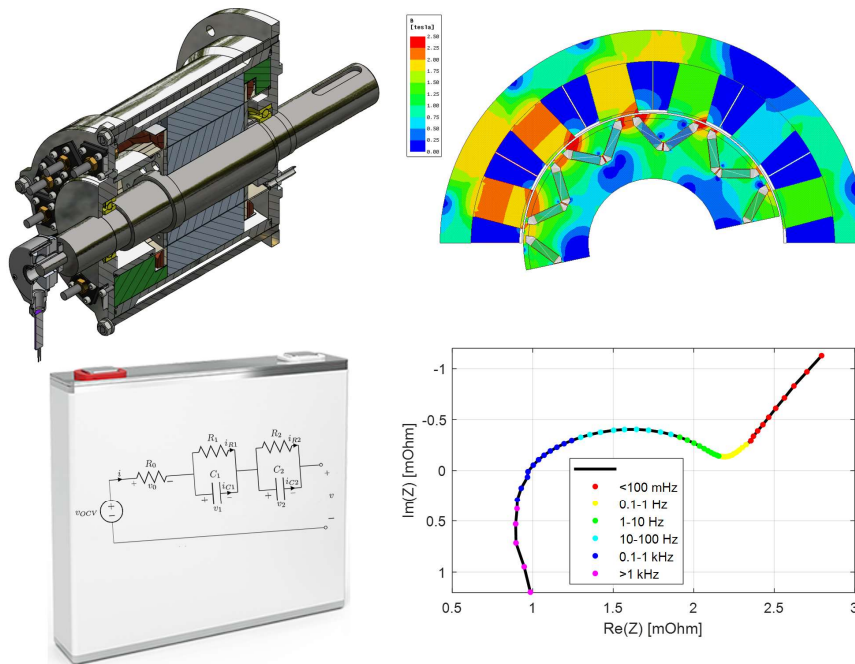


Utilize 48V system to gain CO₂, safety & improved UX

Publik rapport



Författare: Stefan Skoog
Datum: 2020-10-26
Projekt inom -

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	5
5 Mål	5
6 Resultat och måluppfyllelse	6
6.1 AP 1 Start och studier, systemnivå	7
6.2 AP 2 Design elmaskin	8
6.3 AP 3 Design kraftelektronik – i huvudsak integrerat	10
6.4 AP 4 Styralgoritmer och PWM för elmaskin och inverter	11
6.5 AP 5 Design energilager	11
6.6 AP 6 Fördjupade konceptstudier innehållandes olika system topologier.....	12
6.7 AP 7 Reglerstrategier för system	13
6.8 AP 8 Byggnation/inköp av elmaskin – praktisk verifiering	14
6.9 AP 9 Översyn av laster 12 V/48 V-Air conditioning.....	14
6.10 AP 10 Avslut, färdigställande av avhandling samt disputation	14
7 Spridning och publicering	15
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	15
7.2 Publikationer.....	15
8 Slutsatser och fortsatt forskning	16
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	17

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Inom detta projekt studeras ett 48 V mildhybridsystem, såväl på systemnivå som på komponentnivå rörande nyckelkomponenter såsom elmotor och batteri. Detta system har stor potential att bli avsevärd billigare än så kallade fullhybridsystem, med Toyota Prius som referens. Hittills har de höga kostnaderna för hybridsystemen medfört att endast en begränsad andel av fordon är hybridiserade. Med ett mildhybridkoncept erhålls en mycket snabbare marknadsintroduktion av miljöfrämjande teknik och därmed sänkt CO₂-belastning på miljön. Konceptet kommer sannolikt att implementeras på i princip alla premiumbilar med start i mitten på 2020-talet. 48 V är s.k. klenspänning, precis som ett 12 V system, vilket innebär avsevärd mindre konstruktions- och serviceutmaningar beträffande elsäkerhet jämfört med vanliga hybridbilar som använder 150-400 V. Flera delmoment har utförts inom projektet för att öka förståelsen av de viktigaste ingående komponenterna i mildhybridsystem. Avancerade litium-jon-batterisystem har analyserats djupgående i avseende att bygga modeller för att förutspå de elektriska och termiska egenskaperna när dessa används nära sin prestandagräns. Till dessa batterimodeller har lämpliga testmetoder studerats och provats på bred bas. Modellerna och testmetoderna har visat sig erbjuda bättre noggrannhet i modellbaserad simulering än vad referenser inom industrin och akademiska publikationer kan visa upp. Vidare inom projektet har en elmotor med ett nytt integrerat kylkoncept, en direkt-oljekylad tandlindad permanentmagnetiserad synkronmotor, utvecklats, byggts och testats. Resultaten från prestandavalideringen visar på att beräkningar och simuleringar i utvecklingsfasen överensstämmer mycket väl med den uppmätta prestandan. Det nya kylkonceptet möjliggör mycket högre strömmar i motorn utan att leda till överhettning.

Projektet har genererat nio fackgranskade publikationer, varav tre är tidskrifter. Åtta stycken studentarbeten på Master-nivå eller motsvarande har handletts inom projektet, samt ytterligare flera student-projektarbeten. Slutligen har en doktorand blivit finansierad, vilket utöver nämnda resultat, genererat en doktorsavhandling.

2 Executive summary in English

Mild hybrid electric powertrain components and systems are studied within this research project. Such systems are intended to be a cost competitive way of lowering average emissions in car fleets. For this scope, the electrical voltage is limited to 48 V, instead of 150-400 V for similar cars already on the market. The 48 V electrical system is not considered as an electrical hazard from a shock perspective, which alleviates the need of several redundant safety features present in the regular hybrid and electric vehicles. The functionality in terms of emission reductions and increased support for energy- and power-hungry auxiliary functions is still offered by a 48 V mild hybrid system. This project is deep diving into modeling and engineering design of the key components that enables 48 V mild hybridisation: high-power lithium-ion batteries, low-voltage high-current DC/AC inverters and low-voltage, high-power electrical machines.

For the batteries, extensive effort is put into empirical modeling of the electrical and thermal behavior during continuous and pulsed high-power charges and discharges during typical vehicle drive cycle usage. An electrical model is suggested, and test methods developed to parametrize this model, to be used in drive cycle simulations. The model is proven to offer very high voltage accuracy compared to what can be found in the literature and also compared to what is used in the industry. On the thermal behavior, it is found that power-optimized lithium-ion batteries can develop net negative heat, i.e. absorbing heat and lowering their internal temperature, during certain load conditions. This effect is known as the reversible entropy heat, and the appropriate model with parameters is explored and results published as project results.

High-performance electrical machines suitable for low-voltage, 48 V power are explored. Several different machine types are evaluated; synchronous reluctance machine, induction machine, and permanent magnet synchronous machine (PMSM). A PMSM is selected due to its compactness and high efficiency, and a special stator winding configuration called tooth-coil winding is explored deeply. Analytical formulas for electromagnetic performance applicable for all three-phase machines are established and presented in an easy-overviewing table format. The engineering design work process in collaboration with another PhD project

towards building a high-efficiency, high-current, electrically modular machine using a mix of analytical sizing and state-of-the-art Finite Element Analysis. This results in a tooth-coil wound PMSM with 12-slots and 10-poles, which is manufactured with the help of an external company. A test rig is designed and built at Chalmers to validate the machine performance and efficiency, which is done successfully at low to medium speeds due to limitations in available support equipment. The confirmed efficiency is as high as 95%, which is well aligned with the simulated values ahead of the design.

