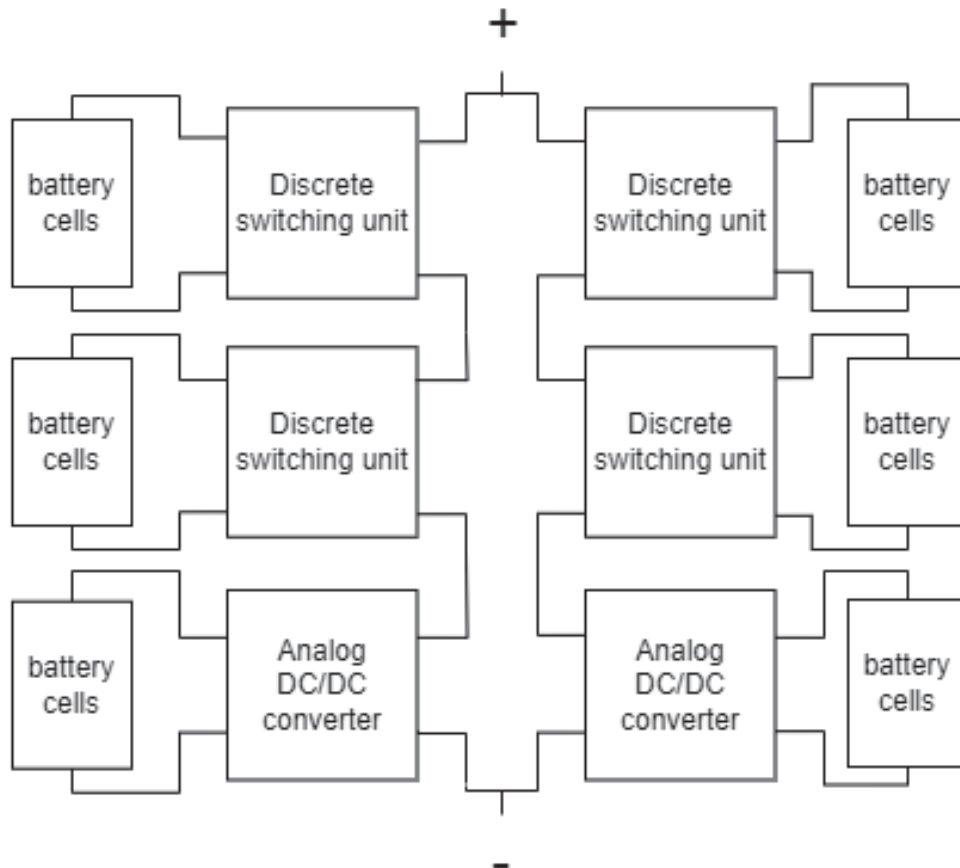


Re-Configurable Battery Packs with Controllable Output Voltage

Publik rapport



A reconfigurable battery

Författare: Faisal Altaf, Yang Xu

Datum: 2024-01-14

Projekt inom Accelerate Swedish partnership – FFI – år 2021

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	4
5 Mål	5
6 Resultat och måluppfyllelse	6
7 Spridning och publicering	9
7.1 Spridning av kunskap och resultat	9
7.2 Publikationer.....	9
8 Slutsatser och fortsatt forskning	9
9 Deltagande parter och kontaktpersoner	10

FFI i korthet

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin för att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsverksamhet med fokus på områdena Klimat & Miljö och Turism Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för cirka 1 miljard kronor per år, varav de offentliga medlen uppgår till drygt 400 miljoner kronor.

Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Energilagringssystem med många battericeller används ofta i elfordon, distribuerade kraftsystem, mikronät och reservkraftsystem. Konventionellt är den elektriska topologin för ett energilagringssystem fixerad som parallellkopplad, seriekopplad eller en kombination av båda. En nackdel är obalansen och heterogeniteterna mellan celler. Batterisystemets prestanda begränsas av skillnaden mellan de svagaste och starkaste cellerna i ett system. Dessutom kan närvaron av heterogeniteter också ha stor inverkan på systemets livslängd, effektivitet och säkerhet (t.ex. kan stora termiska gradienter och lokala hot spots leda till problem som termisk rusning). Det finns ett behov av effektiv hantering och kontroll av obalansförhållandena och heterogeniteter över många battericeller, samtidigt som man säkerställer optimalt utnyttjande av batteripack.

