



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

NGHVT – Nästa generations högvolts-topologi

Offentlig version.

Delprogram: FFI - Elektronik, mjukvara och kommunikation.

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund	3
3. Syfte.....	4
4. Genomförande.....	4
5. Arbetspaket 1 – Omvärldsbevakning.....	4
6. Arbetspaket 2 – Systemanalys.	6
7. Arbetspaket 3 – Elektriska maskiner.....	10
8. Arbetspaket 4 – Krafterlektronik.	13
9. Arbetspaket 5 – Systemutvärderingsmetodik.	16
10. Spridning och publicering.....	17
11. Referenser	17
12. Slutsatser och fortsatt forskning.....	19
13. Deltagande parter och kontaktpersoner	19

1. Sammanfattning

I detta projekt, NGHVT, har komponenter och system för den elektriska drivlinan studerats, med fokus på de kraftelektroniska omriktarna, elmaskinerna och det högspända (400 V) likspänningssystemet som härrör från batteriet. Modellbygge av dessa komponenter samt systemmodellering har varit viktiga aktiviteter med verifikationer mot befintliga förlagor. Metodikutveckling har genomförts, t.ex. för bestämning av representativa beskrivningsparameterar (kretsekvivalenta parametrar) av elektriska maskiner, där maskinberäkningsmjukvaran styrdes via överordnad mjukvara för att få ett mångsidigt och effektivt verktyg. Kontakten med utvecklingsfronten har säkerställts genom ett stort antal leverantörsbesök samt deltagande på viktiga industriella och akademiska konferenser. Vidare har även kurser arrangerats med beräkningsmjukvaruleverantören där Volvo kunnat driva på denna rörande multifysiksimuleringar kopplade till annan programvara för beräkningar av värmeavgivning till kylvätskor samt ljudberäkningar. Resultaten var att dessa samsimuleringar inte rullade med tillräcklig kvalitet och att detta tydligt kunde läggas på mjukvaruleverantörens utvecklingslista. Plattformsanpassning, tankar runt kommersialisering har varit betydelsefulla aspekter förutom de rent tekniska egenskaperna såsom verkningsgrad, funktionalitet, effekttäthet och naturligtvis kostnad. Baserad på nya tekniker rörande halvledarmaterial, kraftelektroniktopologier och maskintopologier har nya lösningar kunnat undersökas och deras potential fastställas.

Sammantaget har projektet resulterat i en förbättrad kompetens rörande såväl högspänningssystemet samt till denna ansluta omriktare och vidare elmaskiner. Förutom de direkta resultaten har projektet bidragit till en stärkt position i relation till leverantörerna. Med resultat från nya lösningar i ryggen har leverantörerna kunnat påverkas att minst anamma de tekniska möjligheter som påvisats med hjälp av NGHVT-projektet

2. Bakgrund

Volvo Car Group (VCG) har som en viktig vision att kunna erbjuda sin målgrupp att köpa och köra premiumbilar med bästa möjliga "miljösamvete". Med premiumbilar avses bilar med hög nivå av komfort och körglädje. Med "gott miljösamvete" menas framför en reducerad nivå av CO₂-emissioner i synnerhet och en minimerad miljöbelastning i allmänhet.

Ett viktigt steg på vägen dit är att finna kommersiella och industrialiserade systemlösningar för de nya system som krävs för att elektrifiera bilen. Med detta menas produkter som uppfyller krav för massproduktion, krav på låga kostnader och som uppfyller de speciella miljötålighetskrav som finns på fordonskomponenter. Med elektrifiering menas införandet av komponenter och system (t.ex. elmotorer och olika typer av kraftelektronik för drivning, generering och nätladdning), vilka drivs av en i sammanhanget högspänd strömkälla (t.ex. 400 VDC).

För att i sin tur effektivt att handla upp dessa system och att kunna delta aktivt med leverantörerna som utvecklingspartner behöver VCG förstärka kompetensbasen både inom

och utom sin organisation. Detta sker för närvarande genom utförandet av tre projekt som delfinansieras av Vinnova. Ett av dessa projekt är "Next Generation High Voltage Topology-NGHVT" som inriktar sig på effektivisering av kraftelektronik och elmaskiner i personbilar.

3. Syfte

Syftet med projektet är att skapa bra förutsättningar för ett generationsskifte av de komponenter som ingår i ett hybridfordons elektriska drivlina. Hit hör modellbygge av komponenter såsom elmaskiner och kraftelektronik i första hand, men även batterier ur elsystemperspektivet, samt verifikation av dessa designer gentemot tillgängliga förlagor.

Förutom de rent tekniska egenskaperna såsom verkningsgrad, funktionalitet och prestanda finns även övergripande egenskaper hos komponenterna såsom kommersialisering och plattformsanpassning med i bilden.

4. Genomförande

Huvudaktiviteter i projektet är:

- Omvärldsbevakning.
- Funktionalitet och design av det högspända likströmssystemet.
- Undersökning av elmaskiners prestanda, jämförelse mot leverantörsdata, koppling till termiska beräkningar samt koppling till ljudalstring.
- Undersökning av alternativa designer för ombordladdare och dc/dc-omriktare.

5. Arbetspaket 1 – Omvärldsbevakning.

Ett antal konferenser besöktes, såväl forsknings- som mera industrinära konferenser. Tabell 1 visar en sammanställning av aktiviteterna.

Tabell 1: Exempel på omvärldsbevakningsaktiviteter

Konferens / Aktivitet	Datum & Plats	Kommentarer
Leverantörsbesök & Mässor.	2011-2012 Göteborg, Tyskland.	
SiCPEAW.	2013, 10-12 juni, Stockholm.	Tekniken med kiselkarbid blir allt mer mogen, livslängsfrågan på "styringångarna" tycks vara

