

WIND BOUW WERK 1

Werktekeningen voor
beproefde windmolens
voor
electriciteits-opwekking.
Rotordiameter van 3 en 5 meter.

FONS DE BEER

Een ODE uitgave
Organisatie voor Duurzame Energie

VOORWOORD

Het bouwen van een windmolen is geen eenvoudige zaak. In dit boekje kunnen zelfbouwers mogelijk een aantal oplossingen vinden voor de lastige problemen welke het 'windgebeuren' met zich meebrengt. Hiertoe worden vele onderwerpen vanuit praktisch oogpunt bekeken. Zelf weet ik, na acht jaar experimenteren, dat meerdere facetten onbesproken zijn gebleven.

Een aantal zaken zijn echter bewust vermeden omdat ze het totaalbeeld niet verhelderen.

Tijdens de langdurige experimenten kwamen talrijke vragen aan de orde, waarvoor telkens een redelijke oplossing werd gevonden. In dit verband wil ik mijn dank laten blijken voor de hulp die ik hierbij heb ondervonden. Dit geldt in het bijzonder voor Tineke Griffioen, Wim 't Hart en Albert Pel die, in 'twijfelgevallen', de juiste adviezen konden bedenken.

Waar het in deze handleiding speciiaal over gaat is de konstruktie van een tweetal rotor-ontwerpen, waarvan de één vijf jaar, de ander twee jaar kontinu in bedrijf zijn, nadat honderden malen de molenmast werd beklommen om ontwerpfouten te elimineren.

Die fouten hoeft u niet meer te maken.

Veel sukses.

Bussum
januari 1982
Fons de Beer

INHOUD

blz.

5 Inleiding

ONTWERP OVERWEGINGEN

6 Beveiliging toerental windmolens

7 Werkings-principe bladverstelling systeem A en systeem B

9 Waarom twee bladen?

10 Oriëntatie op de wind

11 Windservo

11 Werking windservo

DRIE-METER-MOLEN

13 Gegevens 3 meter molen

15 Bouwtekeningen 3 meter molen

16 Rotor-opbouw (zijaanzicht) Tek. 1

18 Rotor-opbouw (vooraanzicht) " 2

20 Grondplaat " 3

22 Diverse onderdelen " 4

24 Regelmechanisme " 5

26 Centrifugaal gewichten " 6

28 Konstruktie rotorbladen " 7 en 7a

32 Inklemming rotorbladen " 8

34 Aanhechting rotorbladen (totaal) " 9

36 Afregelen 'systeem A' " 10

38 Afregelen 'systeem B' " 11

40 Konstruktie windservo " 12

44 Molenmast " 13

46 Kruilager " 13

46 Plaatsen van de molen

48 Beproeving-standaard

48 Rotoras, overbrenging, generator

49 Elastische koppeling

49 Overbrenging

49 Generator

50 Balanceren

51 Flutter van het rotorblad

51 Waarom geen bladtorsie?

51 Houtveredeling

53 Windlast op de molen

53 Inspectie, smering, onderhoud

ALGEMENE WENKEN EN GEGEVENS

54 TV storing

54 Buisconstructies kunnen stukvriezen

54 Optische hinder

54 Vogels en windmolens

54 Scharnieren

54 Tandwielkasten

54 Meting toerental rotoras

55 Auto-wisselstroom generator

56 Overloop accu naar ekstra belasting

58 Meten van accuspanning

58 12 of 24 volt

58 Molenrem

58 Afschermkap regelmechanisme

58 Molens op huis of boot

59 Verkeerde draairichting molen

59 Windsnelheidsmeter

60 Veer 5g van het regelmechanisme

60 Windsnelheid en opgewekte energie

61 Blikseminslag

(vervolg inhoud)

blz.

