

# Batteriemanagementsystem

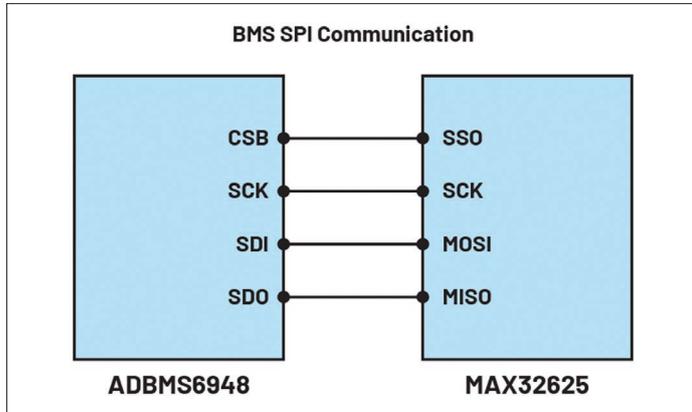


Bild 1: Ein BMS-Mikrocontroller (MAX32625), verbunden mit einem BMS-IC (ADBMS6948)

## Kurzfassung

Dieser Artikel beschreibt den von Analog Devices nach dem Standard Open Rack Version 3 des Open Compute Project (OCP ORV3) für die Batterie-Backup-Einheit (BBU) entwickelten Algorithmus für das Batteriemanagementsystem (BMS), ein wesentlicher Bestandteil jeder BBU eines Rechenzentrums. Die Hauptaufgabe des BMS besteht darin, die Sicherheit des Batteriesatzes zu gewährleisten, indem der Ladezustand (SOC), der allgemeine Zustand und die Leistung überwacht und reguliert werden. Aus diesem Grund muss ein BMS mit großer Sorgfalt entworfen und implementiert werden, da es sich um eine komplexe und wichtige Komponente im Rechenzentrum handelt.

## Einführung

Bei der Erforschung der BBU-Referenzdesigns von ADI ist es unerlässlich, die Funktionsweise eines BMS zu verstehen. Das BMS ist für die Überwachung und Regelung des Batteriezustands verantwortlich und sorgt dafür, dass die Batterie in einem sicheren Parameterbereich arbeitet. Dies umfasst die Überwachung der Spannungen des Batteriestapels, der Temperaturen und der Gesamtstromstärke des Batteriestapels sowie die Verwaltung der Lade- und Entladezyklen. Die Implementierung eines robusten BMS ermöglicht optimale Effizienz und Sicherheit bei Lösungen auf Systemebene. Eine lange Akkulaufzeit ist für Spitzenleistungen unerlässlich. Häufiges unbewusstes Überladen oder Tiefentladen kann dem Akkus schaden und seine Lebensdauer verkürzen. Durch eine sorgfältige Überwachung des Zustands (SOH) der Batterie und eine ordnungsgemäße Nutzung lässt sich eine vorzeitige Abschaltung oder ein Ausfall vermeiden, so dass die Batterie ihre volle Leistung erbringen kann.

## Ladezustand überwachen

Darüber hinaus ist die Überwachung des Ladezustands (SOC) der Batterie wichtig für den allgemeinen Zustand des Batteriestapels. Mit der Zeit verlieren Batterien an Kapazität, und wenn sie bis auf Null entladen werden, kann sich dieser Prozess

beschleunigen. Die optimale Strategie für eine lange Lebensdauer besteht darin, den Ladestand der Batterie zwischen 20 % und 80 % zu halten. Die Kenntnis des SOC der Batterie stellt sicher, dass das BBU-Modul über einen längeren Zeitraum funktionsfähig bleibt.

## Entladetiefe

Neben SOH und SOC muss auch die Notwendigkeit eines besseren Verständnisses der Entladetiefe (DOD) angesprochen werden. Die Entladetiefe ist ein wichtiger Faktor, der bei der Verwendung von wiederaufladbaren Batterien zu berücksichtigen ist. Sie bezeichnet den Prozentsatz der Batteriekapazität, der in einem einzigen Entladezyklus verbraucht wird. Im Allgemeinen wird empfohlen, eine Entladung des Akkus unter 20 % DOD zu vermeiden, um seine Lebensdauer zu verlängern. Einige Batterien können jedoch tiefere Entladungen ohne größere Schäden verkraften. Um spezifische Empfehlungen für die Entladetiefe eines bestimmten Akkus zu erhalten, sollten die Richtlinien des Herstellers zu Rate gezogen werden.

