

Återkopplad Diesel del 1

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Återkopplad Diesel	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Closed loop diesel control	
Ev. Energimyndighetens program Energi och Miljö	Tidplan Slutrapport 2014-05-31
Total projektkostnad 4 658 477 SEK	Energimyndighetens andel av kostnaden i %/kr 2 326 154 SEK
Ev. rapporttitel hos stödmottagaren Slutrapport Återkopplad Diesel del 1	Ev. rapportnr hos stödmottagaren
Universitet/högskola/företag Scania CV AB	Avdelning/institution NMED
Adress 151 87 Södertälje	Organisationsnummer 556084-0976
Namn och e-post - projektledare Ola Stenlås, ola.stenlaas@scania.com	
Namn och e-post – Huvudförfattare/ medförfattare/projektmedlemmar/doktorander Ola Stenlås, ola.stenlaas@scania.com Per Tunestål, per.tunestal@energy.lth.se Bengt Johansson, bengt.johansson@energy.lth.se Roger Hälleberg, roger.halleberg@scania.com Mats Jennische, mats.jennische@scania.com Christer Eriksson, christer.eriksson@scania.com Eric Olofsson, eric.olofsson@scania.com Kenan Muric, kenan.muric@scania.com Claes-Göran Zander, e-postadress ej tillgänglig	
Nyckelord: 5-7 st Diesel, Motor, Reglering, In-Cycle, Insprutning	

Återkopplad Diesel del 2

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Återkopplad Diesel del 2	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Closed loop diesel control part 2	
Ev. Energimyndighetens program Energi och Miljö	Tidplan Slutrapport 2018-08-31
Total projektkostnad 5 448 500 SEK	Energimyndighetens andel av kostnaden i %/kr 2 724 250 SEK
Ev. rapporttitel hos stödmottagaren Slutrapport Återkopplad Diesel del 2	Ev. rapportnr hos stödmottagaren
Universitet/högskola/företag Scania CV AB	Avdelning/institution NEPP
Adress 151 87 Södertälje	Organisationsnummer 556084-0976
Namn och e-post - projektledare Ola Stenlås, ola.stenlaas@scania.com	
Namn och e-post – Huvudförfattare/ medförfattare/projektdeltagare/doktorander Ola Stenlås, ola.stenlaas@scania.com Per Tunestål, per.tunestal@energy.lth.se Martin Tuner, martin.tuner@energy.lth.se Roger Hälleberg, roger.halleberg@scania.com Thomas Colton, thomas.colton@scania.com Carlos Jorques Moreno, carlos.moreno@scania.com	
Nyckelord: 5-7 st Diesel, Motor, Reglering, In-Cycle, Insprutning, Pilot, Main	

Återkopplad Diesel del 3

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Återkopplad Diesel del 3	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Closed loop diesel control part 3	
Ev. Energimyndighetens program Energi och Miljö	Tidplan Slutrapport 2021-10-01
Total projektkostnad 5 242 000 SEK	Energimyndighetens andel av kostnaden i %/kr 2 621 000 SEK
Ev. rapporttitel hos stödmottagaren Slutrapport Återkopplad Diesel del 3	Ev. rapportnr hos stödmottagaren
Universitet/högskola/företag Scania CV AB	Avdelning/institution NEPP
Adress 151 87 Södertälje	Organisationsnummer 556084-0976
Namn och e-post - projektledare Ola Stenlås, ola.stenlaas@scania.com	
Namn och e-post – Huvudförfattare/ medförfattare/projektdeltagare/doktorander Ola Stenlås, ola.stenlaas@scania.com Per Tunestål, per.tunestal@energy.lth.se Marcus Lundgren, marcus.lundgren@energy.lth.se Roger Hälleberg, roger.halleberg@scania.com Jonas Holmborn, jonas.holmborn@scania.com Carlos Jorques Moreno, carlos.jorques@scania.com Ivan Anagrius West, ivan.anagrius@gmail.com Fredrik Haslestad, fredrik.haslestad@scania.com Ola Jönsson, ola.jonsson@scania.com	
Nyckelord: 5-7 st Diesel, Motor, Reglering, In-Cycle, Insprutning, Pilot, Main	

Sammanfattning

I projektet Återkopplad Diesel har snabbast tänkbara insprutningsreglering (återkoppling under förbränningscykeln) undersökts.

Studien har, istället för som de tänkta två doktorandprojekten, genomförts som två licentiandprojekt och ett doktorandprojekt.

Forskningen syftade till att undersöka möjligheten att på denna snabba tidsbas reglera cylindertrycket och emissionerna. Detta har genomförts och demonstrerats. Minskade variationer i spridningen av förbränningen har uppnåtts tack vare bättre förståelse för och reglering av interaktionen mellan pilot och huvudinsprutning. En potential för ökning av den totala verkningsgraden om 0.6%_{enheter} (fossil dieseldrift) respektive 1.7%_{enheter} (biodieseldrift) har visats, med en ytterligare potential vid låglastdrift om 0.6-0.8%_{enheter}.

Forskningen syftade även till att stärka den akademiska kompetensen vid såväl akademi som industri inom området motorstyrning.

Projektet har uppfyllt dessa mål.

Summary

Closed loop diesel control had the aim to investigate in-cycle closed loop DI combustion control.

The project was conducted as two licentiate projects and one PhD project instead of the two planned PhD projects.

The research focused on the possibility to use fast closed loop control to control the cylinder pressure and the emissions from a diesel engine. Decreased variations in the combustion has been achieved by increased knowledge on and control of the interaction between pilot and main injection. A potential to increase the efficiency with 0.6%_{unit} (fossil diesel operation) and 1.7%_{unit} (bio diesel operation) has been demonstrated, with an additional low load operation potential of 0.6-0.8%_{unit}.

Improved competence within the field of engine control, at both the academy partner and the industry partner, was also a project focus area.

The project fulfilled the focus areas.

Inledning

Utvecklingen av tyngre fordon drivs till stor del av lagstadgade krav och kundernas önskemål om körbarhet och ekonomi. De lagstadgade kraven har fram till ett antal år sedan, för dieselmotorer, varit drivna mot att sänka emissionsnivåerna vad gäller kolmonoxid (CO), kolväte (HC), kväveoxider (NO_x), sot/partiklar (PM) och buller. De senaste decennierna har också koldioxidutsläpp (CO₂) blivit en allt viktigare faktor i debatten.

I koldioxiddebatten ingår många aspekter som bland annat koldioxidneutrala bränslen och olika hybridlösningar som ska minska utsläppen av växthusgasen. Dock är det än så länge inte aktuellt att helt fasa ut förbränningsmotorn och därmed driver lag- och kundkraven på förbättringar av motorn. När det gäller att minska koldioxid handlar det om att öka verkningsgraden på motorn. Detta innebär att man genererar mer arbete per förbrukad bränslemängd. Tack vare dessa krav har ”nya” förbränningskoncept utvecklats. Bland de ”nya” koncepten finns kombinationer mellan ottoförbränning och dieselförbränning, t.ex. HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) och PPC (Partially Premixed Combustion). Tanken är att en ökad verkningsgrad skall gå hand i hand med minskade skadliga emissionerna. För att minska de senare, främst NO_x och sot, finns tekniska lösningar på motorsidan. Det går att dela upp dessa lösningar i två huvudspår, direkt förbränningsrelaterade och avgasbehandling. I den förbränningsrelaterade delen ingår t.ex. nya insprutningssystem, återcirkulation av avgaser (EGR) och dubbel överladdning medan avgasbehandlingsdelen består av katalytiska renare, partikelfilter och NO_x-fällor.

