

Belastingreducerende kruiregelingen

Inventarisatie

T.G. van Engelen
P. Schaak

Abstract

We hebben verschillende potentiële mogelijkheden geïdentificeerd om structurele turbinebelastingen te dempen middels een kruiregeling. Voor turbines met 3 bladen en een vaste naaf hebben we aan de literatuur 2 hypothesen voor structurele demping middels een kruiregeling toegevoegd. De eerste optie bestaat uit het oscillerend kruien van de turbine waardoor het grote impulsmoment van de draaiende rotor van richting verandert. Volgens de klassieke mechanica gaat een verandering van een impulsmoment gepaard met een koppel. In het geval van een kruierende windturbine betekent dit dat er een tiltkoppel ontstaat dat evenredig is met de kruisnelheid. Dit tiltkoppel is derhalve via de kruiregeling controleerbaar en kan gebruikt worden om energie uit een voor-achter torentrilling op te nemen. Deze optie is in 2000 bedacht en in deze studie nader onderzocht. De tweede optie is gebaseerd op de directe sturing van de aerodynamische axiaalkracht met de kruisehoek. De axiaalkracht van een windturbine is niet parallel aan de wind maar heeft de richting van de turbine-as. Door oscillerend te kruien draait daarom ook de axiaalkracht oscillerend. De axiaalkracht heeft dan een oscillerende zijwaartse component, die gebruikt kan worden om zijwaartse torenbewegingen te dempen. Deze optie hebben we aan de stand der techniek toegevoegd. In de literatuur was reeds bekend dat er een koppeling is tussen *i*) kruien en tilten en *ii*) kruien en laterale torenbuiging. Daaruit bleek echter niet meer, dan dat dit bruikbaar zou zijn voor structurele demping in geval van 2-bladige turbines met een ‘teetered hub’. Uit het hier beschreven onderzoek komen 3 verschillende concepten naar voren, waarop laterale torenbuiging wellicht middels een kruiregeling kan worden gedempt. Daarnaast is er nog een overdracht van kruisehoek naar axiale torenbuiging geïdentificeerd en zullen er koppelingen met bladklap en bladzwaai zijn. We stellen voor de systeemoverdrachten van kruisehoek naar structurele bewegingen met een representatief turbinemodel te identificeren, om de potentie van dempende kruiregelingen in beeld te brengen. Afhankelijk van deze potentie, de industriële behoefte en de eventuele alternatieven voor een dergelijke regeling kan hier dan invulling aan worden gegeven.

Verantwoording

Het hier beschreven werk is uitgevoerd binnen een project dat mede mogelijk is gemaakt door ondersteuning van het Programma Duurzame Energie in Nederland, dat wordt uitgevoerd door NOVEM in opdracht van het ministerie van Economische Zaken (contractnummer 2020-01-12-10-003).

Erkentelijkheid gaat uit naar Gustave Corten. Gustave heeft in belangrijke mate bijgedragen aan het idee om het tiltkoppel dat via de kruibeweging kan worden aangestuurd, te benutten om voor/achter torentrillingen te dempen.

INHOUDSOPGAVE

1	Introductie	5
2	Literatuur	6
3	Demping van laterale torenbuiging	7
4	Demping axiale torenbuiging	10
5	Nabeschouwing	15
A	Indiening Idee Kruidemper	18

1 INTRODUCTIE

Het hier beschreven onderzoek is een inventarisatie naar het dempen van structurele bewegingen in windturbines middels de kruihoek. Het behelst een literatuuronderzoek en de analyse van torendempende kruiseelingen in turbines met 3 bladen en een vaste naaf.

De demping van laterale torenbuiging hebben we geanalyseerd middels simulaties met lineaire turbinemodellen. Voor de demping van axiale torenbuiging hebben we een structureel model rekenkundig geanalyseerd.

In hoofdstuk 2 is de literatuurstudie beschreven. De analyse volgt in hoofdstuk 3 en 4; respectievelijk voor laterale - en axiale torendemping. De hieruit voortvloeiende conclusies en aanbevelingen staan samengevat in hoofdstuk 5.

2 LITERATUUR

In de literatuur wordt weinig gerept over continue aansturing van de kruisehoek om structurele bewegingen in windturbines actief te dempen. De oudst gevonden referentie waarin deze mogelijkheid wordt aangeroerd is van E. Ulén en stamt uit 1993 [5]. De originele publicatie van Ulén hebben we helaas niet kunnen achterhalen. Blijkens [1] heeft Ulén windtunnelmetingen met een horizontale as windturbine beschreven, waarbij continue kruisehoekregeling is toegepast. Op basis van deze metingen wordt geconcludeerd dat laterale torenbewegingen middels de kruisehoek kunnen worden gedempt en dat de teeterhoek met een kruisehoekregeling kan worden beïnvloed.

Een mathematische studie naar belastingreductie middels de kruisehoekregeling is uitgevoerd door T. Ekelund, die hierover voor het eerst publiceert in 1996 [1]. Nadere details van dit werk heeft hij beschreven in een uitgebreider artikel en in zijn proefschrift [2][3]. Het onderzoek van Ekelund heeft zich beperkt tot een model van een horizontale as windturbine met 2 bladen en een 'teetered hub' (i.e. de rotor kan uit zijn verticale vlak kantelen). Het model gaat uit van een constante rotorsnelheid en 4 graden van vrijheid in de ondersteuningsconstructie: kruisehoek, axiale torenbuiging, laterale torenbuiging en teeterhoek. Alle vier modes zijn in de modelbeschrijvende bewegingsvergelijkingen gekoppeld. Met name de laterale torenbeweging en teeterhoek blijken goed te beïnvloeden met de kruisehoek.

