

Technical Article

# 고전압 DC 링크 커패시터 능동 사전 충전 회로 설계하기



Tilden Chen, Hrag Kasparian

## 머리말

EV(전기차)에서는 트랙션 인버터의 입력에서 전압 리플을 최소화하기 위해 일반적으로 대형 DC 링크 커패시터( $C_{DC\ LINK}$ )를 사용합니다. EV에 전원을 공급할 때 사전 충전의 목적은 차량을 작동하기 전에  $C_{DC\ LINK}$ 을 안전하게 충전하는 것입니다. 배터리 스택 전압( $V_{BATT}$ )까지  $C_{DC\ LINK}$ 를 충전하면 시간이 지남에 따라 돌발적인 고장을 유발하는 접촉기 단자에서의 아크를 방지할 수 있습니다.

기존의 사전 충전 방법에는  $C_{DC\ LINK}$ 와 직렬로 전력 저항을 구현하여 RC(저항-커패시터) 네트워크를 만드는 방법이 포함됩니다. 그러나 총  $C_{DC\ LINK}$  커패시턴스와  $V_{BATT}$ 가 증가하면 반드시 수반되는 전력 손실도 기하급수적으로 증가합니다. 이 문서에서는 스프레드시트 계산기를 사용하여 효율적인 능동 사전 충전 회로를 설계하기 위한 간편한 접근 방식을 소개합니다.

## 능동 사전 충전 이해하기

수동 사전 충전은 전력 저항을 이용해 커패시터를 점진적으로 충전하는 RC 회로를 구성하는 반면, 능동 사전 충전은 이력 인덕터 전류 제어 방식을 사용하는 벡 토폴로지 기반의 스위칭 컨버터를 통해 커패시터에 일정한 충전 전류를 공급할 수 있습니다(그림 1).