		på väg att lösas, modulkapslingen problematisk att lösa.
Advanced E-Motor Technology.	2013, 18 – 20 februari, Nürnberg, Tyskland.	Nu finns prototypomriktare med kiselkarbid tillgängliga och en sådan visades upp på mässan. Integrerade designer, dvs elmaskiner och omriktare ihop, är på ingång.
Svenskt Hybridcentrums årliga konferens.	2013, Göteborg.	Resultat från VCC´s projektaktiviteter presenterades i föredraget "Utmaningar för högtemperatur SiC i Fordon".
EPE '14 ECCE, The 16th European Conference on Power Electronics and Applications.	2014, 26 -28 augusti, Lappeenranta, Finland.	Kretskortsintegration blir allt vanligare. Multinivåomriktare med kaskaderade H-bryggor når ökad popularitet i applikationer för kraftsystem.
ICEM XXI, International Conference on Electrical Machines.	2014, 2 – 5 september, Berlin, Tyskland.	Dubbelrotormaskiner är populära i forskningsvärlden. Delspårs lindade maskiner, där kombinationen 10 poler/12 spår är vanligt förekommande. Switchade reluktansmaskiner uppmärksammas allt mer. Termisk modellering, verkningsgradsanalys och feltoleranta system är som vanligt populärt.
Leverantörsbesök: Microsemi, Rohm, Cree, Infineon.	2014, 2015 Göteborg.	Packningen som vanligt ett problem, svårt att få till moduler med de strömmar som fordonsindustrin vill ha. Chipprestandan ofta hemlig.
SiCPEAW	2015, 26-28 juni, Stockholm.	Ca 5 år kvar till kommersialisering tror man nu, Materialdefekter i kiset inte längre något problem. Parallellkoppling av chip svårt, chipstorlekar av 1 cm ² funkar nu. Fortfarande är problemet att få till bra hela moduler och inte bara bra chip. Livslängsfrågan kvarstår naturligtvis
EPE '15 ECCE, The 17th European Conference on Power Electronics and Applications,	September 2015, Genève.	Nu finns även prototypomriktare med GaN ute, en 1.6 kW dc/dc. Kiselkarbidmodul på 1200V, 800A som har tillräcklig effektförmåga för bilindustrin visades av Mitsubishi.

Vidare utfördes även inom detta paket detaljerade studier av hur andra (icke-Volvoproducerade) fordon har byggt upp sina elsystem och hur deras NVH-miljö (Noise and Vibration Harshness) var.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att NGHVT-arbetet har taktat bra med omgivningens framsteg och att projektet snabbt kunnat tillgodogöra sig de senaste aktuella forsknings- och industrialiseringsframstegen.

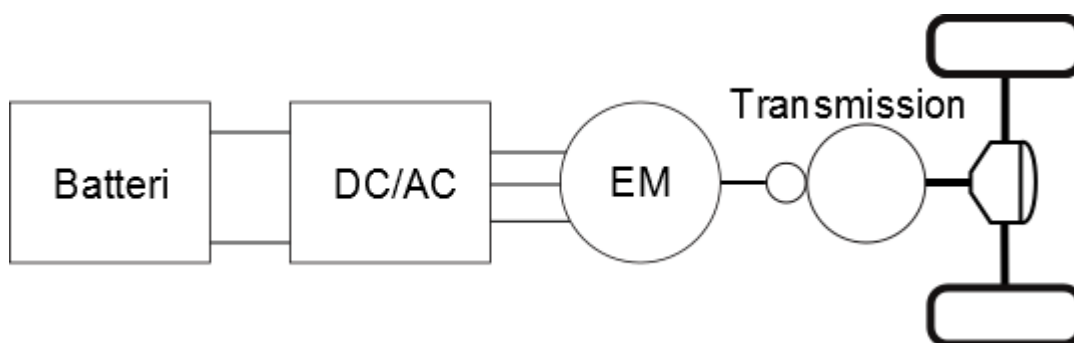
6. Arbetspaket 2 – Systemanalys.

Detta arbetspaket behandlade hur olika komponenter påverkar och påverkas av spänningen på DC-ledet. Sålunda var själva elkvalitén på dc-ledet generellt i fokus. De aktiviteter som utfördes var:

- studier av hur de olika komponenterna som var anslutna till dc-ledet påverkade spänningen genom sin ströminjicering/strömkonsumtion. Här ingick således även modellbygge av komponenterna
- studier av olika kombinationer av komponenter och spänningar, nedan redovisas ett exempel på en dylik studie
- Batterimodellering. Normalt brukar inte induktansen i battericellen vara speciellt mycket i fokus, men i och med att det är mycket högfrekventa pulsationer som alstras p.g.a. av den anslutna kraftelektroniken är det nödvändigt att studera batteriet lite djupare.

Utökad körsträcka via ökat cellantal- konsekvenser för prestandan

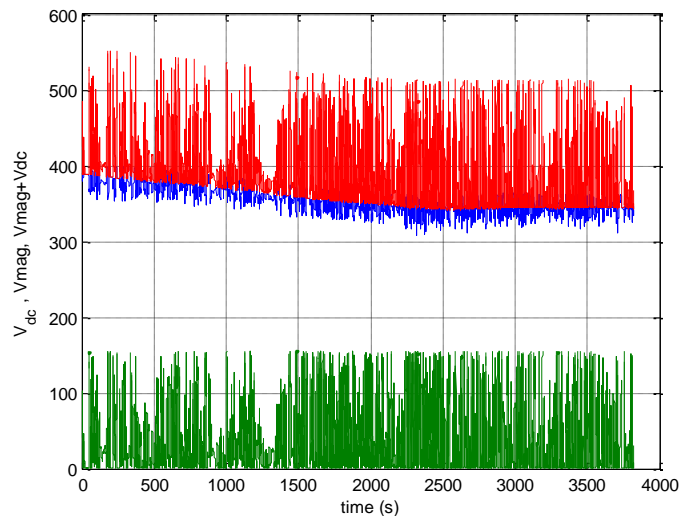
Huvudkomponenterna för framdrift av en elbil ser ungefär ut enligt Figur 1. För en plug-inhybridbil tillkommer dessutom oftast ett elmotor-omriktarsystem till, placerat bredvid förbränningsmotorn, av mindre storlek, med omriktare och elmotor kopplat till batteriet.



Figur 1: Huvudkomponenter för elektrisk framdrivning av ett fordon. Batteri, omriktare med likledskondensator och 6 transistorer, växel och hjulpar.

För att få bästa kostnadseffektivitet är det viktigt att alla komponenter utnyttjas till fullo, dvs vi skall inte överskrida några specifika spänningsnivåer eftersom då kan komponenter haverera, men å andra sidan skall vi ligga så nära gränsen som möjligt annars drar kostnaderna iväg. T.ex gäller detta spänningsnivåerna i systemet. Om vi antar ett system med nominellt 400 V batterispänning, dvs 400 V batterispänning vid fulladdat batteri så vill vi anpassa både omriktare och elmaskin för att passa den valda spänningsnivån. För en 400 V passar 650 V IGBT-moduler för omriktaren bra, eftersom det behövs en säkerhetsmarginal för att säkerställa att IGBTerna inte skadas av spänningsspikar under hela bilens livslängd. Nivån beror helt och hållet på vilken transistor som valts, men låt oss använda 100 V i detta exemplet. När man kör omriktaren, så blir det transienter i omriktaren när man slår av transistorerna, dessa beror på hur fort man switchar (ju snabbare switchning, desto högre transienter) och hur omriktaren ser ut, samt hur hög strömmen ut till elmaskinen är. En tänkt nivå är 150 V vid maximal ström.

