

Application Note

절연 증폭기를 위한 부트스트랩 충전 펌프 전원 공급 장치 설계



Maggie Lee

추상

절연 증폭기는 입력 신호와 출력 신호 사이의 절연을 제공하며, 이는 모터 드라이브의 위상 전류 감지와 같은 많은 애플리케이션에 유용합니다. 절연 증폭기에 고압측 전원을 제공하는 것은 어려울 수 있습니다. 이 애플리케이션 노트에서는 고압측 전원 공급 장치를 생성하는 데 사용되는 작고 저렴한 대안인 부트스트랩 충전 펌프 회로를 소개하고 이러한 회로의 설계에 대해 자세히 알아봅니다.

목차

1 머리말.....	2
2 부트스트랩 전원 공급 장치 설계.....	2
2.1 충전 펌프 커패시터 선택.....	4
2.2 TINA-TI에서 시뮬레이션.....	5
2.3 AMC1311-Q1을 사용한 하드웨어 테스트.....	8
3 요약.....	8
4 참조.....	8

그림

그림 1-1. 부트스트랩 전원 공급 장치.....	2
그림 2-1. 부트스트랩 커패시터 충전.....	3
그림 2-2. 부트스트랩 커패시터 방전.....	3
그림 2-3. 시뮬레이션 모델.....	5
그림 2-4. 커패시터 값 비교.....	5
그림 2-5. PWM 주파수 변경.....	6
그림 2-6. PWM 듀티 사이클 변경.....	7

표

표 2-1. 서로 다른 커패시터를 사용한 정상 상태 출력 전압.....	5
표 2-2. 서로 다른 주파수를 사용한 시작 시간 및 정상 상태 전압.....	6
표 2-3. 서로 다른 듀티 사이클을 사용한 시작 시간 및 정상 상태 전압.....	7

상표

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

1 머리말

절연 증폭기는 측정을 저압측에서 절연 상태로 유지하면서 상대적으로 높은 정확도로 전압 또는 전류를 측정할 수 있습니다. 이는 안전 관련 문제를 위해 고압측 전압에 절연이 필요한 애플리케이션이나, 고압측이 저압측의 컨트롤러에 손상을 줄 수 있는 갑작스러운 과도현상을 경험할 수 있는 경우에 유용합니다. 일반적인 애플리케이션으로는 고전압 모터 버스 측정 또는 모터 위상 전류 측정이 있습니다.

하지만 절연 증폭기에는 고압측 전원 공급 장치가 저압측 전원 공급 장치에서 절연되어야 하므로 크기가 커지고 복잡성이 증가할 수 있습니다. 한 가지 대안은 변압기 절연 전원 공급 장치로, 저압측에서 고압측 절연을 유지하면서 고압측 레일을 생성합니다. 하지만 변압기는 크고 비용이 많이 들 수 있습니다. 부트스트랩 충전 펌프 전원 공급 장치는 경제적인 대안입니다. 전원은 PWM(펄스 폭 변조) 신호에서 공급되며 커패시터, 다이오드 및 전류 제한 저항만 필요합니다. 경우에 따라 LDO(선형 손실 레귤레이터)도 필요할 수 있습니다.

