

모바일 로봇의 성능을 최적화하는 고밀도 모듈형 전력 공급 네트워크

바이코(Vicor)의 고밀도·고성능 전력 모듈을 활용한 모듈형 PDN 설계 접근 방식은 이러한 과제를 해결할 수 있는 대안이 된다. 슈퍼컴퓨팅 애플리케이션에서 축적된 근본적인 엔지니어링 원리와 경험을 바탕으로, 바이코의 고정 비율 전력 컨버터와 고효율, 광범위 입력 전압을 지원하는 영전압 스위칭(ZVS) 벽 또는 벽-부스트 레귤레이터를 활용함으로써 첨단 로봇 전력 시스템의 성능과 설계 유연성을 어떻게 향상시킬 수 있는지를 살펴볼 수 있다.

글 | 안나 지아손(Anna Giasson)와 스타브로스 도코폴로스(Stavros Dokopoulos), Vicor

모바일 로봇의 주행 거리, 생산성, 유연성은 전력 공급 네트워크(PDN)를 어떻게 최적화하느냐에 따라 크게 향상될 수 있다. 이러한 PDN에서는 배터리 전원 전압의 변화와 더불어, 고전력 AI 컴퓨팅 시스템, 모터 드라이브, 센서, 통신 시스템, 로직 보드 및 프로세서 등 전형적인 시스템에 포함될 수 있는 매우 다양한 부하로 인해 복잡한 전력 시스템 설계 및 아키텍처 고려 사항이 발생한다. 또한 고전력 스위칭 레귤레이터를 사용하는 고밀도·고집적 시스템을 개발하는 과정에서 자연스럽게 EMI(전자기 간섭) 이슈도 함께 대두된다. 그 결과, 로보틱스 전력 시스템은 여러 가지 고유한 도전에 직면하게 되며, 이를 해결하기 위한 새로운 접근 방식이 요구된다.

바이코(Vicor)의 고밀도·고성능 전력 모듈을 활용한 모듈형 PDN 설계 접근 방식은 이러한 과제를 해결할 수 있는 대안이 된다. 슈퍼컴퓨팅 애플리케이션에서 축적된 근본적인 엔지니어링 원리와 경험을 바탕으로, 바이코의 고정 비율 전력 컨버터와 고효율, 광범위 입력 전압을 지원하는 영전압 스

위칭(ZVS) 벽 또는 벽-부스트 레귤레이터를 활용함으로써 첨단 로봇 전력 시스템의 성능과 설계 유연성을 어떻게 향상시킬 수 있는지를 살펴볼 수 있다.

고려할 수 있는 두 가지 접근 방식은 다음과 같다.

첫째, IEC 규정에 따른 110V_{DC} SELV(Safety Extra-Low Voltage) 한계 내에서, 최대 75V까지의 전력 공급 네트워크에 광범위 입력 전압 범위를 지원하는 벽 및 벽-부스트 레귤레이터를 사용하는 방법이다. 이를 통해 저전압 로봇 전력 변환 단계는 절연형 DC-DC 컨버터에 비해 더 소형화될 수 있으며, 대형 또는 소형 플랫폼에서 사용되는 더 높거나 더 낮은 배터리 전압에도 유연하게 대응할 수 있다.

둘째, 고정 비율 컨버터를 활용해 전원 전압을 효율적으로 승압 또는 강압함과 동시에, 동일한 PDN 내에서 동적 응답 특성을 향상시키거나, 훨씬 더 높은 전압의 전원에 시스템을 적응시키는 방법이다.

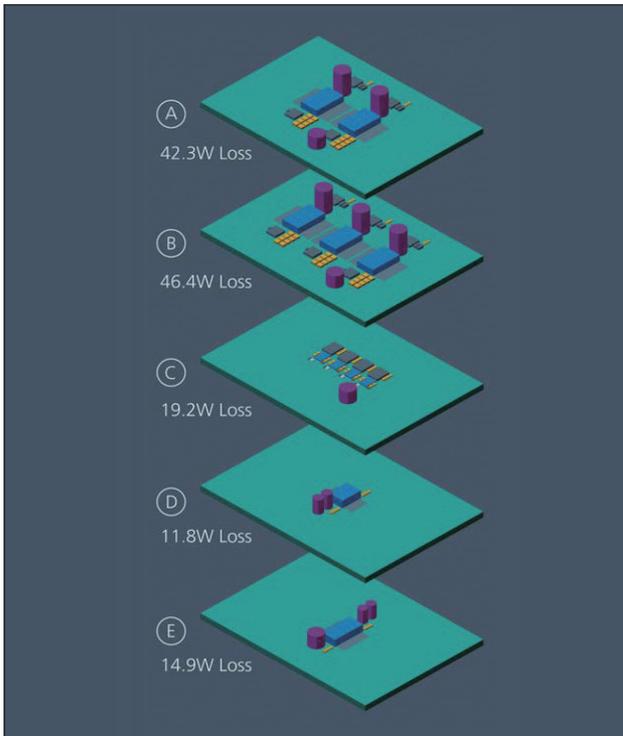
이 두 가지 전력 토폴로지에서 파생되는 다양한 전력 공급 네트워크 아키텍처는 설계자에게 모바일 시스템의 설계 목표

