

Application Brief

휴머노이드 로봇의 GaN FET 애플리케이션



Eason Tian, Kyle Wolf

머리말

휴머노이드 로봇은 서보 제어 시스템, BMS(배터리 관리 시스템), 센서 시스템, AI 시스템 제어 등을 비롯한 수많은 하위 시스템을 통합합니다. 이 복잡한 시스템의 원활한 작동을 유지하면서 이러한 시스템을 인간형 로봇의 체적에 통합할 때 크기 및 방열 요구 사항을 충족하는 것은 까다로운 일입니다. 휴머노이드 로봇에서 공간 제약이 가장 큰 하위 시스템은 서보 제어 시스템입니다. 인간과 유사한 동작 범위를 얻기 위해 약 40개의 서보 모터(PMSM) 및 제어 시스템이 일반적으로 로봇 전체에 분배됩니다. 모터는 목, 몸통, 팔, 다리, 발가락 등 신체의 다른 부분에 분배됩니다. 이 개수에는 손에 탑재되는 모터는 포함되어 있지 않습니다. 사람의 손이 가진 자유로운 움직임을 시뮬레이션하기 위해 하나의 손에는 12개 이상의 마이크로 모터를 통합할 수 있습니다. 이러한 모터의 전력 요구 사항은 수행되는 구체적인 기능에 따라 달라집니다. 예를 들어, 로봇의 손가락을 구동하는 모터에는 몇 암페어만 필요할 수 있지만, 둔부 또는 다리를 구동하는 모터에는 100암페어 이상이 필요할 수 있습니다.

휴머노이드 로봇용 서보 시스템은 전통적인 서보 시스템과 비교하여 더 높은 수준의 제어 정확도, 크기 및 방열 특성을 요구합니다. 이 문서에서는 모터 구동에서 GaN(질화 갈륨) 기술이 가지는 다양한 이점을 설명하고 GaN이 휴머노이드 로봇의 서보 시스템에 의해 발생하는 문제를 해결하는 데 어떻게 도움을 주는지 보여줍니다.

더 정밀한 제어

서보 모터 구동 애플리케이션에서 모터 컨트롤은 일반적으로 전류/토크 루프, 속도 루프, 위치 루프 및 상위 수준의 모션 제어 루프와 같은 여러 제어 루프 계층으로 구분됩니다. 이러한 루프는 일반적으로 실시간 처리 요구 사항에 따라 각각 계단식으로 배열됩니다. 전류/토크 루프는 가장 빠른 제어 루프입니다. 각 업스트림 루프는 사전에 여러 루프에서 실행되며 다운스트림 루프에 입력 참조를 제공합니다. **그림 1**은(는) 일반적인 계단식 제어 토폴로지를 보여줍니다.

