

PFC 재유입 전류를 제한하는 방법

Bosheng Sun
Power Design Services

머리말

최근 출시된 모듈식 하드웨어 시스템 - 공통 이중 전원 공급 장치(M-CRPS) 사양[1]에 따르면 데이터 센터에서 사용되는 전원 공급 장치의 입력 브라운아웃 또는 블랙아웃 이벤트 후 입력 전압이 재개될 때 재유입 전류(잘 알려진 돌입 전류와 다름)를 제한해야 합니다. 이전에는 이러한 재유입 전류가 지정되지 않았고 이 이벤트에 대한 특별한 제어 조치가 존재하지 않았습니다. 이 문서에서는 M-CRPS 요구 사항을 충족하는 간단하고 매우 효과적인 저비용 방법을 제시합니다.

돌입 전류와 재유입 전류 비교

75W를 초과하는 프론트 엔드 전원 공급 장치(PSU)에는 PFC(역률 보정)가 필요합니다. PFC는 전자 부하가 저항으로 나타나다록 입력 전류가 입력 전압을 따르도록 강제합니다. PFC는 일반적으로 큰 출력 커패시터를 가지고 있습니다. 시동 전에 PFC 출력 커패시터가 완전히 방전됩니다. V_{AC} 가 V_{OUT} 를 초과할 때 PFC 구조는 전류 경로를 제공하므로 AC 전압을 적용하면 매우 큰 전류가 생성됩니다. 입력 전압이 기본적으로 PFC 출력 커패시터에 직접 적용되기 때문입니다. 이 전류를 돌입 전류라고 합니다.

정온도 계수가 있는 서미스터(R_T)와 기계적 릴레이를 PFC 입력 측에 배치하면 **그림 1**에서 볼 수 있듯이 돌입 전류가 제한됩니다. PFC 전원을 켜는 동안 릴레이가 꺼집니다. 돌입 전류는 R_T 에 의해 낮은 값으로 제한되며, PFC 출력 벌크 커패시터(C_{BULK})가 점진적으로 충전됩니다. 출력 전압(V_{OUT})이 AC 전압(V_{AC})의 피크 값과 같도록 충전되면 돌입 전류가 0으로 떨어집니다. 그런 다음, 릴레이가 켜지고 R_T 를 우회하여 정상 작동 중 전력 손실을 줄입니다.

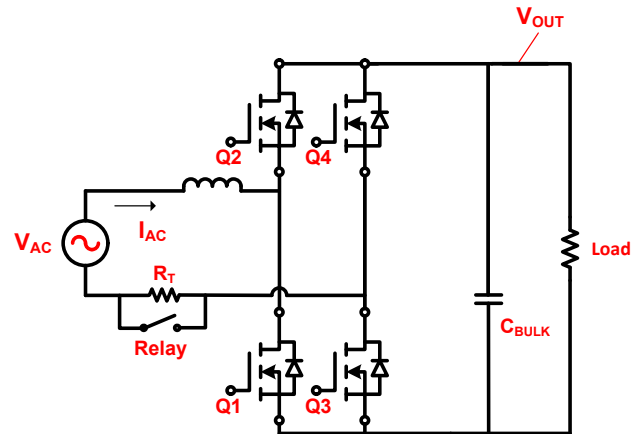


그림 1. R_T 및 릴레이를 사용하여 PFC 돌입 전류 제한.

재유입 전류는 다릅니다. 재유입 전류는 정상 PFC 작동 중에 발생합니다. **그림 2**에서 볼 수 있듯이, PFC가 정상적으로 작동할 때 AC 입력 전압이 갑자기 떨어집니다. 부하가 여전히 적용되므로 PFC V_{OUT} 가 더 낮은 값으로 떨어질 수 있습니다. 그런 다음, AC 전압이 반환될 때 AC 입력 전압이 V_{OUT} 보다 높으면 돌입 전류가 다시 발생합니다. 이러한 전류를 재유입 전류라고 합니다.