I detta samarbetsprojekt mellan Volvo och SEM syftade vi till att omforma energilagringssystem genom att introducera en omkonfigurerbar batteridesign som tar itu med begränsningarna hos konventionella batterisystem med fixerad opologi. Vårt omkonfigurerbara batterisystem fokuserade på att förbättra prestanda, livslängd, säkerhet, tillförlitlighet, flexibilitet och effektivitet. Genom att dynamiskt justera konfigurationen av battericellerna mildrade vi effekten av den svagaste cellen på systemets övergripande prestanda. Denna innovation visade sig lovande för applikationer i elfordon och andra kraftsystem.

Projektet omfattade design av hårdvara, mjukvara och kommunikationssystem i syfte att uppfylla definierade specifikationer. Utvecklingsprocessen organiserades i tio arbetspaket, med regelbundna möten varannan vecka och några specifika workshops, både online och på plats, vilket säkerställer en nära kollaboration mellan Volvo och SEM. Dessa möten och workshops omfattade kritiska aspekter som hårdvaruspecifikationer, mjukvaruutveckling och funktionerna i det omkonfigurerbara batterisystemet.

För att validera effektiviteten av vår design genomfördes en serie testfall. Dessa tester gav både kvantitativa och kvalitativa insikter, vilket bekräftade att det omkonfigurerbara batterisystemet inte bara uppfyllde de definierade specifikationerna utan också visade potential för ytterligare utveckling. Utöver att uppfylla projektmålen identifierade vi framtida möjligheter för tillämpning av omkonfigurerbara batterisystem. Anpassningsförmågan hos dessa system gör dem lämpliga för integrering i elfordon, där energikravens dynamiska natur överensstämmer med vår designs kapacitet och anpassningsförmåga.

2 Executive summary in English

Energy storage systems with many battery cells are widely used in electric vehicles, distributed power systems, microgrids, and backup power systems. Conventionally, the electrical topology of an energy storage system is fixed as parallel connected, series connected, or a combination of both. One drawback is the imbalance and heterogeneities between cells. The battery system's performance is limited by level of difference between the weakest and strongest cells in a system. Moreover, the presence of heterogeneities may also have large impact on system's lifetime, efficiency, and safety (e.g., large thermal gradients and local hot spots may lead to issues such as thermal runaway). There is a need for effective management and control of the imbalance conditions and heterogeneities across numerous battery cells, all while ensuring the optimal utilization of battery packs.

In this collaborative project between Volvo and SEM, we aimed to reshape energy storage systems by introducing a reconfigurable battery design that addresses the limitations of conventional fixed-topology battery systems. Our reconfigurable battery system focused on enhancing performance, lifetime, safety, reliability, flexibility, and efficiency. By dynamically adjusting the configuration of the battery cells, we mitigated the impact of the weakest cell on the overall performance of the system. This innovation held great promise for applications in electric vehicles and other power systems.

The project encompassed the design of hardware, software, and communication systems, aiming to fulfill defined specifications. The development process was organized into ten work packages, with regular biweekly meetings and some specific workshops, both online and onsite, ensuring close alignment between Volvo and SEM. These meetings and workshops covered critical aspects such as hardware specifications, software development, and functionalities of the reconfigurable battery system.

To validate the effectiveness of our design, a series of test cases were conducted. These tests provided both quantitative and qualitative insights, confirming that the reconfigurable battery system not only met the defined specifications but also exhibited potential for further advancements. Beyond meeting the project goals, we identified future possibilities for the application of reconfigurable battery systems. The adaptability of these systems makes them suitable for integration into electric vehicles, where the dynamic nature of energy demands aligns with the capability and adaptivity of our design.