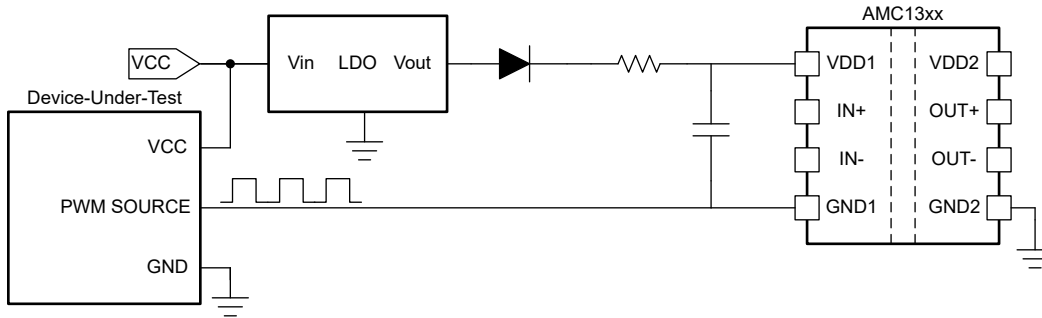


그림 1-1. 부트스트랩 전원 공급 장치

2 부트스트랩 전원 공급 장치 설계

부트스트랩은 입력 전압과 PWM 신호로 작동합니다. 입력 전압은 DUT(테스트 중인 장치)에 전원을 공급하는 동일한 공급 장치로부터 공급되며 입력 전압은 LDO를 사용하여 감압할 수 있습니다. 부트스트랩은 PWM 신호가 작동해야 하므로, PWM 신호를 생성하거나 함께 작동하는 DUT에 사용할 경우에만 신호를 사용할 수 있습니다. 그림 1-1에서 볼 수 있듯이 DUT는 증폭기의 저압측에서 반드시 절연할 필요는 없습니다. 따라서 DC-DC 전원 컨버터만 단독으로 사용할 수는 없습니다. 증폭기의 고압측은 DUT와 접지 연결을 공유하지 않습니다. PWM 신호는 절연 증폭기의 고압측 접지에 연결됩니다. 부트스트랩은 고압측 전원 공급 장치가 항상 PWM 신호 위에 배치되도록 하여 고압측 접지가 PWM 신호인데도 고압측 전원 공급 장치가 일정한 신호를 가지고 있도록 해야 합니다.

부트스트랩 회로에 대한 입력 전압이 출력 정상 상태 값을 결정하므로, 증폭기의 고압측 공급 사양을 위반하지 않도록 입력 전압이 원하는 고압측 공급 전압에 가까워야 합니다. DUT VCC 버스가 절연 증폭기의 권장 작동 조건을 벗어나는 경우 LDO가 필요합니다. LDO는 일반적으로 추가 외부 부품이 적게 필요하며, LDO는 스위칭 레귤레이터보다 더 깨끗한 신호를 생성하므로 이 애플리케이션에 LDO를 권장합니다. 부트스트랩 회로에 대한 입력 전압이 DUT 접지보다 크므로 PWM 신호가 낮을 때 다이오드 전체에 양의 전압 강하가 존재하며 그림 2-1에 나와 있는 것처럼 전도하여 커패시터를 충전합니다.

