

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Systemmodellering för en energieffektiv sjöfart – del 2	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Systems modeling for energy efficient shipping – part 2	
Universitet/högskola/företag Chalmers Tekniska Högskola	Avdelning/institution Sjöfart och Marin Teknik
Adress 412 96 Göteborg	
Namn på projektledare Karin Andersson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Francesco Baldi	
Nyckelord: 5-7 st Sjöfart, energisystem, modellering, fallstudier, exergi	

Förord

Detta projekt har finansierats av Energimyndigheten som avslutande del av ett femårigt doktorandprojekt. Arbetet har bedrivits vid institutionen för Sjöfart och Marin Teknik vid Chalmers med handledning av Karin Andersson och universitetslektor Cecilia Gabriellii. Samverkan med lektor Fredrik Haglind vid institutionen för Mekanisk Teknologi vid Danmarks Tekniske Universitet i Lyngby har skett i form av en ”tvillingdoktorand” till Francesco, Ulrik Larsen, inskriven vid DTU med finansiering från Chalmers/Lighthouse och handledning av Fredrik Haglind och Cecilia Gabriellii. Ulrik har efter disputation arbetat vid Chalmers som post doc.

Innehållsförteckning

FÖRORD	1
SAMMANFATTNING	2
SUMMARY	2
INLEDNING/BAKGRUND	3
GENOMFÖRANDE	4
RESULTAT	4
DISKUSSION	5
PUBLIKATIONSLISTA	5
BILAGOR	8

Sammanfattning

Historiskt sett har låga bränslepriser och låg transportkostnad per ton/km resulterat i att det vid fartygsdesign inte har fokuserats på energieffektivitet. Även i dag, när större fokus ligger på energieffektivitet, är framdriften av nya fartyg inte så energieffektiv som det tekniskt vore möjligt. Detta är känt och har beskrivits av såväl forskare som ansvariga i näringen. En konsekvens av detta är att fartyget vid normal drift arbetar långt från optimalt, inte bara vad gäller framdrivningen utan detta ger också effekter på interna energisystem som kylning, värmning, ventilation.

I projektet, som bedrivits som ett doktorandprojekt har olika delar av energisystemet i fartyget modellerats, kompletterat med fallstudier.

Det är tydligt att användande av systemperspektiv på energisystemet har lett till en bättre förståelse för hur detta fungerar och hur man kan uppnå energieffektivisering. En observation är att fartyg opererar till stor del av tiden under driftförhållanden som ligger långt från "design speed" och "design conditions". Detta har en inverkan på energieffektiviteten.

I fallstudier på olika fartyg (tanker och kryssning) har det framkommit att termisk energi är en viktig del av energisystemet, speciellt för passagerarfartyg.

Återvinning av värmeenergi (Waste heat recovery, WHR) kan ge 5-10% och ibland upp till 15 % energibesparing. I dessa modelleringar har utvärdering av såväl energi- som exergiflöden ("användbar energi") tillämpats.

Optimering av samverkan mellan olika delar i energisystemet kan ge besparingar. Exempelvis mellan motor och propeller där en optimering kan bidra med i storleksordning 2 %, något som vid första anblicken inte verkar så stort, men som, med en årlig förbrukning för en större passagerarfärja om 10 000 m³ diesel eller mera, kan utgöra storleksordning 2 GWh.

I projektet har inledande modellering och fallstudier gjorts. Ytterligare besparingspotential, speciellt på mer energimässigt komplicerade fartyg som större kryssningsfartyg, finns.

Summary

Historically, low fuel prices and low transport costs per tonne / km, has resulted in that the vessel design has not been focused on energy efficiency. Even today, when the major focus is on energy efficiency, operation of new ships is not as energy efficient as it would be technically possible. This is known and has been described by both researchers and managers in industry. One consequence of this is that the vessel during normal operation is working in a manner far from the optimal, not only in terms of propulsion, this also influences the the internal energy systems like cooling, heating and ventilation.

In the project, performed as a PhD project, different parts of the energy system of the ship has been modeled, and complementary case studies have been performed. It is clear that use of the systems perspective on ship's energy systems has led to a better understanding of how this works and how to achieve energy efficiency. One observation is that ships operate a large part of the time under operating

conditions that are far from the "design speed" and "design conditions". This has an impact on energy efficiency.

In case studies on different ships (a tanker and a cruise ship), it has emerged that the thermal energy is an important part of the energy system, especially for passenger ships. Recovery of thermal energy (waste heat recovery, WHR) can give 5-10% and sometimes up to 15% energy savings. In the modeling, the evaluation of both energy and exergy ("useful energy") flows has been performed. Optimization of the interaction between different parts of the energy system can provide savings. For example, between the engine and propeller where optimization can contribute in the order of 2%, which at first glance seems quite small, but, but with an annual consumption of a large passenger ferry about 10 000 m³ of diesel or more, may constitute 2 GWh.

