

1.4.6 Como calcular a energia e a potência disponíveis do pacote de bateria

Havíamos estabelecido os métodos para calcular a energia e a potência disponíveis para uma única célula de bateria. Agora, estenderemos esses conceitos para abordar a tarefa mais complexa e prática de calcular essas mesmas grandezas críticas para um pacote de bateria completo, com múltiplas células. Embora o cálculo da potência em nível de pacote seja uma extensão relativamente direta do método de célula única, o cálculo da energia em nível de pacote requer um processo de raciocínio de múltiplos passos e mais envolvido para levar em conta corretamente o estado único de cada célula individual.

Calculando a Potência Disponível do Pacote de Bateria

O cálculo da potência disponível do pacote é baseado no método de Caracterização de Potência por Pulso Híbrido (HPPC) introduzido anteriormente, mas com uma consideração crítica para as células conectadas em série. Em uma cadeia em série, a mesma corrente deve fluir através de cada célula individualmente. Isso significa que a capacidade de corrente geral do pacote é limitada por sua única célula "mais fraca" — ou seja, a célula que pode tolerar a menor quantidade de corrente antes que sua tensão atinja um limite de segurança mínimo ou máximo.

Potência de Descarga do Pacote:

1. Para cada célula individual j no pacote, a corrente máxima de descarga possível é calculada usando a fórmula HPPC:

$$P_{\text{dis}}^{\text{cell } j} = v_j(t)i_j(t) = v_{\text{min}} \frac{\text{OCV}(z_j(t)) - v_{\text{min}}}{R_{\text{dis}, \Delta T, j}}$$

2. A corrente máxima permitida para todo o pacote é o **mínimo** de todas essas correntes calculadas individualmente.
3. A potência de descarga total disponível para o pacote é então a **soma das potências de cada célula individual**, calculada usando essa única corrente limitante em nível de pacote.

Potência de Carga do Pacote:

1. Um processo semelhante é seguido para o carregamento. A corrente máxima de carga é calculada para cada célula j .
2. Como as correntes de carga são negativas, a corrente de carga limitante do pacote é o **máximo** de todos esses valores negativos (ou seja, aquele com a menor magnitude).
3. A potência de carga total disponível é a **soma das potências individuais das células**, todas calculadas usando essa única corrente de carga limitante.

$$P_{\text{dis}}^{\text{pack}} = \sum_{j=1}^{N_s} v_j(t) i_j(t) = N_s v_{\min} \min_j \left(\frac{\text{OCV}(z_j(t)) - v_{\min}}{R_{\text{dis}, \Delta T, j}} \right)$$

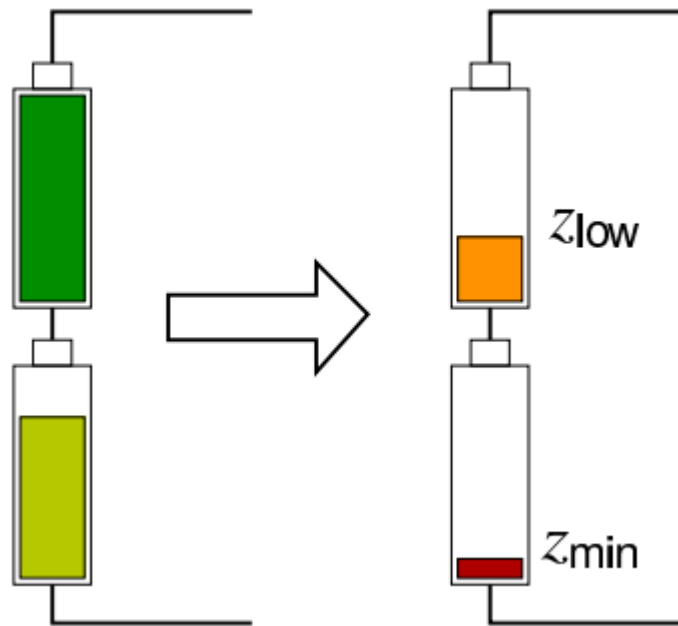
$$P_{\text{chg}}^{\text{pack}} = \sum_{j=1}^{N_s} v_j(t) i_j(t) = N_s v_{\max} \max_j \left(\frac{\text{OCV}(z_j(t)) - v_{\max}}{R_{\text{chg}, \Delta T, j}} \right)$$

Calculando a Energia Disponível do Pacote de Bateria: Um Processo de Três Passos

Calcular a energia total disponível em um pacote de bateria é mais complexo porque cada célula pode ter uma capacidade total (Q) diferente e um Estado de Carga (SOC) inicial diferente. É um experimento mental de três passos.