VIJF-METER-MOLEN

62	Inleiding	
62	Gegevens prototype vijf-meter-molen	
63	Tekeningen vijf-meter-molen	
63	Grondplaat	Tek. 1
64	Regelmechanisme	" 2
65	Diverse onderdelen	" 3
66	Centrifugaal gewichten	" 4
67	Rotorbladen	" 5
68	"	" 6
69	"	" 6a
70	"	" 6b
71	Bladinklemming	" 7
72	Foto's, algemene aanwijzingen	
76	Afregeling	
76	Rotorbladen	
76	Elastische koppeling	
76	Aanpassing vijf-meter-molen aan gemiddeld heersende windsterkte	
79	Belasting aan vijf-meter-molen	
79	28 volts generator	
80	Rem	
80	Molenopbrengst	
81	Trouble shooting	

AANHANGSELS

82	Aanhangsel 1 Werkings-principe windrotor
84	Aanhangsel 2 Overzicht mastkonstruktie vijf-meter-molen

FOTO'S

DRIE-METER-MOLEN

13	Foto 1 Zijaanzicht molen
15	" 2 Overzicht regelmechanisme bladverstelling (werkstand)
18	" 3 Vooraanzicht molen
34	" 4 Regelmechanisme bladverstelling (aanloopstand)
40	" 5 Overzicht windservo
48	" 6 Lagering rotoras-achteraanzicht bladverstelling

VIJF-METER-MOLEN

72	Foto 7 Vooraanzicht totaal (mast en molen)
72	" 8 Zijaanzicht totaal
73	" 9 Bovengedeelte mast met kruilager
73	" 10 Kopkonstruktie molen (rotorlager-transmissie-generator)
74	" 11 Overzicht rotorkop-bladverstelling
75	" 12 Windservo
75	" 13 Onderaanzicht windservo (ketting-kettingwielen)

Briefcitaten uit 'molenbrief' A.J. Geuze

INLEIDING

Deze handleiding is bedoeld voor zelfbouwers die willen beschikken over een duurzame krachtbron voor het opwekken van elektriciteit.

De tekst is geschreven rond twee molenontwerpen, 3 meter en 5 meter diameter, welke zijn getest onder extreme omstandigheden.

Beide ontwerpen zijn voorzien van verstelbare rotorbladen. Het grootste deel van de handleiding is ingeruimd voor de bespreking van de 3 meter molen waarbij de werking van het bladverstel-mechanisme alsmede de aanpassing van molen aan belasting, en de mastconstructie uitgebreid aan de orde komen. De beschrijving van de 5 meter molen is minder diepgaand omdat tal van gegevens uit het 3 meter ontwerp ook van toepassing zijn op het 5 meter ontwerp. Verder is een groot aantal tips verwerkt die tijdens, maar ook na de bouw van de molen, van veel betekenis kunnen zijn.

Voordat met de werkelijke bouwbeschrijving wordt begonnen, zullen eerst enkele, met de praktijk verwante problemen worden aangepakt.

Sla dit niet over. We zullen namelijk zien hoe de oplossingen van deze problemen zijn toegepast op beide ontwerpen. Dit geeft de bouwer de gelegenheid te achterhalen hoe en waarom tot het besproken recept is gekomen.

Het gebruik van formules is vermeden wat niet wegneemt dat enig begrip wordt verlangd inzake het ingewikkelde en vooral, indrukwekkende krachterspel tussen wind en molen.

Veel lezers zullen met de grondbeginselen van de windmolen bekend zijn zodat direkt kan worden begonnen met een aantal beveiligings-aspekten en ontwerpoverwegingen. Voor wie twijfelt aan de basiskennis is achter in het boek het hoofdstuk 'Werkingsprincipe windrotor' opgenomen.