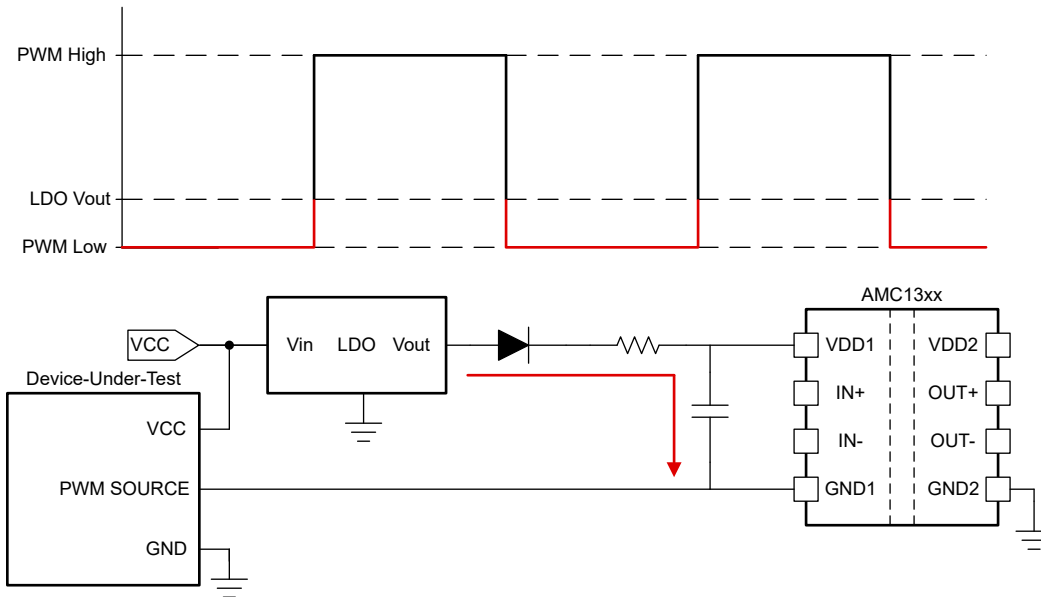


그림 2-1. 부트스트랩 커패시터 충전

PWM 신호가 높으면 커패시터 전체에 전압 강하 또는 음의 전압 강하가 없고 신호가 전도를 멈추므로 그림 2-2에서 볼 수 있는 것처럼 커패시터가 고압측 공급으로 방전됩니다. 부트스트랩 회로는 PWM 신호가 낮을 때 커패시터에 저장된 전압의 양이 PWM 신호가 높을 때 커패시터에 의해 방전된 전압의 양과 같을 때 정상 상태를 달성할 수 있습니다. 즉, 시작 시간 및 정상 상태 리플은 RC 시간 상수에 따라 달라지며 PWM 신호의 주파수 및 듀티 사이클에 영향을 받을 수 있습니다.

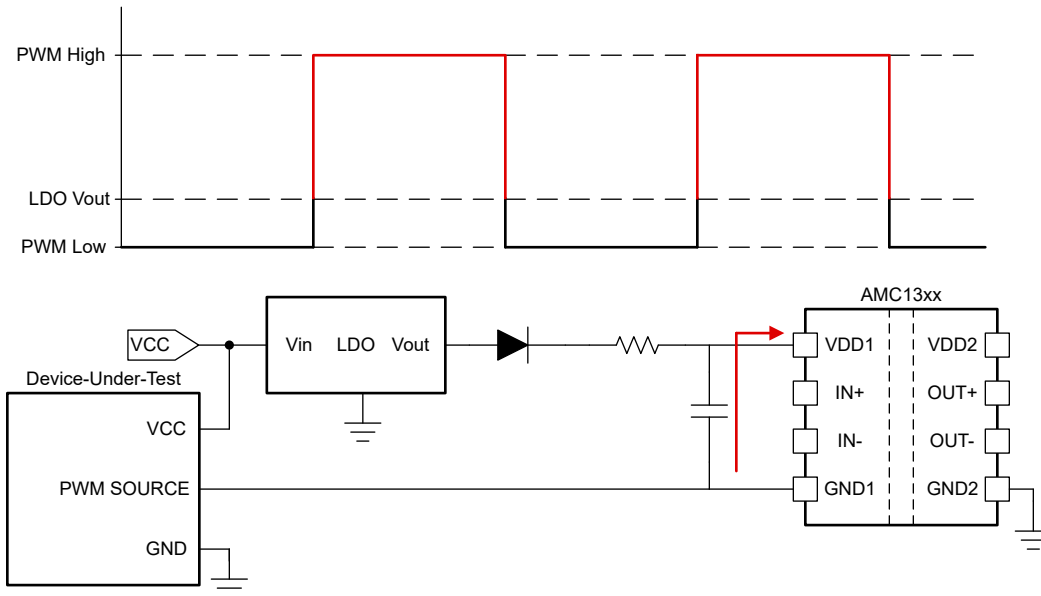


그림 2-2. 부트스트랩 커패시터 방전

2.1 충전 펌프 커패시터 선택

부트스트랩에서 공급하는 최댓값은 부트스트랩의 입력 공급에서 다이오드의 전압 강하를 뺀 값으로 근사치를 얻을 수 있습니다. 그러나 RC 회로 및 PWM 신호의 값에 따라 부트스트랩이 최댓값에 도달하기 전에 정상 상태에 도달할 수 있습니다. RC 시간 상수는 다음과 같이 정의됩니다.