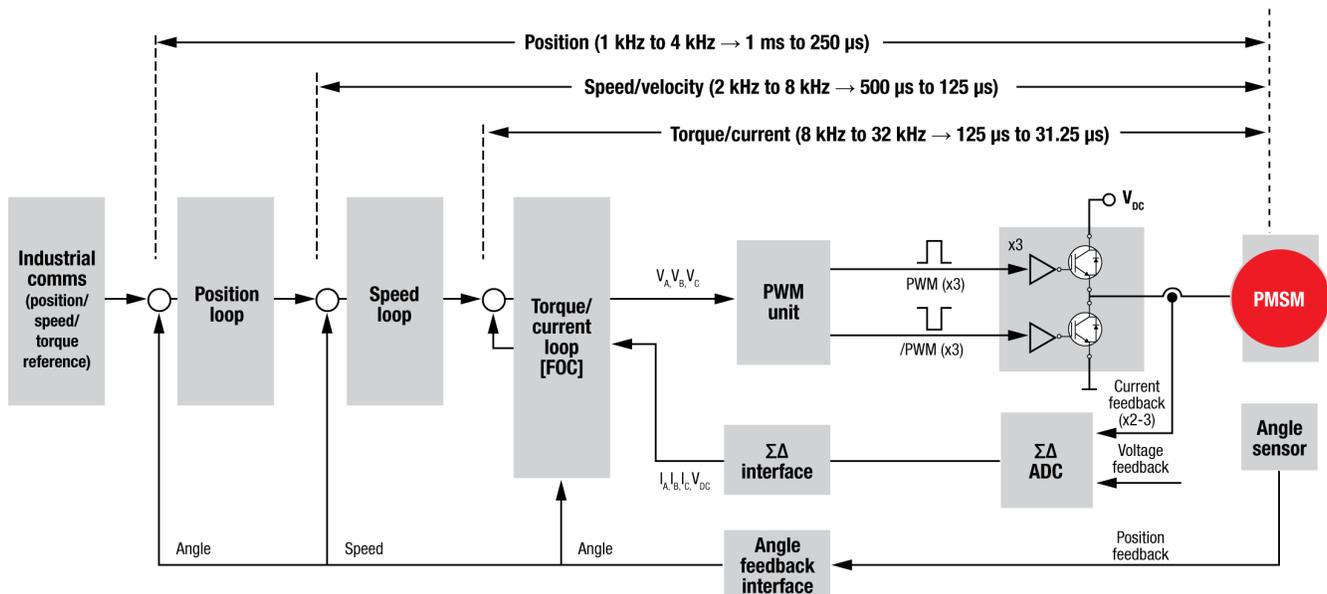


그림 1. 일반적인 서보 모터 컨트롤 루프 기술

제어 루프에서 가장 중요한 부분은 전류 루프입니다. 일반적으로 FET 스위칭 주파수는 전류 루프와 동일한 약 8kHz~32kHz입니다. 전류 루프의 속도는 모터 컨트롤의 정확도와 응답 속도에 직접적인 영향을 미칩니다. 휴머노이드 로봇의 간단한 동작을 위해서는 많은 서보 모터의 제어가 수반됩니다. 시스템의 안정성을 유지하면서 로봇 본체에 탑재된 근 40개의 모터를 조정

하기 위해서는 각 관절의 제어 정확도 및 응답 속도가 매우 높은 요구 사항에 부합해야 합니다. 모터 컨트롤 루프의 속도 및 PWM 주파수를 높이면 이러한 요구 사항을 충족할 수 있습니다. 예를 들어, 스위칭 주파수가 100kHz(그림 2)이면 더 높은 해상도의 모터 전류를 얻을 수 있어 모터 전류 리플이 더 작아지고 제어가 더 정밀해집니다. 또한 모터 전류 파형이 고해상도이면 더 나은 정현파 전류를 얻을 수 있습니다. 즉, 모터의 작동 효율성이 높아지고 모터 발열이 줄어듭니다.

