

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Bränslecell drivsystem med svävande spänning	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Fuel cell drive system with floating voltage	
Universitet/högskola/företag Chalmers Tekniska Högskola AB	Avdelning/institution Elektroteknik
Adress 412 96 Göteborg	
Namn på projektledare Yujing Liu	
Namn på ev övriga projektdeltagare	
Nyckelord: 5-7 st Fuel cell, supercapacitor, drivetrain, inverter, automotive, cost-effective	

Förord

Projektet har fått hjälp från industriell partners Volvo Cars och Powercell i form av studiebesök av bränslecell tillverkning, körcyklar av hybridbilar under dagliga pendlingar, och andra specifikationer om bränslecell baserad fordons drivlina.

Projektet har också fått värdefulla information om krav och fråge ställningar om bränslecell fordon från CEVT och Scania.

Projektet var med i SEC/Energiforsk bränslecell bevaknings grupp. Mycket input därifrån hjälper oss med bättre koll på utvecklingar i världen.

Besöket till Mariestads vätgas anläggning är båda lärorik och uppmuntrande. Man förstår helheten om livscykeln av energi förvandlade från solcell el generering till vätgas produktion, och tankning.

Detta projekt är liten men gav oss möjligheter att koppla till stor nätverk i svenska vätgas / bränslecell utveckling och användning.

Innehållsförteckning

Förord	1
Innehållsförteckning	2
Sammanfattning	2
Summary	2
Inledning/Bakgrund	3
Genomförande	4
Resultat	5
Diskussion	11
Publikationslista	11
Referenser, källor	11
Bilagor	11

Sammanfattning

Bränslecellstekniken, med fördelarna med hög energidensitet, snabb tankning och möjlighet att producera från förnybar energi, blir en lovande lösning för elbilar. Konceptet som utvecklade i detta projekt är en enkelstegs omvandlare topologi med svävande DC spänning. Bränslecellstacken är direkt ansluten till DC terminal med variabel spänning. För att upprätthålla effektkapaciteten och spänningsstabiliteten införs en superkondensatorbank till likströmsterminalen. Superkapacitorer är utmärkta för att hantera den dynamiska effekt som krävs vid fordonsdrifter, speciellt under accelerations- och regenereringsläget. Bränslecellstacken laddar superkapacitorn när likspänningen sjunker. Systemet är kompakt och kostnadseffektivt tack vare enstegs-omvandlarens topologi. Resultaten från projektet verifierade att (1) med 50% bränslecellstackens effekt rating, superkapacitorer kan leverera drivlinan med nödvändig effekt för acceleration och regenerering; (2) effekts variationerna på bränslecellstacken minskas avsevärt, därför kan livstiden för stacken förlängas; (3) spänningsvariationerna försämrar inte fordonets prestanda mer än ett rent batteri fordon med låg laddningsgrad.

Summary

Fuel cell technology, with its advantages of high energy density, fast refuel, and possibility to produce from renewable energy, becomes a promising solution for electric vehicles. The concept developed in this project is a single-stage converter topology with floating DC bus voltage. The fuel cell stack is directly connected to the DC bus with variable voltage. To maintain the power capacity and voltage stability, a super-capacitor bank is introduced to the DC bus. Supercapacitors are excellent to handle the dynamic

power required in vehicle operation, especially in acceleration and regeneration modes. The fuel cell stack powers the supercapacitor when the DC voltage drops. The system is compact and cost-effective due to the single-stage inverter topology. The results from the project verified that (1) with 50 % fuel cell stack power rating, the supercapacitors can supply the drivetrain with required power for acceleration and regenerating; (2) the power variations on fuel cell stack is significantly decreased therefore lifetime of the stack can be extended; (3) the voltage variations will not worsen the vehicle performance more than a pure battery vehicle with low state-of-charge.

Inledning/Bakgrund

Transportelektrifiering är en av de mest lovande metoderna för att minska koldioxid och förbättra vår levnadsmiljö. Bränslecell (Fuel Cell, FC), med relativt hög energieffektivitet, kan uppnå extremt låga- eller nollutsläpp som skadar miljön. Därför har tillämpningen av bränslecell i elbilar (EV) varit i fokus för allt högre uppmärksamhet. Bränslecellstekniken, med fördelarna av hög energidensitet, snabb tankning och möjlighet att producera från förnybar energi, blir en lovande lösning för framtidens transport.

