

# TSFS09 – Modellering och Reglering av Motorer och Drivlinor – Fö 07

## Motor – MVEM och Turbo

Lars Eriksson - Kursansvarig

Fordonssystem, Institutionen för Systemteknik  
Linköpings universitet  
lazer@isy.ltu.se

October 31, 2016

## Innehållsförteckning

Repetition

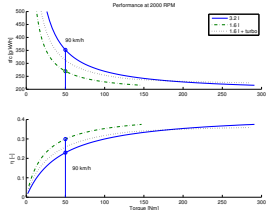
Fortsättning på turbo

Hårdvara för laddtrycksreglering

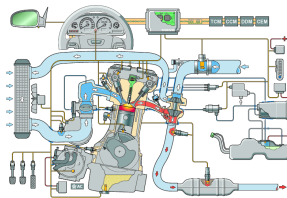
Övergripande Reglering

## Nedskalning och överladdning

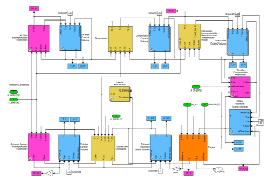
3.2 liter ↔ 1.6 liter ↔ 1.6 liter turbo



## Modelleringsstrategi – MVEM



## En MVEM för en Turbomotor



## Innehållsförteckning

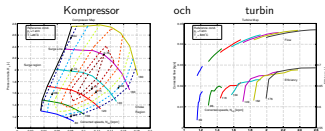
Repetition

Fortsättning på turbo

Hårdvara för laddtrycksreglering

Övergripande Reglering

## Kompressor och Turbin – Mapparna



-Hur används de?  
-Varför korrigerade storheter?

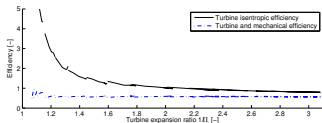
## Kompressor- och turbineffektivitet

$$\eta_c = \frac{\text{Effekt konsumerad av en ideal process}}{\text{Konsumerad effekt}} = \frac{\left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1}$$

$$\eta_t = \frac{\text{Producerad effekt}}{\text{Teoretiskt möjlig effekt för ideal process}} = \frac{1 - \frac{T_{04}}{T_{03}}}{1 - \left(\frac{P_{04}}{P_{03}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

Turbinen – Värmeöverföring ger problem!  
Definition ovan kan ge  $\eta_t > 1!$

## Turbinens effektivitet - Problemet



## Turbinens effektivitet - Mer detaljer

Använd kompressorns effektkonsumtion som mått på:  
 -Producerad effekt

$$\dot{W}_c = \dot{m}_c c_p (T_{02} - T_{01})$$

$$\eta_t \approx \eta_t \eta_m = \frac{\dot{m}_c c_p (T_{02} - T_{01})}{\dot{m}_t c_p (T_{03} - T_{03s})} = \frac{\dot{m}_c c_p (T_{02} - T_{01})}{\dot{m}_t c_p T_{03} \left(1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{03}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)}$$

Detta används för att bestämma turbin effektiviten i mapparna.

## Förstå turbomappar – 1. Dimensionsanalys

$$\Psi = \frac{\Delta h_{0s}}{N^2 D^2} = f_1\left(\frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}, \frac{ND}{a_{01}}, \frac{\rho_{01} N D^2}{\mu}, \gamma\right)$$

$$\eta = f_2\left(\frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}, \frac{ND}{a_{01}}, \frac{\rho_{01} N D^2}{\mu}, \gamma\right)$$

$$\hat{P} = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = f_3\left(\frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}, \frac{ND}{a_{01}}, \frac{\rho_{01} N D^2}{\mu}, \gamma\right)$$

► Dimensionslös flödesparameter  $\Phi = \frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}$

►  $a_{01}$  ljudhastighet  $\sqrt{\gamma R T_{01}}$  för ideal gas

► Energifkoefficienten  $\Psi$  inkluderar

$$\Delta h_{0s} = c_p T_{01} \left( \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

## Förstå turbomappar – 2. Förenkling

$$\text{Variablerna: } \Psi = \frac{\Delta h_{0s}}{N^2 D^2}, \quad \eta, \quad \hat{P} = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

$$\left[ \Psi, \eta, \hat{P} \right] = f\left(\frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}, \frac{ND}{a_{01}}, \frac{\rho_{01} N D^2}{\mu}, \gamma\right)$$

Alternativ för ideal gas, med  $\rho = \frac{P}{RT}$  &  $a_{01} = \sqrt{\gamma RT}$  och andra gruppen insatt:

$$\left[ \frac{P_{02}}{\rho_{01}}, \eta, \frac{\Delta T_0}{T_{01}} \right] = f\left(\frac{\dot{m} \sqrt{RT_{01}}}{D^2 \rho_{01}}, \frac{ND}{\sqrt{RT_{01}}}, Re, \gamma\right)$$

