

Utveckling och Utvärdering av Simuleringsmodeller för Laddluftssystem

Examensarbete utfört i Fordonssystem
vid Linköpings tekniska högskola
av


Jesper Turesson

LiTH-ISY-EX--09/4239--SE

Handledare: **Lars Eriksson**
ISY, Linköpings universitet

Examinator: **Lars Eriksson**
ISY, Linköpings universitet

Linköping, 18 September, 2009

Presentationsdatum _____ 2009-09-18 Publiceringsdatum _____ _____	Institution och avdelning Institutionen för systemteknik Department of Electrical Engineering	 Linköpings universitet
--	--	--

Språk <input checked="" type="checkbox"/> Svenska <input type="checkbox"/> Annat (ange nedan) Antal sidor _____ 70	Typ av publikation <input type="checkbox"/> Licentiatavhandling <input checked="" type="checkbox"/> Examensarbete <input type="checkbox"/> C-uppsats <input type="checkbox"/> D-uppsats <input type="checkbox"/> Rapport <input type="checkbox"/> Annat (ange nedan) _____	ISBN ISRN LiTH-ISY-EX--09/4239--SE Serietitel Serienummer/ISSN
---	--	---

URL för elektronisk version http://www.vehicular.isy.liu.se/

Publikationens titel Utveckling och Utvärdering av Simuleringsmodeller för Laddluftssystem Development and Evaluation of Simulation Models for Air Charge Systems Författare Jesper Turesson
--

Sammanfattning <p>Higher demands on lower fuel consumption, as well as unchanged or improved performance, are key factors in the development of engine combustion systems today. Common systems on the market are different types of supercharging systems with known benefits and disadvantages.</p> <p>A recently developed supercharging system combines all the advantages of the systems enclosed. The actual system setup opens up more degrees of freedom to control and to reduce the disadvantages. This implies new demands to the control structure for reaching desirable system characteristics. A mean value model and a simulation tool have been constructed and evaluated. The model has been validated against the supercharging system and the developed environment for the system. The most important point of view is to get a good agreement compared to measured data for the system as a whole, to be able to read general trends and levels for actual signals in the system. For medium to high air flows with corresponding torque, the agreement is good. For lower air flows and torques it is low. More measurement needs to be done in order to get a better model and for a deeper study of the results. A proposal is produced and discussed in the thesis for the collection of data that is needed.</p> <p>A complete vehicle simulation of an internal combustion engine equipped with the supercharging system has been carried out and works as a good start for further studies. It is shown that the actual supercharging system gives more degrees of freedom to the system development compared to traditional powertrains. Results that have an important impact on fuel consumption and performance are discussed. Based on the discussion an insight is gained for future work in system development.</p> <p>The outline gained from the engine model seems to be good and usable as a technical aid for a rough modification of the actual supercharged system. For a more careful examination more accurate models are needed. A more careful validation is also needed for a wider range of the combustion engine's working area.</p> <p>The final configuration of the supercharged system is a future challenge based on application demands. The developed models seem to serve as a good starting point for this journey.</p>
--

Nyckelord Mean Value Engine Modelling, Measurement, SI Engine, Simulation, Supercharger, Turbocharger.
--

Abstract

Higher demands on lower fuel consumption, as well as unchanged or improved performance, are key factors in the development of engine combustion systems today. Common systems on the market are different types of supercharging systems with known benefits and disadvantages.

A recently developed supercharging system combines all the advantages of the systems enclosed. The actual system setup opens up more degrees of freedom to control and to reduce the disadvantages. This implies new demands to the control structure for reaching desirable system characteristics. A mean value model and a simulation tool have been constructed and evaluated. The model has been validated against the supercharging system and the developed environment for the system. The most important point of view is to get a good agreement compared to measured data for the system as a whole, to be able to read general trends and levels for actual signals in the system. For medium to high air flows with corresponding torque, the agreement is good. For lower air flows and torques it is low. More measurement needs to be done in order to get a better model and for a deeper study of the results. A proposal is produced and discussed in the thesis for the collection of data that is needed.

A complete vehicle simulation of an internal combustion engine equipped with the supercharging system has been carried out and works as a good start for further studies. It is shown that the actual supercharging system gives more degrees of freedom to the system development compared to traditional powertrains. Results that have an important impact on fuel consumption and performance are discussed. Based on the discussion an insight is gained for future work in system development.

The outline gained from the engine model seems to be good and usable as a technical aid for a rough modification of the actual supercharged system. For a more careful examination more accurate models are needed. A more careful validation is also needed for a wider range of the combustion engine's working area.

The final configuration of the supercharged system is a future challenge based on application demands. The developed models seem to serve as a good starting point for this journey.

Sammanfattning

Ökade krav på lägre bränsleförbrukning, parallellt med krav på bibehållen eller förbättrad prestanda, är faktorer som styr en omfattande utveckling av nutida förbränningsmotorsystem. Vanligt förekommande på marknaden är olika typer av överladdningssystem med omtalade fördelar och nackdelar.

Ett nyutvecklat laddluftssystem kombinerar fördelar som vart och ett av de ingående överladdningssystemen har, samtidigt som en ny systemkonfiguration medför ytterligare frihetsgrader till styrning för att kunna reducera nackdelarna. De nya möjligheterna medför nya krav på reglerstrukturen för att systemet ska få önskvärda egenskaper. Som en hjälp till kommande systemutveckling är en medelvärdesmodell och ett simuleringsverktyg för vidare utveckling av laddluftssystemet framtaget. Medelvärdesmodellen är validerad mot den prototyp och det testsystem som är framtaget för systemet. Den viktigaste aspekten är en god överensstämmelse med systemet som helhet för att utläsa trender och nivåer. För medelhöga till höga flöden med motsvarande moment är skattningen god, men sämre för låga flöden och lägre moment. Mer mätdata behöver samlas in för en bättre validering av modellerna och en djupare analys av resultaten. Förslag på datainsamling ges i rapporten.

En förbränningsmotormodell med laddluftssystemet simuleras i en komplett-bilmodell. En demonstration visar hur modellernas ingående delar interagerar med varandra. Det visas att modellen för laddluftssystemet ger möjligheter till fler frihetsgrader i systemutvecklingen än en modell för traditionell drivlina, samt exempel på variabler som används för styrningen. Typiskt viktiga resultat och beteenden från simuleringar som är av vikt för bränsleförbrukning och prestanda diskuteras. Utifrån denna diskussion av enskilda komponenters önskvärda uppförande, ges en inblick för framtida systemarbete.

Som ett hjälpmedel för anpassning av laddluftssystemet, bedöms resultaten från motormodellen vara goda för att urskilja trender och beteenden. För en noggrannare analys behövs bättre anpassade delmodeller som valideras för ett bredare spektrum av motorns arbetsområde, samt en mer specifik beskrivning av enskilda komponenter.

Den slutliga konfigurationen för laddluftssystemet är en uppgift för framtida design utifrån applicerade problemformuleringar. För vägen dit kan den utvecklade modellen fungera som en god utgångspunkt.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	2
1.2	Mål	2
1.3	Metod	3
1.4	Översikt	3
1.5	Begränsning	3
1.6	Resultat	4
2	Modellbeskrivning	5
2.1	Modellernas funktion	6
2.2	Kort beskrivning av MVEM-lib	7
2.3	Beskrivning av systemen	7
2.3.1	Laddluftssystem	7
2.3.1.1	Låghastighetsaxel	10
2.3.1.2	Remaxel	11
2.3.1.3	Avgasturbin	12
2.3.1.3.1	Validering av turbinmodell	13
2.3.1.4	Kompressor	16
2.3.1.4.1	Validering av kompressormodell	19
2.3.1.5	Generator/Elmotor	22
2.3.1.5.1	Redovisning av elmotor	24
2.3.1.6	Planetväxel	25
2.3.1.7	Koppling	26
2.3.1.8	Remväxel	28
2.3.1.9	Wastegate	28
2.3.1.10	Avgassystem	29
2.3.2	Styrenhet	31
2.3.2.1	Kategorisering	32
2.3.3	Förbränningsmotorsystem	33
2.3.3.1	Kategorisering	33
2.3.3.2	Luftfilter och intercooler, Trottell och insugsport	33
2.3.3.2.1	Validering av luftfilter:	33
2.3.3.3	Batteri	34
2.3.3.4	Elförbrukare	34
2.3.3.5	Förbränningsmotor	34
2.3.3.6	Beskrivning av testcell och mätdata	37
2.3.3.7	Validering av förbränningsmotorsystem	38
2.3.3.7.1	Resultat från validering	39

2.3.4	Komplettbilssystem	40
2.3.4.1	Kategorisering	40
2.3.4.2	Drivlina och förarmodell	42
2.3.4.3	Fordonsmodell och hjulmodell.....	44
3	Modelldemonstration	47
3.1	Prestandabegreppet.....	49
3.2	Bränsleförbrukning efter körcykel	49
3.2.1	Förbränningsmotorns arbetsområde	50
3.3	Laddluftssystemets komponenter och dess möjligheter	51
3.3.1	Turbin och kompressor.....	51
3.3.2	Batteri	53
3.3.3	Elmotor/generator.....	53
3.3.4	Planetväxel och remväxel.....	54
3.3.5	Låghastighetsaxel, remaxel och dynamiska element	54
3.3.6	Koppling	54
3.3.7	Styrenhet.....	55
4	Slutledning	57
4.1	Resultat.....	57
4.2	Förslag på fortsatt arbete	59
4.2.1	Förbättring av modellerna	59
4.2.2	Utveckling av modellerna	59
	Litteraturlista	61
I	Domäner och generaliserade kategorier	63
II	Notation	67

Kapitel 1

Introduktion

I utvecklingen av dagens motorsystem är mycket av arbetsinsatserna inriktade på att få ner både bränsleförbrukningen och utsläppen av avgaser som är skadliga för vår miljö. Samtidigt vill man inte göra avkall på motorns prestanda. En vanlig metod som allt fler biltillverkare använder sig av för att uppnå en lägre förbrukning är att introducera bilmodeller med motorer som har en mindre cylindervolym. En mindre förbränningsmotor tar in en större andel luft i förhållande till sin totala volym för motsvarande laster än en större motor. Den mindre motorn kräver således en mer öppen trottel, vilket resulterar i mindre strypande effekt på luftflödet och lägre pumpförluster i motorn. Lägre pumpförluster medför vidare att motorn arbetar vid en högre effektivitet, vilket medför att en lägre bränsleförbrukning är möjlig. Nackdelen med en mindre motor är att dess prestanda i många fall blir lidande. Den mindre motorn arbetar i många fall nära toppen av sin prestationsförmåga. När kravet på ökad prestanda finns är därmed de resurser som finns kvar att utnyttja hos motorn begränsade. Ett annat vanligt problem med förbränningsmotorer är att mycket av den energi som tillförs, går förlorad i form av termisk energi i avgaserna.

En lösning på ovanstående problematik, är att förse motorn med någon form av överladdning. Tanken med överladdning är att öka luftens densitet i insuget med hjälp av komprimering med efterföljande nerkylning av den inkommande luften. En ökning av luftens densitet gör det möjligt att förbränna mer bränsle stökiometriskt, och därmed ta ut mer energi ur en överladdad förbränningsmotor än vad som skulle vara möjligt för en sugmotor med motsvarande cylindervolym. Det finns idag flera typer av överladdningssystem att tillgå på marknaden, vilka kan uppdelas under kategorierna:

- Mekaniska kompressorer
- Termiska kompressorer (Turbo)
- Elektriska kompressorer

I vissa fall förekommer även en kombination av dessa överladdningar i samma motor.

Ett nytvecklade koncept för ett laddluftssystem ligger som grund för en diskussion i framställningen. Laddluftssystemet ska ta tillvara på fördelar som vart och ett av överladdningssystemen tillför. Viktiga fördelar och de typiska vinster som är möjliga med laddluftssystemet förs i en diskussion runt två huvudkategorier.

1. *Bränsleförbrukning*

- Om nya möjligheterna för styrning av komponenters arbetspunkter kan användas för att uppnå en bättre verkningsgrad med reducering av förluster.
- Om regenerering av avgasenergin är möjlig och effektuttag med generator kan göras i stället för reglering via wastegate.
- Om det är möjligt att åstadkomma regenerering av bromsenergi via motorbroms.

2. *Prestanda*

- Om det är möjligt att minska den tid det normalt tar för turbon att bygga upp ett ökat insugstryck. Även kallad turbofördröjning eller ”turbo-lag”.
- Om det går att vinna samma fördel som för en elektrisk kompressor och kunna ge en så kallad elektrisk boost.

1.1 Bakgrund

I ett inledande skede för detta arbete hade en konceptstudie slutförts. Utveckling av en färdig prototyp för laddluftssystemet hade påbörjats. I detta stadium uppkom frågor runt vilka systemkonfigurationer som är lämpliga och hur uppförandet ser ut för systemet. När dessa frågor är besvarade, vill man veta om uppförandet går att styra, vad som är gynnsamt att styra mot och vilka variabler som är centrala för styrningen. Den huvudsakliga frågan som är bakgrund till detta arbete är om det med hjälp av medelvärdesmodeller går att utveckla ett simuleringsverktyg som kan verifiera uppförandet för laddluftssystemet, samt om modellerna kan vara till hjälp för fortsatt utveckling ur ett systemperspektiv.

1.2 Mål

Det finns två mål för detta examensarbete. Första målet är utveckling och validering av en modell för laddluftssystemet med beskrivning av ingående komponenter. Det andra målet är en demonstration som visar hur komponenterna kan integreras till en komplett bilmodell. För valideringen av modeller för laddluftssystemet riktas intresset mot statiska körningar vid olika arbetspunkter. Störst vikt läggs på att systemet som helhet klarar av att beskriva uppförandet väl.

1.3 Metod

Då konceptet sträcker sig över många olika områden med en djup komplexitet, har metoden för modellbygget varit att dela upp modellen i överskådliga fysiska komponenter. Dessa komponenter angrips sedan för att passa in som byggstenar i en större modell uppdelad mellan verksamhetsfält. Utgångspunkten har varit att från enkla fysikaliska samband och övergångar mellan domäner, successivt bygga upp en större fungerande och lättöverskådlig modell. Då en fysikalisk modell har ansetts vara alltför komplex, har den fysikaliska tolkningen fått ge vika för enklare parametermodeller. Detta för att underlätta beskrivningen av modellen, men också då datorsimuleringar bör kunna genomföras under en begränsad tidsrymd. Modellen har även kompletterats med motormappar från förbränningsmotorns styrprogram *NIRA 3i+*. Förhoppningen är att använda mapparna till att fånga upp ytterligare motorspecifik karaktäristik som annars är svårmodellerad. Standardkomponenter från modellbiblioteket *MVEM-lib* från Fordonssystem i Linköping fungerat som första grund för modellbygget. Även modellbiblioteket *the QSS toolbox* från ETH i Zürich har varit till hjälp. *MVEM-lib* har använts eftersom det framgångsrikt har använts i flera projekt och därmed bör valideringen av modellen förenklas.

1.4 Översikt

- | | |
|-----------|---|
| Kapitel 1 | Kapitlet ger en kort introduktion och bakgrund till konceptet. Mål för arbetet sätts upp samt metoden för att nå dessa beskrivs. |
| Kapitel 2 | Behandlar utveckling av medelvärdesmodeller för laddluftssystemet, förbränningsmotorsystemet samt ett komplett-bilsystem. Även utvärdering och statisk validering behandlas. |
| Kapitel 3 | Kapitlet ger en demonstration för hur modellen av motorsystemet interagerar i en simulering av en komplett-bilmodell. Aspekter för bränsleförbrukning och prestanda som är relevanta för framtida systemarbete presenteras. |
| Kapitel 4 | Resultat sammanställs och ger en jämförelse med uppsatta mål. En kortfattad sammanfattning ges och förslag på fortsatt arbete diskuteras. |

1.5 Begränsning

Tyngdpunkten för modellbygget har varit att beskriva och förklara laddluftssystemets ingående delar och utgående från det system som det är tänkt att fungera i. Presentation av resultat har anpassats till en antagen och väl inarbetad nomenklatur inom motorutveckling. Styr signaler och sensorvärden är valda för att motsvara den befintliga konfigurationen av dagens fordon i serieproduktion.

1.6 Resultat

En medelvärdesmodell för laddluftssystemet och ett simuleringsverktyg för vidare utveckling av konceptet är framtaget. En presentation och diskussion är förd kring viktiga resultat som påverkar övergripande bränsleförbrukning och prestanda för laddluftssystemet ur ett komplett-bilsperspektiv. En modellprövning beskriver hur integrationen för de utvecklade modellerna ser ut och hur ett exempelssystem definieras. Resultatet bildar en demonstration av modellerna och för laddluftssystemet som helhet.

Kapitel 2

Modellbeskrivning

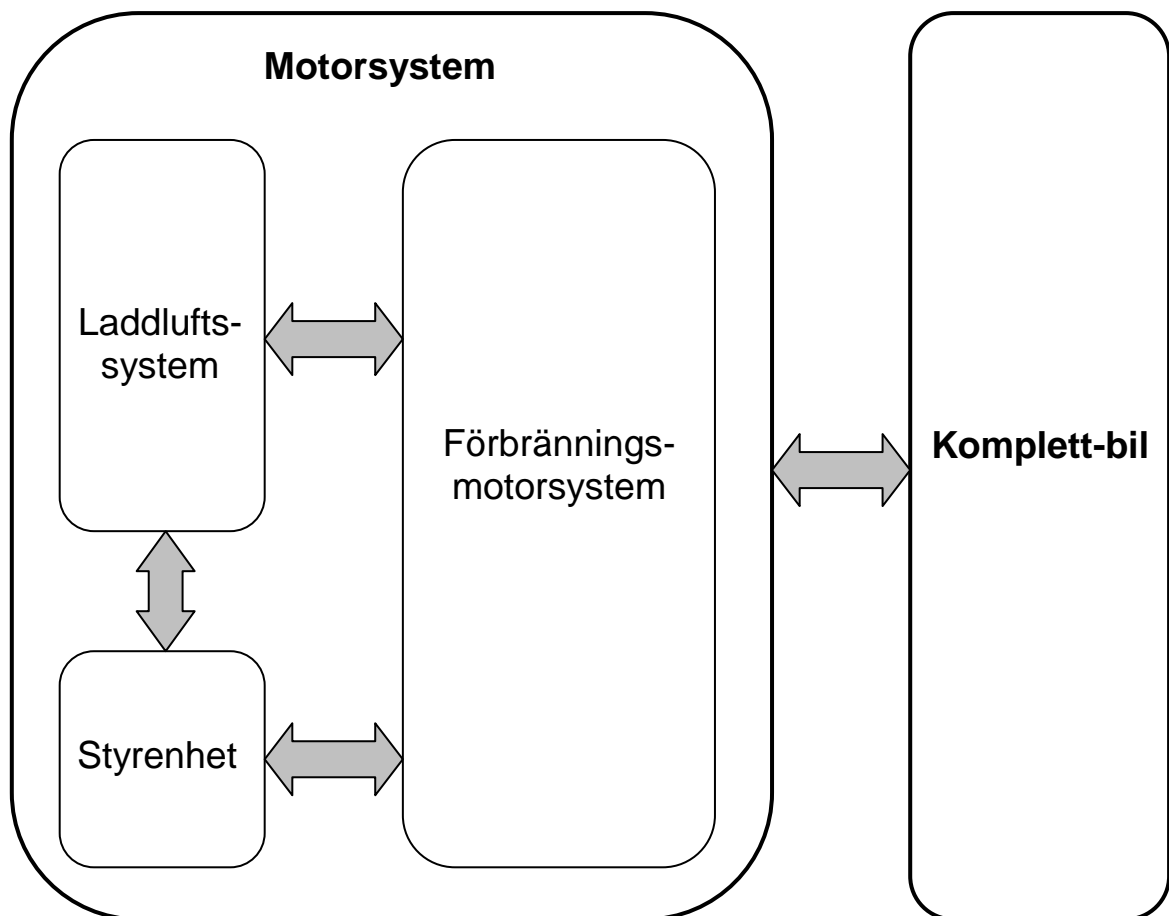
Systemkonfigurationen för laddluftssystemet är mycket beroende av sin omgivning. Laddluftssystemet ska fungera som en del i ett motorsystem och det i sin tur med ett komplett-bilssystem. Uppförandet för laddluftssystemet är starkt beroende av systemen det ska verka bland och modellering av dessa är därmed nödvändig. Modelleringen möjliggör att laddluftssystemet kan utvärderas inte bara ur ett förbränningsmotorperspektiv, utan även ur ett komplett-bilsperspektiv. Översikt över hur systemen interagerar med varandra finns i Figur 1. Hur systemen integreras visas genom en demonstration i kapitel 3.

En djupare beskrivning av omgivningssystemen skulle vara alltför tidskrävande och ligger utanför ramen för detta examensjobb. En beskrivning är emellertid nödvändig och intressant ur många synsätt. Den behövs för förståelsen av laddluftssystemet och dess syfte, för att kunna validera och ge tillförlitlighet åt motorsystemet, för begränsning av modellernas giltighetsområde, som bas för diskussion av resultaten samt vara en utgångspunkt för framtida systemarbete.

Beskrivningen av omgivningssystemen har medvetet hållits kort med ett minimum av komponenter, men stor arbetsmöda har lagts på dessa komponenter för att kunna åstadkomma en god grund för att validera laddluftssystemet.

Figur 1 visar en översiktsbild av de system som är beskrivna mer detaljerat i detta kapitel. Översikten är en hjälp att identifiera de enheter som beskrivs i kapitlet. Störst uppmärksamhet i modellbeskrivningen kommer att riktas mot blocket för laddluftssystemet och gå mer på djupet i detta. För övriga system ges en beskrivning för förståelse och vilka aspekter som är viktigast, såsom typisk karaktäristik och vilka begränsningar som systemen är beskaffade med.

Den parameterskattning och den validering av delarna i motorsystemet som utförts har styrts av det testsystem som funnits tillgängligt under arbetets gång. Skattningarna kan därmed anses ge en god beskrivning av denna prototyp.



Figur 1. Översiktsbild över de system som är framtagna och hur de benämns. Rapporten behandlar de olika komponenterna mer ingående.

2.1 Modellernas funktion

Modellerna är dynamiska motormodeller som beskriver flöden och energiomvandlingar som laddluftssystemet interagerar i. Modellerna är uppbyggda för att kunna användas som simuleringsverktyg som ett led i konstruktionsarbetet, parallellt med framtagning av prototyper. I ett senare skede vill man använda modellerna för att bedöma hur olika reglerstrukturer och komponentkonfigurationer påverkar bränsleförbrukning och prestanda för motorsystemet. Motormodellen är därför en del av en övergripande komplett-bilmodell.

Det angreppssätt med uppbyggnad av delmodeller som använts är en utgångspunkt för vidare utveckling och analys av laddluftssystemet. Uppbyggnaden är objektorienterad för att vara modulär och underlätta fortsatt utvecklingsarbete. En ytterligare önskvärd egenskap som beaktats under modellbygget är skalbarhet. Skalbarheten gör det enkelt att ändra parametrar för ingående komponenter, till exempel motorvolym, storlek på turbo, utväxlingsförhållanden och begränsningar för elmotor/generator.