Resultatet av de ökade kraven och teknikutvecklingen som följt dessa är att en motor idag har ökat extremt i komplexitet i jämförelse med äldre motorer. Detta leder till svårigheter när motorstyrningen ska utvecklas och kalibreras. Under statisk körning (en driftspunkt) kan styrsystemen optimeras relativt enkelt, även om det kräver en hel del arbete för att uppfylla ställda krav. Lösningen av detta problem kallas mappning. Styrsystemet byggs upp av ett antal stora matriser (mappar) för de statistiska driftspunkterna. Styrsystemet känner då, med hjälp av ett stort antal givare, till var i mapparna motorns driftspunkt befinner sig för stunden och ställer på så sätt in alla ställdon så att de förinställda villkoren uppfylls. Under stationära driftsförhållanden ingår dock mycket transienter och dynamiken de ger upphov till gör det svårare att optimera. Motorn är ett kontinuerligt system medan det i mappen finns ett antal diskreta punkter och det blir då uppenbart att det inte går att få en perfekt överensstämmelse i alla driftsfall. Utöver nyss nämnda statistiska problem så finns det vid transient drift många olika förlopp, förlopp som definieras av olika tidskonstanter. Insprutningssystemet är relativt snabbt medan gasväxlingen, inkluderande turbo och avgasrecirkulering är mycket långsammare. Att åstadkomma en tillfredsställande transient mappning med allt detta inräknat är inte en helt trivial uppgift.

För att lösa problemen kring transientprestanda används i en ökande utsträckning avancerad reglerteknik inom motorindustrin. I projektet Återkopplad diesel är tanken att avancerad reglerteknik ska användas för att styra insprutningen på snabbast tänkbara tidsbas under förbränningscykeln. I praktiken innebär detta att

en önskad motorlast skickas till styrsystemet varvid den automatiska styrningen ser till att önskemålet uppfylls inom rimlig tid och med optimering av bränsleförbrukning och emissioner.

I fortsättningen och förfining av det arbete som gjordes i den första delen av Återkopplad Diesel (del 1 och del 2) så fokuserar Återkopplad Diesel del 3 med projektmål att i realtid modellera insprutningsförloppets påverkan på förbränningen i cylindern och realtidsberäkna/-reglera förloppet. Delprojektet fokuserar på att prediktera och reglera tändfördröjning och värmefrigörelse vid pilot- och huvudförbränning för att på detta sätt kunna minska förbränningsvariationen och där igenom öka verkningsgraden och bränsleflexibiliteten. Även diagnos och reglering av utebliven pilotförbränning studerades liksom ny regulatordesign för att täcka in motorns arbetsområde och tillåta anpassning till biodrivmedel. Den ökade verkningsgraden och bränsleflexibiliteten möjliggör minskade utsläpp av växthusgaser.

Denna rapport rapporterar såväl tidigare projektdelar i Återkopplad Diesel som Återkopplad Diesel del 2 och den senast avslutade projektdelen, Återkopplad Diesel del 3, då denna är en direkt utvidgning föregående projektdel.

Huvudresultat

I projektet Återkopplad Diesels första del har snabbast tänkbara insprutningsreglering (återkoppling under förbränningscykeln, "in-cycle") undersökts. Forskningen syftade till att undersöka möjligheten att på denna snabba tidsbas reglera cylindertrycket och emissionerna.

Motorns cylindertryck och kväveoxidemissioner har reglerats återkopplat "in-cycle" med en diagnostisk reglermodell. Projektet har identifierat ett antal svårigheter med konceptet, kvantifierade stabilitetsvinsterna gentemot motorns last och visat att det i vissa fall är möjligt att reglera kväveoxider "in-cycle".

Projektets andra delsteg har studerat pilotinsprutning, pilotförbränning och hur main-förbränningen påverkas av pilotinsprutningen. En "in-cycle" detektionsalgoritm (virtuell sensor) för pilotförbränningens påverkan på main-förbränningen har utvecklats och testats. Diagnostiser- och reglerbarheten har kvantifierats och en regulator har designats/validerats. "In-cycle" återkopplad reglering av pilot-main systemet har därefter demonstrerats och vinsterna i verkningsgrad har kvantifierats.

Projektets tredje delsteg har även det studerat pilotinsprutning, pilotförbränning och hur main-förbränningen påverkas av pilotinsprutningen. Fokus har här varit snabba och robusta modeller för prediktion i ett reglertekniskt kontext. Studie av utebliven pilot samt regulatordesign för kompensation av dessa har genomförts. Den prediktiva regulatorn som utvecklats har optimerats och dess referensvärden har anpassats. Dessa delar har genomförts som ett moduluppbyggt system som är anpassningsbart efter utökad komplexitet. Krav på hårdvara för realisering av konceptet har genomlysts och definierats i form av minnesareor och FPGA-prestanda. Den uppdaterade "In-cycle" återkopplad reglering av pilot-main

systemet har därefter demonstrerats och vinsterna i verkningsgrad har kvantifierats.

Tre licentiatexamina har examinerats inom projektet. En av dessa har gått vidare och avlagt doktorsexamen inom projektets ramar.

Måluppfyllelse

Projektet har ett antal mål. De är: Att visa att en reglerstrategi ”in-cycle” kan genomföras. Att öka den akademiska kompetensen inom området motorstyrning. Att bidra till spridningen av akademiska resultat från akademien till industrin. Att utbilda kompetenta medarbetare som genom sin kompetens stärker svensk industris konkurrenskraft. Och att bidra till en förbättrad miljö genom att främst bidra till framtagande av kunskap som möjliggör minskade växthusgasutsläpp.

Samtliga tre forskarstudenter har inom sina respektive områden visat att en ”in-cycle” reglerstrategi kan genomföras. Arbetet med projekten har bidragit till kompetensuppbyggnad i akademien inom fältet ”in-cycle” reglering. Samverkan kring projekten, med industrilokaliserade forskarstudenter och en industribaserad biträdande handledare har ökat mötestillfällena mellan industri och akademi med effekt att resultat, inte bara från de aktuella projekten, kommit till industrins kännedom. Två licentiat och en doktor har utbildats och alla tre är idag verksamma i industrin. Resultaten, främst från det senaste delprojektet, har visat på potential för minskade utsläpp av växthusgaser.

Projektets uppfattning är därmed att dessa mål har uppfyllts.

Projektmål Reglerstrategi

Reglerstrategin som projektet syftar till att visa är möjligheten att reglera insprutningen baserat på mätdata tagna i samma förbränningscykel. Målet med regleringen är, enligt målen, att påverka cylindertryck, koldioxidutsläpp, kväveoxidutsläpp och eventuellt partikelutsläpp.

Projektet har visat att det är möjligt att reglera motorns last (indikerat cylindertryck, IMEP) baserat på i samma cykel uppmätt cylindertryck.

Projektet har vidare visat på svårigheterna med att reglera kväveoxidutsläpp baserat på i samma cykel uppmätt cylindertryck men även visat att det i vissa fall faktiskt är möjligt.

Projektet har visat att det är möjligt att påverka kväveoxidutsläppen från motorn genom i motorns cylinder direktinsprutat reduktionsmedel. Även i detta fall reglerades insprutningen baserat på i samma cykel uppmätt cylindertryck.

Projektet har reglerat systemet pilot och huvudinsprutning. Det har demonstrerat att spridningen i verkningsgrad kan minskas på detta sätt och att potentialen för ökning av den totala verkningsgraden uppgår till drygt 0.6%_{enheter} för motorer drivna av fossil diesel och till 1.7%_{enheter} för biodiesel (FAME). Potentialen för verkningsgradshöjning vid låglastdrift är ytterligare ungefär 0.6-0.8%_{enheter} högre. När ovanstående resultat ställs mot projektets mål om 1.5% förbättring i verkningsgrad drar vi slutsatsen att projektets mål är uppfyllda.

Projektet har inte gjort några försök att aktivt reglera partikelutsläppen från motorn. Detta då teknikutvecklingen och lagkrav i kombination medfört införande av mycket effektiv avgasbehandling i form av partikelfilter.

