

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>Optimal energistyrning av anläggningsmaskiner med batteridegradering inkluderat</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>Optimal energy management of construction equipment including battery wear</b>	
Universitet/högskola/företag <b>Linköpings universitet</b>	Avdelning/institution <b>Institutionen för systemteknik</b>
Adress <b>Institutionen för systemteknik. Linköpings universitet.</b>	
Namn på projektledare <b>Jan Åslund</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>Iman Shafikhani</b>	
Nyckelord: 5-7 st <b>Energistyrning, batteridegradering, optimal styrning, modellprediktiv reglering, seriehybrider, hjullastare</b>	

## Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten och har skett i samarbete med Volvo Construction Equipment, där Auayporn Elfving har varit industrihandledare och Anders Fröberg referensperson. Kontaktperson vid Volvo CE är Andreas Hjertström. Alessandro Carnevali och Magnus Larsson har bidragit med teknisk kompetens. Vid Linköpings universitet har Iman Shafikhani deltagit som doktorand. Jan Åslund har varit huvudhandledare och bihandledare har varit Erik Frisk och Christofer Sundström.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	2
Summary.....	3
Inledning/Bakgrund.....	4
Genomförande .....	5
Resultat .....	6
Diskussion .....	7
Publikationslista .....	7
Bilagor .....	8

## Sammanfattning

Elektrifiering av fordon är ett viktigt steg för att förbättra bränsleekonomi och reducera utsläpp från fossila drivmedel och marknaden för hybridfordon har ökat i popularitet som ett steg i denna riktning. Med en ökande omtanke om miljön har behovet av utveckling av relevant teknologi blivit mer märkbar än tidigare. Design av effektiva strategier för energistyrning som hanterar effektfördelningen mellan olika energikällor är en viktig del i denna strävan.

Resultaten i detta projekt tyder på att det går att minska kostnaderna för att elektrifiera fordon som till exempel hjullastare, vilket möjliggör en utökad elektrifiering och minskad användning av fossila bränslen. Detta leder i sin tur till reducerad miljöpåverkan genom minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp.

Detta projekt inriktar sig på design av reglersystem för energihantering i seriehybrider, framförallt hybrid-elektriska hjullastare. I den första delen av projektet tas hänsyn till batteriets livslängd när bränsleeffektiva strategier utvecklas. Detta är en viktig aspekt, eftersom kostnaden för batterier är en stor del av fordonets totala kostnad. En tidigare utvecklad empirisk modell för batteriets degradering modifieras och används för att förutsäga batteriets livslängd och i optimeringsproblemen som studeras vägs bränsleförbrukning och batteridegradering ihop. Två optimeringsramverk används för att analysera problemet, Pontryagins minimumprincip (PMP) och modellprediktiv reglering.

Simuleringar visar att det kan finnas en stor möjlighet att förlänga batteriets livslängd avsevärt med en liten ökning i bränsleförbrukning. När PMP-ramverket används har den utvecklade metodiken en prestanda med negativ korrelation med det kvadratiske medelvärdet av effektbehovet för de olika kör cyklerna. Resultaten kan användas för att utveckla regelbaserade metoder som kan användas i realtid.

I den andra delen av projektet utvecklas tidseffektiva strategier för energistyrning. Som ett första steg härleds analytiska lösningar för ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy), där systembegränsningar tas hänsyn till i härledningen. Effektiva begränsningar på parametrarna tas fram för att utveckla en adaptiv realtids-ECMS. Den uppnådda bränsleekonomin ligger nära den som uppnås med icke-kausala utvärderingar. I ett andra steg används de analytiska lösningarna för att ta fram en prediktiv ECMS-realtidsalgoritm.

## Summary

Electrification of vehicles is an indispensable step in improving fuel economy and reducing fossil fuel emissions. In particular, hybrid electric vehicle market has gained popularity as one such reliable solution. With the global rise in environmental concerns, the need for advancement of the relevant technologies has become more noticeable than before.

In this pursuit, it is well-known that design of effective energy management strategy (EMS) that governs power distribution among the onboard energy sources is key in reducing fuel consumption and its adverse environmental impacts. The result of this project indicates that it is possible to reduce the cost to electrify vehicles, such as wheel loaders. This enables an extended electrification, which leads to a reduced environmental impact due a decrease in CO<sub>2</sub> emissions.