## Batteriechemie

Darüber hinaus ist es unerlässlich, die Batteriechemie genauestens zu berücksichtigen. Bei der Entwicklung des BBU-Moduls wurde die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion) bewusst gewählt. Diese Auswahl ist auf die weit verbreitete Verwendung von Li-Ionen-Batterien zurückzuführen, die sich nahtlos in die OCP ORV3-Spezifikationen einfügen. [1] Der Grund für diese Ausrichtung liegt in den bemerkenswerten Eigenschaften von Li-Ionen-Batterien, nämlich ihrer außergewöhnlichen Energiedichte und ihrem bemerkenswert geringen Gewicht. Wenn man sich näher mit der Chemie von Lithium-Ionen-Zellen befasst, wird insbesondere eine wichtige Tatsache deutlich: Ihre Zusammensetzung ist ein komplizierter Dreh- und Angelpunkt, der ihre Leistung, ihr Sicherheitsprofil und ihre allgemeine Haltbarkeit bestimmt.

## Cell Balancing

Ein weiterer zu berücksichtigender Bereich ist Cell Balancing. Cell Balancing ist ein wichtiges Konzept im Bereich der Batterietechnologie. Mit der zunehmenden Nachfrage nach effizienten und leistungsstarken Batterien wird eine optimale Ausgewogenheit zwischen den Zellen immer wichtiger. Cell Balancing bezeichnet den Prozess der Angleichung der Spannung oder des SOC der einzelnen Zellen innerhalb eines Akku-

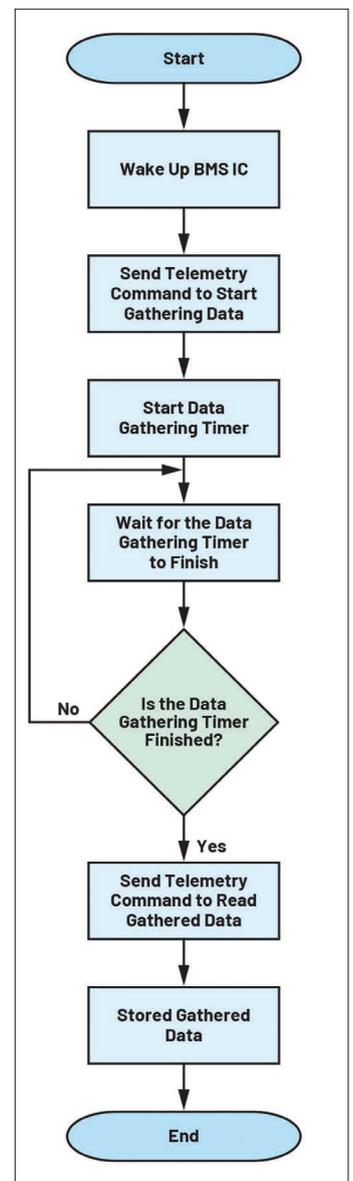


Bild 2: Der BMS-Mikrocontroller steuert und speichert die Daten des BMS-Chips.

Autoren:

Christian Cruz

Senior Applications

Development Engineer,

Marvin Neil Cabuenas

Senior Firmware Engineer

Analog Devices

www.analog.com

packs. In einem mehrzelligen Akkupack hat jede Zelle ihre eigenen einzigartigen Eigenschaften und kann im Laufe der Zeit Leistungsschwankungen aufweisen. Faktoren wie Fertigungstoleranzen, unterschiedliche Zellkapazitäten und unterschiedliche Nutzungsmuster können zu Unausgewogenheiten zwischen den Zellen führen. Diese Unausgewogenheit kann zu einer Verringerung der Gesamtkapazität des Akkus, zu einem geringeren Wirkungsgrad und sogar zu einem vorzeitigen Ausfall des Akkupacks führen.