Power electronics to control and power this type of machine is also explored. Two prototype circuit boards are designed, constructed and verified, using high-performance, water-cooled Silicon MOSFETs. The second prototype is a three-leg converter and tested in continuous load for up to 9.0 kW output power at 48 V. High-frequency switching up to 100 kHz is successfully utilized, which in combination with the low voltage allows for the use of ceramic capacitors as local energy storage in the inverter. Effectively this makes the entire power electronic design very compact. This design can easily be scaled to a 24-leg converter where each leg only have to handle a fraction of the total current. A 12-, or 24-leg design of the inverter also allows for extensive overmodulation and carrier wave modulation, two advanced low-level control concepts which allows for further size reduction and performance increase for the system. These latter concepts are theoretically studied to be viable, and reported in a publication.

3 Bakgrund

Fordonsbrunnen står inför stora utmaningar med att kraftigt reducera CO₂-utsläpp till nivåer som ligger under de teoretiskt möjliga nivåerna om klassiska förbränningsmotorer skall användas med bränslen baserade på fossila kolväten. Att hela bilflottan på en generation skulle skifta till elbilar som laddas med miljövänligt producerad el är orimligt. Ett rimligt scenario för de kommande decennierna är att öka mängden elektrifiering i drivlinor för bilar som i övrigt är baserade på förbränningsmotorer, så kallad hybridisering. Detta har hittills lett till att hybridbilar i det närmsta har haft en dubbel uppsättning drivlinor, både förbränningsmotor och eldrift, vilket gjort komplexiteten och priset högt. Det visar sig att med den senaste tekniken för kraftelektronik (MOSFETs) och multifas-elmaskiner gör det möjligt att bygga så gott som full hybridkapacitet med ett spänningssystem på 48 V istället för det klassiska 150-400 V som etablerade hybridbilar använder. Detta tillsammans med att den senaste generationen av litium-jonbatterier kan leverera och absorbera de höga elektriska effektnivåerna som krävs i en väldigt kompakt volym. 48 V anses vara en säker spänning från ett elsäkerhetsperspektiv vilket håller nere komplexiteten och därmed merkostnaden på säkerhetssystem för att skydda slutanvändare och servicepersonal. Dock är 48 V-system förknippade med en del utmaningar, exempelvis hur värmeutveckling och strömfördelning skall hanteras i batteri, omriktare och elmaskin när strömmarna blir uppåt 1000 A. I fordonsapplikationer är storlek och komponentkostnad väldigt viktiga aspekter. För att ta reda på balansen mellan livslängd, maximal prestanda, storlek och kostnad på komponenter innehållande ny teknik så krävs det en hel del förarbete jämfört med att förlita sig på enbart välbeprövade komponenter.

Samarbetet mellan Chalmers Elteknik och Volvo Cars Power Supply möjliggör unika synergier där Chalmers bidrar med spetskunskaper inom beräkning, modellering och konstruktion av elsystem (batteri, kraftelektronik och elmaskin) och har tillgång till och erfarenhet inom avancerade simuleringsverktyg (Ansys Electronics/Maxwell) och tillgång till lab som behövs för provning av dessa komponenter. Volvo Cars har djup erfarenhet av randvillkoren för komponenternas utformning och användning i sin tilltänkta slutapplikation, samt ett brett nätverk av tekniskt kunnig personal både inom bolaget och hos underleverantörer.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Storleken och därmed också kostnaden på energilagret, där litium-jon-batterier är det mest tilltalande alternativet, är en viktig fråga att behandla för ett lyckat mildhybridsystem. Inom projektet är målsättningen att ta fram elektriska modeller för hur batteriet kommer bete sig under väldigt höga elektriska laster. Detta för att kunna förutspå värmeutveckling, temperatur och sätta rimliga prestandagränser som bevarar lång livslängd för det kostsamma batteriet. För detta behövs provutrustning, provmetoder och modellering av battericeller, samt lämpliga testobjekt av de allra senaste modellerna för fordonsapplikationer.

Elmaskinen, som står för omvandlingen mellan elektrisk och mekanisk energi, detaljstuderas i sin uppbyggnad. Hur kan en maskin byggas med välbeprövade material, men på ett sådant sätt att den blir enkel att producera, effektiv och kompakt samtidigt som den ska hantera väldigt höga strömmar? Det är lämpligt att para ihop en kompakt elmaskin med en kraftelektronisk omvandlare (*inverter*) tätt integrerat på eller till och med inuti maskinen. Målsättningen är att använda erfarenheter av metodik och kraftfulla verktygskedjor (Ansys Electronics/Maxwell) för att på djupet studera de elektro-magnetiska egenskaperna i maskinen och utefter dessa insikter konstruera ändamålsenlig kraftelektronik och även ha i åtanke dess styrning för att optimera prestandan. Målsättningen är att konstruera en elmaskin, låta den byggas och sedan testa den i labbmiljö på Chalmers.

5 Mål

Under projektet har fokus förflyttas mer till att belysa mätning och modellering av battericeller, samt konstruktion och driftsättning av en ny typ av elmaskin. Därmed har mindre tid spenderas på livscykelberäkningar, systemstyrning och funktionssäkerhet enligt ISO26262.

Delmål definierade i projektansökan är:

- Kvantifiera LCC (Life Cycle Cost) för några utvalda 48V systemlösningar
- Kvantifiera potentialen för olika elmaskinkoncept (billigare eller inga magneter, olika maskintyper) för några utvalda system topologier, samt deras möjlighet att utnyttja "distribuerade omriktarenheter"
- Ta fram en kompakt och energieffektiv systemlösning där hänsyn tagits till systemsäkerhetsaspekter (enligt ISO26262) 48 V, ca 10 kW drivsystempaket för mildhybridapplikation
- Fastställa potentialen att frångå klassiskt trefasomriktare till elmaskinen till att använda "distribuerade omriktarenheter"
- Påvisa funktionella elektriska egenskapsförbättringar genom utökning av elkraftsystemet till 48V (d.v.s. allokera funktioner på 48V systemspänning), t.ex.:
 - Förbättrade "handling" egenskaper (säkerhet vid t.ex. undanmanöver) tack vare ökad effekttillgänglighet
 - Stabil och pålitlig batteriövervakning för att säkerställa energireserv till motor start, d.v.s. förbättrad systemtillgänglighet
 - Säkerställa möjlighet för tillväxt av elförbrukare som ett led i att skapa förutsättningar för autonom körning
 - Förbättrad kupékomfort som ett led i ökad trafiksäkerhet vid t.ex. imma eller avisning.

Den vetenskapliga höjden definierade i projektansökan är:

- Att via ordentlig grundkännedom om de ingående komponenterna, elmaskin, kraftelektronik, energilagrar samt styrningen och designen av dessa, kunna föreslå en ideal

systemsammansättning med siktet inställt på såväl drivsystem samt fordonsverkningsgrad samt låg LCC-kostnad.