**저전압 전원: 고효율·광범위 입력 전압을 지원하는
벽 및 벽-부스트 컨버터**

24V 또는 57V 배터리와 같은 초저전압 전원으로 구동되는 경우(그림 2), 모든 부하는 종종 배터리의 음극에 공통으로 연결되므로 절연형 DC-DC 컨버터가 필요하지 않다. 이때 훨씬 더 바람직한 설계는 대기 전력이 낮고 96~97%의 높은 효율을 제공하는 최신 고전압 벽 컨버터를 사용하는 것으로, 이를 통해 배터리 수명을 효과적으로 늘릴 수 있다. 입력 전압 대비 출력 전압의 비율이 벽 컨버터가 듀티 사이클 측면에서 ‘스위트 스폿(sweet spot)’에 가깝게 동작하도록 허용된다면, 공통 모드 EMI 노이즈는 매우 낮아진다. 이 사례에서는 약 57V의 배터리 전압을 약 12V로 낮추는 것이 벽 컨버터의 최적 동작 조건에 해당한다.

많은 하드 스위칭 MOSFET 기반 벽 컨버터는, ‘97% 효율’

그림 3. 확장 가능한 600W급 48V→12V 솔루션과 필요한 외부 부품 구성 (A) 36~75V 입력, 320W 절연형-레귤레이션 모듈 2개, (B) 43~154V 입력, 240W 광범위 입력 절연형-레귤레이션 모듈 3개, (C) 30~60V 입력, 216W, 18A 벽 컨버터 4개, (D) 40~60V 입력, 750W 고정 비율 컨버터 1개, (E) 40~60V 입력, 750W 벽-부스트 + 고정 비율 컨버터 1개 전력 손실은 양산용 유닛을 사용해 측정했다.



이 명시된 낮은 입력 전압(V_{IN}) 조건이 아닌 24V를 초과하는 전압에서 구동될 경우 스위칭 손실로 인해 과열되는 문제가 발생한다. 스위칭 손실은 입력 전압(V_{IN})에 비례해 지수적으로 증가하기 때문에, 예를 들어 24V 플랫폼에서 48V 또는 57V 플랫폼으로 업그레이드하면 발생하는 열은 크게 늘어난다. 스위칭 주파수를 낮추면 손실과 최소 온타임(minimum on-time) 문제를 줄일 수 있지만, 그 대가로 출력 인덕터와 커패시터의 크기가 커진다.

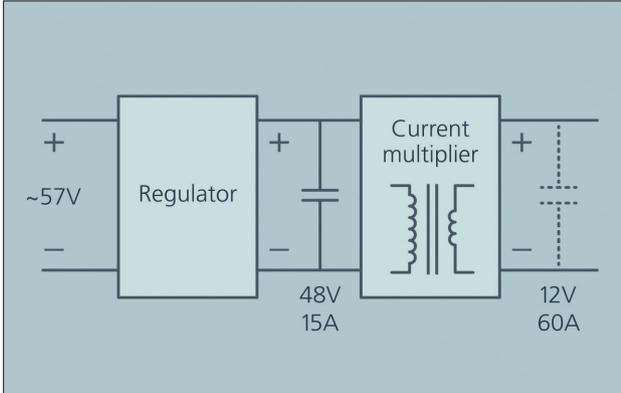
이와 관련해, 다른 고전력 컴퓨팅 및 자동차 애플리케이션에서 48V 백플레인 이 빠르게 채택되고 있는 흐름은 로봇 시스템을 유사한 방식으로 개선하는 데 좋은 모델을 제공한다. 그 결과 일부 제조사들은 48V 초과 입력에서 12V 출력을 제공하는 벽 컨버터의 효율을 실제로 96~97% 수준까지 끌어올렸으며, 2.5V와 같이 더 낮은 출력 전압에서도 유사한 성능을 달성하고 있다.

선택 가능한 옵션을 비교해 보기 위해, 그림 3은 동일한 조건에서 80% 부하로 측정된 40~60V 입력을 사용하는 600W급 12V 컨버터 몇 가지의 전형적인 효율, 손실, 크기를 보여준다.

