

*Application Note***48V 차량용 시스템을 위한 모터 드라이버 회전율 고려 사항**

Akshay Rajeev Menon, Joseph Ferri

추상

최근 자동차 산업은 정부 기관의 환경 규제와 함께 시장의 전기화 추세에 의해 주도되고 있는 중요한 변화를 겪고 있습니다. EV(전기 자동차) 프로젝트에 더 많은 OEM(Original Equipment Manufacturer)이 참여하면서 48V 아키텍처 도입이 매우 빠르게 진행되고 있습니다. 순수 전기 자동차가 아닌 마일드 하이브리드 차량에서도 48V가 사용되고 있습니다.

48V 레일을 사용하면 연결된 시스템이 더 낮은 모터 전류로 작동할 수 있으며, 이를 통해 와이어 게이지 두께, 하네스 무게, 전력 손실 및 PCB 크기를 줄일 수 있습니다. 궁극적으로 이는 이러한 차량에서 와이어 하네스의 높은 총 비용을 줄이는 데 도움이 됩니다. EV에서 더 일반적으로 사용되는 스케이트보드 스타일의 새시는 전력 밀도 상승과 라우팅 간소화라는 48V 레일의 이점을 활용할 수도 있습니다.

많은 차량용 시스템에서 BLDC(브러시리스 DC) 모터는 더 높은 효율, 더 긴 수명, EMI 감소, 더 조용한 작동 및 정밀한 제어 기능으로 인해 사용됩니다. 이러한 모터는 제동, 스티어링, 변속, 액티브 서스펜션, 펌프, 송풍기 등 차량 전체에서 다양한 목적으로 사용됩니다. 기존 12V 아키텍처에서의 이러한 전환을 통해 BLDC(브러시리스 DC) 모터 시스템의 성능이 변경되며 다시 고려해야 할 몇 가지 사항이 있습니다.

48V 전압 레벨에서는 여러 가지 새로운 시스템 수준 고려 사항이 있지만, 이 애플리케이션 노트에서는 MOSFET 전력 손실과 12V에서 48V 시스템으로 전환할 때 전력 손실이 어떻게 변하는지에 대해 중점적으로 다룹니다.

목차

1 소개	2
2 모터 드라이버 시스템의 전력 손실 및 열	2
2.1 전도 손실.....	2
2.2 스위칭 손실.....	3
3 실제 모터 드라이버 제한 사항	5
3.1 EMI(전자기 간섭) - 시스템 잡음 고려 사항.....	5
3.2 모터 드라이버 전압 허용 오차.....	5
4 요약	6
5 참고 자료	6

상표

모든 상표는 해당 소유자의 자산입니다.

1 소개

BLDC 모터는 여러 차량용 시스템에서 다양한 기능을 갖고 있습니다. 기존에는 BLDC 시스템의 가장 일반적인 전압 범위는 12V입니다. 이러한 시스템에 48V 레일을 도입하는 경우에는 MOSFET 전력 손실에 미치는 영향을 이해하는 것이 중요합니다. 작동 발열을 완화하고 배터리 충전을 유지하려면 전력 손실의 원인을 관리하는 것이 핵심입니다.

이 애플리케이션 노트에서는 전도 손실, 스위칭 손실, EMI 등을 포함하여 48V로 전환할 때 새로운 시스템 수준의 고려 사항에 대해 설명합니다. 모든 추가 예와 계산에서 12V 및 48V 모두에 960W 전력 레벨이 사용되며, 이는 12V에서 80A, 48V에서 20A를 사용함을 의미합니다.

2 모터 드라이버 시스템의 전력 손실 및 열

BLDC 모터는 MOSFET 하프 브리지의 3상 전기적 정류를 통해 전기적 전위 에너지를 기계적 운동 에너지로 변환합니다. 배터리에서 모터로 전력을 공급하는 MOSFET은 모터 드라이버 시스템에서 전력 손실과 발열에 가장 크게 기여합니다.

전력 손실은 다음과 같은 사항에 영향을 미치므로 시스템 설계 시 고려해야 할 중요한 요소입니다.

사용자 경험 - 높은 열은 사용성에 영향을 미치며 사용자의 불편함을 유발할 수 있습니다.

장치 안정성 - 높은 온도의 작동으로 인해 마모와 파열이 가속화되고 수명 안정성에 영향을 줄 수 있습니다.

전력 효율성 - 배터리 수명을 줄이고, 차량 주행 거리를 줄이며, 열 설계 관련 과제를 증가시킵니다.

이 애플리케이션 노트에서는 MOSFET과 관련된 전력 손실의 두 가지 주요 분야인 전도 손실과 스위칭 손실을 중점적으로 다룹니다.