Utgångsspänningen från bränslecellerna är emellertid variabel (upp till 30%) beroende på belastningsströmmen. Således kräver ett konventionellt bränslecell drivsystem en tvåstegs omvandlartopologi och en DC-terminal med konstant spänning. Det första steget är en DC/DC-omvandlare för att reglera utgångens spänning från bränslecellerna till den konstanta likspänningen. Den andra steg är en 3-fasig DC/AC omriktare för att generera växelström för motorn. DC spänningen underhålls vanligtvis av Li-Ion-batterier. Batteriernas kapacitet beror på bränslecellernas och motorns effektbalans. I dagens bränslecell bilar, batteriernas kapacitet är små. Bränslecells effekt dimensioneras för att möta topp effekt krav från acceleration.

För att förbättra effektiviteten och pålitlighetsfrågorna är energilagringssystemet viktigt för EV och HEV för att kunna uppfylla toppbelastningen och förbättra systemets tillförlitlighet och effektivitet. Olika energilagringstekniker har utvecklats. Superkondensatorn (SC) och batteriet används ofta i EV, vilket kan ge momentan effekt för att förbättra systemets prestanda och återställa bromsenergin för att förbättra energiprestanda.

Projektet syftar till att utveckla ett enstegs bränslecellsystem stöd med superkondensatorer för framtida storskalig elektrifiering av fordon. Lösningen är att använda en enstegs trefasomriktare och eliminera DC/DC-omvandlaren mellan FC och drivomriktare. De viktigaste fördelarna med den föreslagna topologin är förmågan att leverera effekt behov med en enkel och låg kostnad system.

Projektet kommer att fokusera på innovativa lösningar för att nå höga tekniska krav. Resultaten ska ha akademisk värde och industriella potentialer.

Genomförande

AP1: Konzeptutvärdering med designriktlinjer.

Den teoretiska studien baserad på litteraturgranskning, analysanalys och designriktlinjer har genomförts.

- Uppgift 1.1 - Litteraturstudie och teknisk granskning (Powercell AB hjälpte till med förståelse om bränsleteknik)
- Uppgift 1.2 - Studie om Z-source omriktare topologi för styra utgång spänning
- Uppgift 1.3 - Parametrar design och komponent modellering
- Uppgift 1.4 - Utvärdering av möjligheten att använda svävande spänning systemet

AP2: Modelleringar och simuleringar

- Uppgift 2.1 - Reglera energiflödet under olika arbetstillstånd (Volvo Personvagnar har bidragit en riktig fordonets körcykel med V60 hybrid under arbetspendling.
- Uppgift 2.2 - Nya standarden för körcykelutvärdering, Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Protocol, WLTC, har utvärderats med bränslecell and super-kondensatorer.
- Uppgift 2.3 - Utvärdering av bränslecelldrivsystemets prestanda

AP3: Experimentella test av bränslecelldrivsystemet

- Uppgift 3.1 – Konfigurering av 48 V bränslecell system
- Uppgift 3.2 – Inköp av luft-kylt 3 kW bränslecell stack, 20 kW superkondensatorer, vätgas tank och ventiler, mm.
- Uppgift 3.3 – Lab säkerhet förberedning
- Uppgift 3.4 – Provkörning
- Uppgift 3.5 – Mer tests planeras i hösten 2019

AP4: Publikationer och seminarium

Tillsammans med en doktorand projekt stöd av Swedish Electromobility Centre, SEC, fyra akademiska artiklar har publicerades.

En Licentiat seminarium är planerade i Feb. 2020.