## Passiver Balancer

Der Entwurf sieht einen passiven Balancer auf der BBU vor. Beim passiven Balancieren werden Widerstände verwendet, um überschüssige Energie aus Zellen mit höherem Spannungsniveau abzuleiten oder abzuführen. Diese Methode ist relativ einfach und kostengünstig, kann jedoch zu Energieverlusten und Wärmeentwicklung führen. Indem sichergestellt wird, dass jede Zelle innerhalb eines Akkupacks mit optimalen Werten arbeitet, verbessert das Cell Balancing die Gesamteffizienz und -effektivität von Energiespeichersystemen und trägt zu einem nachhaltigeren und zuverlässigeren Betrieb des BBU-Modulsystems bei.

## Zwei wichtige Prozesse

Der BMS-Mikrocontroller ist für zwei wichtige Prozesse verantwortlich (Bild 1):

1. Kommunikation mit dem BMS-IC (ADBMS6948), um Telemetriedaten für Zellspannungen, Zelltemperatur, Unter- und Überspannung sowie den Gesamtstrompegel des Akkupacks zu erhalten.
2. Weiterleitung aller vom Gerät gesammelten Telemetriedaten an den Hauptmikrocontroller über I<sup>2</sup>C

Der BMS-Mikrocontroller kommuniziert mit dem ADBMS6948 über das SPI-Protokoll. Durch Senden der entsprechenden Befehlscodes ermöglicht der BMS-Mikrocontroller dem Bauelement, Telemetriedaten zu erfassen und gleichzeitig seinen eigenen Zweck zu erfüllen (Bild 2). Alle vom BMS-IC erfassten Daten werden von der BMS-MCU gelesen und verarbeitet.

Eine weitere wichtige Aufgabe des BMS-Mikrocontrollers besteht

darin, die gesammelten Daten an den Hauptmikrocontroller zu senden, der diese für die Lade- und Entladealgorithmen sowie die Steuerung der Lüfterdrehzahl verwendet. Die Kommunikation mit dem BMS-Mikrocontroller erfolgt über das I<sup>2</sup>C-Protokoll mit Registern, die vom Haupt-Mikrocontroller gelesen werden. Die Registertabelle für den BMS-Mikrocontroller ist in Tabelle 1 zu sehen.

Bitte beachten Sie, dass alle Register des BMS-Mikrocontrollers derzeit nur lesbar sind. Das Build-Datum und die Seriennummer werden nur einmal erfasst und in einem externen EEPROM des Haupt-Mikrocontrollers gespeichert.

## Zellenerkennung und Balancierung

Verfahren zum Aufladen von Zellen: Konstantspannungsladen (CV) und Konstantstromladen (CC) sind zwei unterschiedliche Ladeverfahren, die in Batterieladesystemen eingesetzt werden, um den Ladevorgang zu optimieren und die Batterielebensdauer zu erhöhen.

### Konstantspannungsladung (CV)

Die Konstantspannungsladung (CV) ist eine Lademethode, bei der in der Anfangsphase des Ladevorgangs eine feste Spannung an den Akkupack angelegt wird. Zu Beginn des Ladevorgangs arbeitet das BBU-Modul im Lademodus und behält eine konstante Spannung von 44 V bei, während der Ladestrom von 5 A mit steigendem SOC-Wert der Batterie allmählich abnimmt. Dieser Ansatz ist besonders effektiv, um Überladung zu verhindern, da die Spannung konstant bleibt und die sichere Spannungsgrenze der Batterie nicht überschritten wird. Sobald die Spannung des Akkupacks 37 V bis 40 V oder einen vordefinierten Schwellenwert erreicht, kann das Ladegerät zu einer anderen Lade-phase übergehen, z. B. den Ladestrom von 5 A auf 0,5 A reduzieren.

### Konstantstromladung (CC)

Bei der Konstantstromladung (CC) wird hingegen ein gleichmäßiger Ladestrom an die Klemmen des Akkupacks angelegt. Während dieser Phase bleibt der Ladestrom konstant bei 5 A, während die Batteriespannung während des Ladevorgangs allmählich ansteigt.

Diese Methode eignet sich besonders für das schnelle Laden des Akkupacks mit niedrigem Anfangsladezustand. Sie stellt einen kontrollierten Stromfluss in den Akkupack sicher, bis ein bestimmtes Spannungsniveau erreicht ist. Sobald die Spannung des Batteriestapels einen bestimmten Wert erreicht hat, kann der Ladevorgang in eine andere Phase übergehen, z. B. die Reduzierung des konstanten Stroms von 5 A auf 2 A oder eine Phase mit konstanter Spannung.

