

# 전력 모듈을 활용해 전기차의 고전압 프리차지 회로를 제거하는 새로운 방법

자동차가 전기차 플랫폼으로 전환되면서 크기, 무게, 그리고 전력 밀도가 중요한 역할을 하게 되었다. 예를 들어, 800V 구동 모터 인버터의 대용량 커패시터 부하는 손상될 수 있는 돌입 전류를 방지하기 위해 별도의 프리차지 회로가 필요하다. 바이코(Vicor)의 고정비율 컨버터는 새로운 설계 가능성을 제시하며, 다른 전력 전송 네트워크보다 더 효과적으로 프리차지를 지원한다.

글 | 패트릭 코왈리크(Patrick Kowalyk) 자동차 분야 수석 필드 애플리케이션 엔지니어, 바이코(Vicor)

자동차 산업이 전기차(EV)로 전환함에 따라, 설계 엔지니어들은 근본적인 전기 아키텍처를 개발하는 과정에서 여러 도전에 직면하고 있다. 예를 들어, 800V 구동 모터 인버터의 대용량 커패시터 부하는 손상될 수 있는 돌입 전류를 방지하기 위해 전용 프리차지 회로가 필요하다.

동시에 EV 설계자들은 시스템의 크기, 무게, 비용을 지속적으로 줄이기 위해 노력하고 있다. 문제는 설계와 비용의 부담을 최소화하면서도 견고하고 신뢰성 높은 전기 아키텍처를 구현하는 데 있다. 이러한 균형을 달성하기 위해 엔지니어들은 전력 시스템 설계에 대한 새로운 접근 방식을 고려해야 한다.

고밀도의 전력 모듈을 활용하면, 엔지니어들은 차량의 프리차지와 관련된 다양한 트레이드오프를 균형 있게 조정할 수 있는 새로운 아키텍처를 설계할 수 있다. 고정비율 컨버터 모듈은 가장 효율적인 프리차지 시스템을 구현하기 위한 핵심 요소이다.

## 높은 돌입 전류 제어하기

전기차가 동작하기 위해서는 네 가지 주요 구성 요소가 필요하다. 트랙션 배터리, DC-DC 컨버터, 트랙션 모터 인버터, 그리고 전기 모터이다. 이 구조에서 배터리는 트랙션 모터 인버터에 800V 고전압 DC 전력을 공급하고, 인버터는 이를 AC 전력으로 변환해 모터를 구동한다.

트랙션 배터리에서 트랙션 모터 인버터로 전력을 전달하는 과정에는 안전성과 신뢰성 측면의 여러 과제가 존재한다. 트랙션 모터 인버터는 간헐적으로 높은 전류를 요구하기 때문에, 안정적인 DC 전력을 유지하기 위해 대용량 DC 링크 커패시터를 통합해야 한다. 많은 차량에서 총 DC 링크 커패시턴스는 약 58,000 $\mu$ F에 달하며, 이는 매우 큰 용량의 커패시티브 부하를 의미한다.

차량이 시동될 때, 이 커패시터가 충전되지 않은 상태(0V)에서 트랙션 배터리를 인버터에 직접 연결하면 높은 돌입 전류가 발생한다. 배터리 배선의 저항이 마이크로옴( $\mu\Omega$ ) 단위이고, 배터리가 800V로 동작하는 경우, 발생하

는 전류(암페어)는 옴의 법칙에 따라  $I = (800V - 0V) / R$ 로 정의된다.

이러한 높은 돌입 전류는 접지 결함, 장비 손상, 퓨즈 단선 등과 같은 시스템 안전 위험을 초래할 수 있다 (그림 1). 또한 DC 링크 커패시터가 충전될 때 발생하는 높은  $dV/dt$ 는 링잉(ringing) 현상과 부품 손상을 유발할 수 있다.

### 올바른 프리차지의 모범 사례

이러한 문제를 해결하기 위해 전기차에는 프리차지 회로(pre-charging circuit)가 사용된다. 프리차지 회로는 차량의 전원이 켜질 때 발생하는 돌입 전류를 제한하는 초기 동작 모드이다.