Modelleringsarbetet har utgått från att vara beroende av redan existerande och därmed väl inarbetade komponenter för fordon och drivlina. Modellen för laddluftssystemet kan därmed samspela med det redan befintliga motorstyrssystemet. Motorstyrssystemet för testprototypen är *NIRA i3+* som är levererat av *Nira Control AB*.

2.2 Kort beskrivning av MVEM-lib

Modellbiblioteket *MVEM-lib* är uppbyggt genom att betrakta den gasväxling som sker genom motorn. Komponentuppbyggnaden sker genom att betrakta ett schema av kontrollvolym i serie med restriktioner. Kontrollvolymerna ser till att massbalans och energibalans är uppfyllda, medan restriktionerna ger en beskrivning av transporten. Paralleller kan dras till den generella beskrivning av domäner som styr modelluppbyggnaden i detta arbete [*Appendix I*], där omvandlingar och restriktioner ger flödet genom modellen och energiupplagring ser till att energibalans är uppfyllt. För en utförligare beskrivning av *MVEM-lib* och dess tillämpningar, se exempelvis [3].

2.3 Beskrivning av systemen

För att sätta struktur för framställningen och ge en bra beskrivning av modellens ingående komponenter kategoriseras de utifrån de generaliserade kategorier och domäner som är beskrivna i *Appendix I*. Uppdelningen är tänkt att vara ett hjälpmedel för överskådlighet och övergripande förståelse. Detta då ett sådant förhållningssätt har underlättat modelleringsarbetet. Uppdelningen är även tänkt att vara en grund för fortsatt systemutveckling. För modellbygget har det dock inte lagts någon vikt vid en strikt kategorisering. En anledning till detta är att energiomvandling och energiförlust är element som saknar skarp och entydig avgränsning. I modellbygget har den resulterande komponentbeskrivningen ofta varit en kombination av de båda. Komponenterna kommer främst att beskrivas som fysiska objekt och kategoriseras efter huvudsaklig funktion och arbetssätt.

Beskrivningen av de ingående komponenterna ger det uppförande som eftersträvas för laddluftssystemet. Viktiga ekvationer presenteras direkt i skrift eller som referens varifrån de har sitt ursprung. Variabler karakteriseras som antingen insignaler eller utsignaler. Beskrivande parametrar som är centrala för intrimning och validering presenteras. Även övriga antagande som gjorts belyses, tillsammans med andra viktiga aspekter. Beskrivningen av de system laddluftssystemet är beroende av är främst av beskrivande och sammanfattande art.

2.3.1 Laddluftssystem

En översiktssbild över konfigurationen för laddluftssystemet återges i Figur 2. Översiktssbilden ger även riktningen på det energiflöde som är möjligt.

Modellen för laddluftssystemet består av följande ingående delar (kategoriserade efter beskrivning i *Appendix D*):

Energiupplagrare

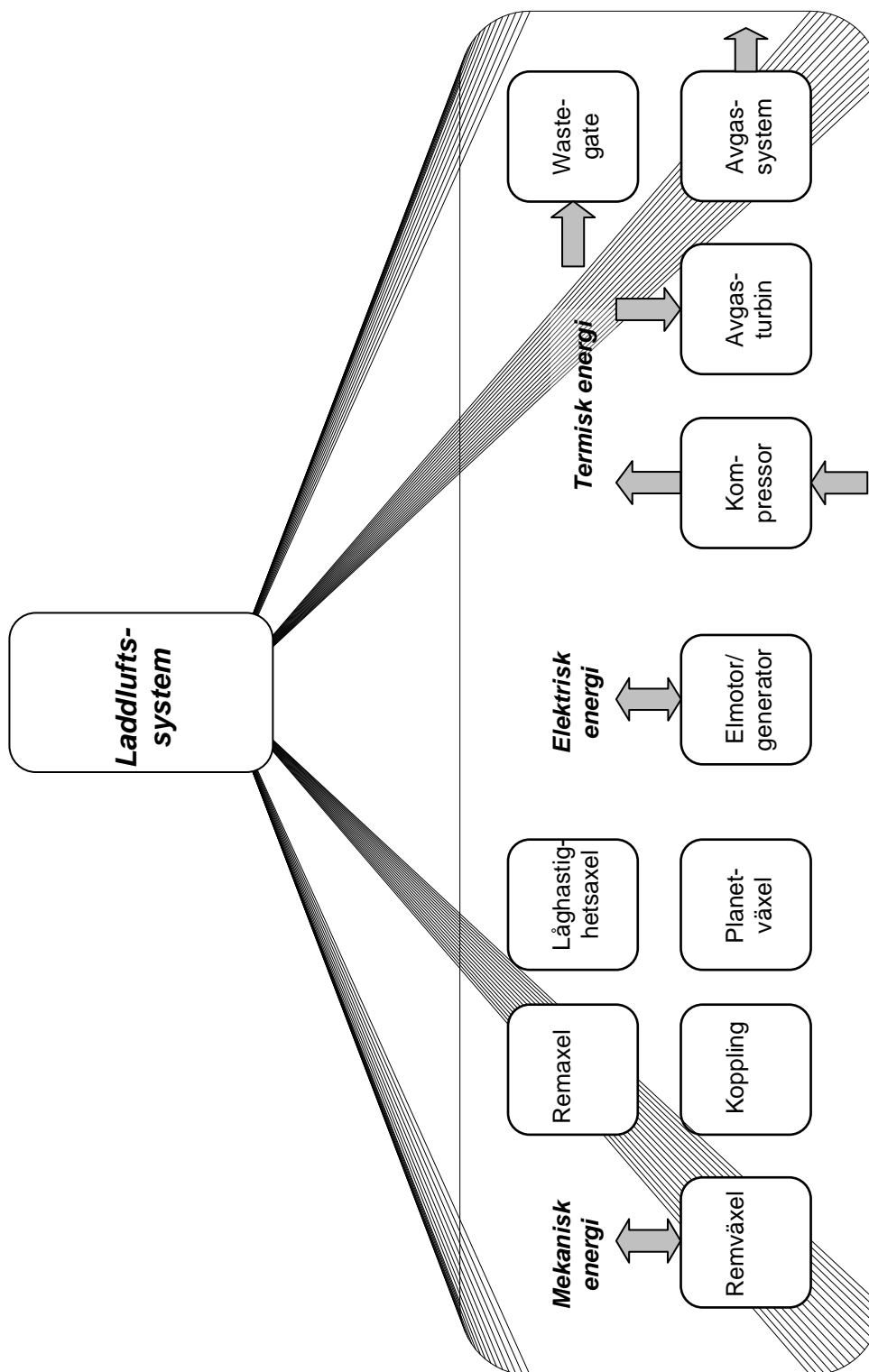
- **Låghastighetsaxel**
- **Remaxel**

Energiomvandlare

- **Avgasturbin**
- **Kompressor**
- **Generator/Elmotor**

Energiförluster

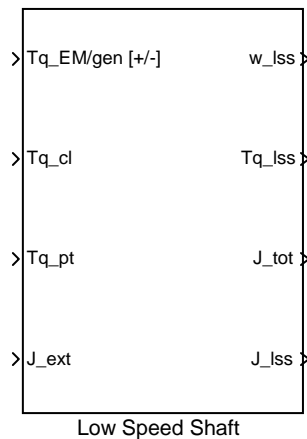
- **Planetväxel**
- **Koppling**
- **Remväxel**
- **Wastegate (flödesrestriktion)**
- **Avgassystem (flödesrestriktion)**



Figur 2. Översikt över ingående delar för laddluftssystemet. De olika energikällorna och var de har sin passage är utritat.

2.3.1.1 Låghastighetsaxel

Låghastighetsaxeln förbinder elmotorn/gentratorn med övriga roterande komponenter i laddluftssystemet. Dess främsta uppgift är att möjliggöra att energi kan överföras från exempelvis turbinen till generatoren eller från elmotorn till kompressorn. Axeln fungerar som ett dynamiskt energiupplagringselement med friktion. Dess beskrivande ekvation är härledd från Newtons andra lag för roterande massor.



Figur 3. Komponentmodellen av låghastighetsaxeln, som den ser ut i Simulink.

Ekvation:

$$\dot{\omega}_{iss} = \frac{1}{J_{tot}} (Tq_{EM/gen}(t) + Tq_{cl}(t) + Tq_{pt} - \beta_{fr} \omega(t))$$

Parametrar:

- Axelns tröghetsmoment, J_{iss} .
- Friktionskoefficient, β_{fr} .

Insignaler:

- Momentet från/till elmotorn/generatoren, $Tq_{EM/gen}$.
- Momentet från kopplingen, Tq_{cl} .
- Momentet från planetväxeln, Tq_{pt} .
- Det påkopplade tröghetsmomentet, J_{ext} .

Utsignaler:

- Vinkelhastigheten för axeln, ω_{iss} .
- Totalt vridmoment, Tq_{iss} .
- Axelns enskilda tröghetsmoment, J_{iss} .
- Det totala tröghetsmomentet, J_{tot} .

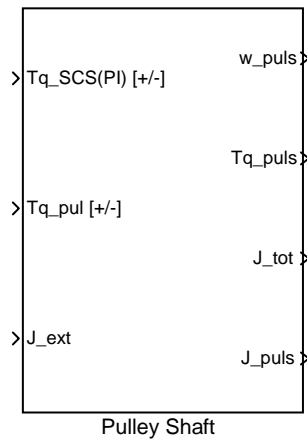
Antaganden:

Ekvationen som använts är en fysikalisk relation som anses gälla utan behov av validering. Antagandet att friktionsmomentet är beskrivet av rotationshastigheten är vanligt förekommande och har använts i en rad tillämpningar med gott resultat, till exempel [1], [3]. Däremot är en intrimning av ekvationens parametrar viktig för systemets uppförande.

Simuleringsdata för rotationshastighet har inte funnits tillgängligt, och det har inte varit möjligt att mäta tröghetsmoment. Parametrarna har därmed satts till uppskattade värden som första utgångspunkt i valideringen av prototypsystemet.

2.3.1.2 Remaxel

Remaxeln förbinder laddluftssystemet med drivaxeln via remväxeln. Dess uppgift är att möjliggöra att energi kan överföras från förbränningsmotorn till laddluftssystemet. Ekvationen för axeln är härledd enligt samma grunder som för låghastighetsaxeln.



Figur 4. Komponentmodellen av remaxeln, som den ser ut i Simulink.

Ekvation:

$$\dot{\omega}_{puls} = \frac{1}{J_{tot}} (Tq_{SCS}(t) + Tq_{pul}(t) - \beta_{fr} \omega(t))$$

Parametrar:

- Axelns tröghetsmoment, J_{puls} .
- Friktionskoefficient, β_{fr} .

Insignaler:

- Momentet från/till laddluftssystemet, Tq_{SCS} .
- Momentet från remväxeln, Tq_{pul} .
- Det påkopplade tröghetsmomentet, J_{ext} .

Utsignaler:

- Vinkelhastigheten för axeln, ω_{puls} .
- Totalt vridmoment, Tq_{puls} .
- Axelns enskilda tröghetsmoment, J_{puls} .
- Det totala tröghetsmomentet, J_{tot} .

Antaganden:

Antagandena för remaxeln är liknande de för låghastighetsaxeln.

2.3.1.3 Avgasturbin

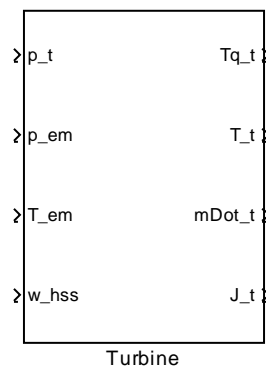
Avgasturbinen är främst en energiomvandlare som tillför energi till laddluftssystemet. Turbinen tar termisk energi från avgaserna och omvandlar denna till mekanisk energi (moment) som levereras till höghastighetsaxeln. I modellbeskrivningen är axeln fiktiv och ej modellerad som komponent. Turbinen utgör en restriktion på luftflödet, och den expansion av luften som sker i enheten reducerar flödestemperaturen.

Överflödigt energi som inte behövs för att driva på axeln eller kompressorn kan omvandlas till elektrisk energi i generatoren eller passera genom wastegaten.

Med hänsyn tagen till den beskrivning som görs i *Appendix I* och klassningen av turbinen, kan dess bidragande moment beräknas i de fall den tillförda energin och effektiviteten är beskrivna. Den tillförda energin kan härledas och skattas från en isentropisk process för en ideal gas, vilken ger den maximala mekaniska energin som kan produceras under en viss tryck- och temperaturskillnad. Turbinens effektivitet skattas med en kvadratisk funktion av en storhet som kallas *Blade Speed Ratio* (BSR). Funktionen är ett sätt att försöka beskriva luftflödet i förhållande till turbinhjulshastigheten.

Förutom fysiska parametrar såsom turbinhulets dimension och turbinhusets storlek, beskrivs turbinen av turbinmappar som hämtas från tillverkaren. För att beskriva massflödet i turbinen har en så kallad black box modell [4] används och anpassats till tillverkarens uppgifter. Det föreslås också av [4] att massflödet i stort sett är oberoende av turbinhulets hastighet och beskrivs väl av tryckförhållandet.

Förfarandena över modellering av energi, effektivitet och massflöde är sedan tidigare vedertagna och finns beskrivna i exempelvis [4] och [8]. Kurvanpassningen är beskriven ytterligare i kapitel *Validering av turbinmodell* på sidan 13.



Figur 5. Komponentmodell för avgasturbinen, så som den ser ut i Simulink.

Ekvationer:

$$Tq_t = \frac{\dot{m}_t c_{p,t} T_{em}}{\omega_{hss}} \left(1 - (\Pi_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \eta_t$$

$$T_t = T_{em} - T_{em} \left(1 - \Pi_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \eta_t$$

$$\dot{m}_t = \frac{P_{em}}{\sqrt{T_{em}}} C \sqrt{1 - \Pi_t^k}$$

$$\eta_t = \eta_{t,max} \left(1 - \left(\frac{BSR - BSR_{opt}}{BSR_{opt}} \right)^2 \right)$$

$$BSR = \frac{D_t \omega_{hss}}{2 \sqrt{2 c_{p,t} T_{em} \left(1 - (\Pi_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}}$$

Parametrar:

- Parametrar för specifik värme, $\gamma, c_{p,t}$.
- Konstanter för kurvanpassning av massflöde, C, k .
- Turbinens maximala effektivitet, $\eta_{t,max}$.
- Turbinhulets diameter, D_t .
- Konstant för kurvanpassning av effektivitet, BSR_{opt} .
- Turbinhulets tröghetsmoment, J_t .

Insignaler:

- Trycket i avgassystemet efter turbinen, p_t .
- Höghastighetsaxelns vinkelhastighet, ω_{hss} .
- Trycket i grenröret innan turbinen, p_{em} .
- Temperaturen i grenröret, T_{em} .

Utsignaler:

- Vridmomentet till höghastighetsaxeln, Tq_t .
- Luftmassflödet från turbinen, \dot{m}_t .
- Temperaturen efter turbinen, T_t .
- Turbinhulets tröghetsmoment, J_t .

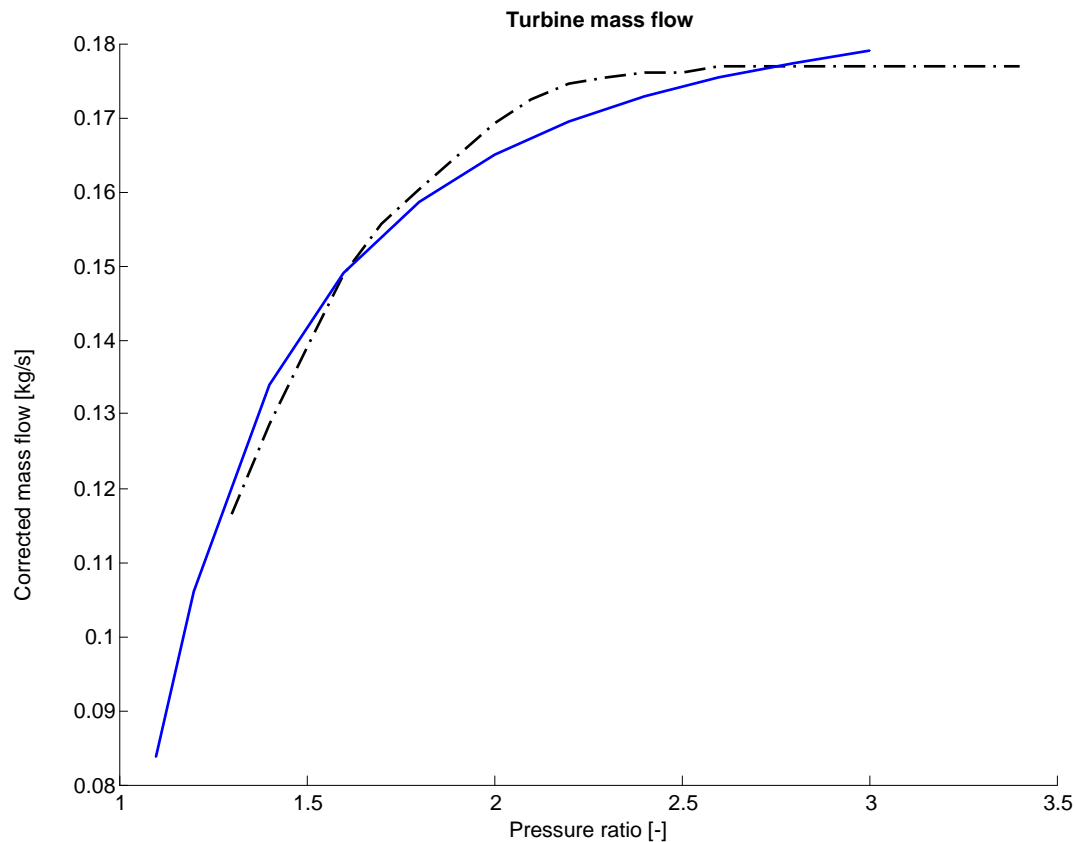
Antaganden:

De antaganden som gjorts i modellen är att parametrar för specifik värme är konstanta. BSR_{opt} är satt att vara i regionen 0.55-0.65. Detta är typiska antaganden enligt [8]. Den maximala effektiviteten är satt till den effektivitet som tillverkaren anger i datablad. Turbinhulets diameter är satt till sitt fysiska värde. Tröghetsmomentet har inte mätts upp utan enbart skattats som en första ansats. Det är även antaget att insignalen ω_{hss} är större än noll.

2.3.1.3.1 Validering av turbinmodell

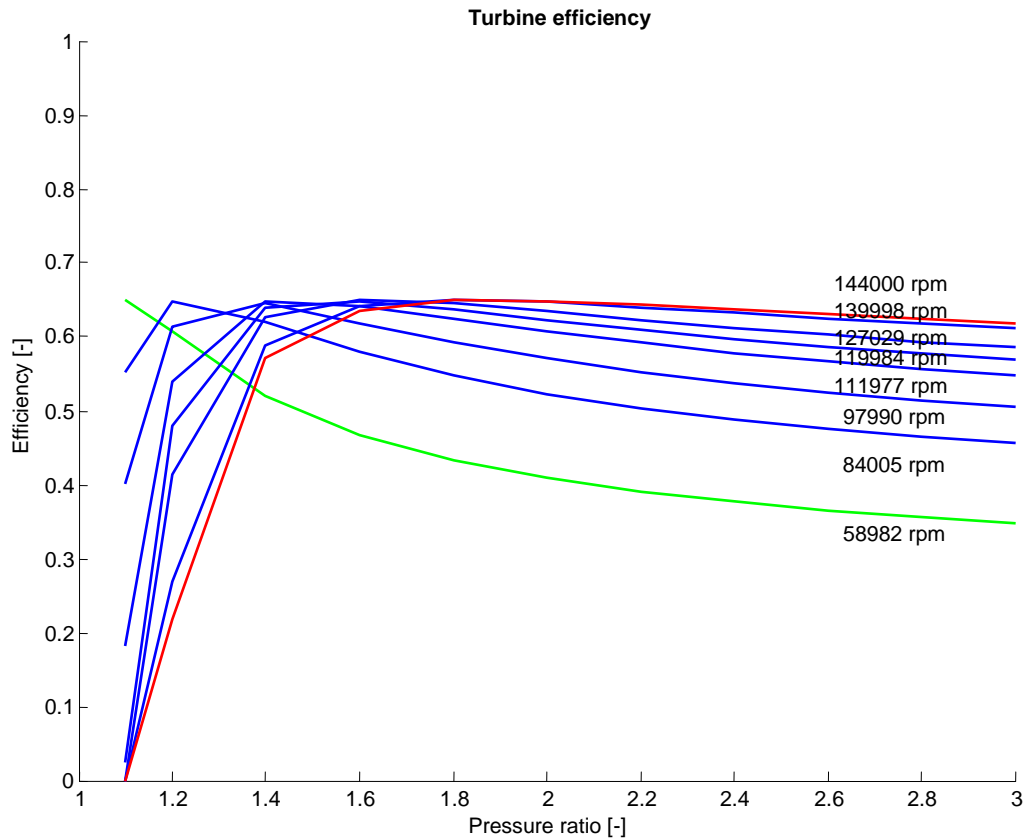
Som tidigare nämnts kan massflödet bestämmas utifrån tryckförhållandet över turbinen, med anpassning efter tillverkarens data. Skattning har erhållits genom kurvpasning till standardfunktion. Denna skattning har visat sig stämma väl överens för många turbiner och

tillämpningar, se exempelvis [4]. Kurvpassningen sker med hjälp av *MATLAB*-funktionen *lsqcurvefit* [10]. Resultatet visas i Figur 6. Residualen är som störst 6 %. En bättre beskrivning är möjlig om en specifik turbin ska användas. För att se trender och kunna nyttja skalbarhet i modellen, anses beskrivningen med kurvpassning vara tillräckligt god.