## Optimales Ladeprofil

Häufig werden Konstantspannungs- als auch Konstantstromladung beim Laden des Akkupacks des BBU-Moduls gekoppelt, um ein optimales Ladeprofil zu erhalten. Die frühe CC-Phase sorgt für eine schnelle Energiezufuhr zur Batterie, während die zweite CV-Phase durch die Begrenzung der Spannung eine Überladung verhindert. Diese Kombination ermöglicht ein effizientes Laden, verlängert die Lebensdauer des Akkus und erhält die Sicherheit und Leistung des Akkupacks. Die korrekte Implementierung der CV- und CC-Lademechanismen ist für den Ladebetrieb des BBU-Moduls entscheidend.

## Verfahren zur Zellenerkennung

Die Methode zur Zellenerkennung ist ein zentraler Aspekt von Batteriemanagementsystemen. Mit dieser Methode lassen sich die Spannung und der Zustand jeder einzelnen Zelle in einem Akkupack genau ermitteln. Durch den Einsatz hochentwickelter Sensorschaltungen und Messalgorithmen ermöglicht die Zellenerkennung dem System, Echtzeitdaten über die Spannung,

die Temperatur und den allgemeinen Zustand einer jeden Zelle zu erfassen. Diese Informationen werden anschließend dazu verwendet, fundierte Entscheidungen über Lade-, Entlade- und Ausgleichvorgänge zu treffen und so eine optimale Leistung, Sicherheit und Langlebigkeit des Akkupacks zu gewährleisten. Eine effektive Zellenerkennung ist für die Aufrechterhaltung der Gesamteffizienz und Zuverlässigkeit moderner Energiespeichersysteme von höchster Bedeutung.

Die elf ADCs des ADBMS6948 sind für die Erfassung der elf differentiellen Zelleneingänge des Akkupacks zuständig. Der Akkupack hat eine 11-fache Serien- und 6-fache Parallelkonfiguration und ist mit den Pins C0 bis C10 verbunden, die den ADCs des BMS entsprechen. Die Wandler haben einen Eingangsspannungsbereich von -2,5 V bis +5,5 V, eine Abtastfrequenz von etwa 4 MHz und liefern im Abstand von 1 ms 16-Bit-Werte mit einem LSB von 150  $\mu$ V. Elf zusätzliche ADCs erfassen die elf Differentialeingänge gleichzeitig über S-Pins mit einem Eingangsbereich von 0 V bis 5,5 V und einer Abtastfrequenz von etwa 4 MHz und liefern alle 8 ms 13-Bit-Ergebnisse mit einem LSB von 1,6 mV. Diese S-ADCs ermöglichen eine redundante Messung der Zellspannung durch einen von den C-ADCs völlig unabhängigen Messansatz.

## Passives Balancing

Passives Balancing ist eine Technik, die häufig beim Management von Batteriesystemen eingesetzt wird. Dabei werden passive Komponenten, vor allem Widerstände, mit MOSFETs kombiniert, die parallel zu

Register	Adresse	Länge in Bytes
CMD_Voltage	0x00	0x16
CMD_Temperature	0x01	0x08
CMD_SOC	0x02	0x16
CMD_Fan_Error	0x03	+ 1
CMD_EOL	0x04	+ 1
CMD_Stop_Discharge	0x05	+ 1
CMD_BMS_Fault	0xE0	0x06
CMD_Manufactured_Date	0xF0	0x07
CMD_Serial_Number	0xF1	0x07

Tabelle 1: Registertabelle des BMS-Mikrocontrollers

einzelnen Zellen angeordnet sind. Diese integrierten Komponenten übernehmen die Rolle von Spannungsableitern oder Energiedissipatoren, die die kontrollierte Ableitung von überschüssiger Energie aus Zellen mit erhöhter Spannung oder erhöhtem Energiezustand ermöglichen. Das Ergebnis ist eine allmähliche Angleichung der Spannungspotentiale oder Energiezustände zwischen den Batteriezellen, wodurch ein Spannungs- und Energiegleichgewicht über einen längeren Zeitraum gewährleistet wird.

