

# 새로운 우주 애플리케이션을 위한 고전력 밀도 및 저잡음 구현

위성 간 통신 및 지상과의 고비용 통신 트래픽을 줄이기 위해, 더 높은 연산 성능이 위성 플랫폼 자체에 탑재되고 있다. 이러한 온보드 연산 수요를 충족하기 위해서는 신호 및 데이터 처리 하드웨어뿐만 아니라, 시스템 전력 및 부하지점(Point-of-Load, PoL)의 전력 요구사항들이 증가해야 한다. 하드 스위칭 방식의 컨버터는 크기, 효율성, 전자기 간섭(EMI) 측면에서 한계가 있기 때문에, 시스템 엔지니어와 전원 공급 설계자는 더 진보된 전원 공급 토폴로지를 고려해야 한다.

글 | **켄 코프먼(Ken Coffman)**과 **살라 벤 두아(Salah Ben Doua)**, Vicor

위성 간 통신 및 지상과의 고비용 통신 트래픽을 줄이기 위해, 더 높은 연산 성능이 위성 플랫폼 자체에 탑재되고 있다. 이러한 온보드 연산 수요를 충족하기 위해서는 신호 및 데이터 처리 하드웨어뿐만 아니라, 시스템 전력 및 부하지점(Point-of-Load, PoL)의 전력 요구사항들이 증가해야 한다. 하드 스위칭 방식의 컨버터는 크기, 효율성, 전자기 간섭(EMI) 측면에서 한계가 있기 때문에, 시스템 엔지니어와 전원 공급 설계자는 더 진보된 전원 공급 토폴로지를 고려해야 한다.

현대의 ASIC, FPGA, CPU, GPU는 물리적으로 크기가 크고 냉각 솔루션이 필요하기 때문에, 이와 같은 대형 칩 주변의 회로 기판 공간은 매우 중요하다. 이 칩들은 점점 더 낮은 전압과 더 높은 전류를 요구하므로 최적화된 전력 전달 네트워크(PDN)가 필수적이다.

따라서 PDN 작업을 두 개의 구간으로 나누는 것이 도움이 된다: 편리한 위치에 배치할 수 있는 조절 구간과 가능한 한 부하에 가까운 위치에 배치함으로써 이점을 얻을 수 있는 전력 전달 구간이다. 이는 Vicor의 분할 전력 아키

텍처(Factorized Power Architecture, FPA™)의 기본 원칙이다.

소프트 스위칭 토폴로지는 고조파 잡음이 적은 높은 기본 변환 주파수를 가능하게 함으로써, 하드 스위칭 컨버터에 비해 뚜렷한 이점을 가지고 있다.

하드 스위칭 방식의 다상 구조와 비교를 해보면...

- ① 가장 높은 주파수로 동작하는 제로 전압 스위칭(ZVS) 및 제로 전류 스위칭(ZCS) 토폴로지는 공간 효율성이 더 높고, 불필요한 전력 손실이 더 적다
- ② 제로 전압 스위칭(ZVS) 및 제로 전류 스위칭(ZCS) 토폴로지는 고주파의 고조파 계열 노이즈 특성이 없다.
- ③ 1MHz를 초과하는 동작 주파수를 가진 Vicor 컨버터는 문제를 일으키는 100~500kHz 대역의 주파수 성분을 포함하지 않는다.
- ④ 낮은 고조파 성분과 높은 변환 주파수 특성을 갖고 있기에 노이즈 필터 설계도 소형화할 수 있다.

1MHz 이상에서 동작하는 Vicor 전원 모듈은, 특히 부품 배치와 장치 간 연결이 적절히 고려될 경우, 엔지니어가 공통 모드(CM) 및 차동 모드(DM) 잡음이 낮은 설계를 가능하게 해준다.

항상 그렇듯이 입력 및 출력 필터는 필요하며 적절하게 설계되고 배치되어야 하지만, Vicor 컨버터의 고유 특성은 이러한 작업을 보다 쉽게 만들어 준다.

### 분할 전력 아키텍처: 고전류 및 저전압의 효율적 전달

위성 전력 시스템 설계자들이 직면한 주요 과제들:

- ① 10A 단위에서 수백(100s) A에 이르는 점점 더 높은 부하 전류 요구
- ② 보다 엄격한 허용 오차 범위로 더 빠른 과도 응답을 요구하는 부하
- ③ 전력 전달 네트워크(PDN)의 손실 및 임피던스 최소화 요구
- ④ 전선(도체) 크기를 줄이기 위한 고전압 버스 사용 확대

우주에서의 발전 과정 중에 있는 전기적 요구 사항 외에도 방사선 TID(총 이온화 선량) 및 SEE(단일 이벤트 효과) 요구 사항이 추가되었다. 일부 경우에는, 작고 빠르며 저렴한 우주 플랫폼 및 발사를 지향하는 신우주(New Space) 철학에 따라, 고가의 방사선 경화 대신 비용이 낮은 방사선 내성(rad-tolerant) 설계가 채택되었다.