- Designförslag och beräkningsmetoder för att ta fram en elmaskin som ur såväl elektromagnetiskt som termiskt perspektiv passar i den givna applikationen, med dess belastningsmönster och bristande kylningsmöjligheter.
- Utnyttja möjligheten med Mosfet transistorer att dela upp kraftelektroniken i små moduler och därmed kunna kringgå klassiska trefas och pol tals koncept. En möjlighet här är att polomkopplingar kan göras tämligen enkelt för t.ex. en asynkronmaskin, vilket ger en liknande effekt som en mekanisk växel.
- Bryta upp de klassiska trefas och pol koncept i maskindesignen genom att styra strömmen över enstaka tänder med "distribuerade omriktarenheter"

I projektansökan definierades följande arbetspaket:

- AP 1 Start och studier, systemnivå
- AP 2 Design elmaskin
- AP 3 Design kraftelektronik – i huvudsak integrerat
- AP 4 Styralgoritmer och PWM för elmaskin och inverter
- AP 5 Design energilager
- AP 6 Fördjupade konceptstudier innehållandes olika system topologier
- AP 7 Reglerstrategier för system
- AP 8 Byggnation/inköp av elmaskin – praktisk verifiering
- AP 9 Översyn av laster 12 V/48 V-Air conditioning
- AP 10 Avslut, färdigställande av avhandling samt disputation

6 Resultat och måluppfyllelse

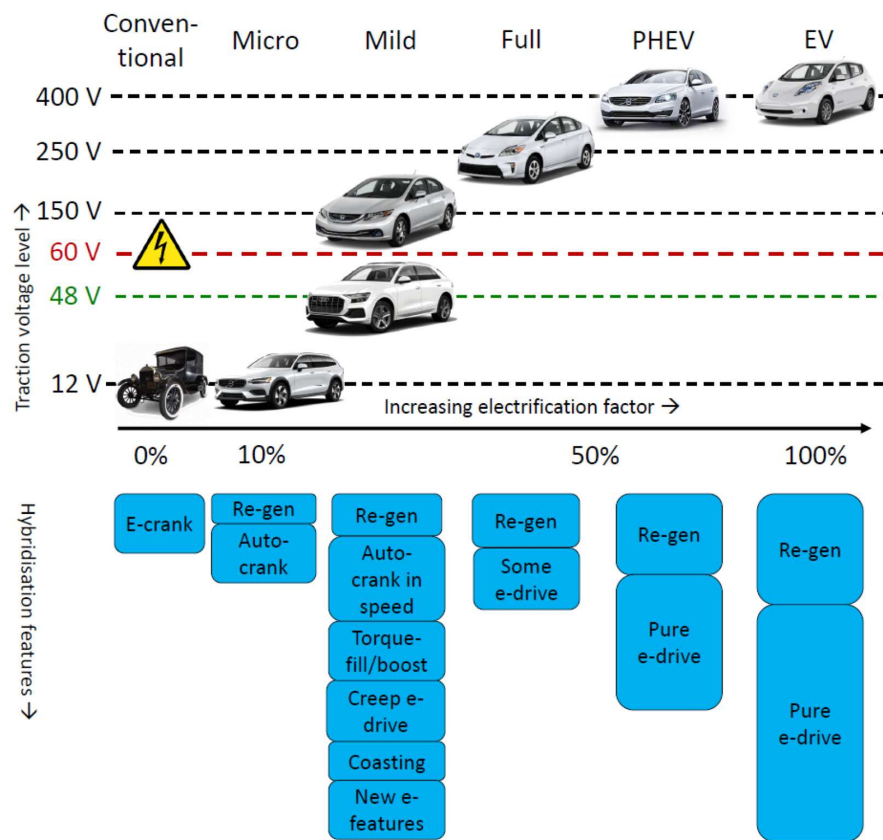
Här kommer först måluppfyllnad att sammanfattas, sedan rapporteras framstegen för respektive arbetspaket under varsin rubrik.

Delmål definierade i projektansökan		
1	Kvantifiera LCC (Life Cycle Cost) för några utvalda 48V systemlösningar	Delvis uppfyllt. LCC har ej utförts på systemnivå, men däremot på elmaskin-nivå i publikation 14.
2	Kvantifiera potentialen för olika elmaskinkoncept (billigare eller inga magneter, olika maskintyper) för några utvalda system topologier, samt deras möjlighet att utnyttja "distribuerade omriktarenheter"	Uppfyllt. Publikation no 14 jämför olika elmaskintyper under begränsningen av samma storlek. Publikation 7 presenterar och kvantifierar olika system-topologier och deras bränslebesparings-potential.
3	Ta fram en kompakt och energieffektiv systemlösning där hänsyn tagits till systemsäkerhetsaspekter (enligt ISO26262) 48 V, ca 10 kW drivsystempaket för mildhybridapplikation	Uppfyllt. Volvo Cars har satt sett sådant system (P0-topologi) i produktion, och sedan mitten av 2020 erbjuds alla premiumbilar med en sådan lösning.
4	Fastställa potentialen att frångå klassiskt trefasomriktare till elmaskinen till att använda "distribuerade omriktarenheter"	Uppfyllt. Arbetet som presenteras i AP2 och AP3 bygger på slutsatsen att det är rimligt att bygga både elmaskin och kraftelektronik för distribuerade omriktarenheter.

5	Påvisa funktionella elektriska egenskapsförbättringar genom utökning av elkraftssystemet till 48V (d.v.s. allokera funktioner på 48V systemspänning), t.ex.: - Förbättrade "handling" egenskaper (säkerhet vid t.ex. undanmanöver) tack vare ökad effekttillgänglighet - Stabil och pålitlig batteriövervakning för att säkerställa energireserv till motor start, d.v.s. förbättrad systemtillgänglighet - Säkerställa möjlighet för tillväxt av elförbrukare som ett led i att skapa förutsättningar för autonom körning - Förbättrad kupékomfort som ett led i ökad trafiksäkerhet vid t.ex. imma eller avisning.	Delvis uppfyllt. I publikation 17 presenteras funktionella och elektriska fördelar med att använda 48 V-system för hjälplaster såsom värmning, "handling" och framtida autonoma (ADAS)-funktioner
Den vetenskapliga höjden definierade i projektansökan		
6	Att via ordentlig grundkännedom om de ingående komponenterna, elmaskin, kraftelektronik, energilager samt styrningen och designen av dessa, kunna föreslå en ideal systemsammansättning med siktet inställt på såväl drivsystem samt fordonsverkningsgrad samt låg LCC-kostnad.	Uppfyllt. Detaljerade modeller för elmaskin och batterisystem är djupt utforskat inom projektet. Den bästa sammansättningen anses vara P2-topologi med endast en elmaskin och en omriktare. LCC har ej utförts på systemnivå, men däremot på elmaskin-nivå i publikation 14.
7	Designförslag och beräkningsmetoder för att ta fram en elmaskin som ur såväl elektromagnetiskt som termiskt perspektiv passar i den givna applikationen, med dess belastningsmönster och bristande kylningsmöjligheter.	Uppfyllt. Elmaskinen presenterad i AP2 är konstruerad från vitt papper med en kombination av nyframtagna analytiska metoder och avancerad finita-element-analys.
8	Utnyttja möjligheten med Mosfet transistorer att dela upp kraftelektroniken i små moduler och därmed kunna kringgå klassiska trefas och pol tals koncept. En möjlighet här är att polomkopplingar kan göras tämligen enkelt för t.ex. en asynkronmaskin, vilket ger en liknande effekt som en mekanisk växel.	Uppfyllt. En litteraturstudie har gjorts på polväxlande asynkronmaskin och konceptet är redan väl utforskat och håller på att industrialiseras. Omriktarna som presenteras i AP3 är konstruerade och förberedda för denna funktionalitet.
9	Bryta upp de klassiska trefas och pol koncept i maskindesignen genom att styra strömmen över enstaka tänder med "distribuerade omriktarenheter"	Uppfyllt. Elmaskinen presenterad i AP2 och omriktaren i AP3 är konstruerad och förberedd för denna funktionalitet

