

토템 폴 브리지리스 PFC를 위한 새로운 CCM-TCM 다중 모드 제어 방법

Bosheng Sun

Systems Engineer, Texas Instruments

소개

데이터 센터의 PSU(전원 공급 장치)는 높은 효율과 높은 전력 밀도를 갖추어야 합니다. 작년에 발표된 80 Plus Ruby 인증은 지금까지 데이터 센터 PSU에 대해 가장 높은 효율 표준을 제시하고 있습니다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 80 Plus Ruby 효율은 각 부하 조건에서 80 Plus Titanium 보다 높을 뿐만 아니라, 이전에는 명시된 적이 없는 5% 부하에서의 90% 효율을 요구합니다.

80 PLUS 인증	230V 내부 중복				
정격 부하 비율	5%	10%	20%	50%	100%
80 Plus Titanium		90%	94%	96%	91%
80 Plus Ruby	90%	91%	95%	96.5%	92%

표 1. 80 Plus 인증 수준

이와 동시에, 한정된 서버 랙 공간과 증가하는 전력 수요로 인해 높은 전력 밀도가 요구되고 있습니다. 가장 최신의 모듈형 하드웨어 시스템인 공통 중복 전원 공급 장치는 185mm x 39mm x 73.5mm의 폼 팩터에서 3.6kW 전력을 목표로 하며, 이는 111W/in³의 전력 밀도에 해당합니다. 다른 PSU 제품들이 여전히 80W/in³에서 90W/in³ 수준에 머물러 있는 것과 대조적입니다.

서버 PSU는 토템 폴 브리지리스 PFC(역률 보정)와 DC/DC 컨버터로 구성됩니다. 토템 폴 브리지리스 PFC에서 사용되는 기존의 제어 방법은 CCM(연속 전도 모드) 또는 TCM(삼각 전도 모드)이지만, 각 방법에는 한계가 있습니다. CCM 토템 폴 브리지리스 PFC는 높은 전력 밀도를 달성할 수 있지만, 하드 스위칭으로 인해 효율이 제한적입니다. 특히 스위칭 손실이 지배적인 경부하 상태에서 효율이 떨어집니다. TCM 토템 폴 브리지리스 PFC는 ZVS(제로 전압 스위칭) 덕분에 전체 부하 범위에서 뛰어난 효율을 얻을 수 있습니다. 그러나 높은 인덕터 전류 리플을 줄이기 위해 두 개 이상의 위상을 인터리빙해야 하므로, 전력 밀도가 낮

아지고 비용이 상승하는 단점이 있습니다. 표 2는 이 두 가지 방식을 비교하여 보여줍니다.

	CCM 작동	TCM 작동
장점	<ul style="list-style-type: none"> 낮은 피크-투-피크 인덕터 전류 리플 간단한 제어 	<ul style="list-style-type: none"> ZVS
단점	<ul style="list-style-type: none"> 하드 스위칭, 높은 스위칭 손실 	<ul style="list-style-type: none"> 높은 피크-투-피크 인덕터 전류 리플 고전력 애플리케이션의 전류 리플을 줄이기 위해 다중 위상 인터리빙이 필요하므로 전력 밀도가 낮아지고 비용 상승 복잡한 제어

표 2. 토템 폴 PFC를 위한 CCM과 TCM의 비교

고효율 및 높은 전력 밀도를 모두 달성하기 위해 토템 폴 브리지리스 PFC는 그림 1에 나와 있는 것처럼 다중 모드로 작동할 수 있습니다. 과부하 상태이거나 AC 반주기의 피크 지점에서는 목표로 하는 PFC 입력 전류가 높으므로 PFC가 CCM으로 동작합니다. 부하가 감소하거나 목표 입력 전류가 낮은 AC 제로 크로싱 부근에서는 PFC가 TCM으로 전환되어 ZVS로 동작합니다.

