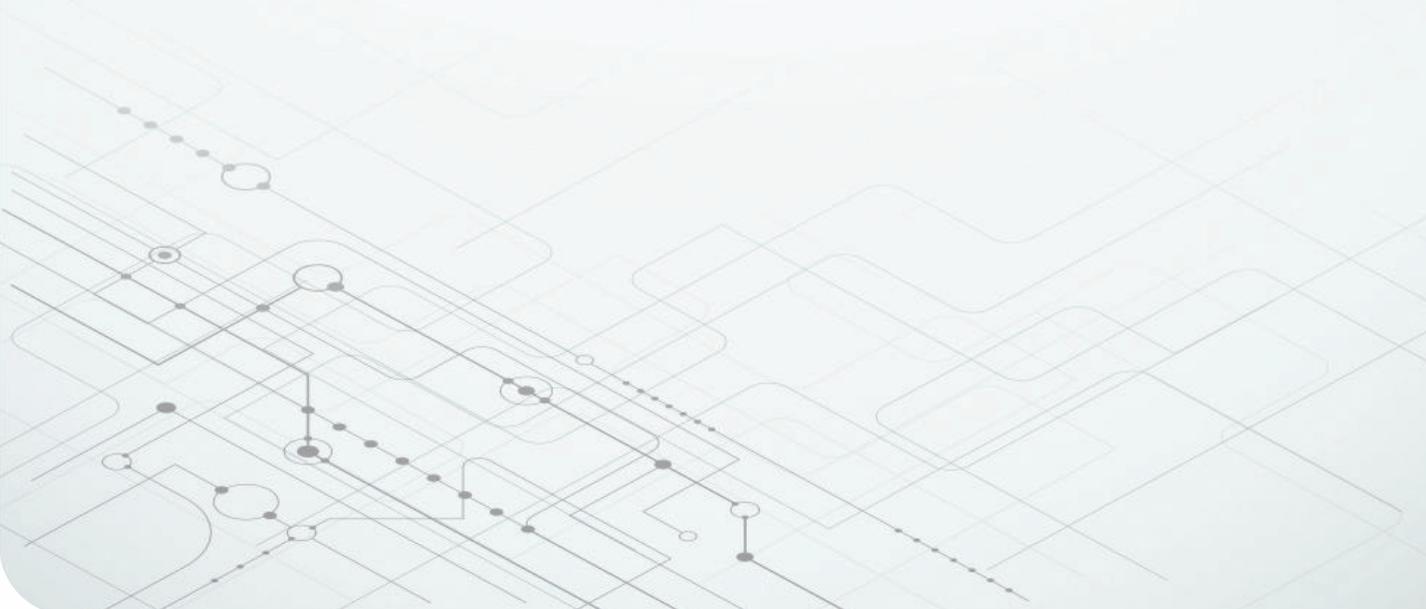


# 더욱 안전하고 스마트하며 더욱 연결 된 배터리 관리 시스템 설계



**Dag Grini**  
Issac Hsu  
Jordan Jennifer  
Bryan Marshall  
Mike Pienovi  
Andreas Schaefer



# 자동차 산업은 전기 방식 전환을 통해 신속하게 진화하고 있습니다.

## 한눈에 보기

차량 아키텍처가 더욱 중앙 집중화된 처리와 스마트 시스템을 지향하는 추세에 따라 이러한 시스템의 반도체 기술도 발전해야 합니다. 이 백서는 하이브리드 전기 자동차(HEV) 및 EV 파워트레인의 구조를 바꾸고 있는 추세와 BMS(배터리 관리 시스템) 내 기술이 어떻게 더 안전하고 더 스마트한 차량의 요구 사항을 지원하기 위해 바뀌고 있는지 살펴봅니다.



1

### 파워트레인을 도메인 및 구역 제어로 진화

도메인 및 영역 아키텍처로의 전환과 이 아키텍처가 시스템 설계 및 반도체 기술에 어떤 영향을 미치는지 알아보십시오.



2

### BMS 내에서 지능을 구현하는 기술: MCU

더 안전하고 더 스마트한 BMS로 전환된 것이 MCU 기술, 통신 인터페이스 및 배터리 정션 박스 설계를 어떻게 진화하는지 살펴보십시오.