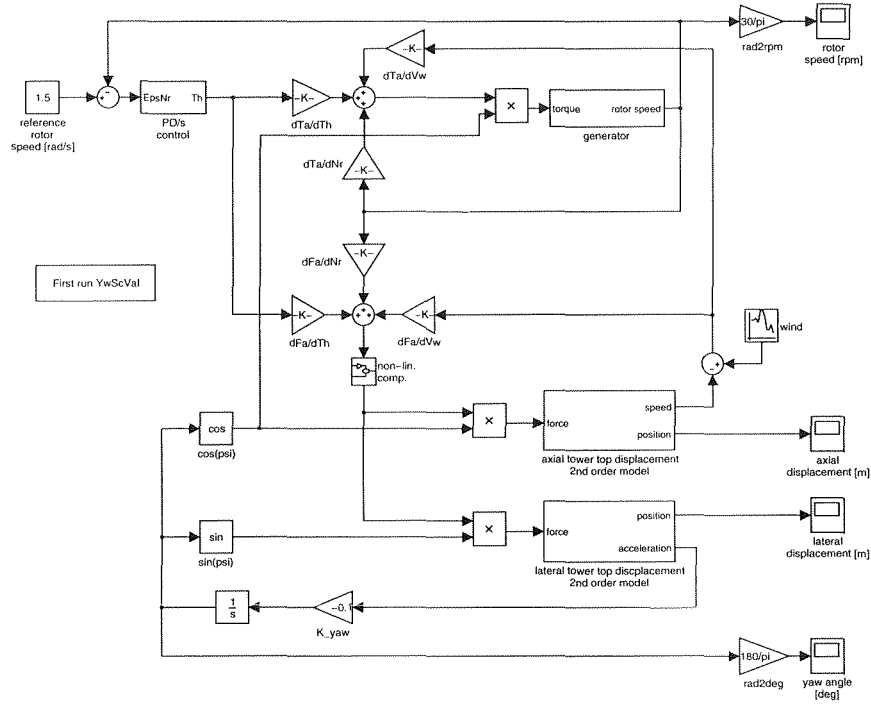
De koppeling van de kruisehoek met de teeterhoek wordt volgens Ekelund veroorzaakt door *i)* de massatraagheid van de rotor en *ii)* het gyroscopische koppel. De eerste zou met name bijdragen in geval de (twee) bladen horizontaal staan, de tweede wanneer zij verticaal staan. De interactie tussen de kruisehoek en laterale torenbeweging wordt verklaard uit het feit dat het massamiddelpunt van de kruisehoeken (hub plus rotor) niet samenvalt met de kruise-as. Doordat tijdens het kruise de torentop om het massamiddelpunt wordt gedraaid, zou de laterale verplaatsing van de torentop binnen de uiterste posities van het massamiddelpunt kunnen worden gehouden (de rotor wordt dan daarbuiten gepositioneerd). Dit wordt ook wel de 'vissestaart mode' genoemd.

Ekelund concludeert dat de kruisehoek kan worden gebruikt om de teeterhoek te controleren, mits er sprake is van slechts geringe aërodynamische demping. Efficiënte beperking van de teeterbeweging blijkt daarbij slechts mogelijk als de regeling periodiek afhangt van de rotorhoek (azimuth van de bladen in het rotorvlak). Ook het dempen van de laterale torenbeweging blijkt mogelijk. Hiervoor is het niet noodzakelijk de rotorhoek in aanmerking te nemen, maar daar kan wel een aanmerkelijke verbetering mee worden bereikt. Ekelund behandelt 2 strategieën om de laterale torenbeweging te dempen. Deze blijken in tegengestelde fase op de laterale torentopbeweging te reageren (waarvoor geen verklaring is gegeven). Beide strategieën leiden tot een neutrale kruisehoek (i.e. de rotor loodrecht op de windrichting) op het moment dat de torentop de neutrale stand (i.e. geen laterale uitwijking) passeert.

Aan de rol van het aërodynamische krachterspel bij structurele demping, zoals laterale torendemping door het verdraaien van de axiaalkracht, wordt in de bovengenoemde literatuur voorbij gegaan. Wat de mogelijkheden zijn voor 3 bladige rotoren is ook niet duidelijk. Wel vermeld Ekelund voorafgaand aan de toetsing van zijn dempende regelingen dat 'de resulterende periodieke belasting op de nacelle en toren significant veel kleiner zijn bij 3 bladen, als gevolg van de rotorsymmetrie. Hierdoor zou de potentie voor continue kruisehoekregeling groter zijn voor turbines met 2 bladen.'

3 DEMPING VAN LATERALE TORENBUIGING

We hebben een inventariserend onderzoek gedaan naar de laterale torenbeweging als gevolg van de verdraaiing van de axiaalkracht die bij het kruien van de rotor optreedt. Hiervoor is aan een gelineariseerd windturbinemodel een regeling toegevoegd die de laterale torenbeweging volgens dit principe zou moeten dempen. Het desbetreffende Matlab-Simulink model is afgebeeld in figuur 1.



Figuur 1: Blokschema van een geregelde lineaire windturbine met kruiseuring om laterale torenbewegingen te dempen

De figuur betreft een windturbine waarbij de bladhoek wordt geregeld volgens:

$$\frac{PD}{s} = \frac{-65 \cdot s - 5}{s} \left[\frac{\circ}{\text{rad/s}} \right] \quad (1)$$