대부분의 전기차에서 프리차지는 트랙션 배터리와 트랙션 모터 인버터 사이에 전용 컨택터(contactors)와 전류 제한 저항기를 배치하여 수행된다(그림 2). 프리차지 단계에서는 SW1이 열리고 SW2와 SW3가 닫혀 있다. 이 상태에서 차량은 직렬 저항 R1을 통해 DC 링크 커패시터를 서서히 충전하며, 돌입 전류를 효과적으로 제한한다.

DC 링크 커패시터가 800V에 도달하면 프리차지가 완료되고, SW3가 열리며 SW1이 닫힌다. 이후 차량은 정상 동작 모드로 전환되어 일반 주행 조건에서 작동하게 된다.

이러한 프리차지 방식은 기능적으로 동작하지만, 이상적인 방법이라고 보기는 어렵다. 가장 큰 단점은 강건하지만 크고 무겁고 비싼 프리차지 컨택터를 포함한 추가 부품이 필요하다는 점이다. 공간, 무게, 비용이 매우 중요한 전기차 설계에서는 이러한 추가 부품이 바람직하지 않다.

또 다른 문제는 고전압 버스에서 프리차지를 수행할 경

그림 1. 차량 시동 시 트랙션 인버터의 DC 링크 커패시터가 충전되면서 장비에 손상을 줄 수 있는 매우 큰 돌입 전류가 발생할 수 있다.

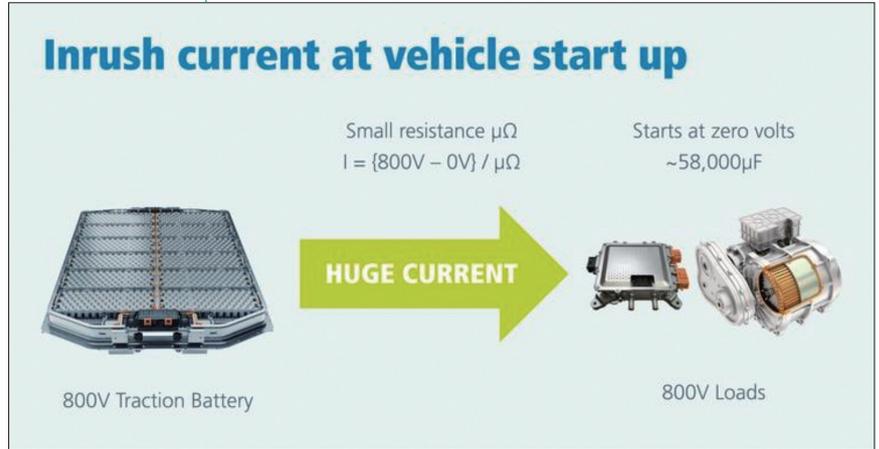
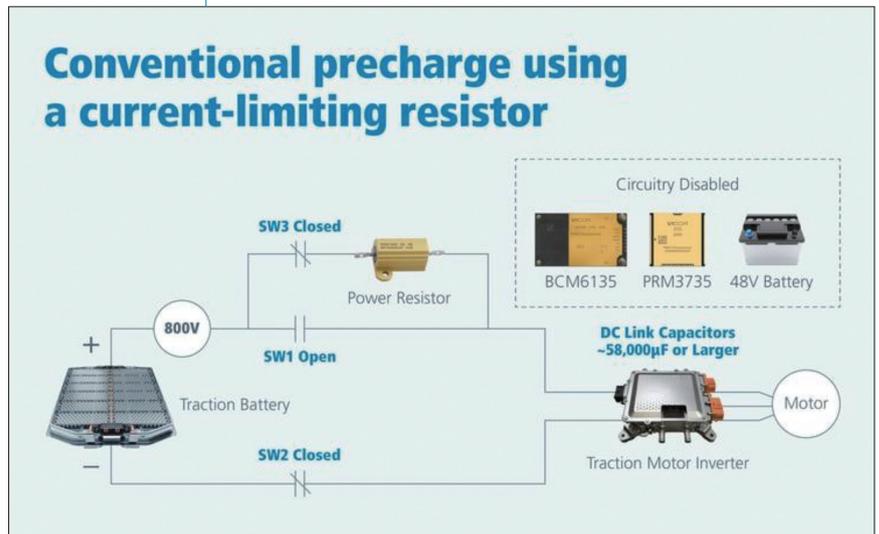


그림 2. 프리차지 중에는 전용 컨택터 SW3가 배터리와 인버터 사이에 직렬 저항기를 연결한다. 프리차지가 완료되면 SW3가 열리고 SW1이 닫히며, 배터리가 인버터에 다시 연결된다.



