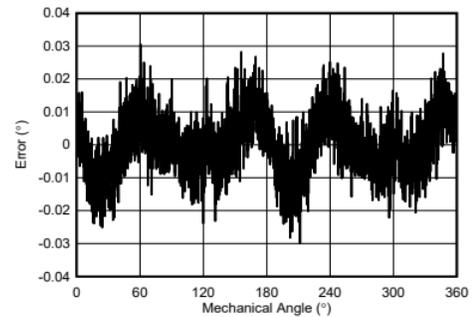


그림 6. 25°C에서 오프셋 보정 시 1회전 동안의 각도 오차.

유도성 위치 감지

유도성 각도 센서는 자기 센서와 비교해 몇 가지 장점이 있습니다. 주된 장점은 외부 DC 필드에 대한 본질적인 자기 내성이 있다는 것입니다. 또한 유도성 기술은 전도성 금속 대상만(자석은 필요 없음) 감지 코일 근처에 있으면 샤프트를 중심으로 회전하는 금속 대상의 위치를 측정할 수 있습니다.

그림 7에 **LDC5072-Q1** 유도성 센서를 감지 코일 한 개당 하나씩, 2개 사용한 절대 인코더를 표시했습니다. Nonius 인코딩의 경우 감지 코일이 2개 필요합니다. 외부 센서 대

상에 금속 위치가 16개, 내부 대상에 15개 있을 수 있습니다. 두 대상의 간격을 고르게 띄우면 회전 전체에 고유한 패턴이 적용되어 높은 정밀도로 절대각을 알 수 있습니다.

기계식 리졸버는 절대적 유도성 인코더와 같은 기능을 수행하지만, 크기와 무게 면에서 불리합니다. 유도성 인코딩 솔루션은 PCB에 직접 구축할 수 있지만, 리졸버는 구리선을 감은 톱니가 있는 두꺼운 강철 라미네이션 위에 구축합니다. 또한 리졸버는 기계 구조 때문에 구축 비용이 많이 듭니다. 마지막으로, 리졸버는 500mW의 전력을 쉽게 소모하기 때문에(7V_{RMS}에서 70mA로 가정) 소비 전력도 문제가 될 수 있습니다.

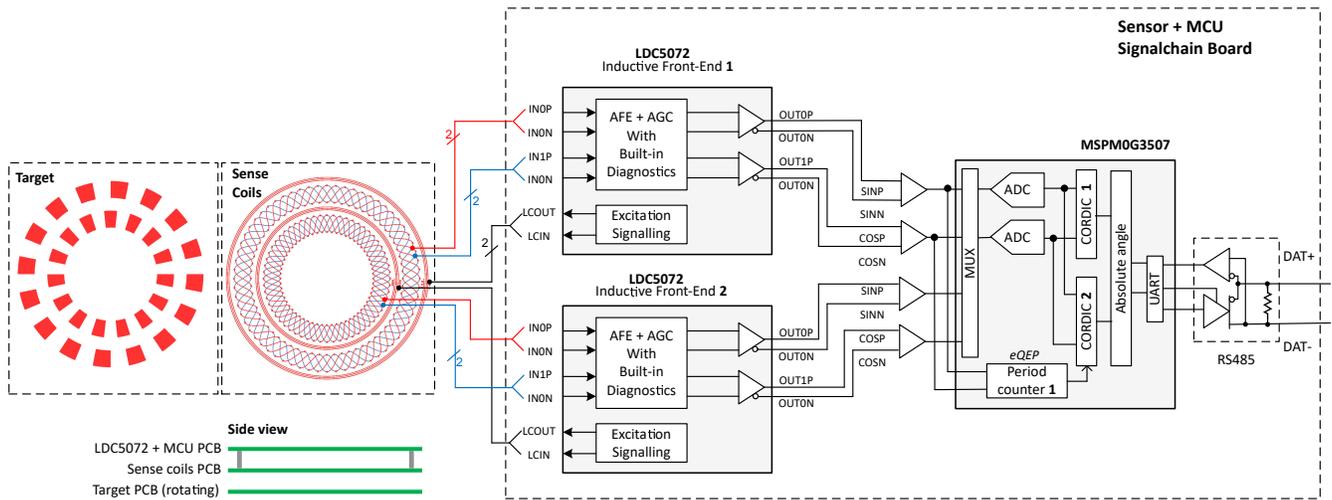


그림 7. LDC5072-Q1을 사용한 절대 인코더.

결론

가장 적절한 위치 센서 선택은 모터 드라이브 시스템 요구 사항에 따라 결정되며, 비용, 성능, 작동 온도, 크기 간의 상충 관계가 가장 중요한 고려 사항입니다. 또 다른 고려 사항은 산업용 또는 차량용 솔루션에 추가 진단 기능이나 기능 안전성을 구현할지 여부입니다. 모터와 인코더는 유형별로 고유한 요구 사항이 있으므로, 애플리케이션에 가장 적합한 센서 유형을 선택하는 것이 중요합니다.

추가 리소스

- 애플리케이션 개요, **휴머노이드 로봇의 모터 컨트롤**을 읽어보세요.
- **정밀한 모터 위치 컨트롤을 위한 홀 효과 센서가 있는 절대각 인코더 레퍼런스 설계**를 참조하세요.

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.

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.
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 © 2025, Texas Instruments Incorporated