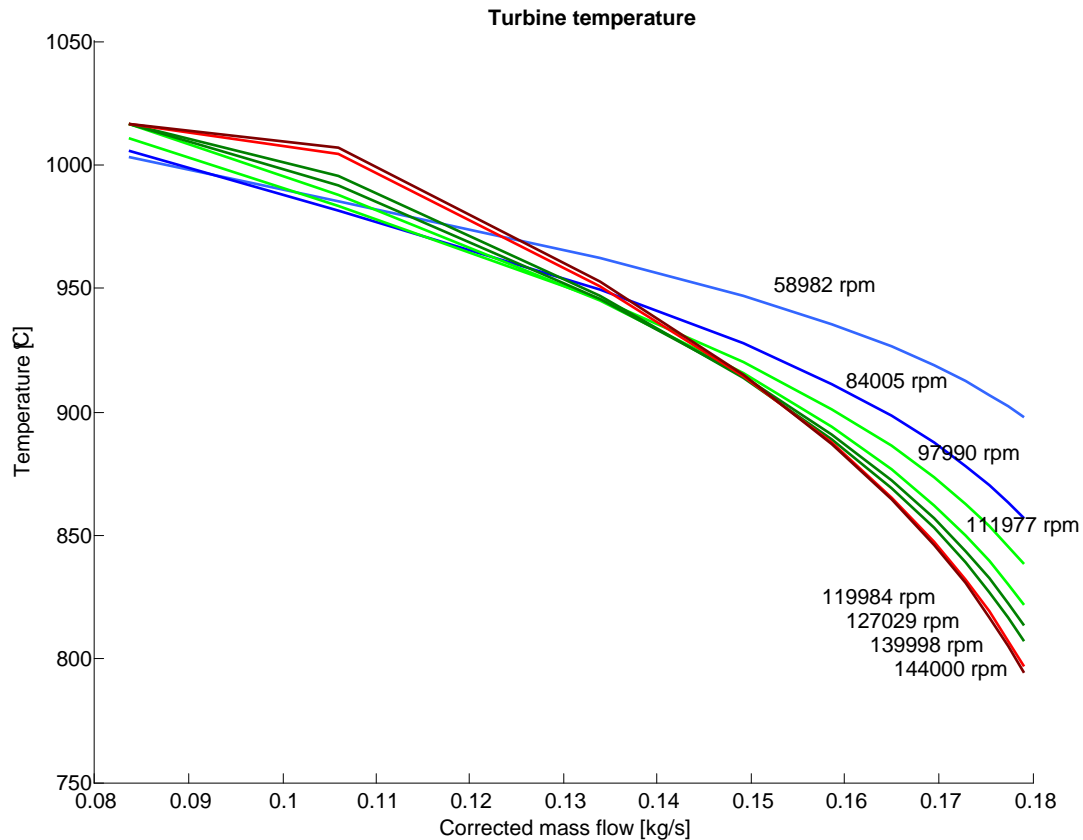


Figur 6. Massflöde genom turbinen. Punkt-streckad linje är tillverkarens uppmätta data och heldragen linje är skattningen av densamma som används i modellen. Skattningen bedöms vara tillräckligt god för modellens syfte.

För turbinens effektivitet samt temperaturpåverkan har inte mätdata funnits tillgängligt, men en uppskattad karaktäristik har använts i modellen. Effektiviteten presenteras i Figur 7 och temperaturen i Figur 8.



Figur 7. Turbinens effektivitet för olika hastigheter på turbinhjulet. Effektiviteten för turbinen har dess topp då den får "spinna med" flödet och har begränsad restriktiv påverkan. För ökade hastigheter infaller denna topp för högre tryckskillnader, vilket är naturligt. Värt att notera är att effektiviteten sjunker kraftigt i de fall turbinen skulle utgöra en större restriktion för flödet och bromsa detsamma.



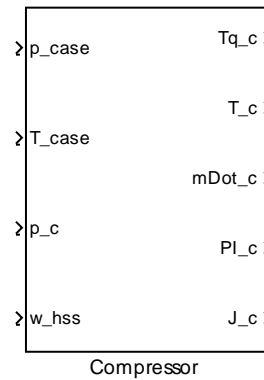
Figur 8. Turbinens "kylande" effekt på avgastemperaturen som funktion av massflöde för olika hastigheter. Temperaturen är stigande för minskat flöde, vilket beror på att kompressionen av gaserna blir större.

Med ledning av de ekvationer som beskriver turbinen, samt uppförandet som återges i figurerna, kan en slutsats dras att turbinen bör dimensioneras så den har en begränsad inverkan på avgasflödet, med hänsyn tagen till dess effektivitet. *BSR* bör med andra ord hållas i närhet av BSR_{opt} för en bättre effektivitet.

2.3.1.4 Kompressor

Kompressorhjulet sitter på en höghastighetsaxel som är gemensam med avgasturbinen. Denna axel är även, via planetväxel, kopplad till generatoren och till motorns vevaxel via remskiva och remväxel. Kompressorn fungerar som en energiomvandlare. Dess uppgift är att ta mekanisk energi från axeln och använda den energin till att öka lufttrycket före trotteln. Termisk energi från avgasturbinen är tänkt att fungera som prioriterad energikälla, men för lägre varv då avgasturbinen inte levererar önskad effekt tas energin istället från förbränningsmotorn eller batteriet. På liknande sätt som för turbinen kan kompressorns förbrukande moment beräknas från den tillförda energin och dess effektivitet. Den tillförda energin skattas på motsvarande sätt utifrån en isentropisk process. Värt att notera är att vridmomentet, som är utsignal, är negativ då enheten är en förbrukare i systemet.

Kraven för samordning med modellen liknar också de för turbinen, dvs. övergripande karaktäristik och mätdata hämtas ifrån flödesmappar från tillverkaren. Modelleringen består av en parameterisering med övergång till dimensionslösa domäner, där målet är att skatta effektivitet, temperatur och massflöde. Modelleringen har många fenomen att ta hänsyn till och endast de viktigaste ekvationerna presenteras nedan. För en mer ingående beskrivning hänvisas till exempelvis [3] eller [4]. Figur 10 nedan visar kompressorns flödesmapp med effektivitet utifrån tillverkarens data. En validering av skattningen till mätdata beskrivs kortfattat under *Validering av kompressormodell*, där även figurer presenteras.



Figur 9. Komponentmodellen av kompressorn, så som den ser ut i Simulink.

Ekvationer:

$$Tq_c = -\frac{\dot{m}_c c_p}{\omega_{hss}} (T_c - T_{case})$$

$$T_c = T_{case} \left(1 + \frac{\Pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_c} \right)$$

$$\eta_c = \eta_{max} - k(\Phi - \Phi_{max})^2$$

$$\dot{m}_c = \Phi \rho_{air} N_{hss} D_c^3$$

$$\Pi_c = \frac{p_c}{p_{case}}$$

$$\Psi = \frac{c_p T_{case} \left((\Pi_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}{\frac{1}{2} U_2^2}$$

$$\Phi = a_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\Psi}{a_2} \right)^2}$$

Parametrar:

- Parametrar för specifik värme, γ , c_p .
- Konstanter i ellipsformel, a_1, a_2 .
- Kompressorhjulets diameter, D_c .
- Kompressorhjulets tröghetsmoment, J_c .

- Konstanter för kompressoreffektiviteten, η_{max} , k , Φ_{max} .

Insignaler:

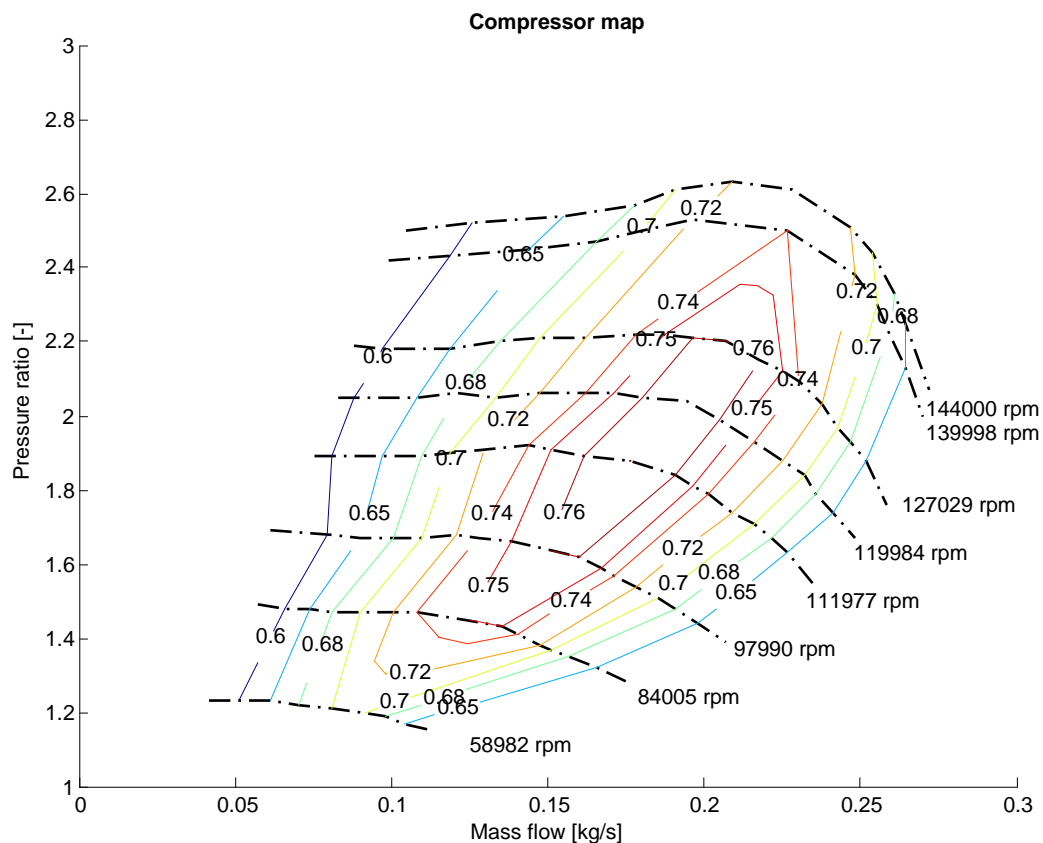
- Trycket före kompressorn, p_{case} .
- Temperaturen innan kompression, T_{case} .
- Höghastighetsaxelns vinkelhastighet, ω_{hss} .
- Trycket efter kompressorn, p_c .

Utsignaler:

- Efterfrågat vridmomentet till höghastighetsaxeln, Tq_c .
- Luftmassflödet från kompressorn, \dot{m}_c .
- Temperaturen efter kompression, T_c .
- Kompressorns effektivitet, η_c .
- Laddtryck, Π_c .
- Efterfrågad effekt, P_c .
- Kompressorhjulets tröghetsmoment, J_c .

Antaganden:

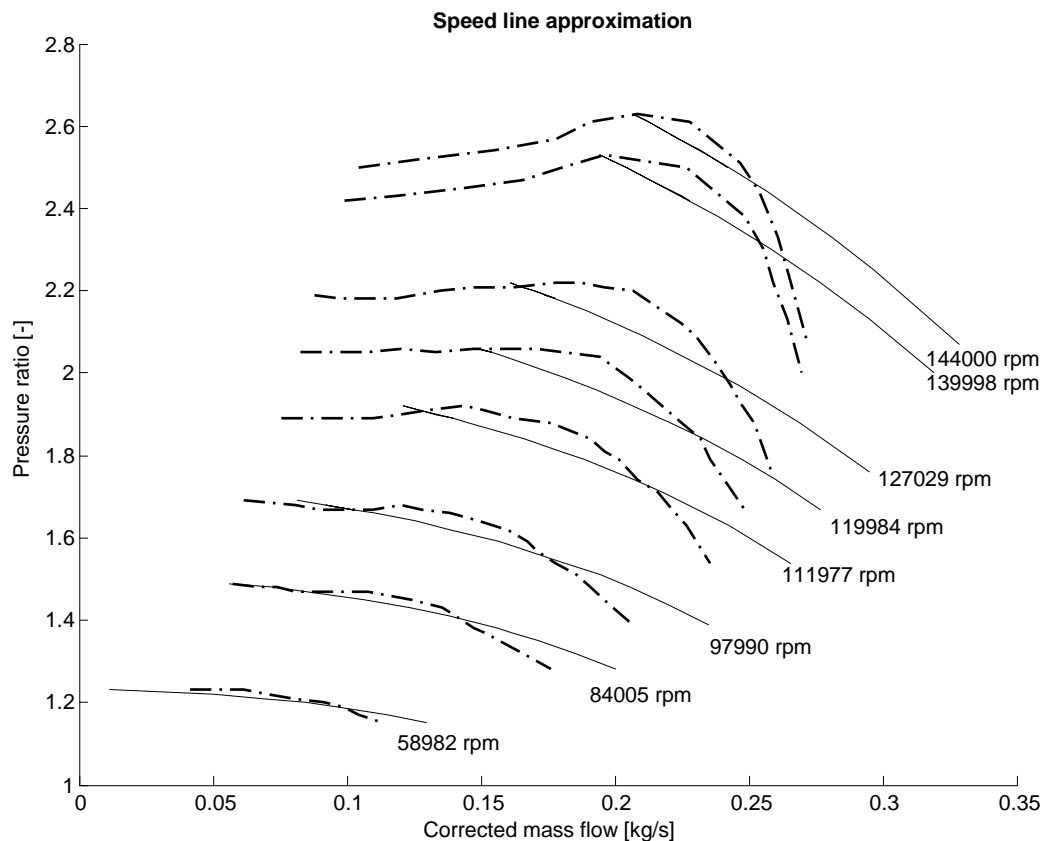
Parametrar för specifik värme är konstanta. Kompressorhjulets diameter är satt till sitt fysiska värde. Tröghetsmomentet har inte mätts upp utan enbart skattats som en första ansats.



Figur 10. Typiskt utseende för en kompressormapp, där tryckskillnaden över kompressorn plottas under luftmassflödet. Streckade linjer är så kallade "speed lines" där rotationshastigheten för kompressorhjulet är konstant. Nivåkurvorna visar kompressorns effektivitet.

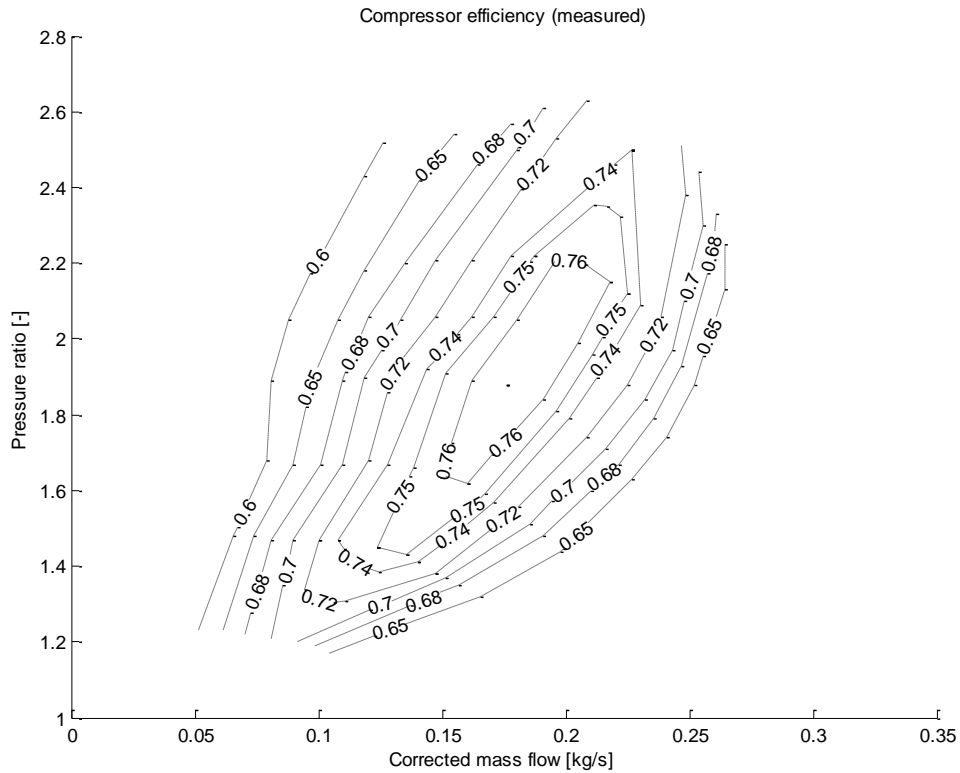
2.3.1.4.1 Validering av kompressormodell

Med utgångspunkt av tidigare beskrivning av kompressorn, anpassas modellen med hjälp av en jämförelse med tillverkarens mätdata ur kompressormappar. En flödesmapp med effektivitet utifrån tillverkarens data visas i Figur 10. Valideringsprocessen är en arbetskrävande process, och detaljer utlämnas här för att ge mer fokus åt resultaten den ger. För att ge en överskådlig bild av skattningen, presenteras effektiviteter med figurer av mätdata (Figur 12) och skattad data (Figur 13).

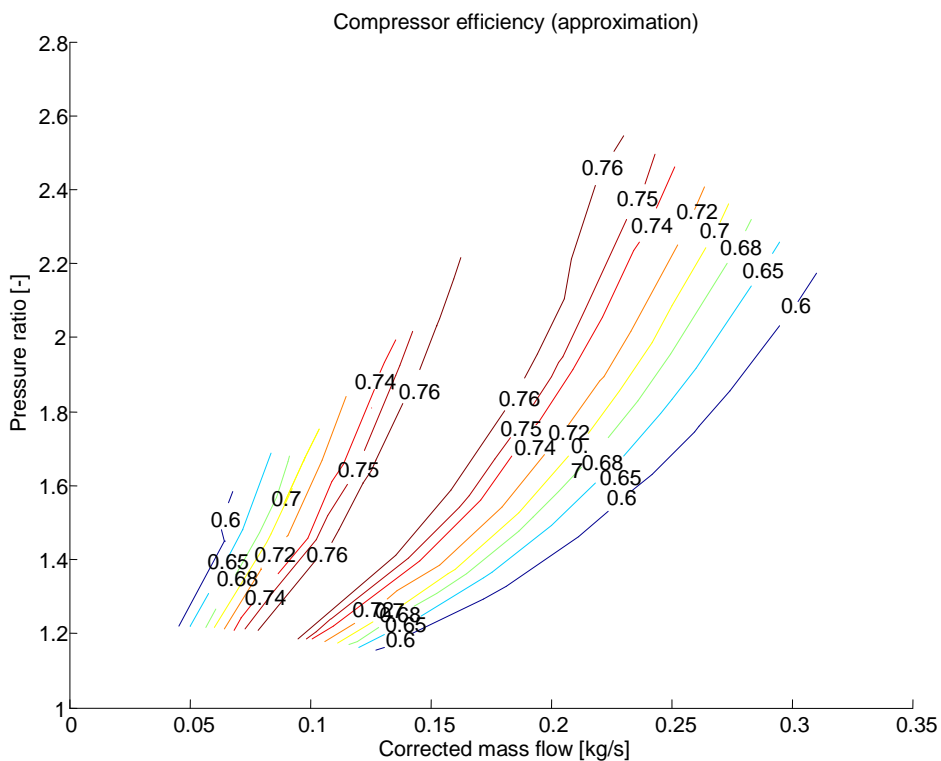


Figur 11. Kompressorns uppmätta hastighetslinjer, så kallade "speed lines" (streckade linjer), samt deras approximationer (heldragna linjer). Skattningen är bättre för lägre hastigheter.

Det kan noteras att skattningen är god för låga hastigheter och låga flöden, men sämre för höga flöden och höga hastigheter. Detta beroende på att modellen inte kompenserar för mättande effekter på flödet (så kallad choke) till höger i kompressormappen. Då kompressorn förväntas arbeta mestadels i det låga till medelhöga hastighetsområdet, är bedömningen att den sämre skattningen för höga hastigheter inte kommer påverka det totala systemet i någon större grad.



Figur 12. Musseldiagram över kompressorns uppmätta effektivitet.

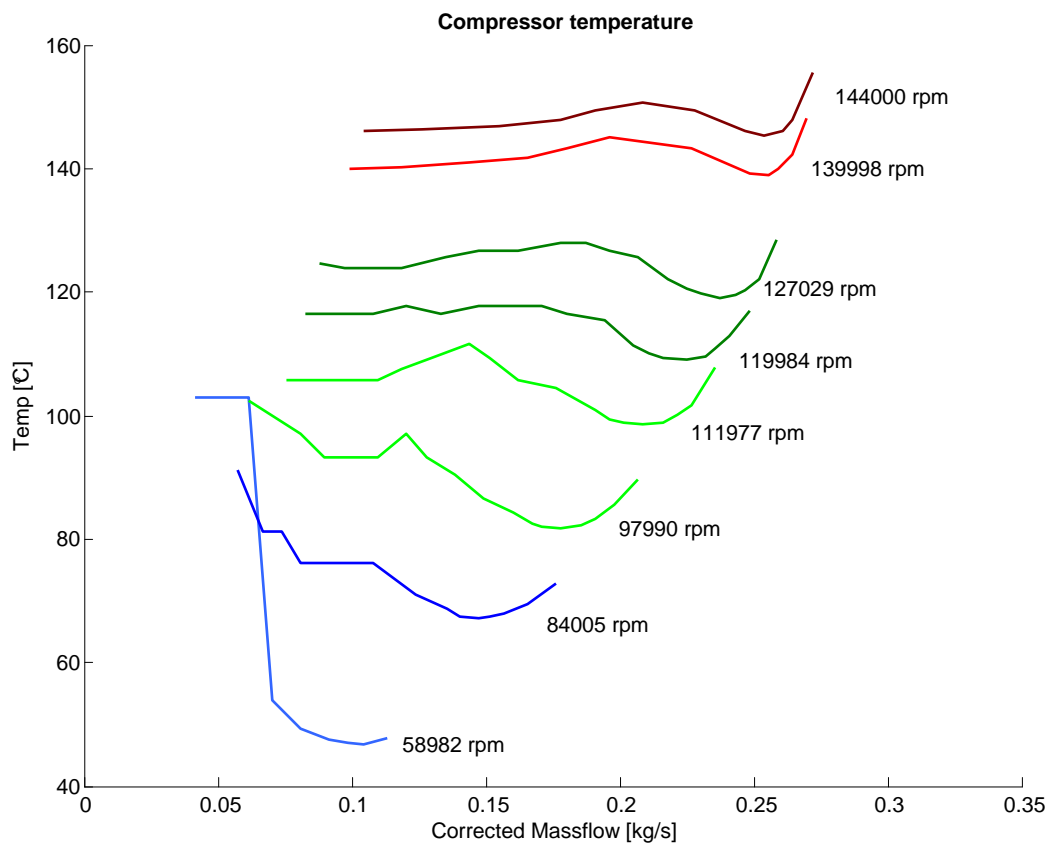


Figur 13. Musseldiagram över kompressorns skattade effektivitet, utgående från den uppmätta effektiviteten. Skattningen anses god inom området där data funnits tillgängligt, men något optimistisk för låga flöden.

En effekt av den förenkling av kompressorns effektivitet som görs är att skattningen blir optimistisk i det område som ligger utanför det där data finns representerad av tillverkaren samt för låga rotationshastigheter. Det är också i detta ytterområde som mycket av valideringen av motorsystemet görs. Då kompressorn är tänkt att anpassas efter arbetsområdet för laddluftssystemet, görs inga försök att beskriva eller förbjuda att kompressorn arbetar i otillåtet område. I de fall går att konstatera att ett bättre val av kompressortyp är möjlig, alternativt bör åtgärd tagas som reducerar tiden i surge. Största effekten för valideringen är att temperaturen blir missvisande och detta bör beaktas.

Värt att notera är även att spridningen för val av parametermodell för effektiviteten kan vara stor, med skillnader upp till 10 %. En mer förfinad modell som även tar hänsyn till rotationshastighet, kan vara önskvärd i ett fortsatt utvecklingsarbete.

För att få en känsla över den temperaturökning som kompressorn ger till inluften presenteras en figur över kompressorns uttemperatur för hastighetslinjerna som funktion av massflöde. Här kan också ses att begränsningen av kompressorns effektivitet för låga flöden resulterar i en begränsning av temperaturen. Temperaturen är därför missvisande i regioner som ligger utanför de där mätdata finns tillgängligt. Det kan antas att den verkliga temperaturen är aningen högre än den som modellen visar.