3 Bakgrund

Energilagringsystem med många battericeller används ofta i elfordon, distribuerade kraftsystem, mikronät och reservkraftsystem. Konventionellt är den elektriska topologin för ett energilagringsystem fixerad som parallellkopplad, seriekopplad eller en hybrid av båda. En utmaning ligger i cell-obalanser och heterogeniteter, där den svagaste cellen begränsar energi- och effektprestanda, vilket begränsar batterisystemens totala livslängd. Ett omkonfigurerbart batteri, i vilket den elektriska topologin möjliggör dynamisk justering för att uppnå specifika prestandakrav, lindrar konsekvenserna av heterogeniteter på flera nivåer mellan celler i ett pack eller ett flerpäckssystem. Dessutom möjliggör den extra styrbarheten hos omkonfigurerbara batterisystem den optimala blandningen av prestandaattribut (energi, energitäthet, kraftförmåga, kostnad, livslängd, säkerhet) och optimal drift av energilagringsystem. Omkonfigurerbara batterisystem kan anpassas till applikationer inom elektrifiering av transporter och förnybar nätintegration.

För att få bättre anpassningsförmåga, prestanda, livslängd, säkerhet och effektivitet hos omkonfigurerbara batterisystem har ett par riktningar utforskats inom akademi och industri.

- Flexibel och modulär batteriarkitekturdesign. Den måste tillhandahålla en enkel lösning för omkonfigurering, underhåll och utbyte, samtidigt som den säkerställer kompatibilitet med strömmvandlingskretsen.
- Förbättringar av de konventionella batteristyrningssystemen. De förbättrade batteristyrningssystemen kan dynamiskt övervaka eller uppskatta tillstånden och styra omkonfigureringsprocessen.
- Styr- och maskininlärningsalgoritmer. De kan användas för att på ett förutsägbart och optimalt sätt driva batterisystemet samtidigt som de uppfyller användningsbegränsningarna.

Omkonfigurerbara batterisystem är ett tvärvetenskapligt forskningsämne, som involverar kraftelektronik, styrning, optimering, kommunikation och batteritillverkning. De involverar också framväxande teknologier, såsom maskininläring, trådlöst Internet of Things, etc. Intresset för omkonfigurerbara batterisystem har ökat både inom den akademiska världen och industrin.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Syftet med detta projekt var att utveckla ett omkonfigurerbart batterisystem som dynamiskt kopplar ihop batterienheter eller justerar batterianvändning baserat på batteriets tillstånd, för att uppnå en specifik optimal prestanda. Det innehöll hårdvara, mjukvara och kommunikationsdesign. Genom att skapa den omkonfigurerbara batteriarkitekturen var vårt mål att förbättra energitätheten, maximera kraftförmågan, förlänga livslängden och optimera prestanda för applikationer som elfordon och förnybar energilagring.

För att säkerställa att vårt arbete stämde överens med det angivna forskningssyftet, använde vi följande frågor som riktlinjer vid utformningen och implementeringen av det omkonfigurerbara batterisystemet:

- Hur bör batterimodulens arkitektur och kraftelektronikmoduler utformas och integreras för att ha mer kontrollerbarhet med avseende på energiförbrukning, komplexitet, fysiska begränsningar, realtidsimplementering och säkerhet?
- Vilka optimeringsstrategier kan användas för att förbättra den totala energitätheten, lagringskapaciteten och kraftförmågan?
- Hur kan omkonfigurerbara batterisystem förbättra laddningseffektiviteten och minska laddningstiden?
- Vilken är den potentiella livslängdsförbättringen på grund av extra styrbarhet och omkonfigurerbarhet i batterisystem?
- Vilka är de andra potentiella tillämpningsområdena för omkonfigurerbara batterisystem, förutom elfordon? Hur kan systemarkitekturen skräddarsys för att möta specifika krav från andra applikationer?

Metoden vi använde för att genomföra projektet innefattar teoretisk analys, teknisk design, praktiska implementeringar och experimentell validering. Några av väsentliga beståndsdelar är:

- *Litteraturgranskning:* Vi har granskat litteratur från både akademi och industri för att bättre förstå de senaste elektriska framdrivningssystemen för elfordon, energilagringssystem och omkonfigurerbara batteriteknologier.
- *Batterimoduldesign:* Med tanke på kravet på spänning, kapacitet, laddning och urladdningshastighet valde vi en blandning av celltyper och konfigurerade batterimoduler, såsom serie- eller parallellkopplingar av celler. Vi placerade temperatursensorer på specifika platser i modulerna och designade mekaniska strukturer, med hänsyn till storlek, form och monteringsalternativ, för att möta robusthet och säkerhetskrav. Vi skapade en elektrisk design, inklusive ledningar, kontakter och säkringar.
- *Kraftelektronikdesign:* Vi designade kraftelektroniken, nämligen DC-DC-omvandlare, för att hantera spänning, ström och kapacitet. Den är också utformad för att balansera laddning och urladdning mellan celler.
- *Teoretisk modellering och optimal reglering:* Vi utvecklade matematiska modeller för att simulera beteendet och prestandan hos omkonfigurerbara batterisystem under olika konfigurationer och driftförhållanden och för att möjliggöra modellbaserad uppskattning, reglering och diagnostik. Vi designade styralgoritmer för att optimera kraft- och energiöverföring och användning.
- *Funktionalitetsverifiering:* Vi genomförde fallstudier, experimentell testning, dataanalys och jämförande analys. Vi undersökte konkreta testfall där konfigurerbara batterisystem har använts för att utvärdera deras praktiska fördelar. Vi genomförde laboratorieexperiment för att validera teoretiska modeller och bedöma systemets prestanda. Vi analyserade data som erhöles från experiment för att dra slutsatser om effektiviteten och genomförbarheten av omkonfigurerbara batterisystem.
- *Värdeutvärdering:* Vi anordnade möten för att diskutera anpassningsförmågan hos omkonfigurerbara batterisystem för att tillfredsställa kraven på elfordon. Vi utvärderade också driftskostnadsbesparingarna, energieffektiviteten och skalbarheten av att använda omkonfigurerbara batterisystem.

5 Mål

Målet och resultaten från projektet är:

- Battericeller monterade i moduler anpassade för integrerad kraftenhetsmontering.
- Två SEM-prototyper med ett gränssnitt till Volvos testmiljö applicerade på två batteripack enligt beskrivning i arbetspaket 6.
- Dokument för ovanstående SEM-prototyper och deras gränssnitt: driftmanual, inklusive definitioner av in- och utgångar och alla relaterade kommunikationssignaler.

De förväntade resultaten av projektet är:

1. SEM-prototyp applicerad på battericeller/moduler från Volvo.

2. Ett gränssnitt mellan SEM-prototypen och Volvos styrsystem i Volvos testmiljö.
3. En demonstration av SEM-prototypens funktion i en laboratoriemiljö:
 - Att utspänningen kan styras till önskat värde oberoende av laddnings- och urladdningsström och battericellernas laddningstillstånd.
 - Att strömflödet genom de två packen kan styras, till exempel genom att styra ett första batteripack så att en begärd mellankretsspänning upprätthålls, medan ett andra batteripack styrs så att en begärd laddnings-/laddningsström upprätthålls.
 - Som ett målvärde ska styr-onoggrannheten för DC-länkspänningen vara maximalt 1 % jämfört med den begärda spänningen. För strömmen för det andra batteripacket ska styr-onoggrannheten vara maximalt 2 % av den begärda strömmen, under typiska belastnings- eller laddningssituationer. Dessutom ska övertonerna som mäts på DC-länken vara små och inom vad som normalt accepteras i elfordon. För battericellerna ska övertonerna inte vara så höga att det kan anses minska battericellernas livslängd avsevärt eller skapa väsentligt ytterligare förluster i cellerna.
4. En rapport om prestandan för SEM-prototypen.

6 Resultat och måluppfyllelse

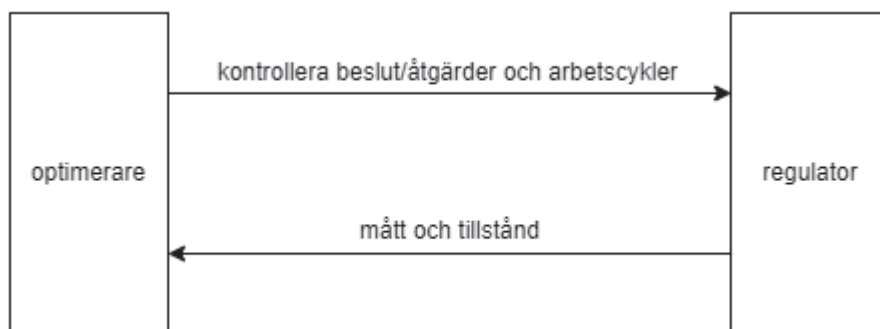
Resultatet av projektet motsvarade de initiala målen och förväntningarna. Hårdvaran, mjukvaran, styrningen och kommunikationsarkitekturen för omkonfigurerbara batterisystem utformades. Dessutom har batterimoduler och kraftelektronik designats, inte bara för att uppfylla systemkraven utan också för att förbättra systemets prestanda. Det omkonfigurerbara batterisystemet visade den förväntade anpassningsförmågan till dynamiska celltillstånd och energikrav på grund av de teoretiska modellerings- och regleralgoritmerna. Vi fortsatte med testfall för laboratorieexperiment och testresultaten analyserades. Prototypimplementeringen av det omkonfigurerbara batterisystemet demonstrerade funktionerna för spänningsspänning och strömdelning mellan två moduler med olika celltyper och olika hälsotillstånd (SoH) nivåer. Huvudresultat och måluppfyllelse sammanfattas enligt följande enligt tio arbetspaket.

