

Slutrapport

Energimyndighetens titel på projektet – svenska

Elektrifierade drivlinor – nya utmaningar och lösningar för industrin

Energimyndighetens titel på projektet – engelska

Electrified Powertrains – New Challenges and Solutions for the Industry

Organisation

RISE Research Institutes of Sweden AB

Material och Produktion, avd Tillverkningsprocesser

Argongatan 30 Mölndal

Namn på projektledare

Eva Troell

Namn på eventuella övriga projektdeltagare

Michael Andersson	Höganäs AB
Mats Henriksson	Scania CV AB
Hans Hansson	SwePart Transmission AB
Elias Löthman	Ovako AB
Christos Oikonomou	voestalpine HPM Sweden AB
Rikard Hjelm	Lunds universitet
Andreas Archenti	KTH

Nyckelord

elektrifierade drivlinor, kugghjul, ljud, verkningsgrad, tillverkning

Förord

Denna rapport är ett resultat av projektet ”Elektrifierade drivlinor – nya utmaningar och lösningar för industrin”; en förstudie finansierad av Energimyndigheten inom programmet FFI Nollutsläpp.

Projektstart: maj 2024

Rapportering: mars 2025

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Summary	4
Inledning/bakgrund	5
Genomförande	6
Resultat	7
Diskussion	9
Publikationslista	9
Referenser, källor	10
Bilagor	11

Sammanfattning

I samband med att fordonsflottan/transportsystemet går över mot elektrifiering är det ett stort fokus på batterier och elförsörjning. Ytterligare en viktig aspekt är lättvikts- och effektivitetsaspekter för att möjliggöra långa körsträckor och livslängd för batteriet och fordonet. Förstudien adresserar drivlinorna som för över kraften från elmotorn till drivhjulen.

Målet med förstudien är att klargöra behov, utmaningar, avgränsningar och innehåll till ett större projekt för att arbeta med frågeställningar och lösningar relaterat till elektrifierade drivlinor under tillverknings- och användningsfas. Tidigare utveckling har gällt drivlinor för förbränningsmotorer. I samband med elektrifieringen uppstår nya utmaningar och därmed behov av ny forskning och även provningsmöjligheter. Effektmålet med ett fullskaleprojekt är att möjliggöra kompakta, lätta, effektiva och tysta drivlinor med låga friktionsförluster för lång livs- och körlängd.

Förstudien har resulterat till grunden för ett större projekt som planeras att sökas till FFI Nollutsläpp hösten 2025.

Summary

As the vehicle fleet/transport system transitions to electrification, there is a significant focus on batteries and power supply. Another important aspect is lightweight and efficiency considerations to enable long driving ranges and lifespan for the battery and vehicle. The preliminary study addresses the powertrains that transfer power from the electric motor to the drive wheels.

The goal of the preliminary study is to clarify needs, challenges, limitations, and content for a larger project to work on issues and solutions related to electrified powertrains during the manufacturing and usage phases. Previous development has concerned powertrains for combustion engines. In connection with electrification, new challenges arise, and thus the need for new research and testing opportunities. The impact goal of a full-scale project is to enable compact, lightweight, efficient, and quiet powertrains with low friction losses for long life and driving range.

The prestudy has resulted in an application for a larger project that is planned to be applied for to FFI Zero Emissions in autumn 2025.

Inledning/bakgrund

I samband med att fordonsflottan/transportsystemet går över mot elektrifiering är det ett stort fokus på batterier och elförsörjning. Ytterligare en viktig aspekt är lättvikts- och effektivitetsaspekter för att möjliggöra långa körsträckor och livslängd för batteriet och fordonet. Förstudien adresserar drivlinorna som för över kraften från elmotorn till drivhjul. Målet med förstudien är att klargöra behov, utmaningar, avgränsningar och innehåll till ett större projekt för att arbeta med frågeställningar och lösningar relaterat till elektrifierade drivlinor under tillverknings- och användningsfas.