Vid reglering av motorns ljudemissioner har regleringen mindre effekt då förbränningen fungerar, ca 0.2 bar/CAD i sänkt tryckökningsnivå. Vid misständning uppnår regulatort större framgång och ca 6 bar/cad minskad tryckstegring uppnås.

Den föreslagna regulatort med täckning av motorns driftområde har stöd för kallstartsreglering, men detta har inte studerats som ett specialfall i projektet.

Projektmål stärkt akademisk kompetens och kompetensspridning

Den ökade akademiska kompetensen inom området motorstyrning som projektet eftersträvade hade som målsättningen att möjliggöra utexaminerandet av en teknologie doktor i vardera delsteg. Projektet har inte resulterat i detta då den första forskarstudenten valde att inrikta forskarstudierna på licentiatexamina och då projektet del 2 enbart finansierades fram till licentiat. Projektet har resulterat i tre teknologie licentiatexamina och, i det tredje delsteget där Carlos Jorques Moreno gick vidare från licentiat, en doktorsexamen. Samtliga studenter gått vidare till industriell verksamhet inom området reglering.

Projektet har stärkt den akademiska kompetensen vid såväl akademiparten som industriparten genom att regelbundet sammanföra akademins och industrins experter inom området.

Arbetet under Återkopplad Diesels del 1-3 har totalt genererat elva patentansökningar. Åtta av dessa är godkända patent och två behandlas fortfarande av PRV.

Arbetet med Återkopplad diesels snabba reglering har även inspirerat till mer industriforskning kring diagnos och långsammare reglering av dieselmotorns förbränningsförlopp. Totalt tolv examensarbeten har genomförts och vidare arbete inom dessa områden har resulterat i författandet av fem publikationer. Den interna forskningen på ämnet har även resulterat i ytterligare 15 patentansökningar varav fyra idag är godkända patent.

Effekter i samhället

Tunga fordons motorer saknar idag nödvändiga sensorer och dess motorstyrenheter saknar erforderlig beräkningskapacitet för att möjliggöra implementering av projektresultaten. Införandet av nya motorgenerationer och motorstyrenheter sker för tunga fordonstillverkare normalt med intervall på mellan tio och tjugo år varför inga samhällspåverkande förändringar är möjliga innan nämnda uppgraderingar skett.

Under projektets löptid har lätta fordonsmotorer med en sensoruppsättning som möjliggör implementering av projektresultaten kommit ut på marknaden. Det är dock inte troligt att deras styrsystem möjliggör implementation av projektresultaten. Den observerade utvecklingen på lätta fordon talar dock för att

det pågår parallell teknikutveckling som kan möjliggöra en framtida realisering av Återkopplad Diesels projektresultat.

Genomförande

Projektindelning

Projektet har genomförts som tre licentiatstudieperioder och en utökning för studier till doktor. Studenterna, Claes-Göran Zander, Kenan Muric och Carlos Jorques Moreno, har med stöd av handledare och styrgrupp, tillfört de huvudsakliga bidragen till projektets resultat.

Inom projektet ingår akademiska studier och avhandlingsarbete. På avdelningen för förbränningsmotorer, där huvuddelen av projektet utförs, läses minst 25% (motsvarande ett halvt års heltidsstudier för licentiatexamen) akademiska kurser under projektets gång. Resterande tid lägges på forskning. Utöver detta tillkommer tid för undervisning och tid inom industrin samt längre planerad frånvaro t.ex. föräldraledighet. Detta gör att kalendertiden för forskningsprojekten ofta blir längre än de två/fyra år som formellt sett krävs för en licentiat-/doktorsexamen. Projektet Återkopplad Diesel har tagit sju års kalendertid i anspråk, Återkopplad diesel del 2 två och ett halvt och Återkopplad diesel del 3 närmare tre år. Det bör betonas att det i denna tid också ingår en del undervisning, föräldraledighet och industritid samt avbrott för rekrytering av forskarstudent efter avlagda examina. I den sista projektdelen ingår även effekter av Corona pandemin såsom permittering.

Då de tre forskarstudenterna klarat av sina kurspoäng kommer följande delar av rapporten att ägnas åt redovisning av vad som uppnåtts under avhandlingsarbetet.

Avhandlingsarbete för Claes-Göran Zander

Forskning inom förbränningsmotorer är till stor del experimentell och därför har en betydande del av det laborativa arbetet lagts på att förfärdiga en fullt fungerande testcell. Allt från motordetaljer till styrsystem har gått igenom för att få experimentell utrustning att fungera kontinuerligt. I nedanstående del redovisas vad som gjorts i testcellen och därefter redovisas publikationsarbetet.

Testcell

Hårdvara

Då projektet startade var den för projektet avsedda testcellen inte uppdaterad med den nya generationens motorplattform. Den första uppgiften blev att byta ut en äldre motor mot en av den senaste motorgenerationen. Detta är tyvärr inte så enkelt som det låter. I en testcell är förbränningsmotorn, på utgående axel, kopplad till en broms, i detta fallet en elektrisk motor. Denna tar hand om den av motorn levererade axeleffekten och ser till att varvtalet hålls konstant.

Varvtalsregleringen innebär att bromsen ibland måste hålla mot och ibland hjälpa till, beroende på hur mycket effekt motorn genererar. I den aktuella testcellen är denna elmotor specificerad för att ta hand om effekten från en lastbilsmotor driven på en cylinder.

Den uppgraderade motorn körs på en cylinder. I vanliga fall är den aktuella typen av Scaniamotor sexcylindrig. Detta innebär att fem cylindrar fick kopplas bort vilket ger vissa komplikationer för driften. De system som finns på en produktionsmotor när det gäller gasväxling (turbo, EGR) är inte anpassade för att köras med bara en av sex cylindrar inkopplade och de fick därför byggas om. I praktiken byggdes insug och avgassystem om från grunden. Detta innebär en luftledning från ett externt kompressormatrat system där insugstrycket är styrt med hjälp av elektronik. På avgassidan installerades två ventiler. Dels en mottrycksventil som gör så att avgastrycket kan regleras och dels en ventil mellan avgassamlaren och insuget för reglering av mängden avgaser som skall gå tillbaka in i motorn (EGR). Naturligtvis styrs båda ventiler elektroniskt. Avgaserna som går tillbaka in i motorn behöver kylas och detta kräver en kylare, i detta fallet en vattenkyld värmeväxlare, i EGR-ledningen in till insuget.

Utöver detta gjordes modifikationer på insprutningssystemet, på kylsystemet och på kolvarna. Ett antal sensorer och mätinstrument används för att kunna mäta vad som händer med motorn under drift. Det handlar det om temperaturgivare, tryckgivare, flödesmätare, bränslevåg och emissionsinstrument som installerats.

Mjukvara

För att en testcell skall fungera behövs ett styrsystem som gör att alla aktuatorer gör vad de ska och att all data samlas in under mätning. I startskedet av det rapporterade projektet, det vill säga i de två första artiklarna, användes programvara som konstruerats av andra forskare på högskolan tillsammans med programvara utvecklad vid Scania. De program som skrivits lokalt vid LTH var anpassade för att samla in data och styra externa ställdon och mätinstrument. Scaniaprogrammen kommunicerade med styrenheten på motorn och styrde därigenom insprutningen av bränsle. De senare programmets begränsningar gjorde att det inte fanns total frihet i styrningen av insprutningssystemet när det gällde insprutningstidpunkter och insprutningshastighet. Lösningen på dessa begränsningar blev att konstruera ett nytt styrsystem. Grundtanken var att allt skulle skötas från samma system och att systemet samtidigt skulle vara snabbt för att hinna styra insprutningen under cykeln. Då projektet är styr och reglerinriktat ställs det krav på determinism vilket innebär att till exempel exekveringen av data-loopar måste ske konsekvent med en på förhand specificerad tid. För att de ställda villkoren ska uppfyllas måste i detta fall ett realtidsoperativsystem användas. Lösningen visade sig vara användandet av National Instruments mätutrustning tillsammans med deras flödesbaserade programmeringsverktyg LabVIEW. I det tillhörande mjukvarupaketet finns ett realtidsoperativsystem som är kompatibelt med cellens mätutrustning. I det här fallet är mätutrustningen som används två datainsamlingskort tillsammans med en FPGA. Datainsamlingskortet som är av standardiserad typ används för att sampla data med hög hastighet. Cylindertrycket är en typisk variabel som samplas med hög hastighet.