In the project initial modeling and case studies have been made. Additional savings potential, especially in the more energetically complex vessels, for example larger cruise ships, could be found by more detailed modeling.

Inledning/Bakgrund

Historiskt sett har låga bränslepriser och låg transportkostnad per ton/km resulterat i att det vid fartygsdesign inte har fokuserats på energieffektivitet. Även i dag, när större fokus ligger på energieffektivitet, är framdriften av nya fartyg inte så energieffektiv som det tekniskt vore möjligt. Detta är känt och har beskrivits av såväl forskare som ansvariga i näringen. En konsekvens av detta är att fartyget vid normal drift arbetar långt från optimalt, inte bara vad gäller framdrivningen utan detta ger också effekter på interna energisystem som kylning, värmning, ventilation.

Energisystemen har studerats i en fallstudie i första delen av projektet.

Potentialen för energibesparing är välkänd, åtminstone teoretiskt sett. I en utredning som gjordes av International Maritime Organization (IMO 2009) visade en arbetsgrupp sammansatt av internationellt välkända experter inom alla områden inom sjöfart att den internationella sjöfarten har en potential att spara mellan 25 och 75 % av sina utsläpp av CO₂. I den beräkningen har endast en liten del tillskrivits användning av icke-fossila bränslen, varför större delen handlar om energieffektivisering. Fartyg är mycket flexibla energisystem som, förutom variationerna i driftförhållanden (hastighet), drivs under varierande yttre förhållanden som väder, strömmar, temperatur. Det faktum att designen är gjord för en speciell driftpunkt (oftast maximal hastighet hos fartyget) som mycket sällan inträffar i verkligheten gör att det uppstår problem när kraven ändras. I tider med svag konjunktur och höga bränslepriser drivs många fartyg mycket långt från designpunkten, vilket kan påverka energieffektiviteten högst betydligt. Ett exempel på en sådan situation är det fartyg som studerades i första delen av projektet där den genomsnittliga belastningen på motorerna låg kring 60 % av den maximala. För detta fartyg kunde enkla modifieringar i driftförhållanden leda till en bränslebesparing på 5-10% utan att göra några tekniska förändringar. Liknande åtgärder skulle kunna göras på andra delar av fartygets energisystem.

Kylvattensystem är exempelvis utformade för att kunna hantera full belastning på motorerna med en kylvattentemperatur på 32 °C, vilket i de allra flesta farvatten ligger långt över den verkliga temperaturen. Även för andra system, vilka har stor

betydelse för det interna energisystemets prestanda, såsom HVAC på passagerarfärjor och kryssningsfartyg samt olika system för energiåtervinning (WHR), finns stora effektiviseringsmöjligheter. Energisystemet ombord består av många olika energibärare. Kemisk energi tillsätts i bränslet och sedan sker omvandlingar, i ett dynamiskt system, mellan mekanisk, elektrisk och termisk energi. Här finns en stor utmaning i att optimera energiflödena och ge information till drift eller konstruktion. I dagens fartygsdesign hanteras inte de komplexa och icke-linjära energisystemen och det finns således även nybyggda fartyg som är suboptimerade eller har system med stor överkapacitet.

Genomförande

Projektet utgör en fortsättning på tidigare delprojekt i form av en förstudie och en del 1, som ledde till vetenskapliga publikationer, konferenspresentationer och en licentiatavhandling. I del 2 har arbetet fortsatt med fler publikationer, konferenspresentationer och en doktorsavhandling.

Francesco Baldi anställdes som doktorand inom del 1 i juni 2011 och disputerade den 20 maj 2016. Huvudhandledare och projektledare har varit biträdande professor Karin Andersson, biträdande handledare universitetslektor Cecilia Gabriell, båda avdelningen för Maritim Miljö och Energisystem, Institutionen för Sjöfart och Marin Teknik, Chalmers.

Arbetet har skett i ett nätverk med samverkan med andra universitet, främst DTU (lektor Fredrik Haglind och doktorand Ulrik Larsen, den senare numera knuten till Chalmers som post doc), Linnéuniversitetet/LTH (doktorand Fredrik Ahlgren och universitetslektor Marcus Thern), samt University of Strathclyde, Glasgow (lecturer Gerasimos Theotokatos). Francesco tillbringade även tre månader i Strathclyde under 2015.