I figur 2 så kör fordonet i en vald körcykel och i figuren kan tre olika spänningar noteras. Batterispänningen, den blå, är vad som finns på kabeln mellan batteri och omriktare. För den inre omriktarspänningen, den röda, gäller att switchtransienterna tillkommer, de gröna spikarna. Tack vare likledskondensatorn, samt även ett EMI-filter på hvdc-utgången, som inte är utritat i figuren, så kommer endast marginella mängder av switchtransienterna ut på 400 V hvdc-bussen.

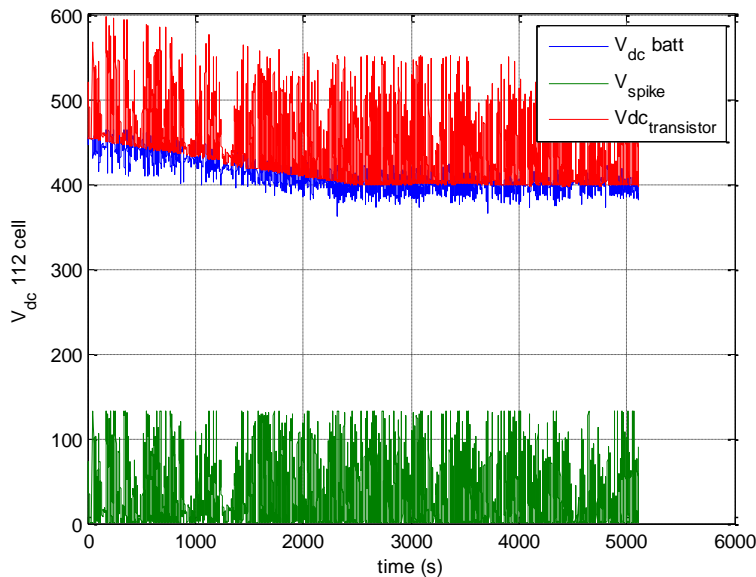


Figur 2: Batterispänningsnivå, blå, spänning i omriktaren röd, switchtransienternas storlek, grön, vid körning i en körcykel.

Vi kan se att den inre omriktarspänningen nu når precis 550 V, och därmed så har vi hittat en ekonomisk balansering av komponenters spänningshållfasthet samt att hålla sig så nära gränsen som möjligt.

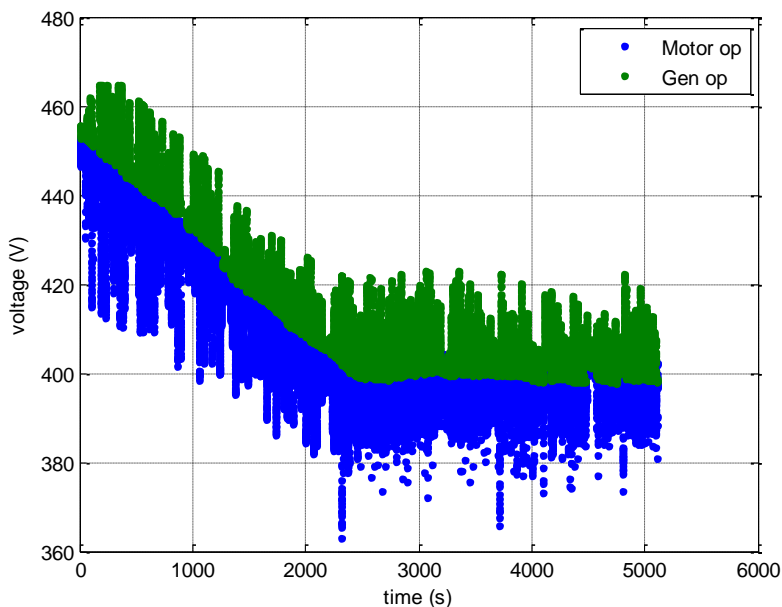
Ett batteri sätts samman av ett antal celler som har en viss Ah-styrka och den i fordonsindustrin vanligast använda Li-teknologin har typisk 4 V/cell. 400 V åstadkoms sålunda med 100 celler i serie. Tyvärr är marknaden aldrig kontinuerligt stabil utan krav på förändringar kan ständigt inkomma. Ett typiskt önskemål kan vara överflyttning av

elsystemet till ett tyngre fordon och att den elektriska körsträckan skall bibehållas eller att man vill förlänga den elektriska körsträckan något i ett befintligt fordon. Enkelt hade ju då varit att köpa celler med större energiinnehåll. Tyvärr är det dock som så att leverantören typiskt inte har en alltför stor palett, och att byta leverantör är ett omfattande arbete och leder till ökade kostnader genom att storköpsfördelarna sjunker undan. Då finns ett enkelt och attraktivt alternativ och det är att öka antalet celler i serie istället. Men, då stiger spänningen i systemet. I Figur 3 finns ett exempel där körkapaciteten har ökat med 12 % genom att addera fler celler. Vi kan nu se att den övre gränsen 550 V ofta överskrids, vilket medför att något behöver göras



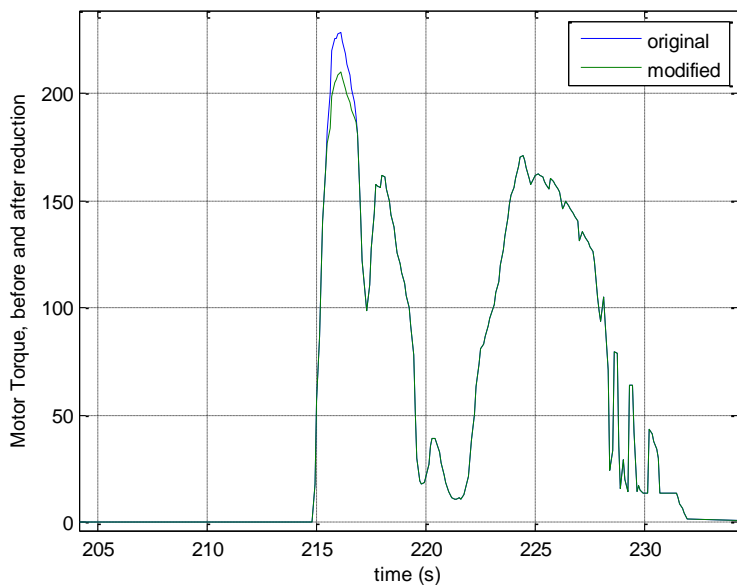
Figur 3: Batterispänningsnivå, blå, spänning i omriktaren röd, switchtransienternas storlek, grön, vid körning i en körcykel, med 15 % mera battericeller.