Figur 14. Modellerad uttemperatur från kompressorn före intercooler. Temperaturen är begränsad för låga hastigheter och flöden.

2.3.1.5 Generator/Elmotor

Laddluftssystemet innehåller en kombinerad elmotor/generator. Generatorns främsta uppgift för systemet är att omvandla mekanisk energi till elektrisk energi. Denna energi kan sedan lagras i batteri eller användas för direktförsörjning av bilens övriga elsystem. Generatorn i laddluftssystemet fungerar även som fordonets ordinarie generator. Elmotorns uppgift är att tillföra energi för att driva kompressorn. Funktionen för enheten medför vinster för bränsleförbrukning och prestanda.

Aspekter för bränsleförbrukning

- Förbränningsmotorn kan lastas eller avlastas för att verka i en mer gynnsam punkt för bränsleförbrukningen.
- Elektrisk regenerering av avgasenergin medför att mindre energi behöver tas från vevaxeln.
- Elektrisk regenerering av bromsenergin verkar positivt för bränsleförbrukningen.

Aspekter för prestanda

- Kompressorn kan ges en elektrisk boost i de fall ett högt effektuttag önskas. Elektrisk boost innebär att kompressorhjulet varvas upp med hjälp av elenergi då både mekanisk och termisk energi saknas för drivningen.

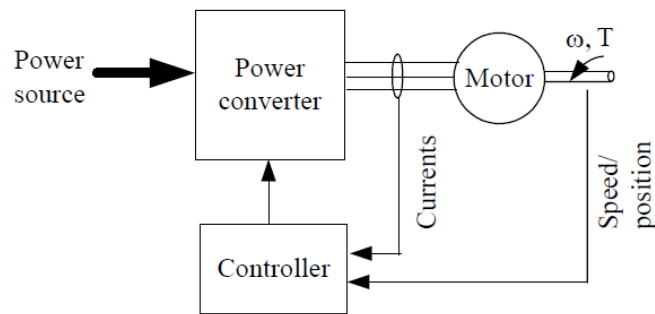
Elmotorn och generatorn överför energi mellan domäner och är modellerad som ett energiomvandlingselement. Paralleller kan dras till en förbränningsmotor, där insignaler ska ge en önskad uteffekt vid aktuellt varvtal. Motsvarande utsignaler för elmotorn är drivmoment och ström.

Generellt sett kan en elmotor verka i alla fyra kvadranter, beroende av vilken elektrisk effektomvandlare som används. Enheten i laddluftssystemet är modellerad som en elmotor verkandes i två kvadranter, där tecknet för det drivande momentet avgör om elmotorn är att betrakta som en drivande elmotor eller en konsumerande generator. Beskrivningen är gjord för att få en mer kompakt modell samt för att enkelt avgöra i vilken kvadrant elmotorn för tillfället verkar. Enbart positiva vinkelhastigheter är aktuella, vilket gör att tredje- och fjärdekvadrantverkan inte behöver beaktas.

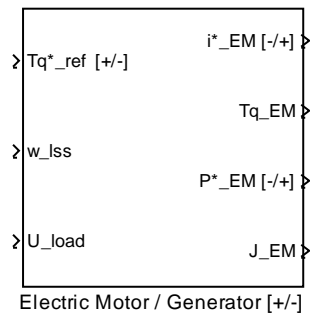
För energiomvandlare kan utgående moment beräknas om den ingående energin och effektiviteten är beskrivna. Ingående energin modelleras från en referenssignal från styrenheten. Modellering av en effektomvandlare beräknar sedan den verkliga effekt som tillförs eller dras ifrån batteriet.

För en enkel representation och för att sätta struktur på modelleringen, beskrivs elmotorn av sin effektivitetsmapp. Effektivitetsmappen kan anpassas till en uppmätt elmotor. En mer ingående modellering av den elmotor som är lämpad för laddluftssystemet är fall för kommande systemutveckling då ingen elmotor är universell för alla hybridkoncept, utan kräver en mer anpassad uppbyggnad. Teoretiskt kan dock mycket sägas vara gemensamt för modelleringen av elmotorsystem. I ett inledande skede är effektivitetsmappen representerad med ett principutseende för en elmotor som är tänkt att användas inom hybridapplikationer. Resonemanget kring principutseende och karaktäristik för elmotorsystemet är hämtade från [2], och är mer beskrivet under *Redovisning av elmotor*. Som en anpassning till fortsatt systemutveckling, är skalbarhet hos den modellerade elmotorn beaktad. Typisk karaktäristik för elmotorn är att den begränsas av en maximal ström för låga hastigheter, en maximal effekt samt en maximal rotationshastighet. Dessa begränsningar är parametrar till modellen.

Figur 15, tagen från [2], visar huvudkomponenterna i ett typiskt elektriskt system. Figuren är en översikt till de uppsatta modellekvationerna.



Figur 15. Huvudkomponenter för ett typiskt system med en elmotor.



Figur 16. Komponentmodell av elmotor/generator, så som den ser ut i Simulink.

Ekvationer:

$$P_{EM} = \frac{Tq_{ref} \omega}{\eta_{PC} \eta_{EM}(\omega, Tq)}$$

$$I_{EM} = \frac{P_{EM}}{U_{load}}$$

$$-P_{min} \leq P \leq P_{max}$$

$$0 \leq \omega \leq \omega_{max}$$

Parametrar:

- Maximala vridmomentet, $Tq_{EM,max}$.
- Maximala effekten, $P_{EM,max}$.
- Maximala rotationshastigheten, $\omega_{EM,max}$.
- Elektriska effektomvandlarens effektivitet, η_{PC} .
- Tröghetsmomentet, J_{EM} .

Insignaler:

- Det efterfrågade vridmoment från styrenheten, Tq_{ref} .
- Låghastighetsaxelns vinkelhastighet, ω_{iss} .
- Lastspänningen från batteriet, U_{load} .

Utsignaler:

- Lastströmmen till batteriet, i_{EM} .
- Det levererade vridmoment till låghastighetsaxeln, Tq_{EM} .

- Elmotorns effekt, P_{EM} .
- Enhetens masströghetsmoment, J_{EM} .

Antaganden:

Beskrivningen av elmotorn utgår från ett antagande att den har ett liknande beteende som för elmotorer som är tänkta för hybridapplikationer. Alla parametrar har givits uppskattade referensvärden som en första ansats. Ytterligare beskrivning och motivering till antaganden ges under beskrivningen av elmotorn ovan, samt under *Redovisning av elmotor* nedan.

2.3.1.5.1 Redovisning av elmotor

Figur 17 visar elmotorns effektivitetsmapp för modellens två kvadranter. I figuren är begränsningar på vridmoment och vinkelhastighet även inritade. Principutseendet är tagna efter resonemang från [2]. Effektiviteten för elmotorn utgår från fyra typer av förluster, vilka är gemensamma för alla typer av elmotorer. Dessa är

- lindningsförluster,
- magnetiseringsförluster,
- friktionsförluster och vindmotstånd samt
- konstanta förluster.

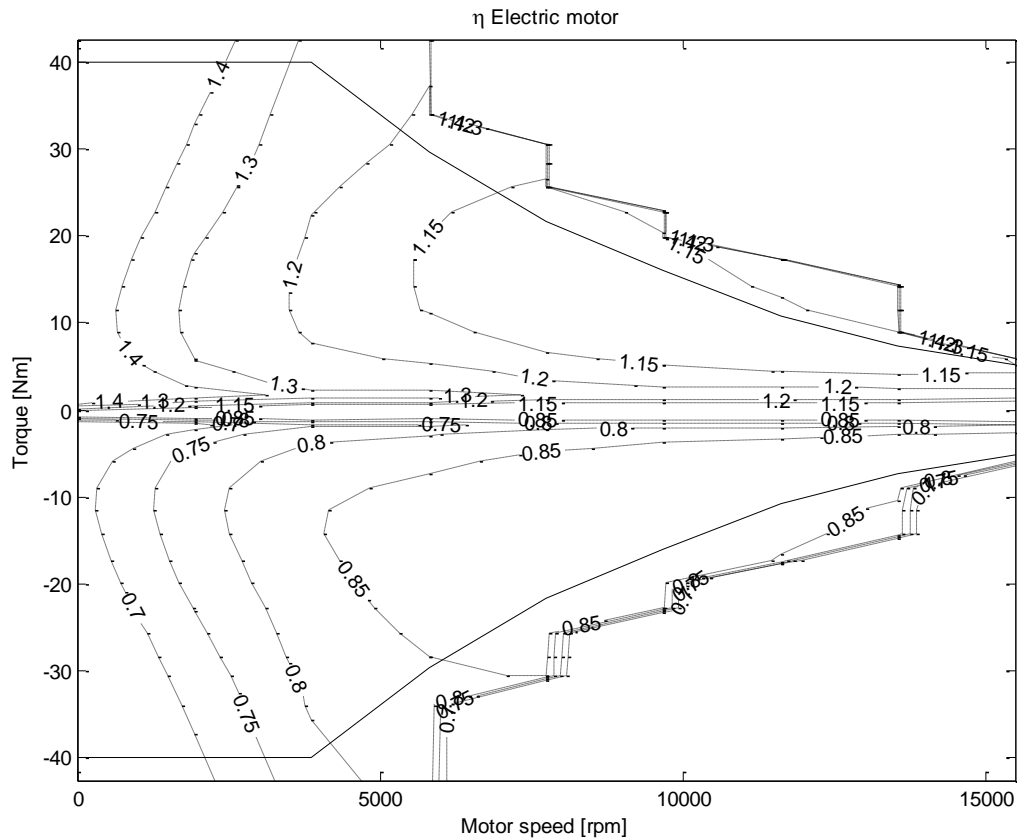
Lindningsförluster härstammar från den elektriska resistansen i ledningarna och är proportionell mot vridmomentet i kvadrat. Den andra typiska förlusten, magnetiseringsförluster i material, uppstår då det magnetiska fältet kontinuerligt alternerar och skapar ytströmmar samt hysteres i materialet. Dessa är vanligen en andragsgradsfunktion av rotationshastigheten. Friktionsförluster och vindmotstånd är antagna proportionella mot rotationshastigheten och rotationshastigheten i kubik. Fjärde och sista förlusten, benämnd som konstanta förluster, uppkommer under statiska förhållanden. Alla dessa förluster kombineras till en sammanslagen beskrivande ekvation för totala effektförlusten för elmotorn. Denna funktion är en bra approximation för alla typer av elmotorer.

$$P_{tot} = k_{lindning} Tq^2 + k_1 \omega + k_2 \omega^2 + k_{vind} \omega^3$$

Där k_1 och k_2 innehåller information om hysteres, friktion och ytströmmar. Effektiviteten för elmotorn är således beskriven av följande ekvation

$$\eta_{EM} = \frac{P_{ut}}{P_{in}} = \frac{\omega Tq}{\omega Tq + k_{lindning} Tq^2 + k_1 \omega + k_2 \omega^2 + k_{vind} \omega^3}$$

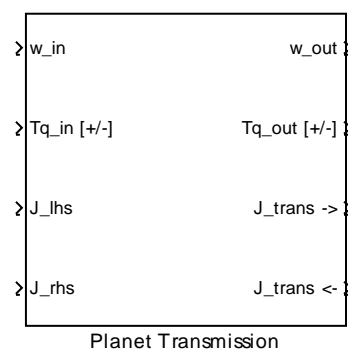
Att erhålla adekvata värden på konstanterna är föremål för framtida arbete. De måste mätas mer noggrant för elmotorn i laddluftssystemet, exempelvis genom direkta mätningar eller med regressionsanalys. Figur 17 visar dock principutseende för effektivitetsmappen enligt de antaganden som är beskrivna.



Figur 17. Elmotorns effektivitetsmapp med begränsningar på moment och vinkelhastighet. Eftersom efterfrågad effekt är större än den levererade, är effektiviteten modellerad som större än 1 för drivande moment.

2.3.1.6 Planetväxel

Planetväxeln är ett element där flöde och intensitet omvandlas under statiska förhållanden. Uppgiften den har är att omvandla vinkelhastighet och vridmoment mellan ingående delar, samt ta hänsyn till dynamiska aspekter i form av transformerat tröghetsmoment. Växeln behövs i laddluftssystemet eftersom turbinen och kompressorn arbetar inom ett högre varvtalsregister än övriga komponenter. Växeln är modellerad för att hantera dubbelriktat vridmoment. I en första ansats antas växeln inte ha något internt tröghetsmoment. För en mer ingående analys bör även det modelleras.



Figur 18. Komponentmodell av planetväxel, så som den ser ut i Simulink.

Ekvationer:

$$\begin{aligned}\omega_{out} &= r \cdot \omega_{in} \\ P_{out} &= \eta_{pt} \cdot P_{in} - P_{0,pt} \\ J_{trans->} &= J_{lhs} \cdot r_{pt}^2\end{aligned}$$

Parametrar:

- Utväxlingsförhållande, r_{pt} .
- Effektivitet, η_{pt} .
- Statisk friktionsförlust, $P_{0,pt}$.

Insignaler:

- Vinkelhastighet in till växeln, ω_{in} .
- Vridmomentet in till växeln, Tq_{in} .
- Masströghetsmoment för ingående axlar, J_{lhs} , J_{rhs} .

Utsignaler:

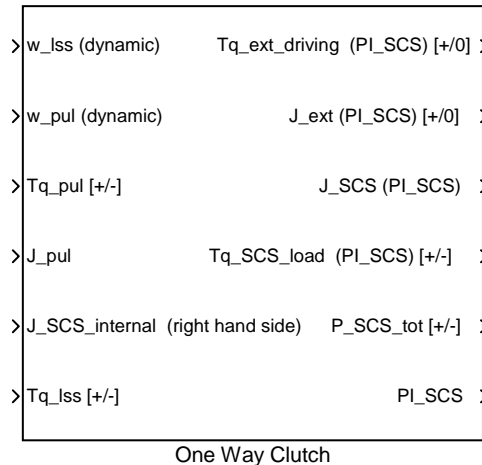
- Den utväxlade vinkelhastigheten, ω_{out} .
- Det utväxlade vridmomentet, Tq_{out} .
- Masströghetsmoment för utgående axlar, $J_{trans->}$, $J_{trans<-}$.

Antaganden:

Växeln beskrivs av linjära förluster och antas sakna eget internt tröghetsmoment.

2.3.1.7 Koppling

För att den mekaniska effekt som skapas av laddluftssystemet inte ska vara begränsad av förbränningsmotorns aktuella varvtal krävs en bortkoppling. Den koppling som finns i laddluftssystemet verkar bara i ena riktningen för vridmomentet mellan låghastighetsaxeln och förbränningsmotorn. Kopplingen omformar mekaniska flöden och intensiteter inom samma domän och kategoriseras som en energiförlust. Trots kategoriseringens benämning antas det att kopplingen saknar både tröghetsmoment och effektförluster. I en utveckling av modellen kan förlusterna vilja behandlas. Funktionen hos kopplingen kan i en första anblick verka enkel. Modelleringsmässigt är den dock mer komplicerad, eftersom kopplingen är styrd av styrenheten. Kopplingen innehåller även en viktig variabel för styrningen, vilken är förhållandet mellan det varvtal som laddsystemet har och varvtalet växlat från förbränningsmotorn.



Figur 19. Komponentmodell av koppling, så som den ser ut i Simulink.

Ekvationer:

$$\Pi_{SCS} = \frac{\omega_{lss}}{\omega_{pul}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \omega_{lss} = \omega_{pul} \\ Tq_{ext,driving} = Tq_{pul} \\ J_{ext} = J_{pul} \end{array} \right\} \text{ för } \Pi_{SCS} \leq 1$$

0 annars

Parametrar:

Enheten saknar varierbara parametrar.

Insignaler:

- Vinkelhastigheten för den gemensamma låghastighetsaxeln, ω_{lss} .
- Remskivans vinkelhastighet, ω_{pul} .
- Vridmoment från remskivan, Tq_{pul} .
- Masströghetsmoment från remskivan, J_{pul}
- Masströghetsmoment ifrån övriga laddluftssystemet, J_{SCS} .
- Vridmoment från låghastighetsaxeln, Tq_{lss} .

Utsignaler:

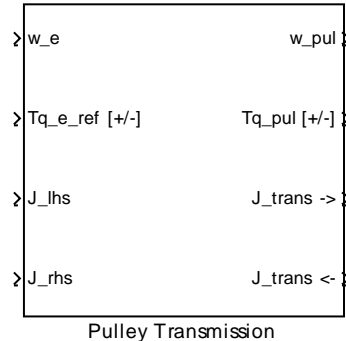
- Vridmomentet till låghastighetsaxeln, $Tq_{ext,driving}$.
- Masströghetsmomentet från remskivan, J_{ext} .
- Masströghetsmomentet från laddluftssystemet, J_{SCS} .
- Vridmomentet från laddluftssystemet, $Tq_{SCS,load}$.
- Den totala effekten, P_{tot} .
- Vinkelhastighetsförhållande mellan remskivan och låghastighetsväxeln, PI_{SCS} .

Antaganden:

Kopplingen saknar eget tröghetsmoment och innehåller ingen beskrivning av förluster.

2.3.1.8 Remväxel

Remväxeln ska ta energi från motorns vevaxel och leverera denna till laddluftssystemet. Den växlar även om motorns varvtal till ett mer passande för laddluftssystemets låghastighetsaxel. Enheten är en enkel växel modellerad som en energiförlust. Härledning och ekvationer är liknande de för planetväxeln.



Figur 20. Komponentmodell av remskiva, så som den ser ut i Simulink.

Parametrar:

- Utväxlingsförhållande, r_{pul} .
- Effektivitet, η_{pul} .
- Statisk friktionsförlust, $P_{0,pul}$.

Insignaler:

- Vinkelhastigheten från motor, ω_e .
- Det pålagda vridmomentet, $Tq_{e,ref}$.
- Masströghetsmoment för ingående axlar, J_{lhs} , J_{rhs} .

Utsignaler:

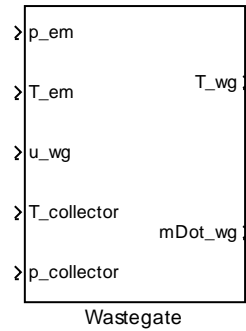
- Utväxlad vinkelhastighet för remskivan, ω_{pul} .
- Vridmomentet till laddluftssystemet, Tq_{pul} .
- Masströghetsmoment för utgående axlar, $J_{trans->}$, $J_{trans<-}$.

Antagande:

Växeln beskrivs av linjära förluster och antas sakna eget internt tröghetsmoment.

2.3.1.9 Wastegate

En wastegate är en ventilöppning som ska föra avgasflödet från förbränningsmotorns grenrör direkt till avgassystemet, utan att det går via turbinen. Effekten till turbinen kan därmed begränsas för att förhindra att så kallat knock uppstår i motorn som kan förstöra denna. På grund av flödets höga hastighet via wastegaten, modelleras det som en restriktion för kompressibelt flöde. Flödet är beroende på hur öppen ventilen ställs, och dess effektiva öppningsarea ses därför som en varierbar insignal som är styrd via ventilen av en regulator. Styrsignalen till wastegaten kan även vara kombinerad med styrsignalen till generatoren. Ventilen är tänkt att regleras så att effekten i första hand ska tas ut av generatoren och i andra hand ska wastegaten öppnas och släppa ut avgasenergin förbi turbinen. Wastegaten är modellerad med hjälp av standardkomponenter för flödesrestriktioner, hämtade från *MVEM-lib*.



Figur 21. Komponentmodell av wastegate, så som den ser ut i Simulink.

Ekvationer:

$$A_{eff, wg} = \pi \cdot C_d \cdot u_{wg} \cdot \min(L_{wg}, \frac{D_{wg}}{4})$$

$$\dot{m}_{wg} = \frac{A_{eff} \cdot p_{em}}{\sqrt{R \cdot T_{em}}} \Psi$$

Parametrar:

- Ventilklaffens diameter, D_{wg} .
- Ventilens maximala öppningslängd, L_{wg} .
- Ventilens C_d värde, $C_{d, wg}$.
- Specifik värme, γ_{wg} .
- Ideal gaskonstant, R .

Insignaler:

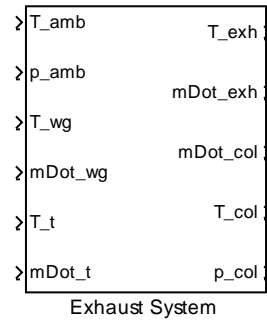
- Avgastrycket i grenröret, p_{em} .
- Temperaturen i grenröret, T_{em} .
- Styrsignal från regulator, u_{wg} .
- Avgastrycket i kollektorrör efter turbinen och wastegaten, $p_{collector}$.
- Temperaturen i kollektorrör efter turbinen och wastegaten, $T_{collector}$.

Utsignaler:

- Temperaturen för avgasflödet ut från wastegaten, T_{wg} .
- Avgasflödet genom wastegaten, \dot{m}_{wg} .

2.3.1.10 Avgassystem

Avgassystemet är uppbyggt av standardkomponenter från *MVEM-lib*. Systemet består bland annat av ett kollektorrör, vilket är modellerat som en adiabatisk mixer och säkerställer att mass- och energibalans upprätthålls mellan flödena genom wastegaten och turbinen. I övrigt är enheten modellerad som en flödesrestriktion, vilken är beskriven utförligare i *Appendix I*.



Figur 22. Komponentmodell av avgassystem, så som den ser ut i Simulink.

Ekvationer:

$$T_{col} = \frac{\dot{m}_{wg} c_{p,wg} T_{wg} + \dot{m}_t c_{p,t} T_t}{\dot{m}_{wg} c_{p,wg} + \dot{m}_t c_{p,t}}$$

$$T_{exh} = T_{col}$$

$$\dot{m}_{col} = \dot{m}_{wg} + \dot{m}_t$$

$$\dot{m}_{exh} = \sqrt{\frac{p_{col}}{C_{exh} T_{col}} (p_{col} - p_{exh})}$$

$$p_{col} = \frac{\dot{m}_{col} R T_{col}}{V_{col}}$$

Parametrar:

- Specifik värme, flöde genom wastegate, $c_{p,wg}$.
- Specifik värme, turbinflöde, $c_{p,t}$.
- Kollektorrörets volym, V_{col} .
- Kollektorrörets gaskonstant, R_{col} .
- Kollektorrörets specifika värmeförhållande, γ_{col} .
- Flödesresistans för avgassystemet, C_{exh} .

Insignaler:

- Omgivningsluftens temperatur, T_{amb} .
- Omgivningsluftens tryck, p_{amb} .
- Flödestemperaturen från wastegaten, T_{wg} .
- Massflöde från wastegaten, \dot{m}_{wg} .
- Flödestemperaturen efter turbinen. T_t .
- Massflöde från turbinen, \dot{m}_t .

Utsignaler:

- Flödestemperaturen i avgasröret, T_{exh} .
- Massflödet från avgasröret, \dot{m}_{exh} .
- Massflöde från kollektorröret, \dot{m}_{col} .
- Flödestemperaturen i kollektorröret, T_{col} .
- Trycket i kollektorröret, p_{col} .