ONTWERPOVERWEGINGEN

Beveiliging toerental windmolens

Moleninstallaties moeten een zeer gevarieerd windaanbod verwerken. Veel (zelfbouw)molens bezwijken bij sterke wind doordat het toerental te hoog kan oplopen waarbij de optredende krachten (centrifugaal, giroscopisch) zeer ver boven de nominale waarden kunnen stijgen. Het is daarom van belang de konstruktie zo te kiezen dat boven een vastgestelde waarde het toerental niet verder toeneemt. We spreken dan van beveiligen. Dit beveiligen kan op verschillende manieren plaatsvinden. De meest effectieve methode is om de drijvende kracht in het wiestelsel onder controle te houden. Een voorbeeld hiervan is de Hollandse molen waarvan, bij te sterke wind, zeil wordt weggenomen waardoor de molen minder effectief op de wind reageert. Bij de nieuwe en betere vormgeving van de wieken (bladen) gaat de Hollandse molentruc niet meer op. Het blijkt echter dat door het veranderen van de stand van de bladen, het toerental van de molen nauwgezet kan worden gecontroleerd. Alvorens de achtergronden van deze regelmethode te omschrijven zal in het kort worden nagegaan welke ingrepen zoal worden toegepast om de gewenste toerentalbegrenzing te realiseren.

- 1 Bij te hoog toerental molen op de rem.
- 2 Belasting op de molen steeds groter laten worden.
- 3 Molen uit de wind draaien.
- 4 Gebruik van remkleppen bij dreigend te hoog toerental.
- 5 Verstellen van de rotorbladen.

Omdat niet iedereen bekend is met de voor- en nadelen van de verschillende beveiligings-systemen zal hierop wat nader worden ingegaan.

ad 1 Omdat de windsterkte in korte tijd sterk kan variëren is deze methode niet aantrekkelijk; of de molen moet elk ogenblik worden stilgezet, of, wanneer minder alert wordt gereageerd, de molen draait regelmatig op een gevaarlijk hoog toerental. Erg onpraktisch dus.

ad 2 Het toerental van veel, vaak netgekoppelde, molens wordt vastgelegd door een onevenredige zware belasting van de generator bij toenemende wind.

Deze werkwijze mag echter niet worden beschouwd als een toeren-beveiliging omdat bij het uitvallen van de belasting het toerental toch weer ongecontroleerd hoog kan oplopen. Molens welke op deze manier opereren moeten altijd worden voorzien van nog een andere soort beveiliging.

ad 3 Het (gedeeltelijk) uit de wind draaien van een molen ter voorkoming van te hoog toerental lijkt voor de hand te liggen doch zal doorgaans niet zonder problemen kunnen plaatsvinden. Dit mag blijken uit het volgende: Veronderstel dat een be-

paalde molen draait op het maximum toelaatbare toerental van 500 omw/min bij een windsnelheid van 8 m/s. Vervolgens laten we de windsnelheid toenemen tot 16 m/s en zien dat de rotor minstens 50 graden uit de wind moet worden gedraaid om bij deze wind het toerental te beperken tot 500 omw/min. Bij een verdere toename van de windsnelheid tot 24 m/s moet de rotor 65 graden uit de wind worden gedraaid voor weer het maximum toelaatbare toerental van 500 omw/min wordt verkregen.

Bij sterk fluktuerende wind zal voortdurend een snelle kruibeweging moeten plaatsvinden om het gestelde doel te bereiken.

In de meeste gevallen zal blijken dat de molenmassa verhindert dat de juiste positie op tijd is ingenomen zodat de rotor regelmatig in een te hoog toerentalgebied komt. Deze situatie wordt nog erger wanneer van de toenemende wind(vlaag) ook de windrichting verandert in dezelfde richting waarin de molen uit de wind wordt gezet. Hierbij moeten zowel de kruihoeck als de kruisnelheid toenemen.

Dit kan niet zonder gevolgen blijven voor de molen al moet worden gezegd dat sommige overgedimensioneerde konstrukties, waarbij het nominaal toerental veel lager ligt dan het maximum toerental, behoorlijk wat kunnen verdragen. Voor tweebledige rotoren echter is dit systeem beslist af te raden. De in het voorbeeld aangehaalde toerentalen en kruihoecken zijn resultaten van metingen in een windtunnel met **onbelaste** rotor.