- **솔루션 A:** ZVS 절연형 플라이백 컨버터로, 개발 초기 단계에서 많은 설계자들이 가장 먼저 선택하는 일반적인 방식
- **솔루션 B:** 더 넓은 입력 전압 범위를 지원하기 위해 고전압 트랜지스터를 적용한 또 다른 ZVS 절연형 플라이백 컨버터로, 여러 입력 전압 플랫폼을 커버하는 데 유용하다.
- **솔루션 C:** 스위칭 손실이 낮고 트랜스포머 손실이 없는 동기식 ZVS 벽 컨버터
- **솔루션 D:** 입력 전압(V_{IN})을 1/4로 낮추는 사인 진폭 컨버터(SAC™, 고정 비율 DC-DC 컨버터의 한 종류). 높은 대역폭과 비(非)레귤레이션 방식 덕분에 에너지 저장 소자가 거의 필요 없다.
- **솔루션 E:** 솔루션 D와 동일한 SAC에 벽-부스트 컨버터를 함께 패키징한 구성으로, 레귤레이터에 따른 손실이 추가되지만 입력 전압 범위가 40~60V로 더 좁은 대신, 효율은 쿼터-브릭(quarter-brick) DC-DC 컨버터에 필적하면서도 크기는 1/16 수준에 불과하다.

일반적인 벽 컨버터가 스위칭 주파수를 낮추거나, 크기

그림 4. 두 개의 전력 변환 단으로 구성된 720W(피크 1kW)급 48V→12V 벽 컨버터 구성도



를 키우거나, 성능을 과도하게 희생하지 않고는 처리하기 어려운 더 큰 전압 변환이 필요한 경우, 데이터센터 애플리케이션에서 흔히 사용되는 모듈형 2단 DC-DC 접근 방식 (Factorized Power)을 적용할 수 있다(그림 4).

이 구조에서는 36~75V 입력을 지원하는 벽-부스트 레귤레이터가 96~98%의 효율로 정확한 48V를 생성하고, 이를 입력으로 97.8% 효율의 4:1 전류 배율기(아래에서 설명하는 고정 비율 컨버터)에 공급한다. 이를 통해 더 작은 설치 공간에서 높은 동적 성능, 신뢰성, 효율을 동시에 달성할 수 있다. 전압 레귤레이션을 더욱 향상시키기 위해, 레귤레이터의 피드백을 전류 배율기 출력에서 취하는 방식도 가능하다. 입력 전압 정격을 60V가 아닌 75V로 설정한 이유는, 아래에서 설명하듯 모터 드라이브 환경에서는 전원 전압이 60V를 초과하는 피크가 발생할 수 있기 때문이다.

고정 비율 컨버터: 더 높은 성능의 전압 변환 및 절연

사인 진폭 컨버터(SAC™, 그림 3D)와 같은 고정 비율 컨버터는 벽 컨버터나 절연형 DC-DC 컨버터와 비교했을 때 가장 뛰어난 효율 성능을 제공한다. 이름에서 알 수 있듯이, 이들 컨버터는 입력 전압(V_{IN})을 출력 전압(V_{OUT})으로 $K = V_{OUT}/V_{IN}$ 이라는 고정된 비율로 변환하며, 별도의 레귤레이션은 수행하지 않는다. 따라서 입력 전압에 변동이 발생하면, 제어 루프 지연 없이 그 변동이 K 비율로 스케일되어 출력에 그대로 반영된다.

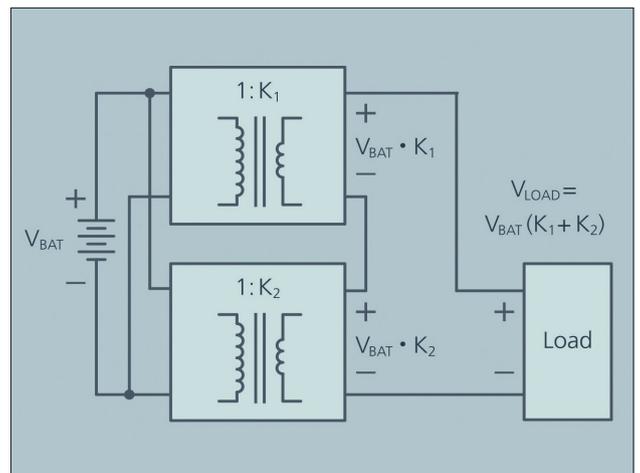
고정 비율 컨버터는 스위칭 단계에서 영전류·영전압 스위

칭(ZCS/ZVS)을 적용함으로써 최대 98%에 달하는 효율을 구현할 수 있다. 이 방식은 스위칭 손실을 최소화하고, 하드 스위칭 컨버터보다 훨씬 높은, 일반적으로 수 MHz 범위의 스위칭 주파수를 가능하게 한다. 그 결과 리액티브 소자와 EMI 필터를 비례적으로 줄일 수 있어, 소형 폼팩터와 매우 높은 전력 밀도를 달성할 수 있다. 고정 비율 컨버터는 본질적으로 교류 전력망에서 사용되는 변압기와 유사하다. 변압기 역시 고정 비율 컨버터로서, 전 세계 전력 분배를 가능하게 하는 핵심 요소다. 전력을 장거리로 전송할 때 전원 및 부하 전압보다 훨씬 높은 전압으로 송전하면, 동일한 전력을 전달하는 데 필요한 전류가 크게 줄어들어 가볍고 저비용의 송전선을 사용할 수 있으며, 부하 지점 근처에서만 짧은 저전압 케이블이 필요하게 된다.