Arbetspaket 1 - specifikation av kommunikationsgränssnitt: Vi definierade gränssnittet mellan SEM-prototypen och Volvos elektroniska styrenhet (ECU) och Volvos testmiljö. Reglerings- och kommunikationsinställningarna mellan SEM:s styrkort för kraftelektronik och Volvos ECU är baserad på Controller Area Network (CAN), vilket säkerställer kompatibilitet med Volvos kommunikations- och mjukvarukonventioner.

Arbetspaket 2 - specifikation av integrerad kraftenhet: Vi specificerade monteringen av battericeller till moduler lämpliga för anslutning till SEM-prototypen. Här inkluderar den integrerade kraftenheten cellmoduler och SEM-kraftelektroniklösning.

Arbetspaket 3 - testmiljökrav: Vi definierade SEM-krav på Volvos testmiljö. Kraven möjliggjorde en omfattande täckning av tester för funktionaliteter hos regulatoren och optimeraren, samt kommunikationsgränssnittet. Vi har fastställt krav som inte bara uppfyller de nuvarande reglerings- och kommunikationsbehoven utan är också förberedda för de föränderliga mjukvaruuppdateringarna.

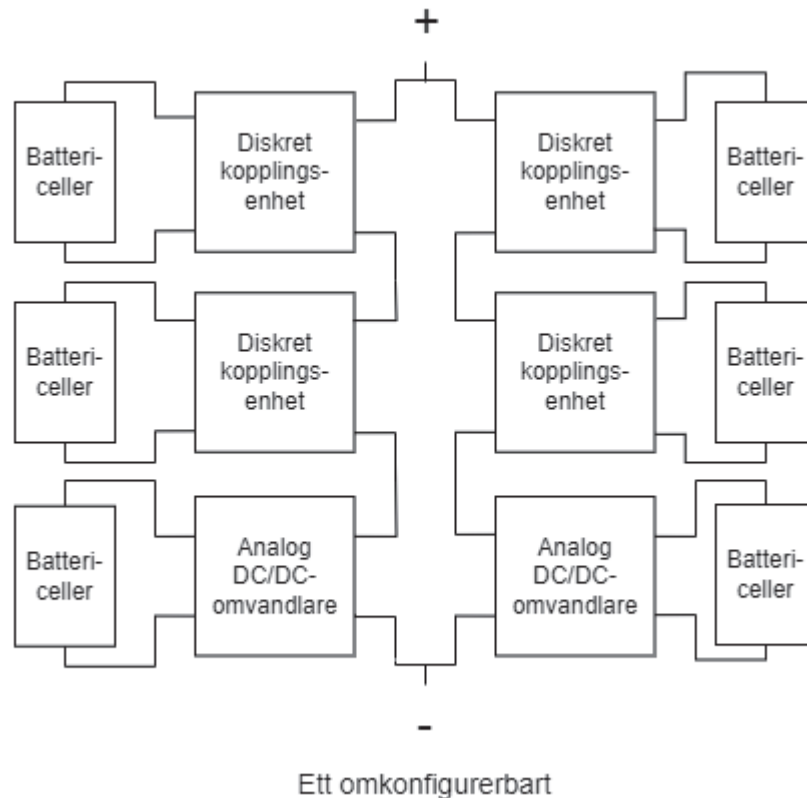
Arbetspaket 4 - implementering av kommunikationsgränssnitt: Vi implementerade gränssnittet mellan SEM-prototypen och Volvos ECU och testmiljö baserat på specifikationerna från arbetspaket 1. Enligt Volvos kommunikations- och mjukvarukonvention köptes relevant utrustning, och en låg-nivå kontrollmiljö justerades och sattes upp på Volvo. Vi testade funktionaliteten och kommunikationsprotokollet för kontrollmiljön på låg-nivå. Reglerings- och kommunikationsgränssnittet implementerades enligt den högnivåarkitektur som visas i figuren nedan.