ad 4 Een veel toegepaste methode voor het regelen van het toerental is het gebruik van remkleppen. Hierbij wordt, boven een bepaald toerental, een ekstra luchtweerstand opgeroepen waarmee het toerental wordt beheerst. Remkleppen kunnen zodoende een effectieve beveiliging vormen. Er kunnen zich echter situaties voordoen waarbij de remwerking ongewild wordt verminderd of zelfs geheel is uitgeschakeld. Zo'n situatie is bij voorbeeld wanneer de remkleppen zijn vastgezet door een laag ijzel of stevig zijn vastgevroren. Inherent aan remkleppen is ook een verhoogde geluidshinder welke tijdens de remwerking optreedt. Slimme konstrukties kunnen mogelijk voor beide nadelen een oplossing bieden. Eigen experimenten vonden meestal een einde in weersomstandigheden zoals omschreven.

ad 5 Het verstellen van de rotorbladen wordt veelvuldig toegepast om toerenregeling te realiseren. De bewegingsenergie van de molen wordt opgewekt in de bladen van de rotor. Het ligt voor de hand dat diezelfde bladen bij uitstek geschikt zijn om de opgewekte energie (toerental) in toom te houden door bladhoekverstelling van de rotorbladen.

Konstruktief gezien is dit echter niet de eenvoudigste oplossing en dat zal wel de reden zijn dat niet veel méér (zelfbouw)molens met bladverstelling zijn uitgerust. Omdat met bladverstelling naast toerenregeling ook gunstige aanloopfaciliteiten kunnen

worden verkregen was het voor mij de moeite waard om ook hiermee een aantal experimenten uit te voeren. Het experiment dat het beste resultaat gaf en bovendien niet al te moeilijk is te bouwen, is verwerkt in de, in dit boekje beschreven, zelfbouw-ontwerpen.

In het algemeen kan worden gesteld dat een toerenbeveiliging van een molen moet zijn gebaseerd op een, uit de wind of toerental afgeleide grootte die, zo direct mogelijk, op het aerodynamisch rendement kan ingrijpen wanneer de vastgestelde normen worden overschreden.

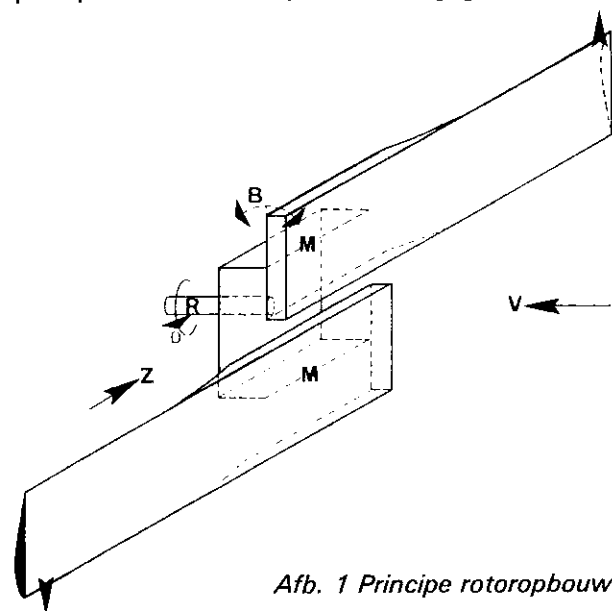
In de praktijk blijkt dat molens vaak zijn uitgerust met combinaties van de genoemde beveiligingsmethoden.

Windmolens moeten altijd zijn voorzien van een goedwerkende rem.

WERKINGSPRINCIPE BLADVERSTELLING

Systeem A en systeem B

Omdat straks door de lezer zélf een beslissing kan worden genomen voor wat betreft de keuze van het regelsysteem zal de werking van het bladverstelmechanisme nader worden bekeken. In afb. 1 is het principe van de rotor-opbouw weergegeven.



