

Final report

1.1 Project details

Project title	Single Blade Installation in high Wind Speeds (Enkelt-vinge installation i højere vind hastigheder)
Project identification (program abbrev. and file)	64014-0550
Name of the programme which has funded the project	EUUDP
Project managing company/institution (name and address)	Liftra ApS Stationsmestervej 81, 9200 Aalborg SV Denmark
Project partners	Aalborg University, Department of Energy Technology Pontoppidanstræde 111, 9220 Aalborg Denmark Technical University of Denmark, Wind Energy Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde Denmark
CVR (central business register)	10110122
Date for submission	4-4-2018

1.2 Short description of project objective and results

EN:

The objective of the project was to increase the wind speed that you are able to install blades in 8-10m/s to 21m/s wind. The results have not been reached in full, but a simulation have been made to verify that it is possible, and a roadmap has been made on how to get to this point as more test and experience is gathered.

It was not possible to sell the tagline system within the time period of the project, but a full-scale test was made together with Vestas at Østerild. Comparing those results with the simulations, Liftra has great confidence that it is possible to reduce the movements of the root of the blade with 80% compared to a normal tagline system. On the basis of this, Liftra have sold the first offshore tagline system to China for delivery in July 2018.

DK:

Målet med projektet var at øge vindhastigheden for installation af vindmølle vinger fra 8-10m/s til 21m/s. Dette mål er ikke fuldt nået, men en simulering er blevet lavet der verificere at det er muligt og et "roadmap" er blevet lavet for hvordan målet skal nås efterhånden som flere testresultater og erfaring indsamles. Det var ikke muligt at sælge et tagline system inden udløbet af projektet, men en fuldskala test var lavet sammen med Vestas i Østerild og ved at samligne disse resultater kan Liftra med stor sikkerhed sige at det er muligt at reducere bevægelsen af rodenden med 80% i forhold til et normalt tagline system. Med baggrund i dette har Liftra solgt sit først Tagline system til offshore brug i Kina til levering i juli 2018.

1.3 Executive summary

Projektet er gennemført i perioden 2013 til 2017 indenfor den budgetterede ramme. Kommercialiseringen af projektet varetages af Liftra ApS, www.liftra.dk. Liftra beskæftiger sig primært med løfte- og transportudstyr inden for vindmølleindustrien, hvorfor et projekt med mål om at øge den mulige tidsramme for vingeanstallation var oplagt.

Projektet som på dansk hedder "Enkelt-vinge installation i højere vind hastigheder" var en meget åben titel. Efter grundig analyse blev der i projektgruppen bestemt at man ville fokusere på et såkaldt Tagline system. Ordet Tagline er en de facto standard i kran industrien, og beskriver en eller flere liner, som bruges til at styre en byrde i luften, som løftes af en kran. State of the art indenfor Taglines er bygget på meget simpel teknologi, hvor der måles på kræfterne i linerne og herfra bestemmes hvordan line skal rulles ud eller ind på et spil. I det hele taget er det et område med masser af plads til udvikling og forbedring.

Liftra har udviklet en række forskellige løfte åg til vingeinstallation. Disse åg er igennem projektet blevet brugt som basis for beregninger på Tagline systemet. Vingeågene med navne som "Blade Dragon" og "Blade Yoke" kan løfte vinger med en længde på 70-90 meter med en totalvægt på åg og vinge på 90-120 tons. Styring af en byrde med sådanne dimensioner kræver mange forberedelser, hvorfor der i projektet blev brugt en stor del af tiden på matematiske samt skalerede modeller af systemet. Ved hjælp af disse modeller blev der designet forskellige typer af løsninger, som hver især tilgodeså omkostninger, tilgængelig kran og løfteåg. Der blev designet systemer med 2, 4 og 5 taglines, hvor resultatet viser, at jo flere taglines, jo bedre kontrol. Konsekvensen er selvsagt en højere omkostning og kompleksitet. Der er testet 2 og 4 taglines på en testopstilling hos Liftra. Grundet kundeønsker er kun systemer med 2 taglines kommercialiseret, omend Liftra er klar til at levere systemer med 4 taglines, såfremt det lykkes at overbevise en kunde om fordelene den nye teknologi.



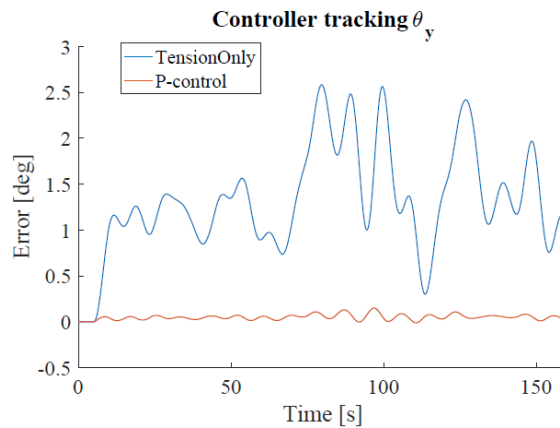
Liftra vingeåg (3 forskellige typer)

Systemerne er autonome, forstået sådan, at man aktiverer systemet når man ønsker, at vingen skal have reduceret svingningerne. Det er herefter også muligt med stor præcision, at flytte vingen, så den er lettere at montere på vindmøllen. Der er benyttet state of the art teknologi og sensorer for at opnå den høje præcision. Den primære sensor måler vingens orientering i luften – samme sensor bruges også i forskellige kommercielle rute-fly. Herudover overvåges tagline længder, tagline laster og meget mere.

Systemet med 4 og 5 taglines kan reducere bevægelsen af vingens ende (rod) med 80% i op til 21 m/s vindstød, hvor et system med 2 taglines ligger på omkring 50% reduktion af bevægelsen op til 18 m/s. Kranerne som systemet er solgt til, må ikke løfte udstyr i mere end 12 m/s vind, hvorfor systemet med 2 taglines ikke er designet helt op til 21 m/s.

Der blev i Østerild foretaget målinger på et løfteåg med 2 taglines for at underbygge de matematiske modeller. Bevægelsesmønstret og systemets dynamik tilsvarede modellerne, hvilket banede vejen for design af et automatisk system, som p.t. er under udvikling og til levering i sommeren 2018.

AAU Energiteknik har haft til opgave at designe den automatiske styring, hvilket primært er sket gennem de matematiske modeller. DTU Wind har leveret vind data og vind laster til de matematiske modeller, da sådanne ting er praktisk umulige at måle på forhånd. Disse data danner input til de matematiske modeller og beregninger. Liftra har stået for praktikken, projektledelse samt beregning og dimensionering af de fysiske produkter, eksempelvis design af elektriske spil. Samarbejdet mellem Liftra, DTU og AAU er forløbet godt. Der er i forbindelse med projektet blevet skrevet 3 universitetsprojekter, hvoraf 2 var Master Thesis. Disse projekter har ført til 2 fastansættelser hos Liftra.



Eksempel på simuleringsresultater fra en publikation af AAU, hvor det ses hvordan et automatisk styret tagline system (Rød) reducerer bevægelsen af vinklerne fra et konventionelt tagline system (blå). Den viste simulering er for 2 taglines og bevægelsen er "vandret" i grader. 3 grader svarer til ca. 6 meter bevægelse af vingens rodende

Resultaterne fra projektet er i det hele taget tilfredsstillende og forventningerne til den nye teknologi er store. Der har gennem projektet været en opgave som bestod i en accept af teknologien fra industrien, hvilket er sket igennem 2017. Der er p.t. 2 systemer under udvikling og produktion og salg af flere systemer forventes i 2018. Der har været tale om salg af 30 systemer til én kunde, hvis test af de første færdige systemer er succesfuld.

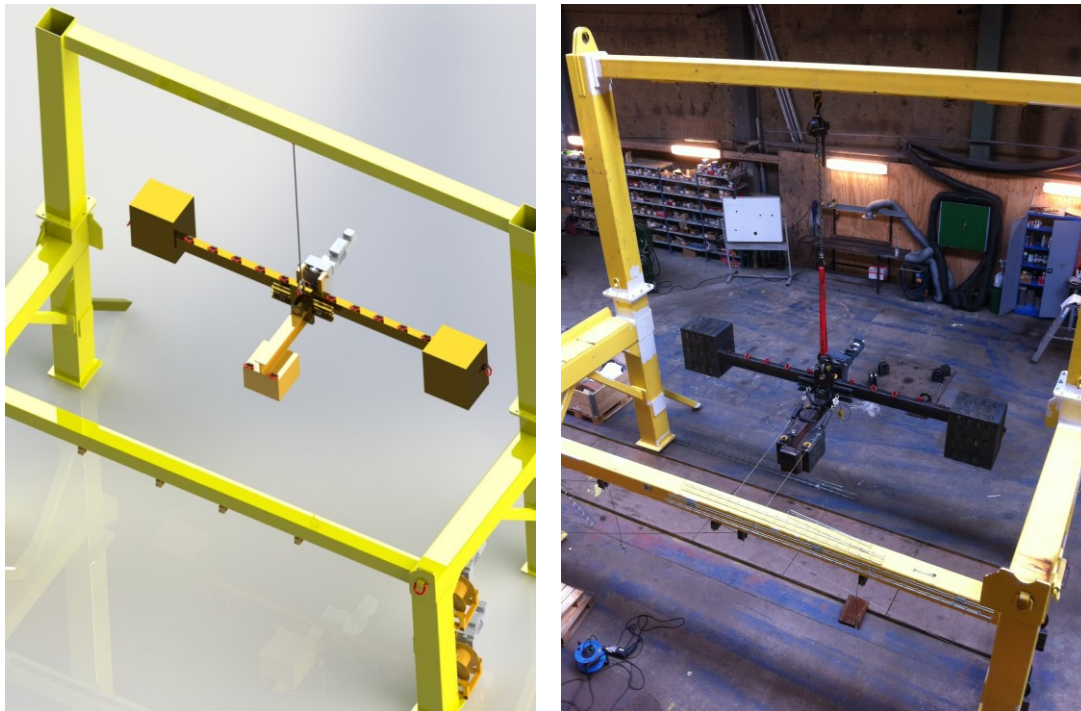
1.4 Project objectives

Gennem projektperioden er der foretaget løbende justeringer af indsatsen fra projektparterne. Justeringerne er primært baseret på resultater fra forskningen samt ønsker/muligheder fra kunder. Der var nogle uforudsete udfordringer med at finde sensorer med tilstrækkelige egenskaber, hvilket gjorde at der blev brugt mere tid end forventet på at teste sensorer i praksis. Herudover har et konservativt marked gjort udbredelsen af teknologien vanskeligere end forventet, men denne barriere ser ud til at være reduceret væsentligt gennem 2017 og 2018.

Liftra ApS

Liftras opgave i første del af projektet var udover projektledelsen, at bistå de studerende og de to institutioner i forskningen. Eksempler på dette er information omkring eksisterende kraner, løfteudstyr m.v. Herudover har Liftra stået for følgende:

- Udvikling af skaleret testopstilling med styring (Vinge skaleret ned til 2500 kg, se afsnit 1.5)
- Udvælgelse af sensorer, test af disse samt implementering
- Implementering af AAU's udviklede styringsalgoritmer på testopstilling
- Kontakt med kunder, konferencer og reklamemateriale
- Design, udvikling og dimensionering af de fysiske systemer



Skaleret testopstilling med 2500 kg byrde designet og beregnet i CAD (venstre) og produceret (højre)

DTU

DTU's hovedopgave gennem projektet er relateret til lasterne fra vindpåvirkningen; aerodynamikken. Idet det er kræfterne fra vindpåvirkningen der driver svingningerne af hele installationssettupet er det essentielt at kunne forudsige hvordan de aerodynamiske kræfter afhænger af vingestørrelse, vingeretning, vindhastighed, vingeretning samt vindens turbulensintensitet. Strømningssituationen omkring vingerne under installation er væsensforskellig fra den man typisk har at gøre med indenfor både flyindustrien og i klassiske vindenergiapplikationer, så for at kunne opstille ingeniørmodeller til effektivt at kunne beskrive vindlasterne for installationssettupet har det været nødvendigt at lave et omfattende arbejde indenfor felterne:

- Analytiske modeller baseret på hvirvelteori (crossflow principle)
- CFD (Computational Fluid Dynamics), med et stort antal beregninger på DTU's computercluster
- Deep stall aerodynamik, inklusiv effekter af selvinducerede, tidsvarierende kræfter
- Dimensionsanalyse

Herfra er nøgleresultaterne blevet kondenseret ned til beregningsmæssigt effektive ingeniørmodeller som enkelt kan afvikles på for eksempel en bærbar computer ved analyse- og designsituationer. Det i projektet udviklede teoretiske fundament for disse modeller er beskrevet i de peer reviewede artikler.

AAU

The main task for AAU in the project has been design of a system-wide control system for the tagline system. This has included the development of detailed mathematical models for different tagline configuration concepts, viewed in the context of different Liftra customer applications. More specifically these tagline configuration concepts include the use of one-, two and four taglines, and especially the control of these concepts have been considered with different feedback configurations, i.e. tagline force feedback and blade orientation feedback. Control strategies considered have been decentralized control as well as centralized controls including pole placement, linear quadratic control, decoupling control and quaternion based control methods inspired by space craft control. Also the actuators used to control the tagline lengths and forces have been considered. Originally, electric winch drives were considered for this task, but also hydraulic winch drives have been considered both regarding design and control. These include a secondary control approach, a cylinder-in-series approach, an open

circuit valve approach and a closed circuit self-contained/standalone valve approach allowing for a high level of installation flexibility. Furthermore various work regarding the measurement technology to be used, estimation of feedback etc. have been conducted, including experimental work.

1.5 Project results and dissemination of results

Dissemination

- D. T. Christensen, A. Sørensen, M. B. Rosengreen, 2013, *Modeling and Control of Hoisting Equipment for Wind Turbine Blades*, Master Thesis
- E. K. Kruse., 2014, *Single Blade Installation in High Wind Speeds – Test Setup Design and Production (Confidential)*, AAU Student Report
- E. K. Kruse., 2014, *Analysis and Validation of a Generic Three-Dimensional Dynamical Simulation Model (Confidential)*, Master Thesis
- M. Gaunaa, L. Bergami, S. Guntur, F. Zahle. *First-order aerodynamic and aeroelastic behavior of a single-blade installation setup*. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 524, 012073, 2014.
- W. R. Skrzypinski, M. Gaunaa, J. C. Heinz. *Modelling of Vortex-Induced Loading on a Single-Blade Installation Setup*. Journal of Physics: Conference Series (Online), Vol. 753, No. 8, 082037, 2016.
- M. Gaunaa, J. C. Heinz, W. R. Skrzypinski. *Toward an engineering model for the aerodynamic forces acting on wind turbine blades in quasisteady standstill and blade installation situations*. Journal of Physics: Conference Series (Online), Vol. 753, 022007, 2016.
- Schmidt, L., Andersen, T.O., Johansen, P. & Pedersen, H.C., "A Robust Control Concept for Hydraulic Drives based on Second Order Sliding Mode Disturbance Compensation". In *Proceedings of the ASME/Bath Symposium on Fluid Power & Motion Control*, Florida, USA, October 16-19, 2017.
- Schmidt, L., Andersen, T.O., Pedersen, H.C. & Bech, M.M., "An Arbitrary Order Adaptive Control Structure with Application to a Hydraulic Winch Drive". In *Proceedings of the ASME/Bath Symposium on Fluid Power & Motion Control*, Florida, USA, October 16-19, 2017.
- Schmidt, L., Roemer, D.B., Pedersen, H.C. & Andersen, T.O., "On Orientation Control of Suspended Blade During Installation in Wind Turbines". In *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Fluid Power & Mechatronics*, Harbin, China, August 5-7, 2015.
- Schmidt, L., Pedersen, H.C., Donkov, V.H. & Andersen, T.O., "Analysis & Control of a Self-contained Hydraulic Winch Drive". *Submitted to the Bath/ASME Symposium on Fluid Power & Motion Control*, Bath, United Kingdom, September 12-14.
- H.C., Donkov, Schmidt, L., Pedersen, V.H. & Andersen, T.O., "Modelling and Control of Wind Turbine Blade Stabilisation System with Quaternions". To be submitted to *IEEE Transactions on Mechatronics (ultimo 2018)*.
- H.C., Donkov, Schmidt, L., Pedersen, V.H. & Andersen, T.O., "Investigating the Dynamics and Controllability of Wind Turbine Blade Stabilization System Configurations". To be submitted to the *Journal of Modeling, Identification & Control (medio 2018)*.

Key simulation tools/software developed for Liftra in the project

- Program til hurtig beregning af stationære aerodynamiske kræfter og momenter på standard-vindmøllevinge af vilkårlig størrelse og orientering
- Program til hurtig beregning af instationære aerodynamiske kræfter og momenter fra turbulent vind på standard-vindmøllevinge af vilkårlig størrelse og orientering
- Program til hurtig beregning af instationære aerodynamiske kræfter og momenter fra turbulent vind på en hel vindmøllerotor af vilkårlig størrelse og orientering

1.6 Utilization of project results

Forventningen er at Liftra skal levere avancerede state of the art tagline systemer til mange forskellige kunder i industrien. Liftra er ikke låst til én kunde, og kan derfor bidrage til lavere installationstider i hele vindsektoren. Tagline systemet kan også bruges på andet end vinger, og en kunde har i 2017 bestilt et system som også skal virke på naceller, tårne og andre af møllens tunge dele. Grunden til at der i projektet blev fokuseret på en vinge var, at det er den absolut sværeste komponent at styre i vind, da vingen naturligvis er designet til netop at fange vinden.

Som nævnt er der solgt 2 systemer og Liftra er stadig i forhandlinger om mange flere. Metoden er patenteret så teknologien er sikret i Liftra. Der har været ønsker fra en større kunde om at købe patentet og dermed have eneret på teknologien i en periode, men dette er endnu ikke afsluttet. I så fald ville Liftra stadig skulle levere systemerne.

Strategien ind på markedet har været gennemgående simuleringer til kundematerialer, demonstration af testopstilling til åbent hus samt kundekontakt med bistand fra universiteterne.

1.7 Project conclusion and perspective

Konklusionen på projektet er at det er lykkedes med stor tilfredsstillelse at udvikle en metode til at styre vinger i op til 21 m/s vindstød. Teknologien er ikke før set i branchen og dokumentationen for teknologien er derfor grundig og detaljeret. Der er ikke set bedre produkter på markedet, og det vurderes derfor at være en state of the art løsning. Produktet mangler stadig at blive realiseret med 4 taglines, hvilket er et klart mål for Liftra.

Projektet anser derfor projektets og EUDP's formål om via forskning, udvikling og demonstration at skabe kommerciel aktivitet til gavn for vækst og beskæftigelse opfyldt i høj grad. Dertil kommer 2-3 vedvarende fuldtidsstillinger i Liftra. Yderligere er projektet et godt eksempel på hvordan forskningsinstitutionernes arbejde kan operationaliseres ind i en kommerciel kontekst til gavn både for forskerinstitution og virksomhed.

Annex

4 Winch Tagline System (4TL System) Presentation

www.liftra.dk

www.et.aau.dk

www.vindenergi.dtu.dk