En FPGA kan enkelt beskrivas som en liten dator med den skillnaden att beräkningar kan ske med äkta parallellitet. Detta är en skillnad från en vanlig PC med enkärnig processor där instruktioner exekveras sekventiellt. Fördelen med

parallellitet är att många beräkningar kan ske samtidigt med hög hastighet och reglering kan utföras snabbt med hög precision. Systemet som utvecklats består övergripande av tre nivåer. Den högsta nivån är Windowsbaserad (kallas värd) och det är här det användargränssnittet finns. Härifrån skickas alla styrparametrar, insamlad data observeras och kommunikation sker med externa instrument som emissionsinstrument, bränslevåg och datalogger. Nästa nivå är realtidsdatorn där höghastighetssampling och loggande av mätdata sker samt där en del långsammare reglering och kommunikation med aktuatorer utförs. Realtidsdatorn får och skickar data till värddatorn över det interna nätverket. I realtidsdator sitter också de två mätkorten tillsammans med FPGA-kortet. Den lägsta nivån är FPGA-kortet där den extremt snabba regleringen kopplad till insprutningssystemet sker. Insprutningsregleringen består av insprutningstryck-, timing- och durationsreglering. Kommunikation med FPGA-kortet sker över PCI-bussen på realtidsdatorn.

Publikationer

“Modeling the Intake CO₂-level during Load Transients on a 1-Cylinder Heavy Duty DI Diesel Engine”

(SAE 2009-24-0039, C-G. Zander, O. Stenlås, P. Tunestål and B. Johansson)

Den första undersökningen som gjordes var kopplad till hur mängden avgaser som recirkuleras in i motorn varierar under lasttransienter. Detta grundades på ett antal experimentellt uppmätta lasttransienter som uppvisade olinjäriteter i förbränningstimen. Det gick att dra slutsatsen att olinjäriteterna berodde på variationer i mängden avgaser som recirkulerades in i motorn.

Gasväxlingsystemet använder långsamma ventiler som har mindre dynamik än systemet på en fullmotor. Tack vare den tröga dynamiken gick det att sätta upp en modell genom antagandet att nya avgaser blandas med gamla genom perfekt omblandning i en tank. Denna blandning antas sedan gå till en ny tank där ännu en perfekt omblandning sker med luft. Efter detta dras gasmixen in i cylindern och förbränning sker varvid nya avgaser bildas. Modellen implementerades i Matlab och jämfördes med experimentella data. Den enkla modellen visade sig beskriva ändringarna i avgasmängden i insuget relativt bra. Artikeln publicerades inom SAE och presentationen hölls på Capri hösten 2009.

“Study of a Heavy Duty Euro5 EGR-engine Sensitivity to Fuel Change with Emphasis on Combustion and Emission Formation”

(SAE 2010-01-0872, C-G. Zander, O. Stenlås, P. Tunestål and B. Johansson)

Den andra publikationen är baserad på en serie experiment som gjordes inom industridelen av projektet. Dessa experiment testade fem olika bränslen relativt svensk standarddiesel. Som fristående parametrar undersöktes hur variationer av bränsletryck och insugstemperatur påverkade motorns prestanda för de olika bränslena. Bakgrunden till studien är att bränslekvaliteten varierar för olika marknader och att användningen av FAME ökar. Bränslen som ingick i experimentserien var ren RME, europadiesel med 10% och 30% RME, japansk diesel och en högsvavlig europadiesel. Det kunde konstateras att den japanska dieseln har en högre tendens till att ge missljud i motorn på lägre laster. Orsaken till detta är att den är mer svårantänd och därmed brinner senare under cykeln

relativt övriga bränslen. Generellt kunde det också konstateras att kväveoxidemissionerna ökade och sotemissionerna minskade med mängden RME-inblandning i dieselbränslet. Skillnaderna mellan bränslena var dock små med tanke på de stora skillnaderna i bränslespecifikationer. Artikeln publicerades inom SAE och presenterades i Detroit i april 2010.

“In-cycle closed loop control of the fuel injection on a 1-cylinder heavy duty CI-engine”

(ICEF2010-35100, C-G. Zander, P. Tunestål, O. Stenlås and B. Johansson)

Denna publikation är mer inriktad på själva styrningen av insprutningen under cykeln. Insprutningen regleras med FPGA-kortet vilket ger speciella förutsättningar vad gäller snabba beräkningar. De programinstruktioner som utförs på FPGA måste programmeras på en lägre nivå lågnivåtyp än om de programmerats för en vanlig dator. Till exempel finns inte tillgång till decimaltal av den vanliga typen (flyttal) och bara begränsade divisioninstruktioner kan användas.

Tankegången under programmering på FPGA bli därmed skild från den vid vanlig programmering. I artikeln presenteras en speciell variant av värmefrigörelseberäkning. Denna är beräkningsmässigt enkel och snabb men lyckas ändå vara flexibel och den beräknar en heat-release parameter i realtid. Denna parameter kräver i vanliga fall en division men det undviks genom en matematisk omskrivning. Beräkningens noggrannhetsökning visade sig, vid jämförelser med förenklingen att använda ett konstant värde på samma parameter, tyvärr vara precis på gränsen till att vara signifikant. Men en betydande fördel med att använda ett beräknat värde på parametern är att stabiliteten för värmefrigörelseberäkningen ökar. Fortsättningsvis används den nya beräkningsalgoritmen för direkt återkoppling under cykeln.

Återkoppling i en förbränningscykel har bara rapporterats av enstaka forskare tidigare. Återkopplingen i denna publikation baseras på tryckspåret som härrör från en första insprutning och som reglerar insprutningstidpunkt och duration på en andra insprutning baserat på slutsatsen av analysen. Själva återkopplingen kan beskrivas i två delar vilka båda baseras på återkoppling av cylindertrycket. Den första delen bygger på direkt mätning av cylindertrycket. Den första bränsleinsprutningen sker och det uppmätta cylindertrycket vid ett bestämt vevinkelintervall jämförs sampel för sampel med ett tidigare uppmätt referenstryck. Detta genererar en differens och denna differens återkopplas till nästa insprutning under cykel genom en regulator som styr insprutningstidpunkten. Om trycket är för lågt flyttas den andra insprutningen fram vilket leder till en kompensation av cylindertrycket. Den andra återkopplingen bygger på värmefrigörelseberäkningen som redovisas i den första delen av artikeln. På detta sätt jämförs värmefrigörelsen från den första insprutningen med ett tidigare beräknat referensspår. En andra regulator reglerar durationen i den andra insprutningen. Om för lite energi har frigjorts under den första insprutningen regleras mängden under den andra insprutningen upp. Denna artikel är publicerad av ASME och presenterad under hösten 2010 i San Antonio.

”Single-Cylinder Diesel Engine Experiments, Modeling and In-Cycle Control with Heat-Release Emphasis”

(C-G. Zander, Licentiatavhandling Lunds Tekniska Högskola, ISRN LUTMDN/TMHP-10/7069-SE, ISSN 0282-1990)

Detta är Zanders licentiatavhandling där han sammanfattar publikationerna ovan och sätter dem i relation till varandra och fältets forskning.