Som visas i figuren är högnivåstyrenheten, nämligen optimeraren, ansvarig för planering, hantering av begränsningar och koordinering av MIMO-system (multiple-input multiple-output). Här används den som optimal styrenhet för hantering av effektdelning, cellbalansering, multi-batteriutjämning etc samtidigt som den uppfyller vissa prestanda- och livslängdsmål. Lågnivåregulatorn, nämligen regulatorn, ansvarar för snabb sampling, aktivering och snabba återkopplingsloop. Här används den för att spåra referenser för spänning och ström. Optimeraren läser mätningar och tillstånd, såsom värde på cell, enhet, packspänningar, modulströmmar och celltemperatur, för att uppskatta batteriets tillstånd och optimera beslutsfattande. Optimeraren skickar styrbeslut, åtgärder och arbetscykler till regulatorn så att regulatorn kan fortsätta med aktivering av halvledaromkopplare (MOSFET).

Arbetspaket 5 - testmiljöanpassning: Vi anpassade testmiljön till SEM-krav enligt arbetspaket 3. Testmiljön, inklusive ett grafiskt användargränssnitt (GUI), implementerades. Det möjliggjorde omfattande testning av funktioner, såsom anslutning, fränkoppling, spännings- och strömspänning, prioriteringsinställning och prioritetsändring för analoga och diskreta kraftenheter.

Arbetspaket 6 - integrerade kraftenheter: Volvo levererade battericeller monterade i moduler anpassade för integrerad kraftenhetsmontering. SEM tillhandahöll elektroniksystemet. Modulerna och elektroniksystemet monterades som integrerade kraftenheter. Med tanke på specifikationerna och kraven för spänning, kapacitet, laddning och urladdningshastighet från arbetspaket 2 valde vi en blandning av celltyper, SoH-nivåer och olika batterisystemkonfigurationer (som serie- eller parallellkopplingar av celler). I utvecklingsprocessen balanserade vi å ena sidan designen mellan omkonfigurerbarhet och enkelhet i elektrisk topologi. Å andra sidan övervägde vi påverkan på och av hård- och mjukvarudesignen. Vi tilldelade temperatursensorer till specifika platser i modulerna och designade mekaniska strukturer, med hänsyn till storlek, form och monteringsalternativ, för att möta robusthet och säkerhetskrav. Vi skapade en elektrisk design, inklusive ledningar, kontakter och säkringar. Vi designade kraftelektroniken, nämligen DC-DC-omvandlare, för att hantera spänning, kapacitet och ström. Den designades också för att balansera laddning och urladdning mellan celler. Det elektriska gränssnittet mellan batterimoduler och kraftelektronik designades och monterades. Batterimodulerna och kraftelektronikens design visas i figuren nedan.



Två batterimoduler är parallellkopplade, där varje modul består av tre oberoende kraftenheter (kombination av några battericeller kopplade till oberoende kraftelektronik) som visas i figuren. Inom varje modul består två kraftenheter av ett kluster av seriekopplade celler kopplade till diskreta omkopplingsenheter, vilket endast tillåter på/av-styrning av varje enskild enhet. Dessutom består en kraftenhet i varje modul av ett kluster av celler kopplade till en analog DC-DC-omvandlare. Dessa omvandlare är designade som buck-boost-omvandlare, vilket ger flexibiliteten att kontinuerligt justera utspänningen inom det specificerade driftsområdet.

Arbetspaket 7 - systemintegration: Vi integrerade kraftenheter, implementerade i arbetspaket 6, med Volvos ECU och testmiljö med hjälp av kommunikationsprotokollet designat i arbetspaket 4. Detta innebar synkronisering av styrsignaler och återkopplingsloopar för att säkerställa exakt reglering under testscenarier.