3

### 디지털 트윈, 기계 학습 및 차량 관리

지능형 배터리 디지털 트윈과 같은 트렌드를 주도하기 위해 기계 학습 알고리즘을 어떻게 적용할 수 있는지 알아보세요.

안전, 편의성 및 맞춤형 경험에 대한 소비자의 기대치가 높아짐에 따라, 현대 차량은 소프트웨어 중심의 변화를 겪고 있습니다. 스마트폰이 휴대폰의 역할과 의미를 재정의하는 방식과 마찬가지로, 소프트웨어 정의 차량은 자동차의 하드웨어 아키텍처를 재정의하고 운전자에게 차량에서 원하는 기능에 대한 유연성을 제공하고 있습니다.

자동차 제조업체는 이제 자동차의 하드웨어 및 소프트웨어 아키텍처를 재설계할 기회를 스스로 찾고 있습니다. 파워트레인 도메인 제어 및 영역 제어 아키텍처로의 전환부

터 더 스마트한 시스템을 설계하고 MCU의 수를 줄이는 것까지 차량 내의 다양한 서브시스템에서 소프트웨어 정의 차량의 영향을 확인할 수 있습니다. 이 모든 것이 더 지능형 반도체 기술로 구현한 것입니다.

**배터리 관리 시스템의 혁신이 EV 채택을 늘리는 방법**에서는 배터리 관리 시스템(BMS)의 아키텍처와 중요한 하위 시스템에 대해 살펴봅니다. 소프트웨어 정의 차량으로의 전환 추세가 HEV 및 EV의 BMS에 어떤 영향을 미치는지에 대한 자세한 내용이 논의됩니다.

### 파워트레인을 도메인 및 구역 제어로 진화

역사적으로 설계자들은 센서 또는 액추에이터에 더 많은 기능을 필요로 하는 차량 설계에 MCU를 추가하여 더 복잡한 제어나 통신이 필요했습니다. 그러나 다양한 차량 플랫폼 내에서 옵션의 추가 복잡성을 결합하면 차량 시스템 설명이 복잡해지고 개발 노력이 많이 들고 유지 관리가 어려워졌습니다. 예를 들어 무선 업데이트에 모든 구성에 대한 테스트가 필요하므로 프로세스에 상당한 시간과 복잡성이 더해집니다.

복잡성, 무게 및 비용의 문제를 해결하기 위해 도메인 및 영역 제어 아키텍처 개념이 등장했습니다. 이러한 다양한 아키텍처에서 차량 내 서브시스템에 필요한 내용을 살펴보세요.

도메인 아키텍처에서 각 도메인은 관련 기능을 기반으로 특정 ECU(전자 제어 장치)를 누적합니다. 예를 들어, 온보드 충전기, DC/DC 컨버터, 트랙션 인버터 및 BMS는 HEV/EV 제어 도메인을 포함하며 **그림 1**에 표시된 것처럼 단일 중앙 집중식 MCU를 공유합니다. 이는 분산된 MCU의 수를 줄이고, 기능을 근접하게 배치하여 인터페이스를 단순화하며, 동일한 기능을 단일 MCU에 집중시켜 컴퓨팅 리소스를 공유할 수 있게 해줍니다. 예를 들어 OBC와 인버터는 동시에 작동하지 않고 대신 컴퓨팅 용량을 공유합니다.

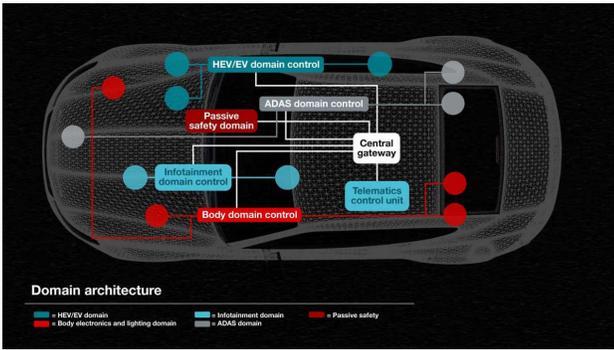


그림1. 도메인 제어 아키텍처.