이러한 새로운 접근 방식은 특정 임무에 따른 허용 가능한 성능과 신뢰성 수준을 정의한 후, 크기(Size), 무게(Weight), 전력소비(Power)의 균형(SWaP) 및 비용 효율성을 기준으로 보드 및 전자 장치를 설계하는 것이다. 이러한 설계 전략은 반 앨런(Van Allen) 복사대(방사선 벨트) 내부의 LEO(저지구 궤도) 및 MEO(중간지구 궤도) 위성 궤도에 적합하다.

고전류 및 고밀도 전력 전달 네트워크(PDN)를 최적화하기 위해서는, 새로운 접근 방식이 필요하며 분할 전력 아키텍처(FPA)를 고려해야 한다. Vicor의 New Space FPA는 PDN을 세 단계로 나눈다.

고정 비율의 비조정 절연형 DC-DC 버스 컨버터

(BCM®)와 절연 및 전압 변환 모듈(VTM™)은 전압을 한 레벨에서 다른 레벨로 변환한다. 사전 조절 모듈(PRMTM) 레귤레이터는 입력 전압과 출력 부하가 변동될 때 전압 조절을 통해 컨버터 출력 전압을 목표 값으로 조절하는 역할을 한다.

현재 세대의 Vicor New Space 컨버터에서는 규제되지 않은 1단계 BCM이 우주선 버스와의 절연, 하위(다운스트림) 컨버터에 공급 전압 제공 및 하위 컨버터와 호환되는 중간 버스 전압을 생성하기 위한 전압 변환등의 역할을 한다.

현재 BCM 설계는 100VDC를 33VDC로 변환하는 3:1 비율을 제공하지만, 다른 버스 전압을 지원하기 위해 다양한 변환 비율도 연구되고 고려되고 있다.

2단계 PRM은 정밀한 출력 전압 조절 기능을 수행하며, 출력 전압은 13.4V에서 35V까지 조절 가능하다.

3단계 VTM은 전력 전달 단계이다. PRM에서 공급된 고전압을 부하에서 요구하는 전압으로 변환한다. 현재 두 가지 변환 비율이 제공된다: 8:1 및 32:1 이다. VTM은 출력 전류 변환에 대한 입력이 전압 변환 비율의 역수이기 때문에 전류 승수(current multiplier)라고 불린다. 예를 들어, 8:1 VTM에 6A가 입력되면 출력 전류는 48A가 된다.

### 우주 공간을 위한 저잡음 분할 전력 아키텍처(FPA) 설계

BCM, PRM, VTM은 분할 전력 아키텍처(FPA)를 가능하게 하는 핵심 부품이다. 현재 세대의 방사선 내성 New Space BCM은 Vicor의 특허 기술인 사인 진폭 변환(Sine Amplitude Conversion, SAC™) 토폴로지를 사용하며, 최대 96.9%의 뛰어난 효율을 제공한다.

Vicor PRM은 특허받은 ZVS 벡 부스트(buck-boost) 레귤레이터 제어 아키텍처를 채택하여 고효율 스텝 업(승압) 및 스텝 다운(감압) 전압 조절과 부드러운 시동(soft start)을 제공한다. VIN과 VOUT이 같을 때 최대 효율이 달성되며, 최신 PRM 기준으로 최대 97% 효율을 제공한다.

VTM 전류 승수는 고효율 전압 변환 모듈이며, Vicor의 독자적인 ZCS/ZVS 사인 진폭 변환(SAC)을 사용하여 고순도의 순수한 정현파를 공통 모드 대칭으로 변환한다. 이러

한 특성은 일반적인 하드 스위칭 PWM 타입 컨버터에서 발생하는 고조파를 생성하지 않으며, 최소한의 노이즈만을 생성한다.

이 제어 아키텍처는 동작 주파수를 전력 시스템(power train)의 공진 주파수에 고정시켜, 최대 97%의 효율을 가능하게 하고, 리액턴스(무효 성분)를 효과적으로 상쇄하여 출력 임피던스를 최소화한다. 이러한 매우 낮고 비유도성(non-inductive) 출력 임피던스는 부하 전류가 급변할 때 거의 즉각적으로 반응할 수 있게 한다.