$$\tau = R \times C \quad (1)$$

커패시터와 저항이 커패시터의 충전 및 방전에 대한 RC 시간 상수를 결정합니다. 시작 시간과 정상 상태 리플 사이에는 상충 관계가 있습니다. 시간 상수가 작을수록 커패시터가 더 빠르게 충전 및 방전되어 정상 상태에 더 빨리 도달할 수 있습니다. 그러나 커패시터가 정상 상태에 도달하면 커패시터가 더 큰 시간 상수를 사용할 때보다 PWM 듀티 사이클당 더 많은 전압을 충전 또는 방전할 수 있어 리플이 더 커집니다. 마찬가지로, 시간 상수가 클수록 충전 또는 방전 시간이 길어지기 때문에 리플이 감소할 수 있습니다. 커패시터 값은 다음 매개 변수를 사용하여 추정할 수 있습니다.

1. PWM 스위칭 주파수
2. PWM 듀티 사이클
3. 절연 증폭기에 전원을 공급하는 데 필요한 전류
4. 허용 가능한 리플

방정식 3에 나와 있는 것처럼 방정식 2을 다시 정렬하여 커패시턴스 값을 구할 수 있습니다.

$$Q = I \times t = \Delta V_{\text{ripple}} \times C \quad (2)$$

$$C = \frac{I \times t}{\Delta V_{\text{ripple}}} \quad (3)$$

50% 듀티 사이클과 20kHz의 스위칭 주파수를 가정하고, AMC1311-Q1 데이터 시트에서 요구되는 최대 전류를 사용했을 때, 100mV 최대 리플 요구 사항을 의무화하면 다음과 같은 최소 커패시턴스 값을 받습니다.

$$C = \frac{9.7\text{mA} \times 0.5 \times \frac{1}{20\text{kHz}}}{100\text{mV}} = 2.4\mu\text{F} \quad (4)$$

여기에서 부트스트랩을 시뮬레이션하여 시작 시간을 추정하고, 시동 시간 요구 사항에 따라 적절한 커패시터와 저항을 선택할 수 있습니다. 증폭기의 고압측에 충분한 전류가 흐를 수 없도록 막지 않는 저항을 선택해야 합니다.

2.2 TINA-TI에서 시뮬레이션

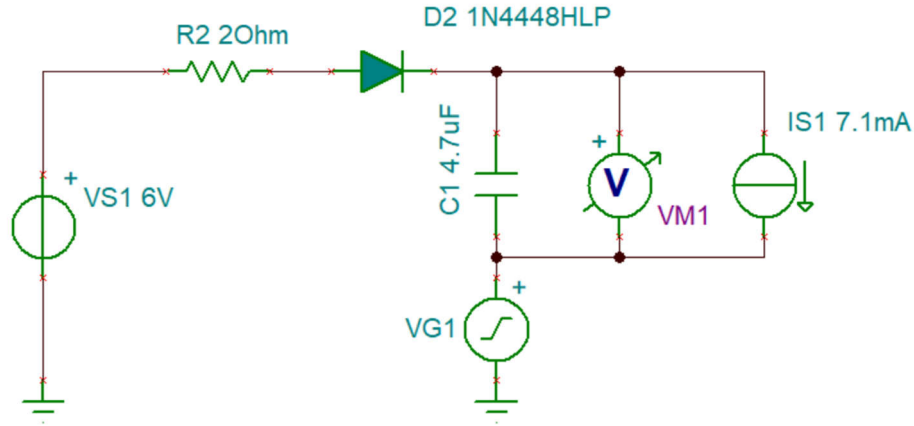


그림 2-3. 시뮬레이션 모델

VS1은 LDO의 출력이고, VG1은 PWM 신호를 시뮬레이션하는 데 사용되며, IS1은 절연 증폭기에서 유입되는 부하를 시뮬레이션합니다. VS1은 6V이고 다이오드 전체의 전압 강하는 300mV이므로, 부트스트랩의 최대 출력은 5.4V입니다. VG1은 듀티 사이클이 50%인 20kHz, 50V_{pp} PWM 신호를 소싱합니다. C1은 4개의 다른 커패시터 값을 통과합니다.