*Sammanfattning av Claes-Göran Zanders bidrag till
projektmåls uppfyllnad*

Zander iordningställde provcell och tog en ny experimentmotor i drift. Han genomförde därefter den första ”in-cycle” återkopplade regleringen av motorns last med en diagnostisk reglermodell, identifierade ett antal svårigheter med konceptet och kvantifierade stabilitetsvinsterna gentemot last.

Avhandlingsarbete för Kenan Muric

Muric hade förmånen att påbörja sin forskning med en fungerande experimentmotor i en fungerande provcell. Hans arbetsinsats i provcellen har därför inriktats mer mot vidareutveckling än uppbyggnad även om uppbyggnadsarbete förekom i slutet av projektet (se nedan). Precis som för Zander redovisas här vad som gjorts i testcellen och därefter redovisas det vetenskapliga publikationsarbetet.

Testcell

Hårdvara

Vid projektets början fanns en fungerande experimentmotor i en fungerande provcell. Därför var denna del av Murics arbete initialt relativt litet för de tre tidigast publicerade artiklarna. Mellan artikel tre och fyra flyttades motorn som ett led i LTH:s utveckling av motorlaboratoriet och Muric deltog efter motorflytten i arbetet med drifttagning och validering av riggen i den nya provcellen. I arbetet med den fjärde, avslutande, artikeln har Muric uppgraderat experimentmotorn och dess kringssystem. Det gäller då främst installation av ureainsprutningssystem, SCR-katalysator och reglersystem för ureadosering. Reglersystemet består av temperatur- och koncentrationssensorer samt ställdon för pump och injektor reglering.

Mjukvara

Muric har investerat mycket tid i laboratoriet med att uppgradera och förbättra provcellens styr- och mätsystem. Detta är ett kontinuerligt arbete under hela forskarstudietiden men med arbetspucklar då FPGA-kortet uppgraderades samt under vintern 2013-2014 då motorlaboratoriet vid LTH byggdes om och motorn bytte provcell. Även de planerade studierna för artikel fyra har krävt mycket provcellsarbete. Detta för att få alla sensorers mjukvaruinterface att kommunicera med cellens loggningssystem och för att få motorregleringen att hantera styrning av ureadoseringen.

Publikationer

”Zero-dimensional modeling of NO_x formation using least squares interpolation”, (International Journal of Engine Research 1468087413495843, K. Murić, O. Stenlås and P. Tunestål).

Murics första publikation sammanfattar arbetet som gjorts med att utveckla en NO_x-modell lämpad för snabba beräkningar. Modellen utgår från att de två kemiska och fysikaliska mekanismer som bäst beskriver NO_x-bildningen är den termiska bildningsprocessen och Zeldovich-mekanismen. Temperaturökningen vid förbränning beräknas via det termodynamiska sambandet $dQ = mc_p dT$. Värme som frigörs beräknas med 'heat release'-ekvationen och resultatet används även för att beräkna substansmängden förbränt bränsle. Genom att tillämpa jämviktskemi och Zeldovich-mekanismen kan man beräkna NO_x-bildningen. Eftersom många av beräkningarna kräver en hel del beräkningskraft gjordes en 'alternativ' modell som utnyttjar minstakvadrat-metoden för att reducera beräkningstiden. Metoden utnyttjar väldigt enkla polynom för att exempelvis beräkna jämviktskoncentrationen av syre, specifik värmekapacitet och

temperaturminskningen på grund av dissociationen av vatten och koldioxid. Modellen visar sig ha förutsättningar till att stämma ganska väl (relativt fel vid valideringsprocessen var cirka 11%). Detta är även känt sedan tidigare (se Magnus Andersson eller Rolf Egnell). Det som är intressant är dock att den 'alternativa modellen', baserad på beräkningstekniskt enkla interpolationer, har förutsättningar till att överensstämma mycket väl med ursprungsmodellen, som interpolationerna är baserade på. Eftersom modellen i framtiden ska finnas tillgänglig i realtid är det av yttersta vikt att den är enkel och tillräckligt tidseffektiv.

“A Fast Crank Angle Resolved Zero-Dimensional NO_x Model Implemented on a Field-Programmable Gate Array”

(SAE2013-01-0344, K. Muric, P. Tunestål and O. Stenlåås)

Murics andra publikation behandlar implementeringen av den tidigare publicerade NO_x-modellen på en FPGA med hjälp av LabVIEW. Det som utmärker denna modell är att den anpassades till att kunna implementeras på en FPGA. Detta innebar att stort fokus låg på att välja rätt variabler att tabellera och att divisioner i princip var förbjudna i beräkningarna. Detta för att de är extremt beräkningstunga i en FPGA-implementation.

Även problem med övermappning av FPGA:n behandlades och löstes. Därefter följde testning av FPGA-implementationen för realtidsberäkning av NO_x under körning med experimentmotorn. Studiens resultat var en validerad NO_x-modell som räknar en cykels NO_x på under en vevvinkelgrad. Tiden som krävdes för en modelliteration var ungefär 3 μ s.

A Study on In-Cycle Control of NO_x Using Injection Strategy with a Fast Cylinder Pressure Based Emission Model as Feedback

(SAE2013-01-2603, K. Muric, O. Stenlåås, P. Tunestål and B. Johansson)

Den tredje publikationen behandlar möjligheten att reglera kväveoxidhalten (NO_x) i cylindern under pågående förbränning med en diagnostisk modell kopplad till regleralgoritmen. Modellen och regleralgoritmen implementerades på en FPGA (Field-Programmable Gate Array) som utgör en integrerad del av motorstyrsystemet (sensorer, styrenhet och ställdon). Detta för att möjliggöra den snabba återkoppling som systemet kräver.

Studien visar en av de möjliga strategierna för in-cycle NO_x-reglering med en solenoid insprutare, en tvådelad huvudinsprutning. Resultaten pekar på att det är svårt, men inte omöjligt, att använda denna metod. Svårigheterna ligger i de tidsfördröjningar som systemet har. Mycket låga varvtal och långa insprutningstryck måste användas för att tillräckligt långa insprutningstider skulle nås så att NO_x-regleringen skulle fungera. Dessa motorinställningar leder normalt till höga sotutsläpp från motorn. För att kunna reglera motorns NO_x-nivå utan dessa begränsningar måste en alternativ approach väljas, en approach som inte är lika begränsad av systemets tidsfördröjningar.

Slutsatsen från detta arbete är att prediktiv modellering är nödvändig för att på ett effektivt sätt, över hela last-varvtalsområdet, reglera NO_x in-cycle med hjälp av bränsleinsprutning.

“An In-Cycle based NOx Reduction Strategy using Direct Injection of AdBlue”

(SAE2014-01-2817, K. Muric, O. Stenlås, P. Tunestål and B. Johansson).

Murics fjärde publikation fokuserar på reglering av cylinderintern dosering av reduktionsmedel för NOx-reglering. Regleralgoritmen baseras på de algoritmer för temperatur- och NOx-beräkning som utvecklats för tidigare publikationer. För denna publikation implementeras ny mjukvara för att hantera en ureadoseringsinjektor samt mjukvara för att beräkna och reglera mängd reduktionsmedel och tidpunkt för insprutningen.

Studien visar att det är möjligt att reducera NOx med cylinderintern reduktionsmedelsdosering såväl katalytiskt som ickekatalytiskt. Studien visar också på att det finns många nya utmaningar med det undersökta konceptet både för mjukvaran och hårdvaran.

”In-Cycle Control of Direct Adblue and Diesel Injection for Reduced NOx Emissions”

(K. Muric, Licentiatavhandling Lunds Tekniska Högskola, ISRN LUTMDN/TMHP-14/7089-SE, ISSN 0282-1990)

Detta är Murics licentiatavhandling där han sammanfattar publikationerna ovan och sätter dem i relation till varandra och fältets forskning.