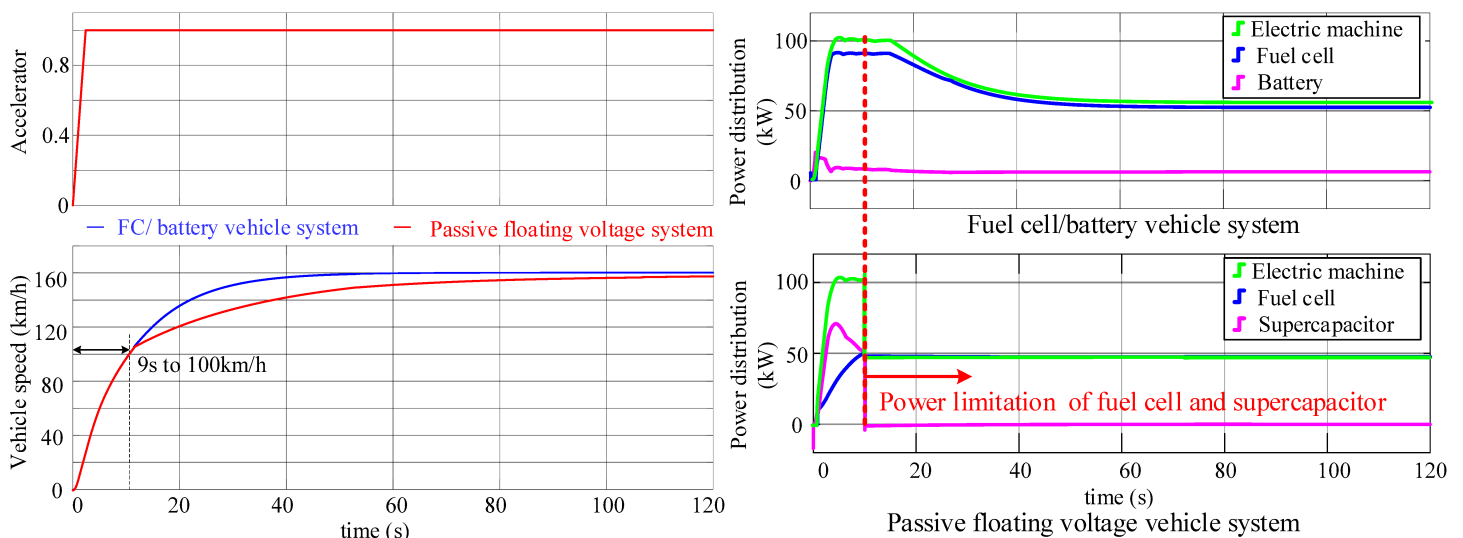
Resultat

1. Drivlina koncept av bränslecell/superkondensatorer (FC/SC)

Koncepten med kombination av bränslecell och superkondensatorer är utvärderade med simuleringsmodell för Honda Clarity. För mer detaljer om utvärderingar, läs vår publikation [1].

1-1. Bränslecell stacken med 50 kW effekten (original bränslecell/batterier system är 100 kW) kan uppnå bilens krav för accelerering.