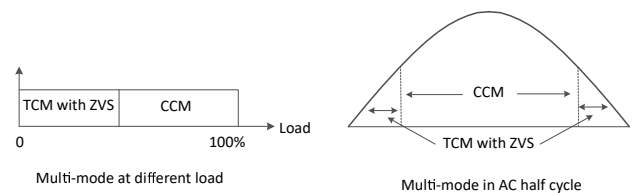


그림 1. CCM_TCM 다중 모드 작동

순수 CCM 방식과 비교하면, 다중 모드 제어는 ZVS(제로 전압 스위칭) 덕분에 경부하에서 더 나은 효율을 제공합니다. 또한 순수 TCM 방식과 비교했을 때는 인덕터 전류 리플이 훨씬 낮아 다상 인터리빙 동작을 사용할 필요가 없으

므로, 크기와 시스템 비용을 대폭 줄일 수 있습니다. 이처럼 CCM과 TCM의 장점을 결합함으로써 고효율과 고전력 밀도라는 두 가지 요구 사항을 모두 충족할 수 있습니다.

경부하에서 PFC를 TCM으로 진입시키는 방법

TCM 작동을 위해서는 스위칭 주기가 끝날 때 인덕터 전류가 0으로 떨어져야 합니다. 그러나 CCM PFC에서는 높은 부스트 인덕턴스 때문에 AC 반주기 전체에서 인덕터 전류가 거의 항상 0보다 큼니다. 인덕터 전류를 0으로 떨어뜨리기 위한 한 가지 방법은 CCM PFC에서 사용하는 것보다는 낮고, 일반적인 TCM PFC에서 사용하는 것보다는 높은 부스트 인덕턴스를 선택하는 것입니다.

인덕턴스가 낮아지면 전류 리플이 커지기 때문에, 다중 모드 동작을 통해 얻은 효율 이득이 높아진 전류 리플로 인한 추가적인 인덕터 코어 손실보다 크도록 인덕터를 설계하는 것이 중요합니다. 또한 인덕터 전류 리플이 CCM일 때보다 크므로 전자기 간섭 필터 역시 재설계해야 합니다.

또 다른 옵션은 동일한 CCM용 인덕터를 유지하면서 **그림 2**와 같이 스위칭 주파수 폴드백 프로파일을 사용하는 것입니다. 이 방식에서 스위칭 주파수는 AC 피크 지점에서 가장 높고(CCM 동작 시의 공칭 스위칭 주파수와 동일), AC 제로 크로싱 지점을 향해 점진적으로 감소합니다.

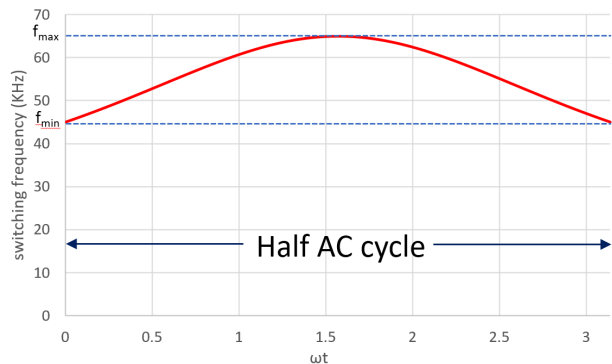


그림 2. AC 반주기 내의 스위칭 주파수 프로파일

방정식 1은 AC 반주기 전체에 걸친 스위칭 주파수를 계산합니다.

$$f = \frac{1}{\frac{1}{f_{min}} - \left(\frac{1}{f_{min}} - \frac{1}{f_{max}} \right) \sin(\omega t)} \quad (1)$$

여기서 f_{max} 는 기존의 CCM 동작에서 사용되는 스위칭 주파수이고, f_{min} 은 최소 스위칭 주파수, ωt 는 AC 입력 전압의 각도 주파수입니다.