우 열로 인한 고장에 취약하다는 점이다. 예를 들어, 짧은 시간 동안 차량을 여러 번 켜고 끄는 반복적인 사이클링은 프리차지 저항기에 장시간 높은 전류를 흘리게 만든다. 이러한 반복적인 전력 부하는 저항기의 과열을 유발해 시스템을 단락(short)이나 결함 상태에 노출시키며, 이는 고전압 회로를 손상시킬 수 있다.

프리차지 회로를 보호하려면 별도의 안전 회로가 필요하며, 이는 결과적으로 시스템의 자재 명세서(BOM), 무게, 비용을 더욱 증가시킨다.

### 고정비율 컨버터를 이용한 새로운 접근 방식

바이코(Vicor)의 BCM® 고정비율 컨버터 제품군은 전

그림 3. 고정비율 컨버터는 전류의 흐름 방향에 따라 미리 정해진 비율로 DC 전압을 승압하거나 강하하며, 이 과정에서 높은 효율을 제공한다.

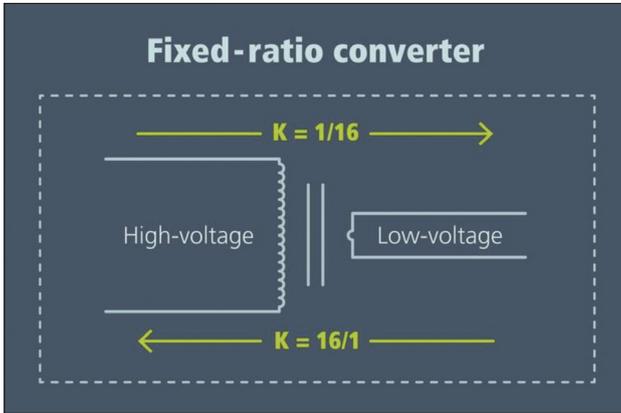
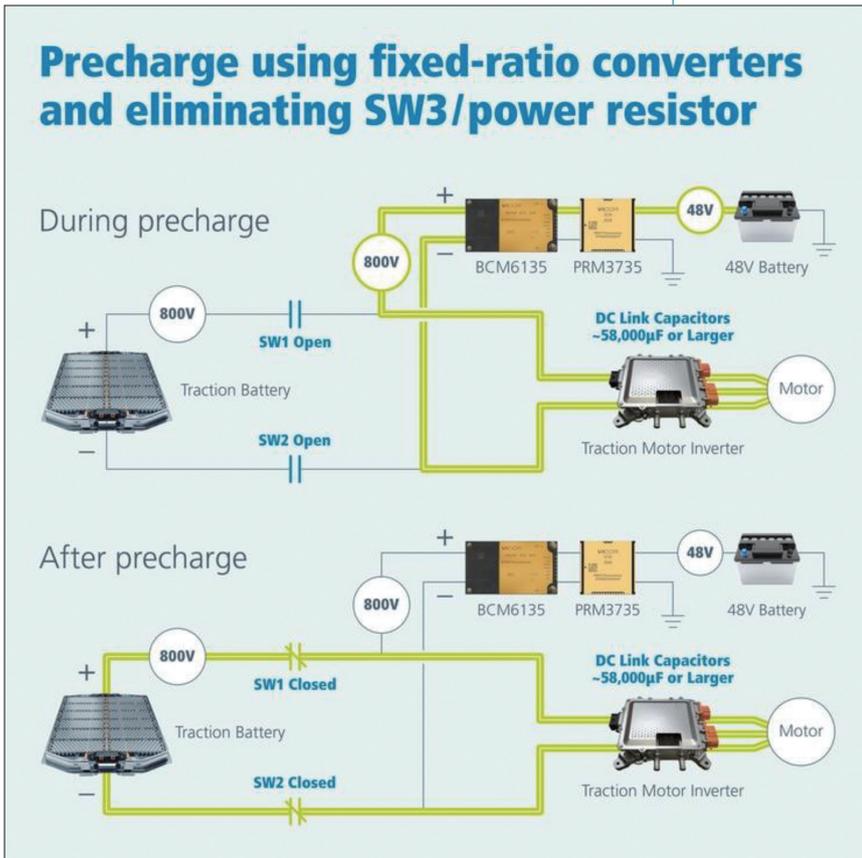