이러한 유사성은 여러 측면으로 확장된다. 고정 비율 컨버터는 양방향 동작 및 회생(regeneration)이 가능해, 배터리 전압을 효율적으로 승압하여 훨씬 높은 전압의 부하를 구동할 수 있으며, 사실상 가상의 고전압 배터리 또는 전송 라인을 형성할 수 있다. 또한 제동 에너지를 고전압 배터리나 버스로 회생시키는 애플리케이션도 지원한다. 고정 비율 컨버터는 병렬 구성이 용이하며, 전압 드롭(droop) 공유 방식에 기반해 본질적으로 전류를 분담한다. 이때 전류 분담 정확도는 각 병렬 분기의 임피던스에 의해 결정된다.

절연형 고정 비율 컨버터는 많은 DC-DC 컨버터와 마찬가지로 출력단을 직렬로 연결할 수 있으며(그림 5), 이를 통해

그림 5. 절연형 고정 비율 컨버터를 입력 병렬·출력 직렬로 연결해 출력 전압을 합산할 수 있는 구성



하나의 배터리로부터 여러 개의 절연된 출력 전압을 생성할 수 있다. 이 방식은 차량 내 보조 배터리의 필요성을 없애고, 컨버터 수와 시스템 중량을 줄이는 동시에 로봇 프레임 설계를 단순화하는 효과를 제공한다.

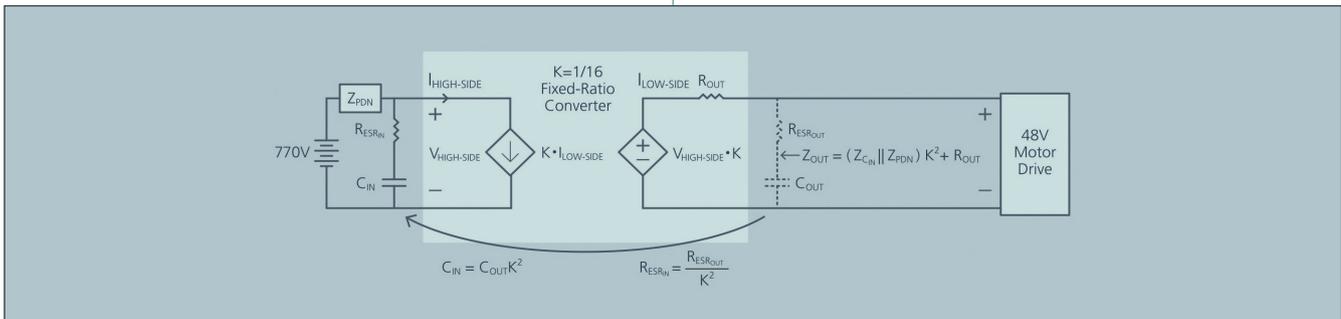
예를 들어, 저임피던스 12V 및 24V 전원 레일이 필요한 400V 시스템을 가정해 보자. 출력이 직렬로 연결된 두 개의 절연형 1:32 컨버터를 사용하면, 직렬 연결 지점이나 그 중간 지점을 탭(tap)함으로써 두 개의 전원 버스를 동시에 생성할 수 있다. 이와 같은 구성의 응용 가능성은 사실상 무한하다.

유효 소스 임피던스를 낮추는 임피던스 반사

고정 비율 컨버터는 1차측에서 2차측으로 임피던스를 반사(reflection)시키며, 이는 계통 연계형 AC 변압기의 동작과 유사하다. 이러한 특성은 로봇틱스 애플리케이션에서 특히 유용한데, 변압기를 통해 임피던스가 반사될 경우 그 크기가 변환 비율의 제곱에 비례해 스케일되기 때문이다. 이를 통해 부하 관점에서의 유효 소스 임피던스를 크게 낮출 수 있다.

임피던스 반사 효과는 벌크 바이패스 커패시터, EMI 필터와 같은 에너지 저장 소자와 기타 회로 파라미터의 활용도를 극대화하는 데 적용할 수 있으며, 초기 예에서 제시한 두 가지 모바일 로봇과 같은 저전압 시스템에서도 유효하다. 예를 들어, 770V 자율주행 차량 시스템이 대형 로봇 프레임 전반에 걸쳐 고전압을 분배한 뒤, 서보 드라이브나 AI 프로세서와 같이 동특성이 매우 큰 부하를 위해 저전압으로 변환하는 경우를 생각해 보자. 이때 부하에서 전원을 향해 바라보는 관점에서, 배터리 자체의 임피던스뿐 아니라 모든 전력 분배 경로의 임피던스가 실제 값보다 훨씬 낮게 보이게 된다.