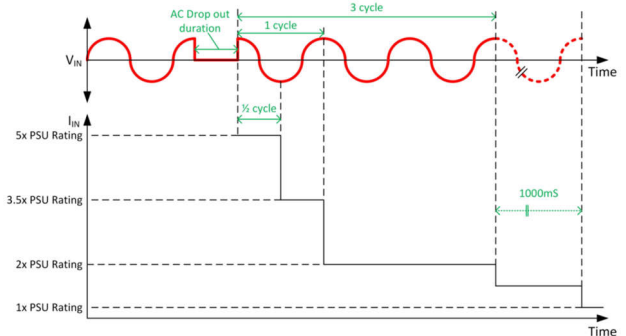


그림 2. M-CRPS 재유입 전류 제한 및 타이밍.

이전에는 재유입 전류를 처리할 수 있는 전력계 구성 요소의 능력에만 의존했습니다. 테스트 결과를 통해 재유입 전류는 PFC 정격 최대 입력 전류보다 10배 이상 높게 증가할 수 있습니다. 이러한 높은 재유입 전류는 전원 공급 장치를 손상시키거나 수명을 단축시킬 수 있으므로 M-CRPS 사양은 AC 전압이 반환된 후 재유입 전류의 양을 제한합니다. 재유입 전류의 평균 제공된 값은 입력 주파수의 절반 사이

클에서 최대 PSU 전류 등급($5 \times I_{rated,RMS}$)의 5배 미만이고, 입력 주파수의 한 사이클에서 $3.5 \times I_{rated,RMS}$ 미만이어야 합니다. 또한 입력 전류는 AC 입력을 적용한 후 입력 주파수의 두 사이클 이내에 $2 \times I_{rated,RMS}$ 이하의 값으로 안정화되어야 합니다.

이 기간 동안 PFC 펄스 폭 변조(PWM) 작동을 고려하면 더욱 복잡해집니다. PFC가 잘 제어되지 않는 경우 AC 전압이 재개될 때 부적절한 PWM 듀티 사이클이 발생하여 M-CRPS 사양을 초과할 수 있는 다른 큰 입력 전류 스파이크가 발생할 수 있습니다.

반면, AC 전압이 재개되면 PFC는 PFC 출력 전압을 가능한 한 빨리 조정 수준으로 부스트할 수 있을 만큼 충분한 전류를 공급해야 합니다. 그렇지 않으면 과부하로 인해 V_{OUT} 이 계속 하락하고 결국 DC/DC 컨버터의 입력 부족 전압 록아웃 수준이 트리거됩니다. AC 전압이 재개되면 PFC 출력 커패시터를 충전하는 데 큰 입력 전류가 필요합니다. 이러한 전류는 V_{IN} 이 V_{OUT} 보다 큰 경우 재유입을 통해, V_{IN} 이 V_{OUT} 보다 작은 경우 PFC 제어 루프로부터 얻습니다.

이 문서에서는 AC 전압이 강하 후 회복되는 경우를 대비하여, 재유입 전류($V_{IN} > V_{OUT}$) 및 비재유입 전류($V_{IN} < V_{OUT}$)가 충분히 제어되고 V_{OUT} 을 빠르게 상승시킬 수 있을 만큼 충분한 전류를 공급하고, 동시에 M-CRPS의 한계 사양을 초과하지 않도록 처리할 수 있는 솔루션을 제시합니다.

제안된 재유입 전류 제어 방법

그림 3에는 제안된 저비용 재유입 전류 제어 방법이 나와 있습니다. 그림 1과(와) 비교 시 두 가지 차이점이 있습니다. 첫째, R_T 가 AC 측에서 DC 측으로 이동했습니다. 둘째, Q_5 라는 금속 산화물 반도체 전계 효과 트랜지스터(MOSFET)가 기존의 기계식 릴레이를 대체했습니다. 솔리드 스테이트 릴레이를 선택하는 이유는 릴레이를 빠르게 온/오프해야 하는데 이 목적을 달성하기에 기계식 릴레이가 너무 느리기 때문입니다. 또한 MOSFET은 AC 전압을 끌 수 없기 때문에 DC 측에 배치됩니다. 돌입 전류 제한은 기존 방법과 동일하게 작동합니다. 입력 전압이 처음 PSU에 적용되면 R_T 는 돌입 전류를 제한합니다. 돌입 전류가 통과하면 Q_5 가 켜지고 R_T 는 우회됩니다.