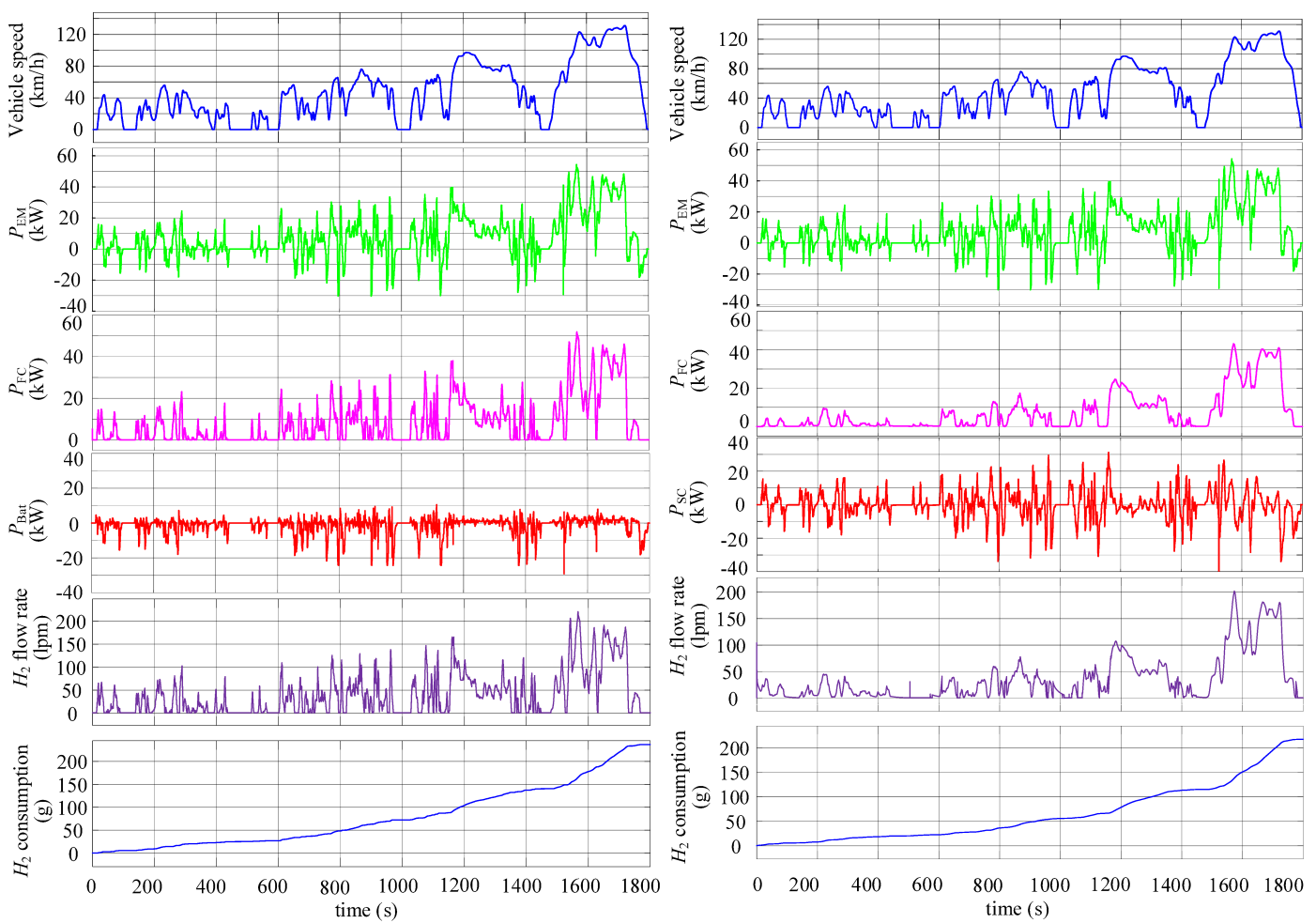
Superkondensatorer täcker dynamisk effekt för drivlina. Figur 1 visar simuleringsresultaten under acceleration test. Topp hastigheten för FC/batterier drivsystemet är 160 km/h, vilken är begränsade av vridmomentets hastighetskurva för den elektriska maskinen. Medan topp hastigheten för FC/SC svävande spänning systemet är 156 km/h, vilken är begränsade av effektbegränsningen av FC. Den maximala hastigheten runt 156 km / h kan uppfylla de flesta praktiska fordonsapplikationer. FC/SC svävandesspänningssystemet kan användas i applikationer där kravet på topp hastighet inte är så strikt.



Figur 1 Acceleration egenskap för en Honda Clarity bil med Chalmers svävandesspänningssystem