Förenkling för ett aggregat:  $D, R, \gamma, \mu, Re$  – konstanta

$$\left[ \frac{P_{02}}{\rho_{01}}, \eta, \frac{\Delta T_0}{T_{01}} \right] = f\left(\frac{\dot{m} \sqrt{T_{01}}}{\rho_{01}}, \frac{N}{\sqrt{T_{01}}}\right)$$

Inte längre dimensionlös, kallas *korrigerat massflöde* och *korrigerad hastighet*

## Förstå turbomappar – 3. Sammanställning

- Korrigerade kvantiteter

$$\dot{m}_{corr} = \frac{\dot{m} \sqrt{T_{01}}}{\rho_{01}} \quad \text{och} \quad N_{corr} = \frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$$

dessa används ofta på turbinsidan.

Kallas då TFP (turbine flow parameter) resp TSP (turbine speed parameter).

- Korrigerade kvantiteter, med referenstillstånd ( $p_r$ ,  $T_r$ )

$$\dot{m}_{corr} = \dot{m} \frac{\sqrt{T_{01}/T_r}}{(\rho_{01}/p_r)} \quad \text{och} \quad N_{corr} = \frac{N}{\sqrt{T_{01}/T_r}}$$

dessa används ofta på kompressorsidan

**Varning:** läs databladn nogga för att se vilka som skall användas!

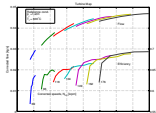
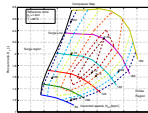
## Kompressor och Turbin – Modeller

Grundläggande princip – Generaliserade restriktioner i MVEM

$$\dot{m}_{corr} = f_1(\Pi, N_{corr})$$

$$\eta = f_2(\Pi, N_{corr})$$

$$\dot{W} = f_3(\Pi, N_{corr}, p_{in}, T_{in})$$

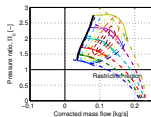


Genomgång av implementation och användning på tavlan.

## Kompressor – Flödesmodell

$$\Pi_{max} = \left( \frac{N^2 D^2 \Psi_{max}}{2 c_p T_{01}} + 1 \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (1)$$

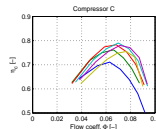
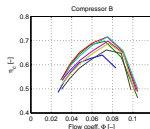
$$\dot{m}_{c,co} = \dot{m}_{max} \sqrt{1 - \left( \frac{\Pi_c - \Pi_0}{\Pi_{max} - \Pi_0} \right)^2} \quad (2)$$



## Kompressor – Effektivitetsmodell

$$\chi(\Phi, N_{co}) = \left[ \frac{\Phi - \Phi_{max}}{N_{co} - N_{co,max}} \right]$$

$$\eta_c(\chi) = \max(\eta_{c,max} - \chi^T Q_{\eta} \chi, \eta_{c,min})$$



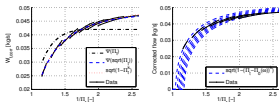
## Turbin – Flödesmodell

Turbinflöde (restriktion litet utsmetat) i huvudsak varvtalsberoende

$$\dot{m}_{t,co} = k_0 \sqrt{1 - \Pi_t^{k_1}}$$

Lägger till varvtalsberoende

$$\dot{m}_{t,co} = k_0 \sqrt{1 - (\Pi_t - \Pi_0(N_{co}))^{k_1}}$$

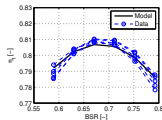


## Turbin – Effektivitetsmodell

Blade Speed Ratio (BSR) används ofta

$$BSR = \frac{\omega_t r_t}{\sqrt{2 c_p T_{03} (1 - \Pi_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}})}}$$

$$\eta_t(BSR) = \eta_{t,max} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{BSR - BSR_{opt}}{BSR_{opt}} \right)^2 \right\} \quad (3)$$



## Implementeringstips

Använd skyddsnet vid implementering av modellerna  
Underlättar debuggning, simulering och undviker problem i produktion

- ▶ Kvadratroten används ofta: Kan ge imaginära tal  
Ersätt  $\sqrt{x}$  med  $\sqrt{\max(x, 0)}$ .
- ▶ Effektiviteter nära eller under 0 kan ge division med 0.  
Lägg till  $\max(\eta, 0.3)$  eller motsvarande.