그림 4. 고정비율 컨버터와 전압 레귤레이터를 함께 사용하면, 프리차지 단계에서는 저전압 배터리로부터 프리차지를 수행하고, 정상 운전 상태에서는 트랙션 배터리로부터 저전압 버스에 전력을 공급할 수 있다.



압 변환의 새로운 형태를 제공하여 프리차지를 수행하는 보다 향상된 방법을 가능하게 한다.

고정비율 컨버터는 최대 98%의 효율을 달성하는 비조정형(unregulated) 절연 DC-DC 컨버터로, AC 변압기와 유사하게 작동한다. 변압기의 권선비(K factor)로 정의되는 고정 비율을 통해 전압을 일정 비율로 강하(buck)하거나 승압(boost)할 수 있다(그림 3). 가장 중요한 점은 이 장치들이 양방향(bidirectional)으로 동작한다는 것이다. 즉, 동일한 모듈이 전류의 흐름 방향에 따라 전압을 상승시키거나 낮출 수 있다.

EV 프리차지 관점에서 고정비율 컨버터의 가치는 저전압 버스에서 직접 프리차지를 수행할 수 있다는 점에 있다.

모든 전기차에는 두 개의 배터리가 존재한다. 하나는 400V 또는 800V로 동작하는 메인 트랙션 배터리이고, 다른 하나는 12V 또는 48V로 동작하는 저전압 배터리이다. 저전압 배터리는 차량이 꺼져 있을 때 라디오나 제어 시스템과 같은 저전압 보조 장비에 전력을 공급한다.

차량이 켜지면, 이러한 저전압 보조 장비는 전용 DC-DC 컨버터와 레귤레이터를 통해 트랙션 배터리로부터 전력을 공급받는다(그림 4). 이러한 전력 변환 구조는 모든 EV에 공통적으로 존재하며, 일반적으로 스위칭 모드 전력 변환기(SMPS)와 같은 단방향 솔루션을 통해 구현된다.

### 고밀도 전력 모듈을 활용한 프리차지 설계

고정비율 전력 컨버터 모듈의 도입으로 전력 시스템 설계자는 추가 부품 없이, 그리고 추가 비용이나 무게 증가 없이 프리차지를 구현할 수 있게 되었다.

트랙션 모터 인버터의 DC 링크 커

패시티브를 트랙션 배터리로부터 직접 프리차지하는 대신, 설계자는 고정비율 컨버터를 사용해 저전압 배터리로부터 프리차지를 수행할 수 있다. 이 설계에서는 고전압 버스로부터 저전압 버스를 구동하는 기존의 DC-DC 컨버터를 바이코(Vicor)의 BCM6135와 같은 고정비율 컨버터, 그리고 PRM3735와 같은 DC-DC 레귤레이터로 대체한다. 중요한 점은 이 구성이 기존 구조와 비교해 전체 부품 수가 증가하지 않는다는 것이다.

프리차지 단계에서는 SW1과 SW2가 열려 트랙션 배터리가 완전히 분리된다. 이 모드에서 저전압 배터리의 48V는 PRM3735를 통해 조정(regulate)된 뒤 BCM6135를 통해 승압되어 트랙션 모터의 DC 링크 커패시터를 충전하는 데 필요한 800V를 생성한다. PRM3735의 출력 전류를 제어할 수 있기 때문에, 이 아키텍처는 과도하고 통제되지 않은 돌입 전류 없이 안정적인 프리차지를 달성할 수 있다.