영역 아키텍처는 도메인 제어의 개념을 한 단계 더 발전시킵니다. 이 아이디어는 그림 1에서와 같이 차량의 위치를 기반으로 기능이 영역별로 그룹화되고 MCU에 의해 제어됩니다. 영역 간의 분산 센서와 액추에이터는 시기적절한 통신을 필요로 하기 때문에 이 영역은 고대역폭 통신 백본을 통해 연결됩니다. 영역 아키텍처는 필요한 MCU의 수를 줄이면서 와이어링 하니스의 복잡성과 무게를 줄여 비용 절감 및 주행 범위를 확대합니다. 하드웨어 및 소프트웨어 업데이트 주기가 분리되고 자동차 제조업체는 서비스 기반 소프트웨어 구조로 이동할 수 있습니다.

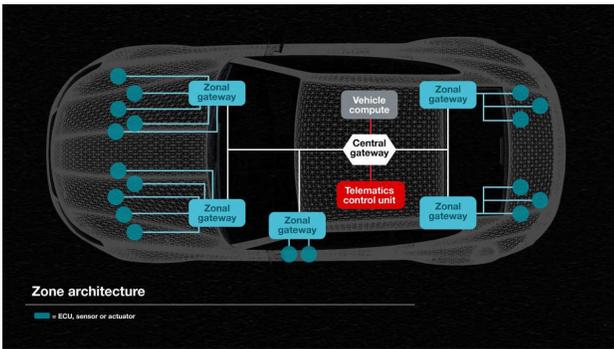


그림2. 구역 제어 아키텍처.

도메인 및 영역 아키텍처는 서로 다른 장점과 과제를 가지고 있지만 크로스오버 아키텍처 내에서 동일한 차량에 공존할 수도 있습니다. 예를 들어, BMS는 도메인 제어 접근 방식을 사용할 수 있으며, ADAS(자동 운전자 보조 시스템)는 동시에 영역을 활용할 수 있습니다. 파워트레인을 도메인 또는 영역 제어 아키텍처로 전환하는 작업은 기능 안전 및 시스템 민첩성 분야의 애플리케이션별 문제를 해결한 후 나중에 발생하는 경우가 많습니다. MCU 기능을 최대한 중앙 집중화한다는 원래 철학을 따르면 BMS는 에지에 MCU 인텔리전스가 없는 정교하거나 표준화된 인터페이스

를 통해 통신해야 합니다. 이러한 구현 유형은 MCU 수를 줄이려는 목표를 달성했습니다.

그러나 그런 다음 셀 또는 팩 고전압 칩셋 데이터(전압, 전류 및 온도 판독값 및 관련 안전 조치)가 원시 데이터로 전송된다는 기술적 문제가 발생합니다. 고장 감지 시간 간격, 고장 반응 시간 간격 및 안전 상태가 엄격하게 정의되기 때문에 인터페이스의 사용 가능한 대역폭은 긴밀한 관찰과 최적화가 필요하며, 영역 또는 도메인 제어 MCU는 지정된 시간 간격 내에서 처리하기 위해 엄격한 시간 슬롯이 필요합니다. 그림 3에서는 BMS 내 임베디드 시스템 아키텍처를 비교합니다.

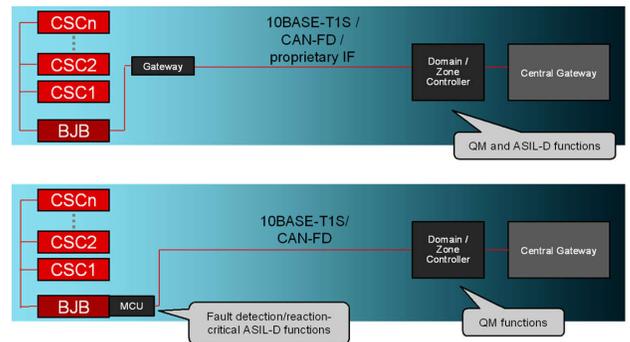


그림3. BMS의 임베디드 시스템 아키텍처 비교.

고전압 칩셋을 장착하거나 스마트 배터리 정션 박스와 같은 BMS의 가장자리에 더 작은 안전 MCU를 추가하면 이 과제를 간소화할 수 있습니다. 기능 안전 조치를 로컬로 해결함으로써 작업 이외의 데이터가 BMS 내에서 전송되지 않습니다. 에지의 로컬 안전 MCU가 기본 원시 데이터 대신 중앙 MCU로 OK/nOK 데이터를 전송하고 로컬에서 얻은 데이터를 전송함으로써 타이밍 및 대역폭 문제를 크게 줄입니다.