## Grundekvationer för turbo

Vid stationäritet – effektbalans

$$\dot{W}_c = \eta_m \dot{W}_t$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}_c c_p (T_{02} - T_{01}) = \dot{m}_c c_p T_{01} \frac{1}{\gamma c} \left( \left( \frac{p_{02}}{p_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}_t c_p T_{03} \eta_t \left( 1 - \left( \frac{p_{04}}{p_{03}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)$$

Vid samma laddtryck

Sämre effektivitet – Högre mottryck på avgassidan

## Kompressor- och turbindynamik

Stationära förhållanden (handräkning & matchningsberäkningar)

$$\dot{W}_C = \eta_m \dot{W}_t$$

Dynamiska förhållanden (simulering)

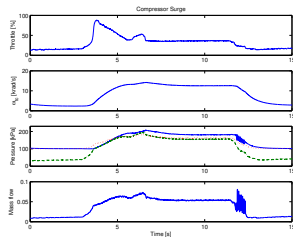
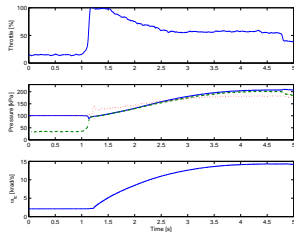
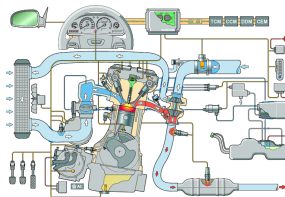
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{tc}} \left( \frac{\dot{W}_t}{\omega_{tc}} \eta_m - \frac{\dot{W}_C}{\omega_{tc}} \right) \quad \text{eller} \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{tc}} \left( \frac{\dot{W}_t}{\omega_{tc}} - \frac{\dot{W}_C}{\omega_{tc}} \frac{1}{\eta_m} \right)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{tc}} \left( \frac{\dot{W}_t}{\omega_{tc}} - \frac{\dot{W}_C}{\omega_{tc}} - M_{fric}(\omega_{tc}) \right)$$

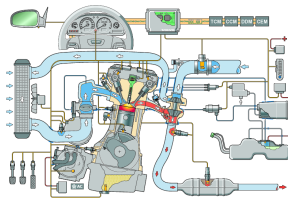
Ett tillstånd för rotationshastigheten

-Den dominerande dynamiken i systemet

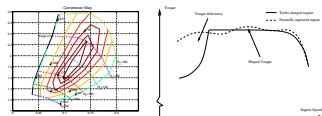
## Turbo lag – Turbo tidskonstant



## Surge Ventil – Surge Reglering



## Momentkaraktäristik och turbo



Kompressor surge (pumpning) och lågvarvtalsmoment är sammankopplade

## Innehållsförteckning

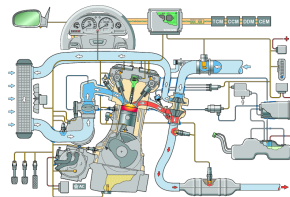
Repetition

Fortsättning på turbo

Hårdvara för laddtrycksreglering

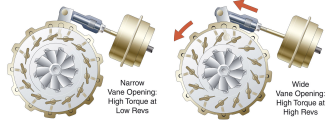
Övergripande Reglering

## Reglering av laddtrycket – Wastegate

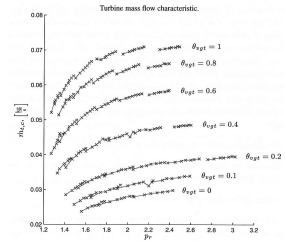


## Reglering av laddtrycket – VGT

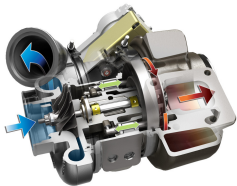
Variable Geometry Turbine – VGT ("bara" dieselmotorer idag)



## Effektiva arean ändras med styrsignalen



## VGT – Annan teknisk lösning



## Innehållsförteckning

Repetition

Fortsättning på turbo

Hårdvara för laddtrycksreglering

Övergripande Reglering

Historik

Momentbaserad reglering

Turboreglering



## Motorreglering – Kort historik

På T-forden:  
 Manuell reglering av  
 –Handgas  
 –Tändningsinställning  
 "Köra med slokande mustascher"

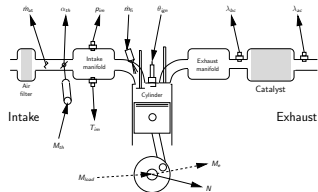
Senare (i Ford Mustang m.fl.):

- ▶ Gaspedal
- ▶ Tändningsinställning genom mekaniskt system; centrifugalregulator och vakumklocka i fördelaren.