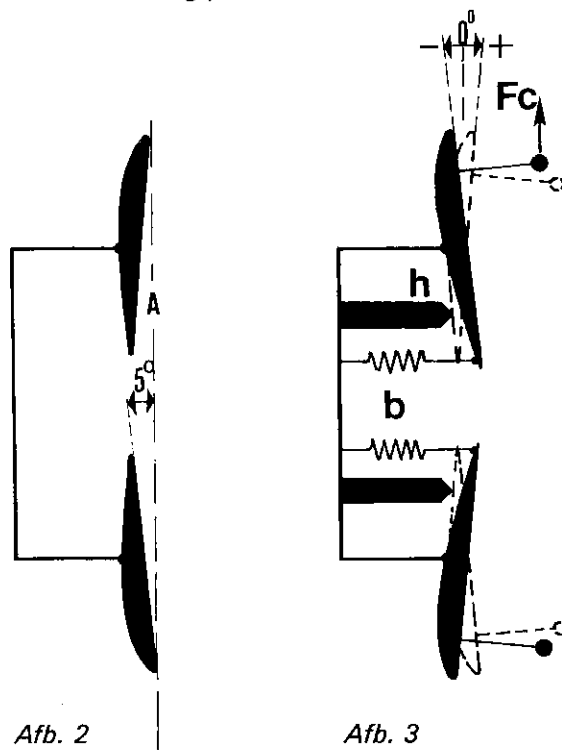
Afb. 1 Principe rotoropbouw

We zien hier beide rotorbladen gemonteerd tegen een U profiel. De bladen zijn **verstelbaar** om streeplijn **M** volgens cirkelboog **B**. Het U profiel is gekoppeld aan rotoras **R** welke draait in pijlrichting **D**.

We zien ook de positie van het bladprofiel t.o.v. de windrichting **V**. De lengte van het blad is omwille van de tekening ingekort.

Omdat in dit ontwerp geen blad-torsie wordt toegepast is de hoek tussen bladprofiel en draaivlak over de gehele lengte van het blad vrijwel even groot. Om tekenwerk te besparen gaan we in het nu volgende verhaal de bladen bekijken vanuit pijlrichting **Z**, zodat we het **U** profiel zien samen met de beide bladprofielen. Zie afb. 2.

Uit deze afbeelding blijkt dat de bladen onder een kleine hoek (5 graden) ten opzichte van het draaivlak **A** staan opgesteld. Voor dit ontwerp blijkt dit een gunstige werkstand te zijn hoewel kleinere hoeken ook nog prima werken.



Afb. 2

Afb. 3

Voor het regelen van het toerental kunnen nu twee methoden worden gevolgd welke elk voor zich, aerodynamisch gesproken, totaal verschillende uitgangspunten hebben.

Beide systemen vragen echter om een kracht welke, afhankelijk van het toerental, in staat moet zijn de bladen te verstellen.

Hiertoe worden, in ons geval, de centrifugaalgewichten **c** geïntroduceerd welke tijdens het draaien van de rotor een kracht **F_c** in pijlrichting leveren.

Systeem A

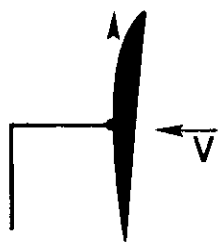
Bekijken we nu eerst systeem A in afb. 3. De bladen worden door veren **b** tegen stuitpunt **h** getrokken waardoor de werkstand is vastgelegd (streeplijn blad). Boven een bepaald toerental wordt de kracht **F_c** sterker dan de veerspanning en trekt het blad met zich mee. De bladhoek t.o.v. het draaivlak wordt dus eerst kleiner, tot aan nul graden, daarna weer groter maar is dan **negatief**.

Deze actie heeft tot gevolg dat de invalshoek van de relatieve wind op het blad zover kan worden vergroot dat de luchtstroom het koorde(blad)-profiel niet meer kan volgen en 'loslaat'. Tijdens dit proces verlaagt de bladlift in sterke mate en daarmee de drijvende kracht in de draairichting. Dit verschijnsel wordt 'overtrek' genoemd.

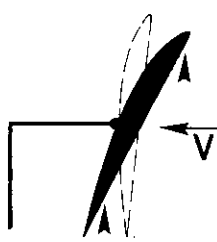
Het toerental zal in deze situatie niet verder kunnen toenemen en wordt derhalve bepaald door **F_c** en de veerdruk welke **F_c** als tegendruk ondervindt. Alvoers andere regelmogelijkheid (systeem B) te omschrijven eerst nog iets anders.