Hierin is s de Laplace-operator. Het generatormodel betreft een effectieve massa traagheid met een lineaire koppelregeling, respectievelijk gegeven door:

$$J_{\text{eff}} = 15 \cdot 10^6 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (2)$$

$$K_{\text{gen}} = -980 \text{ [kNm/(rad/s)]} \quad (3)$$

De aërodynamische overdracht van de rotor wordt gekarakteriseerd door de gevoeligheden van het aërodynamische koppel voor windsnelheid, bladhoek en rotorsnelheid, respectievelijk:

$$\frac{dT_a}{dV_w} = 400 \frac{\text{kNm}}{\text{m/s}} \quad (4)$$

$$\frac{dFa}{dTh} = -250 \text{ kNm/}^\circ \quad (5)$$

$$\frac{dFa}{dNr} = -900 \frac{\text{kNm}}{\text{rad/s}} \quad (6)$$

De axiaalkracht komt met soortgelijke gevoeligheden tot stand:

$$\frac{dFa}{dVw} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m/s}} \quad (7)$$

$$\frac{dFa}{dTh} = -20 \text{ kNm/}^\circ \quad (8)$$

$$\frac{dFa}{dNr} = -4.3 \frac{\text{kN}}{\text{rad/s}} \quad (9)$$

De toren is gemodelleerd middels een lumped parameter model voor zowel de axiale - als de laterale torentopverplaatsing. De overdracht van kracht F naar torentoppositie x ligt vast volgens:

$$\frac{F}{m_t} = \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k_t}{m_t} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{c_t}{m_t} \cdot x \quad (10)$$

Hierin zijn m_t , k_t en c_t respectievelijk de torentop equivalente massa, dempingsconstante en veerconstante:

$$m_t = 265 \cdot 10^3 \text{ kg} \quad (11)$$

$$k_t = 5.9 \frac{\text{kN}}{\text{m/s}} \quad (12)$$

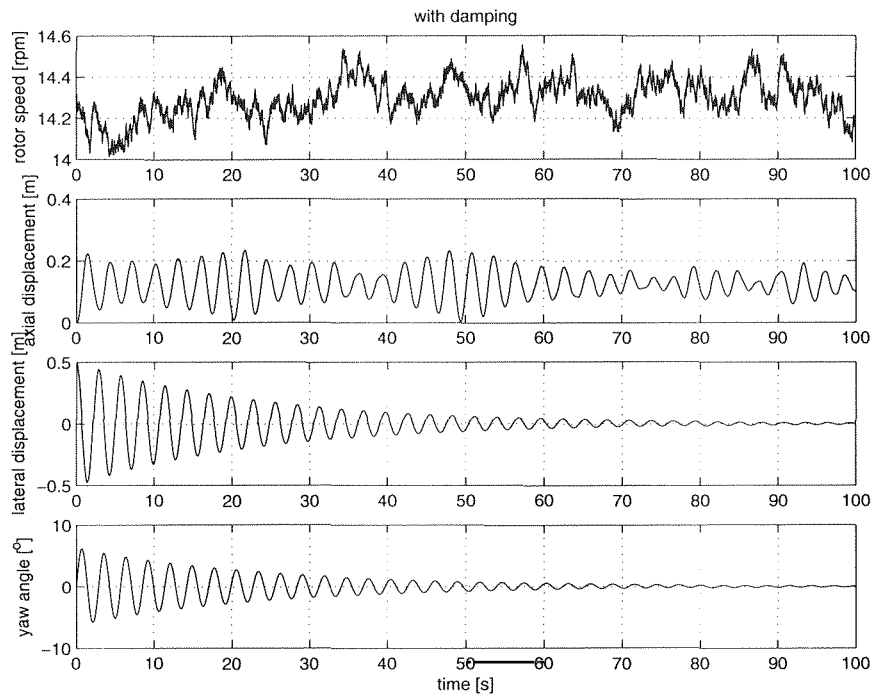
$$c_t = 1.3 \cdot 10^3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (13)$$

De laterale torenbeweging wordt gedempt volgens proportionele terugkoppeling van laterale versnelling naar de kruisnelheid met:

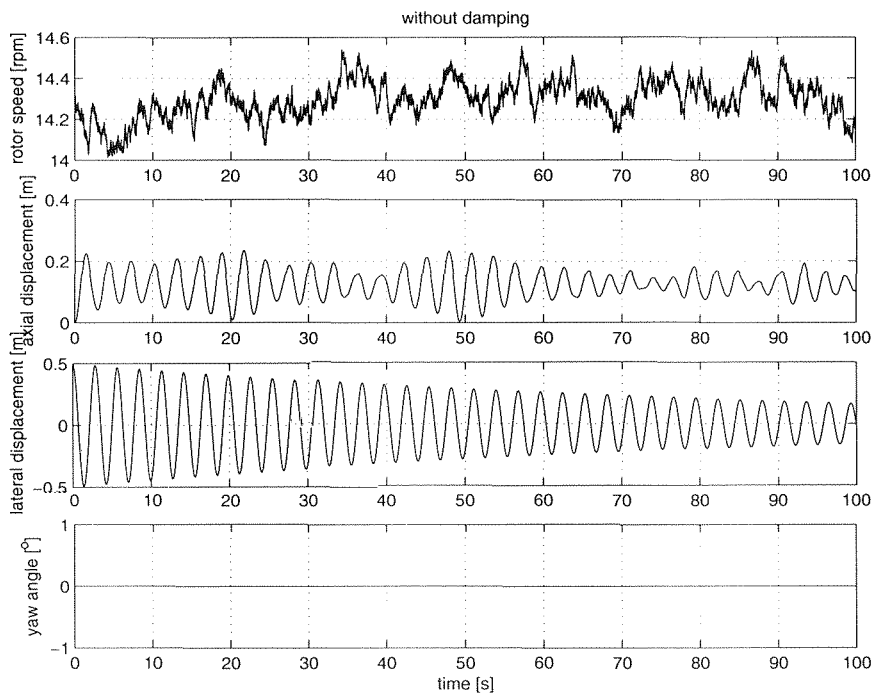
$$K_{yaw} = -0.1 \frac{\text{rad}}{\text{m/s}} \quad (14)$$

Dit model is gesimuleerd met - en zonder inschakeling van de lateraal dempende kruiregeling. Als beginsituatie voor de laterale torenbeweging is een uitwijking van 0.5 m en een snelheid van 0.0 m/s aangenomen. De resultaten hiervan zijn afgebeeld in figuur 2 en 3.