2.1 전도 손실

MOSFET의 전도 손실은 전류가 드레인에서 소스로 전도될 때 발생합니다. 전도하면서 MOSFET의 채널 저항을 보통 온 상태 저항($R_{ds(on)}$)이라고 합니다. 이러한 손실은 전류의 제곱값으로 커지므로 모터 전류는 전도 손실을 결정하는 중요한 요인이 됩니다. FOC 정류 중 발생하는 전도 손실은 다음과 같은 공식을 사용하여 계산합니다.

$$P_{conduction} = 3 \times I_{RMS}^2 \times R_{ds(on)} \quad (1)$$

예 1

총 전력이 960W인 두 대의 시스템을 가정합니다.

시스템 A = 12V 배터리

시스템 B = 48V 배터리

$$P = I \times V \quad (2)$$

방정식 2(를) 바탕으로 12V와 48V 시스템 모두에 대해 동일한 전력 출력이 가정되면 음의 법칙을 사용하여 48V 시스템이 4배 적은 전류로 작동한다는 것을 추측할 수 있습니다. 따라서 더 적은 전류가 MOSFET을 통과하므로 방정식 1에 따라 48V 시스템에서 전도 손실이 16배 줄어듭니다. 그림 2-1에서는 예 1에 표시된 손실을 보여줍니다.

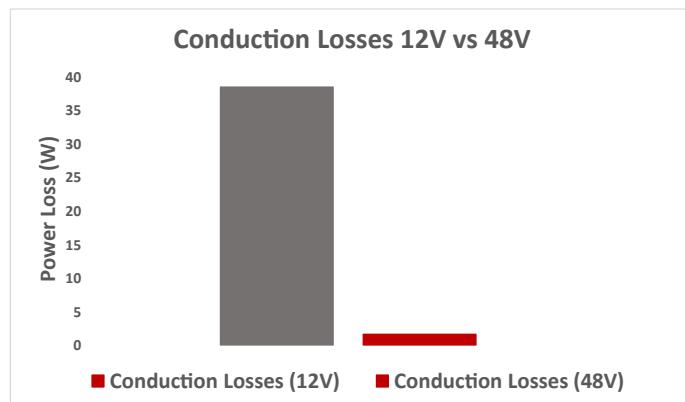


그림 2-1. 12V 및 48V 전도 손실

2.2 스위칭 손실

스위칭 손실은 MOSFET을 켜거나 끌 때 손실되는 에너지와 관련된 또 다른 형태의 전력 손실입니다. 이러한 손실은 드레인-소스 전압을 완전히 회전하는 데 필요한 시간 및 MOSFET의 스위칭 주파수와 정비례합니다.

FOC 정류 중 발생하는 스위칭 손실은 다음 공식을 사용하여 계산됩니다.

$$P_{switching} = 3 \times I_{RMS} \times V_{peak} \times T_{rise/fall} \times F_{PWM} \quad (3)$$

12V 차량용 시스템에서는 전도 손실이 총 소비 전력의 지배적인 요인이므로 스위칭 손실은 관심사가 아닙니다. 그러나 자동차 제조업체가 48V EV/하이브리드 시스템으로 전환함에 따라 스위칭 손실이 총 손실에서 더 지배적인 요인이 되고 있습니다. 시장 변화의 이러한 추세에 따라 더 많은 엔지니어들이 총 소비 전력을 줄이기 위해 스위칭 동작을 최적화하게 되었습니다.

주요 매개 변수는 배터리 전압에 대한 MOSFET의 회전 시간입니다. 회전 시간을 줄이면 ($\frac{Voltage}{T_{rise/fall}}$) MOSFET을 더 효율적으로 스위칭할 수 있습니다. 모터 드라이버의 게이트 전류를 증가시키면 회전율 시간이 단축되므로 회전율이 빨라집니다. 그림 2-2에서는 회전율이 스위칭 손실에 미치는 영향을 보여줍니다.