Effektmålet med ett fullskaleprojekt är att möjliggöra kompakta, lätta, effektiva och tysta drivlinor med låga friktionsförluster för lång livs- och körslängd. Tidigare utveckling har gällt drivlinor för förbränningsmotorer. I samband med elektrifieringen uppstår nya utmaningar och därmed behov av ny forskning och även provningsmöjligheter. Mycket hänger ihop med att elektrifierade drivlinor arbetar med färre växlar och avsevärt högre varvtal än traditionella drivlinor; för en personbil kan så lite som en växel och upp mot 14 000 - 20 000 rpm bli aktuellt jämfört med traditionellt 2500 - 5000 rpm. För en lastbil går man från dagens ca 1000 rpm, 8-12 växlar, med förbränningsmotor till 3000-5000 rpm med 2-6 växlar vid elektrifiering. De höga varvtalen medför att transmissionen behöver hålla för avsevärt längre ”körsträckor”, lastcykler. Även lasterna blir avsevärt högre och komponenterna blir färre och kompaktare för att spara vikt. Detta ställer nya krav på både ingående material och tillverkningsmetoder; både avseende makro- och mikrogeometri för transmissionen.

I elektrifierade fordon finns det inte en förbränningsmotor som maskerar ljud från transmissionen. Utmaningarna gäller t ex ljudbild, friktionsförluster, toleranser i geometri, samt mekaniska egenskaper och ytstruktur/-geometri.

Inom ramen för Vinnova LIGHTer-projektet ”Transmissionskomponenter för Elektrifierade Drivlinor (TED)”, Dnr 2019-02630, designades och byggdes en provningsrigg för kuggväxlar i elektrifierade drivlinor (”TED-riggen”). Huvudsyftet var att utvärdera ljud vid höga varvtal (14000 rpm). Förutom ljud kan även friktions- och effektförluster samt slitage utvärderas för olika egenskaper och specifikationer på kugghjulen. TED-riggen medger en stor frihet i framtida experiment då mätningar, smörjning, kugghjulsdimension etc kan anpassas efter behov och önskemål. I provriggen kördes och utvärderades en provserie provhjul av olika stål, värmebehandling och makrogeometri avseende ljud och effektförlust. Det kunde konstateras en tydlig skillnad i beteende mellan

olika varianter av hjul; t ex olika hårdhet och makrogeometri. Pulvermetall (PM)-hjul tillverkades med olika varianter av urtag som möjliggör en viktsbesparing på ca 30-50% jämfört med ett solitt hjul. Fortsatt arbete och analys krävs. Detta har adresserats i förstudien och planeras även ingå i det planerade större projektet.

Utöver frågeställningar relaterat till riggen behandlar förstudien hur metodik för modellering och simulering ska adresseras i ett fullskaleprojekt. Simuleringar i datorprogram har två syften: 1. Att replikera experimenten 2. Att komplettera experimenten och förklara observerade fenomen Genom att modellera riggen matematiskt och implementera en numerisk lösare ska resultatet återspegla experiment i riggen. Validering kan exempelvis vara att jämföra den beräknade verkningsgraden med den som mäts i riggen. Modelleringen medför ett minskat behov av experimentella tester, vilket i sin tur minskar åtgång av tid, arbetskraft, material och energi.

Genomförande

Arbetet var upplagt i tre arbetspaket med följande beskrivning:

- Provningsrigg för elektrifierade drivlinor
 - Utvärdering av behov av ytterligare sensorer, mätningssmöjligheter och analys. Vilka krav som ställs på riggen beroende på kugg-geometrier som ska provas i fortsatt projekt. Anpassning av riggen för utvärdering av smörjningssmöjligheter. Hjul som finns framtagna i det avslutade TED-projektet kommer att användas för fortsatt utvärdering av riggen. Ytterligare riggar som kan vara aktuella kommer identifieras. Behov och aktiviteter som ska hanteras i fullskaleprojekt. Plan för sensorer, analys och vidareutveckling av riggen.
- Modellering och simulering
 - State of the art: Var forskningsläget (akademi, institut, industri) ligger idag. Vad som krävs för att ytterligare avancera kunskap och förståelse. Undersöka särskilda behov och tillgångar i Sverige och internationellt. Beräkningsmöjligheter/modellering riggen. SOTA och metodik för fullskaleprojekt
- Projektledning och fortsatt projekt
 - Identifiera och bjuda in konsortium; företag och akademiska parter Identifiera och klargöra frågeställningar