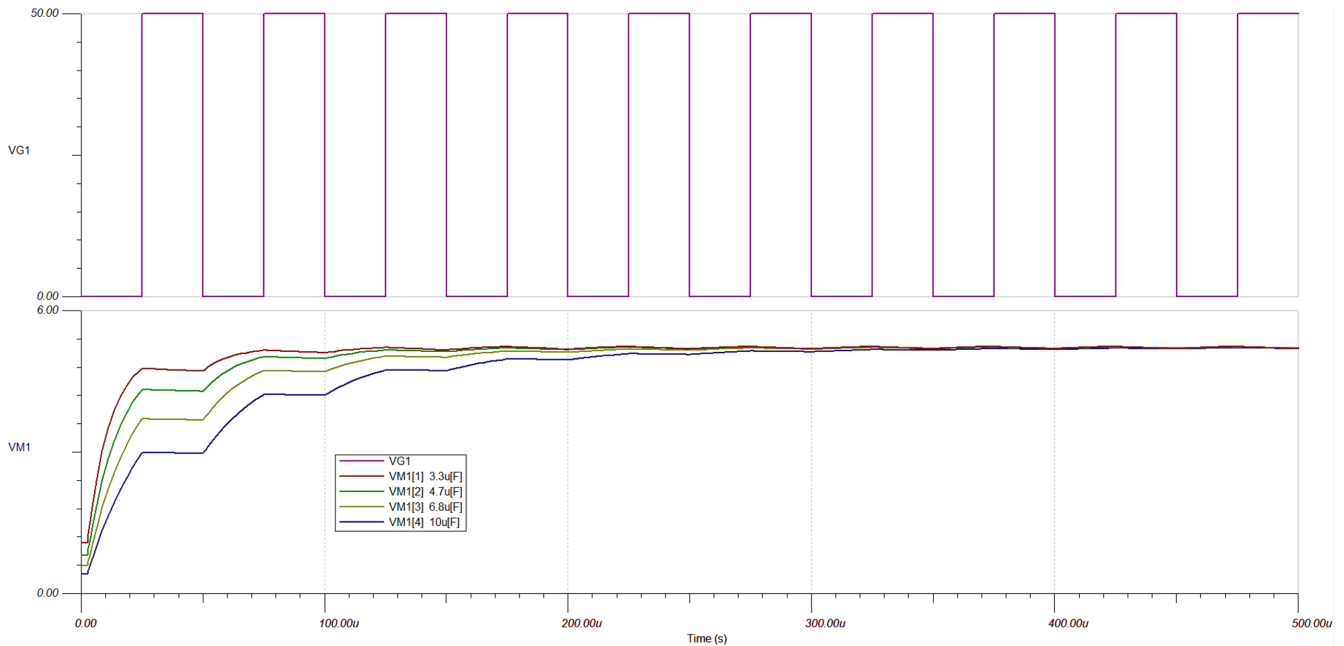


그림 2-4. 커패시터 값 비교

표 2-1. 서로 다른 커패시터를 사용한 정상 상태 출력 전압

커패시터 값(μF)	정상 상태 리플(mV)	평균 정상 상태 값(V)
3.3	53.6	5.215
4.7	37.7	5.200
6.8	25.8	5.215
10	17.7	5.215

그림 2-4에는 동일한 PWM 신호를 가진 4개의 서로 다른 커패시터 값이 나와 있습니다. 표 2-1은 다른 커패시터의 정상 상태 출력 전압을 보여줍니다. 어떤 커패시터도 이론상의 최대 정상 상태 값인 5.4V에 도달하지 않는 것을 알 수 있습니다. 하지만 리플이 감소하면 시작 시간이 확실히 증가합니다. 4.7 μ F의 신호가 시작 시간과 리플 사이의 균형을 잘 이룹니다.