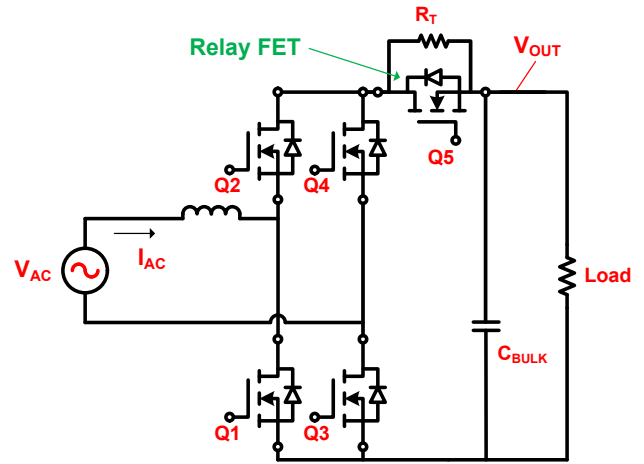


그림 3. 제안된 재유입 전류 제한 하드웨어 구조.

그림 4에는 제안된 재유입 전류 제어 방법이 나와 있습니다. V_{AC} 는 PFC 입력 전압이고, V_{OUT} 은 PFC 출력 전압이며, I_{AC} 는 입력 전류입니다. Q_1 및 Q_2 는 각 AC 하프 사이클에서 PFC 부스트 스위치 또는 동기 스위치로 작동하는 고주파 스위치입니다. AC 라인은 10ms 동안 강하한 후 PFC가 전부하에서 작동하는 동안 피크로 회복됩니다. 이는 AC 전압 강하 상황과 관련된 최악의 사례입니다.

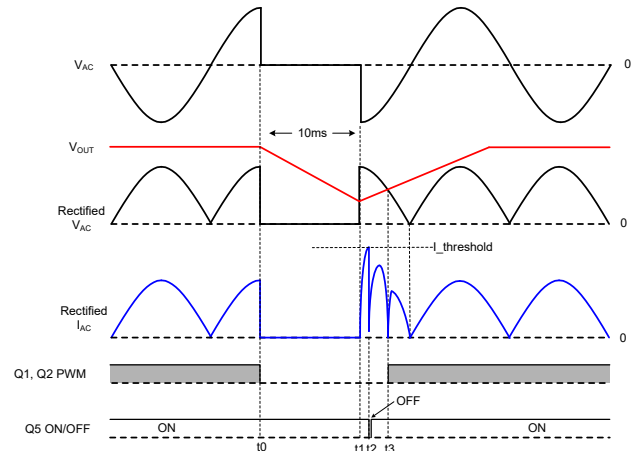


그림 4. 제안된 AC 강하 및 재유입 전류 제한 제어 알고리즘.

이것은 제안된 재유입 전류 제어 방법입니다.

- t_0 에서: AC 전압 강하가 감지되면 Q_1 및 Q_2 가 꺼집니다. 또한 전압 루프와 전류 루프가 계속 실행되면 통합기가 누적되기 때문에 PFC 전압 및 전류 루프를 모두 꺼야 합니다. AC 전압이 회복되고 PFC가 켜지면 큰 PWM 듀티 사이클이 존재하게 되고, 전원 공급 장치에 손상을 줄 수 있는 큰 전류 스파이크가 발생합니다.