VTM은 1마이크로초 이내에 크기에 관계없이 부하 변화에 반응한다. VTM의 매우 높은 대역폭은 부하 지점(Point-of-Load)에 대용량 커패시터를 필요 없게 한다. 외부 출력 커패시터가 없어도 VTM의 출력은 갑작스러운 전류 급증에 대해 제한된 전압 변동을 보인다. 최소한의 외부 바이패스 정전 용량(저 등가 직렬 저항/equival 직렬 인덕턴스(ESR/ESL) 세라믹 커패시터 형태)으로도 출력 과도 전압 오버슈트를 최소화할 수 있다.

VTM은 커패시턴스나 인덕턴스를 저장하지 않고 거의 투명하게 작동하기 때문에, 대용량 커패시턴스(bulk capacitance)를 입력 전압 측에 배치할 수 있다. 이때 전압의 제공 항과 선형 전압 변환 비율의 이점을 누릴 수 있다.

$$E_j = 1/2 CV^2$$

$E_j$  = 저장 에너지(단위 : Joule)

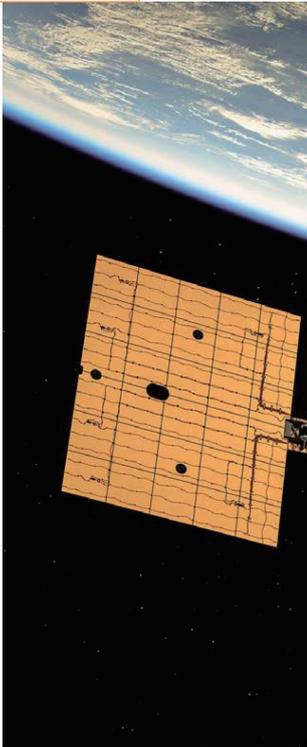
$C$  = 정전용량(단위 : Farad)

$V$  = 전압(단위 : Volt)

예를 들어, 8:1 변환 비율을 가진 Vicor VTM을 사용한 동등한 에너지 저장의 경우, 28V에서 25 $\mu$ F의 입력 커패시턴스는 3.3V에서 1600 $\mu$ F의 출력 커패시턴스와 유사한 에너지 저장 효과를 낸다(그림 1 참조).

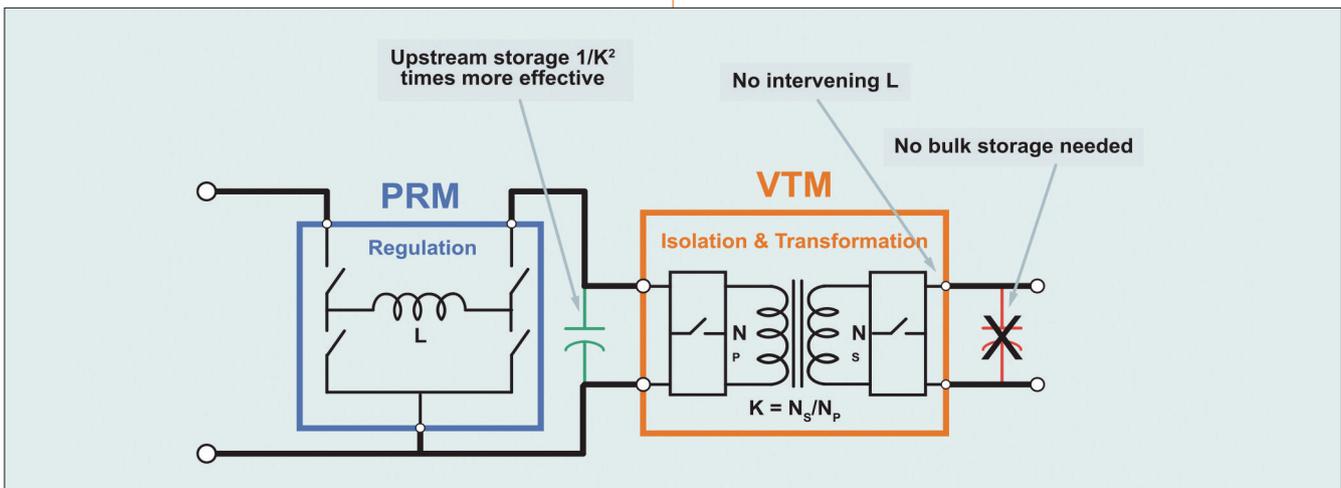
VTM은 거의 투명하게 작동하기 때문에, 입력과 출력 간의 커패시턴스 전달 비율은 펄스 부하(pulsed load)에 효과적으로 대응할 수 있다. 즉, 이 변환은 더 작은 값의 커패시턴스(고전압에서)를 사용하여 펄스 부하 요구 사항을 충족할 수 있다는 의미이다.