Antaganden:

De specifika värmekonstanterna är satta till lika värden och är antagna från typiska avgasflöden i grenröret. Kollektorrörets volym och flödesresistansen för avgassystemet är satta till uppskattade värden.

2.3.2 Styrenhet

Styrenheten är det modellelement där regleralgoritmer för laddluftsystemet har samlats. Styrenhetens funktion är användarberoende och faller inte under någon av de generaliserade kategorierna, och den är därför klassad som ett övrigt element. In och utsignalerna kan i många fall likna flödes- och intensitetsvariabler. Största skillnaden är dock att ut signaler inte innehåller något energiutbyte som berikar systemet, utan enbart information om önskat uppförande. Det generella syftet med styrenheten är att behandla systemdata, externa insignaler och kontrollinstruktioner. Utifrån informationen, med hänsyn tagen till de begränsningar som finns, ska enheten generera styrsignaler till de olika systemkomponenterna.

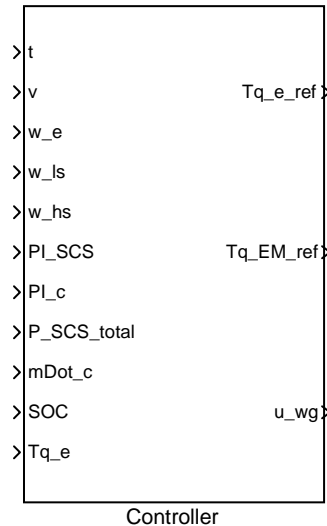
För att undvika loopar som är mycket beräkningskrävande, samt för att upprätthålla kausalitet i modellen, innehåller styrenheten ett minneselement som gör att styrsignalen inte direkt påverkar systemet, utan först efter det att den beräknats för givet fall. För detta syfte är enheten modellerad som en användarberoende *Embedded MATLAB Function* [10].

Utseendet på kontrollalgoritmen för laddluftssystemet är relativt komplex, då styrningen inte är helt uppenbar samtidigt som de ingående variablerna är kopplade till varandra på ett implicit sätt.

De genererade styrsignalerna är beroende av de förutsättningar som ställs upp i form av olika körfall, samt för det uppförande som är eftersträvat för varje enskilt tillfälle. Hur en mer utförlig och optimal kontrollalgoritm ser ut blir därmed fall för en framtida analys.

Två viktiga tillämpningar är att reglera wastegate och elmotor/generator. Insignaler för styrningen av wastegate är bland annat laddtryck för kompressorn. Styrsignalen för wastegaten anger den andel som ventilen ska ställas öppen. Styrningen av elmotor/generator är beroende på tillståndet för systemet. Därför måste diverse systeminformation läsas in. Utifrån denna tas beslut om en styrning i form av önskat vridmoment till låghastighetsaxeln.

Styrenheten innehåller även manövrering av kopplingen. Detta för att få en mer flexibel kopplingsfunktion samt att förhållandet mellan växlad vevaxelrotation och laddluftsystemets rotationshastighet är en viktig tillståndsvariabel för övrig reglering. Kopplingens styrning sker med en referens kopplad till motorns vridmoment.



Figur 23. Komponentmodell av styrenheten, så som den ser ut i Simulink. Insignaler är tillstånd för modellen. Utsignaler är styrsignaler till laddluftssystemet.

Insignaler:

- Den aktuella simuleringstiden, t .
- Fordonshastigheten, v .
- Förbränningsmotorns rotationshastighet, ω_e .
- Låghastighetsaxelns rotationshastighet, ω_{lss} .
- Höghastighetsaxelns rotationshastighet, ω_{hss} .
- Varvtalsförhållandet, Π_{SCS} .
- Kompressorns laddtryck, Π_c .
- Totala momentana effekten i laddluftssystemet, P_{SCS} .
- Massflödet genom kompressorn, \dot{m}_c .
- Batteriets laddningsgrad, SOC .
- Moment från förbränningsmotorn, Tq_e .

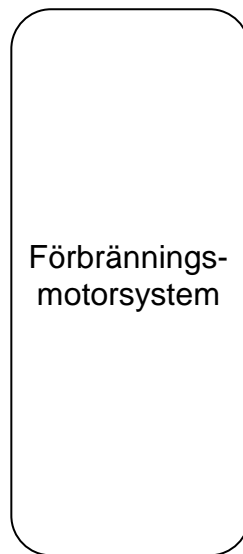
Utsignaler:

- Momentreferens till förbränningsmotor, $Tq_{e,ref}$.
- Styrsignalen till elmotorn/generatoren, $Tq_{EM,ref}$.
- Styrsignalen till wastegaten, u_{wg} .

2.3.2.1 Kategorisering

Styrenheten kategoriseras som ett övrigt element.

2.3.3 Förbränningsmotorsystem



Figur 24. Komponentöversikt av förbränningsmotorsystemet.

Komponentöversikten av förbränningsmotorsystemet visas i Figur 24 och kan identifieras från översikten i Figur 1. Systemet består av följande delar

- Luftfilter och intercooler
- Trottell och insugsport
- Batteri
- Elförbrukare
- Förbränningsmotor

2.3.3.1 Kategorisering

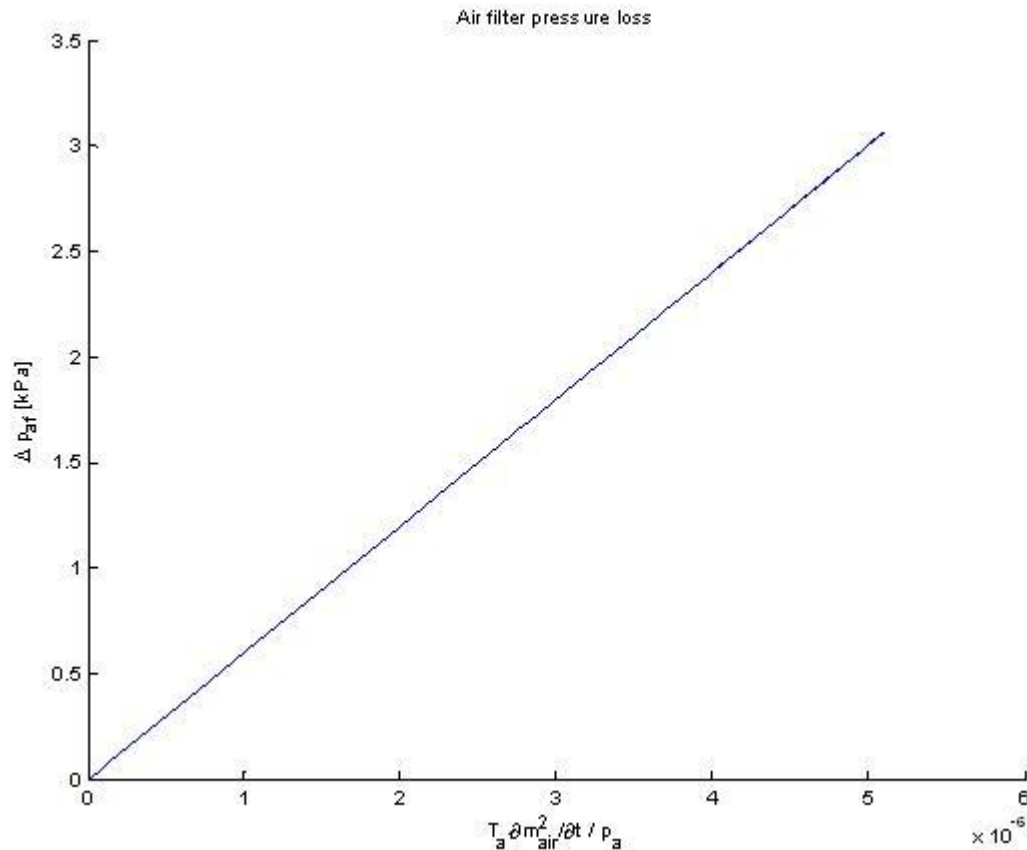
Luftfilter och intercooler, trottell och insugsport räknas främst som förlustelement i form av flödesrestriktioner. Batteri klassas som upplagringsselement. Elförbrukare är elektriska energiförluster. Förbränningsmotor kategoriseras som omvandlingsselement.

2.3.3.2 Luftfilter och intercooler, Trottell och insugsport

Luftfilter, intercooler, trottell och insugsport är alla komponenter som hämtats från *MVEM-lib*. Någon utförligare beskrivning av dessa görs därmed inte, utan referens ges istället till [4]. En validering av luftfiltrets karaktäristik görs emellertid.

2.3.3.2.1 Validering av luftfilter:

Luftfiltret anpassas till en generell modell av flödesrestriktion. Efter observationer gjorda i motorlabbet, där en tryckmätare i insugsröret samt en tryckmätare kopplad till röret mellan kompressor och intercooler har studerats under motorriggskörningarna, antas lufttrycket falla linjärt över luftfilter och intercooler. Modellen för flödesrestriktioner har använts med framgång inom många olika tillämpningar [1], [3]. En linjär modell med friktionskonstant kan således antas beskriva luftfiltret väl. En mer detaljerad validering för filtret som enskild komponent bedöms inte vara nödvändig, utan de observationer som gjorts i motorlabbet bedöms vara en tillräcklig god informationskälla. En figur av filtrets uppskattade tryckförlust visas nedan.



Figur 25. Flödesrestriktion över luftfilter. Restriktionen antas linjär efter observationer i motorriggen.

2.3.3.3 Batteri

Batteriet är beskrivet av sin effektivitetsmapp. Den mest beskrivande faktorn som ligger till grund för framtida reglerstrukturer är dock dess laddningsgrad. Laddningsgraden betecknas State Of Charge, *SOC*, och anges i procent av full laddning. Övriga parametrar för batteriet är laddningskapacitet och en referensladdningsgrad som det bör upprätthålla.

2.3.3.4 Elförbrukare

Elförbrukarna är komponenter som kräver elenergi för sin funktion. Beskrivningen av dessa sker i form av ett medelvärde på den strömförbrukning de drar från batteriet.

2.3.3.5 Förbränningsmotor

Baserad på kategoriseringen är förbränningsmotorn beskriven utifrån hur effektivt energiomvandlingen sker. Karaktäristiken beskrivs till största delen av en faktor baserad på ottomotorns effektivitet samt av fyllnadsgraden. Fyllnadsgraden är ett mått på hur väl förbränningsmotorn andas vid olika arbetspunkter. Detta mått är unikt för varje motor. Generellt är dock en grundläggande karaktäristik gemensam, då fyllnadsgraden är högre för ökad trottelvinkel (högre belastning). Den fyllnadsgrad som är uppmätt i testrigg med hjälp av *NIRA* och som används i modellen visas i Figur 26.

Karaktäristiken är underlag för framtida reglerstrukturer, varvid det finns skäl att återkomma till den grafiska representationen. En följd av karaktäristiken är att den specifika bränsleförbrukningen är lägre där motorn jobbar mer effektivt. Den specifika

bränsleförbrukningen ger ett jämförbart mått gentemot andra motorsystem. Typisk karaktäristik för en referensmotor visas kombinerad med motormapp i Figur 27.

Förbränningsmotorn är vidare begränsad av ett varvtalsområde och ett vridmomentsområde. Momentmodellen är en medelvärdesmodell med ursprung i [4].

Ekvationer:

$$Tq_e = \frac{BMEP \cdot V_d}{4\pi}$$

$$BMEP = IMEP - FMEP - PMEP$$

$$IMEP = \frac{120}{N_e V_d} \cdot \frac{\dot{m}_{NIRA}}{\left(\frac{A}{F}\right)_s} \cdot q_{HV} \cdot \eta_e$$

$$FMEP = \xi_{aux} \sqrt{\frac{75}{1000 \cdot Bore}} \left((0.464 + 0.0072 \cdot mps^{1.8}) \cdot \Pi_{bl} \cdot 10^5 + 0.0215 \cdot \hat{BMEP} \right)$$

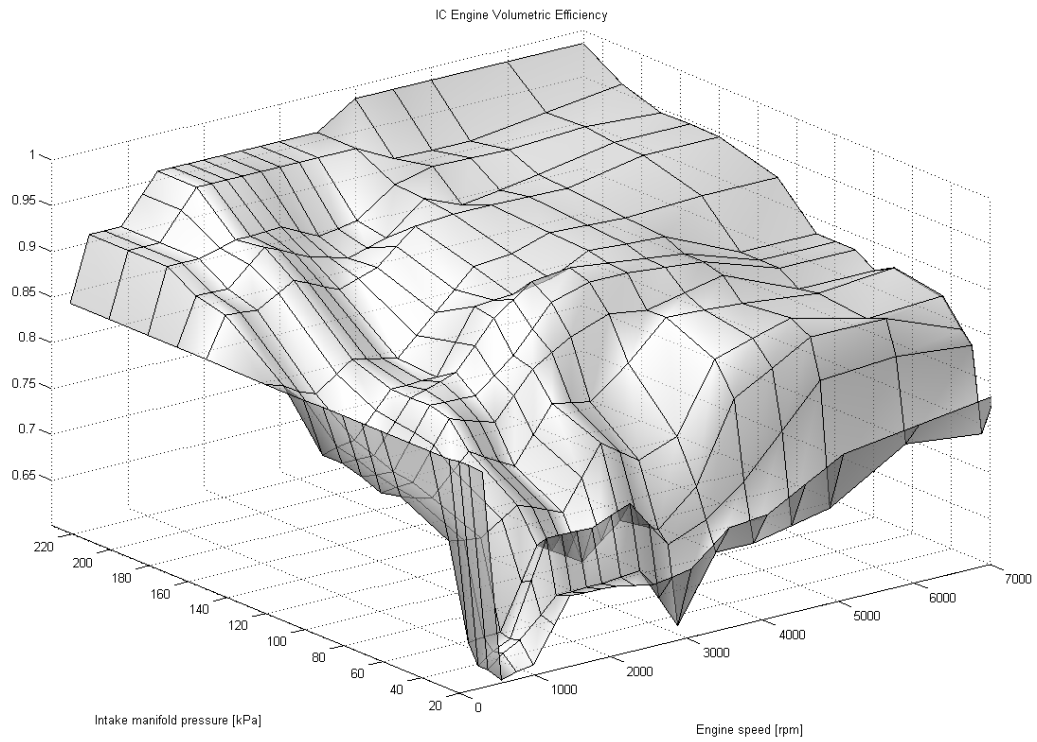
$$PMEP = p_{em} - p_{im}$$

$$\hat{BMEP} = -C_1 + C_2 \cdot p_{im}$$

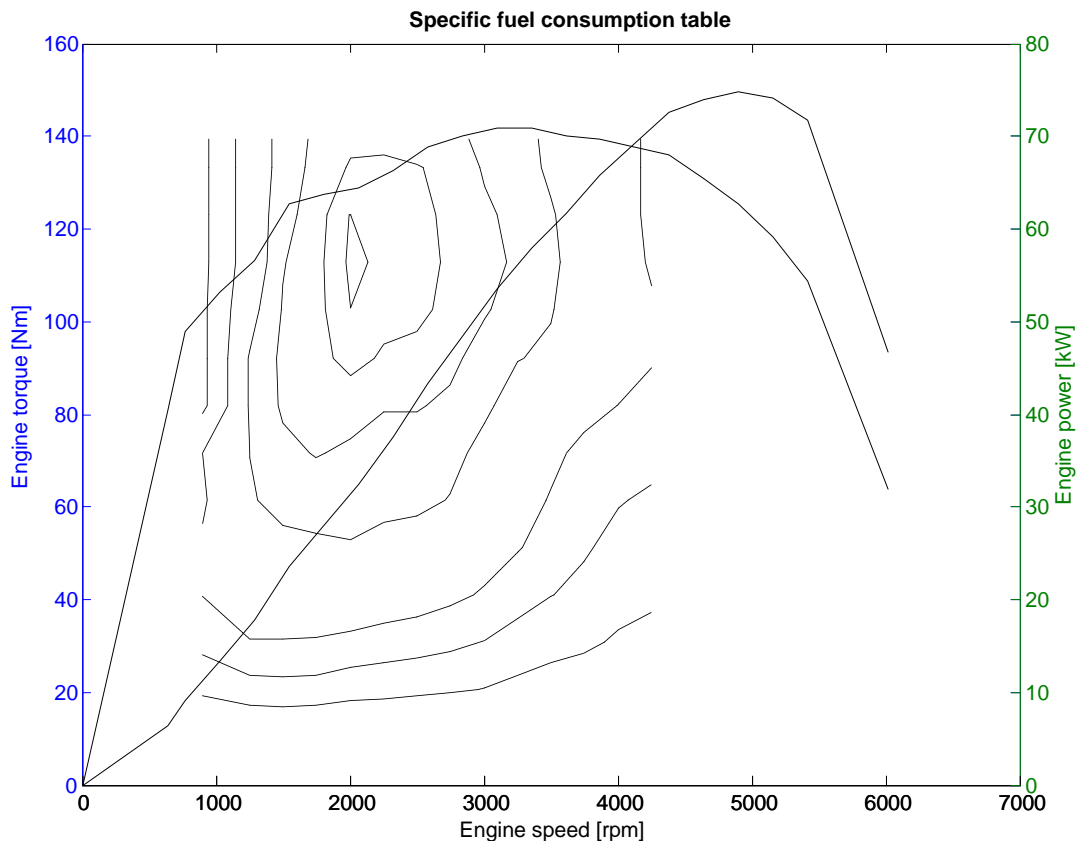
$$mps = 2 \cdot \frac{N}{60} \cdot Stroke$$

Parametrar:

- Motorvolym, V_d .
- Borrning, $Bore$.
- Slag, $Stroke$.
- Stökiometriskt luft/bränsleförhållande, $(A/F)_s$.
- Värmeinhåll för bränsle, q_{HV} .
- Förbränningsmotorns verkningsgrad, η_e .
- Konstant för FMEP, ξ_{aux} .
- Grad av överladdning, Π_{bl} .
- Konstanter för skattning av BMEP, C_1, C_2 .



Figur 26. En grafisk representation av fyllnadsgraden för referensmotorn. Fyllnadsgraden visas som andel luft som funktion av lufttrycket i insuget och motorvarvtal.



Figur 27. Typiskt utseende för en förbränningsmotormapp. Maxeffekt- och maxmomentkurva är kombinerat med den specifika bränsleförbrukningen.

2.3.3.6 Beskrivning av testcell och mätdata

Motorsystemet har validerats mot den prototyp och det testsystem som är framtaget för konceptet. Målsättningen är att få en god överensstämmelse med systemet som helhet och prioriteras över en omfattande detaljbeskrivning. En noggrann validering på detaljnivå är dock nödvändig, då små förändringar i modellen kan ge upphov till stora förändringar i dess uppförande. Ett resultat av detta är att en sammanslagen beskrivning eller mappar i flera fall valts framför en fysikalisk beskrivning för att förenkla modelleringen. Valideringsprocessen består i att jämföra simulerat tryck, temperatur och luftmassflöde med uppmätt data. Valideringen av motorsystemet presenteras som resultatet från simuleringar av en sammanslagen modell.

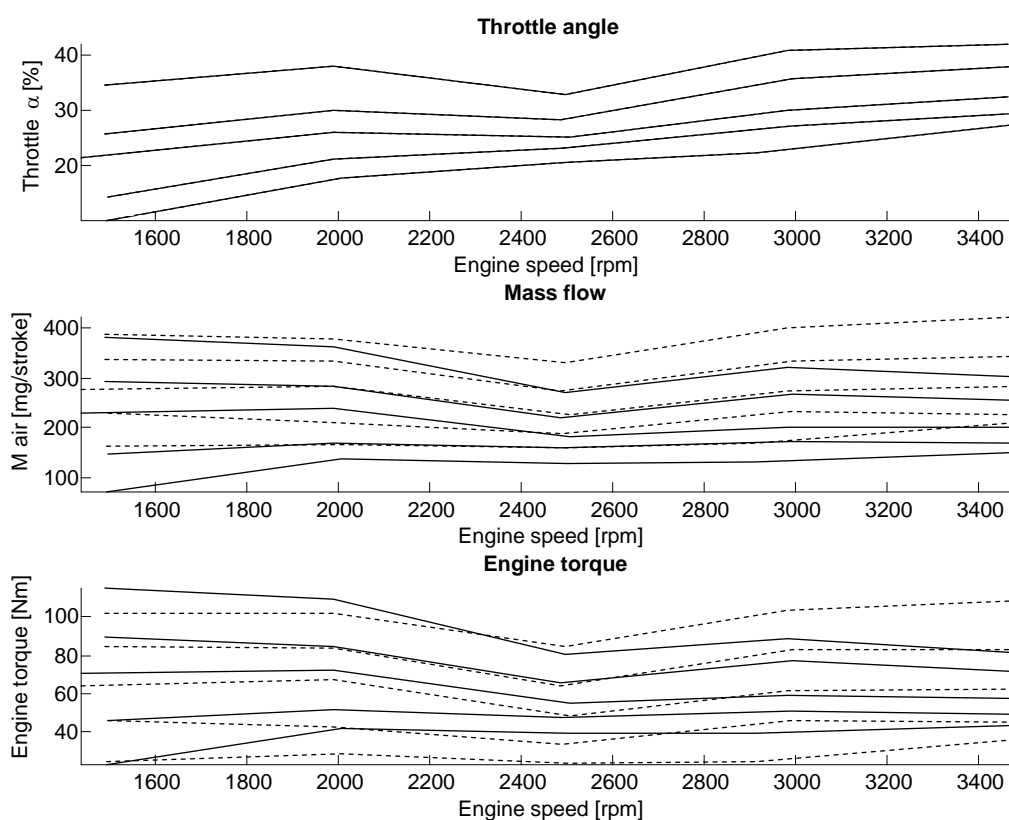
Datainsamlingen har skett med hjälp av rigg i motorlab. Testcellen som använts består av en motordynamometer *SF-902*, vilken är kontrollerad med hjälp av en *SuperFlow Xconsole* tillsammans med *WinDyn* mjukvara. Förbränningsmotorn är styrd av *NIRA* styrbox och dataloggning sker via *NIRA rk* programvara. För att mäta motorn i statiska arbetspunkter, är dynamometern styrd med hjälp *WinDyn* för att säkerställa att arbetspunkterna är stabila när loggningen sker. Resultaten är sparade till textfiler som kan behandlas av *MATLAB*. Mappningen sker med en samplingsfrekvens på 5 Hz och data är inspelad under ungefär 5 sekunder. Arbetspunkter är tagna från 1500 rpm till 3000 rpm med intervaller om 500 rpm. Lastpunkter vid respektive varvtal är tagna med ungefär 15 Nm mellanrum. Totalt är 45 arbetspunkter inspelade. Ett medelvärde av signalerna i var och en av arbetspunkterna är beräknat vilka därefter använts i valideringen. Datauppsättning för arbetspunkter har spelats in under två separata dagar, samt med något skild konfiguration för att vara till hjälp under

intrimning och validering. I de fall då en begränsad tillgång till mätresultat ändå funnits, har en delmängd av datasamlingen använts till intrimning, för att sedan valideras mot resten av datasamlingen.