Resultat

Det övergripande målet med projektet var att utvärdera betydelsen av variation i driftförhållanden för effektiviteten på olika delar av fartygets energisystem genom systemmodellering. Det har varit tydligt att användande av systemperspektiv på energisystemet har lett till en bättre förståelse för hur energisystemet fungerar och har kunnat ge underlag för energieffektivisering. I studien har man även kunnat notera att fartyg opererar till stor del av tiden under driftförhållanden som ligger långt från "design speed" och även "design conditions" och att detta har en inverkan på energieffektiviteten.

Två fallstudier inom projektet har utförts i samverkan med rederier, där driftdata för systemmodellering har använts. Rederierna var Larurin Maritime (<http://www.laurinmaritime.com>, kemtank) och Birka (<https://www.birka.se/omforetaget/historik/>, kryssningsfartyg). Modelleringsresultaten har, speciellt för kemtankfallet, använts som kunskapsåterföring till rederiet.

I fallstudierna har det framkommit att termisk energi är en viktig del av energisystemet, speciellt för passagerarfartyg. Återvinning av värmeenergi (Waste heat recovery, WHR) kan ge 5-10% och ibland upp till 15 % energibesparing. I dessa modelleringar har utvärdering av såväl energi- som exergiflöden tillämpats. Optimering av samverkan mellan olika delar i energisystemet kan även ge besparingar. Exempelvis mellan motor och propeller där en optimering kan bidra med i storleksordning 2 %, något som vid första anblicken inte verkar så stort, men som, men en årlig förbrukning för en större passagerarfärja om 10 000 m³ diesel eller mera, kan utgöra stora energimängder.

I projektet har inledande modellering och fallstudier gjorts. Ytterligare besparingspotential, speciellt på mer energimässigt komplicerade fartyg, finns.

Francesco har även arbetat med undervisning av skeppsbyggare i masterprogrammet Naval Architecture and Ocean Engineering, i form av föreläsningar i kursen "Marine Propulsion Systems" och som handledare för projektarbeten och masteruppsatser.Handledning av master och kandidatarbeten har även skett inom programmen Maritime Management, Marine Engineering och Shipping and Logistics. Erfarenheter från forskningsprojektet har på olika sätt kommit till användning i dessa sammanhang.

Hela rapporteringen finns i bifogad doktorsavhandling med tillhörande vetenskapliga publikationer.

Diskussion.

Resultatet av projektet har visat på möjligheter att arbeta strukturerat med energisystem ombord och fallstudierna med rederier har gett en för båda parter värdefullt kunskapsutbyte kring kopplingen mellan modellering och utfall. Fartyg är, förutom att vara ett komplext system internt, utsatta för varierande förhållanden i form av väder, vind och strömmar. Dagens sätt att optimera fartygs framdrivning sker vanligen för propeller och motor i separata processer. Även detta, till synes enkla, angreppssätt att se till samverkan mellan motor och propeller och optimera detta för olika fartregister visar sig vara av stort intresse. Francesco har även uppmärksammat den stora skillnaden mellan de förhållanden som energisystemen designats för och variationen i verkliga driftförhållanden, där man kör långt under "design speed" av olika skäl – bränslebesparing, kontrakt etc.

Publikationslista

Doktorsavhandling

Baldi, F. (2016). Modelling, analysis and optimisation of ship energy systems. Göteborg: Chalmers University of Technology. ISBN/ISSN: 978-91-7597-359-3
This thesis aims at contributing to the broader field of energy efficiency in shipping by adopting a systems perspective, which puts a special focus on system requirements and on interactions within the system. In this thesis, the energy systems of two case study ships were analysed using energy and exergy analysis

to identify energy flows and inefficiencies. Then, solutions for improving the energy efficiency of the existing systems were proposed and evaluated accounting for the ship's observed operating range and for how added elements influenced the existing systems and their performance. The results of this thesis show the importance of modelling the interactions between different parts of the energy systems. This allows not only a more accurate estimation of the benefits from the installation of new technologies, but also the identification of potential for additional energy savings. This is particularly important when the broad range of ship operations is included in the analysis, rather than focusing on the performance of the system in design conditions. In addition, the results of this thesis also show that there is potential for further improving ship energy efficiency by putting additional focus on heat losses from the engines and on how to efficiently recover them.

Vetenskapliga tidskrifter

F. Baldi and C. Gabriellii. A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications. *Energy*, 80:654–665, 2015.

In this article, a methodology for performing a feasibility analysis of the installation of a WHR (waste heat recovery) system on a vessel is described and applied to a case study vessel. The use of the proposed method can guide in the choice of the installation depending on the requirements of the owner in terms of payback time and capital investment. The results of the application of this method to the case study ship suggest that fuel savings of 5%–15% can realistically be expected, depending on the sources of waste heat used and on the expected efficiency of the WHR system.