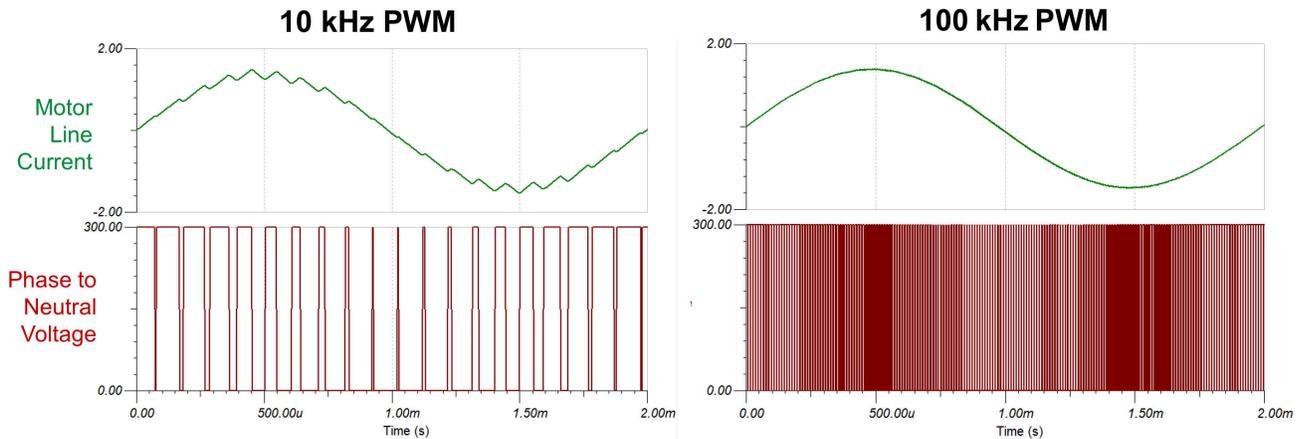


그림 2. 100kHz 및 10kHz PWM 모터 전류

이 외에도 PWM 스위칭 주파수를 높이면 DC 버스 커패시터 크기 및 커패시턴스를 줄일 수 있습니다. 버스 커패시턴스 요구 사항이 더 낮아지면 전해 커패시터를 세라믹 커패시터로 교체할 수 있습니다. 서보 전력계 FET는 PWM 신호를 사용하여 버스 커패시터에서 주기적으로 전류를 가져옵니다. PWM 주파수가 높아지면 단위 시간당 가져오는 전하 양이 더 적어져 필요한 버스 커패시터가 감소하게 됩니다. TIDA-010936의 테스트에 따르면 PWM 주파수를 20kHz에서 80kHz로 높인 후 전해 커패시터를 동일한 커패시턴스의 세라믹 커패시터로 교체하는 경우 유사한 버스 전압 리플을 얻을 수 있습니다. 세라믹 커패시터는 전해 커패시터에 비해 더 작은 크기, 더 긴 수명, 향상된 고주파 특성 등 분명한 이점을 가지고 있습니다.

따라서 휴머노이드 로봇을 설계할 때는 더 빠른 속도의 전류 루프 및 PWM 주파수를 고려해야 합니다. MOSFET 기반 서보 드라이버의 경우 PWM 스위칭 주파수가 높아지면 큰 추가 손실이 발생하여 드라이버의 발열이 심각한 수준까지 상승합니다. 스위칭 주파수를 10kHz에서 20kHz로 높이면 MOSFET 기반 드라이버에서 전체적인 손실이 20%~30% 증가하게 되며, 이는 휴머노이드 로봇에서는 허용되지 않는 수준입니다. 다른 대체 방법인 GaN FET의 경우 고주파에서 낮은 스위칭 손실 특성을 보입니다. TIDA-010936 테스트에서 40kHz 및 80kHz에서의 보드 손실이 거의 동일한 것으로 드러났기 때문에, GaN은 높은 스위칭 주파수 시나리오에 특히 적합합니다.