6.1 AP 1 Start och studier, systemnivå

Omfattande tid spenderades på Chalmers för att bygga upp en öppen simuleringsmiljö för hybrid- & elfordon i Matlab Simulink, och denna modell jämfördes med Volvo Cars interna proprietära svit för fordonsmodellering. Målsättningen med denna modell var att i detalj fånga förluster i alla nyckelkomponenter från batteri och förbränningsmotor till drivhjulen, för att kunna räkna fram verkningsgrad med hög noggrannhet för olika hybrid-topologier. Resultaten blev olika lastkollektiv för att dimensionera batteri och elmaskin, samt publikation no 7.



Nivåer av elektrifiering och dess associerade fordonsfunktioner

6.2 AP 2 Design elmaskin

Omfattande tid inom projektet har spenderats i detta arbetspaket. Dels för att generera djup förståelse i hur effektiva elmaskiner fungerar på den mest grundläggande elektromagnetiska nivån med hjälp av finita-element-programvara. Vidare har speciellt tandlindade synkronmaskiner studerats på djupet, vilket genererat publikation no 6. Konstruktion av ett tvillingpar av högpresterande maskiner gjordes i samarbete med ett annat Energimyndigheten-finansierat doktorandprojekt *Multifysiksimulering av kylsystemet och dess komponenter i ett el/hybrid-fordon*, där stora synergier hittades i utvecklingsmetodiken samt att det gick att samköra randvillkoren för slutprodukten till en rimlig nivå: 48 eller 600 V matningsspänning, samt 50 kW maxeffekt och storleksmässigt anpassad att driva en bakaxel (ERAD) på ett elektrifierat fordon. Själva konstruktionen och byggnationen av elmaskinen är mycket lyckad, samt omfattande arbete har lagts ner för att bygga och driftsätta en testrigg på Chalmers för att prova prestandan på elmaskinerna. De två motorerna är testade i tandem och jämförda med varandra. På grund av begränsningar i tillgänglig kraftelektronik för att driva maskinen och bromsriggar för att lasta maskinen så gjordes de flesta högeffekt-test på maskinen konstruerad för 600 V och endast vid relativt låga varvtal. Detta tillät att befintliga omriktarenheter och -bromsmaskiner kunde användas och ändå nå hög effekt. Resultaten kan sedan skalas för att representera 48 V-maskinen. Konstruktion, provning och prestanda har resulterat i flera rapporter; publikation no 3,4,5. Dessutom har ett exjobb tittat på för- & nackdelar med olika maskintyper för mildhybridapplikation, PMSM, SynRM, induktionsmaskin. Resultaten finns i publikation no 14. För prestanda och lättvikt vinner PMSM, men för kostnad och LCA-aspekter kan andra maskiner utan magneter vara mer relevanta. Ett annat studentarbete tittade på en fem-fasmaskin som ett intressant

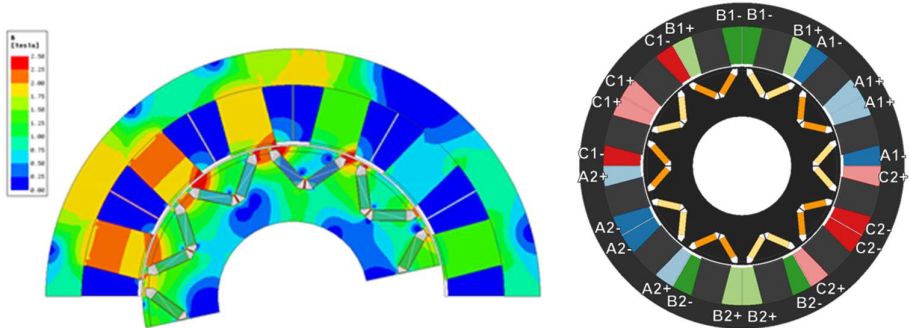
koncept (rapport no 18). Att använda fler än en multipel av tre faser i maskinen bedöms dock inte aktuellt inom ramen för detta projekt på grund av påtaglig ökad komplexitet i styrningen.

Quantity	Symbol	Value	Unit
Peak torque	T_{max}	140	Nm
Peak power	P_{max}	50	kW
Base speed	n_b	3 600	rpm
Max speed	n_{max}	11 000	rpm
Coolant max temperature	$\Theta_{max,c}$	60	$^{\circ}C$
Max winding temperature	Θ_{max}	180	$^{\circ}C$

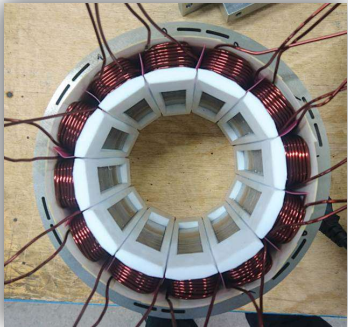
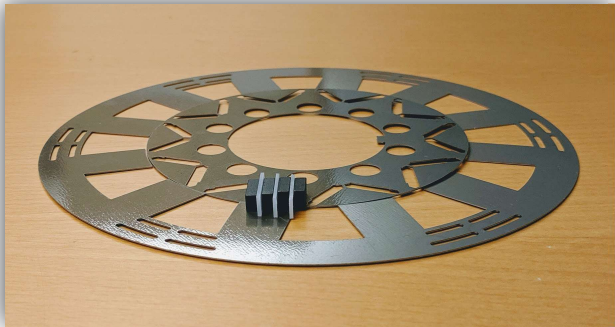
Quantity	Symbol	Value	Unit
Outer Stator diameter	D_e	180	mm
Inner Stator diameter	D	111.4	mm
Active length	L	100	mm
Tooth width	w_t	17	mm
Stator Yoke width	w_{sy}	13	mm
Magnet thickness	h_m	3.5	mm