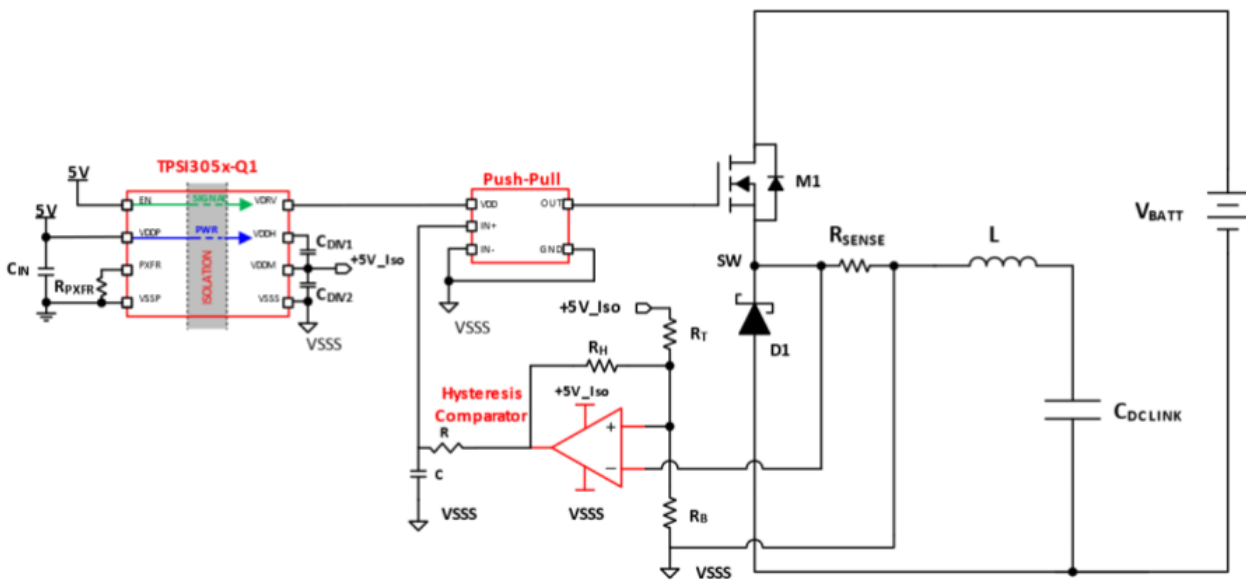


그림 1. 벡 컨버터에서 이력 인덕터 전류 방식을 사용하여 커패시터에 일정한 충전 전류를 제공함으로써 커패시터 전압( $V_{CAP}$ )의 선형 충전이 배터리( $V_{BATT}$ )와 동일한 전압 전위를 가지도록 지원하는 능동 사전 충전 회로. 출처: 텍사스 인스트루먼트

이 정전류를 통해 커패시터 전압( $V_{CAP}$ )을 배터리와 동일한 전압 전위까지 선형으로 충전할 수 있습니다. 그림 2 및 방정식 1은 이 선형 동작을 나타낸 것입니다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I_{\text{CHARGE}}}{C_{\text{DC LINK}}} \quad (1)$$