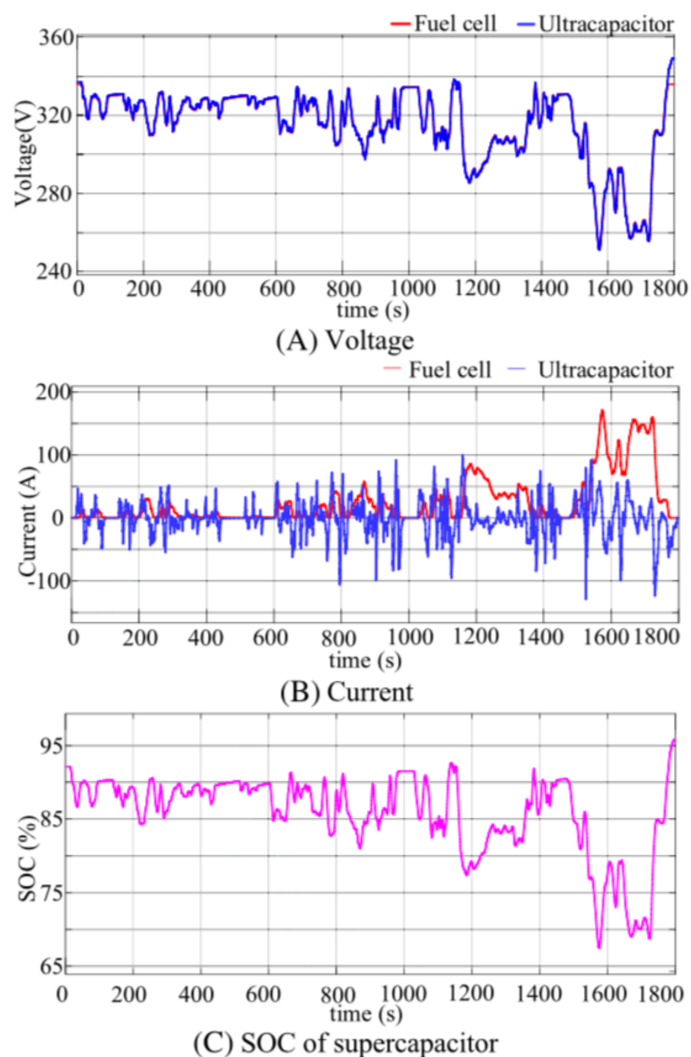
1-2. Minskade H₂ förbrukning och minskade dynamiska belastning för FC.

Baserade på WLTC körcykeln, FC/SC svävandesspänningssystemet kan uppfylla hela körcykeln. Figur 2 visar simuleringens resultat under testcyklerna för WLTC. Den bättre prestanda för den FC/SC svävande spänningen uppnås på grund av SCs utmärkta dynamiska prestanda. På så sätt minskar effektvariationen av FC betydligt, vilket kan begränsa åldring av FC. FC:s hållbarhet och livslängd kan förbättras. Vätgasförbrukningen minskar också eftersom FC arbetar på bättre verkningsgrad område.



Figur 2 Simulering data under WLTC körcykeln för en Honda Clarity bil med Chalmers svävandesspänningssystem

- 1-3. Begränsade påverkningar av spänning variationer på köregenskaper.** Figur 3 (A) visar spännings variationer under hela 30 minuter WLTC körcykel. Max variation är cirka -21% till $+9\%$ (mellan 252 V – 348 V) from nominal 320 V. Låga spänningarna händer under höghastighetskörningar. Vid låg och mellan hastigheterna, spänningarna är höga. Krav för eventuellt accelerationer kan bli uppfyllt. I flesta batteribilar, vid låg state-of-charge (SOC), batterisspänning kan sjunka 20 – 30 % av de nominala värden, vilket kan begränsa topp effekten också. Därför spänningsvariationen i FC/SC systemet påverkar inte köregenskaper av fordon mer än en batterier baserad drivlina. För mer detaljer om jämförelse mellan FC/batteri system och FC/SC system, läs vår publikation [3].

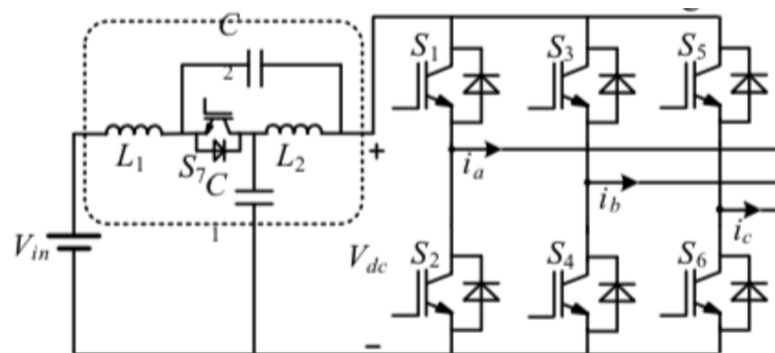


Figur 3 Spänning och ström i FC/SC systemet under WLTC körcykeln för en Honda Clarity bil med Chalmers svävandespänningssystem

- 1-4. Grov uppskattningar om potential kostnadsbesparing med FC/SC systemet.**
 Besparing med minskade stack effekt kan vara upptill mer än 30 000 SEK per system. Eliminering av DC/DC omriktare kan spara yttligare 10 000 SEK. Att använda superkondensatorer (SC) istället batterier kan spara 10 000 SEK. SC har mycket mer laddning/urladdning cyklar och dämpar dynamiska belastning till bränslecell (FC). FCs livslängden utökas också. Därför FC/SC systemet är mer kost-effektiv system med låg inköp kostnader och längre service längden.