- 전류 루프가 꺼지면 0으로 재설정하고 통합기 기록을 지워야 합니다. 통합기를 지우지 않으면 AC 전압이 회복되고 PFC가 켜질 때 PFC가 AC 전압 강하 전에 동일한 PWM 듀티 사이클로 켜지는데, 이는 적절한 듀티 사이클이 아닐 수 있습니다. 예를 들어, AC 전압 강하가 제로 크로싱에서 발생하는 경우 PWM 듀티 사이클은 거의 100%입니다. 전류 루프 통합기를 지우지 않고 AC 전압이 AC 피크에서 회복되면 AC 피크에서 거의 100% 듀티 사이클이 발생하고 전원 공급 장치에 손상을 줄 수 있는 큰 전류 스파이크가 생성됩니다. 전압 루프가 꺼지면 내부 값을 유지하도록 고정해야 합니다. 전압 루프 출력은 부하를 나타내며 전류 루프 레퍼런스 생성에 사용됩니다. 따라서 AC 강하 동안 부하가 변하지 않도록 값을 유지해야 합니다.
- t_1 에서: AC 전압이 돌아옵니다. V_{AC} 가 V_{OUT} 보다 크기 때문에 생성된 재유입 전류가 벌크 커패시터를 충전합니다. Q_1 과 Q_2 는 여전히 꺼져 있습니다.
- t_2 에서: 재유입 전류가 프로그래머블 임계값을 초과하고 릴레이 Q_5 턴오프 이벤트를 트리거합니다. 그런 다음, Q_5 가 꺼지면 재유입 전류가 R_T 에 의해 제한되고 그 규모가 빠르게 감소합니다. 릴레이 Q_5 는 매우 짧은 시간(예: $10\mu s$) 동안만 꺼졌다가 다시 켜집니다. Q_5 가 켜지면 재유입 전류가 임계값을 초과할 때까지 다시 상승합니다. 이 프로세스는 재유입 전류가 한계를 다시 초과하지 않을 때까지 반복됩니다. **그림 5**에는 이 프로세스의 순서도가 나와 있습니다.
- t_3 에서: V_{AC} 가 V_{OUT} 보다 작습니다. 이제 PFC를 켤 시간입니다. 전압 루프 레퍼런스를 t_3 의 순시 V_{OUT} 값과 동일하게 설정한 후 전압 루프를 켵니다. 그런 다음, 정상 설정값에 도달할 때까지 전압 루프 레퍼런스를 서서히 높입니다. 전류 루프의 경우, 먼저 듀티 사이클을 계산하고($D = (V_{OUT} - V_{AC})/V_{OUT}$) 전류 루프가 켜져 있을 때 계산된 D 에서 전류 루프 출력이 시작되도록 전류 루프에 주입합니다. 그러고 나서 전류 루프를 켵니다. 마지막으로, Q_1 및 Q_2 를 켜서 PFC 정상 작동을 허용합니다.

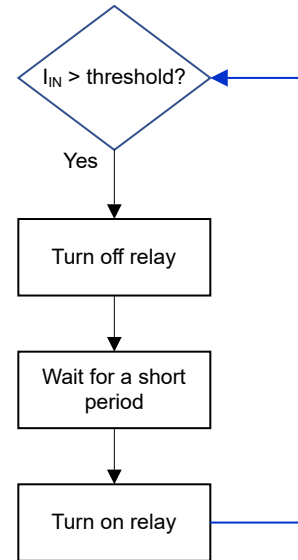


그림 5. 제안된 릴레이 온/오프 제어 알고리즘 순서도

이 프로세스는 V_{OUT} 이 V_{AC} 를 초과할 때까지 반복됩니다.

테스트 결과

제안된 방법은 3.6kW 토렘 폴 브리지리스 PFC [2]에서 테스트했습니다. **그림 6**은(는) AC 전압이 떨어진 후 10ms 만에 피크 전압까지 회복되는 모습을 보여줍니다. 채널 1(파란색)은 PFC 입력 전류 파형(I_{IN})이고 채널 2(청록색)는 릴레이 온/오프 제어 신호입니다. **그림 7**은(는) 릴레이의 온/오프 시점을 확대하여 보여줍니다. AC 강하 기간 동안 릴레이 Q_5 는 온 상태에 있습니다. C_{BULK} 는 저장된 에너지를 부하로 지속적으로 전달하며 V_{OUT} 은 강아됩니다. AC 전압이 재개된 후 릴레이가 온 상태이고 V_{AC} 는 V_{OUT} 보다 크기 때문에 재유입 전류가 빠르게 증가합니다. 재유입 전류가 사전 정의된 전류 제한 임계값(이 예에서는 40A)에 도달하면 릴레이가 꺼지며, 재유입 전류가 R_T 로 인해 매우 낮은 값으로 감소합니다. 릴레이는 $10\mu s$ 동안만 꺼졌다가 다시 켜집니다. 재유입 전류가 다시 한 번 상승합니다. 이 전체 프로세스를 통해 M-CRPS 사양 내에서 재유입 전류를 제한하는 동시에 C_{BULK} 를 빠르게 충전하기 위해 상당한 전류를 공급합니다. 또한 파형은 비재유입 전류가 큰 전류 스파이크 없이 잘 제어되는 것을 보여줍니다. 여기서 V_{AC} 는 V_{OUT} 보다 작습니다.