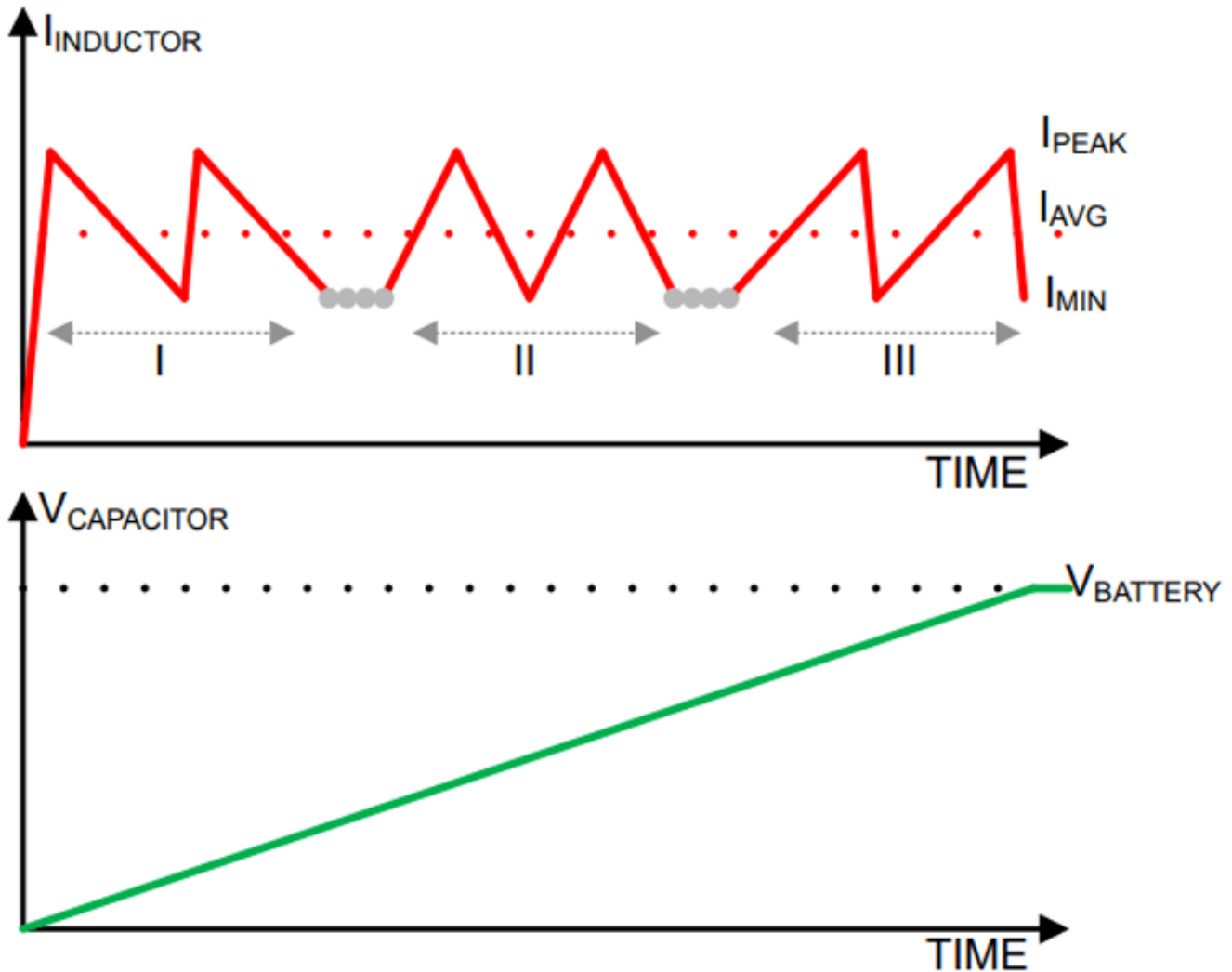


그림 2. 이력 인덕터 전류 제어 방식을 지원하는 벡 토폴로지를 사용한 능동 사전 충전 선형 동작. 출처: 텍사스 인스트루먼트

첫 번째 단계는 필요한 충전 전류( $I_{\text{CHARGE}}$ )를 구하는 것입니다. 방정식 2에 표시된 것처럼  $I_{\text{CHARGE}}$ 는 총 DC 링크 충전 ( $Q_{\text{DC LINK}}$ )을 필요한 사전 충전 시간( $t_{\text{CHARGE}}$ )으로 나눈 몫입니다.

$$I_{\text{CHARGE}} = \frac{Q_{\text{DC LINK}}}{t_{\text{CHARGE}}} \quad (2)$$

방정식 3에 표시된 것처럼  $Q_{\text{DC LINK}}$ 는  $C_{\text{DC LINK}}$ 와  $V_{\text{BATT}}$ 를 곱한 것입니다.

$$Q_{\text{DC LINK}} = C_{\text{DC LINK}} \times V_{\text{BATT}} \quad (3)$$

### 계산기 개요

이 능동 이력 벡 회로에서는 스위치 노드에 부동 접지 전위가 있어 제어 시스템에 전원을 공급하려면 절연 바이어스 전원이 필요합니다. [계산기 도구](#)를 사용하면 이 제어 회로의 소비 전력이 절연 바이어스 전원의 소싱 용량 내에서 유지되도록 할 수 있습니다. 이를 사용하지 않으면 전압이 붕괴합니다.

TI(텍사스 인스트루먼트)의 [고전압 솔리드 스테이트 릴레이 능동 사전 충전 레퍼런스 설계](#)에서 에너지 전달 효율성을 개선하고 실제 충전 시간을 줄이는 능동 솔루션을 소개합니다. TI의 [TPSI3052-Q1](#)은 능동 사전 충전 레퍼런스 설계에서 사용되는

완전 통합형 절연 바이어스 전원 공급 장치로, 절연된 2차 공급측에 최대 83mW의 전력을 소싱하고 공급할 수 있습니다. 게이트 드라이브 전류, 장치 정동작 전류 및 저항 분할기는 소비 전력에 주로 기여하는 요소입니다. 방정식 4는 게이트 드라이브 전류( $I_{GATE\ DRIVE}$ )와 게이트 드라이브 전압( $V_{S\ GATE\ DRIVER}$ )의 곱인 게이트 드라이브 전력( $P_{GATE\ DRIVE}$ )을 나타낸 것으로, 이 레퍼런스 설계의 경우 값은 15V입니다.

$$P_{GATE\ DRIVE} = I_{GATE\ DRIVE} \times V_{S\ GATE\ DRIVER} \quad (4)$$

방정식 5는 MOSFET(금속 산화막 반도체 전계 효과 트랜지스터) 총 게이트 전하( $Q_G$ )와 스위칭 주파수( $F_{SW}$ )의 곱인 게이트 드라이브 전류를 나타낸 것입니다.