스위칭 주파수를 낮추면 스위칭 사이클이 끝날 때 인덕터 전류가 0으로 떨어지게 되어 TCM 제어가 가능해집니다. 이를 통해 PFC가 AC 피크 지점에서는 CCM으로 동작하고, AC 제로 크로싱 부근에서는 ZVS를 동반한 TCM으로 전환되도록 제어할 수 있습니다. 최소 스위칭 주파수를 더 낮추면 TCM 영역을 확장할 수 있지만, 루프 대역폭이 줄어들어 THD(총 고조파 왜곡)가 악화되거나 루프 불안정성이 발생할 수 있다는 단점이 있습니다.

제로 전류를 감지하는 방법

TCM 제어를 위해 PFC 접지 복귀 경로에 저항을 배치하거나 부스트 인덕터에 2차 권선을 추가하는 제로 전류 감지(ZCD) 회로를 구성하면, 인덕터 전류가 0으로 떨어지는 순간을 감지할 수 있습니다. TI의 LMG3427R030 GaN(질화 갈륨) FET(전계 효과 트랜지스터)와 같은 일부 장치에는 ZCD 회로가 내장되어 있어, **그림 3**과 같이 전류가 0이 될 때 ZCD 신호를 생성합니다. 이 장치를 고주파 스위치로 사용하면 설계 프로세스를 크게 간소화할 수 있습니다. 생성된 ZCD 신호는 추가 처리를 위해 MCU(마이크로컨트롤러)로 전송됩니다.

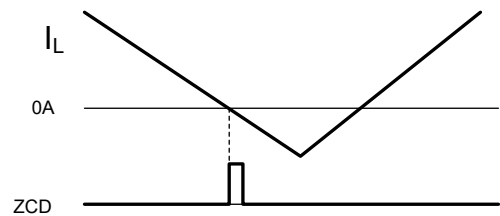


그림 3. ZCD 신호 생성

TCM에서 ZVS를 달성하는 방법

TCM에서 ZVS 동작을 달성하려면, 스위치 노드 전압을 방전시키기 위해 인덕터 전류가 음의 방향으로 흘러야 합니다. **그림 4**에서 보는 바와 같이, MCU가 ZCD 신호를 수신하면 해당 신호에 시간 지연을 추가한 후, 지연된 ZCD 신호를 사용하여 PWM(펄스 폭 변조)을 끄고 PWM 카운터를 리셋합니다. 리셋 후 다음 스위칭 기간이 시작되고 부스트 스위치가 켜집니다. 인덕터 전류가 0으로 떨어진 후에도 동기 스위치가 여전히 켜져 있기 때문에, 이 시간 지연에 의해 인덕터 전류가 음의 값으로 흐르게 됩니다. 지연 시간

을 적절히 조절하면 음의 전류량을 조절할 수 있으며, 이를 통해 스위치 노드 전압을 0까지 방전시켜 부스트 스위치가 켜지는 순간 ZVS를 달성할 수 있습니다.

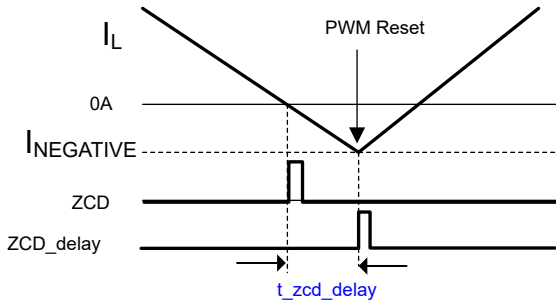


그림 4. PWM 리셋을 위한 ZCD 지연 추가

동기 스위치가 꺼진 시점부터 부스트 스위치가 켜질 때까지의 주어진 데드 타임 Δt 에 대하여, 스위치 노드 전압을 완전히 방전시키는 데 필요한 최소 음의 전류값은 **방정식 2**를 통해 계산할 수 있습니다.

$$I_{\text{NEGATIVE}} = -\frac{2 \times C_{\text{OSS}} \times V_{\text{out}}}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서 C_{OSS} 는 스위치의 출력 커패시턴스이고, V_{out} 은 PFC 출력 전압입니다.