프리차지가 완료되면 SW1과 SW2가 닫힌다. 고정비율 컨버터의 양방향 특성을 활용하여, 동일한 고정비율 컨버터와 DC-DC 레귤레이터가 이제 극성을 전환해 트랙션 배터리의 800V를 48V로 강하시켜 저전압 버스에 전력을 공급할 수 있다.

이 접근 방식의 이점은 매우 크고 다양하다:

- ① 추가 비용이나 부품 없이 프리차지 구현 이 아키텍처를 사용하면 전력 시스템 설계자는 부품을 추가하지 않고도 안정적이고 제어된 프리차지를 달성할 수 있다. 기존 시스템에 이미 존재하는 부품(DV-DC 컨버터와 DC-DC 레귤레이터)을 그대로 활용하여, 프리차지와 저전압 버스 구동을 모두 수행할 수 있다. 반면 기존의 프리차지 방식은 추가적인 컨택터, 저항기, 안전 회로가 필요했으나, 이 방법은 자재 명세서(BOM)를 크게 줄인다. 부품 수 감소는 시스템의 크기, 무게, 비용 절감으로 직결된다.
- ② 높은 신뢰성과 낮은 위험성 고정비율 컨버터는 직렬 저항을 이용한 기존의 프리차지 방식보다 훨씬 신뢰성이 높으며, 과열이나 고장의 위험이 거의 없다.
- ③ 가장 높은 전력 효율 고정비율 컨버터 방식은 매우 효율적이다. DC-DC 레귤레이션이 전압 변환 없이(48V에서 48V 조정만 수행) 이뤄지기 때문에, 실제

전압 변환은 전적으로 고정비율 컨버터에서 수행된다. 최대 98%에 달하는 효율 덕분에 손실이 거의 없으며, 전력 낭비를 최소화한다. 이러한 효율 향상은 차량 주행 거리 증가와 냉각 시스템의 부담 감소로 이어진다.

## 전력 모듈은 BOM, 비용, 무게를 모두 줄인다

내연기관(ICE) 차량에서 전기차(EV)로의 전환이 가속화됨에 따라, 더 저렴하고 작으며 가벼운 전력 시스템에 대한 수요가 높아지고 있다. 이러한 목표는 보다 혁신적인 설계를 통해 EV 전력 전송 네트워크를 개선하는 방식으로만 달성될 수 있다.

바이코(Vicor)는 고효율 고정비율 컨버터를 통해 전력 시스템 설계자에게 전례 없는 설계 유연성을 제공하며, 새로운 전력 아키텍처 가능성을 열고 있다. 기존 부품을 활용한 프리차지 방식은 고정비율 전력 컨버터 모듈의 잠재력을 보여주는 대표적인 응용 사례 중 하나이다.

전력 시스템이 더욱 발전하고 자동차 산업의 핵심 구성 요소로 자리 잡음에 따라, 고정비율 컨버터는 보다 지속 가능하고 경제적인 EV 전력 아키텍처 실현을 가능하게 하는 핵심 기술이 될 것이다. **SN**

### 저자 소개



**패트릭 코왈리크(Patrick Kowalyk)**는 6년 이상 자동차 전력 시스템 분야에서 활동해왔으며, 수십 년간 엔지니어로 경력을 쌓아왔다. 그는 깊이 있는 기술적 전문지식을 바탕으로 바이코(Vicor)의 자동차 사업 성장을 견인해왔다. 전력 모듈, 토폴로지, 아키텍처 전반에 걸친 그의 전기공학적 통찰은 독보적이다. 코왈리크는 완성차 제조사(OEM)와 1차 협력업체(Tier 1) 고객을 위해 소형화되고 효율적인 전력 시스템을 설계하는 데 핵심적인 역할을 해왔다. 그는 일리노이 공과대학교(Illinois Institute of Technology)에서 전기공학 학사 학위를 취득했다.