부트스트랩 회로의 시작 시간과 정상 상태 리플은 입력 PWM 신호의 주파수 및 듀티 사이클에 따라 달라집니다. 시뮬레이션에서 C1을 단일 값으로 설정하고 VG1에 의해 생성되는 PWM 신호를 변경함으로써 이를 확인할 수 있습니다.

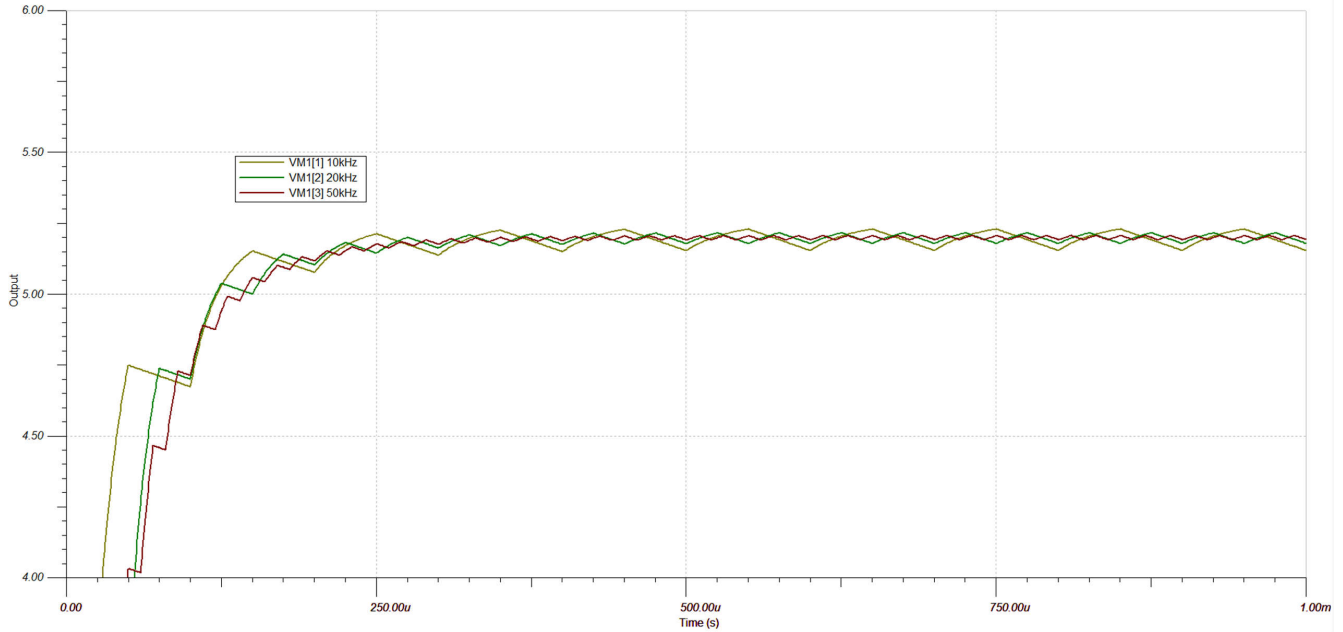


그림 2-5. PWM 주파수 변경

표 2-2. 서로 다른 주파수를 사용한 시작 시간 및 정상 상태 전압

PWM 주파수(kHz)	정상 상태 리플(mV)	평균 정상 상태 값(V)
10	75.1	5.190
20	37.7	5.200
50	14.7	5.200

C1은 4.7 μ F이며 PWM 신호는 50V_{pp} 진폭과 50% 듀티 사이클을 갖습니다. 표 2-2에서 보듯이 주파수는 시작 시간 및 평균 정상 상태에는 너무 큰 영향을 주지 않고 출력 리플에 훨씬 더 큰 영향을 미칩니다.

