

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

## Motor – MVEM och Turbo

Lars Eriksson - Kursansvarig

Fordonssystem, Institutionen för Systemteknik  
Linköpings universitet  
larser@isy.liu.se

November 30, 2020

## Innehållsförteckning

Repetition

Kompressor- och Turbin-mappar

Fortsättning på turbo

Turbomatchning och Turbvarvtal med dess dynamik

Need for Compressor Map Extrapolation

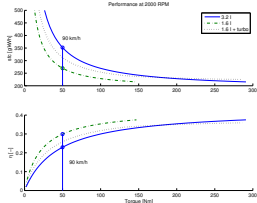
Laddtrycksreglering

2 / 46

3 / 46

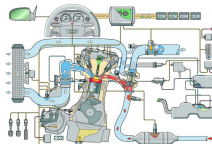
## Nedskalning och överladdning

3.2 liter ↔ 1.6 liter ↔ 1.6 liter turbo



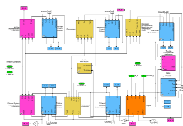
4 / 46

## Modelleringsstrategi – MVEM



5 / 46

## En MVEM för en Turbomotor

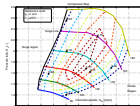


Blå blocken är återanvända kontrollvolymmodeller



Komponentmodellering underlättar återvinning  
Kan debugga komponenterna för sig  
Diskutera komponenter med experter

## Kompressor- och turbinprestanda – Mappar

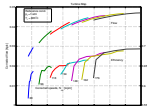


$$\text{Pressure ratio } \Pi_c = \frac{p_{03}}{p_{01}}$$

–Korrigerat massflöde och korrigerad hastighet

–Effektivitet

–Hur bestäms kompressor- och turbinprestanda?



$$\text{Expansion ratio } \frac{1}{\Pi_T} = \frac{p_{04}}{p_{03}}$$

6 / 46

7 / 46

## Innehållsförteckning

Repetition

Fortsättning på turbo

Prestanda mätning

Turbinen och dess höga värmeöverföring

Dimensionsanalys för Reducerad Experiment Tid

Flödes och Effektivitetsmodeller för Kompressor och Turbin

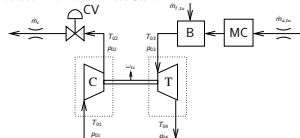
Turbomatchning och Turbvarvtal med dess dynamik

Need for Compressor Map Extrapolation

Laddtrycksreglering

## Bestämning av kompressor- och turbinprestanda

Flödebänk för Turbo – Gas Stand



C - Kompressor, T - Turbin, CV - reglerventil, B - brännare

MC - Mekanisk kompressor

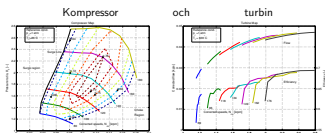
Två massflödessensorer,  $\dot{m}_c$ ,  $\dot{m}_{a,tu}$  + injektormodell  $\dot{m}_{f,tu}$

Turbinflöde:  $\dot{m}_t = \dot{m}_{a,tu} + \dot{m}_{f,tu}$

8 / 46

9 / 46

## Kompressor och Turbin – Mapparna



-Hur används de?

-Varför korrigerade storheter?

10 / 46

## Turboladdningens komplicerade samband - Ett försök till en karta



11 / 46

## Kompressor- och turbineffektivitet

Sammanställning av effektiviteterna från förra föreläsningen.

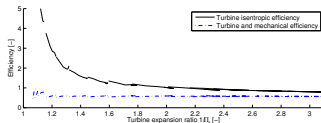
$$\eta_c = \frac{\text{Effekt konsumerad av en ideal process}}{\text{Konsumerad effekt}} = \frac{\left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1}$$

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

Turbinen – Värmeöverföring ger problem!

Definition ovan kan ge  $\eta_t > 1$ !

## Turbinens effektivitet - Problemet

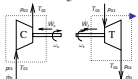


12 / 46

13 / 46

## Kompressor prestanda - Utan värmeöverföring

Vi höjer trycket från  $\rho_{01}$  till  $\rho_{02}$ , det kostar energi. Engine



Antar att effekten som konsumeras bara påverkar entalpin vilket resulterar i ett  $\Delta T$ , dvs vi bortser från värmeöverföringen

- Den konsumerade effekten från kompressionen är

$$\dot{W}_C = \dot{m}(h_{02} - h_{01}) = [c_p \text{ constant}] = \dot{m} c_{p,c} (T_{02} - T_{01})$$

Effektivitet? Jämför med ideal (isentropisk) process.