Ett knep för att komma tillrätta med detta vore att minska transistorernas switchhastighet genom att öka gateresistansen. Tyvärr medför detta att förlusterna i IGBTerna skulle stiga, så för att kompensera detta måste strömmen till maskinen minskas då detta inträffar (derating). En minskning av strömmen innebär två olika saker, beroende på om vi driver fordonet från batteriet och då reduceras det tillgängliga momentet eller om vi regenererar effekt in till systemet, och då spiller vi lite energi vi kunde återvunnit. I figur 4 kan vi se batterispänningen vid generering och vid drivning. På grund av batteriresistansen så stiger spänningen vid regenerering och vi inser då att det är där vi har störst problem med derating för att undvika överspänning.



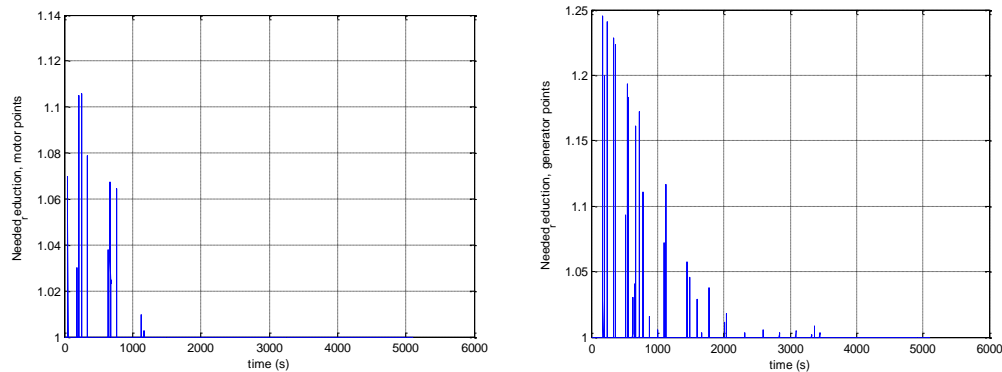
Figur 4: Batterispänningsnivå vid körning i en körcykel med 15 % mera battericeller.

Ett exempel på hur en derating kan se ut ser vi i figur 5 nedan. Detta är den värsta situationen som uppkom under den undersökta körcykeln. Den blå linjen visar vad vi skulle ha för att följa körcykeln, medan den gröna visar vad vi får efter begränsning pga av det ökande antalet battericeller.



Figur 5: (Moment)derating vid motorisk drift för att undvika överspänning.

I figur 6 nedan visas hur ofta derating förekommer under hela cykeln

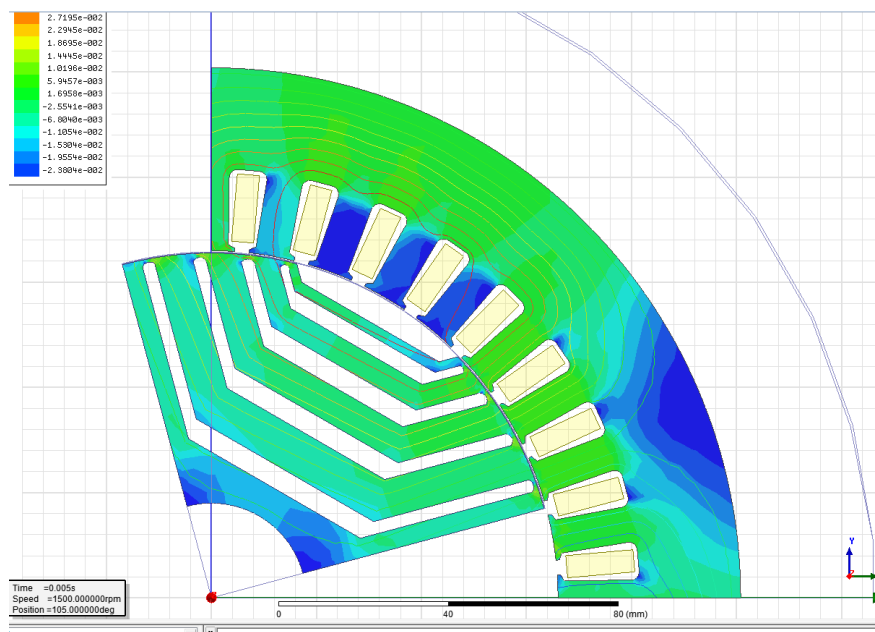


Figur 6: Derating vid motorisk drift (vänster), och under generering (höger), för att undvika överspänning.

Vi kan se att när det gäller framdriften blir det ytterst få tillfällen som derating behöver användas och den maximala nivån är 10 %. När det gäller regenereringen så är det som syns flera tillfällen och större nivåer. Dock ger högra bilden i Figur 6 en alltför negativ bild. I själva verket är det endast 0.5 % av den regenererade energin som går till spillo. Mao, om man kan acceptera en 10 %-ig minskning av accelerationsförmågan vid enstaka tillfällen när batteriet är fulladdat så är det möjligt att genomföra en dylik körsträckeökning utan att byta omriktarens hårdvarukomponenter. Även andra cykler testades och alla cykler låg under 1 % förlust i regenererad energi, samt högsta momentderating blev 13 %.

7. Arbetspaket 3 – Elektriska maskiner.

Strategisk uppbyggnad av elektromaskinkunskap har varit det övergripande målet för verksamheten. Att utveckla verktyg för analys och dimensionering av såväl konventionella som innovativa maskintopologier är också lärandets väg mot en mer insiktsfull produktutveckling, i samarbete med komponentleverantörer. Genom succesiv ökning i modellkomplexitet och genom att samtidigt verifiera resultat kan metodförändringar införas stegvis i utvärderingar, upphandlingsprocesser och granskningsförfaranden av olika underleverantörer. Utgångspunkten för aktiviteter inom arbetspaketet har därför varit en modell av en befintlig maskin, så att beräkningsresultaten kunnat verifieras. Proceduren har genomförts för några kända elmaskinkonstruktioner dels från industriella leverantörer och dels från akademiska studier. I första hand har PM-maskiner verifierats, men även magnetfria alternativ har undersökts, såsom en synkronreluktansmaskin, se figur 7 samt tabell 2, och en asynkronmaskin. Detta innebär att dessa elmaskintyper kan analyseras och modifieras för att anpassas till vissa tänkbara applikationer i produktprogrammet, i syfte att frigöra komponentens kostnadspåverkan från permanentmagneter.