This project is concerned with EMS design for series hybrid electric vehicles from two standpoints. Powertrain component durability is often neglected in EMS development. In particular, batteries are prone to degradation through usage, a phenomenon widely known as cycle aging, and contribute largely to vehicle cost. In the first part of the thesis, therefore, battery lifetime optimization is integrated into the design of fuel-efficient energy management strategies. An empirical capacity degradation model is adopted from the literature and is modified in order to predict battery lifetime. The multi-objective problem is to compromise between fuel consumption reduction and battery wear minimization. The problem is formulated within two control theory frameworks, namely Pontryagin's minimum principle and model predictive control. Simulation results suggest that there is a big potential in prolonging battery lifetime by sacrificing a small amount of fuel. The application considered in this part is a hybrid electric wheel loader. While prolonging battery lifetime is economically beneficial for any hybrid electric vehicle, the cost savings for high power applications such as the aforementioned construction equipment can be even more rewarding.

The second part of the project is dedicated to development of time-efficient energy management strategies. Considering the need for real-time feasibility, satisfactory fuel economy and low computation time are the key elements in EMS design. In a first step, an analytical solution to the equivalent consumption minimization strategy (ECMS) for series hybrid electric vehicles is derived, where the system constraints are directly taken into account in the derivation process. Effective equivalence factor bounds are found and used to develop a real time adaptive ECMS. The obtained fuel economy figures are observed to be very close to the non-causal benchmarks. In the second step, the analytical policies are utilized to propose realtime predictive ECMS algorithms.

## Inledning/Bakgrund

Projektet är en fortsättning på delprojektet Hybrid Wheel Loader Component Control som genomfördes inom ramen för projektet Autonom elektrisk bergtäkt, ett samarbete mellan Volvo CE, Skanska, Mälardalens högskola och Linköpings universitet.

Det övergripande målet med projektet Autonom elektrisk bergtäkt var att visa på potentialen att minska kundens transportkostnader och samtidigt minska miljöpåverkan genom minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp. En del av lösningen för att uppnå målet var elektrifiering av fordon och övrig produktionsutrustning. Delprojektet Hybrid Wheel Loader Component Control var ett doktorandprojekt, där en hybrid hjullastare studerades som en del av elektrifieringen av bergtäkten, men resultaten är även relevanta i andra sammanhang där hjullastare används. I projektet formulerades ett optimalt styrningsproblem där energiförbrukning och batteriets degradering vägs samman i målfunktionen.

Hjullastaren är en laddhybrid (PHEV) med möjligheter att för kortare perioder av helelektrisk drift. Det är en seriehybrid där två energikällor används för att möta effektbehovet. Den ena är en förbränningsmotor kopplat till en generator och den andra är ett batteri. Batteriet laddas i vissa faser med antingen energi från förbränningsmotorn eller med regenererad energi. Reglerproblemet i detta fall är att bestämma hur effektbehovet skall fördelas mellan de två energikällorna i varje tidpunkt

Reglerproblemet har formulerats som ett optimalt styrningsproblem där två kostnader, batteridegradering och förbrukat bränsle, vägs samman i målfunktionen. Minimering av bränslekostnaden är ett välstuderat problem, men betydligt mindre har skrivits om hur batteriets livslängd påverkas av vald reglerstrategi och hur en optimal reglerstrategi ska implementeras i fordonet

I det förra projektet har en modell utvecklats som beskriver hur batterianvändandet påverkar batteriets livslängd samt en metod för att identifiera parametrar i modellen. Modellen är anpassad för att kunna användas i optimal styrningsproblemet och även modeller av seriehybriden har utvecklats. Modellerna och formuleringen av optimeringsproblemet utvecklades i den första delen används i detta projekt.

I nuläget finns flera arbeten där Potryagins maximumprincip används för lösa optimala styrningsproblemet där batteridegradering vägs in i målfunktionen. I dessa arbeten har körcykeln antagits vara känd och lösningarna har beräknats off-line. Detta antagande är ofta inte uppfyllt i många tillämpade situationer och målet med detta projektet är att utveckla metoder som kan användas för beräkningar i realtid där detaljer om körcykeln inte är kända i förväg. Det finns metoder utvecklade för att, utifrån information från tillgängliga sensorer, identifiera i vilken typ av cykel hjullastaren används och denna information har använts i projektet.

Linköpings universitet har varit koordinator för projektet och projektet har finansierats av Energimyndigheten. Projektet har pågått under perioden 2019-11-01 till 2021-10-31

## Genomförande

Arbetspaket 1: Styrstrategier för hybrid hjullastare.

Utveckling av styrstrategi där hänsyn tas till både energiförbrukning och batteridegradering. Detta sker genom att utveckla metoder att skatta duala tillstånd för att kunna tillämpa Pontryagins maximumprincip (en princip för att hitta bästa möjliga kontroll över ett dynamiskt system från punkt a till punkt b, med hänsynstagande till yttre omständigheter och restriktioner).