$$I_{GATEDRIVE} = Q_G \times F_{SW} \quad (5)$$

방정식 6은  $F_{SW}$ 가 충전 시간 동안  $V_{CAP}$ 에 따라 어떻게 변화하는지 나타낸 것으로, **그림 3**에 표시된 것처럼  $F_{SW}$  대  $V_{CAP}$  곡선이 거꾸로 된 포물선 형태를 취합니다. 아래 그림에 표시된 것처럼 게이트 드라이브 전류의 피크는 최대 스위칭 주파수( $F_{SW\_MAX}$ )에서 발생하며, 이는  $V_{CAP}$ 가  $V_{BATT}$ 의 절반 수준에 도달할 때입니다. 방정식 7은  $F_{SW\_MAX}$ ,  $V_{BATT}$ , 인덕턴스(L) 및 피크 간 인덕터 전류( $dI$ )의 관계를 나타냅니다.

$$F_{SW} = \frac{V_{CAP} - \frac{V_{CAP}^2}{V_{BATT}}}{L \times dI} \quad (6)$$

$$F_{SW\_MAX} = \frac{V_{BATT}}{4 \times L \times dI} \quad (7)$$

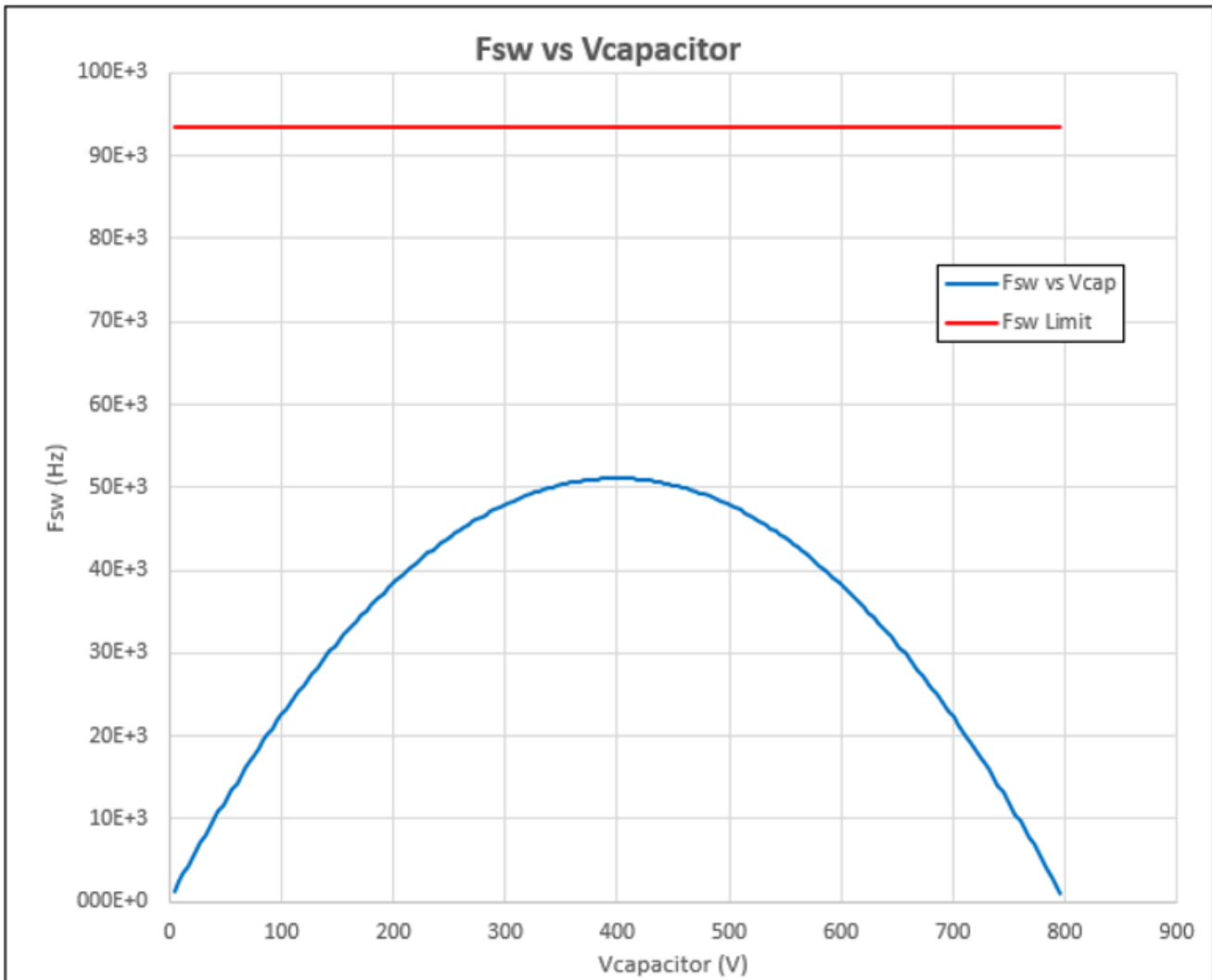


그림 3.  $F_{SW}$  대  $V_{CAP}$  및  $F_{SW\ LIMIT}$ 을 보여주는 계산기 곡선. 출처: 텍사스 인스트루먼트

### 계산기 도구 사용하기

계산기에는 여러 설계 매개 변수를 입력하라는 메시지가 표시됩니다. 노란색 셀은 필수 입력을 나타내고, 회색 셀은 선택적 입력을 나타냅니다. 회색 셀의 기본값은 레퍼런스 설계의 매개 변수를 반영합니다. 사용자는 필요에 따라 회색 셀의 값을 변경할 수 있습니다. 흰색 셀은 출력으로 계산된 값을 나타냅니다. 셀의 오른쪽 상단에 표시되는 빨간색 삼각형은 오류를 나타내며, 사용자는 수정 방법을 알려주는 팝업 텍스트를 볼 수 있습니다. 이 표시의 목적은 빨간색 셀이 없는 성공적인 구성을 달성하는 것입니다. 이는 사용자가 각 유닛 셀에 마우스 커서를 올려 해당 정보를 읽는 반복적인 프로세스일 수 있습니다.