Figur 7: Tvärsnitt av den modellerade synkrona reluktansmaskinen.

Tabell 2: Beräkningsresultat; referensmaskin (KTH) och Volvos modell implementerad i Maxwell.

	Referensmaskin	Maxwell Implementering
Ld	26.4 mH	24.4 mH
Lq	2.9 mH	2.6 mH
Moment	153.4 Nm	141.7 Nm
Momentrippel	21 %	26 %
Max B i luftgapet	1.083 T	
Järnförluster @3000 rpm	1413 W	1450 W

Vidare har beräkningsresultat för en av PM-maskinmodellerna kopplats till beräkningsprogrammet ANSYS/Fluent (CFD) för att analysera maskinens termiska egenskaper [1]. Det visade sig emellertid att problematiken med elementindelning för respektive delberäkning (från elektromagnetisk till fluidmekanisk) är för komplex för att kunna automatgenerera lösningar. Den idag nödvändiga manuella handpåläggningen i processen anses vara alltför tidskrävande för att acceptera som effektivt alternativ till mindre sofistikerade termiska beräkningsmetoder. En ökad användning av kopplade FEM-baserade metoder kräver utveckling av programvaran, vilket initierats under projektet i kontakten med mjukvaruleverantören.

Vidare undersöktes hur de elektromagnetiska beräkningarna kan kopplas till ljudalstring genom kraftpåverkan av valda maskindelar. Som en del av samarbetet med NVH-gruppen, har en utvärdering av metodik för att beräkna magnetiska krafter i elmaskin genomförts som en pilotstudie. Resultat från elektromagnetiska beräkningar utreds i samarbete med avdelningen för NVH och jämförelse med mätningar av ljudnivåer pågår. Det återstår således arbete med att verifiera metod och resultat, och mätningar på maskinljud som kan användas för validering kommer att genomföras i ett framtida angränsade projekt.

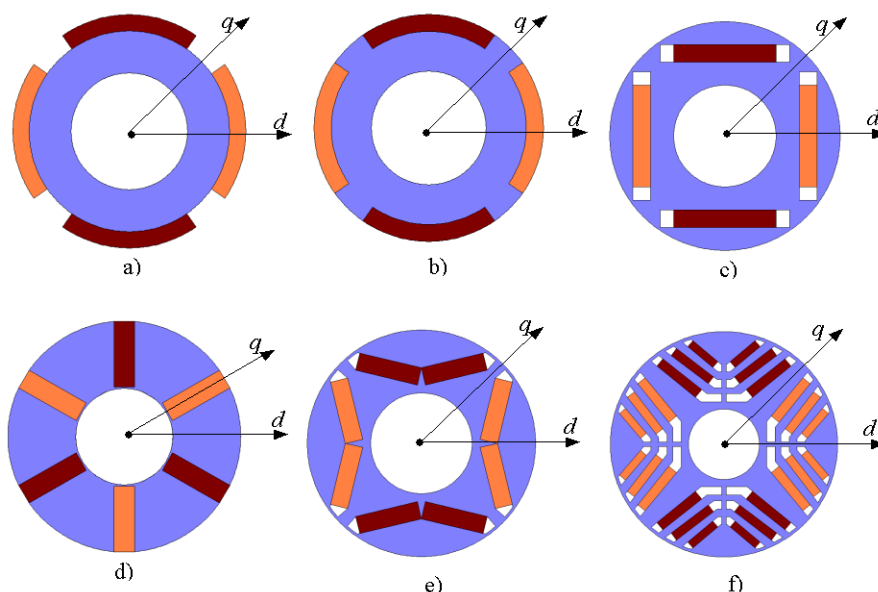
Under arbetet har även framkommit att elektromaskinmodellens ingående parameteriserade materialbeskrivningar kan ha ett anmärkningsvärt stort inflytande på beräkningsresultaten. Som exempel kan nämnas att antalet definierade punkter på magnetiseringskurvan, hur dessa sammanbinds och, framför allt, extrapoleras, kan ge avgörande variationer i resulterande maskinprestanda. Det resulterande luftgapsflödet påverkas dessutom av lokala materialstrukturella förändringar vid tillverkning, såsom plåtstansning. För att uppnå goda resultat behövs experimentellt validerade, och kompenserade, parametrar för stansad laminering. Sammantaget leder detta till att implementerad metod för järnförlustberäkningar inte kan användas direkt för att uppnå tillförlitliga resultat. Istället blir informationsutbyte med leverantörer av elektroplåt såväl som elektromaskinproducenter nödvändigt för att erhålla relevant information.

Som tidigare nämnts har möjligheten att genomföra en kopplad, FE-baserad elektromagnetisk-termisk analys av en elmaskin undersökts. Arbetet med integrering av elektromagnetiska och termiska beräkningar, med mål att möjliggöra en komplett maskinanalys, har genomförts i en, för Volvo, helt ny miljö. En kombinerad mjukvarulösning har utvärderats i olika steg för att kunna avgöra lämplighet och mognad av kopplade beräkningar med finita elementmetoden (FEM) [2-4]. Som komplement till den nya, FEM-baserade beräkningsmiljön har en mer traditionell metod implementerats för termiska beräkningar. Ett förenklat termiskt nätverk har studerats och provats för att prediktera temperaturen i vissa viktiga områden i maskinen. Särskilt intressant är lindningarnas härvändor och permanentmagneterna i rotern. Här sker kopplingen med FE-beräkningarna genom att överföra geometriska data, materialdata samt beräknade förluster till ett termiskt ekvivalent nätverk som kan lösas med vanliga numeriska metoder [5].

I syfte att fördjupa insikten i beräkningsmetodik genomfördes en studie av induktansberäkning i FEM-miljö [6]. Som alternativ till en vanligt förekommande metod som bygger på transient lösning i flera tidssteg i kombination med frusen permeabilitet har en magnetostatisk metod undersökts. En fördel är att magnetostatiska problem kan lösas snabbare och skulle därmed kunna möjliggöra ett snabbare konstruktionsförfarande. En nackdel med den statiska lösaren är att den kräver en väldefinierad retur bana för flödesbildande statorström, vilket i vissa fall innebär att en avsevärt större del av maskingeometrin måste modelleras. Att den elementindelade geometrin måste förfinas (antal noder fördubblas) kan vara ett bakslag för metoden, som förväntades vara avsevärt snabbare att lösa. Från undersökningen av en referensmaskin visar det sig att den alternativa statiska metoden ger resultat som är likvärdiga med den inbyggda transienta metoden.