Ansvarig: Linköpings universitet ansvarar för att utveckla styrstrategierna. Övriga deltagare: VCE bistår med teknisk kompetens, modeller och mätdata. Leverans: Metod som kan implementeras i hjullastarens styrsystem.

En batterimodell har vidareutvecklats för att kunna användas i styrstrategimodellen. Detta har skett genom att skriva om och anpassa en befintlig modell. Sedan har en metod utvecklats för att identifiera modellparametrarna. Metoder för att lösa optimeringsproblemet har utvecklats genom att använda Pontryagins minimumprincip och modellprediktiv reglering.

Arbetspaket 2: Styrstrategier för elektriska och autonoma anläggningsmaskiner. Utveckla styrstrategier för andra tillämpningar där batterier används. Modellering och reglering där hänsyn tas till energiförbrukning och batteridegradering. Autonomi tillför en extra frihetsgrad att styra det totala effektbehovet, vilket kommer att studeras.

Ansvarig: Linköpings universitet ansvarar för att utveckla styrstrategierna. Övriga deltagare: VCE bistår med teknisk kompetens, modeller och mätdata. Leverans: Simuleringsstudie.

Styrstrategier har utvecklats som är lämpliga att använda även för andra hybridfordon, till exempel personbilar. Analytiska lösningar för en ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) har tagits fram. Fördelen med de utvecklade metoderna är att de går att använda när fordonet inte arbetar i en repetitiv körcykel och är betydligt snabbare än numeriska metoder.

Arbetspaket 3: Demonstration av koncept.

Implementering och utvärdering av prototyp

Ansvarig: VCE implementerar utvecklade algoritmer.

Övriga deltagare: Linköpings universitet bistår med kunnande och eventuell ytterligare utveckling av metoderna.

Leverans: Utvärdering av koncepten i prototyp.

Två prototypjullastare har tagits fram av Volvo CE där de teoretiska resultaten kan utvärderas. Maskinernas mjukvara har utvecklats baserat på idéer från de teoretiska modellerna som utvecklats i tidigare arbetspaket. Därefter har fokus varit på att genomföra maskintester under realistiska körförhållanden för att samla data till utvärdering av de utvecklade idéerna. För att fullt förstå potentialen behövs mycket maskindata och därför har det under oktober startats en omfattande provperiod. Resultaten från detta beräknas finnas tillgängliga tidigt under 2022.

## Resultat

En styrstrategimodell för en hybrid hjullastare har utvecklats i den första delen av projektet. Hänsyn tas till både bränsleförbrukning och batteridegradering, som vägs ihop i en målfunktion. En befintlig batterimodell har vidareutvecklats och anpassats för att kunna användas i styrstrategimodellen. Sedan har en metod utvecklats för att identifiera modellparametrarna. En metod för att minimera målfunktionen har tagits fram, baserad på Pontryagins maximumprincip. Metoden utvärderades slutligen på olika typer av körcykler, med lovande resultat. Även metoder baserade på modellprediktiv reglering har utvecklats för att lösa optimeringsproblemet. Målet var att reducera beräkningstiden och därmed öka möjligheten att använda algoritmerna i realtid.

I den andra delen av projektet har analytiska lösningar för en ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) tagits fram. Motivet för att använda analytiska lösningar är att metoden är mycket mer tidseffektiv, jämfört med att använda numeriska metoder. Lösningarna beror av drivlinans parametrar vilket medför att lösningarna anpassar sig automatiskt när parametrarna ändras. Tolv körcykler simulerades för att utvärdera metoden. Resultatet visar god överensstämmelse med övriga metoder.

Metoden med analytiska lösningar har vidareutvecklats genom att träna en markovmodell på typiska körcykler, för att sedan använda tillsammans med de analytiska lösningarna. Även scenariot där ingen information finns om tidigare körcykler har studerats. Detta är en vanlig situation vid till exempel stadskörning. Framtida effektbehov modelleras som en linjär trend baserad på nuvarande och tidigare effektbehov. Metoderna har utvärderats på två seriehybrider, en hjullastare och en personbil.

Två prototypjullastare har tagits fram av Volvo CE där de teoretiska resultaten kan utvärderas. Maskinernas mjukvara har utvecklats baserat på idéer från de teoretiska modellerna som utvecklats i övriga delar av projektet. Maskintester utförs under realistiska körförhållanden för att samla data till utvärdering av de utvecklade idéerna. För att fullt förstå potentialen behövs mycket maskindata och därför har det under oktober startats en omfattande provperiod. Resultaten från detta beräknas finnas tillgängliga tidigt under 2022.