방정식 3은 필요한 최소 ZCD 지연 시간을 계산합니다.

$$t_{\text{zcd_delay}} = \frac{L \times |I_{\text{NEGATIVE}}|}{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}} \quad (3)$$

여기서 L 은 부스트 인덕턴스이고, V_{in} 은 PFC 입력 전압입니다.

방정식 3에서 V_{in} 이 V_{out} 에 근접하면 계산된 지연 시간이 너무 길어져 **그림 5**와 같이 지연된 ZCD 신호가 다음 스위칭 주기에 걸칠 수 있습니다. 이 시점에서 PWM을 리셋하는 것은 오류입니다. 이를 방지하기 위해 **그림 5**에서처럼 ZCD 신호의 시작점에서 시작하여 현재 스위칭 주기의 끝에서 끝나는 ENABLE 윈도우를 생성합니다. MCU는 이 ENABLE 윈도우를 지연된 ZCD 신호와 AND 연산하여 RESET 신호를 생성하고, 이 RESET 신호를 사용해 PWM을 리셋합니다. 이를 통해 PWM 리셋이 반드시 동일한 스위칭 사이클 내에서만 발생하도록 할 수 있습니다.

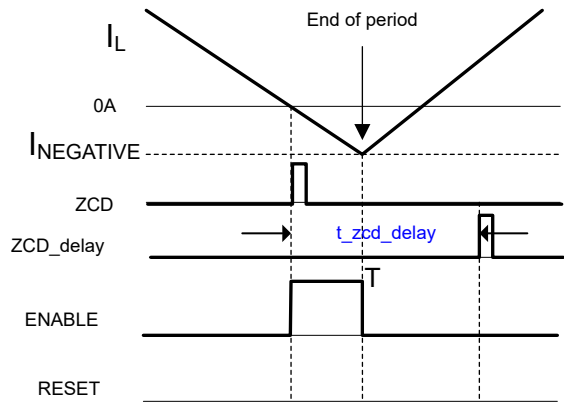


그림 5. ENABLE 윈도우 및 RESET 신호

CCM과 TCM 간의 전환

CCM과 TCM 사이의 전환은 자동으로 이루어집니다. AC 피크 지점이나 과부하 상태에서는 인덕터 전류가 높게 유지됩니다. 전류가 0으로 떨어지지 않아 ZCD 신호가 생성되지 않으므로, RESET 신호 또한 발생하지 않습니다. 이 경우 PWM 카운터는 공칭 스위칭 주기가 끝날 때 자연스럽게 리셋됩니다. 또한 스위칭 주파수가 공칭 스위칭 주파수와 동일하므로, **그림 6**에서 보듯 PFC는 기존의 CCM PFC와 동일하게 동작합니다.