Van boven naar beneden zien we in deze figuren de rotorsnelheid, axiale torenbeweging, laterale torenbeweging en kruihoeck. Analyse hiervan leert ons dat kruien met de Eigenfrequentie van de toren de laterale torenbeweging significant zou kunnen beïnvloeden. Voor deze relatief simpele lineaire som (met betrekking tot slechts één van de optredende effecten die kruien teweeg brengt) blijkt er zelfs een dempende werking met de kruihoeck realiseerbaar te zijn.



Figuur 2: Laterale torenbeweging gedempt middels kruien

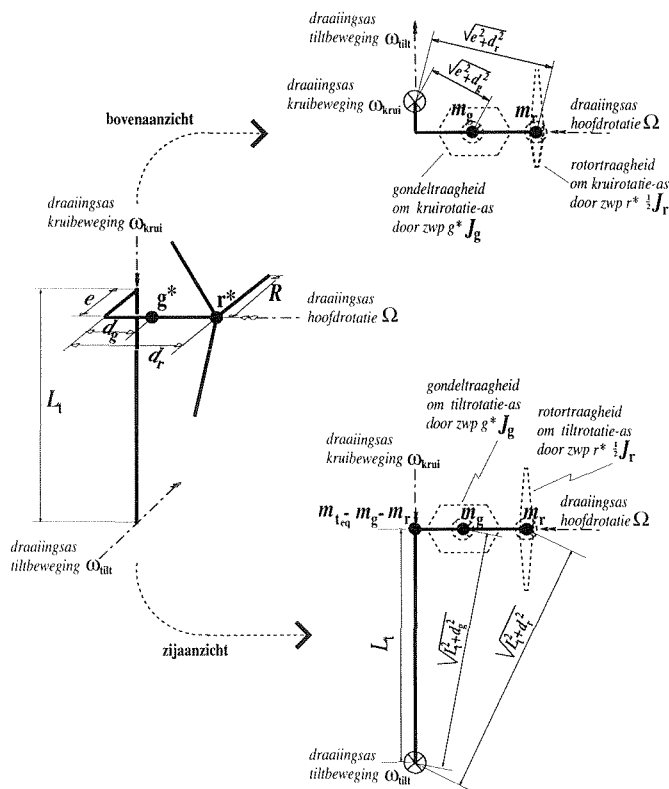


Figuur 3: Ongedempte laterale torenbeweging

4 DEMPING AXIALE TORENBUIGING

Voor turbines met 3 bladen en een vaste hub hebben we de mogelijkheid geïnventariseerd om axiale torenbuiging actief te dempen met een kruiregeling. In de klassieke mechanica is bekend dat als een impulsmoment van grootte of richting verandert dat dat gepaard gaat met een koppel. Bij een windturbine leidt een kruibeweging tot een tiltkoppel [1]. In 2000 is door Corten en van Engelen voorgesteld om het tiltkoppel dat via de kruibeweging kan worden aangestuurd, te benutten om voor/achter torentrillingen te dempen, zie Appendix A. Dit idee is in deze studie kwantitatief onderzocht. Ook bij turbines met vaste hub zal dit koppel ertoe leiden dat de toren meer of minder overhelt. Hierdoor bestaat de mogelijkheid om axiale torenbuiging te dempen door de tiltbeweging terug te koppelen naar het aandrijvend koppel in de krui-inrichting.

Figuur 4 toont vereenvoudigd schematisch een turbine-layout zoals we bij de analyse van dit dempingsconcept zullen gebruiken.



Figuur 4: Schematische layout windturbine ten behoeve van axiale torendemping via krui-inrichting

Het zij- en bovenaanzicht van de turbine-layout geeft de traagheid-bepalende factoren bij de axiale torenbuiging (rechtsonder) en bij de krui-rotatie (rechtsboven). De gebruikte grootheden ondervermelde betekenis, waarbij steeds een karakteristieke waarde vermeld is voor windturbines in de vermogensklasse van 1MW.

m_r	: massa van de turbine-rotor en naaf ($30 \cdot 10^3$ kg)
m_g	: massa van de gondel ($50 \cdot 10^3$ kg)
$m_{t_{eq}}$: torentop-equivalente massa voor eerste buigmode toren; omvat (deel van) eigenlijke torenmassa en verder rotor- en gondelmasa ($100 \cdot 10^3$ kg)
d_g	: coördinaat langs hoofdas van kruicentrum tot gondelzwaartepunt g^* (1.0 m); afstand van gondelzwaartepunt tot krui-as bedraagt $\sqrt{e^2 + d_g^2}$
d_r	: coördinaat langs hoofdas van kruicentrum tot rotorzwaartepunt g^* (3.5 m); afstand van rotorzwaartepunt tot krui-as bedraagt $\sqrt{e^2 + d_r^2}$
J_r	: polair massastraagheidsmoment van turbine-rotor ten opzichte van de hoofdas ($3 \cdot 10^6$ kgm ²); ten opzichte van de as door het zwaartepunt r^* evenwijdig aan de krui-as bedraagt dit $\frac{1}{2}J_r$ voor een 3 bladige rotor; dit laatste geldt ook ten opzichte van de as door het zwaartepunt die evenwijdig is aan de draaiings-as van de tiltrotatie.
J_g	: polaire massastraagheidsmoment van gondel ten opzichte van de as door het zwaartepunt g^* en rotor evenwijdig aan de krui-as ($3.1 \cdot 10^5$ kgm ² ($\leq m_g \cdot (d_r - d_g)^2$))
ω_{0t}	: eigenfrequentie van eerste toren-buigmode (2.5 rad/s)
Ω	: rotatie-snelheid turbinerotor om hoofdas (2.0 rad/s).
L_t	: torenhoogte (60 m)

De dempingseigenschap van de terugkoppeling van tiltbeweging naar kruimotorkoppel T_{krui} volgt uit de 3D-impulsmomentbalans voor de configuratie uit figuur 4.