Sammanfattning av Kenan Murics bidrag till projektmålets uppfyllnad

Muric har uppgraderat motorprovcellens mjukvara. Han har därefter utvecklat en snabb NOx-modell, implementerat NOx-modellen i en FPGA med LavVIEW-stöd, validerat NOx-modellen i motorexperiment och genomfört en studie i ”in-cycle” återkopplade regleringen av motorns NOx med en diagnostisk reglermodell. Han har identifierat ett antal svårigheter med konceptet och visat att det i vissa fall är möjligt att reglera NOx ”in-cycle”.

Muric har vidare visat att reglering av NOx-emissioner medelst cylinderintern reduktionsmedelsinsprutning är möjligt såväl katalytiskt som icke katalytiskt.

Avhandlingsarbete för Carlos Jorques Moreno

Även Jorques påbörjade sin forskning med en fungerande experimentmotor i en fungerande provcell och även hans arbetsinsats i provcellen har varit fokuserad på vidareutveckling. På samma sätt som för föregående studenter redovisas här vad som gjorts i testcellen och därefter redovisas det vetenskapliga publikationsarbetet.

Testcell

Hårdvara

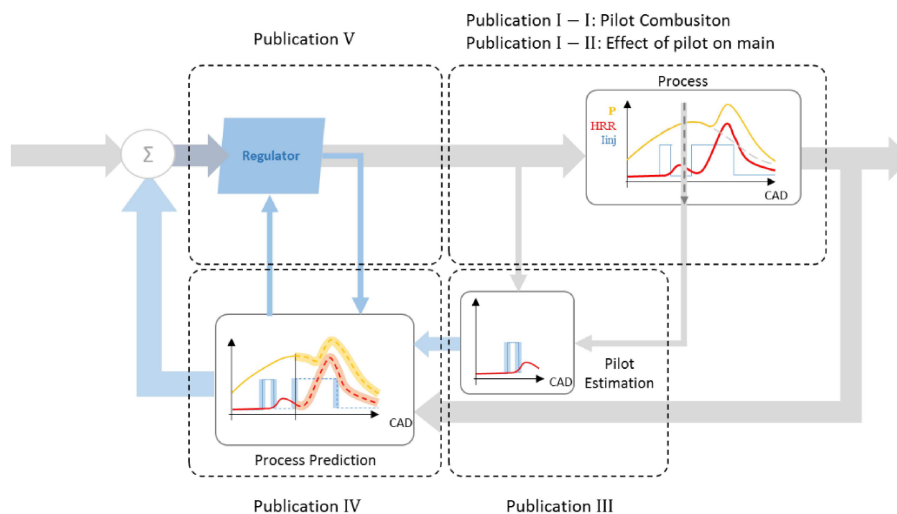
För att kunna dra nytta av synergier med KCFP:s regler tekniska forskning bytte projektet motorplattform från den tidigare använda encylindriga motorn till den flercylindrig motor, byggd på samma motorplattform, som KCFP:s motorregleringsprojekt använde. Detta innebar att det vid projektets början fanns en fungerande experimentmotor i en fungerande provcell. Denna motor var dock inte helt anpassad efter projektets behov och innan Jorques kunde påbörja sin första experimentkampanj behövde dieselinjektorerna bytas mot nya kalibrerade enheter. Sett över hela projektet så har Jorques arbete med hårdvaruförbättringar dock varit litet.

Mjukvara

Jorques arbete med motorregleringsmjukvara har, i och med att experimentmotorn redan vid projektstart hade ett fungerande styrsystem, kunnat begränsas till de för forskningen nödvändiga förbättringarna (redovisas som del i forskningsarbetet).

Publikationer

Jorques avhandlingsarbete delades in i fem publikationer (se figur nedan) till licentiatexamen och ytterligare tio till doktorsexamen. Den första experimentella studien karakteriserade systemet och presenterades i publikation ett och två. En metod för "in-cycle" estimering av piloten utgjorde temat för publikation tre. Publikation fyra undersökte gränserna för predikter- och reglerbarheten av systemet. Som avslutning inför licentiatexamen demonstrerades den återkopplade regleringen "in-cycle" i publikation fem.



Publikation sex genomfördes som ett examensarbete och fokuserade på motorns mekanik och hur en dynamisk approach påverkar utvärdering och modellering av förbränning. Publikation sju, åtta och elva behandlar misständnings detektion och -reglering. Publikation nio går in på prediktiv, modellbaserad, reglering och publikation tio tar upp reglering av flera cylindrar samtidigt. Publikation tolv behandlar börvärdesoptimering. Publikation tretton går in på den modulbaserade programstruktur som möjliggör ett flexibelt användande och undersökande av in-cycle regleringen. Publikation fjorton kvantifierar de krav på elektronikhårdvaran som ett produktionssättande av in-cycle reglering kan kräva. Avslutningsvis, i publikation femtonde, utreds den verkningsgradshöjande potentialen av in-cycle förbränningsreglering av dieselmotorn.

"Investigation of Small Pilot Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine"

(SAE Int. J. Engines 10(3):2017,

C. Jorques Moreno, O. Stenlaas and P. Tunestal)

Jorques första och andra publikation karakteriserar beteendet hos pilot- och huvudförbränning i den aktuella experimentmotorn. Den första publikationen fokuserar på hur pilot förbränningen beter sig då parametrar som pilotinsprutningens start, mängd, bränsletryck och separation från huvudförbränningen varierar. Individuellt kalibrerade dieselinsprutare användes som referens i experimentserien som sträckte sig över för tunga fordon relevanta laster och varvtal. Resultaten visar att cykel till cykel och cylinder till cylinder variationer bidrar till antändnings och förbränningsförloppen. Även bränsletryck och bränslemängd påverkar i vissa fall. Pilotförbränningens cykel till cykel variation minskade med ökande mängd pilotbränsle och bränsletryck. Tändfördröjningen kortades med ökande pilotmängd, ökat bränsletryck och senarelagd pilotinsprutning. Värmefrigörelsen från piloten identifierades som olinjärt beroende av pilotens bränslemängd. Den första, förblandade, förbränningsfasen förbrände merparten av pilotens bränsle i alla fall utom de med högst motorlast.

"Influence of Small Pilot on Main Injection in a Heavy-Duty Diesel Engine"

(SAE2017-01-0708, C. Jorques Moreno, O. Stenlaas and P. Tunestal)

Jorques första och andra publikation karakteriserar beteendet hos pilot och huvudförbränning i den aktuella experimentmotorn. Den andra publikationen fokuserar på hur piloten påverkar huvudförbränningen. I studien, som var experimentell, varierades för pilotförbränningen viktiga parametrar som pilotinsprutningens start, mängd, bränsletryck och separation från huvudförbränningen över för tunga fordon relevanta laster och varvtal. Individuellt kalibrerade dieselinsprutare användes som referens i experimentserien.

Studien visade att effekten av pilotinsprutning på huvudförbränningen kunde delas in i fyra typfall: Huvudinsprutning under pilotbränslets omblandningsfas. Huvudinsprutning under pilotförbränningens förblandade förbränning. Huvudinsprutning under pilotförbränningens diffusiva förbränning. Och Huvudinsprutning efter avslutad pilotförbränning. Denna upptäckt sammanfattades i en konceptuell interaktions-mode-modell. Denna approach har fördelen att den predikterar interaktionen oberoende av individuella pilotinsprutningsparametrar. Detta möjliggör i sin tur ett smidigt och kalibreringssnålt implementerande i en motorstyrningsmjukvara. De olika typfallen förkortade alla tändfördröjningen för huvudförbränningen men effekten är starkare i de två sistnämnda typfallen. Emissions och verkningsgradspåverkan från pilot-huvudförbränningsinteraktionen var underordnad effekter från huvudförbränningens fasning och duration. Men pilotens påverkan på huvudförbränningens fasning, genom påverkan av premix-diffusionsförbränningsbalansen, är dock signifikant.