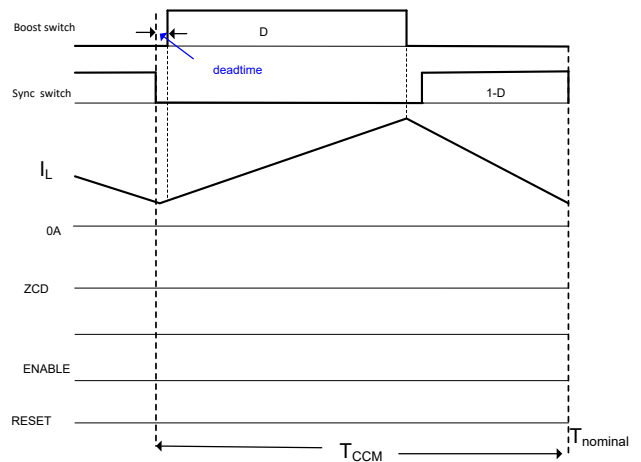


그림 6. AC 피크에서의 CCM 동작

AC 전압이 제로 크로싱을 향해 낮아지면 인덕터 전류와 스위칭 주파수가 모두 감소하며, 스위칭 주기가 끝나기 전에 인덕터 전류가 0으로 떨어집니다. 이때 GaN 장치가 ZCD 신호를 생성합니다. **방정식 3**으로 계산된 지연 시간을 사용하고 ENABLE 윈도우와 AND 연산을 거치면 RESET 신호가 생성됩니다. 이 RESET 신호는 PWM을 리셋합니다. 결과적으로 동기 스위치는 공칭 스위칭 기간이 끝나기 전

에 꺼지며 다음 스위칭 기간이 시작됩니다. 이때 실제 스위칭 주파수는 공칭 스위칭 주파수보다 낮아집니다. **그림 7**에서 볼 수 있듯이, PFC는 TCM PFC로 동작하게 됩니다.

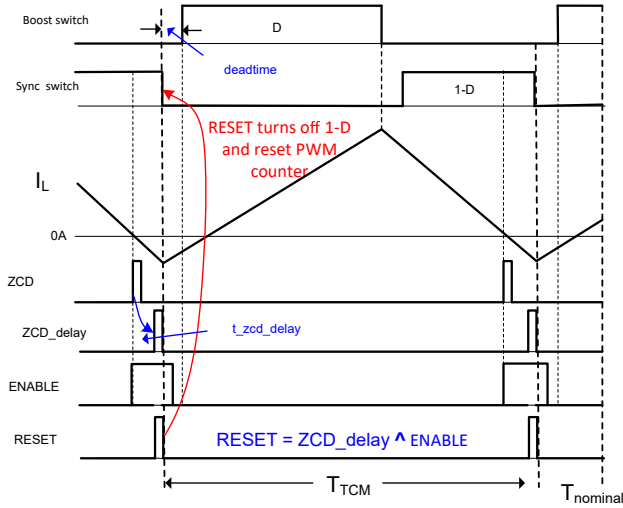


그림 7. AC 제로 크로싱 부근에서의 TCM 동작

동적 데드 타임

CCM에서 데드 타임을 최소로 유지하면, 동기 스위치가 꺼지고 부스트 스위치가 켜지는 사이의 시간으로 부스트 스위치의 바디-다이오드 전도 시간이 감소합니다. 반면 TCM에서는 동기 스위치가 꺼질 때 스위치 노드 전압을 방전하거나 충전하는 데 시간이 걸립니다. 따라서 데드 타임이 더 길어야 합니다. CCM과 TCM 사이에 동적 데드 타임을 사용하면 효율을 최적화할 수 있습니다.

제어 법칙 및 PWM 생성

기존의 TCM 작동에서는 전압 루프만 있으며 전류 루프가 없습니다. 부스트 스위치의 턴온 시간은 일정한 톤 제어 방법에 따라 결정됩니다. 다중 모드 제어 방법에서는 **그림 8**에 나와 있는 것처럼 기존의 평균 전류 모드 컨트롤러가 TCM과 CCM 작동 모두에 대한 PWM 듀티 사이클을 생성합니다. 컨트롤러에는 외부 전압 루프(G_V)와 내부 전류 루프(G_I)가 포함되어 있습니다. G_V 의 출력은 감지된 입력 전압에 의해 변조되어 전류 루프의 전류 명령이 됩니다. 동일한 보상기가 CCM과 TCM 모두에 대해 PWM 듀티 사이클을 생성하므로, 모드 전환이 매끄럽고 전환 시 전류 왜곡이 발생하지 않습니다.