2.3.3.7 Validering av förbränningsmotorsystem

Motormodellen är uppbyggd med standardkomponenter från modellbiblioteket *MVEM-lib* som mall. En parameterapproximation har gjorts och är föremål för vidare intrimning. En modifiering av modellen har utförts för att använda en uppmätt fyllnadsgrad tagen från motorstyrsystemet *NIRA*. Inga försök att justera denna tabell har gjorts, då en tanke är att resultaten ska jämföras med de som motorriggen gav för att se om fyllnadsgraden kan användas för att beskriva förbränningsmotorn på ett enkelt och kortfattat sätt.

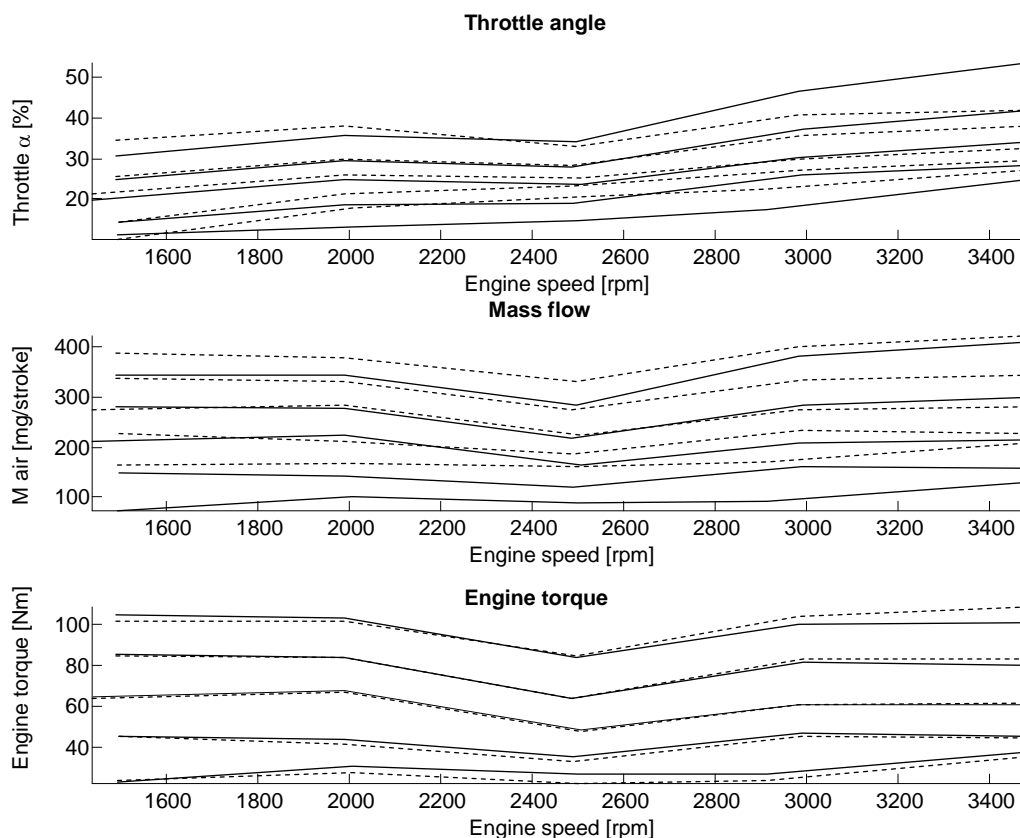
Simuleringsmodellen har matats med samma styrsignal till trotteln för ett givet motormoment som den i riggen. Det luftmassflödet och drivaxelmoment som modellen ger kan ses i Figur 28 nedan.



Figur 28. Översikt över trottelvinkel som insignal, med svarande massflöde och vridmoment. Referenssignaler visas som streckade linjer.

Vissa gemensamma trender och nivåer går att se från resultaten, men en uppenbar skillnad är ändå närvarande. Skillnad kan ha många möjliga ursprung. Den trottellmodell som använts i modellen är baserad från ett geometriskt perspektiv och tar möjligen inte tillräcklig hänsyn till den skiftande inverkan på luftflödet den har för olika laster och varvtal. En annan felkälla kan vara beskrivningen av den volymetriska effektiviteten som nämnts tidigare. Denna kan behöva en bättre intrimning. Då ingen kompensering gjorts för till exempel inluftstemperatur, eller att bränsleberikning och bränslepolar inte är modellerade bör också påverka resultaten (till viss del kompenserar volymetriska effektiviteten för detta). Ingen kompensation är heller modellerad för tändfördröjning.

För ytterligare validering av förbränningsmotormodellen används simulerat luftflöde, när modellen återkopplats till att följa motormomentet till skillnad från en given trottelvinkel. Resultater från simulerat moment visas mot uppmätt i Figur 29. Det kan noteras att modellen skattar flöden bättre för medelhöga till höga laster, medan en större skillnad kan ses för lägre moment och låga flöden. Det verkar också vara problem för modellen att nå referensvärdena, vilket kan bero på en bristfällig trottelmödel. Resultaten ger också att det kan behövas en bättre validering av modellerna för turbon.



Figur 29. Översikt över validering av motorns vridmomentskattning, med motsvarande trottelvinkel och massflöde. Referenssignaler visas som streckade linjer.

2.3.3.7.1 Resultat från validering

Som nämnts tidigare är de skattade värdena från det simulerade motorsystemet inte fullt överensstämmande med verkligheten, men goda nog för att i ett tidigt skede kunna utläsa trender och nivåer under statistiska förhållanden. För medelhöga till höga flöden med motsvarande moment är skattningen bättre, men sämre för låga flöden och lägre moment. Då kompressorn förväntas arbeta en stor del under flöden och rotationshastigheter där tillverkarens data är dåligt matchad eller inte finns representerad, kan en förfinad kompressormodell antas förbättra skattningen. Ett förslag till en bättre modell är att utveckla parametermodellen till att även innehålla rotationshastigheten som en beskrivande parameter.

För att kunna validera modellerna bättre och analysera resultaten från motorvalideringen behövs mer mätdata finnas tillgängligt. En bättre intrimning och en bättre utgångspunkt till hur modellen ska förbättras kan göras när t.ex. följande storheter har kunnat mätas noggrannare;

- Temperaturen efter kompressorn

- Lufttrycket i insuget före trotteln
- Turbons rotationshastighet
- Avgasttryck

Temperaturen efter kompressorn kan användas för bättre analys av kompressorns arbetsområde, då den i nuläget är en okänd parameter. Lufttrycket före trotteln kan användas för att skatta en bättre trottelmödel, som är mer anpassad till luftflöden än till geometrisk form. Då trotteln är den enhet som beskriver det luftflöde som når förbränningsmotorn, är det viktigt att trottelmödelens validering är god. En bättre mödel har kunnat studeras då flöden betraktats, men ytterligare validering är nödvändig. Turbons rotationshastighet är en viktig parameter för laddluftssystemet, såväl som för intrimning och validering av kompressor och turbin. Trycket i grenröret bör även mätas. Detta för att rimliga referensvärden för turbinens arbetsområde ska kunna skattas, då dessa är viktiga parametrar för mödeln. Avgasttrycket är också viktigt att känna till för att kunna validera flödesmödeln och momentmödeln bättre. Det är dock värt att nämna att flera av dessa signaler enbart behövs för noggrannare intrimning och validering. Mödeln behöver inte vara beroende av dessa värden, då de som regel inte finns tillgängliga i vanliga bilar i serieproduktion. Det kan också påpekas att värdeinformationen från sensorer på avgassidan är i förhållande liten till den arbetsbörda som de medför, mycket tack vare att flödet genom wastegaten är svårt att uppskatta.

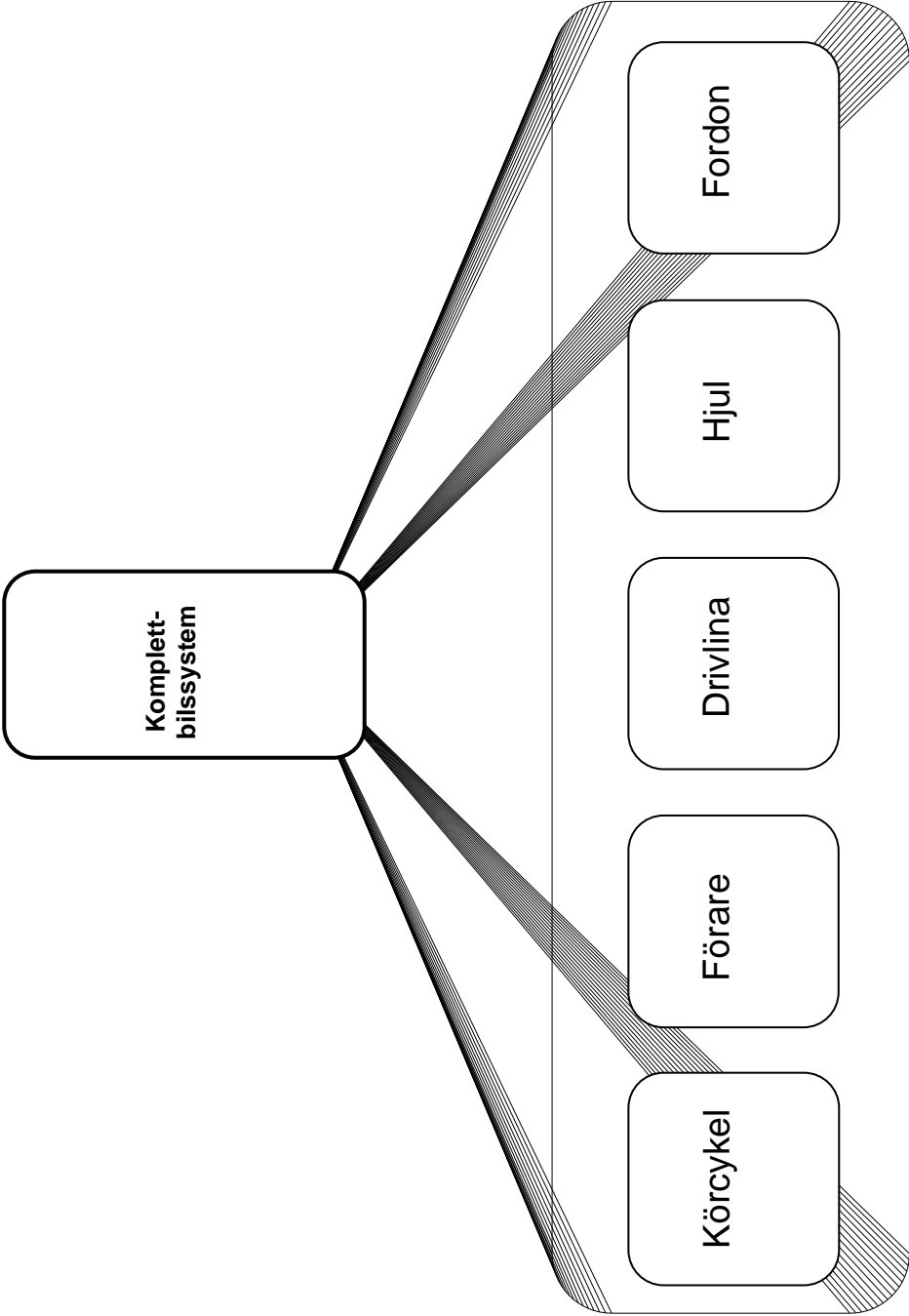
2.3.4 Komplettbilsystem

Komplettbilsystemet visas i figur på nästa sida och består av:

- Drivlina
- Fordon
- Hjul
- Köröyel
- Förare

2.3.4.1 Kategorisering

Drivlinan kategoriseras som mekaniska energiförluster. Fordonet klassas som ett upplagringselement. Hjulet är ett omvandlingselement. Köröyeln och förarmödeln klassas som övriga enheter.



Figur 30. Komponentöversikt över komplett-bilssystemet.

2.3.4.2 Drivlina och förarmodell

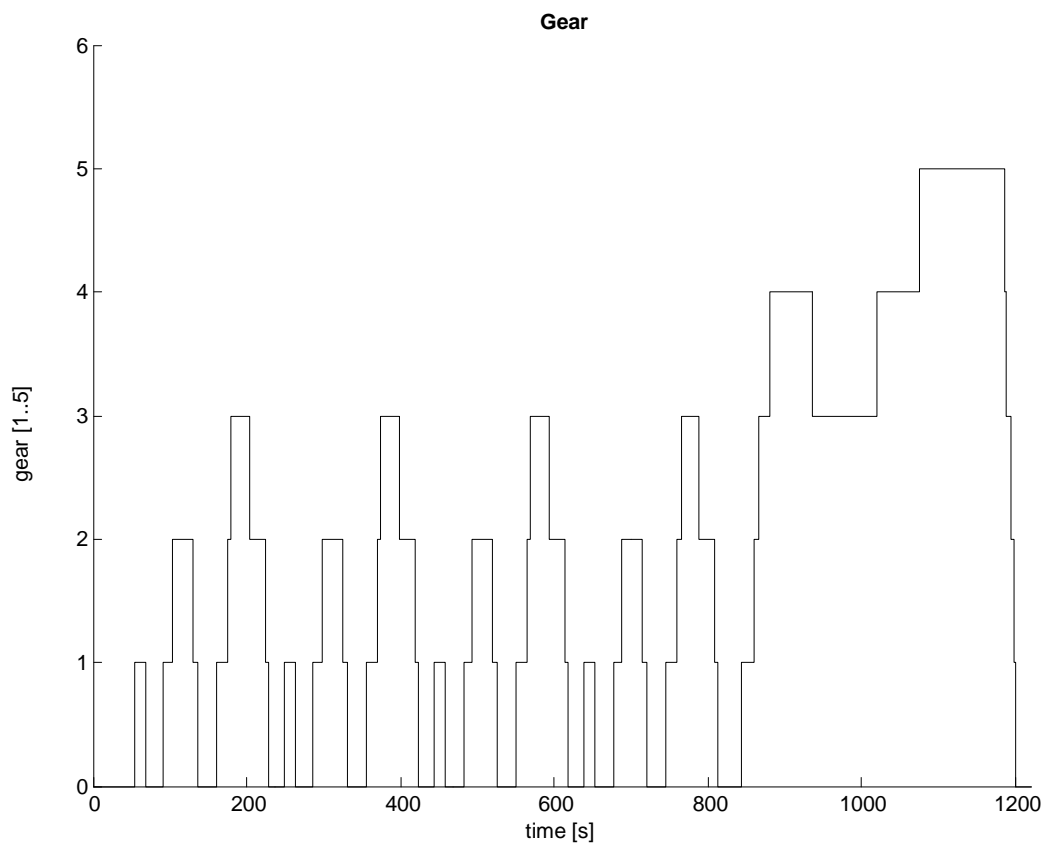
Drivlinan är att betrakta som stel och är representerad av en femstegad växellåda, slutväxel och en enkel koppling. Alla växlar har ett fixt utväxlingsförhållande. Energiförlusterna är sammanslagna till en övergripande effektivitet för hela drivlinan.

I traditionell utveckling av drivlinor är valet av utväxling för både växellåda och slutväxel viktiga parametrar att ta i beaktande ur både bränsleförbruknings- och prestandasynpunkt. Det är även viktigt att på ett realistiskt sätt definiera aktuella växelval och kopplingens in- och urkoppling. Så är också fallet för modellen av laddluftssystemet.

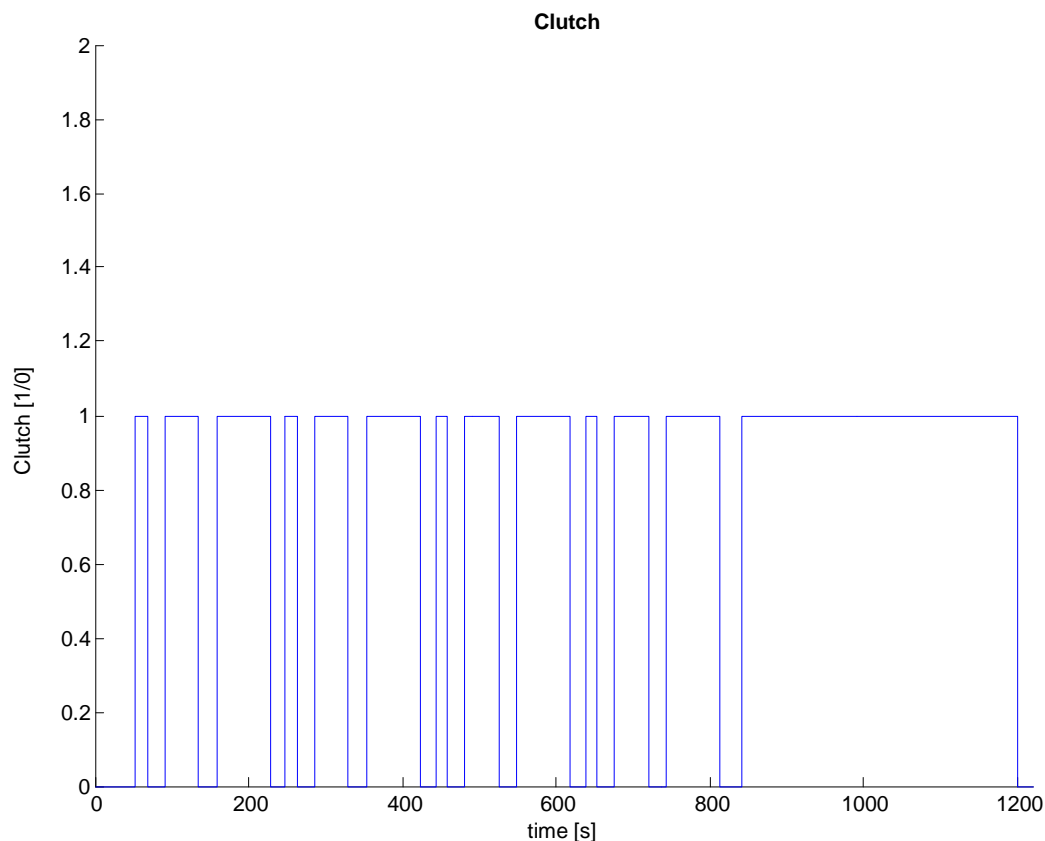
För att motivera en enkel representation av systemet som helhet, är växelpunkter och kopplingens signal fördefinierade efter körcykler (beskrivna utförligare under demonstrationen i kapitel 3). Ytterligare motivering är även att drivlinan ska hållas ”status quo” för att istället lägga vikt vid uppförandet av laddluftssystemet. En mer sofistikerad växelmodell skulle vara att föredra, då en stel modell ger upphov till större transienta förlopp i växelpunkterna. På grund av moduluppbyggnaden i modellen, är det fullt möjligt att utveckla och integrera en bättre växelmodell, men för syftet med denna rapport bedöms den enkla modellen som tillräcklig för att få fram och analysera preliminära resultat. De växelval och växelpunkter som är använda, återfinns i Figur 31. Hur kopplingen in- och urkoppling sker kan ses i Figur 32.

Parametrar:

- Utväxlingsförhållande 1:a växel, *gear1*.
- Utväxlingsförhållande 2:a växel, *gear2*.
- Utväxlingsförhållande 3:e växel, *gear3*.
- Utväxlingsförhållande 4:e växel, *gear4*.
- Utväxlingsförhållande 5:e växel, *gear5*.
- Utväxlingsförhållande slutväxel, *final*.
- Effektivitet, η_{gear} .



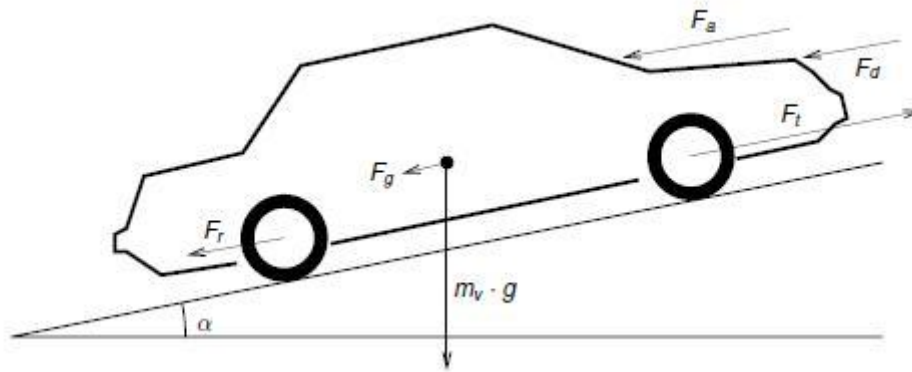
Figur 31. Modellens fördefinierade växlarval utefter en typisk europeisk körcykel. Växellådan är en femstegad låda med fasta utväxlingsförhållanden.



Figur 32. Kopplingens in- och urkoppling av det drivande momentet på fordonet under europeisk körcykel. Urkoppling sker då hastigheten är noll och förbränningsmotorn går på tomgång.

2.3.4.3 Fordonsmodell och hjulmodell

Fordonsmodellen består av de mest betydande krafter som verkar på fordonet. Beskrivningen är här integrerad med hjulmodellen då en mer kompakt beskrivning är möjlig. Enbart longitudinell dynamik är betraktad. De inskränkande krafterna kan delas in i aerodynamiska-, rullmotstånds-, accelerations- samt externa krafter. Externa krafter är sådana som uppkommer från exempelvis vägens stigning. I modellen antas vägen vara horisontell och de externa krafterna försummas. Vidare antas rullmotståndet vara konstant. De parametrar som beskriver fordonet är fordonsvikt, roterande massa, koefficient för luftmotstånd (så kallat *drag*) och koefficient för rullmotstånd. Fordonets tröghetsmoment är kopplat till fordonets massa utan hjul, tillsammans med en roterande massa. Den roterande massan anges som procent av fordonsvikten. Krafterna är sammanfattande i Figur 33 och de relevanta ekvationerna ges nedan. Ekvationerna och antaganden har sitt ursprung från [7]. Figur 33 och nomenklatur är tagna från [6].



Figur 33. De krafter som verkar på fordonet. Vinkeln alfa är alltid noll eftersom enbart longitudinell dynamik är betraktad.

Ekvationer:

$$F_a(t) = \frac{\rho_{air} \cdot A_v \cdot c_d \cdot v(t)^2}{2}$$

$$F_r = c_r \cdot m_v \cdot g$$

$$F_g = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

$$F_t = \frac{1}{r_w} \left[\left(Tq_e - J_e \frac{d}{dt} \frac{v(t)}{r_w} r_{gear} \right) r_{gear} - J_v \frac{d}{dt} \frac{v(t)}{r_w} \right]$$

Parametrar:

- Luftens densitet, ρ_{air} .
- Fordonets frontalarea, A_v .
- Koefficient för luftmotstånd, c_d .
- Koefficient för rullmotstånd, c_r .
- Fordonsvikt, m_v .
- Gravitation, g .
- Hjulradie, r_w .