이러한 접근 방식은 MCU 수를 줄이려는 본래의 의도와 모순되지만, 추가적인 이점을 제공합니다. 로컬 MCU는 CAN-FD(컨트롤러 영역 네트워크-유연한 데이터 속도) 또는 이더넷 10BASE-T1S와 같은 표준화된 인터페이스를 지원하고, 추가로 팩 다중 소싱과 차량 간, 플랫폼 및 크로스 세대 호환성을 지원하는 균일한 추상화 계층을 구현할 수 있습니다.

이러한 아키텍처를 지원하고 보다 지능적인 시스템을 구현할 수 있는 BMS 내의 몇 가지 기술에 대해 알아보겠습니다.

## BMS 내에서 지능을 구현하는 기술: MCU

가장 기본적인 수준에서 MCU는 BMS 내에서 센서를 연결하여 데이터를 수신하고 차량 네트워크에 해당 정보를 다시 전달하는 두 가지 주요 역할을 합니다. 이 두 기능은 충전 상태와 같은 기능 안전과 중요한 진단 정보를 BMS에 제공하는 데 도움이 됩니다. 오늘날 MCU 발전 추세는 더욱 발전된 감지 및 계산과 더욱 발전된 네트워킹이 요구됨에 따라 이 두 가지 주요 기능 모두에서 더욱 높아지고 있습니다. 고급 MCU를 사용하면 더 높은 품질의 데이터를 배터리에서 다른 차량의 나머지 부분까지 전송할 수 있어 차량 내에서 어떤 일이 일어나고 있는지 보다 정확하게 파악할 수 있습니다.

BMS 내 MCU 작동에 대한 고급 시나리오를 살펴보십시오. 배터리의 유용성을 극대화하는 데 필요한 지능을 처리하기 위한 복잡한 알고리즘이 필요하기 때문에 컴퓨팅 성능이 향상되고 있습니다. 배터리의 크기가 증가함에 따라 측정기 필요한 개별 셀의 수도 증가합니다. 배터리 내에 더 높은 전압 수준과 더 높은 전체 전력이 저장됩니다. 즉, 이 전보다 더 많은 신호가 들어오고 있으므로 MCU 패키지 크기를 늘리고 차량 아키텍처가 도메인에서 영역 제어로 전환함에 따라 입력/출력 수를 모두 늘려야 합니다.

이러한 고급 알고리즘 및 감지 요구 사항을 충족하기 위한 한 가지 접근 방식은 코어 컴퓨팅 성능을 높이는 것입니다. 기존의 MCU는 간단한 전류 및 전압 측정과 100MHz의 온도 측정을 단일 코어에서 수행하는 BMS에서 작동할 수 있었습니다. 이제 시스템 내에서 계산하고 작동할 수 있는 최대 1GHz까지 실행되는 멀티 코어 장치가 있습니다. 설계자는 디지털 신호 프로세서와 현장 프로그래밍 가능 게이트 어레이를 활용하여 훨씬 더 빠른 속도로 실행할 수 있는 컴퓨팅 엔진을 구축할 수 있습니다. TI의 Arm® Cortex® 기반 32비트 MCU 포트폴리오는 시스템 요구 사항을 충족하는 데 도움이 되는 고성능 및 전원 효율적인 장치가 포함되어 있습니다.

배터리 ECU와 차량의 다른 부분과의 통신 역시 점점 더 복잡해지고 있습니다. 시스템은 진단을 수행하거나 배터리 부하에 따라 예측 기능과 같은 동적 변경을 구현하거나 작업 유형 간에 전환해야 할 수 있습니다. 예를 들어 차량이 고속으로 주행하는 경우 배터리의 최대 부하가 있기 때문에 진단 또는 셀 업데이트와 같은 작업을 수행하는 것은 비

효율적입니다. 그러나 차량이 충전하는 동안에는 이러한 작업을 수행하고 차량 네트워크와 무선 또는 유선으로 통신하는 데 더 많은 시간과 시스템 대역폭이 필요하며, 이더넷과 같은 프로토콜을 통해 과거 CAN 또는 CAN-FD 버스보다 훨씬 빠른 데이터 전송률을 제공합니다. 배터리 내 모듈화 수준에 따라 BMS 자체에서 통신이 필요할 수도 있습니다.