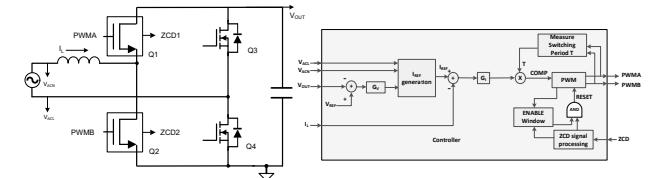


그림 8. 제안된 CCM_TCM 제어에 대한 블록 다이어그램

MCU에서 COMP 값을 RAMP 신호와 비교하면 PWM 신호가 생성되고, 여기서 COMP는 **방정식 4**처럼 전류 루프 G_I 출력에 스위칭 기간 T를 곱하여 계산합니다.

$$COMP = G_I \times T \quad (4)$$

기존의 CCM 작동에서 스위칭 기간 T는 일정합니다. 그러나 TCM 동작에서는 RESET 신호가 실제 스위칭 주기를 결정하며, 이는 T보다 짧습니다. 이 경우 **방정식 4**를 사용하면 필요보다 긴 PWM 펄스 폭이 생성되어 G_I 가 이를 보상하기 위해 과도하게 작동하게 됩니다. G_I 를 더 높은 대역폭으로 밀어붙이는 것이 도움이 될 수 있지만, 루프가 불안정해질 수 있습니다.

이 문제를 해결하려면 컨트롤러가 계속 실제 스위칭 기간을 측정하도록 합니다. **방정식 5** 및 **그림 9**에서 볼 수 있듯이 이전 스위칭 사이클에서 측정된 스위칭 기간에 G_I 출력을 곱하여 COMP 값을 계산합니다. 연속된 두 사이클에서 PWM 기간이 거의 동일하기 때문에 **방정식 5**는 유효합니다.

$$COMP_N = G_I \times T_N - 1 \quad (5)$$

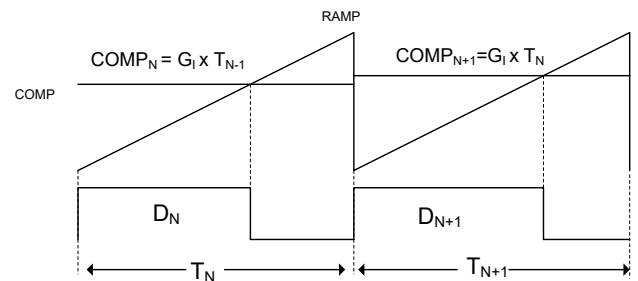


그림 9. PWM 생성

테스트 결과

이 제어 방식은 3.6KW 토렘 폴 브리지리스 PFC [1]에서 구현되었습니다. 최대 스위칭 주파수는 65kHz이며, 최소 스위칭 주파수는 45kHz로 설정되었습니다. 컨트롤러는 TI의 TMS320F280039C 실시간 MCU를 사용합니다. 고주파 스위치에는 ZCD 회로가 내장된 LMG3427R030 GaN FET를

사용했습니다. 65kHz의 ISR1(인터럽트 서비스 루틴 1)은 전류 루프 및 ZCD 지연 시간 계산을 수행하며, 10kHz의 ISR2(인터럽트 서비스 루틴 2)는 전압 루프를 수행합니다. ZCD 지연, ENABLE 윈도우, AND 로직 및 실제 스위칭 주기 측정은 TMS320F280039C의 CLB(구성 가능 로직 블록)를 통해 구현되었습니다. 일단 구성이 완료되면 CLB는 CPU의 개입 없이 독립적으로 작동합니다.

이 설계는 180W/in³ 이상의 전력 밀도를 달성했으며, 매우 뛰어난 경부하 효율을 보여줍니다. **그림 10**과 **그림 11**은 동일한 보드에서 테스트한 이 제어 방식과 기존 CCM 제어 방식 간의 효율 비교를 보여주며, 경부하 효율이 최대 2% 까지 향상된 것을 확인할 수 있습니다.