Figuur 5 geeft voor de gondel en de toren de krachtmomenten ten gevolge van snelheidsveranderingen (traagheidskoppels) die een rol spelen bij de gekoppelde krui- en tiltbeweging.

Voor kleine krui- en tiltverdraaiingen ($\Delta\phi_{krui}$, $\Delta\phi_{tilt}$) spelen alleen eerste orde effecten een rol. De tweede orde effecten hebben de omvang ‘ $1 - \cos \Delta\phi$ ’ ($\sim \frac{1}{2}(\Delta\phi)^2$) en zijn daarmee veel kleiner dan de eerste orde termen met omvang ‘ $\sin \Delta\phi$ ’ ($\sim \Delta\phi$).

Het werkt inzicht verhogend om de massastraagheidsmoment-termen in de uitdrukkingen voor ‘koppelconsumptie door rotatie-versnelling’ uit figuur 5 onder te brengen in ‘de’ polaire massastraagheidsmomenten J_k en J_t om de krui- en tiltrotatie-as:

$$J_k = \frac{1}{2}J_r + J_g + m_r(e^2 + d_r^2) + m_g(e^2 + d_g^2) \quad (15)$$

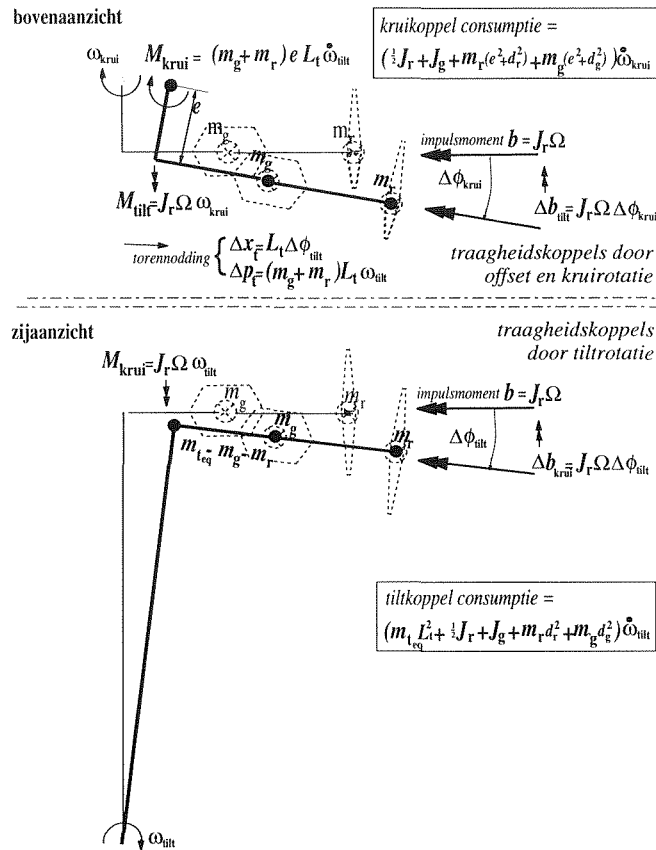
$$J_t = m_{t_{eq}}L_t^2 + \frac{1}{2}J_r + J_g + m_r d_r^2 + m_g d_g^2 \quad (16)$$

Gegeven de traagheidskoppels uit figuur 5 en (i) de rotor-axiaalkracht F_a in de richting van de impulsmomentvector \vec{b} en (ii) het ‘externe kruikoppel’ T_{krui} in de richting van de kruisnelheidsvector $\vec{\omega}_{krui}$ kunnen de volgende gekoppelde bewegingsvergelijkingen voor de tilt- en kruibeweging afgeleid worden:

$$J_k \cdot \frac{d}{dt}\omega_{krui} = J_r \cdot \Omega\omega_{tilt} + (m_r + m_g)e \cdot L_t \frac{d}{dt}\omega_{tilt} + T_{krui} + F_a \cdot e \quad (17)$$

$$J_t \cdot \frac{d}{dt}\omega_{tilt} = -J_r \cdot \Omega\omega_{krui} - k_t \cdot \omega_{tilt} - c_t \cdot \Delta\phi_{tilt} - F_a \cdot L_t \quad (18)$$

Het externe kruikoppel T_{krui} kan via een krui-motor gerealiseerd worden of een gevolg zijn van (passieve) demperwerking.



Figuur 5: Traagheidskoppels bij demping van axiale torenbuiging via kruiseinrichting

Parameters c_t en k_t zijn respectievelijk de ‘torentop-equivalente’ tilt-stijfheid- en tilt-dempingsconstante. Dit betekent dat voor de ‘vrije’ tiltbeweging (niet gekoppeld met kruibeweging) de volgende relatie geldt tussen het ‘tilt’-massatraagheidsmoment J_t , ‘tilt’-stijfheid c_t en radiale Eigenfrequentie ω_{0t} :

$$\omega_{0t} = \sqrt{\frac{c_t}{J_t}} \quad (19)$$

Verder geldt dan de volgende relatie tussen de structurele dempingsgraad β_t^{struct} (relatieve amplitude-afname per oscillatie [eigenlijk $\hat{x}_{na}/\hat{x}_{voor} = e^{-\Delta\beta_t}$]) en de drie torenparameters:

$$\beta_t^{\text{struct}} = \frac{1}{2} \frac{k_t}{\sqrt{J_t \cdot c_t}} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{k_t}{c_t} = \frac{2\beta_t^{\text{struct}}}{\sqrt{c_t/J_t}} = \frac{2\beta_t^{\text{struct}}}{\omega_{0t}} \quad (20)$$