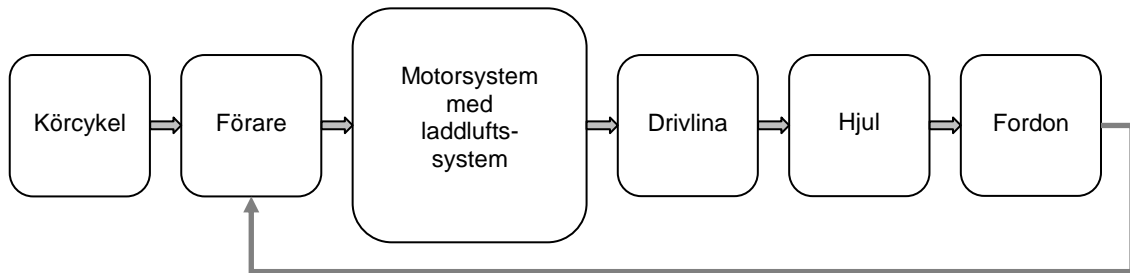
Kapitel 3

Modelldemonstration

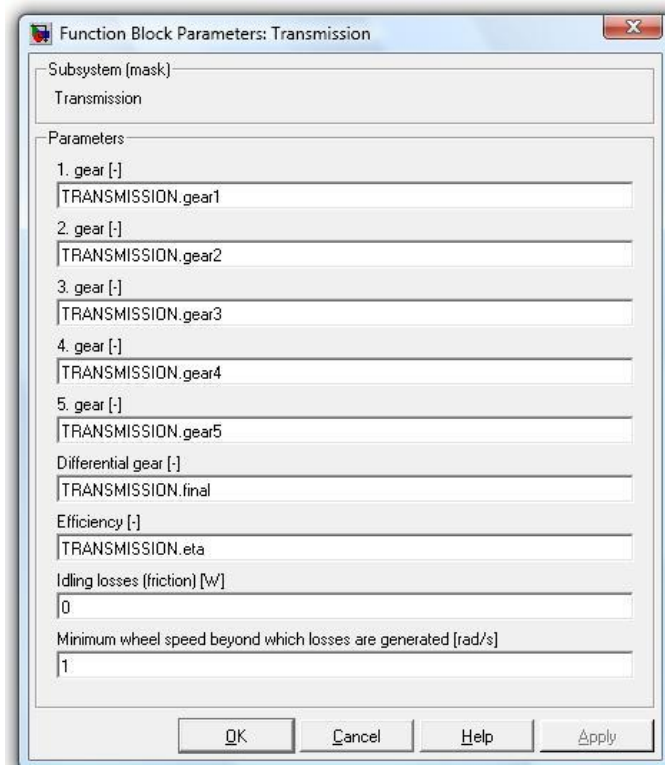
I detta kapitel presenteras exempelgrafer efter simuleringar med det komplettbilssystem som gjorts inom ramen för detta examensarbete. Modellerna för laddluftssystemet, förbränningsmotorsystemet och komplettbilssystemet som alla är beskrivna i tidigare kapitel, har kopplats samman till en modell för en komplett bil. En översikt över systemet och hur sammankopplingen ser ut finns i Figur 34.

En tilltänkt konfiguration på systemet ansätts för en demonstration av modellens användningsområde, samt för en fortsatt beskrivning av laddluftssystemet. På detta sätt ges ett exempel på tillämpning av modellerna. Vidare är det ett hjälpmedel för en framtida kravspecifikation för ett system där laddluftssystemet ingår. Det är även möjligt att diskutera hur krav kan uppnås med hjälp av de nya komponenter som är tillförda.

För att visa användargränssnittet för simuleringsmodellen, ges exempel på parameterinmatningen för de komponenter som är beskrivna i modellbeskrivningen. I Figur 35 visas denna för drivlinan i komplettbilssystemet. Det framgår i modellbeskrivningen vilka parametrar som beskriver övriga komponenter. Parametrarna är kandidater för att vara ingående optimeringsparametrar för framtida systemutveckling. I demonstrationen diskuteras hur variabler som tillförs systemet med laddluftssystemet kan användas och ökar frihetsgraderna för denna systemutveckling. En diskussion är förd kring bränsleförbrukning och prestanda. Värt att nämna är att studien enbart är en beskrivning av möjligheter med laddluftssystemet. En bedömning av resultaten och hur prestandakraven sedan uppfylls ligger utanför arbetet med denna rapport.



Figur 34. Översikt över komplett-bilsystemet.



Figur 35. Gränssnitt för parameterinmatning i simuleringsmodellen.

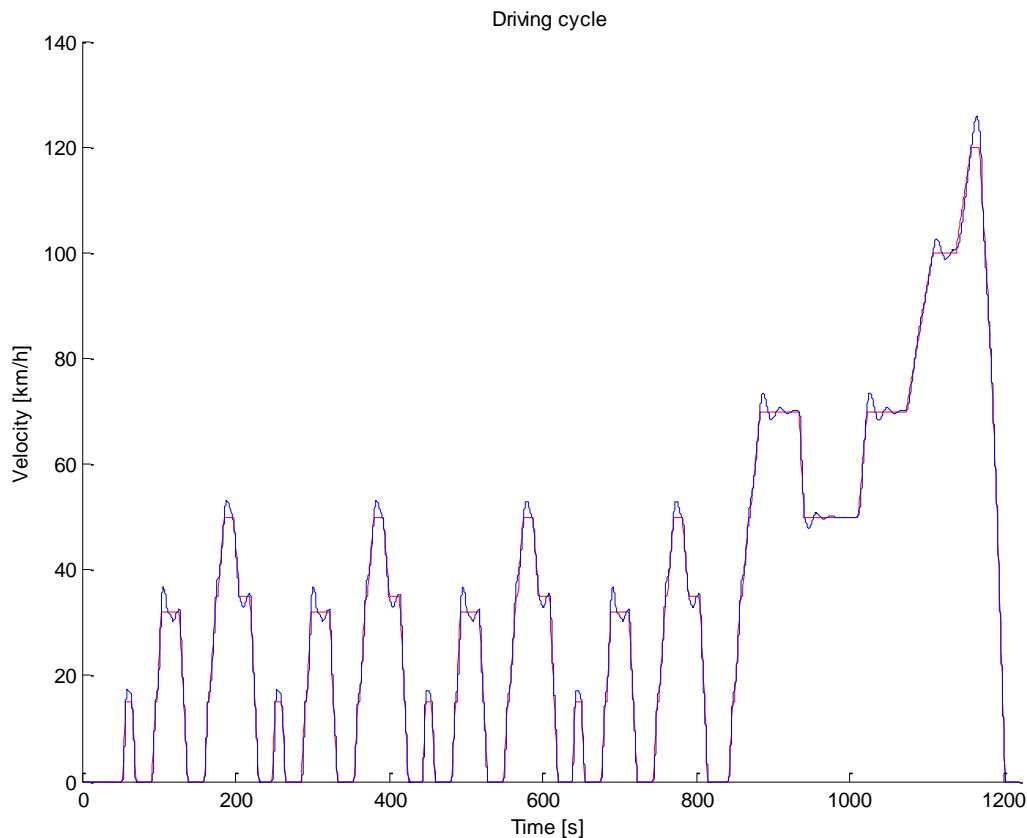
3.1 Prestandabegreppet

Begreppet prestanda är subjektivt och saknar en klar definition. En del väl inarbetade prestandamått för kompletta fordon finns dock. Dessa är lätt tillgängliga för en jämförelse. Exempel på sådana mått är vanligen accelerationstiden för 0-100 km/h och 80-120 km/h.

Största intresset för modellen av laddluftssystemet är att uppskatta vilken inverkan komponenterna har på prestanda och vilka variabler som kan användas till att styra bilens prestanda till ett önskat resultat. I vissa fall kan laddluftssystemet utgöra en ytterligare restriktion och belastning för förbränningsmotorn. I andra fall kan laddluftssystemet fungera som en avlastning för densamma med ökad prestanda som följd. Tanken är att den prestandaförbättring som erhålls används till en nedskalning av förbränningsmotorns storlek, men med en slutgiltig prestanda som motsvarar den nivå för motorsystemet det är tänkt att ersätta. Resultaten kan användas i kommande dimensioneringsanalys för exempelvis turbons utformning.

3.2 Bränsleförbrukning efter körcykel

En uppvisning av bränsleförbrukning är endast relevant för data som insamlas under en normaliserad testkörning. Signalen som systemet matas med är referenspunkter av på förhand kända hastighetsprofiler. Dessa benämns vanligen körcykler. Modellen innehåller flera vanligt förekommande profiler som kan vara underlag för vidare diskussioner och resultat för systemet. Den hastighetsprofil som läggs störst vikt vid för presentation av laddluftssystemet är den europeiska körcykeln *New European Driving Cycle, NEDC*. Denna profil är en testnorm som alla bilmodeller sålda i Europa använder sig av. Profilen är 1200 sekunder lång och består av fyra stycken identiska och 200 sekunder långa körcykler som ska likna stadskörning. Dessa efterföljs av en profil på 400 sekunder som ska illustrera landsvägskörning, där hastigheten som mest är uppe i 120 km/h. Resultaten som presenteras, såsom arbetspunkter och bränsleförbrukning med mera, är således en kombination av olika trafiksituationer. Även data för växelval och koppling är på förhand definierade. Systemet är återkopplat för att få en bra följsamhet till den valda hastighetsprofilen. Hur den resulterande hastigheten ser ut är en utsignal från modellen och ligger som underlag för vidare analys. En god överensstämmelse är ett grundläggande krav för en bra jämförelse av resultaten. Hur väl modellen i demonstrationen följer hastighetsprofilen visas i Figur 36.

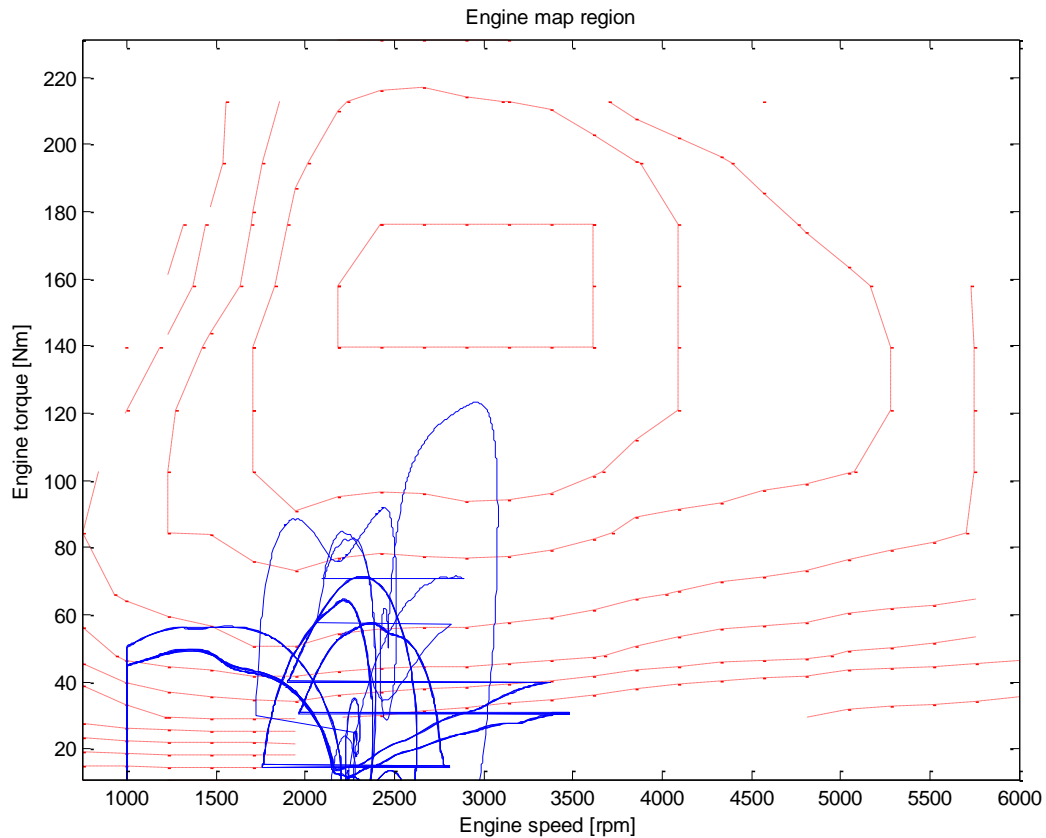


Figur 36. Körcykel NEDC referenssignal (streckad linje) samt resultat från modellen (heldragen linje).

Det mest intressanta resultatet från körcykeln är bränsleförbrukning. Denna brukar ges i tre delar: stadskörning, landsvägskörning och blandad körning. Den del som är viktigast är blandad körning då denna i stor grad styr ägarens totala kostnad för bilen. Det är av flera anledningar viktigt att reducera bilens blandade bränsleförbrukning.

3.2.1 Förbränningsmotorns arbetsområde

En viktig aspekt att ta i akt när man utvärderar bränsleförbrukningen, är inom vilket område som förbränningsmotorn arbetar utefter körcykeln. Ett mål för kommande reglerstrukturer är att styra motorn till att verka i fördelaktiga arbetspunkter för att på så sätt minska bränsleförbrukningen. Positivt för bränsleförbrukningen är att låta motorn arbeta under hög effektivitet där den specifika förbrukningen är låg. Simuleringen ger en karta över de arbetspunkter motorn arbetar mellan som hjälp och visas i Figur 37. Denna kan jämföras med den karaktäristik förbränningsmotorn har och som givits exempel på i Figur 27.



Figur 37. Förbränningsmotorns arbetspunkter under körcykeln.

3.3 Laddluftssystemets komponenter och dess möjligheter

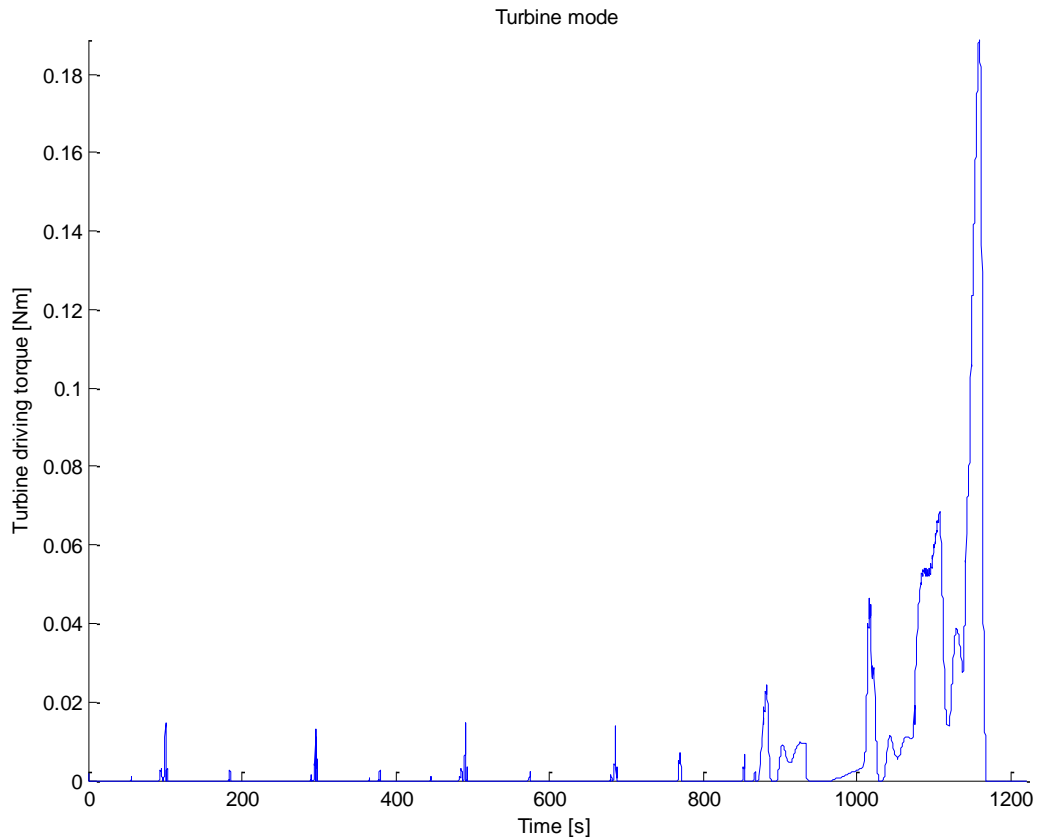
En diskussion kring hur laddluftssystemets komponenter påverkar bränsleförbrukning och prestanda ger en konkret framställning av vilka nya möjligheter laddluftssystemet tillför. På detta sätt ges en inblick i varje ny komponents påverkan och vad som är viktigt att beakta för framtida utvecklingsarbete och optimeringsanalys.

3.3.1 Turbin och kompressor

En viktig komponent för systemets prestanda är turbinen och kompressorn. Vad turbinen levererar för effekt och vad kompressorn konsumerar sätter en stor del av dynamiken för laddluftssystemet. Det är därför viktigt att övervaka vridmoment och turbinhastighet.

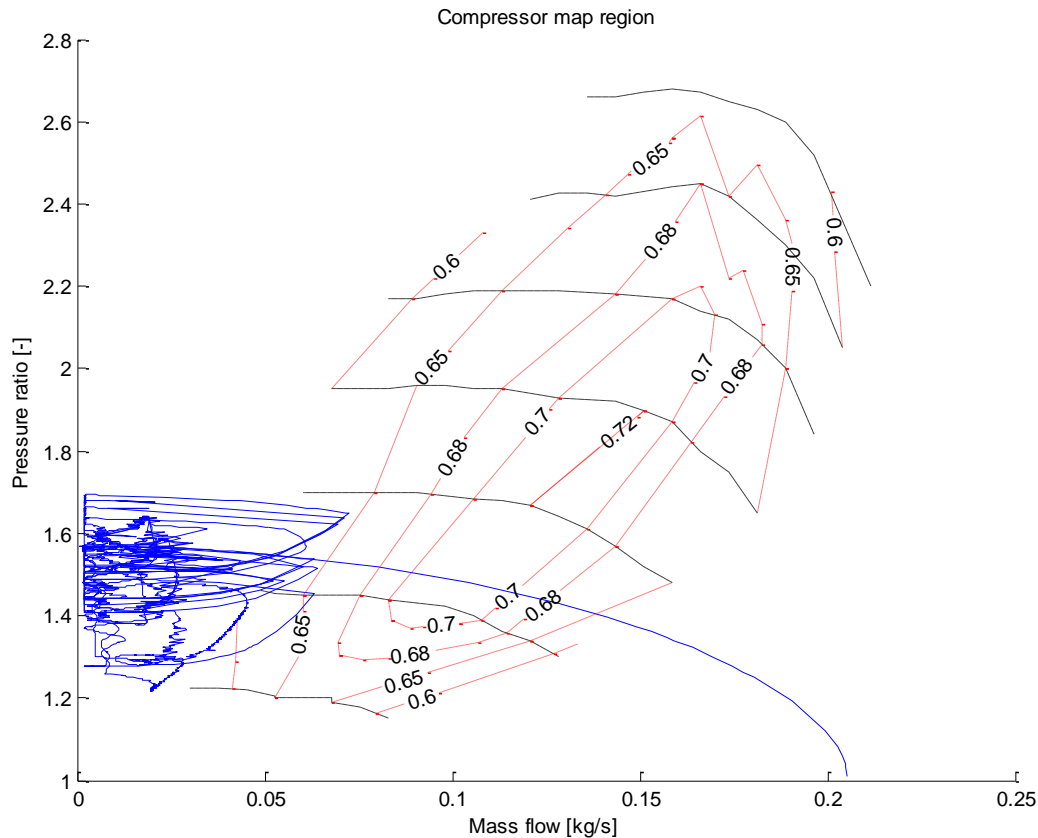
Turbin- och kompressorhjulets hastigheter är desamma som för höghastighetsaxeln, vars uppförande blir en viktig parameter att betrakta för kommande reglerstrukturer.

Turbinens levererade moment till laddluftssystemet är viktig för reglerstrukturen för wastegaten. Som demonstration visas dess profil under *NEDC* i Figur 38.



Figur 38. Drivande vridmoment från turbinen under NEDC.

Det är viktigt att ha en kompressor som är korrekt anpassad till motorsystemet i övrigt. Det är till exempel inte önskvärt att kompressorn arbetar alltför länge i surgerregionen till vänster i kompressormappen då det kan skada kompressorn. Om kompressorn arbetar inom sin mapp är också effektiviteten bättre. För anpassning av kompressorn, kan arbetsområdet övervakas i en karta på ett liknande sätt som för förbränningsmotorn. Kompressorns karta visas i Figur 39, där även arbetsprofilen under *NEDC* är utritat.



Figur 39. Arbetsområde för kompressor. Kompressorns flödesmapp är utritad som referens. Grafen visar det spår av arbetspunkter som kompressorn genomgår under körcykeln.

3.3.2 Batteri

Batteriet innehåller energi som kan tillföras systemet, vilket är positivt för både bränsleförbrukning och prestanda. För att vara energineutralt måste dock energi tillföras batteriet. Nettovinsten erhålls, då systemet tar överskottsenergin från avgaserna som annars skulle ha gått förlorad via wastegaten. Alternativt kan man låta förbränningsmotorn alstra extra energi om det innebär att den kan styras till en mer gynnsam arbetspunkt för effektiviteten. Tillståndet att övervaka är batteriets laddningsgrad, *SOC*.

Prestandamässigt är batteriet känsligt för den momentana effekt som tillförs och tas ut. En övervakning av denna kan därmed vara relevant.

3.3.3 Elmotor/generator

Elmotorns vinst till bränsleförbrukningen är att den i generator drift gör det möjligt att plocka ut den överskottsenergi från turbinen som annars skulle gå förlorad genom wastegaten. Om generatorm lastas under motorbroms innebär också det en stor vinst för bränsleförbrukningen.

Prestandamässigt ger elmotorn möjlighet till e-boost som kompenserar för turbinens fördröjning. Därmed är det möjligt att kompensera för turbo-lag.

På liknande sätt som förbränningsmotorn är elmotorn en energiomvandlare som verkar inom en arbetsmapp. Nivåerna på efterfrågad effekt sätter begränsningar för enheten. Dess arbetspunkter är övervakade i en motormapp.

3.3.4 Planetväxel och remväxel

Planetväxeln och remväxeln har ingen funktion som behöver övervakas för driften eller regleringen av bränsleförbrukning eller prestanda. Däremot innehåller de viktiga parametrar för anpassningen och optimeringen av komponentkonfigurationen för laddluftssystemet. Utväxlingsförhållandena sätter begränsningar för komponenternas arbetsområde. Växlarna inför frihetsgrader att påverka bränsleförbrukning och prestanda på motsvarande sätt som utväxling för drivlinan gör. Anpassade utväxlingsförhållanden är fall för framtida optimeringsanalys för laddluftssystemet.

3.3.5 Låghastighetsaxel, remaxel och dynamiska element

Axlarna är dynamiska komponenter som beskriver hur snabbt laddluftssystemet spinner upp, samt hur dess friktion påverkar rotationshastigheten. Accelerationsförmågan för axlarna har en implicit koppling till prestandan för laddluftssystemet. Här är det inte direkt uppenbart hur variationen av enskilda parametrar kan svara på hur systemet som helhet uppför sig. Förfarandet måste ta hänsyn till systemet som helhet och övrig dynamik. Ett viktigt resultat för analysen är till exempel tryckuppbyggnaden i insugsröret. Den dynamiska valideringen av systemet är ett arbete som återstår att genomföra.