## Ungleichgewicht

Wenn die Zellen in einem Akkupack ein Ungleichgewicht aufweisen, muss das BMS dies durch Entladen der Zellen mit der höheren Spannung ausgleichen. Die S-ADC-Pins des ADBMS6948 können zum Entladen einzelner Zellen verwendet werden. Die eingebauten MOSFETs an den S-ADC-Pins können ebenfalls zum Entladen von Zellen verwendet werden. Jeder S-ADC-Pin kann separat oder kontinuierlich über Pulsweitenmodulation (PWM) gesteuert werden. Durch die Konfiguration der Register PWMA, PWMB und CFGB ist es zudem möglich, die Zellen auszugleichen, während sich der BMS-Mikrocontroller im Schlafmodus befindet.

## Zellenladung mit Coulomb-Zähler

Der Hauptzweck eines Coulomb-Zählers besteht darin, die Menge der elektrischen Ladung (gemessen in Coulomb), die in eine Batterie oder einen Stromkreis ein- und ausfließt, genau zu messen. Diese Messung ermöglicht eine bessere Steuerung des Lade- und Entladevorgangs des Akkupacks, was eine längere Lebensdauer des Akkupacks, eine höhere Effizienz und eine genauere Kapazitätsüberwachung gewährleistet.

Der ADBMS6948 verfügt über einen integrierten Coulomb-Zähler. Dies ermöglicht die Überwachung der Ladungsmenge, die während des Ladevorgangs durch die Batterie fließt. Der Coulomb-Zähler, der auch als integrierter Stromsensor oder Ladungsmonitor bezeichnet wird, misst die Gesamtmenge der elektrischen Ladung (in Coulomb), die in eine Batterie hinein oder aus ihr heraus übertragen wird. Beim

Laden einer Zelle mit einem Coulomb-Zähler überwacht der Zähler die an die Batterie abgegebene Ladungsmenge. Dies erfolgt durch Messung des durch die Batterie fließenden Stroms, der über die Zeit integriert wird, um die Gesamtladung zu berechnen. Somit kann durch die Schätzung des SOC der Batterie und die Implementierung von Ladealgorithmen der Ladevorgang optimiert werden.

Die grundlegende Funktion eines Coulomb-Zählers besteht darin, den in den oder aus dem Akkupack fließenden Strom über die Zeit zu integrieren, um die übertragene Gesamtladung zu berechnen. Das funktioniert folgendermaßen:

- **Strommessung:** Der Baustein misst den Strom, der in den oder aus dem Batteriestapel fließt. Dies erfolgt in der Regel mit Hilfe eines Stromsensors, z. B. einem Shunt-Widerstand, der an der unteren Seite des Batteriestapels angeschlossen ist.
- **Integration:** Der gemessene Strom wird vom ADBMS6948 über die Zeit integriert. Bei der Integration werden die Stromwerte in regelmäßigen Abständen addiert, um die kumulierte Ladung zu berechnen.
- **Berechnung der Kapazität:** Die kumulierte Ladung wird in Amperestunden (Ah) oder Coulomb umgerechnet. Dies liefert Informationen über die verbleibende Kapazität des Batteriestapels.
- **Überwachung und Anzeige:** Die berechnete Kapazität wird verarbeitet, an die Haupt-MCU übertragen und auf der grafischen Benutzeroberfläche zur weiteren Verarbeitung angezeigt. Diese Informationen sind wertvoll für das Batteriemangement, die Bestimmung des SOC und die Vermeidung von Überladung oder Überentladung.

Diese Informationen sind wertvoll für das Batteriemangement, die Bestimmung des SOC und die Vermeidung von Überladung oder Überentladung. Durch die Kenntnis des anfänglichen SOC der Batterie ist es möglich, den SOC während des Ladevorgangs abzuschätzen, indem die integrierte Ladung zum Anfangswert addiert wird. Diese Schätzung trägt dazu bei, eine Überladung zu verhindern, und ermög-

licht die Implementierung von Ladealgorithmen, die den Ladevorgang unter Berücksichtigung von Faktoren wie Temperatur, Batteriealter und -chemie optimieren.