2. Z-source baserad spänning förstärkning och styrning

Om man skulle vilja att förstärka spänning och förbättra styrning möjlighet, en Z-source omriktare kan användas. I projektet har vi utveckla en kvasi-Z-source omriktare (Figur 4). Ett impedansnätverk har förmåga att fritt styra den svävande DC spänningen enligt belastningskravet. Kvasi-Z-source omriktaren har studerats och simulerat. Men extra komponenter som inkluderar induktanser och kondensatorer ökar kostnader och vikten av systemet. För mer detaljer om kvasi-Z-source omriktare och styrning, läs vår publikation [4].



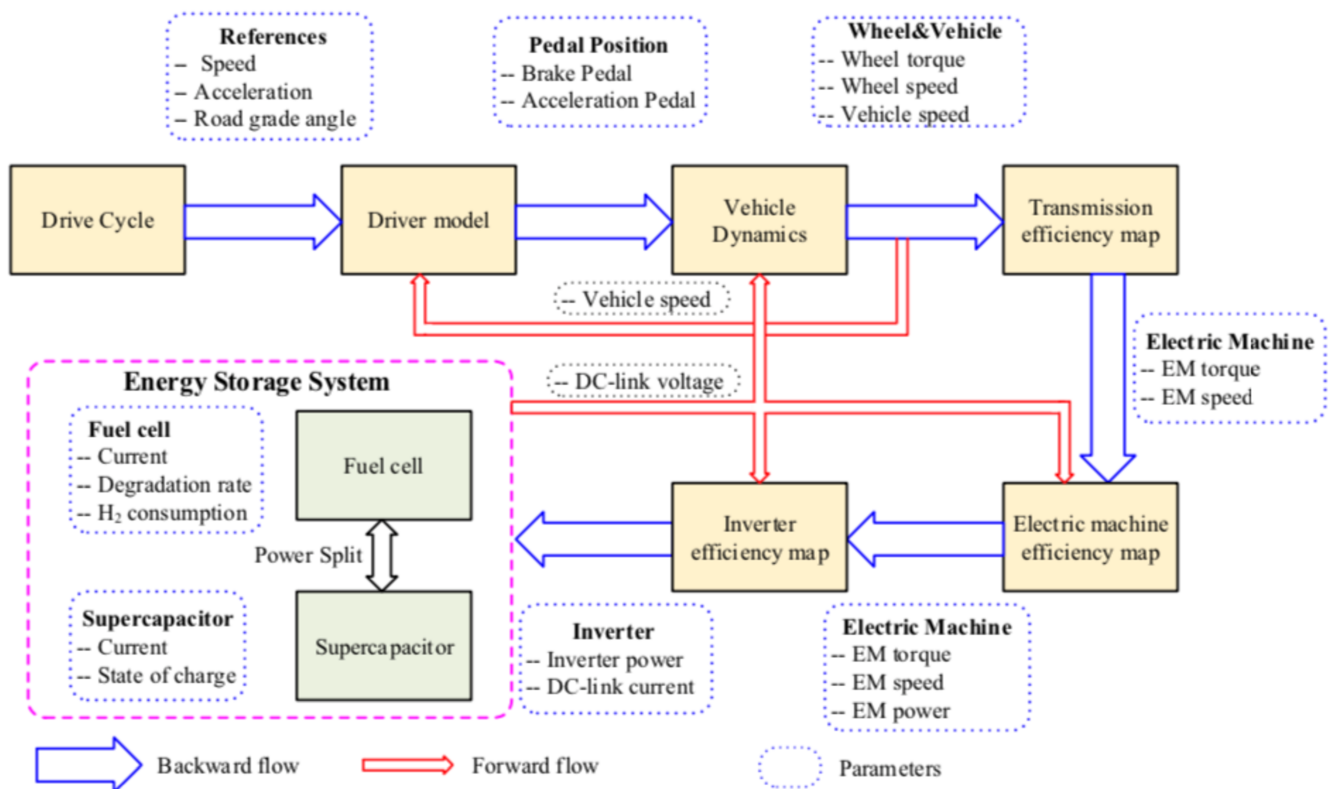
Figur 4 Kvasi-Z-source omriktare kan användas för att förstärka spänning till motor.
 Inom den streckade områden sitter ett impedansnätverk.