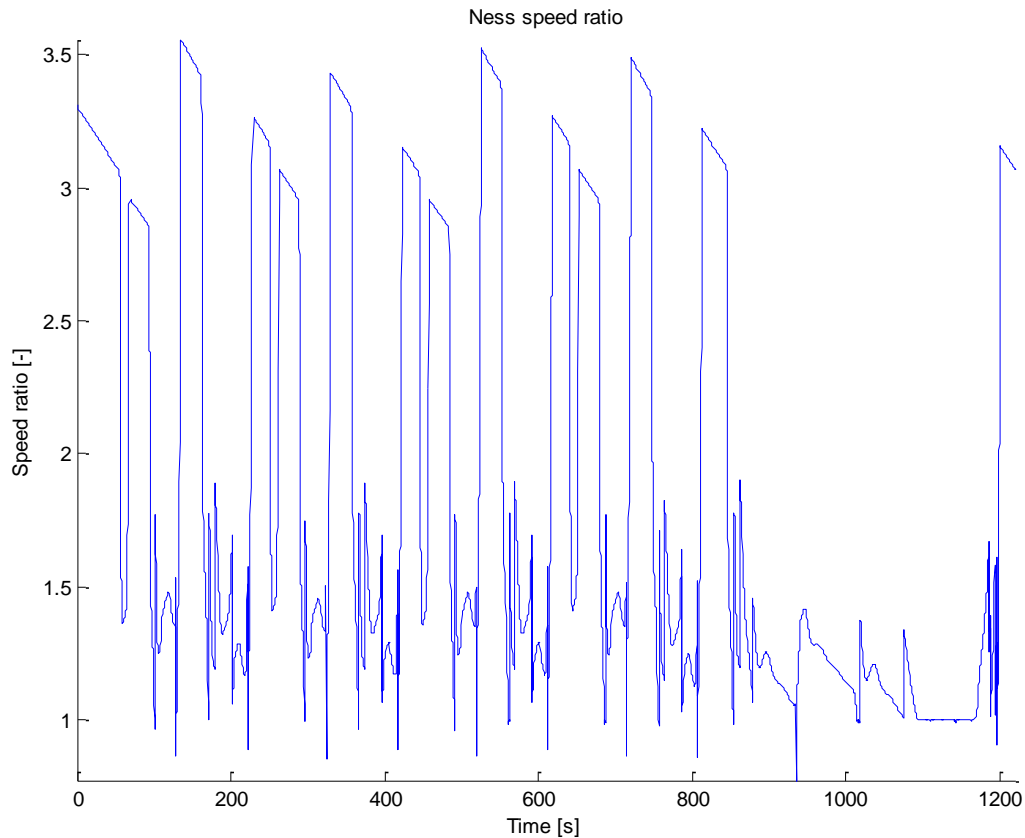
Övriga viktiga parametrar för dynamiken är storleken för kontrollvolymerna. Viktiga signaler i sammanhanget att övervaka är de tryckvariationer som sker under en körcykel.

3.3.6 Koppling

Kopplingen innehåller viktig information för styrningen av laddluftssystemet då den möjliggör att laddluftssystemet kan ha en rotationshastighet som är högre än den som förbränningsmotorn bidrar med. Man kan även tänkas ha en styrd slirande koppling för in och urkoppling av remmen. När laddluftssystemet roterar fritt innebär det en möjlighet till reglering via generatoren, som gör att avgasenergi kan regenereras med energi från turbinen. En viktig funktion som beskriver tillståndet för laddluftssystemet, är förhållandet mellan varvtalet laddluftssystemet har och varvtalet växlat från förbränningsmotorn. Definitionen är

$$\Pi_{SCS} = \frac{\omega_{ls}}{\omega_{pul}}$$

När Π_{SCS} är mindre eller lika med ett, innebär det således en mekanisk koppling till förbränningsmotorn och ett bidragande vridmoment till laddluftssystemet. För Π_{SCS} strikt mindre än ett innebär en slirande drivrem. Förloppet över en cykel övervakas och kan ha utseendet som Figur 40 visar.



Figur 40. Varvtalsförhållande för laddluftssystemet. När förhållandet är större än ett frihjulad laddluftssystemet och möjliggör en reglering som ger mer andel regenerering av avgasenergi från turbinen.

3.3.7 Styrenhet

Styrenhetens utsignaler styr laddluftssystemet. Viktigast är den för elmotor/generator. När styrsignalen är positiv är funktionen som elmotor och när den är negativ är funktionen som generator. Styrsignalen har ett värde som ligger mellan -1 och 1.

Om dynamiken för reglering är otillräcklig för elmotorn/generatoren, regleras laddluftssystemet med hjälp av wastegate. Wastegatens styrning återges på liknande sätt som för elmotorn men enbart med positiva värden.

Styrenhetens reglerstruktur är en funktion som är beroende på systemets önskade uppförande, utgående från systemets interna tillstånd. Tillstånden för laddluftssystemet är insignaler till styrenheten. Information om systemets önskade uppförande är strukturer som är på förhand uppsatta efter körfall och styrda med dessa strukturer som referenser. I den presenterade studien här har en enkel reglerstruktur ansatts. Att bedöma studiens saklighet från simuleringarna samt erhålla en bättre lämpad reglerstruktur är fall för kommande systemutveckling.

Kapitel 4

Slutledning

Målet med detta examensarbete är att undersöka om det med hjälp av medelvärdesmodeller går att utveckla ett simuleringsverktyg som kan verifiera uppförandet av ett nytt laddluftssystem samt om verktyget kan vara till hjälp för fortsatt utveckling ur ett systemperspektiv.

I detta kapitel belyses styrkor med modellen samt vilka delar som behöver en djupare studie för att ge ett bättre uppförande. I kapitel 2 är en utförligare beskrivning och validering av utvecklade modeller genomförd.

4.1 Resultat

Medelvärdesmodeller för laddluftssystemet, omgivande motor- samt komplettbilsystem är framtagna som kan simuleras i *MATLAB/Simulink*. Beskrivningen är mer ingående för laddluftssystemet än för övriga system. Ekvationerna för modellen av laddluftssystemet är presenterade i kapitel 2. Många tankar och idéer är hämtade från [7] och [9] med en del modifieringar. För modellering av det omgivande förbränningsmotorsystemet, samt för turbinen och kompressorn, är många av ekvationerna hämtade från [4]. Nya eller omarbetade modeller av komponenter som utvecklats i detta arbete är

Modell för laddluftssystem

- Låghastighetsaxel
- Elmotor/generator
- Remväxel
- Remaxel
- Koppling
- Planetväxel
- Kompressor
- Turbin
- Styrenhet

Förbränningsmotormodell

- Batteri
- Elförbrukare
- Förbränningsmotor

Komplettbilsschema

- Körcykel
- Förare
- Drivlina
- Hjul
- Fordon

Modellerna är implementerade i *Simulink*. Varje modell är komponentbaserad för att representera en fysisk enhet, vilket gör det enkelt att få en överblick av systemet som helhet. Moduläriteten gör att arbetsinsatser kan inriktas till delar av modellerna. Den gör det också enkelt att ersätta delar av modellen i de fall en bättre representation av komponenten kan tas fram. En ytterligare önskvärd egenskap som beaktats i modellbygget är skalbarhet, vilket underlättar för fortsatt systemutveckling.

Förbränningsmotormodellen har kompletterats med motormappar från förbränningsmotorns styrprogram (*NIRA 3i+*). Mapparna hjälper till att fånga upp ytterligare motorspecifik karaktäristik som annars är svårmodellerad.

Från den statistiska valideringen framgår att motormodellen fångar upp typiska trender och uppförande på ett godtagbart sätt. Dock är en mer precis överensstämmelse mot mätdata svår att få. För ett noggrannare simuleringsresultat behöver mer mätdata finnas tillgängligt för vidare och bättre intrimning av delmodellerna.

Komplettbilsschemat är framtaget för att visa hur simuleringsmodellerna kan integreras med varandra. Det gör det även möjligt att resonera runt bränsleförbrukning och prestanda för systemet. I kapitel 3 demonstreras hur integrationen ser ut och hur parameterinmatningen för ett system går till. Resultatet är en demonstration av modellerna och en beskrivning av möjligheter med laddluftssystemet. Siffror och värden från simuleringarna i demonstrationen är osäkra då de inte kunnat valideras. Ingen möda har lagts i detta examensjobb till att finna en bättre reglerstrategi. Vad som kvarstår att bedöma är modellens rimlighet och om det är en bra bas att utgå från för kommande systemutveckling.

4.2 Förslag på fortsatt arbete

Den övergripande modellstrukturen verkar lovande för fortsatt utveckling. En förbättring och utveckling av modellen är dock nödvändig för att få tillförlitliga resultat.

4.2.1 Förbättring av modellerna

För bättre intrimning av delmodellerna måste mer mätdata insamlas. I nuläget fångar förbränningsmotormodellen upp godtagbara trender och nivåer av de flesta intressanta signaler, men för en noggrannare validering behöver signaler som är okända mätas eller skattas bättre. Fyllnadsgraden som *NIRA* ger bör mätas noggrannare för att få högre upplösning av motorns karaktäristik. Övriga aspekter som påverkar datainsamlingen måste också undersökas. Det bör undersökas hur *NIRA* styrsystem behandlar bränsleberäkning för att kunna modellera karaktäristik som inte fångas upp av den tabell över fyllnadsgraden som används i modellen.

Dynamiska körfall måste spelas in i motorlabbet för att en dynamisk validering ska kunna ske. Resultaten från simuleringar med komplett-bilmodellen är beroende av dessa för att ge mer tillförlitlighet åt modellen. Efter en dynamisk validering kan också analys ske för vilka parametrar som bör mätas mer noggrant, som till exempel tröghetsmoment.

En modellering av den elmotor som är bättre lämpad för laddluftssystemet bör genomföras. Viss förberedelse är gjord för att anpassa modellen till en uppmätt elmotor.

Kopplingen i laddluftssystemet bör innehålla en beskrivning av dess förluster.

4.2.2 Utveckling av modellerna

Då kompressorn kan tänkas arbeta en stor del under låga flöden och låga rotationshastigheter, kan en förfinad kompressormodell vara fall för utveckling. Ofta är inte tillverkarens uppgifter representerade för denna region. Även modellering av instabiliteter som uppstår när kompressorn arbetar under låga flöden och höga rotationshastigheter (eng. surge) kan vara en aspekt värd att beakta. Åtgärder bör göras för att förhindra att kompressorn arbetar längre perioder i regionen eftersom fenomenet ger ett beteende som inte är önskvärt för kompressorn och som kan skada denna.

Kopplingen i laddluftssystemet kan modelleras till att även innehålla energiförluster.

En trottelmotormodell som är mer anpassad till luftflöden än till geometrisk form är förslag på fortsatt arbete. En bättre modell då flöden betraktats har kunnat studeras utanför ramen av examensarbetet. Ytterligare validering är dock nödvändig.

NIRA styrsystemet kompenserar med tändfördröjning i flertalet arbetspunkter. För bättre överensstämmelse med mätdata kan fördröjningen vara värd att modellera.

Laddluftssystemet kan tillföra energi till turbinen och driva på denna. Det kan då tänkas uppstå en sugande effekt på avgaserna ur motorn och som påverkar motorns fyllnadsgrad. Förslag på fortsatt arbete är att undersöka effekten noggrannare.

I komplett-bilmodellen är växelpunkter och kopplingens signal fördefinierade efter körcykler. En mer sofistikerad modell skulle vara att föredra, eftersom de fasta punkterna visat sig vara upphov till orealistiska förlopp som inte är att förvänta av en verklig förare.

Litteraturlista

- [1] Per Andersson. Air Charge Estimation in Turbocharged Spark Ignition Engines. PhD thesis, Linköpings Universitet. ISBN 91-85457-77-9. 2005.
- [2] Hybrid Vehicle Drives, System components – Electrical machines and drives. Department of Electrical Engineering, KTH. Stockholm 2004.
- [3] Lars Eriksson. Modeling and Control of Turbocharged SI and DI Engines. Rencontres Scientifiques de l'IFP. 2-4 October 2006.
- [4] Lars Eriksson, Lars Nielsen. Course material Vehicular Systems. Linköping Institute of Technology, Vehicular Systems, ISY. 2004.
- [5] Lars Eriksson, Lars Nielsen, Jan Brugård, Johan Bergström, Fredrik Pettersson, Per Andersson. Modeling of a Turbocharged SI Engine. Annual Reviews in Control, 26 s.129-137. 2002.
- [6] Lars Eriksson. Vehicle Propulsion Systems, Lektionsanteckningar. Vehicular Systems, ISY. 2008.
- [7] L Guzzella, A Amstutz. The QSS Toolbox Manual. Measurement and Control Laboratory. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. 2005.
- [8] L Guzzella, A Amstutz. Control of Diesel Engines. IEEE 0272-1708. October 1998.
- [9] Lennart Ljung, Torkel Glad. Modellbygge och simulering. Studentlitteratur. ISBN 91-44-02443-6. 2004
- [10] MATLAB Simulink version 7, Help browser. The MathWorks, Inc. 2004.
- [11] NIRA i3+ Handbok. Nira Control AB. 2007

Appendix I

Domäner och generaliserade kategorier

För att ge en övergripande bild av modelluppbyggnaden och för att se hur signaler är kopplade till varandra, görs en ansats till kategorisering av de ingående komponenterna. Uppdelningen sker till generaliserade kategorier och domäner som systemet verkar inom. Då modellen är komplex och går över gränser till olika domäner, finns samtidigt likheter dem emellan som kan vara enklare att ta sikte mot. De fyra domäner systemet växelvis interagerar mellan är kemisk, mekanisk, elektrisk, och termisk domän.

Det övergripande flödet genom modellen följer i stort sett relationer mellan två variabler. Dessa är intensitetsvariabler och flödesvariabler. Tabellen nedan visar analogierna mellan domänerna. Produkten av variablerna är effekt, med undantag för termiska system där det räknas med entropiflöden.

Domän	Kemisk	Mekanisk	Elektrisk	Termisk
		<i>Translation</i>	<i>Rotation</i>	
Intensitetsvariabel	Värmetal, q_{HV} [J/kg]	Kraft, F [Nm]	Moment, Tq [Nm]	Spänning, U [V] Temperatur, T [K]
Flödesvariabel	Massflöde, dm/dt [kg/s]	Hastighet, v [m/s]	Vinkelhastighet, ω [rad/s]	Ström, i [A] Värmefflöde, Q [W]
Produkt	Effekt	Effekt	Effekt	Effekt · Temperatur

En generaliserad bild av byggelementen ser ut som följande



Figur 41. Generaliserat byggelement i modellen. Insignaler och utsignaler är flödes- och intensitetsvariabler.

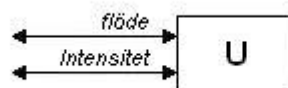
Beroende på kombination och riktning av flödes och intensitetsvariabler gör att man förenklat kan kategorisera domänerna i följande.

- Energiupplagring
- Energiomvandling
- Energiförlust

Energiomvandling och energiförlust är element där ingen hård gräns är dragen dem emellan. I uppbyggnaden av modellen har ofta den resulterande komponenten inneburit en kombination av de båda.

A.1 Energiupplagring

Element som kategoriseras som energiupplagring är källor och sänkor i systemet, samt dynamiska element. Elementen beskrivs av den energi som finns lagrad, och utsignaler är flöde och intensitet. Figur visar en schematisk bild över elementet. I flera fall kan flödet vara tvåriktat, så att energi både kan lagras upp och tas ut ur enheten. Exempel på komponenter som faller under denna kategori är bränsletank, batteri, tröghetsmoment för fordon och svänghjul med flera.



Figur 42. Generaliserad energiupplagring. Flödet är ofta dubbelriktat.

Energiupplagringen ser olika ut för de olika domänerna, och är beskriven mer under de aktuella komponenterna. Generellt för den upplagrade energin är att den momentana effekten är integrerad för att erhålla denna enligt

$$W_{\text{stored}} = \int_{-\infty}^t P(\tau) d\tau = W_0 + \int_0^t (\text{effort}(\tau) \cdot \text{flow}(\tau)) d\tau$$

Lösningen av ekvationen är uträknad från ett dynamiskt förhållande av ingående variabler.

A.2 Energiomvandling

Element som kategoriseras som energiomvandling är komponenter som tillför/förbrukar kraft till/från systemet genom att omvandla den energi som finns upplagrad. Det som kännetecknar dessa som särskiljande är att omvandlingen av energi sker från en domän till en annan. Komponenter som faller under denna kategori är förbränningsmotorn, elmotorn/generatoren, turbinen och kompressorn. Gemensamt för dessa element är att de är beskrivna av en effektivitet, vilken är förhållandet mellan tillförd energi och uttagen energi. För tillförande element är effektiviteten mindre än ett, samt större än ett för konsumerande element eftersom efterfrågad effekt alltid är större än levererad effekt. Effektiviteten är ofta en funktion av ingående flödesvariabler. Den kan även ses som implicit beroende av enskilda variabler eftersom förhållandet mellan flödet och intensiteten är dynamiskt.



Figur 43. Byggelement för energiomvandling. För element som utgör en energitillgång är effekten ut mindre än effekten in. Det omvända förhållandet gäller för element som har en efterfrågan på energi.

A.3 Energiförlust

Energiförluster är element som utgör ett motstånd för flöde eller intensitet. Ofta sker förluster i samband med statisk omvandling av flödes- och intensitetsvariabler. Paralleller kan då dras till omvandlare, men med skillnad att omvandlingen sker inom samma domän. Exempel på komponenter är växellådor och elektriska omvandlare. Modellering av dessa innefattar på samma sätt som energiomvandling en omvandlingsfaktor (effektivitet). För ytterligare förenkling är effektiviteten många gånger beskriven som en statisk faktor och innehåller då inte den dynamik som en omvandlare har. Även flödesrestriktioner är kategoriserade som energiförluster. Flödesrestriktioner är dock värda ytterligare beskrivning och utförligare redogörelse finns under egen rubrik nedan.



Figur 44. Principiellt utseende för ett energiförlustselement, eller restriktion.

A.3.1 Flödesrestriktion

Många av komponenterna i laddluftssystemet är enheter som genomströmmas av luftflöden. När luftflöden passerar ogynnsamma gradienter, såsom böjar, kanter eller areaförändringar, sker en tryckförlust i flödet. Hur denna tryckförlust beskrivs, beror på om flödet betraktas som kompressibelt eller inkompressibelt. Inkompressibelt flöde kan vidare kategoriseras som laminärt eller turbulent flöde. Generellt när flöden betraktas, formuleras massflödet som en funktion av omgivande tryck och densitet. Massflödet kan sedan följas genom systemets komponenter. I många komponenter kan luftflödet betraktas som inkompressibelt och ovisköst. Detta eftersom flödeshastigheten, även då höga flöden betraktas, ligger under ljudhastigheten. Komponenter med detta angreppssätt är exempelvis luftfilter, intercooler och avgassystem. För komponenter där ett högt flöde är att betrakta genom en betydande restriktion eller påverkan, måste flödet betraktas som kompressibelt. Exempel på sådana komponenter är kompressor, trottel och wastegate.

Appendix II

Notation

I modellbygget har följande notation används för att beskriva komponenter och variabler. Huvudvariablerna beskrivs specifikt av sitt index. Index refererar antingen till komponentens egen beskrivning eller till den föregående. Exempelvis ger T_i temperaturen efter turbinen. En engelsk och grekisk notation har använts eftersom symbolhanteringen i *MATLAB* är mer bekant med en sådan hantering.

Tabell A1. Engelsk notation som är använd på variabler i rapporten.

<i>Variabel</i>	Beskrivning
C	Konstant (Constant)
c	Specifik värmekapacitet
D	Diameter
i	Växelval
J	Masströghetsmoment
m	Massa
\dot{m}	Massflöde
N	Varvtal
P	Effekt (Power)
p	Tryck (pressure)
q	Energihåll
R	Gaskonstant
r	Radie
sfc	Specifik bränsleförbrukning (specific fuel consumption)
SOC	Laddningsgrad (State Of Charge)
T	Temperatur (Temperature)
t	Tid
Tq	Moment (Torque)
U	Spänning
u	Styrsignal
V	Volym
v	Hastighet

Tabell A2. Grekisk notation som är använd på variabler i rapporten.

<i>Variabel</i>	Beskrivning
α , <i>alfa</i>	Trottelvinkel
γ , <i>gamma</i>	Specifik värmekapacitetsförhållande
ε , <i>epsilon</i>	Intercoolerns kylfaktor
η , <i>eta</i>	Effektivitet
λ , <i>lambda</i>	Luft/bränsleförhållande
ρ , <i>rho</i>	Densitet
ω , <i>omega</i>	Vinkelhastighet
Π , <i>PI</i>	Tryck- eller varvtalsförhållande
Ψ , <i>Psi</i>	Flödesfunktion

Tabell A3. Subindex som används i rapporten.

<i>Index</i>	Beskrivning
<i>air</i>	Luft (air)
<i>amb</i>	Atmosfär (ambient)
<i>af</i>	Luftfilter (air filter)
<i>aux</i>	Omgivande (auxiliary)
<i>c</i>	Kompressor (compressor)
<i>col</i>	Kollektorrör (collector)
<i>d</i>	Luftmotstånd (drag)
<i>ds</i>	Nedströms (downstream)
<i>exh</i>	Avgas (exhaust)
<i>e</i>	Förbränningsmotor (engine)
<i>em</i>	Grenrör (exhaust manifold)
<i>EM</i>	Elmotor (Electric Motor)
<i>es</i>	Avgassystem (exhaust system)
<i>ext</i>	Extern (external)
<i>f</i>	Bränsle (fuel)
<i>gear</i>	Växellåda
<i>gen</i>	Generator
<i>HV</i>	Värmeinhåll (Heating Value)
<i>hss</i>	Höghastighetsaxel (high speed shaft)
<i>ic</i>	Intercooler
<i>im</i>	Insugrör (intake manifold)
<i>lhs</i>	Vänstersida (left hand side)
<i>lss</i>	lågastighetsaxel (low speed shaft)
<i>CL</i>	Koppling (clutch)
<i>pc</i>	Elektrisk effektomvandlare (power converter)
<i>pt</i>	Planetväxel (planet transmission)
<i>pul</i>	Remväxel (pulley)
<i>puls</i>	Remaxel (pulley shaft)
<i>rhs</i>	Högersida (right hand side)
<i>s</i>	Stökiometrisk
<i>SCS</i>	Laddluftssystem (Super Charged System)
<i>t</i>	Turbin
<i>tc</i>	Turbo (turbocharger)
<i>th</i>	Trottel (throttle)
<i>tot</i>	Total
<i>tr</i>	Transmission
<i>us</i>	Uppströms (upstream)
<i>v</i>	Fordon (vehicle)
<i>vol</i>	Volymetrisk
<i>w</i>	Hjul (wheel)
<i>wg</i>	Wastegate