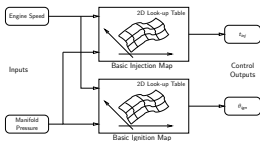
## Motorreglering - Sensorbaserad reglering

Första stegen i elektroniska EMS (Engine Management Systems)

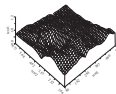


## Motorreglering - Mappbaserad reglering

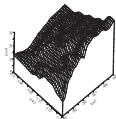
Illustration av hur mappar kan användas för att uppfylla det grundläggande reglerna för bränsle- och tändningsreglering. Målen uppnås via injektoröppningstid  $t_{inj}$ , och tändvinkel  $\theta_{ign}$  i ett regelsystem.



## Engine control - Map based control

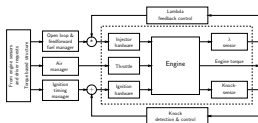


Mapbaserad reglering kan utvidgas och optimeras till mycket stor förfiningsgrad.



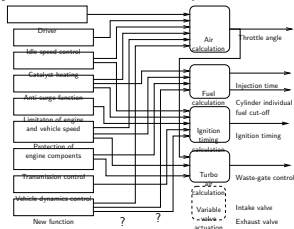
Ett exempel med optimal luft/bränsle  $\lambda$  och tändningsvinkel  $\alpha$  för ett FTP test.

## Motorreglering - De tre huvudlooparna

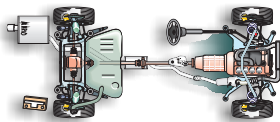


- De olika regulatorerna kan vara
- ad hoc lösningar
  - baserade på mappar
  - modellbaserade designmetoder

## Styrsystemen blir mer och mer komplexa – Ohållbart



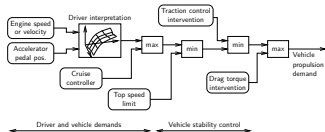
## Momentbaserad reglering



Vad vill föraren uppnå när han trampar på gasen?

- Tolka föraren, propagera tolkning från fordonsbeteende till motor.

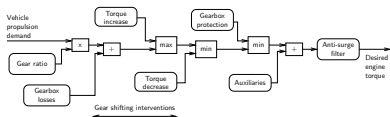
## Momentbaserad struktur – Fordon



Från förare till hjulmoment

- Mycket arbete bakom förartolkning

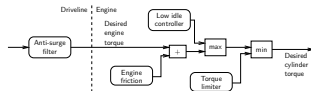
## Momentbaserad struktur – Drivlina



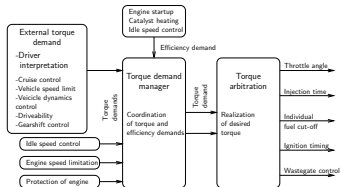
Från hjul till motor

- Anti-surge: Nästa projekt, drivlinereglering

## Momentbaserad struktur – Motor



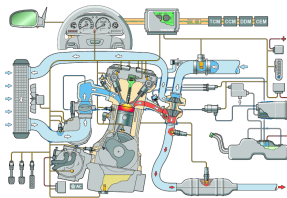
## Momentbaserad struktur – Översikt med aktuatorer



## Referensvärde

- Grundprincip invertera momentmodellen (med fyllnadsgraden)
  - Lös ut trycket i insugsröret  $p_{im}$
- Trottelregulator reglerar trycket  $p_{im}$ 
  - Återkoppling
  - Framkoppling
- Påverkar luftflödet, bränslet regleras med  $\lambda$ -regulatorn
  - Framkoppling från insugstryck
- Hur gör man i turbobaljet?

## Tidsoptimal vs Bränsleoptimal regulator

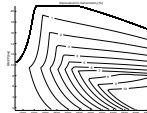
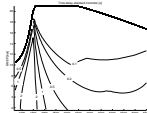


## Tidsoptimal vs Bränsleoptimal regulator

Förändring från tidsoptimal till bränsleoptimal

Extra svarstid

Vinst i bränsle



Detaljer i Eriksson et. al. (2002), "Control and Optimization of Turbocharged Spark Ignited Engines"

## Trade-off – Ställ in acceptabel förlust över trottel

- ▶ Börvärde för kompressortryck:

$$p_c \approx p_{ic} = p_{im} + \Delta p_{th}$$

- ▶ PI regulator:  $u_{wg} = PID(p_{ic} - (p_{im} + \Delta p_{th}))$

- ▶ ECO-/Sportsmode: Välj  $\Delta p_{th}$  beroende på mod.

- ▶ Problem vid implementering:

–WG aktuatorn ligger ofta begränsningarna.

- ▶ Ger problem med I-delen – Windup.

- ▶ I projektet: Anti-Windup implementerat åt er.  
(Reklam för industriell reglerteknik)