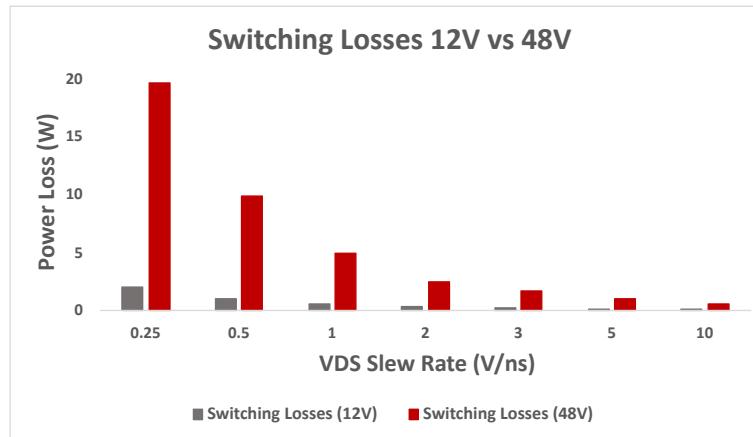


그림 2-2. 12V 및 48V 스위칭 손실

2.2.1 스위칭 주파수의 효과

시스템에서 스위칭 손실량에 큰 영향을 미칠 수 있는 또 다른 요소는 입력 PWM 신호의 주파수입니다. MOSFET은 각 입력 펄스의 시작과 끝 모두에서 스위칭 영역으로 들어가야 합니다(턴오프 및 턴온). PWM 주파수가 높을수록 이러한 펄스가 더 자주 발생하므로 각 MOSFET이 스위칭 영역에서 소비하는 시간이 증가합니다. 즉, 스위칭 손실의 양과 입력 PWM 신호의 주파수 사이에 비례하는 관계가 있음을 의미합니다([그림 2-3 참조](#)). 48V 시스템에서 PWM 주파수에 대한 일반적인 값은 약 20kHz입니다. 이 값을 목표로 하는 이유는 이 주파수가 사람의 가청 범위를 벗어날 수 있을 정도로 높지만 스위칭 손실과 잡음을 완화하기 위해 낮게 유지되기 때문입니다.



그림 2-3. 스위칭 손실(0.5V/ns에서 48V)

3 실제 모터 드라이버 제한 사항

이론적으로 가장 빠른 회전율로 작동하는 것이 모터 드라이버 시스템을 최적화하고 스위칭 전력 손실을 줄이는 핵심입니다. 그러나 실제로는 다음과 같은 제한 사항이 있습니다.

3.1 EMI(전자기 간섭) - 시스템 잡음 고려 사항

MOSFET의 더 빠른 스위칭으로 빠른 전압 과도가 발생하며, 여기에는 EMI로 전달되는 고주파 성분이 포함됩니다. 모든 회로에는 기생 인덕턴스와 커패시턴스가 있으며 이러한 L-C 구성 요소의 빠른 여리로 특정 주파수가 더욱 증폭되는 공진 회로가 생성될 수 있습니다. 이러한 주파수는 시스템의 나머지 부분에 간섭을 일으킬 수 있습니다. 차량용 시스템에는 엄격한 EMI 주파수 상한 요구 사항(예: CISPR 25 규격 준수)이 적용되므로 최종 시스템에 구현할 수 있는 회전율에 제한이 있습니다.

3.2 모터 드라이버 전압 허용 오차

전압 회전율이 증가하면 MOSFET의 게이트 및 소스 신호에서 전압 링잉(오버슈트 및 언더슈트)가 발생합니다. 오버슈트의 크기는 회전율에 따라 직접적으로 바뀝니다(게이트 전류에 의해 제어됨). 게이트 전류가 회전률 및 링잉에 미치는 영향은 [그림 3-1](#)을(를) 참조하세요. 전압 스파이크가 모터 드라이버의 최대 정격 절대값, 특히 게이트 및 소스 편 정격을 위반하지 않도록 해야 할 책임은 시스템 설계 엔지니어에게 있습니다. 모터 드라이버의 정격값을 초과하여 작동하는 경우 장치 성능과 안정성에 영향을 미치며, 이는 예상치 못한 동작/조기 마모를 유발합니다.