### 사전 충전 시스템 요구 사항

그림 4에 표시된 계산기 섹션에서는

$V_{BATT}$ ,  $t_{CHARGE}$  및  $C_{DC\ LINK}$  시스템 매개 변수를 바탕으로 필요한 충전 전류( $I_{CHARGE\ REQUIRED}$ )를 계산합니다.

Parameter	Value	Units
V <sub>BATT</sub>	800	V
t <sub>CHARGE</sub>	400.0E-3	sec
C <sub>DC LINK</sub>	2.0E-3	F
Q <sub>DC LINK</sub>	1.6E+0	C
I <sub>CHARGE REQUIRED</sub>	4.00E+0	A

Battery or supply voltage, which will also be the final voltage the capacitor gets charged up to.

그림 4. V<sub>BATT</sub>, t<sub>CHARGE</sub> 및 C<sub>DC LINK</sub> 시스템 매개 변수를 바탕으로 계산되는 필요한 충전 전류(I<sub>CHARGE REQUIRED</sub>). 출처: 텍사스 인스트루먼트

### 인덕턴스 및 충전 전류 프로그래밍

그림 5에 표시된 계산기 섹션에서는 실제 평균 충전 전류(I<sub>CHARGE</sub>)와 F<sub>SW MAX</sub>를 계산합니다. 평균 인덕터 전류는 기본적으로 I<sub>CHARGE</sub>와 같습니다. 여기서 I<sub>CHARGE</sub>는 I<sub>CHARGE REQUIRED</sub>와 같거나 더 커야 합니다. 이는 이전 섹션에서 원하는 t<sub>CHARGE</sub>를 충족하기 위해 계산되었습니다.