Undersökningen av elmaskiner lämpade för hybridfordon har, baserat på litteraturstudier och omvärldsbevakning, inriktats mot att strategiskt minska behovet av tunga sällsynta

jordartsmetaller. Eftersom permanentmagneter lämpliga för fordonsapplikationer innehåller starkt kostnadsdrivande material finns motiv att undersöka möjligheten att minska mängden av sådana material. Det är främst Dysprosium (Dy) och Terbium (Tb), som används för att åstadkomma temperaturstabilitet och koercivitet önskvärda för tillämpningarna. Samtidigt är materialproduktionen koncentrerad till Kina, vilket har visat sig utgöra en osäkerhet i fråga om tillgång och kostnad. Det kan därför vara önskvärt att utnyttja magneter med lägre halt av kritiska material, allt för att minska inverkan av prisfluktuationer på världsmarknaden, och även kanske minska miljöpåverkan avseende produktion av dessa material. Figur 8 visar några olika rotortopologier för permanentmagnetmaskiner, där variant f) representerar den grundtyp som valts för fortsatta studier.



Figur 8: Rotortopologier för permanentmagnetmaskiner, med varierande grad av utprägling. a) ytmonterade magneter (SPM), b) nedsänkta magneter (INSET), c) interna magneter (IPM), d) ekertopologi (SPOKE), e) v-magneter (V-IPM), f) PM-assisterad SyRM/multibarriär PM.

8. Arbetspaket 4 – Krafterlektronik.

Följande aktiviteter genomfördes inom detta paket:

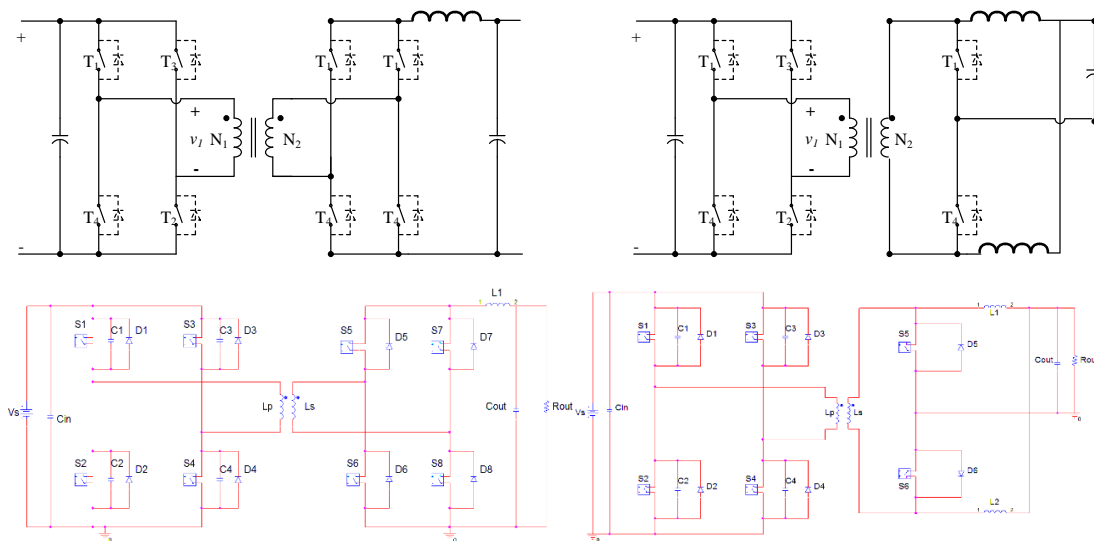
- En modell som predikerade utströmmen från en trefasomriktare utvecklades och implementerades i Matlab.
- En modell som predikerade kurvformerna vid switchning av en Mosfettransistor togs fram och implementerades i Matlab.
- Termiska nätverk av krafterlektronikkomponenter togs fram samt konverteringsverktyg för att omvandla dessa mellan Cauer och Foster kretstyper [7].

- Möjligheter till att implementera Kiselkarbidkomponenter studerades [8].
- Koncept med ombordladdare med högre verkningsgrad, dock utan galvanisk isolering studerades [9, 10].
- Studie av EMI-påverkan av laddare på elnätet.
- Andra topologier för hur sekundärsidan på dc/dc-omriktaren kunde designas studerades, samt vilka verkningsgradsvinster som kan finnas vid dubblering av vissa krafthalvledare [11].

Nedan redovisas ett av de utförda arbetena lite mera i detalj.

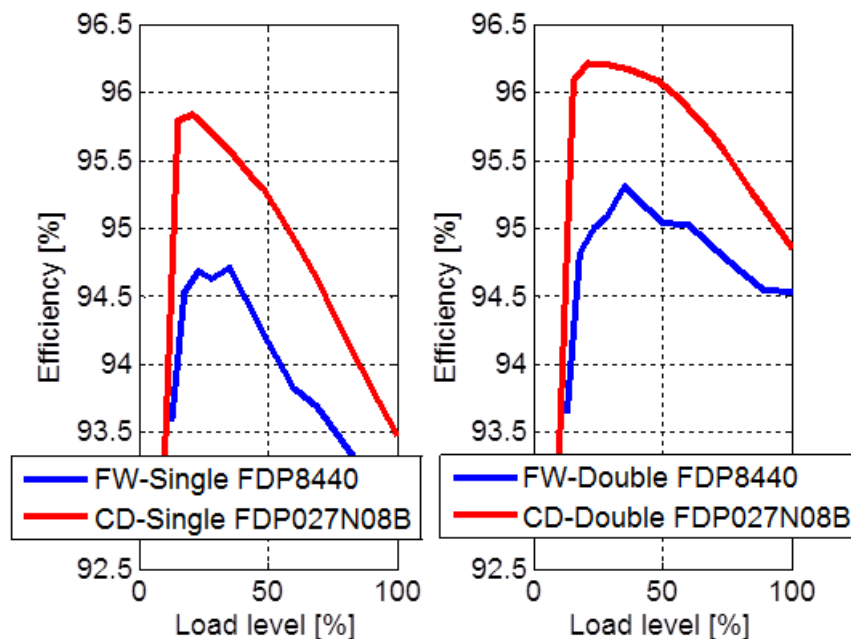
Topologistudie av dc/dc-omriktaren

Dc/dc-omriktaren omvandlar den högspända likspänningen till 12 V spänning, och ersätter därmed den vanliga 12V-generatorn som finns i vanliga fordon för att försörja hjälpsystemen. Som med alla elkomponenterna gäller det att förutom att den skall vara kostnadseffektiv, att dess verkningsgrad skall vara hög, av två skäl. Dels så vill vi inte förlora energi, som leder till kortare körsträcka och dels så vill vi inte ha alltför mycket förluster för det driver upp storleken och ökar kravet på kylning. I figur 9 visas en s.k. fullbryggetopologi samt en topologi med en så kallad strömdubblare på sekundärsidan.



