

1.3.2 Quais são algumas razões para o design modular

Tendo estabelecido os cinco requisitos principais de um Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS), exploramos o princípio do design modular. Examinaremos como os pacotes de bateria de grande escala são construídos de forma modular para atender a metas de desempenho, segurança e economia, e como essa arquitetura física informa e sugere diretamente um design modular correspondente para o próprio BMS. Este conceito é central para a criação de sistemas de bateria escaláveis, de fácil manutenção e com bom custo-benefício.

Projetando Pacotes de Alta Potência: O Trade-off entre Série e Paralelo

Aplicações de grande porte exigem pacotes de bateria de alta potência e, como a potência é o produto da tensão pela corrente, isso requer alta tensão, alta corrente ou ambos. A configuração de células em série e em paralelo é a ferramenta principal para atingir esses objetivos.

- **Alcançando Alta Tensão (Conexões em Série):** A tensão de uma única célula de íon-lítio é quimicamente limitada a uma faixa de aproximadamente 3 a 4 volts. Para atingir uma tensão geral mais alta no pacote, as células devem ser conectadas em série. A tensão total do pacote é a soma das tensões individuais das células.
- **Alcançando Alta Corrente (Conexões em Paralelo):** A corrente máxima que uma única célula pode fornecer é limitada por sua construção física. Para atingir uma corrente geral mais alta no pacote, as células podem ser conectadas em paralelo. A corrente total do pacote é a soma das correntes das células individuais em paralelo.

Isso dá aos projetistas uma flexibilidade significativa. Para um determinado requisito total de energia ou potência, o que mais importa é o produto do número de células em série (n_s) pelo número de células em paralelo (n_p). No entanto, as escolhas específicas para n_s e n_p são restringidas por fatores críticos de segurança e economia.

Restrições que Limitam as Conexões em Série

Embora adicionar células em série aumente a tensão e a potência de forma eficiente, existem limites práticos.

- **Segurança:** A tensão de corrente contínua (CC) torna-se um risco de segurança significativo acima de certos níveis. Normas de organizações como a NFPA (Associação Nacional de Proteção contra Incêndios dos EUA) sugerem um limite de 100 VCC, enquanto fabricantes automotivos conservadores muitas vezes visam menos de 50 V em qualquer área exposta.
- **Custo:** A eletrônica de potência (inversores, conversores, etc.) necessária para lidar com tensões maiores que aproximadamente 600 V torna-se exponencialmente mais cara.

Esses fatores criam um limite superior prático para o número de células que podem ser conectadas em série.

Restrições que Limitam as Conexões em Paralelo

Por outro lado, alcançar alta potência com baixa tensão e corrente muito alta apresenta seus próprios desafios.

- **Perdas de Potência:** A potência perdida como calor na fiação é proporcional ao quadrado da corrente ($P_{\text{perda}} = I^2R$). Dobrar a corrente quadruplica a energia desperdiçada. Para eficiência, correntes altas devem ser evitadas.
- **Custo e Peso:** A única maneira de mitigar as perdas I^2R em altas correntes é usar fiação extremamente grossa e de baixa resistência. Isso requer uma grande quantidade de cobre, que é caro e pesado.

Esses fatores criam um forte incentivo para limitar o número de células conectadas em paralelo.

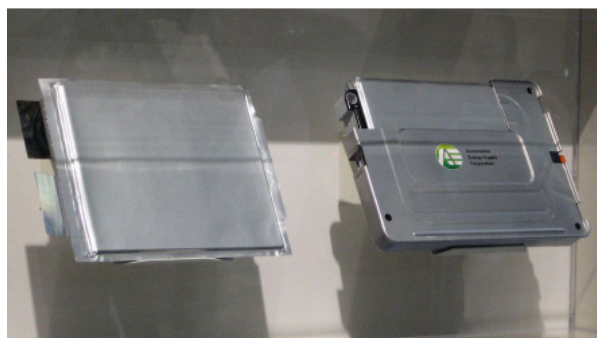
A Solução Modular: Uma Abordagem Comum de Engenharia

O compromisso que resolve este trade-off de engenharia é o pacote de bateria modular. A abordagem padrão é:

1. Construir módulos menores e gerenciáveis de células. Cada módulo é projetado para ter uma baixa tensão segura (por exemplo, abaixo de 100 V).
2. Conectar esses módulos de baixa tensão em série para atingir a alta tensão total desejada para o pacote.