방정식 7에 표현된 것처럼 L, di 및 F<sub>SW MAX</sub>와의 관계에 유의하세요. L과 di은 각각 F<sub>SW</sub>와 반비례 관계이므로, 최대 스위칭 주파수 한도(F<sub>SW LIMIT</sub>)를 초과하지 않는 값을 선택하는 것이 중요합니다. 인덕터 선택 시에는 적절한 평균 제공된 전류(I<sub>RMS</sub> > I<sub>CHARGE</sub>), 포화 전류(I<sub>SAT</sub> > I<sub>L PEAK</sub>) 및 전압 정격과 각각에 대한 버퍼로서 충분한 수준의 헤드룸을 고려해야 합니다.

L	560.0E-6	H
I <sub>L PEAK</sub>	7.5E+0	A
I <sub>L VALLEY</sub>	500.0E-3	A
V <sub>HYSTERISIS + OFFSET COMP.</sub>	22.00E-3	V
V <sub>F</sub>	1.25	V
I <sub>L PK-TO-PK</sub>	7.00E+0	A
I <sub>CHARGE</sub>	4.00E+0	A
F <sub>SW MIN.</sub>	1.0E+3	Hz
F <sub>SW MAX.</sub>	51.1E+3	Hz
F <sub>SW MAX. LIMIT</sub>	93.5E+3	Hz

그림 5. 인덕턴스 및 충전 전류 프로그래밍 매개 변수. 출처: 텍사스 인스트루먼트

## 전류 감지 및 비교기 설정값

그림 6에 표시된 계산기 섹션에서는 이력 회로의 최저 저항( $R_B$ ), 최고 저항( $R_T$ ) 및 이력 저항( $R_H$ )를 계산하며, 이는 이전 섹션에서 지정된 피크( $I_{L\ PEAK}$ ) 및 밸리( $I_{L\ VALLEY}$ ) 인덕터 전류 임계값을 충족하는 데 필요합니다. 전류 감지 저항( $R_{SENSE}$ ) 및  $R_B$ 를 입력합니다. 이는 필요에 따라 유연하게 변경할 수 있습니다. 비교기 공급 전압( $V_{S\ COMPARATOR}$ )이 올바른지 확인합니다.

$R_{SENSE}$	100.0E-3	$\Omega$
$P_{AVG. Rsense}$	1.60E+0	W
$V_{COMP. LOW}$	50.00E-3	V
$V_{COMP. HIGH}$	750.00E-3	V
$V_{S\ COMPARATOR\ IC}$	5.00	V
$R_B$	2.37E+3	$\Omega$
$R_T$	201.45E+3	$\Omega$
$R_H$	14.39E+3	$\Omega$

그림 6. 피크( $I_{L\ PEAK}$ ) 및 밸리( $I_{L\ VALLEY}$ ) 인덕터 전류 임계값을 충족하는 데 필요한 이력 회로의 최저 저항( $R_B$ ), 최고 저항( $R_T$ ) 및 이력 저항( $R_H$ ). 출처: 텍사스 인스트루먼트

## 바이어스 전원 및 스위칭 주파수 제한

그림 7에 표시된 계산기 섹션에서는 MOSFET 스위칭에 사용할 수 있는 전력( $P_{REMAINING\ FOR\ FET\ DRIVE}$ )을 계산합니다. 이를 위해 먼저 총 전력 소모( $P_{TOTAL}$ )(이력 회로 저항( $P_{COMP. RESISTORS}$ )와 연계됨), 게이트 드라이버 IC(통합 회로)( $P_{GATE\ DRIVER\ IC}$ ) 및 비교기 IC( $P_{COMPARATOR\ IC}$ )를 계산한 후 해당 값을 TPSI3052-Q1의 사용 가능한 최대 전력( $P_{MAX\_ISOLATED\ BIAS\ SUPPLY}$ )에서 뺍니다. MOSFET 총 게이트 전하( $Q_{G\ TOTAL}$ ), 장치 정동작 전류( $I_{S\ GATE\ DRIVER\ IC}$  및  $I_{SUPPLY\ COMP\ IC}$ ) 및 게이트 드라이버 IC 공급 전압( $V_{S\ GATE\ DRIVER\ IC}$ )을 입력합니다. 이 도구에서는 이 값을 사용하여 그림 3에 빨간색 선으로 표시된  $F_{SW\ LIMIT}$ 을 계산합니다.