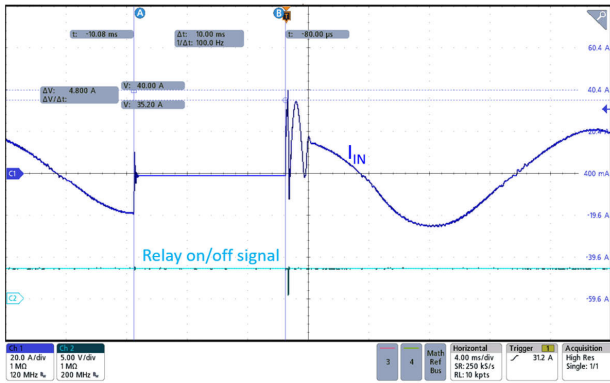


그림 6. 강하 후 AC 전압이 재개될 때 재유입 전류 제어.

그림 7은 제한된 기울기로 상승하는 두 번째 재유입 전류를 보여줍니다. 이는 전자기 간섭 필터 임피던스와 인쇄 회로 보드 트레이스 임피던스를 포함한 PFC 입력 임피던스가 전류 상승 기울기를 제한하기 때문에 발생합니다. 이 예에서 두 번째 재유입 전류의 규모는 40A 임계값을 초과하지 않으므로 릴레이는 한 번만 꺼집니다. 두 번째 재유입 전류도 임계값을 초과하면 릴레이가 다시 꺼집니다.

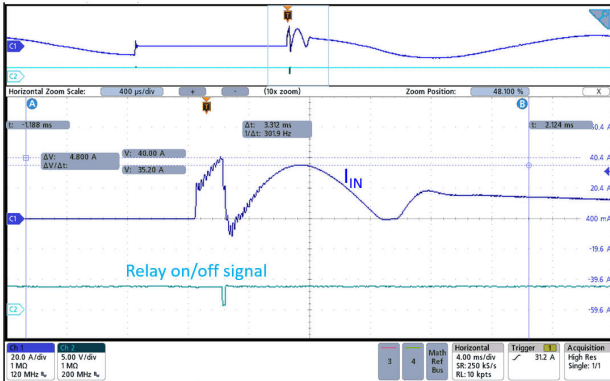


그림 7. 릴레이 켜기 및 끄기 순간에서 확대한 그림 6.

결론

데이터 센터에 사용되는 전원 공급 장치를 사용하려면 AC 전압이 강하 후 재개될 때 재유입 전류가 M-CRPS 사양에 정의된 제한을 초과하지 않아야 합니다. 기존의 기계식 릴레이를 솔리드 스테이트 릴레이로 교체하고, 재유입 전류가 프로그래머블 임계값을 초과하면 릴레이를 빠르게 끄거나 켜서 재유입 전류를 효과적으로 제어하여 M-CRPS

제한 사양을 초과하지 않지만 V_{OUT} 을 빠르게 상승시킬 수 있을 만큼 높게 유지할 수 있습니다. 또한 이 펌웨어 기반 방법은 기존 R_T 를 활용하여 매우 효과적인 저비용 재유입 전류 제어 솔루션을 완성합니다.

참고 자료

1. 모듈형 하드웨어 시스템 - 공통 이중화 전원 공급 장치 (M-CRPS) 기본 사양서. 버전 1.05 RC5. Open Compute Project: 2024년 9월 25일, 텍사스 오스틴.
2. 텍사스 인스트루먼트, n.d. 전자 계량기 기능을 지원하는 3.6kW, 단상 토렘 폴 브리지리스 PFC 레퍼런스 설계. 텍사스 인스트루먼트 레퍼런스 설계 번호 PMP23338. 2025년 3월 24일에 액세스함.

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 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