그림 6. 임피던스 반사는 유효 소스 임피던스를 K²의 비율로 줄일 수 있다.



770V 배터리 전압을 $K = 1/16$ 고정 비율 컨버터(BCM-4414)를 사용해 약 48V로 변환하면, 그림 6에 나타난 것처럼 소스 임피던스가 감소하며 그 결과 입력 커패시턴스도 256 배 감소한다. 이때 입력 커패시터의 물리적 크기는 R_{ESRN} , 전압 정격, 수명, 성능을 고려하더라도 동등한 출력 커패시터에 비해 극히 작은 수준에 불과하다. 반면, 출력 측에 필요한 동등한 커패시터는 컨버터 자체와 맞먹는 크기가 될 수 있다. 레귤레이션된 DC-DC 컨버터에서도 어느 정도 이러한 효과를 얻을 수는 있지만, 이들 컨버터의 제어 루프 대역폭은 고정 비율 컨버터에 비해 훨씬 낮다. 또한 이러한 제어 지연과 더불어, 많은 컨버터에서 나타나는 불연속 전도 모드(DCM)와 관련된 지연까지 더해지면 유효 임피던스가 증가하게 되어, 임피던스 반사 효과가 제한된다.

이처럼 동특성이 매우 큰 고출력 부하의 경우, 저항성 및 유도성 임피던스를 줄이는 것은 동적 성능뿐 아니라 정적 성능 개선에도 직접적으로 기여한다. 모터는 일반적으로 고주파 펄스를 사용해 구동되며, 이 과정에서 순간적인 전류 변화가 매우 크기 때문에 소스 임피던스가 크면 단자에 인가되는 전압과 전류가 왜곡된다. 마찬가지로, 광범위한 PDN 내부에 존재하는 기생 인덕턴스는 모터 권선으로 공급될 수 있는 전류를 제한해 결과적으로 토크를 저하시킬 수 있다.

로봇틱스 애플리케이션에서의 적용 고려 사항

앞서 살펴본 내용은 전력 요구가 증가함에 따라 전력 분배 라우팅과 하네스 설계에 단순하지만 중요한 원칙을 적용해야 함을 시사한다. 즉, 더 높은 전압으로 전력을 분배한 뒤 부하 근처에서 앞서 논의한 컨버터를 사용해 부하 전압으로 변환

함으로써, 전류를 낮추고 분배 손실, (동적) 전압 강하, EMI 간섭을 줄일 수 있다. 또한 필드 상쇄(field-cancellation)를 활용한 지인덕턴스 레이아웃과 배선 예를 들어 타이트한 루프 구성, 트위스트 와이어, 인접한 PCB 평면을 통한 라우팅 역시 도움이 될 수 있다.

일반적으로 컨버터는 제어 루프의 대역폭 범위 내에서 소스의 AC 임피던스가 부하 임피던스보다 최소 10배 이상 작아야 하며, 특히 동적 부하에서는 그림 8의 예에서 보듯 전압 강하를 제한하는 것이 중요하다. 이는 미들브룩 안정성 해석 기준(Middlebrook Criterion)과도 부합한다. 따라서 허용 전류 용량(ampacity)에 맞춰 전선 굵기를 최적화하는 것과 더불어, 컨버터 입력단에 적절한 용량의 커패시터를 배치해 전선의 AC 임피던스를 낮출 수 있으며, 이를 통해 장거리 배선에서 발생하는 교류 전류 손실과 간섭도 함께 줄일 수 있다.

효율과 배터리 수명

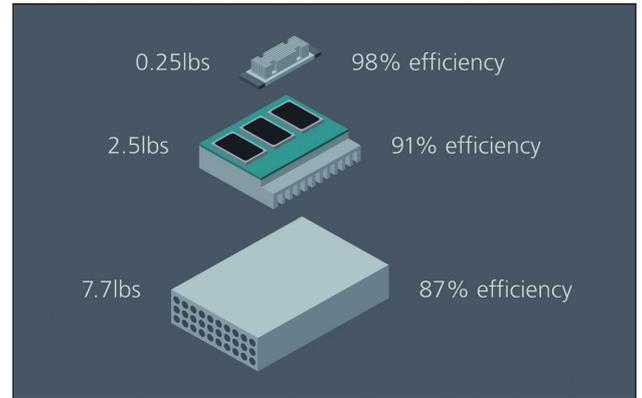
DC-DC 컨버터의 손실은 보통 부하 손실에 비해 한 자릿 수 이상 낮기 때문에 배터리 수명 측면에서 무시할 수 있을 것처럼 보일 수 있다. 그러나 실제로는 페이로드가 슬립 모드에 있을 때 발생하는 무부하(no-load) 손실이 누적되면서 예상보다 큰 영향을 미칠 수 있다. 데이터시트를 살펴보면 알 수 있듯이, 트랜스포머 기반 DC-DC 컨버터는 제어 회로를 구동하고 메인 스위칭 트랜스포머를 자화·탈자하기 위해 활성화 상태에서 상당한 전력을 소모하는 경향이 있으며, 이는 정격 출력 대비 0.5 ~ 1% 수준에 달할 수 있다. 일부 레귤레이션 컨버터는 무부하 상태에서 더 많은 전력을 소비하며, 출력 안정화를 위해 최대 부하의 몇 퍼센트에 해당하는 프리로드(pre-load)를 요구하거나 내부에 포함하기도 한다.