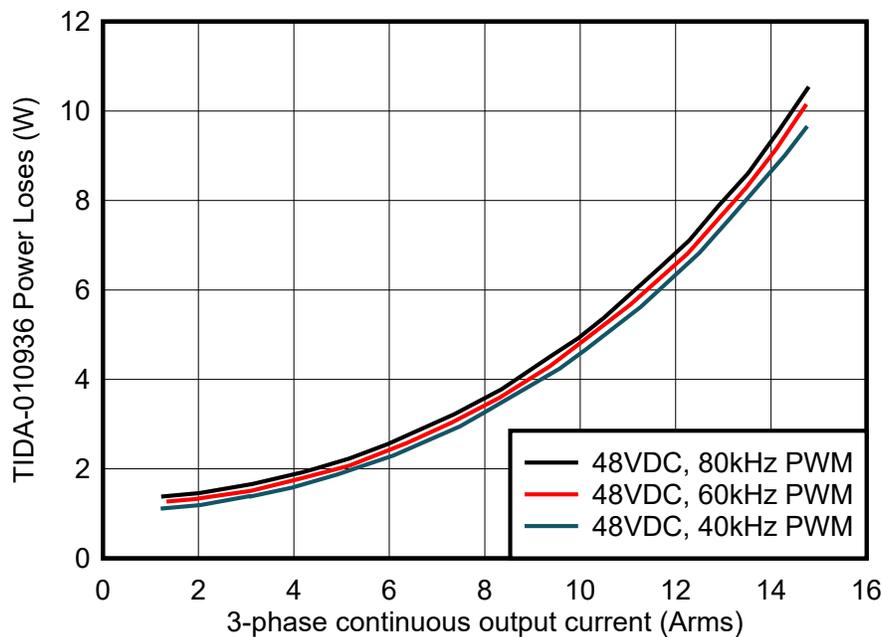


그림 3. TIDA-010936: 48V 입력 대 3상 출력 전류에서의 보드 손실

더 낮은 스위칭 손실

이와 같이 GaN의 스위칭 손실이 낮은 이유는 GaN 장치의 특성 덕분입니다. GaN 장치는 더 작은 게이트 커패시턴스(Cg) 및 더 작은 출력 커패시턴스(Coss)를 가지고 있어 Si-MOSFET보다 100배 더 빠른 스위칭 속도가 가능합니다. 턴오프 및 턴온 시간이 짧아지면 10~20ns와 같이 더 짧은 범위 내에서 데드 타임을 제어할 수 있습니다. 이와 달리 MOSFET의 경우에는 일반적으로 약 1us의 데드 타임이 필요합니다. 데드 타임이 감소하면 스위칭 손실이 줄어듭니다. 또한, GaN FET에는 바디 다이오드가 없지만, 3사분면 작동을 통해 프리휠링 기능이 구현됩니다. 고주파 PWM 시나리오에서는 MOSFET의 바디 다이오드가 큰 역복구 손실(Qrr 손실)을 유발합니다. 3사분면 작동은 바디 다이오드에 의해 발생하는 EMI 및 스위치 노드 링잉의 위험도 방지하여 높은 전력 밀도를 지닌 휴머노이드 로봇의 다른 장치와 간섭이 발생하는 현상을 줄일 수 있습니다.

더 작은 크기

휴머노이드 로봇의 관절 공간은 제한적입니다. 파워 보드는 일반적으로 직경이 5~10cm인 원형 PCB입니다. 또한, 관절에는 모터, 감속기, 인코더뿐만 아니라 센서까지 통합되어야 합니다. 결정적으로 설계자는 제한된 공간에서 더 큰 힘을 얻고 더 안정적인 모터 컨트롤 특성을 구현해야 합니다. MOSFET과 비교하여 GaN은 Rsp(비저항, 영역 대 다이 크기 비교)가 더 작으므로 Rds(on)이 동일한 MOSFET과 비교하여 GaN의 다이 영역이 더 작습니다. 텍사스 인스트루먼트는 FET 및 게이트 드라이버를 통합하여 풋프린트 영역을 추가로 줄입니다. 이를 통해 단지 4.5 x 5.5mm 크기의 패키지에 4.4mΩ 하프 브리지 + 게이트 드라이버를 통합할 수 있습니다.