In früheren Artikeln von ADI finden Sie Tipps zum Ausgleichen der Batterie und zur Optimierung der Lebensdauer. Diese Ressourcen sind besonders empfehlenswert für diejenigen, die weitere Einzelheiten zu diesem Thema suchen. Mit dem Thema Cell Balancing befassen sich zwei Artikel von Kevin Scott und Sam Nork: „Passive Battery Cell Balancing“ and „Active Battery Cell Balancing.“ Weitere Einzelheiten zur Charakterisierung von Zellen finden Sie im Artikel „Characterizing a Li+ Cell for Use with a Fuel Gauge.“

## Zusammenfassung

Daher ist die Integration eines BMS in eine BBU von äußerster Wichtigkeit. Ein BMS bietet zahlreiche Vorteile hinsichtlich der Verbesserung der Leistung, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit des Batteriesystems. Durch die Optimierung der Batterieleistung trägt ein gutes BMS zur Maximierung der Batterielebensdauer und -kapazität bei und stellt eine effiziente Nutzung der Energiespeicherfähigkeiten sicher. Es steuert aktiv die Lade- und Entladevorgänge und verhindert Überladung, Überentladung und Überhitzung, die die Batterie beschädigen können.

Sicherheit ist ein wichtiger Aspekt, insbesondere bei Batteriesystemen. Ein BMS verfügt über Sicherheitsfunktionen und Überwachungsmechanismen, um thermisches Durchgehen zu verhindern und potenzielle Gefahren zu minimieren. Es schützt vor Überstrom, Überspannung und abnormalen Temperaturbedingungen und schützt so das Batteriesystem und die Umgebung. Die Energieeffizienz ist ein weiterer großer Vorteil eines BMS. Die Optimierung der Lade- und Entladevorgänge minimiert die Energieverluste und verbessert die Gesamteffizienz der BBU. Dies führt zu Kosteneinsparungen, einer geringeren Umweltbelastung und einer besseren Nutzung der verfügbaren Energieressourcen.

Das BMS überwacht und schätzt zudem den SOC und SOH des Batteriestapels genau. Diese Informati-

onen sind für die ordnungsgemäße Verwaltung der Batterie, die Berechnung der verbleibenden Laufzeit und die Planung der Wartung oder des Austauschs wesentlich. Die Integration eines Coulombzählers ist wichtig für eine präzise Messung und Überwachung. Diese Informationen sind für ein effizientes Batteriemangement und die Verlängerung der Batterielebensdauer in verschiedenen Anwendungen unerlässlich, was die Systemzuverlässigkeit erhöht und das Risiko unerwarteter Ausfälle verringert.

Der vierte Teil dieser Serie, „Intelligentes Batterie-Backup für ununterbrochene Energieversorgung Teil 4: Betrieb des BBU-Trägers“ erläutert, wie ADI eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt und bereitstellt, die es dem Benutzer ermöglicht, mit den sechs BBU-Modulen auf dem BBU-Träger (Shelf) zu kommunizieren und Daten von ihnen zu sammeln.

Im ersten Teil, „Intelligentes Batterie-Backup für ununterbrochene Energieversorgung Teil 1: Elektrisches und mechanisches Design“, werden die elektrischen und mechanischen Designüberlegungen für BBU besprochen. Der zweite Teil, „Intelligentes Batterie-Backup für ununterbrochene Energieversorgung Teil 2: Funktionen und Arbeitsweise des BBU-Mikrocontrollers“, geht näher auf die Software des Hauptmikrocontrollers ein.

## Wer schreibt:

Christian Cruz ist Staff Applications Development Engineer bei Analog Devices, Inc. Er verfügt über mehr als 12 Jahre Erfahrung in den Bereichen analoges und digitales Design, Firmware-Design und Leistungselektronik.

Marvin Neil Solis Cabueñas erwarb einen Bachelor-Abschluss in Elektrotechnik an der De La Salle University in Manila, Philippinen. Er verfügt über mehr als zehn Jahre Berufserfahrung in verschiedenen Bereichen wie der Programmierung eingebetteter Systeme, digitaler Signalverarbeitung, Simulationsmodellierung und anderen.

## Literatur

[1] David Sun. „Open Rack/SpecsAndDesigns.“ Open Compute Project. ◀