이러한 컨버터를 필요하지 않을 때 해당 부하와 함께 비활성화(disable)하는 것은 하나의 방법이 될 수 있지만, 비활성화 상태에서도 전력 손실이 상당할 수 있다.

따라서 트랜스포머 기반 컨버터의 사용 수를 가능한 한 줄이고, 필요한 절연 장벽마다 하나 정도만 사용한 뒤, 동일한 리턴을 공유하는 추가 출력은 벡 또는 벡-부스트 컨버터로 생성하면 유휴 손실(idle loss)을 비례적으로 줄일 수 있다.

많은 벡 및 벡-부스트 컨버터는 펄스 스킵핑(pulse-skipping)이나 그보다 진보된 기법을 활용해, 대기 전류

그림 7. (위에서 아래로) 방열판을 장착한 K = 1/16 고정 비율 컨버터, 방열판을 포함한 상용 레귤레이션 DC-DC 컨버터 어레이, 그리고 발전기 구동형 AC-DC 컨버터(팬 냉각)



(quiescent current)를 수 mA 수준으로 낮출 수 있다.

고정 비율 변환 vs. 레귤레이션 변환

부하가 허용하는 입력 전압 범위가 전원 전압 범위와 같거나 더 넓다면, 크기·효율·성능 측면에서 고정 비율 컨버터가 최적의 선택이 될 수 있다. 예를 들어 770V를 48V로 변환하는 1.5kW급 고정 비율 컨버터(그림 7)는, 트랜스포머와 레귤레이션 단계에서 추가 손실이 발생하는 레귤레이션형 DC-DC 파워 컨버터에 비해 손실이 약 1/2 ~ 1/3 수준에 불과하다.

조금 덜 엄밀하지만 실용적인 비교 대상으로는, 과거에 차량의 AC 발전기에서 동일한 드라이브에 전력을 공급하던 AC-DC 컨버터를 들 수 있다. 이 경우 정류기와 전형적인 PFC 부스트 단계에서 추가 손실이 발생한다. 이러한 비교는 건물, 대형 장비, 로봇 차량 등 다양한 분야에서 DC 그리드를 활용하는 것이 갖는 장점을 더욱 분명히 보여준다. 후자의 두 경우에서 최근 기술 발전으로 각각 약 94%와 91%의 효율을 달성할 수 있지만, 고정 비율 컨버터는 레귤레이션 기능 자체가 없기 때문에 그에 따른 손실도 발생하지 않는다.

높은 동적 특성 부하

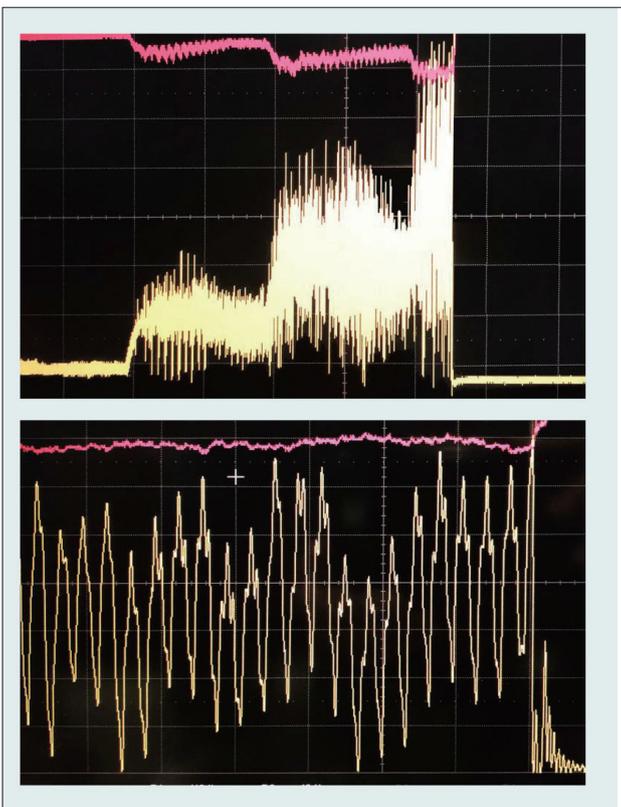
배터리에서 모터 드라이브를 직접 구동할 경우, 배터리와 케이블의 임피던스로 인해 전압 강하가 발생하며, 이러한 임

피턴스는 전류 자체도 제한한다. 전압 강하와 전류 제한은 모두 전선 굵기와 전원이 부하까지 전달되는 거리의 함수다.