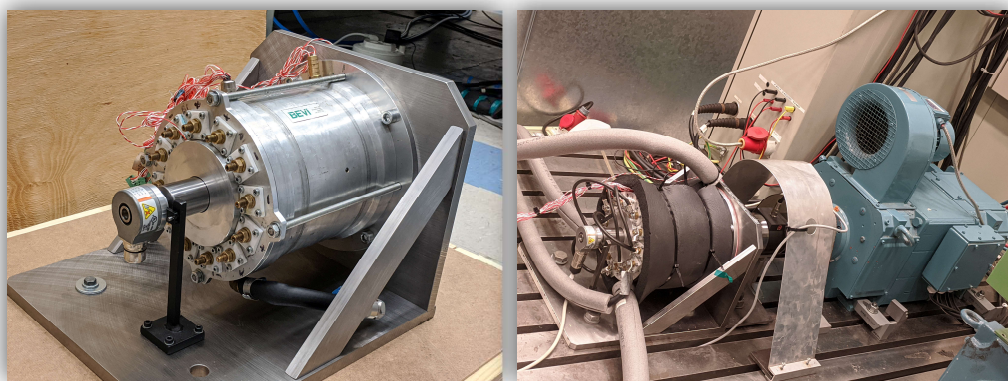
Dimensioner samt konstruktionsbild på den framtagna elmaskinen.



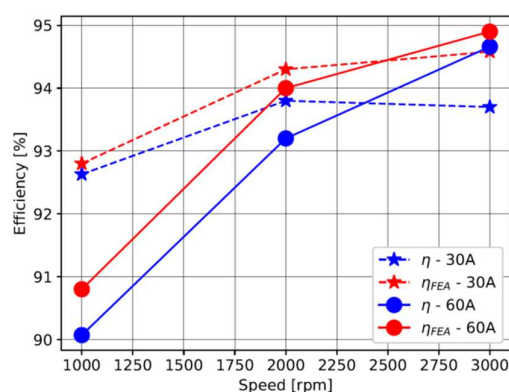
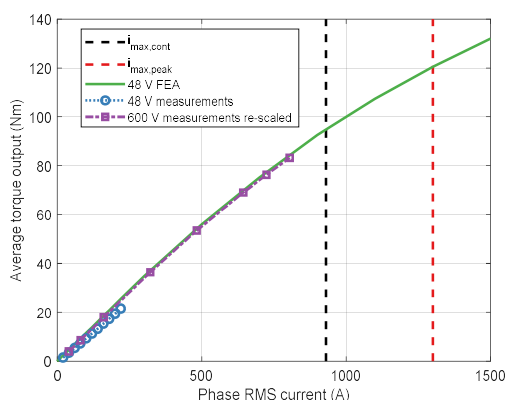
Elektromagnetisk simulering samt lindningslayout för elmaskinen.



Byggnation av elmaskin. Till vänster: Stator-, rotorplåtar och magneter.
Till höger: Stator med tandlindningar innan gjutning av kylkanaler.



Komplett maskin (till vänster) och installerad i testrigg (till höger).

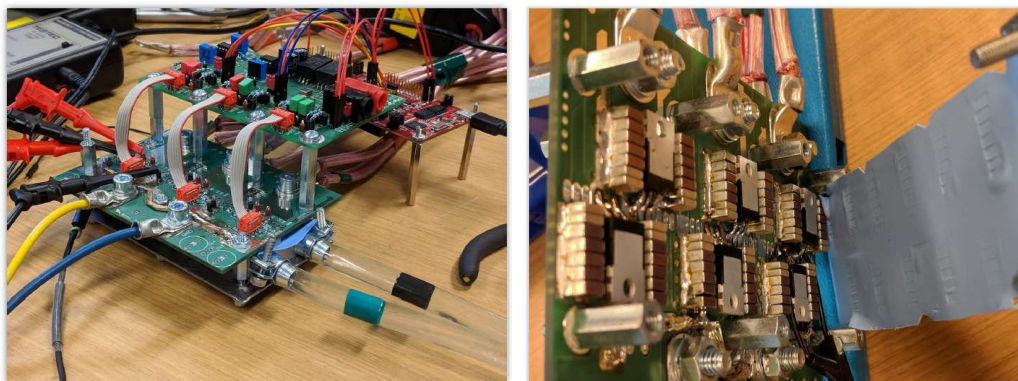


Testresultat av prestanda av maskin (vänster) samt hur väl verkningsgraden matchar beräkningarna (höger).

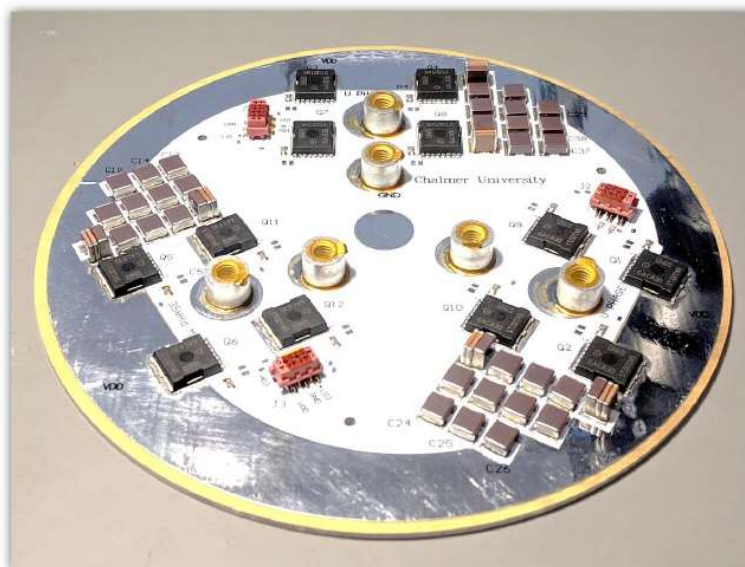
6.3 AP 3 Design kraftelektronik – i huvudsak integrerat

Utvecklingen av omriktare för 48 V och hög effekt har framförallt drivits i olika exjobb inom projektet. Flera olika prototyper av kretskort med styrning har byggts. Medan visas två av dessa. Samtliga har framgångsrikt driftsatts med hög effekt. Resultaten är lovande då switchfrekvenser på 100 kHz framgångsrikt har provats, samtidigt som utteffekter på 9.0 kW har uppnåtts under relativt kort utvecklingstid. Styrningen av krafthalvledarna, klenspända högeffekt-MOSFET, har också utvecklats inom projektet, både mjukvara och hårdvara. Speciellt styr-hårdvaran, *gate-drivarna*, visar sig vara väldigt viktiga för att lyckas med en effektiv och robust omvandlare. Användandet av hög switchfrekvens och låg spänning möjliggör användandet av keramiska kondensatorer som energibuffert i omriktaren. Dessa kan göras mycket mindre än för klassiska omriktare, och hela energibanken kan nu rymmas tillsammans med transistorerna. Om en högre multipel än tre omriktare används kan energibanken teoretiskt göras ännu mindre med hjälp av *vävning* av bärvågen för PWM, d.v.s. att alla omriktare jobbar synkroniserat men i anti-fas. Detta är teoretiskt utrett i projektet men ej rapporterat i någon publikation.