Passo 1: Determinar a Carga Limitante (em Ampere-horas)

Primeiro, devemos determinar a quantidade total de carga (em Ampere-horas) que pode ser retirada de todo o pacote antes que a primeiríssima célula atinja seu estado de carga mínimo permitido (z_{\min}).



- Para cada célula individual j , calculamos a quantidade de carga que pode ser removida antes que ela se esgote:
- Start with generic SOC equation

$$z(t) = z(0) - \text{Ah discharged} / Q$$
- Set $z(0) = z_j(t)$, $z(t) = z_{\min}$, $Q = Q_j$, rearrange

$$\text{Ah discharged} = \min_j Q_j (z_j(t) - z_{\min})$$
- A quantidade máxima de carga que pode ser removida do pacote é o **mínimo** de todos esses valores de ΔAh calculados individualmente. Este valor representa a carga total que o pacote pode fornecer antes que seu elo mais fraco seja completamente esgotado.

Passo 2: Calcular o Estado de Carga Final para Cada Célula

Depois que essa quantidade limitante de carga for hipoteticamente removida, apenas a única célula mais fraca estará em z_{\min} . *Todas as outras células, mais saudáveis, terão um SOC final acima de z_{\min} . Devemos calcular este SOC final para cada célula $_j$:*

$$z_{\text{low},j} = z_j(t) - \frac{\text{Ah discharged}}{Q_j}$$

Passo 3: Somar a Energia Fornecida por Cada Célula

Finalmente, com o SOC inicial conhecido (z_j) e o SOC final calculado para cada célula, podemos calcular a energia que cada célula contribui durante este evento de descarga.

- A energia fornecida por uma única célula j é calculada integrando sua curva de OCV entre seus SOC's inicial e final, e multiplicando por sua capacidade.

$$E(t) = Q \int_{z_{\min}}^{z(t)} \text{OCV}(\xi) d\xi \approx Q V_{\text{nom}} \Delta z$$

- A energia total disponível do pacote é então a **soma das energias fornecidas por todas as células individuais**.

$$E_{\text{pack}}(t) = \sum_{j=1}^{N_s} Q_j \int_{z_{\text{low},j}}^{z_j(t)} \text{OCV}(\xi) d\xi$$

Implementação Prática: Usando Tabelas de Consulta para um Cálculo Eficiente

A integral na equação da energia pode parecer custosa em termos computacionais e difícil de resolver em tempo real em um microprocessador de BMS. No entanto, na prática, não é o caso. A relação integral entre SOC e energia pode ser pré-computada offline e armazenada na memória do BMS como uma **tabela de consulta** (*lookup table*).

Apresentamos um exemplo simples de código em MATLAB/Octave para demonstrar isso.

```
% zRef is vector of SOC points , e.g.,
% zRef = zmin :0.01:1;
% ocvVec is a vector of OCV values
% corresponding to each SOC point .
% ivzRef is integrated OCV function
ivzRef = cumtrapz (zRef , ocvVec );

% Table lookup uses " interp1 .m" to find
% OCV integrated between zmin and "z".
ivz = interp1 (zRef ,ivzRef , max(zmin ,z));
```

- A função `cumtrapz` pode realizar uma integração trapezoidal cumulativa em um vetor de dados de OCV para gerar a tabela de energia integrada com uma única linha de código.
- A função `interp1` pode então ser usada em tempo real para realizar uma interpolação linear muito rápida nesta tabela pré-computada. Dado qualquer valor de SOC como entrada, ela pode "consultar" instantaneamente o valor de energia correspondente.

Esta técnica transforma uma integral matematicamente complexa em uma operação simples e computacionalmente eficiente, tornando-a perfeitamente adequada para um sistema embarcado de tempo real.