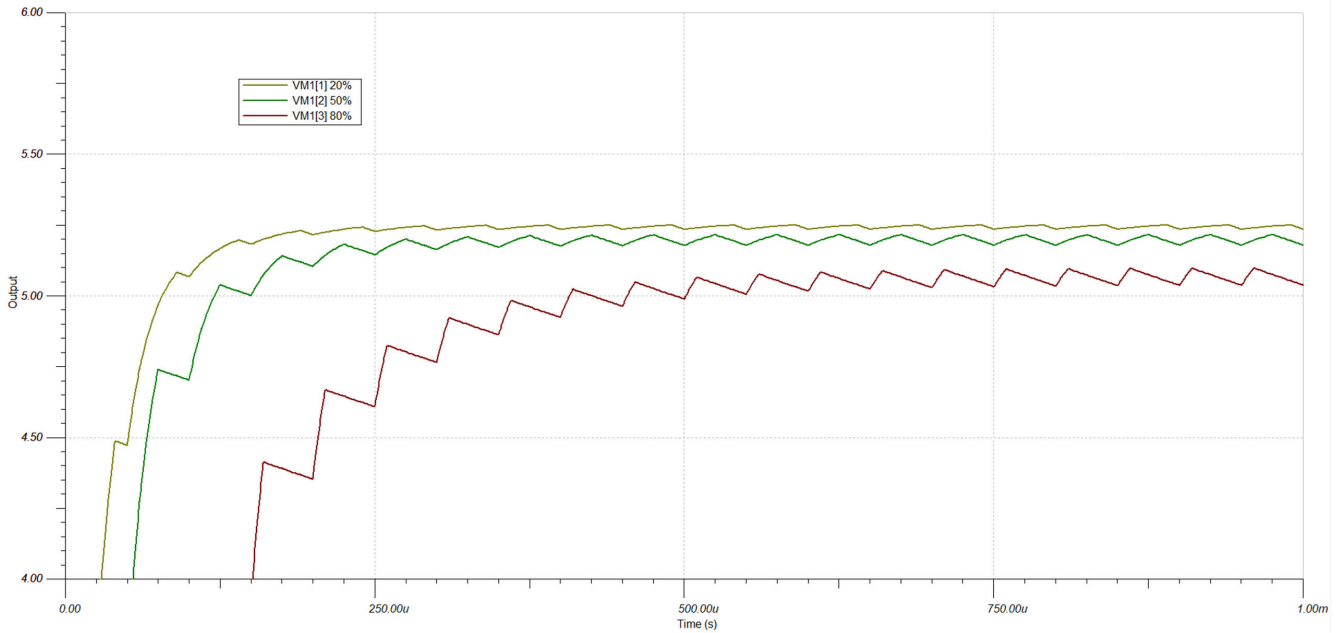


그림 2-6. PWM 듀티 사이클 변경

표 2-3. 서로 다른 듀티 사이클을 사용한 시작 시간 및 정상 상태 전압

PWM 듀티 사이클	정상 상태 리플(mV)	평균 정상 상태 값(V)
20%	14.7	5.245
50%	37.7	5.200
80%	59.9	5.070

C1은 $4.7\mu\text{F}$ 이고 PWM 신호는 50V_{pp} 진폭과 20kHz 주파수를 가집니다. 그림 2-6 및 표 2-3에서 보듯이 시작 시간과 평균 출력이 훨씬 더 많이 영향을 받습니다.