고정 비율 컨버터를 사용하면 부하에서 바라본 유효 소스 임피던스는 낮아지지만, 그 대신 컨버터 그리고 궁극적으로는 전원 가 감당해야 하는 피크 전류는 증가한다. 따라서 과전류나 단락(short-circuit) 고장으로부터 보호하기 위해 컨버터에 내장된 보호 기능이, 매우 동적인 부하에 의해 동작(트리거)될 수 있으며, 이는 설계 단계에서 반드시 고려해야 할 요소다.

예로 그림 8에서는, 그림 7에 제시된 것과 같은 $K = 1/16$ 고정 비율 컨버터 4개(각각 35A)를 구동하기 위해 770V 입력 전압과 전류가 어떻게 공급되는지를 보여준다. 그림 6을 블록 다이어그램으로 사용해 보면, 출력 저항 $R_{OUT} = 3.5m\Omega$, 전력 분배 네트워크 임피던스 $Z_{PDN} = 10\Omega$ (배터리 임피던스는 무시

그림 8. (상단) 20ms/div 설정에서 측정한 오실로스코프 파형으로, 6kW(피크 8kW) 고정 비율 컨버터를 통해 48V 모터를 가속할 때의 770V 입력 전압[적색, 100V/div]과 전류[황색, 2A/div]를 보여주며, 가속 단계와 PWM 펄스를 확인할 수 있다. (하단) 100μs/div 설정에서의 피크 구간 상세 파형

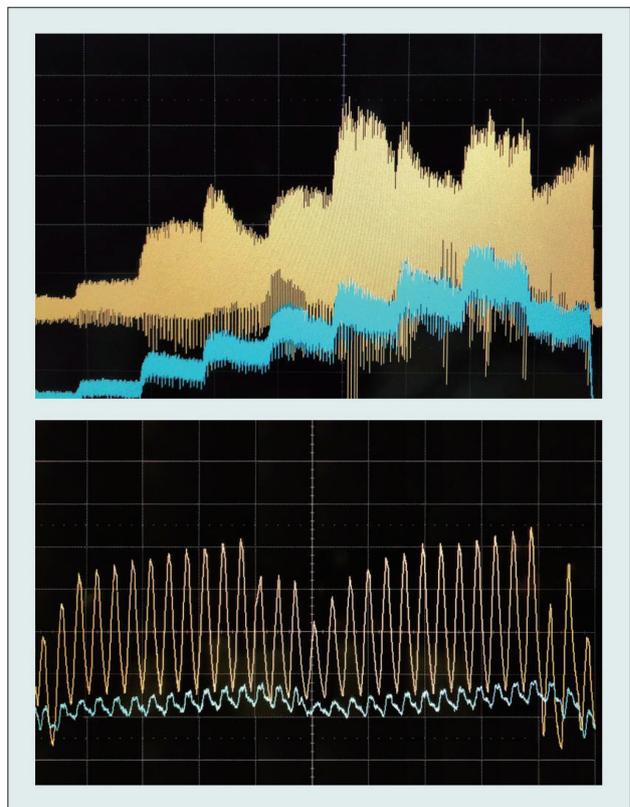


할 수 있을 정도로 작다고 가정) 조건에서 48V 모터 드라이브를 구동하는 사례에 해당한다.

컨버터를 모터 드라이브 근처에 배치하면, 컨버터에서 바라보는 10Ω 소스 임피던스는 $10/256 = \text{약 } 40m\Omega$ 로 감소하며, 48V 케이블이 없는 상태에서 출력 저항 R_{OUT} 을 포함한 총 임피던스는 43.5mΩ가 된다. 이 경우 소스에서 공급되는 피크 전류는 14.7A로, 저임피던스 컨버터가 평균 전류뿐 아니라 PWM 전류 피크까지 공급하기 때문이다. 따라서 컨버터는 평균 전류보다 4~5A 높은 피크 전류 처리 능력을 갖도록 사양이 정해져야 한다.