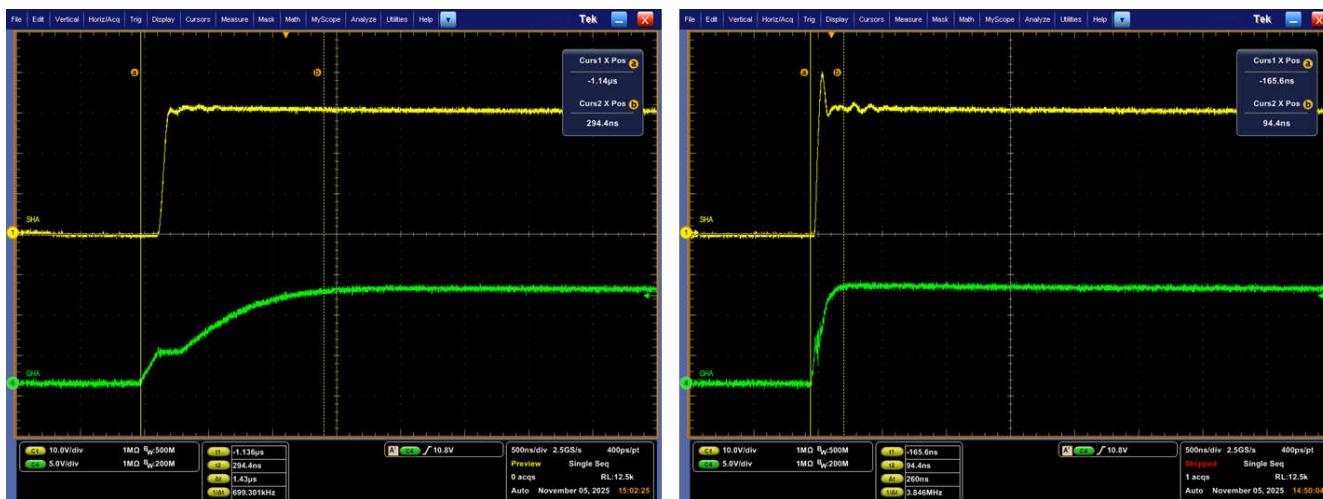


그림 3-1. 게이트 전류가 회전율과 링잉에 미치는 영향: a) 게이트 전류 - 64mA(왼쪽) b) 게이트 전류 - 1,024mA(오른쪽)

간과되는 또 다른 중요한 사양은 모터 드라이버의 소스 노드에 의해 허용되는 최대 절대 회전율입니다. 많은 구형 장치와 주요 경쟁사 장치의 최대 절대 회전율 사양은 $1\text{V}/\mu\text{s}$ 이므로 스위칭 속도가 제한됩니다. 또한 MOSFET 전압 드레인-소스 회전은 커패시터 충전 아날로그이기 때문에 선형이 아니라 S 곡선과 유사하다는 점도 주목할 만합니다. 즉, 회전율이 중간 부분에서 장치 정격보다 높을 수 있습니다. 따라서 스위칭 효율을 위해 더 빠른 회전 스위칭 시간을 필요로 하는 고객에게는 심각한 제한이 있습니다. 텍사스 인스트루먼트의 새로운 48V 드라이버 [DRV8363-Q1](#)은 이러한 점을 염두에 두고 특별히 설계되었으며 소스 노드에서 최대 $20\text{V}/\mu\text{s}$ 의 회전율 허용 오차를 제공합니다. [DRV8363-Q1](#)의 새로운 정격은 더 빠른 회전율을 위해 시스템 견고성을 높여서 드라이버가 시스템 성능을 제한하지 않도록 합니다.

RC 스너버를 추가하거나 적절한 PCB 설계 관행을 따라 링잉의 영향을 줄일 수 있습니다. 궁극적으로 시스템 설계 엔지니어는 시스템의 게이트 전류를 선택하기 전에 EMI 제한 사항과 드라이버 전압 정격을 고려해야 합니다. 시스템의 최적 회전율에 영향을 미치는 기생에 대한 전반적인 PCB 견고성을 포함하여 어느 쪽이든 장점과 단점이 있습니다.

4 요약

BLDC 시스템이 차량용 시스템에서 48V로 전환됨에 따라 MOSFET 스위칭 손실은 더 이상 무시할 수 없는 중요한 요소가 되었습니다. 손실의 주요 원인이 전도에서 스위칭으로 바뀌면 모터 드라이브 시스템의 최적화 방법이 변경됩니다.

높은 회전율은 스위칭 손실을 줄이는 데 도움이 될 수 있지만, EMI 및 링잉과 같은 더 빠른 회전율의 악영향을 고려하는 것이 중요합니다. 회전율이 너무 과도하면 시스템은 전압 오버슈트, 정전식 커플링, 심지어 원치 않는 턴온에 취약해질 수 있습니다. PCB 레이아웃과 적절한 소스 및 싱크 전류 설정을 선택하는 것은 시스템을 최적화하는 데 매우 중요합니다. 이러한 요소의 균형을 유지함으로써 설계자는 [DRV8363-Q1](#)을 사용하여 강력한 48V 시스템을 만들 수 있으며, 이는 장치의 회전율 성능에 의해 제한되지 않습니다.

5 참고 자료

- 텍사스 인스트루먼트, [DRV8363-Q1 정확한 전류 감지 및 고급 모니터링을 지원하는 48V 배터리 3상 스마트 게이트 드라이버](#), 데이터 시트.
- 텍사스 인스트루먼트, [DRV8363-Q1EVM](#), 평가 모듈.

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 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 [TI의 판매 약관](#), [TI의 일반 품질 지침](#) 또는 [ti.com](#)이나 해당 TI 제품과 함께 제공되는 기타 조건의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다. TI가 명시적으로 제품을 사용자 정의 또는 고객 정의용으로 지정하지 않는 한, TI 제품은 범용의 표준 카탈로그 장치입니다.

TI는 사용자가 제안할 수 있는 어떠한 추가적이거나 상이한 조건도 반대하며 이를 거부합니다.

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

최종 업데이트: 2025/10/25

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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](#), [TI's General Quality Guidelines](#), 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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025