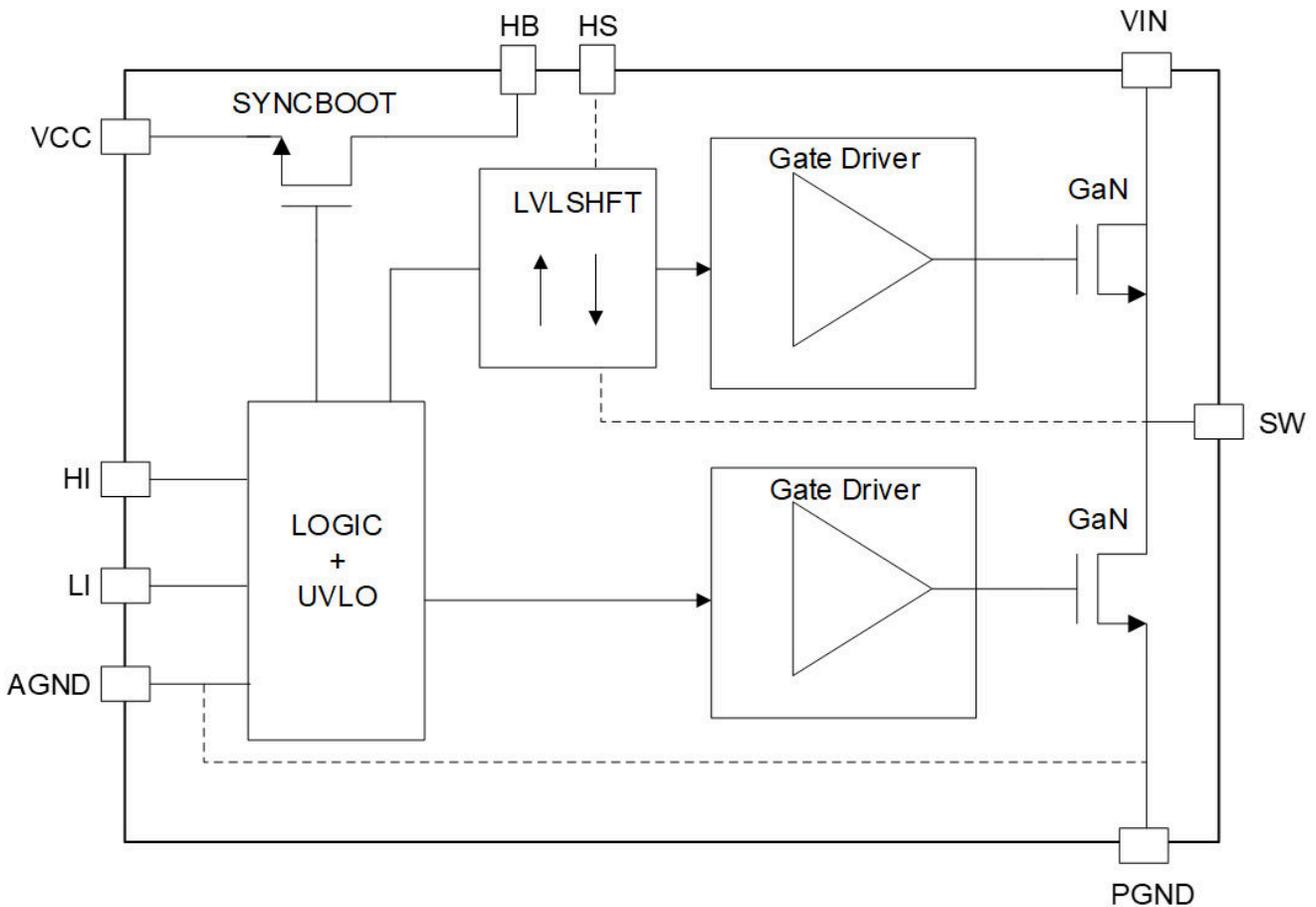


그림 4. LMG2100 블록 다이어그램

LMG2100R026을 예로 들어보겠습니다. 이 장치는 하프 브리지 및 하프 브리지 드라이버의 FET를 통합하고 55A의 연속 전류를 견딜 수 있습니다. 드라이버를 FET와 통합하면 다음과 같은 많은 이점이 있습니다.

- 게이트 링잉을 줄여 작동의 신뢰성이 높아짐
- 최적화된 패키지 풋프린트를 통해 전력 루프 인덕턴스가 감소함
- 게이트 드라이버를 통합하여 크기가 감소함
- 통합 보호 기능으로 장치 보호

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 침해에 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.com](https://www.ti.com)에서 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 © 2025, 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](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