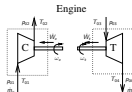
$$\dot{W}_{C,ideal} = \dot{m} c_{p,c} (T_{02,ideal} - T_{01}) = \dot{m} c_{p,c} T_{01} \left( \frac{T_{02,ideal}}{T_{01}} - 1 \right)$$

Där den minimala (ideala) temperaturhöjningen bestäms av tryckhöjningen som vi gör, vilket ger effektiviteten

$$\frac{T_{02,ideal}}{T_{01}} = \left( \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad \eta_c = \frac{\left( \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1}$$

## Turbinens effektivitet - Mer detaljer

- Sträck ut kontrollvolymen över turboaxeln.
- Använd kompressorns effektkonsumtion som mått på:
  - Producerad effekt



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

$$\eta_t \approx \eta_t \eta_m = \frac{\dot{m}_c c_p (T_{02} - T_{01})}{\dot{m}_t c_p (T_{03} - T_{04s})} = \frac{\dot{m}_c c_p (T_{02} - T_{01})}{\dot{m}_t c_p T_{03} \left( 1 - \left( \frac{\rho_{04}}{\rho_{03}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}$$

### Sammanlagren mekanisk och turbin verkningsgrad

Detta används för att bestämma turbin effektiviteten i tillverkarnas mappar.

## Förstå turbomappar – 1. Dimensionsanalys

### Dimensionsanalys

Används för att skapa insikt om viktiga samband som är fysikaliskt motiverade.

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

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

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

- Dimensionslös flödesparameter  $\Phi = \frac{\dot{m}}{\rho_{01} N D^3}$
- $a_{01}$  ljudhastighet  $\sqrt{\gamma R T_{01}}$  för ideal gas
- Energikoefficienten  $\Psi$  inkluderar

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

## 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:

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

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

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

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 ( $p_r$ ,  $T_r$ )

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

dessa används ofta på kompressorsidan

Vinst: Reducerar mappningsbehovet från 4-dim till 2-dim  $N^4 \Rightarrow N^2$

Varning: läs databladen noga för att se vilka som skall användas!

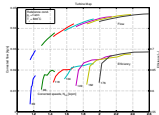
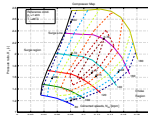
## Kompressor och Turbin – Modeller

Grundläggande princip – Generaliserade restriktioner i MVEM

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

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

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



18 / 46

19 / 46

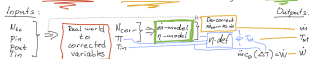
## Modellerna och deras användning

### The modeling & its implementation

Supplier data comes in corrected format.

Build the flow & efficiency models in corrected variables

Do correction & de-correction when using the models.



## Kompressor – Flödesmodell – Kurvanpassning

Se flödesmodellen

(varvtalskurvorna) som

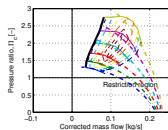
kvarts-ellipser (1) med en

asymptot åt flödet  $\dot{m}_{max}$  och en

spridning i tryckkvot (2).

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

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



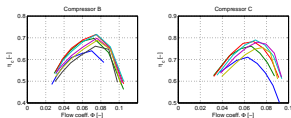
20 / 46

21 / 46

## Kompressor – Effektivitetsmodell – Kvadratisk form

$$\chi(\Phi, N_{co}) = \begin{bmatrix} \Phi - \Phi_{max} \\ N_{co} - N_{co,max} \end{bmatrix}$$

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



22 / 46

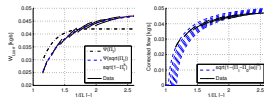
## Turbin – Flödesmodell

Turbinflöde (restriktion litet utsmetat) nästan varvtalsberoende karaktäristik

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

Lägger till varvtalsberoende

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



23 / 46

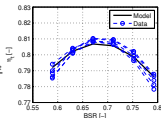
## Turbin – Effektivitetsmodell

Blade Speed Ratio (BSR) från impulsturbinerna används ofta

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

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

Kvadratisk kurva med max i  $BSR_{opt}$ .



24 / 46

## 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 liknande.

25 / 46

## Innehållsförteckning

Repetition

Fortsättning på turbo

Turbomatchning och Turbvarvtal med dess dynamik

Turbo lag

Need for Compressor Map Extrapolation

Laddtrycksreglering

## Grundekvationer för turbo

Vid stationaritet – effektbalans

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

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

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

Används för att matcha turbin, kompressor och motor mot prestanda, effektivitet (bränsleförbrukning)

Anta att vi vill nå samma laddtryck med olika turbiner eller kompressorer

Med sämre effektivitet – Krävs högre mottryck på avgassidan

Ett lågt mottryck är viktigt för låg bränsleförbrukning.