Vicor의 방사선 내성 New Space VTM은 8:1 변환(50A에서 3.3V)에서 94.7%의 최대 효율을, 150A에서 0.8V의 고전류 32:1 변환에서는 92.9%의 최대 효율을 보인다.



### FPA 방식의 에너지 저장 및 동적 응답

그림 1. Vicor의 PRM 및 VTM 모듈 제품을 사용한, 보다 효율적이고 유연한 분할 전력 아키텍처(FPA)를 보여주는 다이어그램





### FPA의 장점

분할 전력 아키텍처(FPA™)는 전력 시스템의 밀도와 고전류 요구사항을 급속히 발전하고 있는 CPU, GPU, ASIC 기술에 보조를 맞출 수 있게 해준다. 주요 시스템 설계 상의 장점은 다음과 같다:

- ① CPU/GPU 근처의 PDN(전력 전달 네트워크) 점유 면적을 50% 이상 절감
- ② PDN 및 관련 회로기판 손실의 크기를 한 자릿수로 줄임
- ③ PRM을 중요하지 않은 영역(기판의 가장자리 등)에 배치함으로써 성능 제약 해소
- ④ CPU의 입출력 라우팅 단순화
- ⑤ VTM의 낮은 노이즈 성능으로 인해 프로세서 SerDes 근처 배치 시 발생할 수 있는 위험 완화

조절되지 않은 DC 전원에서 작동하는 BCM, PRM, VTM의 조합을 포함한 전력 시스템의 전반적인 최대 효율은 저전압 DC 출력이 89%(50A 변환 시 100V:3.4V)와 87.3%(150A 변환 시 100V:0.8V)이다. 더 높은 효율은 더 낮은 총 발열로 이어지며, 냉각 메커니즘이 추가적인 질량과 구조를 요구하는 우주선 전력 시스템 설계에서 이는 매우 중요한 고려 사항이다.

### 우주 공간 전력 솔루션의 방사선 내성 매개변수 요약

저지구 궤도(LEO) 및 중간지구 궤도(MEO)에서 유효한 기간 동안 견딜 수 있는 전력 모듈을 만들기 위해서는 많은 작업이 필요하다. TID(총 이온화 선량) 요구사항을 충족하기 위해, 구성 부품은 방사선 성능 기준으로 신중히 선택되고 선별되어야 하며, 파라미터 변화는 성능 보장을 위한 최악 조건 분석(worst case analysis)에 포함해야 한다.

향상된 저선량률 민감도(ELDRS) 요구 사항을 충족하기 위해, ELDRS 성능이 확인된 부품만을 사용하거나, 부품을 저선량률 조건으로 테스트한다.

단일 이벤트 효과(SEE) 성능 요건을 충족하기 위해, 가속된 하전 입자를 활용한 광범위한 테스트가 수행되었다. 사용되는 모든 부품은 35MeV-cm<sup>2</sup>/mg의 선형 에너지 전달(LET) 조건에서도 동작이 가능한지 테스트되고 분석되었다. SEFI(단일 이벤트 기능 중단)를 완화하기 위해, 모니터링 및 전원 리셋 기능이 포함된 이중화된 내부 파워트레인이 구현되었다.

Vicor New Space 방사선 내성 전력 모듈들은 LET (linear energy transfer) 35MeV-cm<sup>2</sup>/mg까지 생존이 가능하며, TID 기준으로는 50krad 등급을 받았다.

최악 조건 회로 분석(WCCA)은 부품 샘플 테스트를 기반으로 하여, 통계적 신뢰 한계(99% 확률에 신뢰수준 90%)를 포함한 모든 회로에서 수행되었다. 극단값 분석(EVA), 제공근(RSS), 몬테카를로(Monte Carlo) 분석 기법들이 적절히 사용되어 전력 모듈 설계를 평가하였으며, 이를 통해 모든 부품이 기대한 성능을 발휘할 수 있도록 보장하였다.

### 결론

요약하자면, Vicor 기술은 New Space 임무에 적합한 핵심적 장점을 가지고 있다. Vicor 솔루션을 더 자세히 살펴보기 위해, Vicor는 선정된 고객을 대상으로 NDA(비밀 유지계약)하에 보다 자세한 정보와 방사선 테스트 데이터를 공유한다. **SN**