Este design resulta em pacotes de bateria que geralmente têm mais células em série do que em paralelo. Para gerenciar o risco de alta tensão do pacote completo, são frequentemente incorporados desconectores de serviço, que quebram automaticamente as conexões em série entre os módulos quando o

invólucro do pacote é aberto. Uma notação comum para essas configurações é **xPyS**, onde 'x' é o número de células em paralelo e 'y' é o número de células em série. Por exemplo, o Nissan LEAF usa módulos com uma configuração 2S2P (2 em série, 2 em paralelo), e o pacote completo do veículo é construído a partir de 48 desses módulos.

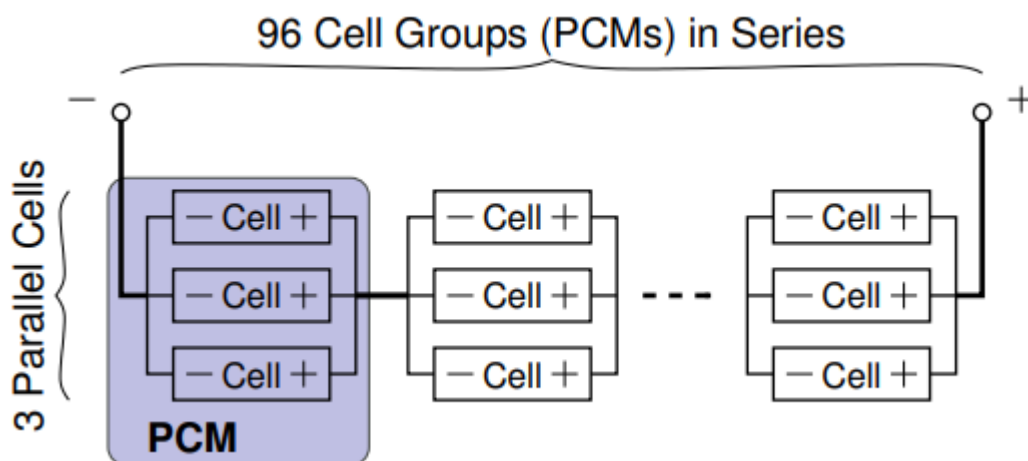


Arquiteturas de Pacotes Modulares: PCM vs. SCM

Existem duas arquiteturas principais para projetar esses módulos, cada uma com vantagens distintas.

A Abordagem de Módulo de Células em Paralelo (PCM)

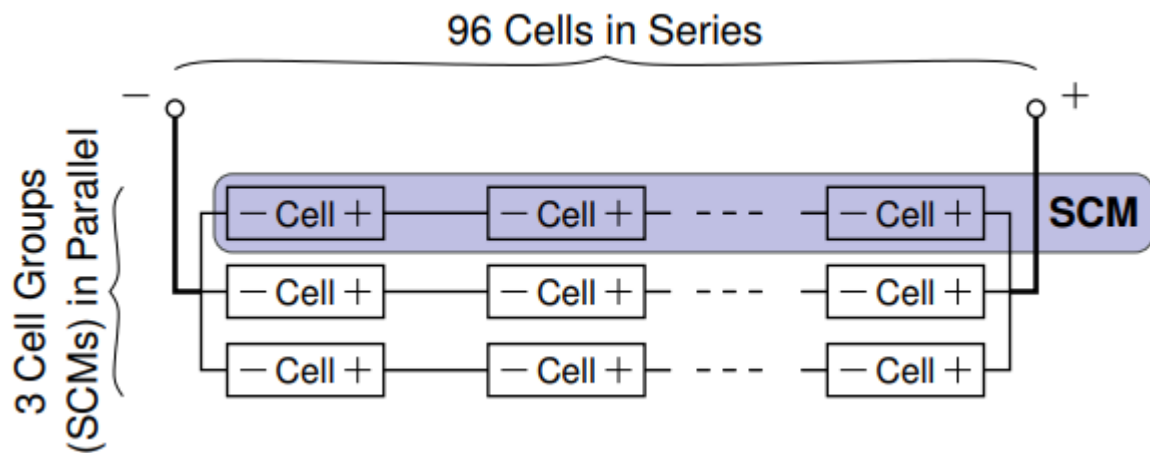
Neste design comum, as células são primeiro conectadas em paralelo para formar um módulo, e então esses módulos são conectados em série.