som ska adresseras i ett större projekt och angreppssätt för dessa. Exempel: mikro-, makrogeometri, smörjning, koncepthjul; dvs makrogeometri, digitala tvillingar, kostnadseffektivitet, miljöutvärdering, cirkularitet

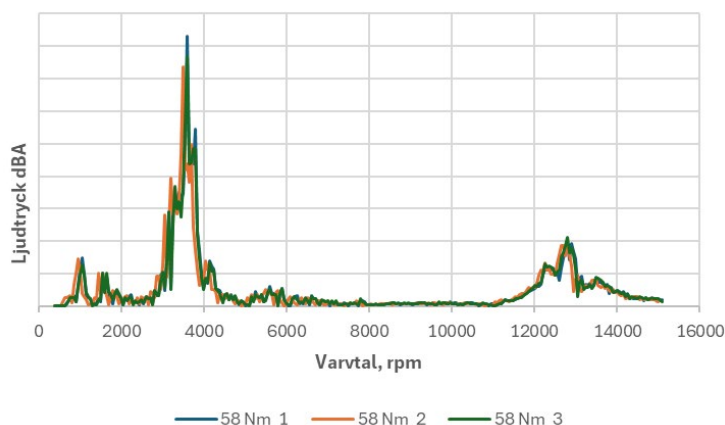
Resultat

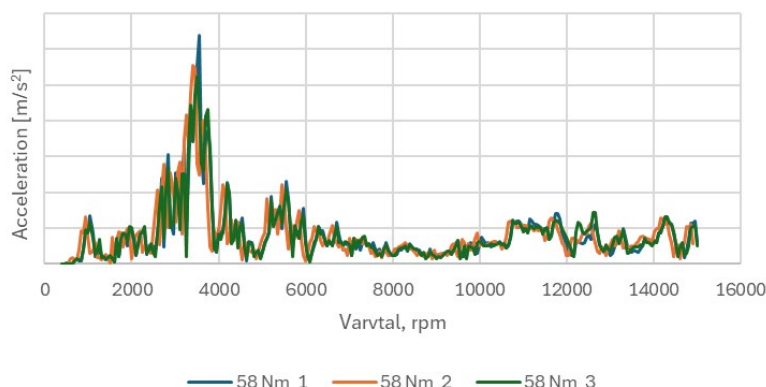
Provningsriggen, den sk TED-riggen, är framtagen för att möjliggöra experimentell utvärdering av problem relaterade till elektrifierade drivlinor. Riggen har två huvudsakliga syften:

- att utvärdera bulleremission, främst vid höga hastigheter. Ljudemissioner mäts direkt i närheten av testriggen med en mikrofon samt indirekt med accelerometrar placerade nära växellagringarna
- att utvärdera effektförlust och friktion.

Riggen är designad med avsikten att vara en neutral och generell demonstrator för en drivlina för applikationer relevanta för elektrifierade fordon, det vill säga inte specifik för något företag eller viss växelstorlek. Det är möjligt att variera axelavstånd för att kunna prova olika storlekar på hjul och även ha olika dimension på hjulen för att skapa en utväxling. I förstudien gjordes fortsatt utveckling och provning i riggen som nu fungerar väl för fortsatt provning. Vridmoment upp till 120 Nm och rotationshastigheter upp till 15 000 rpm har applicerats.