F. Baldi, H. Johnson, C. Gabriellii, and K. Andersson. Energy and exergy analysis of ship energy systems—the case study of a chemical tanker. *International Journal of Thermodynamics*, volume 18, 2105. Originally published in the Proceedings of the 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS). Turku, Finland, 2014.

In this paper, energy and exergy analysis are applied to the energy system of a chemical tanker, for which both measurements and technic knowledge of ship systems were available. The application of energy analysis to the case-study vessel allowed for the comparison of different energy flows and therefore identifying system components and interactions critical for ship energy consumption. Exergy analysis allowed instead identifying main inefficiencies and evaluating waste flows.

Results showed that propulsion is the main contributor to ship energy consumption (70%), but that also auxiliary heat (16.5%) and power (13.5%) needs are relevant sources of energy consumption. The potential for recovering waste heat is relevant, especially from the exhaust gases, as their exergetic value represents 18% of the engine power output.

F. Baldi, U. Larsen, and C. Gabriellii. Comparison of different optimisation procedures for an organic Rankine cycle based on ship operational profile. *Ocean Engineering*, vol 110, issue B, pp 85-93, 2015.

This paper presents the comparison of four different procedures for the optimization of a combined Diesel and organic Rankine cycle system with increasing attention to the ship operational profile and to the inclusion of engine control variables in the optimization procedure. Measured data from two years of operations of a chemical tanker are used to test the application of the different procedures. The results indicate that for the investigated case study the application of an optimization procedure which takes the operational profile into account can increase the savings of the installation of an organic Rankine cycle from 7.3% to 11.4% of the original yearly fuel consumption. The results of this study further show that (i) simulating the part-load behavior of the ORC is important to ensure its correct operations at low engine load and (ii) allowing the engine control strategy to be part of the optimization procedure leads to significantly larger fuel savings than the optimization of the waste recovery system alone.

F. Baldi, G. Theotokatos, and K. Andersson. Development of a combined mean value-zero dimensional model and application for a large marine four-stroke diesel engine simulation. *Applied Energy*, 154, 2015.

In this article, a combined mean value-zero dimensional model is developed using a modular approach in the computational environment of Matlab/Simulink. The proposed model combines the advantages of the mean value and zero-dimensional models allowing for the calculation of engine performance parameters including the in-cylinder ones in relatively short execution time and therefore, it can be used in cases where the mean value model exceeds its limitations. A large marine four-stroke Diesel engine steady state operation at constant speed was simulated and the results were validated against the engine shop trials data. The model provided results comparable to the respective ones obtained by using a mean value model.

U. Larsen, L. Pierobon, F. Baldi, F. Haglind, and A. Ivarsson. Development of a model for the prediction of the fuel consumption and nitrogen oxides emission trade-off for large ships. *Energy*, 80:545–555, 2015.

This study investigates five different configurations of two-stroke diesel-based machinery systems for large ships and their influence on the mentioned trade-off. Numerical models of a low-speed two-stroke diesel engine, turbochargers and an ORC (organic Rankine cycle), are used for the optimisation of the NO_x and fuel consumption at design and part-load conditions, using a multi-objective genetic algorithm. Moreover, the effects of engine tuning and exhaust gas recirculation are investigated. The results suggest that increased system complexity can lead to lower fuel consumption and NO_x. Fuel consumption reductions of up to 9% with a 6.5% NO_x reduction were achieved using a hybrid turbocharger and organic Rankine cycle waste heat recovery system.

Konferensbidrag

F. Baldi, F. Ahlgren, T.-V. Nguyen, C. Gabriellii, and K. Andersson. Energy and exergy analysis of a cruise ship. In *Proceedings of the 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS)*, Pau, France, 2015.

F. Baldi, S. Bengtsson, and K. Andersson. The influence of propulsion system design

on the carbon footprint of different marine fuels. In Low Carbon Shipping Conference, London, UK, 2013.

F. Baldi, C. Gabriellii, F. Melino, and M. Bianchi. A preliminary study on the application of thermal storage to merchant ships. In Proceedings of the International Conference on Applied Energy, Abu Dhabi, UAE, 2015.

F. Baldi, S. Lacour, Q. Danel, and U. Larsen. Dynamic modelling and analysis for the potential of waste heat recovery on diesel engine driven applications with cyclical operational profile. In Proceedings of the 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS), Pau, France, 2015.

F. Baldi, U. Larsen, C. Gabriellii, and K. Andersson. Analysis of the influence of the engine, propeller and auxiliary generation interaction on the energy efficiency of controllable pitch propeller ships. In Proceedings of the International Conference on Maritime Technology (ICMT), Glasgow, UK, 2014

Övrigt

F. Baldi. Improving ship energy efficiency through a systems perspective. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, December 2013. Licentiate thesis.

Bilagor

Administrativ bilaga

Doktorsavhandling

CV Francesco Baldi