Figur 9: Topologier för dc/dc-omriktaren, till vänster med fullbrygga på sekundärsidan av transformatorn (den högra) och till vänster med en så kallad strömdubblare.

I figur 10 visas resultatet av en verkningsgradsberäkning av det två topologierna dels med enkel uppsättning av krafthalvledare och dels med dubblad på sekundärsidan.



Figur 10: Verkningsgrad för de två topologierna, blå fullbryggsomriktare och röd, strömdubblare, vänster enkla halvledare, höger – dubblad halvledarkapacitet på primärsidan.

Vi kan tydligt se att strömdubblaren har betydligt bättre verkningsgrad. Detta beror på att vi har färre transistorer på sekundärsidan som strömmen behöver flyta igenom och detta ger minskade förluster.

Vi kan notera att verkningsgraden stiger ca 0.5 % runt den maximala verkningsgradspunkten och uppåt 1.5 % vid den högsta lasten när vi dubblar antalet krafthalvledare på sekundärsidan. Att den stiger som mest vid den högsta lasten är naturligt eftersom det då flyter mest ström. Ur kylsynpunkt är det extra värdefullt med den avsevärda förbättringen vid hög last eftersom det ju då är vi har högst total förlust.

Vidare undersöktes även att fördubbla antalet halvledare på primärsidan. Här var dock energivinsterna inte speciellt stora. Vi har hög spänning vilket leder till att Mosfetarna på primärsidan har betydligt mera switchförluster än de på sekundärsidan. Dubblar vi Mosfetarna så kvarstår switchförlusterna tyvärr oförändrade.

Vi kan se att vi har en aningens ytterligare förbättrad verkningsgrad, men inte i samma omfattning som vid ökning av storleken på transistorerna på sekundärsidan.

Om vi nöjer oss med att dubbla transistorerna på sekundärsidan så kan vi spara 9 kWh förluster per år för fullbryggefallet och 6 kWh för strömdubblaren. Under 15 år innebär detta 134 kWh och 89 kWh för de två topologierna. Med ett elpris på 1.72 kr/kWh (detta är lågt räknat, elen ombord är oftast dyrare än så) erhålles 230 respektive 153 kronors besparing. Kostnaden för de ökade switcharna (OBS katalogpris, vid större serier så kan säkerligen lägre

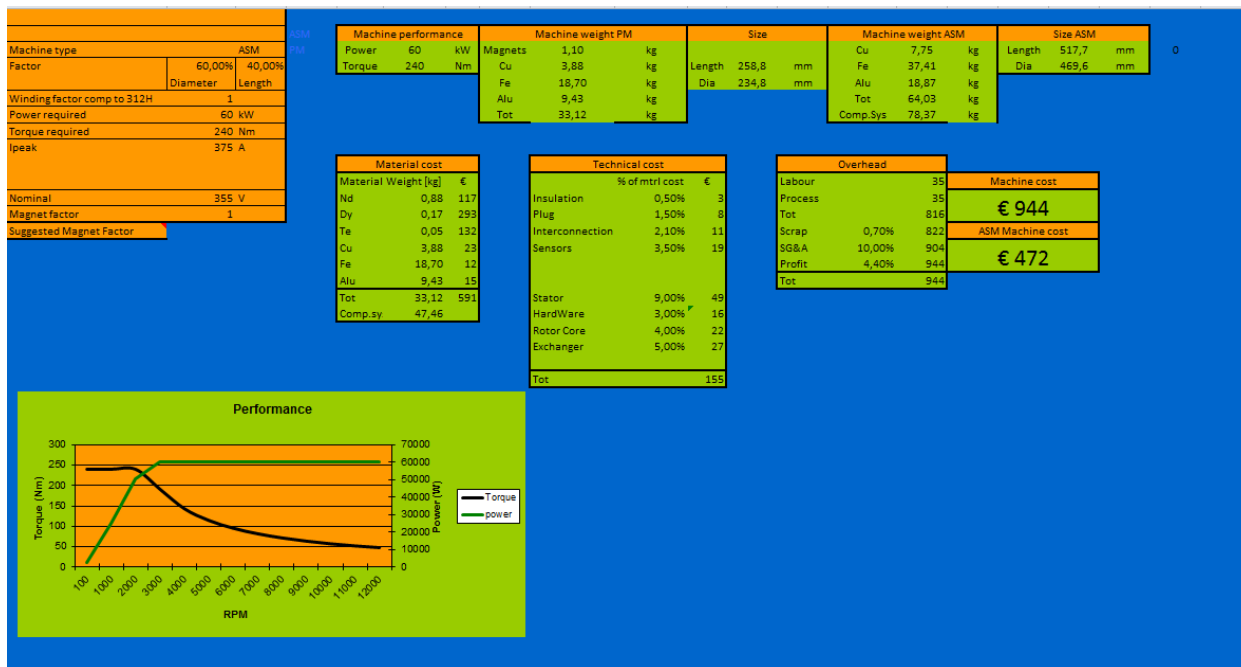
pris erhållas) blir 226 respektive 91 kronor. Till detta tillkommer kostnader för att få plats med de extra komponenterna, men samtidigt sjunker kylkostanden.

Vad exemplet visar är att det kan vara en idé att överdimensionera.

9. Arbetspaket 5 – Systemutvärderingsmetodik.

För att skapa prognoser om de möjligheter som finns för elektrifiering av utvalda fordon i kommande produktionsplan så genomfördes ett arbete på att undersöka kostnader och vikter hos de huvudsakliga elkomponenterna, samt hur dessa faktorer skalar med storleken och prestandan.

I Figur 11 nedan visas ett exempel på hur beräkningsprogrammet för bakaxelmotorn såg ut



Figur 11. GUI för elmotorundersökningsprogrammet.

Genom analys av olika hårdvarulösningars kostnadsvariation har förbättringar kunnat identifieras och prioriteras. En jämförelse av två olika generationer av hybridsystem, i enlighet med projektets förutsättningar, visar på förbättringar på komponentnivå avseende kostnad, specifik effekt, vikt och volym.