3. Modellering och system simuleringar

En detaljerad modellering av FC/SC baserad fordonssystem har framställts. En omfattande utvärdering av FC-drivsystem, inklusive komponentförluster, har genomförts för flera olika körcykler. Dessutom analyseras det dynamiska beteendet hos FC en SC under acceleration och WLTC-cykeln.

Simuleringen genomförs för att utvärdera fordonsprestanda och ge insikt i förbättring av fordonsgesamt och optimering avseende den varierade likspänningsspänningen. Skillnaderna i genomsnittlig verkningsgrader för olika körcykler är relativt små, vilket beror på hastighetsnivåerna och accelerationen.

I det systemet fungerar superkondensatorer som låg pass filter och kan dämpa bort toppen från belastning. För mer detaljer om komponent modellering och system simulering, läs vår publikation [2].



Figur 5 Komponent modellering och system simulering under olika körcyklar

4. Experimental setup och utvärdering

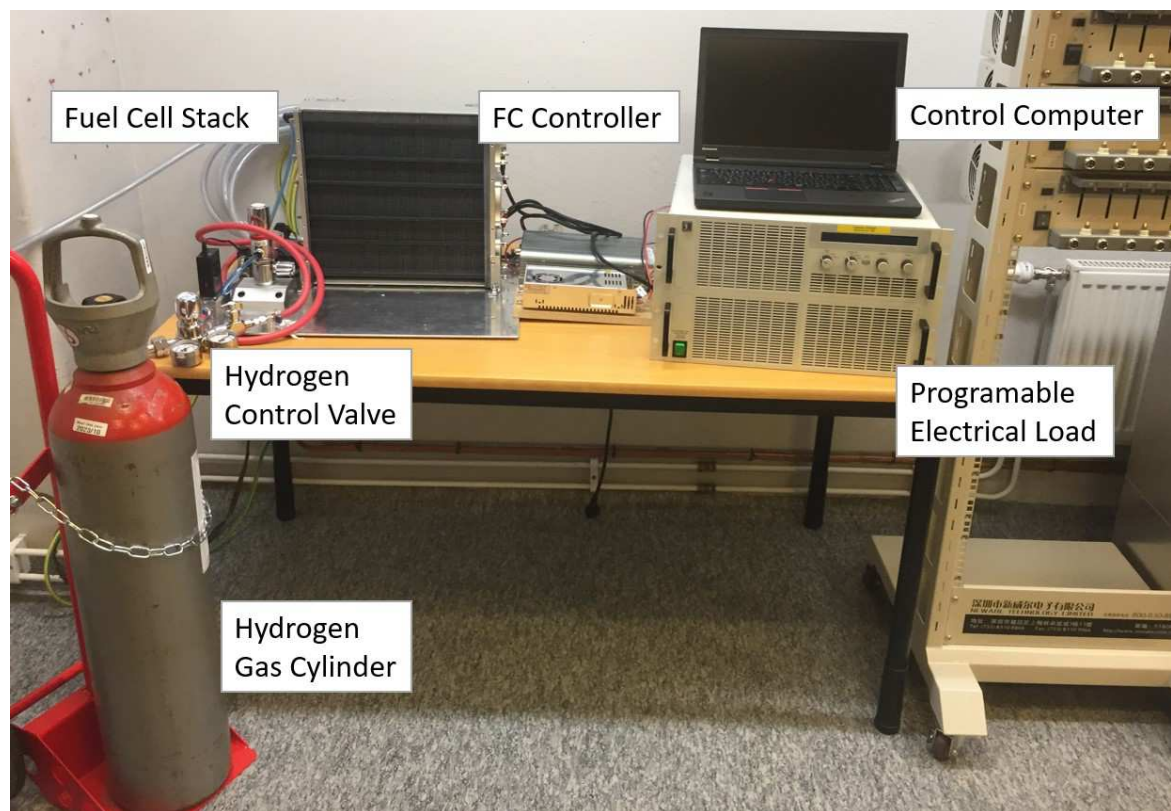
Under projekttiden har vi byggt en labb uppställning för att verifiera olika bränslecell drivlina koncept. Figur 6 visar en del av labb utrustningar i brand säkrade labb på Chalmers.