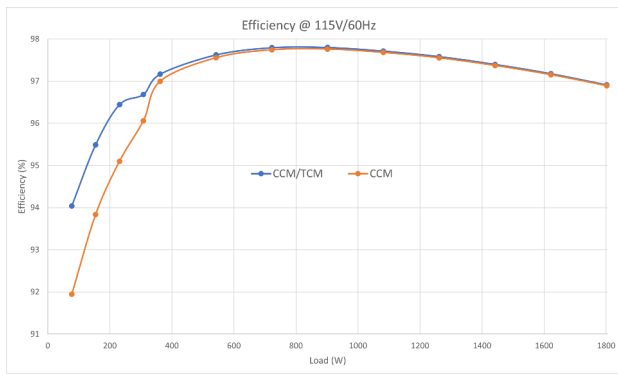


그림 10. 저압 라인에서의 효율 비교

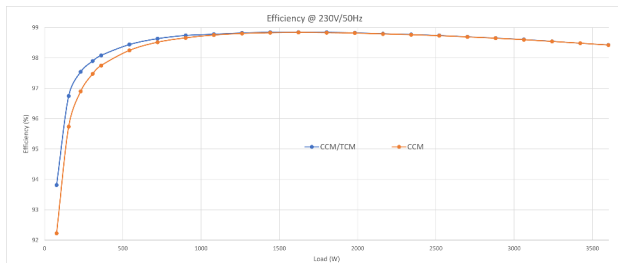


그림 11. 고압 라인에서의 효율 비교

그림 12는 50% 부하에서의 입력 전류 파형을 보여주며, 모드 전환 시 전류 왜곡이 관찰되지 않음을 확인할 수 있습니다.

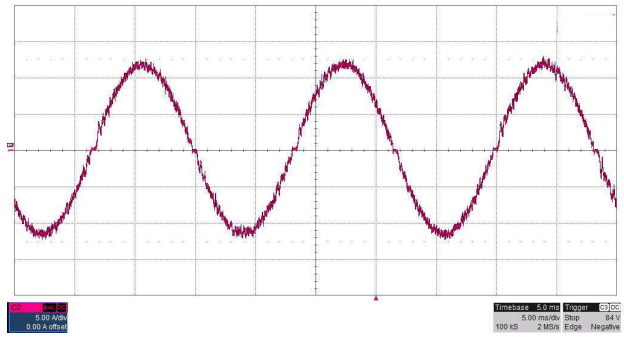


그림 12. 50% 부하에서 입력 전류 파형

결론

토텐 폴 브리지리스 PFC는 CCM-TCM 다중 모드 동작을 통해 고효율과 고전력 밀도를 모두 달성할 수 있습니다. 이는 고부하 또는 AC 피크 시점에는 CCM으로 동작하고, 경부하 또는 AC 제로 크로싱 부근에서는 ZVS를 동반한 TCM으로 전환함으로써 가능해집니다. CCM-TCM 다중 모드는 모드 전환 중 입력 전류의 왜곡 없이 경부하 효율성을 크게 개선합니다. 이는 80 Plus Ruby 효율이 필요한 응용 분야에 매우 유용합니다.

참고 자료

1. 텍사스 인스트루먼트, n.d. "**3.6kW CCM-TCM 다중 모드 제어 토텐 폴 브리지리스 PFC 레퍼런스 설계.**" 텍사스 인스트루먼트 레퍼런스 설계 번호 PMP23537. 2025년 2월 16일에 액세스.

작성자 소개

Bosheng Sun은 텍사스 인스트루먼트의 시스템 엔지니어로, 서버와 산업용 애플리케이션을 위한 디지털 제어, 고성능 AC/DC 솔루션 개발에 주력하고 있습니다. 2003년 클리블랜드 주립대학교에서 전기 공학 석사 학위를, 1995년 베이징의 칭화 대학교에서 전기 공학 학사 학위를 취득했습니다. 또한 6개의 미국 특허를 보유하고 있습니다.

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.

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

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 © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025