Verkningsgrad står i konflikt till moment och effekttäthet, moment och effekttäthet står i konflikt till pris. En viktig aspekt har varit verkningsgraden. Med bibehållet pris och bibehållen storlek per moment, sjönk förlusten i maskinen med 15 % från nivån i det tidiga projektet. När det gäller kraftelektroniken var tekniken betydligt mindre mogen än för

elmaskinen. Ombordladdarens pris per effekt reducerades med 40 %, med bibehållen verkningsgrad, 20 % minskad vikt och 40 % minskad volym. I den tidigaste varianten var likspänningsomvandlaren för 12 V försörjning separerad från omriktare, medan dessa två enheter kombinerades i senare enheter. Här kunde en prisreduktion på 50 % noteras, en minskad volym samt bibehållen verkningsgrad. För kraftelektroniken uppnåddes 50 % ökad effekt per viktenhet samt en volymreduktion på 45 %.

10. Spridning och publicering

Innehållet i arbetspaketen har diskuterats med Chalmers tekniska högskola. Exempel är i arbetspaket 2 där doktorand Ali-Rabiei, som arbetat inom Energimyndighetens program "energieffektiva fordon", utfört arbete på verkningsgrad av tvånivåomriktare i fordon. Vidare har inom WP4 kontakten med högskolan varit naturlig i och med de examensarbeten som genomförts med elever från Mastersprogrammer i Electric Power Engineering från Chalmers. Resultat från VCC's projektaktiviteter presenterades i föredraget "Utmaningar för högtemperatur SiC i Fordon", som genomfördes på Svenskt Hybridcentrums årliga konferens 2013.

Inom WP3 har resultatet diskuterats inom en kontaktgrupp, där Volvo Personvagnar, Volvo AB och Chalmers ingått. Kontaktgruppens namn är västsvenska Maxwellsällskapet, och som namnet anger så har just erfarenheter med elmaskindesign och elmaskinprestandaberäkning medelst programmet Ansys Maxwell diskuterats.

Vidare avhölls kurser inom Ansys Fluent och Ansys Mechanical med inriktning mot akustik och hur dessa program kopplar till Maxwell. Deltagarna kom från Chalmers, VCC samt Aros Electronics och VCC kunde ta med egna beräkningsproblem och på så sätt återkopplades för VCC viktiga behov till mjukvaruleverantören. Detta rörde sig dels om samsimulering mellan Fluent och Maxwell för att beräkna elmaskintemperaturförhållanden samt ljudalstringsberäkningar.

11. Referenser

- [1] "Pilot preparatory study for 312H Magna NVH", Svetla Chakarova-Käck, dept. 94311, Volvo Car Group, 2014-03-10.
- [2] "Coupled electromagnetic and thermal simulation – first test", Svetla Chakarova-Käck, dept. 94311, Volvo Car Group, 2013-07-02.
- [3] "Coupled electromagnetic and thermal simulation – trial 2", Svetla Chakarova-Käck, dept. 94311, Volvo Car Group, 2013-10-27.

- [4] “Coupled electromagnetic and thermal simulation – trial 3”, Svetla Chakarova-Käck, dept. 94311, Volvo Car Group, 2014-04-01.
- [5] “Matlab-skripten som kopplar Maxwell till EMIAT”, Fabio Santandrea, dept. 94311, Volvo Car Group, 2014.
- [6] “FEM-based parameter estimation for PMSM”, Fabio Santandrea, dept. 94311, Volvo Car Group, 2014.
- [7] “Foster to Cauer Network Transformation in Thermal Engineering of Power Electronics”, Que Wang, dept. 94312, Volvo Car Group, 2014.
- [8] Que Wang, “Investigation and Implementation of MOSFETs Losses Equations in a Three-phase Inverter”, Master of Science Thesis, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden 2015.
- [9] “OBCn: Effekterna av olika krav”, John Simonsson, 94311, Volvo Car Group, 2014.
- [10] Robert Nyström och Yuxuan He, “Evaluation of a non-isolated charger Concept, analysis and reference design”, Master of Science Thesis, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden 2012.
- [11] Artur Puzinas och Siavash Sadeghpour, “Energy Efficiency Investigation of a 3kW DC/DC Converter for Electric Vehicle Applications using Full Wave and Current Doubler Synchronous Rectification”, Master of Science Thesis, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden 2013.
- [12] David Lennström, “Assessment and control of tonal components in electric vehicles”, Doctoral thesis, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, LuTH, Luleå, Sweden 2015.
- [13] Andreas Andersson, "Electric machine control for energy efficient electric drive systems", Licentiate thesis, Department of Energy and environment, Chalmers, Göteborg, Sweden, 2015.

12. Slutsatser och fortsatt forskning

NGHVT-projektet har bedrivit verksamhet inom ett antal områden inom kraftelektronik och elmaskinteknik. Ett viktigt resultat inom båda dessa områden var att projektet gav möjlighet till att driva leverantörerna mot ett för VCC önskat håll, då det gavs möjlighet till fördjupade studier och på så sätt kunde VCC vara mer proaktiva än vad som annars hade varit möjligt. Detta har även gällt mjukvaruleverantören, Ansys, vars multifysikberäkningsprogram kunde påvisas ha svagheter.

Det har varit av stor vikt att kunna delta i olika forum och via NGHVT-projektet har möjlighet givits till detta. Aktuell kunskap har på så sätt kunnat tillföras VCC.

Exempel på andra resultat är systematisk och snabbare parametersättning av elmaskiner från beräkningsprogrammet Maxwell. Till detta skall läggas metodutveckling för beräkning av verkningsgrader hos trefasomriktare och dc/dc-omriktare med användande av annan transistorteknologi, verifikation av elmaskinprestanda och alternativa induktansberäkningsmetoder. Analysverktygen och deras resultat har spelat en viktig roll i identifieringen av potentiella förbättringsmöjligheter i systemen.

NVH (Noise, vibration, harshness)-arbetet som genomfördes inom NGHVT, har fortsatt inom två industridoktorandprojekt [12, 13].

Kopplingen till beräkningsprogrammet Fluent kan förhoppningsvis återupptas när mjukvaruleverantören rättat till de upptäckta bristerna.

Elmaskindesignarbetet rullar nu vidare stärkt av metodutvecklingen som kunde genomföras inom projektet.

13. Deltagande parter och kontaktpersoner

NGHVT har varit ett projekt som drivits av endast Volvo Personvagnar. Kontaktperson för projektet är Martin Ask, avdelning 97312.