Bränslecell stacken är 72 V, 3 kW luftkylt från Horizon Fuel Cell Technology. Det är mycket enklare att använda luftkylt variant inställt av väska kylt, speciellt för låg effekt tillämpningar.

Superkondensatorer K2 Ultracapacitor är från Maxwell Technologies. Nominal cell spänning är 2,85 V. Kapacitansen per cell är 3400 Farader. Max ström per cell är 2500 A. Antal av kondensatorer som är i series kopplade är 24 för att nå 72 V bränslecells tomgång spänning.

Vätgas lagras under 200 bar och kommer från AGA AB. Vi testade med HiQ Hydrogen 4.5 som innehåller högre CO än bränslecell stack tillåter. Under provkörning uppnår effekten från bränslecell inte till den specificerade värden. Vi ska testa HiQ Hydrogen 6.0 senare.

Systemet har inte hunnit att testa med full effekt eftersom renovering av labbet och säkerhet process av vätgas installation dröjer ut mycket på tid. Vi planerar ordentliga tester under hösten 2019. Rapportering om resultaten ska ske under licentiat samarium under första kvartal 2020.



Figur 6 Bränslecell labb utrustningar i brand säkrade labb på Chalmers

Diskussion

Vätgas baserad energisystem betraktas som en av mesta hållbara energisystem i framtiden. I systemet, elektriska energi från sol, vind och vatten omvandlas till vätgas genom elektrolyser. Vätgas kan lagras och transporteras till användningspunkter. Vätgas omvandlas tillbaka el genom bränslecell stack i fordon eller hus. Det är ett idealt hållbart system.

För att utveckla och använda sådan system, vi behöver att lära känna tekniken och dess potential. Mer kunskap om vätgas och hantering i vår utbildning och forskning system behövs. Fordon industrin har stor förtroende i vätgas drivlina och rankar den högre än batteri teknik för längre perspektiv.

Svenska fordon industrin ligger liten efter i användning av bränslecell teknik. Men det finns stor behov för att komma ikapp.

Projektet är bara en förstudie om hur kan vätgas bil drivlina konstrueras mer kosteffektivt med mindre krav på effekt av bränslecell stack and utökade livslängden. Resultaten visar att koncepten kan vara en bra alternativ för budget vätgas drivsystem.

Publikationslista

Vetenskapliga artiklar publicerades tillsammans med SEC doktorandprojekt:

- [1] Qian Xun, Yujing Liu. Evaluation of Fluctuating Voltage Topology with Fuel Cells and Supercapacitors for Automotive Applications. International Journal of Energy Research. 2019, pp. 1-13.
- [2] Qian Xun, Yujing Liu, Jian Zhao and Emma Grunditz. Modelling and Simulation of Fuel Cells/Supercapacitor passive hybrid vehicle system. 11th Annual Energy Conversion Congress and Exposition, Baltimore, MD. Sep. 29-Oct.3, 2019.
- [3] Qian Xun, Yujing Liu, Elna Holmberg. A comparative study of fuel cell electric vehicles hybridization with battery or supercapacitor. International symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2018, 20-22 Jun., Amalfi, Italy.
- [4] Qian Xun, Yujing Liu. Commutation Torque-ripple minimization for brushless DC motor based on quasi-Z-source inverter. International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2018, 3-6 Sep., Alexandroupoulos, Greece.

Referenser, källor

För referenser, läs referenslistor i vår publikationer.

Bilagor

- [1]. Administrativ bilaga.
- [2]. Presentation material om bränslecell teknik för fordon tillämpningar (in English).
- [3]. Fyra vetenskapliga artiklar (in English).