“Cylinder Pressure Based Virtual Sensor for In-Cycle Pilot Mass Estimation”

(SAE2018-01-1163, C. Jorques Moreno, O. Stenlaas and P. Tunestal)

Jorques tredje publikation inriktades på att, under ett pågående kompressionsslag, beräkna mängden pilotbränsle som sprutats in. Bakgrunden till arbetet med denna modell är dels det starka samband som sågs i den andra publikationen mellan pilotmängd och påverkan på huvudförbränningen och dels den relativt stora mängdosäkerhet som bränsleinsprutarna till tunga fordon har vid de låga mängder som normalt används för pilotförbränning. En tidig (innan pilotförbränningen är avslutad) bedömning av den insprutade mängden pilotbränsle är fundamental för att, i senare arbete, kunna reglera fenomenet.

Beräkningen av pilotbränsle utgår från de cylindertryckvariationer som kan uppmätas vid förångning och antändning. Genom att basera modellen på ett Kalmanfilter som viktar tidsfördröjningar från insprutning till förångnings respektive förbränningsstart uppnås en större modelltillförlitlighet.

Modellen programmerades i ett Field Programmable Gate Array (FPGA) baserat motorstyrssystem och verifierades experimentellt vid reglering av en motor avsedd för tunga fordon. Experimenten visade att användandet av modellen minskar osäkerheten i bedömningen av insprutat pilotbränsle. Ett pålagt pilotbränsle om 3 mg per slag minskades ner till 0,45 mg per slag. Modellens robusthet verifierades också och den befanns vara god. Känsligheten för bränslebyte mellan t.ex. diesel och biodiesel var proportionell mot skillnaden i bränslenas lägre värmevärde.

“In-cycle closed-loop combustion controllability with pilot-main injections”

(published in the Conference Proceedings of the THIESEL 2018 Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Direct Injection Engines, 11th-14th September 2018, Valencia (Spain).

(C. Jorques Moreno, O. Stenlås and P. Tunestål)

Jorques fjärde publikationen behandlar möjligheten att reglera och maximera motorns indikerade verkningsgrad. Arbetet baseras på användandet av en förbränningsmodell som utsätts för simulerade störningar i pilotparametrar för att optimera värmefrigörelsen och därmed verkningsgraden i motorn. Resultaten från studien visar att den pilotinsprutade bränslemängden är den viktigaste parametern att reglera. 79% av verkningsgradsspridningen förklaras av denna parameter. Om spridningen kan elimineras så kan den indikerade verkningsgraden ökas med upp till 1% i vissa driftpunkter. En regulator utvecklades och testades. Användandet av denna höjde den indikerade verkningsgraden i 86% av fallen. Detta med i snitt 0,2%_{enheter}. I de 14% som inte förbättrades var systemet inte kontrollerbart och regulatören kunde därmed inte påverka systemet.

“In-Cycle Closed-Loop Combustion Control with Pilot-Main Injections for Maximum Indicated Efficiency”

(published in preprint of the Conference Proceedings of the 5th IFAC Conference on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling, September 20-22, 2018, pp. 98-104, South Lake Hotel, Changchun, China,

(C. Jorques Moreno, O. Stenlås and P. Tunestål)

Jorques femte publikation summerar Återkopplad Diesel del 2 genom att, i realtid i förbränningscykeln, reglera pilot- och huvudinsprutningarna mot maximal indikerad verkningsgrad återkopplat på cylindertrycket. Modellen som utvecklades till publikation tre är i detta sammanhang en nyckelkomponent. Experimentella resultat på en motor avsedd för tunga fordon visar att regulatören arbetade ihop med långsammare bränsleregulatorer utan att orsaka identifierbara störningar. Den indikerade verkningsgraden förbättras med i genomsnitt 0,4%_{enheter}. Men studien belyser också svagheter i de antaganden om linjära samband som regulatören baseras på. Vidare visades att effekten av de linjära antagandena är bränsleberoende. Denna kunskap är av stor vikt då motorreglering skall anpassas till ett antal biodrivmedel med varierande egenskaper.

”In-Cycle Closed-Loop Diesel Combustion Control with Pilot and Main Injections”

(C. Jorques Moreno, Licentiatavhandling Lunds Tekniska Högskola, LUTMDN/TMHP-18/7102-SE, ISBN 978-91-7753-615-4)

Detta är Jorques licentiatavhandling där han sammanfattar publikationerna ovan och sätter dem i relation till varandra och fältets forskning.

“Internal Combustion Engine Cylinder Volume Trace Deviation”

(SAE Int. J. Engines 11(2):195-214, 2018,

I. West, C. Jorques Moreno, O. Stenlås, O. Jönsson and F. Haslestad)

Wests publikation undersöker hur avvikelser från nominell cylindervolym påverkar beräkningen av förbränningsrelaterade parametrar och verkningsgrad. Vevmekanism och cylinderhuvud deformeras av förbränningsrummets höga tryck och de höga temperaturerna får cylinderns och vevmekanismens komponenter att expandera. Effekten blir att cylinderns volym kan avvika med så mycket som 6% från den nominella. Studien föreslår och demonstrerar en metod som kompenserar för merparten av volymavvikelserna och begränsar felet till 0.4%. Den ökade volymnoggrannheten ökar i sin tur noggrannheten i värmefrigörelseberäkningen och minskar felet vid beräkning av några av de vanligaste förbränningsparametrarna (SOC, CA10, CA50, CA90 och indikerad verkningsgrad) med mellan 0.5% och 5%.

“Cylinder Pressure Based Method for In-Cycle Pilot Misfire Detection”

(SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility 2(2):488-502, 2020,

C. Jorques Moreno, O. Stenlaas and P. Tunestal)

Jorques sjätte publikation tittar på cylindertrycksbaserade metoder för detektion av misständning. Metodens baseras på deterministiskt och stokastiskt beräknade storheter såsom värmefrigörelse, ackumulerad värmefrigörelse och tryckdifferens mellan släpad och bränd cykel. Fenomenets låga signal till brusförhållande ger en hög känslighet för kalibreringsnoggrannheten. Detta gör adaptiv metodik väl lämpad som angreppsmetod av problemet. Föreslagen metod förbättrar detektionsnoggrannheten till 97%, att jämföras med de 90% som off-line kalibrerade metoder uppnår och med de 98% som är teoretiskt maximalt möjligt.

”Bayesian Method for Fuel Mass Estimation of Short Pilot Injections based on its Misfire Probability”

(Conference Proceedings of the 2020 American Control Conference (ACC), USA, 2020, pp. 1507-1513,

C. Jorques Moreno, O. Stenlås and P. Tunestål)

Jorques sjunde publikation utnyttjar korrelationen mellan pilotens misständning och insprutad pilotbränslemängd. Osäkerheter i korrelationen, misständningsberäkningen och sampelurvalet ligger till grund för uppskattningens osäkerhet. Resultaten visar en minskning av den initial osäkerheten, jämfört med traditionell uppskattning, från ± 1.8 mg/slag till ± 0.5 mg/slag med den föreslagna metoden.

“Predictive In-Cycle Closed-Loop Combustion Control with Pilot-Main Injections”

(IFAC-PapersOnline, Volume 53, Issue 2, 2020, Pages 14000-14007,

C. Jorques Moreno, O. Stenlås and P. Tunestål)

Jorques åttonde publikation fokuserar på en in-cycle regulator för reglering av förbränningen. Regulatorn baseras på ett antal förenklade förbränningsmodeller som predikterar förbränningsstart, mängd förbränt pilotbränsle och motorns last. Den reglerar pilot- och huvudinsprutningarnas starttidpunkt och deras mängd insprutat bränsle. Reglermålet uppdateras kontinuerligt prediktivt i takt med att information från förbränningscykeln blir tillgänglig. Jämfört med öppen styrning så förbättrar regulatorn regleringen av pilotförbränningens start från ± 1 vevinkelgrad till ± 0.4 , pilotbränslemängden från ± 1.5 mg/slag till ± 0.6 , huvudförbränningens start från ± 0.4 vevinkelgrader till ± 0.3 och motorns huvudbränslemängd (last) från ± 0.8 bar indikerat medeltryck till ± 0.2 bar. Regulatorns prestanda visades transparent mot byte av bränsle inom det bränsleurlval som finns tillgängligt för tunga dieselmotorer (diesel, HVO or RME).