BMS 내에서 MCU의 가장 중요한 기준은 기능 안전 기능입니다. 네트워킹 수준이 계속 높아짐에 따라 보안도 점점 더 중요해지고 있습니다. MCU는 ASIL(Automotive Safety Integrity Level) D를 지원해야 하며 시스템의 안전 및 보안 요구 사항을 충족하는 데 도움이 되는 하드웨어 보안 모듈이 내장되어 있습니다. **AM263P4-Q1 MCU**와 같은 장치는 멀티 코어이며 네트워킹 및 감지 및 작동 IP의 품질을 위한 고급 주변 장치를 사용한 컴퓨팅에 대해 훨씬 더 높은 작동 주파수를 가집니다. 또한 MCU는 안전을 개선하고 개발 시간을 단축하기 위해 AUTOSAR(차량용 오픈 시스템 아키텍처)와 같은 개방형 및 표준화된 차량용 소프트웨어 아키텍처를 지원해야 합니다.

## BMS 내에서 지능을 구현하는 기술: 무선 기능

에지 프로세싱을 무선 BMS에 통합한 것은 획기적인 발전을 의미합니다. 컴퓨팅 프로세스를 에지로 푸시하면 실시간 의사 결정을 개선하고, 지연 시간을 줄이고, 차량용 시스템의 전체 성능을 최적화합니다.

중앙 집중식 ECU로 데이터가 이동해야 하는 필요성을 최소화하면 응답 시간이 더 빨라집니다. 이는 적응형 배터리 관리 및 동적 에너지 분배와 같이 즉각적인 피드백이 필요한 애플리케이션에 매우 중요합니다. 무선 BMS는 에지 컴퓨팅을 활용하여 배터리 상태, 사용 패턴 및 환경 요인에 대한 실시간 분석을 수행할 수 있습니다. 이러한 데이터는 시스템이 배터리 성능을 즉시 적응하고 최적화할 수 있도록 지원하여 다양한 조건에서 차량이 최대 효율로 작동하도록 합니다. 또한 중요한 데이터를 로컬에서 처리하면 확장된 네트워크를 통해 중요한 정보를 전송하는 것과 관련된 사이버 위협에 대한 취약성도 줄어듭니다.

**그림 4**에 나와 있는 TI의 소프트웨어 정의 무선 솔루션은 기존 케이블의 제약 조건을 없애서 소프트웨어 정의 차량의 복잡한 아키텍처 내에서 더 창의적이고 효율적인 통합을 가능하게 합니다.

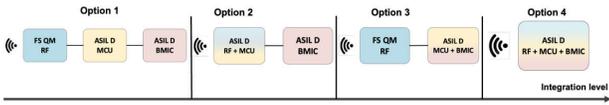


그림 4. 무선 BMS를 위한 소프트웨어 정의 무선 솔루션 내의 통합 수준.

무선 BMS는 변화하는 차량 구성에 동적인 적응력을 제공합니다. 배터리 팩이 발전함에 따라 무선 접근 방식은 업데이트 또는 수정과의 원활한 통합을 보장하여 이러한 시스템을 위한 미래 지향적인 솔루션을 제공합니다. 또한 무선 BMS는 여러 계층 간 보안 통신 프로토콜 및 이중화와 같은 고급 기술을 통합하여 시스템 안정성을 높입니다.

### BMS 내에서 지능을 구현하는 기술: 지능형 정션 박스

지능형 배터리 정션 박스는 전압, 전류 및 절연 저항 팩 모니터를 통해 배터리의 고전압을 직접 측정하는 데 도움이 됩니다. 일반적인 팩 모니터에는 여러 개의 전압 및 전류 측정 채널이 있으며, 이 채널은 퓨즈와 계약자 사이에서 전압을 측정하고 절연을 점검할 수 있습니다. 그림 5은(는) 배터리 정션 박스의 간소화된 시스템 다이어그램입니다.