Projektet har resulterat i tre publicerade artiklar, två i tidskrift och ett konferensbidrag, samt ett manuskript inskickat till tidskrift. Doktoranden disputerade 2021-10-29.

## Diskussion

Resultaten tyder på att det går att minska kostnaderna för att elektrifiera fordon som till exempel hjullastare, vilket möjliggör en utökad elektrifiering och minskad användning av fossila bränslen. Detta leder i sin tur till reducerad miljöpåverkan genom minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp.

Modellerna som har använts i utveckling är ofta förenklade och ett nästa steg är att undersöka vilka förbättringar av modellerna som är möjliga, utan att öka beräkningstiden alltför mycket och därmed försämra möjligheten att använda algoritmerna i realtid. Till exempel så har inte minskad effekt p.g.a. batteriets åldrande tagits med i modellerna och målfunktion för optimeringsproblemet. Metodernas robusthet med avseende på modellosäkerhet har heller inte studerats, vilket borde göras.

## Publikationslista

- Iman Shafikhani. *Energy Management Strategy Design for Series Hybrid Electric Vehicles*. PhD Thesis, 2021.

Doktorsavhandling som innehåller fyra artiklar (se nedan) samt en kapp.

- Iman Shafikhani och Jan Åslund, *Energy management of hybrid electric vehicles with battery aging considerations: Wheel loader case study*, Control Engineering Practice, 2021.

Systemet som studeras är en hybrid hjullastare. En styrstrategimodell utvecklas där hänsyn tas till både bränsleförbrukning och batteridegradering, som vägs ihop i en målfunktion. En befintlig batterimodell vidareutvecklas och anpassas för att kunna användas i styrstrategimodellen. Sedan utvecklas en metod för att identifiera modellparametrarna. En metod för att minimera målfunktionen tas fram, baserad på Pontryagins maximumprincip. Metoden utvärderas slutligen på olika typer av körcykler.

- Iman Shafikhani, Christofer Sundström, Jan Åslund och Erik Frisk, *MPC-based energy management system design for a series HEV with battery life optimization*, European Control Conference, 2021.

Samma problemformulering som i artikeln ovan studeras i detta arbete, men här används modellprediktiv reglering för att lösa optimeringsproblemet. Främsta motivet, för ytterligare ett arbete med samma frågeställning, var att reducera beräkningstiden och därmed öka möjligheten att använda algoritmerna i realtid.

- Iman Shafikhani och Jan Åslund, *Analytical Solution to Equivalent Consumption Minimization Strategy for Series Hybrid Electric Vehicles*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021.

I detta arbete härleds analytiska lösningar för en ECMS. Motivet för att använda analytiska lösningar är att metoden är mycket mer tidseffektiv, jämfört med att använda numeriska metoder. Lösningarna beror av drivlinans parametrar vilket medför att lösningarna anpassar sig automatiskt när parametrarna ändras. Tolv körcykler simuleras för att utvärdera metoden. Resultatet visar god överensstämmelse med övriga metoder.

- Iman Shafikhani, Erik Frisk, Jan Åslund och Christofer Sundström. *Real-time Predictive Energy Management Strategies for Series Hybrid Electric Vehicles*. Inskickad till tidskrift.

Detta arbete bygger vidare på idéerna i det föregående arbete. Först studeras fallet att det finns data för typiska körcykler som används för att träna en markovmodell, för att sedan använda tillsammans med de analytiska lösningarna i föregående i föregående arbete. Sedan studeras scenariot där ingen information finns om tidigare körcykler. Detta är en vanlig situation vid till exempel stadskörning. Framtida effektbehov modelleras som en linjär trend baserad på nuvarande och tidigare effektbehov. Metoderna utvärderas på två seriehybrider, en hjullastare och en personbil.

- Carolina Pahkasalo. och André Sollander. *Adaptive Energy Management Strategies for Series Hybrid Electric Wheel Loaders*. Examensarbete, 2020.Handledare: Iman Shafikhani. Examinator: Jan Åslund.

I detta examensarbete kombineras mönsterigenkänning med optimal styrning. Olika metoder för mönsterigenkänning, för att identifiera aktuell körcykel, utvärderas. Sedan analyseras hur bränsleförbrukningen för de olika körcyklerna kan reduceras genom att använda ECMS.

## Bilagor

Administrativ bilaga

Iman Shafikhani. *Energy Management Strategy Design for Series Hybrid Electric Vehicles*. PhD Thesis, 29 oktober 2021.