“Multi-Cylinder Adaptation of In-Cycle Predictive Combustion Models”

(SAE2020-01-2087, C. Jorques Moreno, O. Stenlås and P. Tunestål)

Jorques nionde publikation tar fasta på att in-cycle regulatorn begränsas av noggrannheten hos de förenklade förbränningsmodeller som predikterar förbränningsstart, mängd förbränt pilotbränsle och motorns last.

Den vidareutvecklar konceptet genom att införa adaptiva återkoppling för modellerna. Den adaptiva återkopplingens optimering balanseras resursmässigt och noggrannhetsmässigt genom att delar av adaptationerna delas mellan motorns cylindrar och delar sker cylinderindividuellt. Reglering baserad på adaptiva modeller reglerade pilotförbränningens start inom ± 0.3 vevinkelgrader, pilotbränslemängden till ± 0.3 mg/slag och huvudförbränningens start till ± 0.3 vevinkelgrader.

“In-Cycle Closed-Loop Combustion Control for Pilot Misfire Compensation”

(SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility 3(1):299-311, 2021,

C. Jorques Moreno, O. Stenlås and P. Tunestål)

Jorques tionde publikation utvecklar en regulator som kompenserar insprutningsregleringen för pilotmisständning. Två olika angreppssätt för pilotmisständningskompensering, med tillhörande strategier, utvecklas och undersöks. Den första approachen är en kombination av två cykel till cykelregulatorer för huvudinsprutning vid pilotförbränning respektive pilotmisständning och en in-cycle pilotmisständningsdiagnos som väljer vilken av cycle till cycle regulatorerna som är aktiv. Den andra approachen är en prediktiv in-cycle regulator som reglerar antingen en andra pilotinsprutning eller huvudinsprutningen, baserad på predikterad huvudförbränningstänndfördröjning och in-cycle pilotmisständningsdiagnos. De experimentella resultaten ger 30% lägre spridning och belyser fördelarna med att kunna aktivera en andra pilotinsprutning jämfört med att vara låst av frihetsgradsbegränsningarna justering av huvudinsprutningen innebär.

“Stochastic Set-Point Optimization for In-Cycle Closed-Loop Combustion Control Operation”

(SAE2021-01-0531, C. Jorques Moreno, O. Stenlåås and P. Tunestål)

Jorques elfte publikation använder stokastisk modellering för att undersöka hur den minskade spridning som in-cycle reglering möjliggör kan användas för att minska marginalerna till referensvärdena. Som referens används in-cycle reglering med öppen styrning och regleringen jämförs avseende förbränningstyngdpunkt (CA50) med bivillkor på maximalt cylindertryck, maximal cylindertryckstegring, maximal avgastemperatur och minimal avgastemperatur. Den in-cycle återkopplade regulatorn möjliggör en verkningsgradsökning på mellan 0.6%_{enhet} (medelhög last) och 1.8%_{enhet} (låglast).

“Modular Design and Integration of In-Cycle Closed-Loop Combustion Controllers for a Wide-Range of Operating Conditions”

(published in the Conference Proceedings of the 2021 American Control Conference (ACC), New Orleans, LA, USA, 2021,

C. Jorques Moreno, O. Stenlåås and P. Tunestål)

Jorques tolfte publikation tittar närmare på en modulär lösning för hantering av de många möjliga kombinationerna av tillgänglig förbränningsinformation, de möjliga regleråtgärderna och de tillgängliga regulatorerna vid olika driftsfall. De olika byggstenarna (bränsleinsprutningsaktivering, förbränningsövervakning och regulatorval) i modulbygget kring förbränningsregleringen styrs av en övergripande tillståndsmaskin. Modulsystemet möjliggör enkla byten mellan olika kombinationer av reglerstrategier, -mål, -begränsningar (t.ex. avgastemperatur eller utsläppsnivå) och -återkopplingar (mätning, uppskattning och förutsägelse). Experimentella resultat verifierar att den modulära in-cycle lösningen uppnår lägre förbränningsparameterspridning än cykel till cykel reglering, detta speciellt i driftsfall med stora variationer i drift under kort tid.

“Quantification of FPGA Requirements for Closed-Loop Combustion Control Implementation”

(SAE2021-24-0024, C. Jorques Moreno, O. Stenlåås and P. Tunestål)

Jorques trettonde publikation fokuserar på hårdvarukraven som den utvecklade mjukvaran för in-cycle återkopplad reglering ställer. Kraven på samplingstid och upplösning för cylindertryck och övriga in och utsignaler analyseras. Antalet erforderliga logiska enheter för virtuella sensorer, regulatorer och injektordrivsteg sammanställs. Algoritmernas totala kravställningen landar i en FPGA-kravspecifikation på 21000 skivor (“slices”) men en viss potential för bantning av kravspecifikationen finns om injektordrivstegen läggs i en separat plattform, t.ex. som ASIC.

“Efficiency Optimization by In-Cycle Closed-Loop Combustion Control”

*(Submitted to Control Engineering Practice, 2021,
C. Jorques Moreno, O. Stenlås and P. Tunestål)*

Jorques fjortonde publikation summerar kortfattat hela projektet Återkopplad Diesel. Det syftar till att lyfta fram synergier i in-cycle återkopplad reglering för verkningsgradshöjning som inte syns i de ingående delstudierna. Två huvudspår belyses: Regulatorn som strävar efter att uppnå maximal verkningsgrad utifrån innevarande cykels förbränningsförloppsutveckling och Regulatorn som minimerar förbränningsförloppets spridning för att möjliggöra optimala börvärden. Den förstnämnda är enklare i sin struktur och enklare att implementera men kräver mer kalibreringsarbete då den är begränsad i vissa driftsfall och med vissa bränslen. Den sistnämnda är mer komplex i struktur och implementering men har inte den förstnämndas begränsningar. Detta visar sig i verkningsgradshöjningen som regulatorerna åstadkommer: Den förstnämnda 0.42%_{enhet} medan den sistnämnda uppnår 0.6%_{enhet} med hela 1.8%_{enhet} i låglastområdet.

”Design and Optimization of In-Cycle Closed-Loop Combustion Control with Multiple Injections”

*(C. Jorques Moreno, Doktorsavhandling Lunds Tekniska Högskola,
LUTMDN/TMHP-19/1163-SE, ISSN: 0282-1990,
ISBN: 978-91-7895-827-6 (print), ISBN: 978-91-7895-828-3 (pdf))*

Detta är Jorques doktorsavhandling där han sammanfattar publikationerna ovan och sätter dem i relation till varandra och fältets forskning.

Sammanfattning av Carlos Jorques Morenos bidrag till projektmålets uppfyllnad

Jorques har arbetat såväl teoretiskt som experimentellt med att kvantifiera, identifiera och reglera pilotförbränning och pilot-huvudinsprutnings-/förbrännings interaktion. Projektet har demonstrerat att spridningen i verkningsgrad kan minskas på detta sätt och att potentialen för ökning av den totala verkningsgraden uppgår till drygt 0.6%_{enheter} för motorer drivna av fossil diesel och till 1.7%_{enheter} för biodiesel (FAME). Potentialen för verkningsgradshöjning vid låglastdrift är ytterligare ungefär 0.6-0.8%_{enheter} högre.

Bilagor

- 1) Administrativ bilaga