- **Vantagens:** Como as células dentro de um PCM estão fisicamente conectadas em paralelo, a lei das tensões de Kirchhoff dita que elas devem compartilhar a mesma tensão. Isso significa que elas se autobalanceiam dentro do módulo, e o BMS só precisa medir uma tensão por módulo, reduzindo a complexidade e o custo do sensoriamento.

A Abordagem de Módulo de Células em Série (SCM)

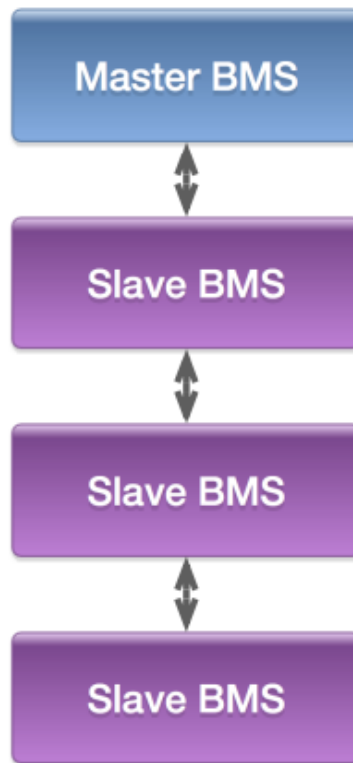
Neste design alternativo, as células são primeiro conectadas em série para formar um módulo, e então esses módulos são conectados em paralelo em seus terminais de alta tensão.



- **Desvantagens:** As tensões de todas as células podem ser diferentes e devem ser medidas individualmente. As células não se autobalanceiam, exigindo circuitos de balanceamento mais complexos.
- **Grande Vantagem (Flexibilidade):** Esta arquitetura permite a criação de pacotes de bateria de diferentes capacidades totais, mantendo exatamente a mesma tensão de barramento. Por exemplo, um fabricante de ônibus poderia oferecer um veículo com um SCM para rotas curtas ou três SCMs para rotas longas. O resto do powertrain de alta tensão do veículo não precisaria ser redesenhado, pois a tensão de operação permanece a mesma. Isso proporciona uma enorme flexibilidade para aplicações com requisitos variáveis de autonomia ou energia.

0 BMS Modular: Uma Hierarquia Mestre-Escravo

Um pacote de bateria modular naturalmente motiva um projeto de BMS modular e hierárquico, comumente conhecido como arquitetura **mestre-escravo**.



0 Papel do BMS Escravo

Um BMS escravo é uma unidade eletrônica menor, localizada dentro de cada módulo de bateria, diretamente conectada às células que gerencia. Isso minimiza a necessidade de chicotes de fiação complexos.

- **Responsabilidades:** As principais tarefas do escravo são medir todas as tensões individuais das células, medir as temperaturas locais (normalmente com um ou dois sensores por módulo) e realizar o balanceamento das células.

0 Papel do BMS Mestre

Um único BMS mestre serve como o cérebro central para todo o pacote de bateria.

- **Responsabilidades:** O mestre realiza o controle de supervisão. Ele se comunica com todas as unidades escravas (frequentemente através de um barramento em cadeia), controla os contadores principais que conectam o pacote à carga, mede a corrente e o isolamento do pacote em relação ao chassi, e comanda o sistema de gerenciamento térmico. Ele também serve como o único ponto de comunicação com a aplicação hospedeira (por exemplo, o computador principal do veículo).

Reutilização de Design em Sistemas Modulares

Um benefício significativo da arquitetura mestre-escravo é o potencial para a reutilização do design, o que pode reduzir drasticamente os custos de engenharia não recorrentes (NRE).

- **Reutilização do Escravo:** O design eletrônico de um BMS escravo é muitas vezes altamente reutilizável. Um escravo bem projetado pode ser flexível o suficiente para lidar com diferentes números de células e uma faixa de tensão ampla o suficiente para acomodar várias químicas de íon-lítio, apenas com alterações de software.
- **Reutilização do Mestre:** Reutilizar o design de um BMS mestre é mais difícil. Diferentes aplicações exigem números e tipos diferentes de contadores, sensores de corrente e interfaces de carregador. Um mestre universal precisaria ser altamente flexível, com muitos componentes redundantes, tornando-o caro. É mais comum ter um projeto de mestre genérico que é então adaptado para um mestre específico da aplicação, incluindo apenas os recursos necessários.