Arbetspaket 8 - tester och proof of concept (PoC) utvärdering: Vi testade det integrerade systemet i Volvos testmiljö. För att utvärdera funktionaliteterna gjorde vi fallstudier, experimentell testning, databearbetning och jämförande analys. Vi undersökte konkreta testfall där omkonfigurerbara batterisystem användes för att utvärdera deras praktiska fördelar. Testfallen inkluderade scenarierna som representerade karakteriseringarna av det omkonfigurerbara batterisystemet.

- anslutning och urkoppling av en batterimodul;
- spänningsspårning;
- prioritetsändringskommando följande; och
- strömförsörjningstester för varje kraftenhet och hela det omkonfigurerbara batterisystemet för laddning och urladdning.

Arbetspaket 9 - dataanalys: Vi analyserade testresultaten. Vi genomförde laboratorieexperiment för att validera teoretiska modeller och bedöma systemets prestanda. Vi analyserade data som erhöles från experiment för att dra slutsatser om effektiviteten och genomförbarheten av omkonfigurerbara batterisystem.

7 Spridning och publicering

7.1 Spridning av kunskap och resultat

Hur ska projektresultaten användas och spridas?	Välj med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Studien resulterade i ökad kunskap om den elektriska och mekaniska designen av batterimoduler, kraftelektronisk omvandlingsdesign, uppskattning och regleralgoritmer i batteristyrningssystemen och egenskaper hos elfordons energilagringssystem såsom kapacitet, spänning, energitäthet och cykel-livslängd.
Förmedla till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Vi kan komma att använda projektresultat i framtiden för vidare FoU-arbete inom detta ämne.
Överföra till produktutvecklingsprojekt	---	----
Introducerad på marknaden	---	----
I utredningar/föreskrifter/ tillståndsärenden/ politiska beslut	X	Resultaten kan vara användbara för att definiera framtida batteriregler.

7.2 Publikationer

Inga forskningspublikationer (förutom interna tekniska rapporter) var ursprungligen planerade för detta projekt på grund av konfidentialitet och IP-skäl.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Resultatet av projektet var en arkitektur och implementering av hårdvara, mjukvara, reglering och kommunikation för ett omkonfigurerbart batterisystem. Den utvärderade prestandan för det omkonfigurerbara batterisystemet uppfyllde projektmålen och designspecifikationerna avseende spänningsspårning, strömdelning och optimal effekt- och energiprestanda. Framstegen med det implementerade omkonfigurerbara batterisystemet var designen av omkonfigurerbara batterimoduler, kraftomvandlingssystem och kontroll- och kommunikationsalgoritmer. Forskningen bidrog till de tillämpliga områdena inom elfordon, energilagringssystem, elnät och reservkraftssystem.

Det finns flera områden som forskare kan utforska i framtiden relaterade till omkonfigurerbara batterisystem:

- *Styrning och optimering*: Implementering av styralgoritmer som i realtid optimerar omkonfigurationen av batterier baserat på strömförbrukning och driftsförhållanden. Skalbarhet för att rymma många celler och generalisering över olika cellkemi måste studeras. Hybridsystemdynamik, där analoga krafterheter och diskreta krafterheter blandas, måste analyseras med avseende på stabilitet och nåbarhet.
- *Hybridenergilagringssystem*: Inom det omkonfigurerbara batteriramverket, med tanke på fördelarna och begränsningarna med att kombinera olika cellkemi, eller i en bredare skala, en blandning av olika energilagringsteknologier, såsom batterier, superkondensatorer, bränsleceller, etc. En anmärkningsvärd framsteg inom detta område är konceptet Software Defined Batteries (SDB). SDB

utnyttjar sofistikerade operativsystemmekanismer och kontrollalgoritmer för att dynamiskt hantera och optimera energilagringsoperationer.

- *Optimala prioriteringsalgoritmer:* I projektet använde vi prioritetsbaserade omkonfigurerbara batterisystem. Icke fasta prioriterade uppdrag kan utredas. Round robin, tilldelning av den svagaste kraftenheten med lägst prioritet, flernivåkö eller andra prioriterade tilldelningsmetoder kan förbättra prestanda hos energilagringssystem.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Volvo Group:

V O L V O

SEM:

