

Technical University of Denmark



Kan dynamisk instabilitet ved lave indfaldsvinkler blive et problem?

Hansen, Morten Hartvig; Aagaard Madsen, H.

Publication date:
2000

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Hansen, M. H., & Aagaard Madsen, H. (2000). Kan dynamisk instabilitet ved lave indfaldsvinkler blive et problem? (Resultatblad AED-RB; Nr. 11(DA)).

DTU Library
Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

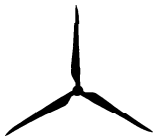
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Kan dynamisk instabilitet ved lave indfaldsvinkler blive et problem?

af

Morten H. Hansen
Helge Aa. Madsen



Titel og forfatter(e)

Kan dynamisk instabilitet ved lave indfaldsvinkler blive et problem?

Morten H. Hansen og Helge Aa. Madsen

Review

Flemming Rasmussen, Kenneth Thomsen og Stig Øye

Program og afdeling	Dato
Aeroelastisk Design Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik	Juni 2000
Registreringsnummer	Projekt/Kontrakt
AED-RB-11	ENS 1363/99-0011

Klassifikation

Offentlig

Bemærkninger

Resultaterne er opnået i projektet "Program for Forskning i Aeroelasticitet - EFP99", som er et samarbejde imellem Risø, DTU og den danske vindmølleindustri. Projektet er støttet af Energistyrelsen under EFP99 programmet.

Resumé

Dette resultatblad omhandler stabilitet for en vindmøllevinge ved lave indfaldsvinkler, hvor strømmingen er usepareret. I dette driftsområde kan *flutter* optræde for vinger med lav egenfrekvens af første torsionssvingningsform. Med en forenklet 2D aeroelastisk model for en vingesektion og med tidssimuleringer med den aeroelastiske model HawC er stabilitetsgrænsen beregnet for forskellige vingedesign. Hovedresultatet er, at flutter sandsynligvis ikke er et problem for eksisterende vingedesign under normale driftsforhold, men at fænomenet bør tages i betragtning ved fremtidige vinger. Dette gælder især, hvis designparametrene ændres mod højere tipastigheder og vinger med lavere masse-længde forhold og lavere torsionsfrekvens i forhold til flapfrekvens.

Kan rekvireres fra:

Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø
P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde
Telefon 46 77 50 54 · Fax 46 77 50 83

Dette er et resultatblad fra forskningsprogrammet Aeroelastisk Design ved Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø. Resultatbladets målgruppe er primært den danske vindmølleindustri og dansk vindmølleforskning i øvrigt. Formålet er at formidle opnåede forskningsresultater på en kort og letfordøjelig form, samt at kunne publicere opnåede resultater så tidligt som muligt. Resultaterne kan være foreløbige erkendelser eller sammendrag af udgivne publikationer. Såfremt rapporteringen er foreløbig, vil det fremgå af teksten. Anden og eventuelt senere planlagt rapportering vil fremgå af databladet og evt. litteraturlisten.

Hovedresultater

Målet med resultatbladet er, at belyse om dynamisk instabilitet ved lave indfaldsvinkler er et problem eller kan blive det for fremtidige mølledesign. Under det aeroelastiske forskningsprogram har der været arbejdet med forskellige områder af denne problemstilling gennem de sidste par år, og der er nu grundlag for at præsentere de første resultater og konklusioner.

Dynamisk instabilitet ved lave indfaldsvinkler, også kaldet *flutter*, er et klassisk problem indenfor aeroelasticitet, som man har taget hensyn til ved design af fly og helikopterrotorer gennem årtier. Endda ved konstruktion af Nibe møllerne var man opmærksom på problemet. Spørgsmålet er, om det er eller kan blive et problem for moderne vindmøller? Hidtil har der været stor opmærksomhed omkring instabilitet i stallområdet [4, 5], hvor både stall-inducerede kantsvingninger og flapsvingninger har været et problem. Flutter optræder derimod ved lave indfaldsvinkler på den lineære del af liftkurven. Det kan derfor være aktuelt for pitchregulerede møller i hele driftsområdet, og for stallregulerede møller ved lave vindhastigheder.

Flutter er en instabilitet for en vinge, hvor bevægelser i to frihedsgrader, flap og torsion, indgår. Endvidere er der en stærk dynamisk kobling mellem strømmingen og vingen gennem instationær aerodynamik.

De vigtigste parametre, som er bestemmende for om flutter optræder, er:

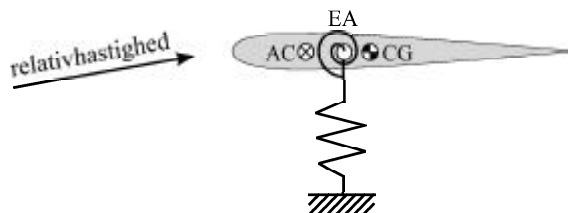
1. Relativhastigheden mellem strømning og vingen (vingens tip hastighed)
2. Torsionsfrekvens i forhold til flapfrekvens
3. Vingens tværsnitsparametre
 - masse pr. længdeenhed
 - beliggenhed af massecenter
 - beliggenhed af elastisk akse
4. Strukturel dæmpning

En undersøgelse af den kvantitative indflydelse fra de forskellige parametre er gennemført; dels med stabilitetsanalyse med en forenklet todimensionel model for en vingesektion, og dels med tidssimuleringer med det aeroelastiske program HawC for en hel mølle med 30 m vinger. Hovedresultatet af denne undersøgelse er, at flutter sandsynligvis ikke er et problem under normal drift for eksisterende vindmøller. Derimod bør man tage det med i designgrundlaget for nye større vinger, hvor designparametrene langsomt ændres, f.eks. mod større tip hastighed, lettere vinger eller lavere torsionsfrekvens i forhold til flapfrekvens.

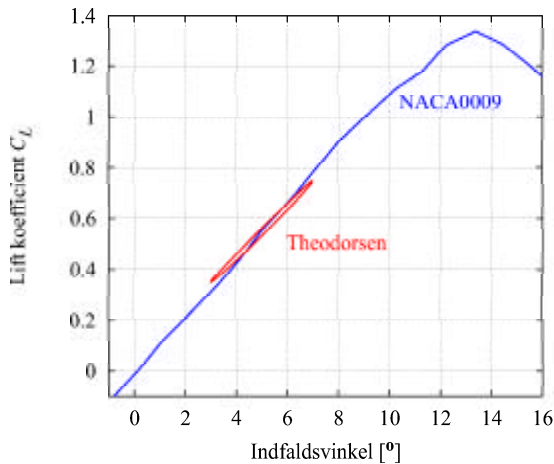
Fluttermekanismen og dens modellering

Til undersøgelse af flutterproblematikken for vindmøller er der benyttet to modeller: 1) en forholdsvis simpel todimensionel (2D) model for en vingesektion og 2) den aeroelastiske model HawC. For sidstnævnte henvises til [2], mens den simple model kort bliver introduceret her.

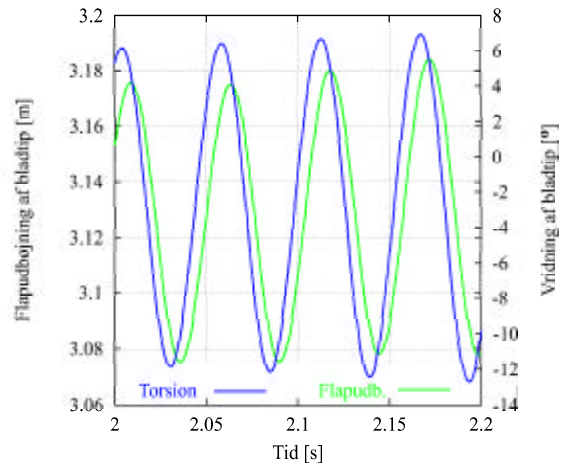
For at modellere flutter er det som minimum nødvendigt at inkludere den flapvise og torsionsvise bevægelse af vingesektionen [1]. De strukturdynamiske egenskaber af vingesektionen modelleres således ved en model med frihedsgraderne: *flap* og *torsion*. Vingesektionen betragtes ophængt i fjedre som skitseret på Figur 1. Væsentlige parametre i denne todimensionelle model er torsionsfrekvensen og forholdet mellem torsions- og flapfrekvensen, samt placering af massecenter (CG), elastisk akse (EA), og aerodynamisk center (AC).



Figur 1: Todimensionel model af vingesektion.



Figur 2: Hysteresesløjfe for liftkoefficienten (rød) beregnet med Theodorsens instationære potentialstrømløsningsmodel.



Figur 3: Eksempel på indholdet af flap og torsion for en vinge der er udsat for flutter. Tidsserierne er beregnet for en 30 meter vinge med HawC [2].

En anden vigtig del af flutter er en stærk dynamisk kobling mellem strømning og vinge gennem instationær aerodynamik. Når en vinge svinger, ændres den cirkulation (opdrift), som vingeprofilet skaber. For at opretholde den totale cirkulation i strømningen afkastes hvirvler fra bagkanten af profilet, der har en styrke svarende til ændringen af cirkulationen. De afkastede hvirvler inducerer hastigheder omkring profilet således, at den effektive indfaldsvinkel ændres. Derved opstår en hysteresesløjfe, når man afbilder liftkoefficienten mod indfaldsvinklen, som vist i Figur 2. En tilnærmet, analytisk model af denne instationære aerodynamik blev opstillet af Theodorsen i 30'erne [3] netop for at undersøge flutter. Senere omskrivninger af denne model er benyttet til 2D modellen.

Når flutter opstår, er det fordi relativhastigheden ved vingesektionen og strukturdynamikken for vingen er således, at en svingningsform med stort indhold af torsion og flap kan exciteres. Dette flutterfænomen forekommer først, når relativhastigheden overstiger en vis mindste værdi, *flutterhastigheden*. Figur 3 viser tidsserier for en instabil svingning af en vinge. Udover det store torsionsindhold ses det, at torsions- og flapbevægelsen i denne fluttersvingningsform er faseforskudt således, at profilet pitcher op lidt før flapbevægelsen. I mekanismen bag flutter er denne faseforskel og hysteresen på liftkoefficienten af stor betydning.

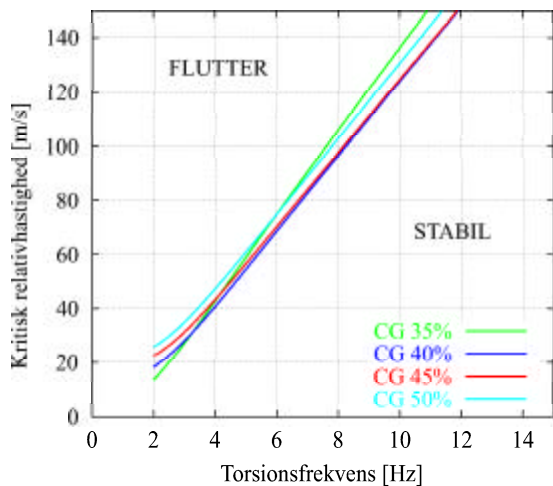
Den simple 2D model har de fordele, at man kan gennemføre parameterstudier, og at den kan valideres mod kendte 2D flutterresultater [1]. Endvidere kan stabilitetsgrænsen i denne model direkte beregnes ud fra de opstillede bevægelsesligninger, hvorimod flutterstabilitet i HawC må baseres på tidssimuleringer for at se, om svingningerne vokser eller dæmpes. Den instationære aerodynamik modelleres i HawC med Beddoes-Leishman modellen, som udover at kunne modellere stallhysteresen også modellerer den instationære aerodynamik i det lineære område. Strukturdynamikken i HawC modelleres ved finite element metoden baseret på bjælkeelementer. For vingen betyder det, at der for hvert element specificeres alle tværsnitsdata, der er vigtige for flutter.

Hvad er de kritiske parametre for stabiliteten?

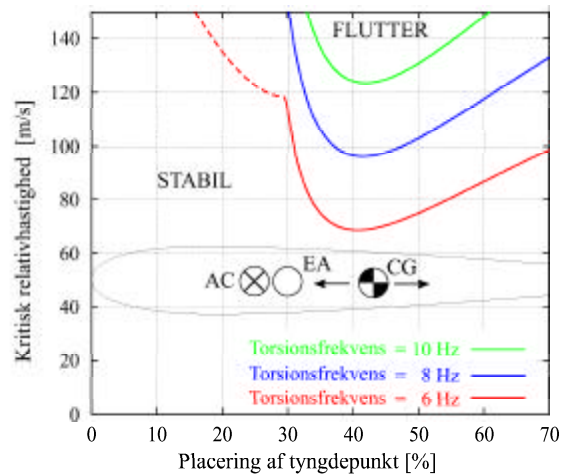
Nu vises nogle eksempler på stabilitetsdiagrammer, som illustrerer stabiliteten af vingesektionens statiske ligevægt som funktion af relativhastigheden og forskellige udvalgte parametre. Disse parameterstudier tager udgangspunkt i typiske parametre for en vingesektion med en korde på 1 meter. Det skal bemærkes, at effekten af strukturel dæmpning ikke er medtaget i denne stabilitetsanalyse. I alle eksemplerne er AC placeret i 25 % og EA i 30 %.

Effekten af reduceret torsionsfrekvens

Figur 4 viser den kritiske relativhastighed som funktion af torsionsfrekvensen ved fastholdt flapfrekvens på 1.79 Hz. Kurverne svarer til forskellige placeringer af CG. I dette tilfælde er det tilsyneladende mest kritisk med CG i 40 %. Det ses, at torsionsfrekvensen er en vigtig parameter for stabiliteten, jo lavere jo mere kritisk.



Figur 4: Kritisk relativhastighed som funktion af torsionsfrekvens for forskellige placeringer af CG, men med fastholdt flapfrekvens på 1.79 Hz og EA placeret i 30 %.



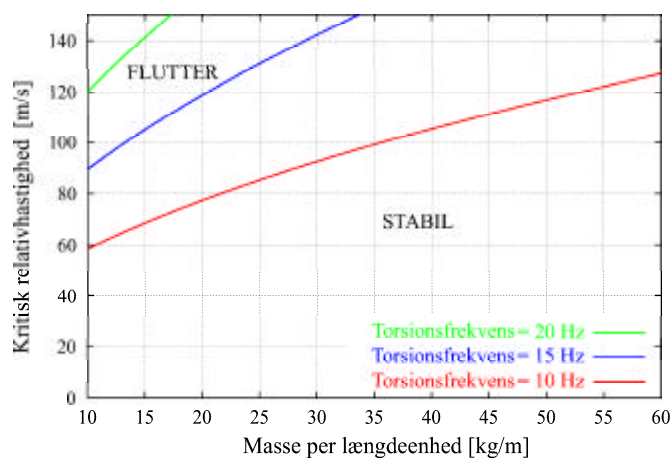
Figur 5: Kritisk relativhastighed som funktion af massecenterets placering for forskellige torsionsfrekvenser, men med fastholdt placering af EA i 30 % og AC i 25 %.

Effekten af massecenter-forskydning

Figur 5 viser den kritiske relativhastighed som funktion af massecenterets placering for forskellige torsionsfrekvenser og fastholdt flapfrekvens på 1.79 Hz. Det ses her mere tydeligt, at den mest kritiske placering af CG er omkring 40 % i dette eksempel. Bemærk, at alle kurver har en lodret asymptote ved AC i 25 %. Hvis CG placeres foran AC kan flutter ikke optræde, derimod kan en statisk instabilitet (*divergens*, hvor vingen “vrides” af de aerodynamiske kræfter) optræde, hvis AC er placeret foran den EA. En grænse for den statiske instabilitet er markeret med en stiplede kurve for torsionsfrekvensen lig med 6 Hz.

Effekten af reduceret masse

En anden vigtig parameter for en vingesektionens stabilitet er masseforholdet mellem luft og vinge. Generelt øges effekten af de aerodynamiske kræfter på en vinge, når dens masse reduceres. Figur 6 viser den kritiske relativhastighed som funktion af vingesektionens masse pr. længdeenhed for forskellige torsionsfrekvenser. Det ses, at stabilitetsgrænsen reduceres for reduceret masse. Derudover viser Figur 6, at denne effekt er størst for vinger med højere torsionsfrekvens. Effekten af reduceret masse per længdeenhed viser, at den yderste (og letteste) del af vingen, hvor også relativhastigheden er størst, er nærmest grænsen til flutter.



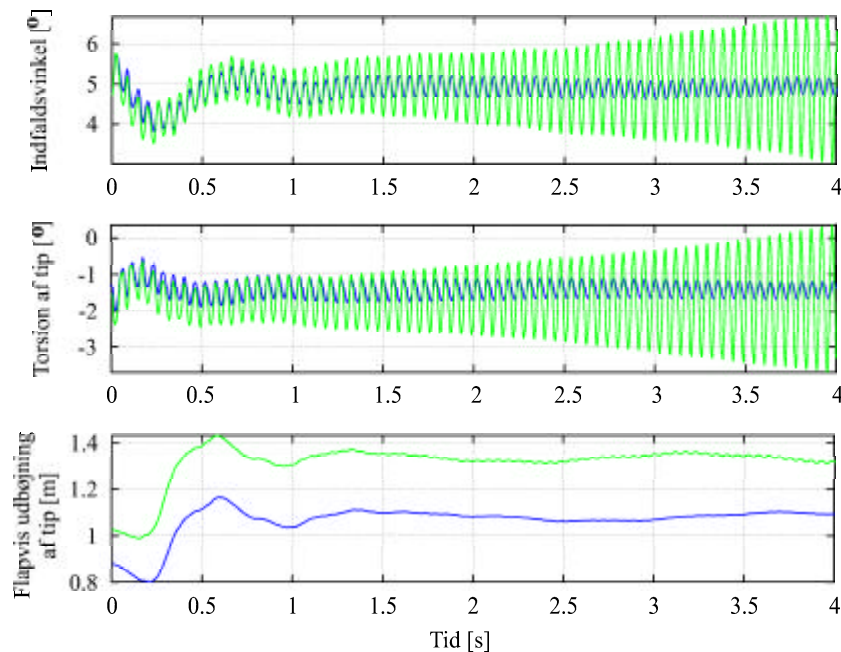
Figur 6: Kritisk relativhastighed som funktion af massen pr. længdeenhed for forskellige torsionsfrekvenser.

Eksempler på flutter for en hel vinge

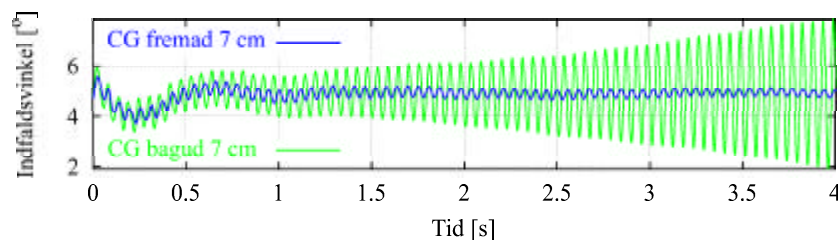
Stabilitetsdiagrammerne danner grundlag for eksempler på flutter for en typisk vinge modelleret med HawC. Modellen tager udgangspunkt i et modificeret 30 meter blad. Egenfrekvenser af første flapvise og første torsions-svingningsformer er henholdsvis 1.18 Hz og 17.3 Hz, og massen pr. længdeenhed ved radius 25 m er 90 kg/m. Effekten af strukturel dæmpning og massemidtpunktets placering i forhold til elastisk akse undersøges med forskellige eksempler. I alle eksempler er turbulens og shear i vindfeltet udeladt.

Først et eksempel på flutter for et blad, hvor CG er sammenfaldende med EA og de logaritmiske dekrementer for den første flapvise og torsionssvingningsform er henholdsvis 2.0 % og 7.3 %. Figur 7 viser tidsserier af indfaldsvinkel, torsionsvinkel og flapvis udbøjning for bladet ved to forskellige tiphastigheder. De blå kurver svarer til en tiphastighed på 90 m/s, hvor de transiente svingninger dør ud. Bladet indfinder sig i en stabil bevægelse med lille amplitude bestemt af tidsvarierende kræfter, som i dette tilfælde 1P tyngdepåvirkningen. De grønne kurver svarer til en tiphastighed på 105 m/s, hvor de transiente svingninger ikke dør ud, men vokser med tiden. Instabiliteten forekommer ved en lav indfaldsvinkel (mellem 5°), og må derfor betegnes som flutter.

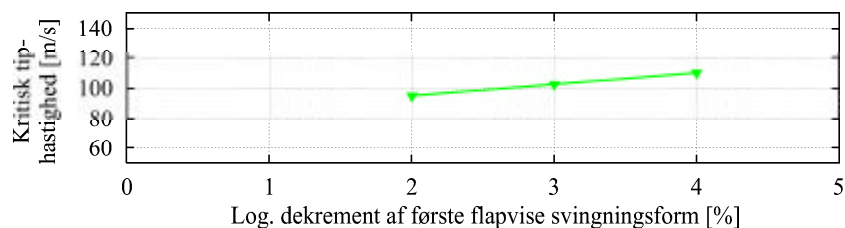
Instabiliteten kan afhjælpes ved flytning af CG. Figur 8 viser to tidsserier af indfaldsvinklen for samme blad ved samme tiphastighed, men med forskellige placeringer af CG. Tiphastigheden er 105 m/s svarende til Figur 7, hvor flutter optræder. Figur 8 viser dog, at flutter kan undgås, hvis CG flyttes 7 cm fremad mod forkanten, men ikke hvis CG flyttes bagud 7 cm. Denne iagttagelse stemmer overens med det kvalitative resultat i Figur 5.



Figur 7: Flutter af modificeret 30 meter vinge beregnet med HawC. Blå og grønne kurver svarer til tiphastigheder på hhv. 90 m/s og 105 m/s. Fra oven: Indfaldsvinkel ved radius 25 m, torsion og flapvis udbøjning af tippen.



Figur 8: Flutter af modificeret 30 meter vinge beregnet med HawC. De blå og grønne kurve svarer til CG placeret 7 cm hhv. foran og bagved EA. For begge kurver er tiphastighed = 105 m/s.



Figur 9: Kritisk tip-hastighed som funktion af strukturel dæmpning af første flapvise svingningsform for en modificeret 30 meter vinge. For de tre punkter (for 2 %, 3 % og 4 % flapvis dæmpning) er første torsionssvingningsform dæmpet 7.3 %, 8.4 % og 9.5 %. Estimeret fra HawC-beregninger.

Strukturel dæmpning har kun en lille effekt på den kritiske tip-hastighed. Figur 9 viser den kritiske tip-hastighed som funktion af strukturel dæmpning for første flapvise svingningsform. Den strukturelle dæmpning af første torsionssvingningsform ændres også, når den flapvise dæmpning ændres. Således er vingen dæmpet 7.3 %, 8.4 % og 9.5 % i torsion for 2 %, 3 % og 4 % flapvis dæmpning. Den kritiske tip-hastighed øges kun 15 % ved fordobling af det logaritmiske dekrement for første flapvise svingningsform og forøgelse på 30 % for første torsionssvingningsform. Forøgelse af dæmpning i en vinge synes således ikke at være den mest effektive metode til afhjælpning af flutter.

Konklusion

Mekanismen bag flutter er væsentlig forskellig fra mekanismen bag stall-inducerede svingninger. De problemer med stall-inducerede svingninger, som er set ved stallregulerede vindmøller, kan i visse tilfælde løses ved at ændre vingens aerodynamiske egenskaber, for eksempel med påsætning af kantlister på dens forkant. Problemer med flutter kan ikke løses ved ændring af de aerodynamiske egenskaber. Det kræver en ændring af vingens strukturdynamiske egenskaber, for eksempel ved flytning af massecenteret eller øgning af torsionsegenfrekvensen. Derfor er det vigtigt at gøre sig overvejelser omkring sikker margin mod flutter allerede i designfasen.

Den nuværende udvikling kunne medføre, at tip-hastigheder for f.eks. off-shore møller nærmer sig 100 m/s, hvilket ikke er langt fra den kritiske værdi for vinger med lav torsionsegenfrekvens. Det er dog svært at give et generelt svar på, hvor langt eksisterende vinger er fra flutter under normal drift, fordi det er influeret af mange parametre. Men det er muligt med HawC at undersøge en given vinges sikkerhed mod flutter, hvis detaljerede tværsnitsdata for vingen er tilgængelige. Et godt fingerpeg kan dog opnås, hvis vingens modal-egenskaber kendes, dvs. egenfrekvenser, logaritmiske dekrementer og svingningsformer. Endelig bør det nævnes, at flutterfænomenet kan være mere komplekst end modelleret i denne analyse. Effekten af de højere flapvise svingningsformer, store udbøjninger, rotorens dynamik, osv. bør undersøges nærmere i fremtiden.

Litteratur

- [1] R. BISPLINGHOFF, H. ASHLEY, AND R. HALFMAN, *Aeroelasticity*, Dover Publications, 1955.
- [2] J. PETERSEN, *The aeroelastic code hawc – model and comparisons*, in State of the Art of Aeroelastic Codes for Wing Turbine Calculations, B. M. Pedersen, ed., vol. Annex XI, Lyngby, April 1996, International Energy Agency, Technical University of Denmark, pp. 129–135.
- [3] T. THEODORSEN, *General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter*, NACA Report 496, (1935), pp. 413–433.
- [4] K. THOMSEN AND J. PETERSEN, *Risikoen for kantsvingninger kan kortlægges med en exciter*, Resultatblad AED–RB–9, Aeroelastisk Design, Afd. for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø, Sept. 1999.
- [5] K. THOMSEN, J. PETERSEN, AND M. THØGERSEN, *Vingers svingningsformer er vigtige for kantsvingninger*, Resultatblad AED–RB–8, Aeroelastisk Design, Afd. for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø, Marts 1999.