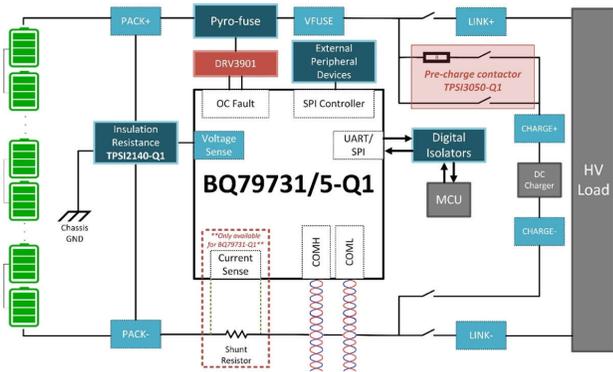


그림 5. 간소화된 BJB 시스템 블록 다이어그램.

배터리 관리 시스템에는 배터리 분리와 전력 분배라는 두 가지 중요한 기능이 있습니다. 지능형 배터리 정션 박스에는 접촉기 드라이버와 파이로 퓨즈 스크립트 드라이버의 디지털 제어가 통합되어 있어 충돌 시 배터리 팩을 EV 시스템에서 분리합니다.

고전압 배터리 분리는 용융 또는 파이로 퓨즈를 사용하여 처리할 수 있습니다. 차량 내 고전류 시스템은 새로운 조건을 도입하여 시장이 과전류 열 이벤트로 인해 발생하는 기존 용융 퓨즈에서 MCU/허브를 통해 발생하는 파이로 퓨즈로 전환하게 됩니다. 오늘날 파이로 퓨즈는 비효율성의 원

인이 될 수 있는 복잡한 개별 회로에 의해 구동됩니다. 차량용 EV 파이로 퓨즈 배포를 위한 TI의 단일 채널 스크립트 드라이버인 DRV3901-Q1은 기존 용융 퓨즈 시스템 대신 파이로 퓨즈를 통해 배터리의 과전류 연결 해제를 빠르게 지원하는 고집적, 안전 개발 솔루션을 제공합니다.

고전압 전력 분배 컨트랙터는 더 높은 전류도 처리해야 하지만, 옵션이 제한되어 있고 비싸거나 지나치게 복잡합니다. 절약형 컨트랙터에는 컨트랙터에 전원이 공급되는 동안 전류 소모 및 가열을 줄임으로써 주 컨트랙터의 효율성을 향상시키는 데 사용되는 추가적인 고저항 이코노마이저 코일이 있습니다. 이러한 절약형 접촉기는 시스템 효율을 개선하는 솔루션이라고 생각되지만, 현재 선택 가능한 제한된 선택이 있으며 비용이 많이 드는 경우가 많습니다. 이와 대조적으로 비절약형 컨트랙터에는 이러한 추가 코일이 없으므로 비용이 절감되지만 안전 및 효율성 표준을 충족하려면 더 복잡한 개별 회로로 구동되어야 합니다. 텍사스 인스트루먼트는 비절약형 컨트랙터를 구동하는 데 필요한 회로의 복잡성과 비용을 줄이는 동시에 설계자의 더 많은 자유와 설계 유연성을 높여주는 완전 통합 듀얼 채널 컨트랙터 드라이버인 DRV3946-Q1을 개발하여 효율성과 견고성을 개선하는 데 투자했습니다.

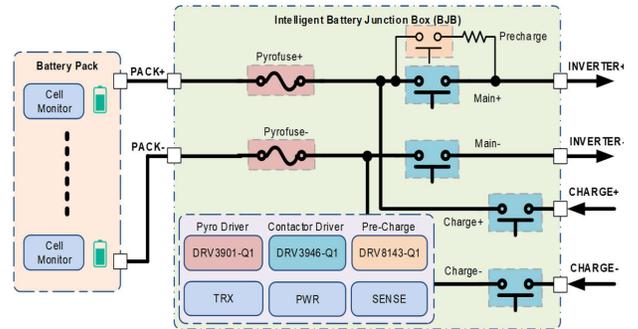


그림 6. BMS 내에서 고전력을 위한 배터리 분리 및 전원 분배.