Deze vergelijkingen waren in eerste instantie afgeleid volgens 3D-impulsmomentvergelijkingen, beschouwd langs assenstelsels verbonden aan rotor, gondel en toren. Hierbij zijn de traagheidskoppels bepaald volgens de algemene kinematica, onder verwaarlozing van tweede en hogere orde termen. De uiteindelijk relevante traagheidskoppels zijn in figuur 5 in beeld gebracht in samenhang met de kinematische grootheden, verbonden door de ‘actie = – reactie’ wet:

$$\vec{M}_{krui(\hat{x}_t)} = -e \cdot \frac{d}{dt} \vec{\Delta p}_{tilt} \quad (\Delta p_{tilt} \sim (m_r + m_g) L_1 \omega_{ilt}) \quad (21)$$

$$\vec{M}_{\text{kruil}(\omega_{\text{tilt}})} = -\frac{d}{dt}\Delta\vec{b}_{\text{tilt}} \quad (\Delta b_{\text{tilt}} \sim J_r \cdot \Omega \Delta\phi_{\text{tilt}}) \quad (22)$$

$$\vec{M}_{\text{tilt}(\omega_{\text{kruil}})} = -\frac{d}{dt}\Delta\vec{b}_{\text{kruil}} \quad (\Delta b_{\text{kruil}} \sim J_r \cdot \Omega \Delta\phi_{\text{kruil}}) \quad (23)$$

Proportionele terugkoppeling K [Nm / (rad/s²)] van tiltrotatie-versnelling naar kruikoppel geeft:

$$T_{\text{kruil}} = -F_a \cdot e + K \cdot \frac{d}{dt}\omega_{\text{tilt}} \quad (24)$$

We stellen de offset e gelijk aan 0 en introduceren de vervangende symbolen:

$$\Delta\phi_{\text{tilt}} = \phi_{\text{tilt}} \quad (25)$$

$$\Delta\dot{\phi}_{\text{kruil}} = \dot{\phi}_{\text{kruil}} \quad (26)$$

$$\omega_{\text{tilt}} = \dot{\phi}_{\text{tilt}} \quad (27)$$

$$\omega_{\text{kruil}} = \dot{\phi}_{\text{kruil}} \quad (28)$$

Na integratie van vgl. (17) en vgl. (18) volgen de bewegingsvergelijkingen:

$$J_k \cdot \dot{\phi}_{\text{kruil}} = J_r \cdot \Omega \phi_{\text{tilt}} + K \cdot \dot{\phi}_{\text{tilt}} \quad (29)$$

$$J_t \cdot \ddot{\phi}_{\text{tilt}} = -J_r \cdot \Omega \dot{\phi}_{\text{kruil}} - k_t \cdot \dot{\phi}_{\text{tilt}} - c_t \cdot \phi_{\text{tilt}} - F_a \cdot L_t \quad (30)$$

Substitutie van 29 in 30 geeft een tweede orde vergelijking die teruggebracht kan worden in standaardnormaalvorm, waaruit de invloed van de terugkoppeling op de dempingsgraad kan worden afgeleid.

Met 19 voor de vrij tilt-eigenfrequentie kan de standaardnormaalvorm geschreven worden als:

$$\left(\frac{1}{\omega_0^2} \right) \cdot \ddot{\phi}_{\text{tilt}} + \left(\frac{k_t + \frac{\Omega J_r}{c_t} \cdot (m_r + m_g) e L_t}{1 + \Delta} \right) \cdot \dot{\phi}_{\text{tilt}} + \phi_{\text{tilt}} = \left(\frac{L_t}{1 + \Delta} \right) \cdot F_a \quad (31)$$

Waarin de verwaarloosbare term Δ :

$$\Delta = \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{J_r}{J_k} \cdot \frac{J_r}{J_t} \quad (32)$$

Bij afschatting van Δ geldt namelijk voor het product van de eerste twee factoren:

$$\frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{J_r}{J_k} \leq 4 \quad (33)$$

Gelijkheid treedt hierin op in het geval dat $J_k = \frac{1}{2}J_r$ en dat het toerental Ω 40% boven de toreneigenfrequentie ω_0 ligt. Verder geldt voor de derde factor:

$$\frac{J_r}{J_t} < \frac{J_r}{m_{\text{teq}} L_t^2} \quad (34)$$

Deze is kleiner dan 1/100 in het geval van voornoemde karakteristieke waarden.

Bij gekoppelde tilt- en kruibeweging is de factor voor $\dot{\phi}_{\text{tilt}}$ in (31) maatgevend voor de totale dempingsgraad β_t . Toepassing van 19 en van dempingsrelatie (20) levert voor $\Delta = 0$:

$$\frac{2\beta_t^{\text{struct}}}{\omega_{0t}} + \frac{\Omega J_r}{\omega_{0t}^2 J_k} \cdot \frac{K}{J_t} \triangleq \frac{2\beta_t}{\omega_{0t}} \quad (35)$$

De dempingsverhoging β_t^{control} door actief kruien is dan:

$$\beta_t^{\text{control}} \sim \frac{1}{2} \cdot \frac{\Omega}{\omega_{0t}} \cdot \frac{J_r}{J_k} \cdot \frac{K}{m_{\text{teq}} L_t^2} \stackrel{(1\text{MW})}{\sim} \frac{1}{2} \cdot 0.8 \cdot 1.3 \cdot \frac{K}{360 \cdot 10^6} = 1.44 \cdot 10^{-9} \cdot K \quad (36)$$

Voor $K = 7 \cdot 10^6 \text{ Nm}/(\text{rad}/\text{s}^2)$ bedraagt de toevoeging aan de dempingsgraad 1%. Dit heeft de hieronder beschreven consequenties op het turbine-gedrag.