För att illustrera resultat från provningen presenteras i Figur 1 ett exempel där repeterbarheten har undersökts med tre körningar. Då ytterligare analys krävs presenteras här inte i detalj vilka hjul det handlar om eller värden på axlarna för att undvika att fel slutsatser dras.





Figur 1 Resultat mätt med övre) mikrofon och nedre) accelerometer Z-riktning, för tre repetitioner från 0 till 15000 rpm.

Simuleringar i datorprogram har två syften:

1. Att replikera experimenten
2. Att komplettera experimenten och förklara observerade fenomen.

Genom att modellera riggen matematiskt och implementera en numerisk lösare ska resultatet återspegla experiment i riggen. Validering kan exempelvis vara att jämföra den beräknade verkningsgraden med den som mäts i riggen. Modelleringen medför ett minskat behov av experimentella tester, vilket i sin tur minskar åtgång av tid, arbetskraft, material och energi. Simuleringar syftar även till att komplettera experiment som utförs i riggen och förklara fenomen som observerats. Detta sker framförallt genom kontaktanalys, där interaktionen mellan ytor och smörjmedel studeras. Riggen kan visa att ytfinhet påverkar verkningsgraden, men inte varför. En kontaktanalys kan även förklara fenomen som uppstår; tex genom att beräkningar visar att smörjfilmen kollapsar under vissa förhållanden.

Utöver frågeställningar relaterat till riggen behandlade förstudien hur metodik för modellering och simulering ska adresseras i ett fortsättningsprojekt. I en separat rapport sammanfattas resultaten av en undersökning av forskningsfronten (SOTA, State of the Art) för modellering och simulering av smorda kontakter, företrädesvis i kuggväxlar. Kontaktanalys medför val av ytor och smörjmedel. State of the Art inkluderar typiskt två uppsättningar ekvationer, en för den smorda delen av kontakten och en för den torra [Wang et al]. För tillräckligt små filmtjocklekar kan molekylodynamik användas [Stephan et al].

Diskussion

Målet med förstudien var att klargöra behov, utmaningar, avgränsningar och innehåll till ett större projekt för att arbeta med frågeställningar och lösningar relaterat till elektrifierade drivlinor under tillverknings- och användningsfas.

TED-riggen vidareutvecklades i förstudien och möjliggör nu analys av kuggväxlar vid varvtal upp till 15000 rpm. Vidare medger den stor frihet i framtida experiment då mätningar, smörjning, kugghjulsdimensioner etc kan anpassas efter behov och önskemål.

Från de tester som har gjorts är det tydligt att riggen fångar upp skillnader, ljud och verkningsgrad, som varierar över varvtalet. Ytterligare analys och en omfattande kontrollerad parameterstudie krävs för att kunna särskilja effekter, och ev samverkan, av geometri, ytor, hjuldesign, stål och värmebehandling.

Utöver frågeställningar relaterat till riggen behandlade förstudien hur metodik för modellering och simulering ska adresseras i ett fortsättningsprojekt.

Resultatet av förstudien är en ansökan för ett större fortsättningsprojekt som planeras sökas till FFI Nollutsläpp hösten 2025. Ett konsortium finns och ytterligare parter kan tas med.

Publikationslista

Intern rapport "Rapport TED2: SOTA", Rikard Hjelm, Lunds universitet
Intern rapport "Förstudie: Elektrifierade drivlinor – nya utmaningar och lösningar för industrin", Eva Troell och Hans Lindell, RISE, Rikard Hjelm, Lunds universitet

Referenser, källor

Wang, X., Huang, H., Song, J., Wang, Y., & Ruan, J. (2023). Numerical Analysis of Friction Reduction and ATSLB Capacity of Lubricated MTS with Textured Micro-Elements. *Lubricants*, 11(2), 78

Stephan, S., Schmitt, S., Hasse, H., & Urbassek, H. M. (2023). Molecular dynamics simulation of the Stribeck curve: Boundary lubrication, mixed lubrication, and hydrodynamic lubrication on the atomistic level. *Friction*, 11(12), 2342-2366

Bilagor

-