Målsättningen för AP3 var att kunna prova en tandomriktare, d.v.s. 12 individuella små omriktare för hög ström. Resultaten visade upp till tre faser vilka med en litet ytterligare utvecklingsinsats kan dupliceras till de önskade 12 kanalerna för att nå slutmålet. Kylningen av krafthalvledarna har vid alla försök med hög effekt varit vattenbaserad, vilket också visat lovande, robusta resultat. Resultaten har publicerats i rapport no 11-12.



Första prototypen för att testa vätskekylda, högpresterande MOSFETs tillsammans med energibanken utgjord av keramiska kondensatorer.



Kretskort för den andra versionen av tre-fasomriktare, byggt på aluminiumsubstrat för att möjliggöra effektiv vattenkylning. Diametern är anpassad för att passa direkt på baksidan av elmaskinen. Denna är testad för 9.0 kW kontinuerlig uteffekt i tre faser och 60 V.

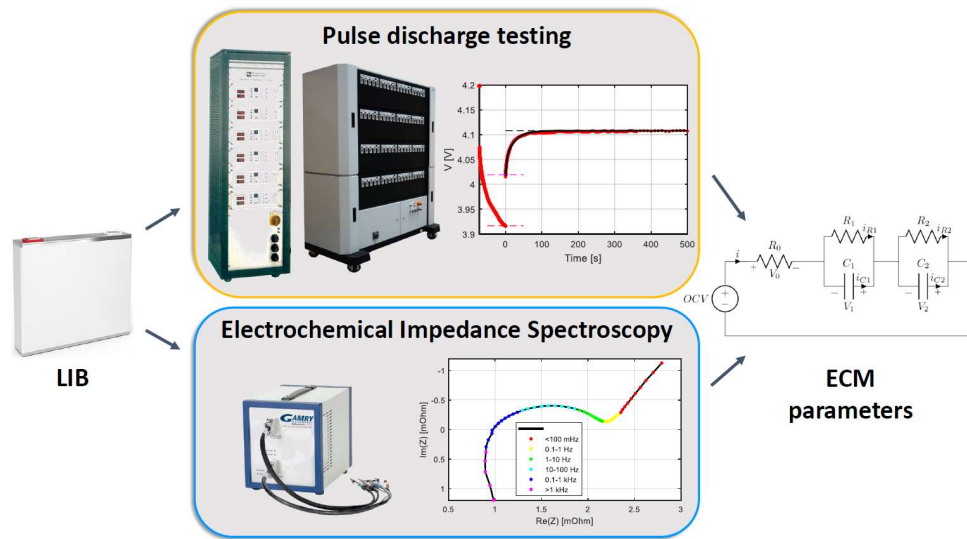
6.4 AP 4 Styralgoritmer och PWM för elmaskin och inverter

Detta paket är tätt kopplat till resultaten inom AP3, så en mängd av resultaten rapporteras i samma publikationer: no 11-12. Därutöver har det utvärderats teoretiskt med elektromagnetiska simuleringar hur *övermodulering* med PWM kan öka prestandan i den konstruerade maskinen i AP2. Även om prestandan i form av ökad uteffekt med bibehållen hårdvara ökar, är det också känt att förlusterna i motorn ökar i en snabbare takt. Ett Master-exemensarbete har även djupdykt i temat övermodulering för att undersöka hur mycket extra prestanda som kan vinnas med detta styrkoncept. Resultaten presenteras i publikation no 2 och 19.

6.5 AP 5 Design energilager

Resultaten inom design av energilager har överträffat de initiala målen. Det tidiga jobbet inom AP1 pekade snabbt ut att den största flaskhalsen för systemsimulering med hög precision var bristen på verifierade modeller för högpresterande batterier. Akademiska rapporter som rapporterade både modell och en verifierad noggrannhet av samma modell saknades så gott som helt. Därför togs egna testmetoder fram

som fungerade på den typen av högeffekt-optimerade li-ion-celler som förväntas användas inom mildhybrider; litium-järnfosfat, litium-titanoxid, litium-NMC. Testmetoderna tillämpades på många olika exemplar och modeller av celler för att utgöra en stadig bas för modellering. Bland testmetodikerna användes högströms-urladdningspulstestning samt elektrisk impedans-spektroskopi. Resultaten visar på att högströms-urladdningspulstestning är mest pålitligt eftersom den elektriska modellen är förenklad och förväntas återspegla batterierna beteende just när de laddas ur och i med höga strömmar. Därför ska testmetoden med fördel vara så lik användarfallet som möjligt. Den elektriska modellen som extraheras av pulstesterna används sedan i en simulering av en körcykel. Resultaten för noggrannhet (RMSE i avvikande spänning) överträffar de flesta referensarbeten som hittats inom litteraturen. Samma testförfarande har provats att tillämpa på ultra-kondensatorer, men här återfanns en begränsning i den valda elektriska modellen då den inte klarar av att hantera de relativt stora och olinjära läckströmmar som uppstår i kondensatorer. Vidare har temperaturens inverkan på li-ion-cellernas prestanda studerats noggrant. Sammanfattat så begränsas batteriets prestanda kraftigt av låga temperaturer, men exakt hur stor begränsningen är beror mycket på hur batteriet är uppbyggt, t.ex. vilken kemi den är byggt enligt. Den förlustvärme som batteriet producerar när den används visar sig vara dubbelriktad, d.v.s. i vissa arbetspunkter *absorberar* batteriet värme när det används. Detta fenomen benämns entropi-värme och har inte förut rapporterats mycket om på makro-skala, d.v.s. för massproducerade li-ion-celler med hög prestanda. Att ta detta fenomen i beaktning visar sig viktigt för att kunna maximera prestandan på batterierna när det kommer till deras styr- och övervakningsalgoritmer (BMS). Resultaten från AP5 återfinns i publikation 8,9,10,13,15,16,20.

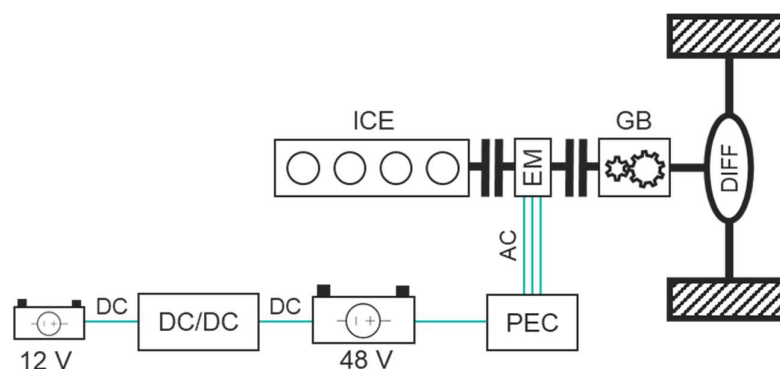


Översikt av testmetoder och resulterande elektriska modell för li-ion-celler.