De kruibeweging bij harmonische tiltbeweging in de toreneigenfrequentie,

$$\phi_{\text{tilt}} = \hat{x}_t / L_t \cdot \sin \omega_{0t} t \quad (\hat{x}_t: \text{amplitude axiale trilling torentop}) \quad (37)$$

wordt beschreven door:

$$\dot{\phi}_{\text{kruil}} = 1/J_k \cdot (J_r \cdot \Omega \cdot \hat{x}_t / L_t \cdot \sin \omega_{0t} t + K \cdot \omega_{0t} \cdot \hat{x}_t / L_t \cdot \cos \omega_{0t} t) \quad (38)$$

Voor voornoemde parameterwaarden (met $\omega_{0t} = 2.5 \text{ rad/s}$) geldt dat de ‘regeling-term’ $K \omega_{0t} \hat{x}_t / L_t \cos \omega_{0t} t$ ca. 6 keer groter is dan de ‘gyroscop-term’. Dit impliceert:

$$\dot{\phi}_{\text{kruil}} \sim 0.12 \cdot \hat{x}_t \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \cos \omega_{0t} t \text{ [}^\circ/\text{s]} \quad (39)$$

Dit betekent dat een amplitude van 14 cm in de torentop-oscillatie, overeenkomend met *een versnellingsamplitude van 0.1g*, leidt tot een amplitude van $\sim 1.0^\circ/\text{s}$ in de kruibeweging waardoor de axiale torendemping verdrievoudigd wordt.

5 NABESCHOUWING

Via verschillende wegen hebben we verschillende potentiële mogelijkheden geïdentificeerd om turbinebelastingen te reduceren middels een kruiregeling. Voor turbines met 3 bladen en een vaste hub (bij verre het meest gangbaar) hebben we aan de literatuur 2 hypothesen voor structurele demping middels een kruiregeling toegevoegd:

- Axiale torendemping via het tiltkoppel
- Laterale torendemping via axiaalkrachtverdraaiing

In de literatuur was reeds bekend dat er een koppeling is tussen *i)* kruien en tilten en *ii)* kruien en laterale torenbuiging. Daaruit bleek echter niet meer, dan dat dit bruikbaar zou zijn voor structurele demping in geval van 2-bladige turbines met een ‘teetered hub’. Opmerkelijk hierbij is dat de koppeling met de laterale torenbeweging in de literatuur heeft geleid tot 2 dempende regelingen met een tegengesteld fase-gedrag en dat verdraaiing van de axiaalkracht niet in acht is genomen. Het nut van een dempende kruiregeling in geval van 3 bladen of het ontbreken van een ‘teetered hub’ is niet eerder aangeroerd.

Aan dit onderzoek hebben we 3 verschillende wijzen overgehouden, waarop laterale torenbuiging wellicht middels een kruiregeling kan worden gedempt. Daarnaast is er nog een overdracht van kruisehoek naar axiale torenbuiging (bij dezelfde (toreneigen)frequentie!) geïdentificeerd en zullen er koppelingen met bladklap en bladzwaai zijn. Het lijkt ondoenlijk om via analytische weg en niet-integrale beschouwing van de verschillende overdrachten van kruisehoek naar de structurele bewegingen te achterhalen welke structurele beweging middels een kruiregeling kan worden gedempt (zonder via een andere overdracht juist schade aan te richten).

We stellen voor dit onderzoek voort te zetten door de kruisehoek in een representatief turbinemodel in Phatas [4] of Turbu [6] aan te stoten met een pseudo random binary sequence (prbs) en de potentieel te beïnvloeden bewegingen, met name toren- en bladbuiging, te registreren. Met een geschikt gekozen prbs kunnen dan de ‘regeltechnische systeemoverdrachten’ van kruisehoek naar structurele bewegingen worden afgeleid. Als er na deze voortgezette inventarisatie potentie blijkt te zijn om een structurele beweging te dempen, zou er invulling kunnen worden gegeven aan een kruiregeling. Of we daar dan ook toe over zullen gaan is afhankelijk van de industriële behoefte en de eventuele alternatieven voor een dergelijke regeling.

REFERENTIES

- [1] T. Ekelund. Yaw control for active damping of structural dynamics. 1996 European Union Wind Energy Conference.
- [2] T. Ekelund. *Modeling and Linear Quadratic Optimal Control of Wind Turbines (PhD Thesis)*. Number ISBN 91-7197-458-x. Chalmers University of Technology, S-412 96 Goteborg, Sweden, 1997.
- [3] T. Ekelund. Yaw control for reduction of structural dynamic loads in wind turbines. In *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 85, pages 241–262, 2000.
- [4] C. Lindenburg and J.G. Schepers. Phatas-iv aeroelastic modelling: Program for horizontal axis wind turbine analysis and simulation, version iv. Technical Report (Draft), Energy research Centre of the Netherlands, Petten, The Netherlands, 2001.
- [5] E. Ulén. Wind tunnel test of a 5.35 m yaw controlled turbine. Technical Report FFA TN 1993-20, The Aeronautical Research Institute of Sweden, Sweden, 1993.
- [6] T.G. van Engelen, L.D. Hofland, and J.H. Vugts. Turbu offshore - programma voor frequentiedomein analyse van horizontale as offshore windturbines - fase i: modelbeschrijving. Technical Report ECN-C-02-073, Energy research Centre of the Netherlands, Petten, The Netherlands, 2002.

A INDIENING IDEE KRUIDEMPER

Petten, 5 oktober 2000

Notitie aan : Jos Beurskens

Van : Gustave Corten, Tim van Engelen

Betreft : Indiening Idee Kruidemper (*zie – N:de/corten/idee*)

Voor het opstellen van deze tekst van maximaal één A4-tje wordt 8 uur op nummer 7.4095.01.01 ter beschikking gesteld. Binnen 3 weken na dato ontvangen de auteurs een lijst met vragen over de idee.

Probleemstelling

Sommige turbines (bijvoorbeeld de NedWind 62 op de maasvlakte) vertonen ernstige voor/achter-waartse torentrillingen. De trillingen verkorten de levensduur van de turbine.