26 / 46

27 / 46

## Kompressor- och turbodynamik

Stationära förhållanden (handräkning & matchningsberäkningar)

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

Dynamiska förhållanden (simulering)

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

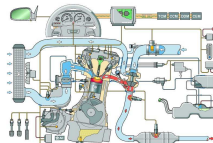
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{tc}} \left( \frac{\dot{W}_t}{\omega_{tc}} - \frac{\dot{W}_c}{\omega_{tc}} - M_{fric}(\omega_{tc}) \right)$$

Ett tillstånd för rotationshastigheten

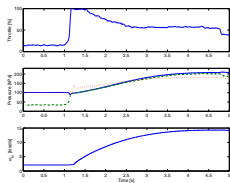
–Den dominerande dynamiken i systemet

28 / 46

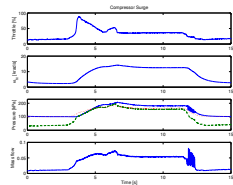
## Turbo lag – Turbo tidskonstant



29 / 46

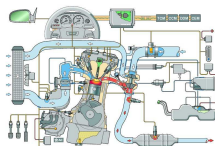


30 / 46

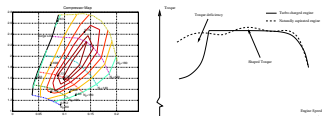


31 / 46

## Surge Ventil – Surge Reglering



## Momentkaraktäristik och turbo



Kompressor surge (pumpning) och lågvarvtalsmoment är sammankopplade

32 / 46

33 / 46



## Turboladdningens komplicerade karta - Ett försök



34 / 46

## Innehållsförteckning

Repetition

Fortsättning på turbo

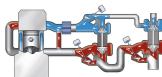
Turbomatchning och Turbvarvtal med dess dynamik

Need for Compressor Map Extrapolation

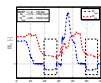
Laddtrycksreglering

35 / 46

## Need for Extended Modeling – Motivating example 1

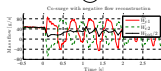
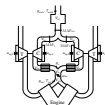


- ▶ Two stage turbocharged engine
- ▶ Measurements in engine test bench
- ▶ Open and closes control valves
- ▶ "Handing over" between compressors
- ▶ High pressure compressor  $\Pi < 1$
- ▶ **Need to extrapolate**



36 / 46

## Need for Extended Modeling – Motivating example 2



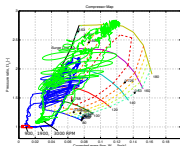
- ▶ Bi-Turbo engine
- ▶ Disturbance in the flow
- ▶ Flow reverses



- ▶ **Need to extrapolate.**

37 / 46

## Behov av utökade modeller – Exempel 3



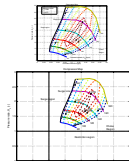
38 / 46

## Setting for the investigation – Leading to a Generic Model

- ▶ Starting point:  
normal compressor map
- ▶ How to extrapolate to
  - ▶ surge region
  - ▶ restriction region
- ▶ Experimental work
  - ▶ Engine test cell
  - ▶ Surge rig
  - ▶ Modified gas stand
- ▶ Summarize knowledge
- ▶ Build flexible model with:  
extrapolation capabilities in the structure

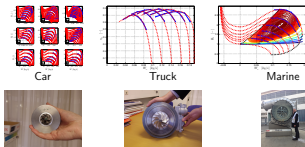
Result after 2 PhD & 8 MSC theses

The ellipse model that can be found in the book.



39 / 46

## Compressors Modelled with the Ellipse Model ⇒ Extrapolation



Open source Matlab package **CPGui** available at [www.fs.isy.liu.se/Software/](http://www.fs.isy.liu.se/Software/).

40 / 46

## Innehållsförteckning

Repetition

Fortsättning på turbo

Turbomatchning och Turbvarvtal med dess dynamik

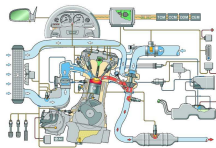
Need for Compressor Map Extrapolation

Laddtrycksreglering

Hårdvara för laddtrycksreglering

41 / 46

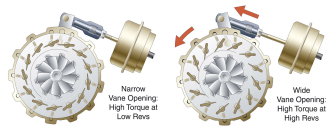
## Reglering av laddtrycket – Wastegate vanligast



42 / 46

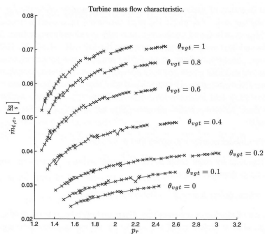
## Reglering av laddtrycket – VGT

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



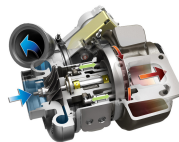
43 / 46

## Effektiva arean ändras med styrsignalen



44 / 46

## VGT – Annan teknisk lösning



45 / 46