$V_S$ COMPARATOR IC	5.00	V
$R_B$	2.37E+3	$\Omega$
$R_T$	201.45E+3	$\Omega$
$R_H$	14.39E+3	$\Omega$
$V_S$ GATE DRIVER IC	15.00	V
$I_S$ GATE DRIVER IC	750.00E-6	A
$I_{SUPPLY COMP.}$	10.00E-6	A
$P_{MAX ISOLATED BIAS SUPPLY}$	83.00E-3	W
$R_{DIVIDER MIN.}$	15.80E+3	$\Omega$
$I_{MAX R\_DIVIDERS}$	316.46E-6	A
$P_{GATE DRIVER IC}$	11.25E-3	W
$P_{COMPARATOR IC}$	50.00E-6	W
$P_{COMP. RESISTORS}$	1.58E-3	W
$P_{TOTAL}$	12.88E-3	W
$P_{REMAINING FOR FET Drive}$	70.12E-3	W
$Q_G TOTAL$	50.00E-9	Q
$I_{GATE DRIVE}$	4.67E-3	A

그림 7. 절연 바이어스 전원 및 스위칭 주파수 제한 매개 변수. 출처: 텍사스 인스트루먼트

이 계산기 도구는 특정 가정을 취하며, MOSFET 및 프리휠링 다이오드에서의 비교기 지연, 전력 손실 등의 요인은 고려하지 않습니다. 이 도구에서는 레일 간 입력 및 출력 비교기를 사용한다고 가정합니다. 적절한 전압 정격,  $R_{DS(ON)}$  및 기생 커패시턴스 매개 변수를 지닌 MOSFET을 선택하도록 합니다. MOSFET과 프리휠링 다이오드의 전력 손실이 모두 허용 가능한 한도 이내를 유지하도록 합니다. 마지막으로, 전류 감지 피크 및 밸리 레벨 전압과 관련하여 오프셋과 이력 전압이 낮은 비교기를 선택합니다. 최종 계산기 값으로 회로를 시뮬레이션하면 의도한 작동을 구현할 수 있습니다.

### 원하는 충전 프로파일 달성

능동 이력 벡 회로를 적용하면 EV에서 사용되는 고전압 DC 링크 커패시터의 효율성이 상당한 수준으로 개선되고 충전 회로 크기가 감소합니다. 이를 통해 잠재적으로 사전 충전 솔루션의 크기, 비용 및 열을 줄일 수 있습니다.

이 문서에서는 원하는 충전 프로필을 달성하는 데 도움이 되는 적절한 구성 요소 값을 계산하는 설계 프로세스를 안내합니다.

엔지니어는 이러한 기술 및 도구를 사용하여 EV의 사전 충전 기능을 효과적으로 개선함으로써 자동차 산업의 증가하는 요구를 충족하기 위한 개선된 전력 관리 시스템을 구현할 수 있습니다.

### 관련 콘텐츠

- [전원 팁 #127: GaN 기반 PFC의 전력 밀도를 높이기 위한 고급 제어 방법 사용](#)
- [전원 팁 #126: 안전한 DC/DC 컨버터 핫 플러그](#)
- [전원 팁 #125: 옴토 에뮬레이터가 절연 DC/DC 컨버터의 신뢰성 및 과도 응답을 개선하는 방법](#)
- [분석: 가변 주파수 드라이브의 미묘한 차이](#)

이전에 EDN.com에 게시되었습니다.

### 상표

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.



## 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 명시적 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://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