Idee (oplossing)

Door het impulsmoment van de draaiende rotor middels krui-bewegingen van richting te veranderen ontstaat een reactie-koppel dat de voor/achter-waartse torentrilling dempt. Dit kan door een aangepaste krui-regeling actief gerealiseerd worden. Ook kan, bij een nieuw ontwerp, de hoofd-as náást de toren-as geplaatst worden, zodat torentrillingen geheel passief dempende kruibewegingen opwekken. Bij de passieve variant geeft bovendien direct een dempend tegenkoppel aan excitaties door windvlagen.

Beide mogelijkheden zijn gekwantificeerd, waaruit gebleken is dat voor de NedWind 62 de demping 3 keer zo hoog wordt als de constructieve demping door de as 1m naast de toren-as te plaatsen. De krui-snelheid die vereist is om te dempen bij actief te kruien is makkelijk mogelijk met het aanwezige mechanisme.

Onderstaande relatie 1 geeft aan dat een hoeksnelheid voor de tiltrichting ω_{tilt} reageert met een kruimoment. Relatie 2 geeft aan dat omgekeerd een moment in tiltrichting kan worden opgewekt door met een bepaalde hoeksnelheid te kruien ω_{krui} . Dit verband kan gebruikt worden om de voor achter trilling te dempen.

$$M_{krui} = I_{rotor} \Omega_{rotor} \omega_{tilt} \quad (1)$$

$$M_{tilt} = I_{rotor} \Omega_{rotor} \omega_{krui} \quad (2)$$

De opname van de trillingsenergie gebeurt door de krui-motor in het geval van de actieve variant en middels wrijving in het kruilager voor de passieve variant.

Voordelen (tov. alternatieven)

1. Voor de actieve variant geldt het voordeel dat alleen de aansturing van de krui-inrichting veranderd hoeft te worden om de torentrilling te dempen, er is dus géén extra hardware nodig.
2. De demping voor een Megawatt klasse turbine kan drie keer toenemen tov. de constructieve demping door de hoofd-as anderhalve meter zijwaarts te verplaatsen. Excitatie door vlagen worden direct tegengewerkt.

Nadelen

1. De krui-inrichting van de passieve variant dient mee te geven aan trillingen en excitaties. Het excentrisch plaatsen van de hoofd-as geeft een gemiddeld kruikoppel (zie ook de opmerking).
2. De krui-inrichting wordt meer gebruikt.

Opmerkingen

1. Bij de Lagerwey 18/80 staat de hoofdas ook naast de toren-as. De reden is om te compenseren voor de bijdrage van de rotor aan het kruikoppel. De tilhoek zorgt ervoor dat een klein deel van het rotorkoppel in krui-richting werkt. Om dit te compenseren wordt de hoofdas iets naast de krui-as geplaatst. Dit is echter precies in de richting tegenovergesteld aan die om extra demping toe te voegen.
2. Een inzicht dat door dit idee is ontstaan is dat de voor achterbeweging van de toren een tilhoekverdraaiing geeft die doorwerkt als een kruimoment. Dit kruimoment kan dimensionerend zijn.



	Date: december 2003	Report No.: ECN-C-03-140	
Title	Belastingreducerende kruiregelingen		
Author	T.G. van Engelen, P. Schaak		
Principal(s)	NOVEM		
ECN project number	7.4153		
Principal's order number	2020-01-12-10-003		
Programmes			
<p>Abstract</p> <p>We hebben verschillende potentiële mogelijkheden geïdentificeerd om structurele turbinebelastingen te dempen middels een kruiregeling. Voor turbines met 3 bladen en een vaste naaf hebben we aan de literatuur 2 hypothesen voor structurele demping middels een kruiregeling toegevoegd. De eerste optie bestaat uit het oscillerend kruien van de turbine waardoor het grote impulsmoment van de draaiende rotor van richting verandert. Volgens de klassieke mechanica gaat een verandering van een impulsmoment gepaard met een koppel. In het geval van een kruierende windturbine betekent dit dat er een tiltkoppel ontstaat dat evenredig is met de kruisnelheid. Dit tiltkoppel is derhalve via de kruiregeling controleerbaar en kan gebruikt worden om energie uit een voor-achter torentrilling op te nemen. Deze optie is in 2000 bedacht en in deze studie nader onderzocht. De tweede optie is gebaseerd op de directe sturing van de aerodynamische axiaalkracht met de kruihoeck. De axiaalkracht van een windturbine is niet parallel aan de wind maar heeft de richting van de turbine-as. Door oscillerend te kruien draait daarom ook de axiaalkracht oscillerend. De axiaalkracht heeft dan een oscillerende zijwaartse component, die gebruikt kan worden om zijwaartse torenbewegingen te dempen. Deze optie hebben we aan de stand der techniek toegevoegd. In de literatuur was reeds bekend dat er een koppeling is tussen <i>i</i>) kruien en tilten en <i>ii</i>) kruien en laterale torenbuiging. Daaruit bleek echter niet meer, dan dat dit bruikbaar zou zijn voor structurele demping in geval van 2-bladige turbines met een 'teetered hub'. Uit het hier beschreven onderzoek komen 3 verschillende concepten naar voren, waarop laterale torenbuiging wellicht middels een kruiregeling kan worden gedempt. Daarnaast is er nog een overdracht van kruihoeck naar axiale torenbuiging geïdentificeerd en zullen er koppelingen met bladklap en bladzwaai zijn. We stellen voor de systeemoverdrachten van kruihoeck naar structurele bewegingen met een representatief turbinemodel te identificeren, om de potentie van dempende kruiregelingen in beeld te brengen. Afhankelijk van deze potentie, de industriële behoefte en de eventuele alternatieven voor een dergelijke regeling kan hier dan invulling aan worden gegeven.</p>			
<p>Keywords belastingreductie, kruien, kruiregeling, torenbuiging, windturbine, resonanties</p>			
Authorisation	Name	Signature	Date
Checked	E.L. van der Hooft		8/9/2004
Approved	H.B. Hendriks		8/9/04
Authorised	H.J.M. Beurskens		8/9/2004