6.6 AP 6 Fördjupade konceptstudier innehållandes olika system topologier

Detta paket är när anknutet till AP1 Systemsimuleringar. Resultaten från simuleringarna visar att det mest kostnadseffektiva sättet att bygga en mildhybrid, utan att uppoffra speciellt mycket prestanda eller funktionalitet, är med en så kallad P2-layout som visad nedan. Med denna kan fordonet, utrustat med endast en extra elmaskin, köras på ren eldrift, i hybrid-läge och som konventionell förbränningsmotordrift. Medellasten på denna elmaskin och associerad drivelektronik blir ganska hög, vilket det är en bra lärdom att ta med sig in i AP2 och AP3 där dessa komponenter konstrueras.

Även i publikation no 7 har fördjupande studier gjorts, där tre olika hybridkoncept jämförts, varav två experimentellt uppmätta i en prototypbil körd på allmän väg.



Systemöverblick över en typisk drivlina för mildhybrider, så kallad P2-layout

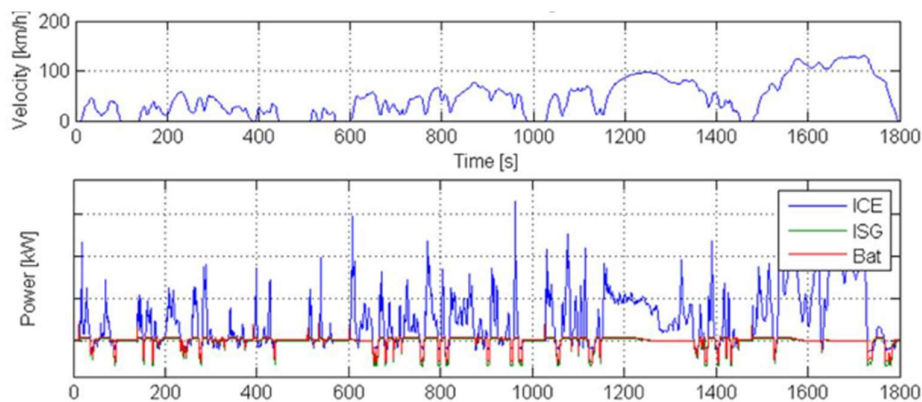
6.7 AP 7 Reglerstrategier för system

Volvo Cars har under projektets gång fortlöpande jobbat med att utvecklat simuleringsmiljöer för systemet och ingående komponenter i 48 V-systemet dvs. 48 V elmaskin, Li-ion batteri 48 V och DC/DC 48 V/12 V. Simuleringar av bränslebesparing över körcyklarna NEDC och WLTC för 48 V system är utförda och reglerstrategier är förfinade för att bättra på bränslebesparingar och användbarhet. Simuleringsmiljön är utvecklad i Matlab/Simulink och är kopplad till existerande modeller för förbränningsmotor, transmission, m.m. som ingår i helbilsmodellen.

Fokus under utvecklingen av reglerstrategierna har varit att nå maximal reduktion av bränsleförbrukning för bilföraren. Reglerstrategin bygger på att vid retardation av fordonet återvinna så mycket av rörelseenergin som möjligt och ladda upp 48 V-batteriet. När sedan förbränningsmotorn förbrukar mycket bränsle används energin som byggts upp i 48 V-batteriet under retardationerna, för att hjälpa till med framdrivningen av fordonet via 48 V elmaskinen. Strategin liknar i mångt och mycket de strategier som används i rena fullhybrider. En mängd olika strategier har utvärderats över åren för att hitta en optimal strategi för bränslebesparing men som även ger en bra körbarhetsupplevelse för bil föraren.

Den simulerade bränslebesparingen i WLTP ligger på 5-8% för en bil med 48 V-system jämfört med en traditionell bil med 12 V-system och StopStart-teknik (mikrohybrid). Storleken på besparing är beroende på många faktorer som tex. bränsle (bensin/diesel), transmission, etc.

Nedan kan ett typexempel ses från simuleringarna för effekterna in och ut ur batteriet över certifieringscykeln WLTC.



6.8 AP 8 Byggnation/inköp av elmaskin – praktisk verifiering

Den praktiska verifieringen av den egenkonstruerade elmaskinen särskiljer detta projektet från många liknande. Detta förfarande kräver mycket resurser både ekonomiskt och i kalendertid, något som den initiala projektansökan tillät. En extern part har anlåtats för att mekaniskt tillverka elmaskinen, vars elektromagnetiska konstruktion tagits fram inom projektet. Även testtriggen för att möjliggöra verifikationen av maskinen har till stor del tagits fram inom projektet. Bilderna illustrerade inom AP2 visar på byggnationsprocessen. Ytterligare fördjupande information om byggnationen finns i publikation no 3.

6.9 AP 9 Översyn av laster 12 V/48 V-Air conditioning

Inte bara elmaskin och dess omriktare utgör de elektriska lasterna i ett mildhybridsystem. Stöd- & bekvämlighetsfunktioner såsom luftkonditionering, förarassistans och media- och kommunikationssystem behöver också tillgång till mycket elektrisk energi. Ett sätt att motivera den ökade merkostnaden för 48 V mildhybridsystem är att allokera en del av dess kostnad till att vara en möjliggörare för dessa stödfunktioner. Det klassiska energinätet i bilar baseras på 12 V. I en mildhybrid kommer 12 V samexistera med 48 V under en överskådlig framtid. Vilka av de klassiska elektriska lasterna skall då flyttas över till 48 V, då det medför en extra utvecklingskostnad? Det korta svaret är de komponenter som använder mest energi, såsom luftkonditionering. Även framtida förarassistans-system eller elektronik för autonom körning bör lämpligtvis köras på 48 V spänningsmatning. En utförlig studie presenteras i rapport no 17.

6.10 AP 10 Avslut, färdigställande av avhandling samt disputation

Presentation, rapportering och kommunikering är en kontinuerlig del av projektet, vilket återspeglas i det antal fackgranskade publikationer listade under 7.2, samt många presentationer och posters på industrikonferenser och workshops som ej är listade här. En av de större leveranserna är en doktorsavhandling publikation no 1.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	En bred kunskapsspridning inom Chalmers, VCC, och via seminarier, workshops, konferenser med flertalet industrideltagare har spridit möjligheterna och utmaningarna med 48 V mildhybridsystem. De djupa insikterna har spritts via fackgranskade forskningsrapporter.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Elmaskinerna som är konstruerade, byggda och validerade inom projektet har nått en relativt hög mognadsgrad för att i delar eller helhet kunna föras vidare in i industrialiseringsprojekt.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Batterimodeller genererade inom projektet har hjälpt dimensioneringsarbetet inom VCC för industrialisering av mildhybrider.
Introduceras på marknaden	x	Batterimodeller genererade inom projektet har hjälpt dimensioneringsarbetet inom VCC för industrialisering av mildhybrider.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut	x	Frågorna om tolkning och tillämpning av elsäkerhetsföreskrifter runt 48 V-system har ständigt varit aktuella för diskussion inom projektet.

I delar av projektet som handlar om elmaskinutveckling har framgångsrikt utförts i samarbete med de Energimyndigheten-finansierade doktorandprojekt *Multifysiksimulering av kylsystemet och dess komponenter i ett el/hybrid-fordon*. Publikation 3,4,5,6 är författade inom detta samarbete. Utöver listan av publikationer nedan har projektet representerats på flera workshops och seminarier lokalt och internationellt. T.ex. Kraftforum, Chalmers Elkraftdagen, SEC-seminarier, Energimyndigheten-seminarier, FFI-workshops, VCC Powertrain Week, VCC VIPP-konferens.