그림 9는 임피던스 반사 효과가 실제로 어떻게 작동하는지를 보여준다. 출력단에 크고 무거운 10mF, 3mΩ R_{ESR} 커패시터를 사용하는 대신, 입력단에 10μF, 30mΩ R_{ESR} 커패시터를 적용했다. 그 결과 소스 케이블에 흐르는 입력 리플 전류가 11A_{P-P}에서 1A_{P-P}로 크게 감소했으며, AC 임피던스가 10Ω에

그림 9. 컨버터 출력 전류 180A_{PK}[황색, 40A/div]와 입력 전류[청색, 2A/div]. 입력단에 커패시터를 배치함으로써 리플이 감소했다. (좌측) 20ms/div, (하단) 0.1ms/div





바이코(Vicor)의 고밀도·고성능 고정 비율 컨버터 모듈과 벅 및/또는 벅-부스트 레귤레이터 모듈을 창의적으로 활용하면, 각 부하에 대해 효율적이면서도 경량의 전력 공급을 통해 최적의 성능을 달성할 수 있다. 이러한 조합을 통해 비교적 넓은 입력 전압 범위를 지원하는 고효율 비절연 종단 전력 스테이지를 표준화하는 것도 가능하다.

서 약 1Ω으로 줄어들면서 손실도 대폭 감소했다. 피크 전류는 소형 출력 IC 필터를 적용한 경우 9.75A까지 낮아졌으며, 이는 컨버터의 연속 전류 한계인 8.75A를 약간 초과하지만, 14A 단기 전류 한계 범위 내에는 충분히 들어오는 수준이다.

커패시티브 부하

시동 시 모터 드라이브와 컴퓨팅 보드는 큰 커패시티브 부하로 동작한다. 컴퓨팅 카드에는 다수의 온보드 벅 컨버터가 배열 형태로 탑재되어 있으며, 각 컨버터는 벅 입력 커패시터와 추가적인 IC 필터를 포함하는 경우가 많다. 이러한 부하에 전력을 공급하는 DC-DC 컨버터는 허용 가능한 외부 부하 커패시턴스가 충분히 크게 규정되어 있거나, 대용량 커패시티브 부하와 함께 사용하기 위해 프리차지(pre-charge) 회로가 뒤따라야 한다. 이는 고정 비율 컨버터로 모터 드라이브를 구동하는 경우에 특히 흔히 요구된다.

이 항목은 설계 후반까지 간과되는 경우가 많다. 일부 레귤레이터, 특히 벅-부스트 컨버터는 배터리 충전 용도로도 설계되어 있어 별도의 전류 제어 루프를 제공하거나 소프트 스타트 시간을 조절할 수 있으며, 이를 통해 매우 큰 부하 커패시턴스를 가진 시스템에서도 안정적으로 사용할 수 있다.

전력 회생과 입력 전압 고려 사항

동적 동작이나 제동 과정에서 모터 드라이브는 발전기처럼 동작할 수 있다. 57V 예제를 기준으로 보면, 회생 동작 중인 주 모터 드라이브의 역방향 전류는 연결된 하네스를 통해 배터리를 충전하게 되며, 이 과정에서 경로상의 임피던스에 비례해 전압이 상승해 60V를 초과할 수도 있다. 따라서 이 전원으로 구동되는 DC-DC 컨버터는 일반적으로 많이 사용되

는 60V 정격이 아니라, 그보다 더 높은 전압 정격을 가져야 한다.

그림 6의 개략도는 그림 8의 예와 같이 양방향 컨버터를 통해 모터 드라이브에 전력이 공급되는 전력 분배 네트워크에도 동일하게 적용된다. 회생 에너지는 컨버터를 통해 ZOUT에 비례해 저전압 측과 고전압 측 단자 모두의 전압을 상승시킬 수 있다. 반면 컨버터가 단방향(unidirectional)일 경우, 이 회생 에너지는 차단되며 출력 커패시터 C_{OUT}만 충전된다. 따라서 회생 에너지와 그로 인한 전압 상승은 가능하다면 제한해 컨버터와 C_{OUT}의 최대 출력 전압 사양을 넘지 않도록 해야 하며, 필요 시 해당 에너지를 흡수하기 위한 브레이크 회로(brake circuit)를 구현할 수 있다.

요약

성능을 최적화하고 주행 거리, 생산성, 유연성을 높이기 위해 로봇 시스템 설계자는 애플리케이션의 전력 트리를 체계적으로 정리하고, 다양한 컨버터 조합과 PDN 설계 전략을 비교·검토할 필요가 있다. 플랫폼 전반에는 더 높은 전압을 분배하고, 부하 지점 근처에서 필요한 전압으로 변환하는 방식이 특히 유리하다.

바이코(Vicor)의 고밀도·고성능 고정 비율 컨버터 모듈과 벅 및/또는 벅-부스트 레귤레이터 모듈을 창의적으로 활용하면, 각 부하에 대해 효율적이면서도 경량의 전력 공급을 통해 최적의 성능을 달성할 수 있다. 이러한 조합을 통해 비교적 넓은 입력 전압 범위를 지원하는 고효율 비절연 종단 전력 스테이지를 표준화하는 것도 가능하다. 또한 적절한 변환 비율을 갖는 고정 비율 컨버터를 적용함으로써, 이러한 전력 스테이지를 고전압 배터리 아키텍처와 효과적으로 연결할 수 있다. **SN**