너무 많은 리플은 절연 증폭기의 성능에 영향을 줄 수 있습니다. 바운싱 전원 공급 장치가 출력에서 공통 모드 오류를 유발할 수 있기 때문입니다. 그러나 증폭기가 증폭기의 고압측 전원 공급 장치에 권장되는 최소값에 도달할 때까지 절연 증폭기는 DUT를 정확하게 측정하는 것으로 확인할 수 없습니다. 예상되는 PWM 출력 신호를 아는 것은 시스템 매개 변수 내에서 효과적인 부트스트랩 회로를 설계하는 데 매우 중요합니다. 그러나 $4.7\mu\text{F}$ 커패시터는 PWM 신호의 듀티 사이클이 50%이고 20kHz 주파수(섹션 2.1 참조)를 가지고 있다고 가정하여 선택한 것이므로 PWM 신호 특성에 따라 최소 커패시턴스를 조정할 수 있습니다(방정식 4 참조).

2.3 AMC1311-Q1을 사용한 하드웨어 테스트

실제 회로는 시뮬레이션을 확인할 수 있도록 [그림 1-1](#)으로 제작되었습니다. $C = 4.7\mu\text{F}$, $R = 2\Omega$, LDO의 출력은 6V, 입력 PWM 신호는 20kHz, 50% 듀티 사이클에서 $50V_{pp}$ 입니다. AMC1311-Q1은 선택한 절연 증폭기이고 TPS7A4101은 넓은 입력 범위에 대해 선택한 LDO입니다.

시작 시간은 약 $260\mu\text{s}$ 이며, 정상 상태 출력은 29.7mV 리플에서 5.1V로, [그림 2-3](#)와 상당히 잘 어울립니다. 시뮬레이션과 하드웨어 간의 불일치는 설계된 시뮬레이션에서 설명되지 않는 장비 전류 제한 때문에 발생합니다.

부트스트랩 전원 공급 장치의 리플은 깨끗한 전원 공급 장치를 사용한 성능과 비교했을 때 AMC1311-Q1의 성능에 최소한의 영향만 미쳤습니다. 깨끗한 신호는 저압측 전원 레일의 변압기와 LDO를 사용하여 생성되었습니다. 이 변압기 전원 공급 장치의 크기는 부트스트랩 전원 공급 장치의 약 두 배이며 변압기 비용 때문에 부트스트랩보다 훨씬 더 비쌉니다. 리플이 너무 높다면 간단한 RC 필터를 사용하여 부트스트랩 전원 공급 장치를 조정할 수도 있습니다. 이렇게 하면 회로에 추가되는 크기 and 비용을 최소화할 수 있습니다.

3 요약

충전 펌프 부트스트랩 회로는 PWM 애플리케이션에서 절연 증폭기를 위한 절연 전원 레일을 생성하는 효율적인 방법입니다. 잘 설계된 부트스트랩 전원 공급 장치는 공간과 비용을 절약하면서 효과적이고 깔끔한 전원 공급 장치로 작동할 수 있습니다.

부트스트랩 회로를 설계할 때 고려해야 할 몇 가지 주요 요소가 있습니다. 절연 증폭기의 전류 유입량, PWM 신호의 주파수 및 듀티 사이클, 회로 시작 시간에 대한 허용 범위, 절연 증폭기의 허용 가능한 전원 공급 리플을 아는 것이 중요합니다. 이러한 모든 사양은 부트스트랩 회로에 사용되는 RC 회로 선택에 영향을 줄 수 있습니다. 부트스트랩은 손쉽게 시뮬레이션할 수 있어 설계자가 여러 회로 조건에서 다양한 RC 값을 쉽게 테스트할 수 있으므로 선택 과정이 훨씬 간소화됩니다.

4 참조

1. 텍사스 인스트루먼트, [AMC13xx 매개 변수 표](#).
2. 텍사스 인스트루먼트, [부트스트랩 충전 펌프 기법을 사용한 DC+ 버스 전원 공급 솔루션](#) 애플리케이션 노트.
3. 텍사스 인스트루먼트, [전기 모터 드라이브의 오류 감지에 절연 비교기 사용](#) 아날로그 설계 저널.
4. 텍사스 인스트루먼트, [절연 전류 감지에 대한 설계 고려 사항](#) 아날로그 설계 저널.

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.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](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