배터리 팩은 팩 모니터에 의해 제어되는 기계식 접촉기를 사용하여 차량 전체의 하위 시스템을 연결하거나 분리합니다. 통제되지 않은 돌입 전류가 발생할 경우 아크 및 피팅으로 인해 기계적 고전압 접촉기가 응집되거나 손상될 수 있습니다. 고전압 시스템에 사전 충전 회로가 필요한 이 유에서는 TPSI3050-Q1 절연 스위치 드라이버를 사용하여 오토모티브 배터리 정션 박스의 사전 충전을 위한 안정적인 솔리드 스테이트 릴레이를 구성하는 방법을 설명합니다. 지능형 배터리 정션 박스의 경우 TPSI3100-Q1은 이러

한 사전 충전 애플리케이션에 구현되어 통합 절연 콤포레터 및 오류 보고 출력으로 진단 기능을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 이러한 기능을 과전류 또는 온도 모니터링 회로와 결합하면 이러한 오류 감지 회로가 **TPSI3100-Q1**을 통해 이 정보를 안정적으로 피드백하고 이러한 이벤트를 팩 모니터에 보고할 수 있습니다.

운전자 또는 정비사가 전기 충격을 받지 않도록 고전압 배터리 팩의 양극 및 음극 단자를 차량 새시에서 충분히 분리해야 합니다. 이러한 분리를 주기적으로 모니터링하는 것을 절연 점검 또는 절연 저항 모니터링이라고 합니다.

**TPSI2140-Q1**과 같은 솔리드 스테이트 릴레이는 알 수 없는 저항 값(배터리 단자와 새시 접지 사이)과 병렬로 알려진 저항 값(예: MΩ)을 연결하고 분리합니다. **BQ79731-Q1**과 같은 팩 모니터를 사용하여 결합된 저항을 측정하면 배터리 분리 허용 오차 범위 내에 있는지 또는 잠재적으로 위험한지를 확인할 수 있습니다.

## 디지털 트윈, 기계 학습 및 차량 관리

BMS 내의 소프트웨어 구현에서도 혁신이 일어나고 있습니다. 획득된 팩 및 셀 측정 정확도는 칼만 필터 또는 쿨롱 계산보다 고급 X 상태 알고리즘의 기초입니다.

개별 주행 동작, 교통 상황, 지리적 및 도로 상태를 모니터링할 수 있어 더 정밀한 차량 범위 예측과 배터리 구동 상태 데이터 및 충전 상태 예측이 가능합니다. 클라우드에서 데이터를 중앙 집중화하는 경우 기계 학습 알고리즘이 전체 차량을 모니터링하고 예측 서비스를 구현할 수 있습니다. 예를 들어, 이전에 고장 패턴을 관찰하고 저장한 경우 알고리즘이 조기 징후를 감지하고 다른 차량의 향후 고장 가능성을 계산하여 사전에 차고 서비스를 요청할 수 있습니다. 디지털 트윈을 만드는 것으로 알려진 이 기능을 사용하면 소프트웨어 정의 차량에서 임시 차량 제품군 업그레이드와 같은 상용 모델을 추가로 구현할 수 있습니다.

TI의 **AM263P4-Q1** Arm 기반, AutoSAR 지원 MCU에는 적응형 셀 모델링 시스템을 사용할 수 있는 라이브러리가 포함되어 있으며, 기계 학습 서비스가 차량 및 차량의 X 상태

측정을 개선하여 더 스마트한 충전을 지원하고 배터리 상태와 범위를 최적화하는 데 도움이 됩니다.

## 결론

BMS는 많은 발전적이고 혁신적인 개념의 핵심입니다. TI의 장치 솔루션은 전체 BMS 포트폴리오를 포괄하여 시스템 수준의 이점을 실현하고 차량을 더 스마트하고 안전하며 더 많이 연결되도록 합니다.

## 추가 리소스

1. 전기 자동차용 지능형 배터리 관리에 대해 자세히 알아보세요. (<https://www.ti.com/applications/automotive/hev-ev-powertrain/overview.html#BMS>)
2. 하이브리드, 전기 및 파워트레인 시스템을 위한 레퍼런스 설계를 살펴보세요. (<https://www.ti.com/reference-designs/index.html#search?applid=209,84,235167>)

**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.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere. 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