7.2 Publikationer

Följande avhandlingar har publicerats inom projektet:

1. Stefan Skoog, "Component and system design of a mild hybrid 48 V powertrain for a light vehicle", *PhD Thesis*, Chalmers University of Technology 2020

Följande akademiska fackgranskade artiklar har publicerats inom projektet:

2. Stefan Skoog, "Overmodulation opportunity in 48 V three-phase PMSM with open-ended windings." *Accepted*, In *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, 2020.
3. Acquaviva, Alessandro, Stefan Skoog, and Torbjörn Thiringer. "Manufacturing of in-slot cooled tooth coil winding PM machines." *Accepted*, In *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, 2020.
4. Acquaviva, Alessandro, Stefan Skoog, Emma Grunditz, and Torbjörn Thiringer. "Electromagnetic and Calorimetric Validation of a Direct Oil Cooled Tooth Coil Winding PM Machine for Traction Application." *Energies* 13, no. 13 (2020): 3339.

5. Acquaviva, Alessandro, Stefan Skoog, and Torbjörn Thiringer. "Design and Verification of In-slot Oil-Cooled Tooth Coil Winding PM Machine for Traction Application." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (2020).
6. Skoog, Stefan, and Alessandro Acquaviva. "Pole-slot selection considerations for double layer three-phase tooth-coil wound electrical machines." In *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 934-940. IEEE, 2018.
7. Skoog, Stefan. "Experimental and model based evaluation of mild hybrid fuel consumption gains and electric machine utilization for personal vehicle application." In *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, pp. 1-6. IEEE, 2017.
8. Skoog, Stefan, and Sandeep David. "Parameterization of linear equivalent circuit models over wide temperature and SOC spans for automotive lithium-ion cells using electrochemical impedance spectroscopy." *Journal of Energy Storage* 14 (2017): 39-48.
9. Skoog, Stefan. "Electro-thermal modeling of high-performance lithium-ion energy storage systems including reversible entropy heat." In *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2369-2373. IEEE, 2017.
10. Skoog, Stefan. "Parameterization of equivalent circuit models for high power lithium-ion batteries in HEV applications." In *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, pp. 1-10. IEEE, 2016.

Följande exjobb och studentarbeten har genererats med handledning inom projektet:

11. Poovattil Tomy, Biju Jude, and Akshay Santosh. "Design and characterization of a 48V inverter for mild hybrid vehicle application." (2019).
12. Tisell, Carl, and Usman Tariq. "Design, construction and evaluation of a distributed 48 V inverter for a mild hybrid vehicle." Master's thesis, 2018.
13. Anandaguru, Mohanapriya, and Andreas Eriksson. "Model based development of mild hybrid electrical battery systems." Master's thesis, 2018.
14. Larqvist, Sebastian, and Östergren, Hannes. *Electric Machine Comparison for Mild Hybrid Light Vehicles with Respect to Performance and Thermal Capability*. Tech. Rep.[Online]. Available: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/252782/252782.pdf>, 2017.
15. Biswas, Akik, and Xuming Yao. "Mild Hybrid Electro-Thermal Battery Modelling." Master's thesis, 2016.
16. David, Sandeep Nital. "Pulse power characterisation for lithium ion cells in automotive applications-Small and large signal cell impedance analysis." Master's thesis, 2016.
17. Brusokas, Linas, and Naveen Raja Rajarathinam. "Evaluation of Electrical Loads on 48 V Supply in Future Mild Hybrid Electric Vehicles." Master's thesis, 2015.
18. Hjert, Andreas and Mikiver Anders, "Modellering och identifiering av en bilgenerator". Bachelor's Thesis 2015.
19. Halder, Shayan, and Xingyun Yang. "Extracting the maximum torque from a PMSM for a vehicular application by using different modulation techniques in the overmodulation region." Master's thesis, 2019.
20. Bidari, Saurabh. "Anisotropic temperature distribution within li-ion cells in EV batteries." Master's thesis, 2020.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Följande lärdomar och slutsatser har dragits inom projektet:

- Detaljerade prestanda modeller för li-ion-batterier är nödvändiga för att kunna förutspå maximal prestanda, verkningsgrad och bränsleförbrukning med hjälp av en fordonsmodell

- Dessa elektriska modeller är lätta att definiera, men svåra att parametersätta eftersom parameterna ändras över framförallt temperatur och laddnivå
- Exempel på högpresterande li-ion-cellers beteende över laddnivå och stort temperaturspann är i detalj uppmätt och presenterat (publikation no 8,10)
- Li-ion-batterier uppvisar entropi-värme, vilket för hög-effektoptimerade celler förskjuter deras interna värmeutveckling så pass mycket att de ibland netto absorberar värme under elektrisk belastning (publikation no 9)
- Den mest optimala hybrid-topologin för mildhybrider med balans mellan komplexitet och bränslebesparing verkar vara en P2-layout, som kan spara 21-35% bränsle beroende på körstil enligt simuleringar baserade på verklig körning (publikation no 7)
- Ett tvillingpar av elmaskiner förberedda för 48 V och distribuerad kraftelektronik har framgångsrikt konstruerats och byggts och testats inom projektet (publikation no 3,4,5)
- De elektro-magnetiska egenskaperna för tre-fas tandlindade "modulära" elmaskiner är grundligt utvärderade och sammanställd i ett överskådligt diagram (publikation no 6)
- De elektro-magnetiska modellerna och beräkningarna som används för att ta fram elmaskinen inom projektet överensstämmer väldigt bra med uppmätta värden (publikation no 4-5)
- Övermodulation kan användas för att öka prestandan i tandlindade maskiner som drivs av flertalet omriktare (publikation no 2)

Följande lista är förslag på områden som är intressanta att fortsätta forska inom:

- Räkna fram prestanda för möjliga lindningskonfiguration för tandlindade synkronmaskiner med annat fas-antal än en tre-multipel.
- Fortsätt utvecklingen av modulära omriktare med högpresterande MOSFET med vätskekylning och använd bärvågsvävning vid höga frekvenser för att minska behovet av lokal energilagring.
- Utvärdera den utvecklade tandlindande maskinens prestanda vid höga varvtal
- Studera närmare, teoretiskt och tillämpat/FEM, hur övertons-läckinduktans påverkar elmaskinens prestanda och hur detta kan lyftas fram på ett bättre sätt som en dimensioneringsfaktor
- Generalisera testmetodik för li-ion-celler till att vara överförbar på ultra-kondensatorer

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Deltagare		Roll	Personal
	Volvo Cars	Teknisk handledare	Torbjörn Larsson
		Koordinator	Ulrika Helldén
		Koordinator	Daniel Midholm
	Chalmers	Doktorand	Stefan Skoog
		Akademisk handledare	Torbjörn Thiringer
		Biträdande akademisk handledare	Stefan Lundberg