Aanloopstand

Een sneldraaiende molen, zoals ook gebruikt in dit ontwerp, zal door zijn vormgeving niet of moeilijk aanlopen. Dit is een eigenschap van de 'snelloper'. De oorzaak hiervan is dat de bladen tijdens stilstand vrijwel loodrecht op de toestromende wind V staan zodat nagenoeg geen aanloopkoppel in de draairichting aanwezig is (zie afb. 4). Door nu de bladen een aanloopstand te geven kan een groot aanloopkoppel worden verkregen (zie afb. 5). De bladen moeten echter direkt na het aanlopen in de werkstand van afb. 4 worden gebracht.



Afb. 4
Zonder aanloopstand.
Laag aanloopkoppel.



Afb. 5
Met aanloopstand.
Hoog aanloopkoppel.

Het blijkt nu dat systeem A zich goed leent om ook de aanloopprocedure voor zijn rekening te nemen. Dit komt omdat verdraaiing van de bladstand, zowel bij aanlopen als bij het regelen naar de overtrek positie, in éénzelfde richting kan plaatsvinden. Het principe van systeem A komt er tenslotte uit te zien zoals in afb. 6 is getekend.

Ook hier worden de bladen door veren b tegen stuitpunt h getrokken. Nu echter wordt hiermee de **aanloopstand** vastgelegd (25 graden). In deze stand hebben de bladen een hoog aanloopkoppel. Na het aanlopen zorgt F_c dat de veerspanning van b wordt overwonnen waardoor de bladen loskomen van hun stuitpunten h en tegen het tweede stuitpunt a komen te rusten. Dit is de werkstand van de bladen. Wordt de kracht F_c nog groter, dus bij toenemend toerental, dan zal, via stuitpunt a , ook de sterke veer g worden ingedrukt waarbij de bladen zich naar de besproken overtrekpositie kunnen bewegen. Aldus wordt door veer g het maximum toerental van de rotor vastgelegd. Deze manier van regelen noemen we in de verdere beschrijving en tekeningen 'systeem A'.

In bouwtekening 1 kunnen we zien hoe deze regeling in praktijk is gebracht. (Blz. 17)

Systeem B

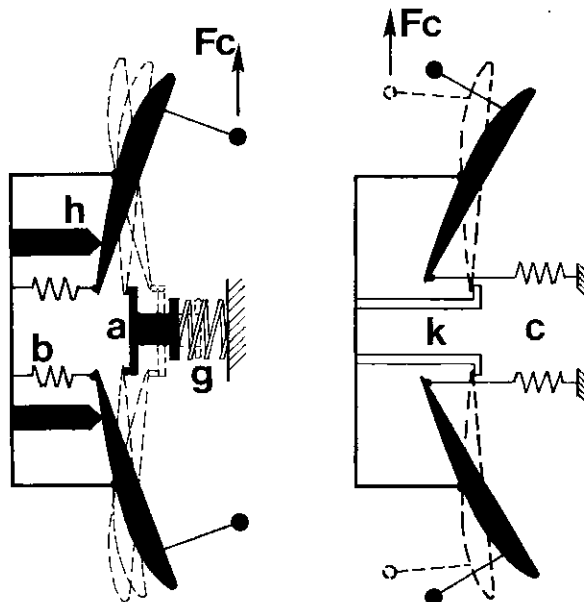
De tweede methode (systeem B) voor regeling van het toerental zien we, nog steeds 'schematisch', voorgesteld in afb. 7. Hierbij worden de bladen in de werkstand gehouden door ze met de veren c tegen de hoekstukjes k te trekken. (streeplijn blad)

Bij toenemend toerental van de rotor zal F_c , welke nu aan de andere zijde van het blad is aangebracht, de veerkracht overwinnen waardoor de bladhoek t.o.v. het draaiingsvlak wordt vergroot. Dit heeft tot gevolg dat het blad in een, min of meer schuine stand, moet ronddraaien waardoor de driftweerstand (een remmende faktor) sterk wordt verhoogd.

Het resultaat is een lagere waarde van de 'snellopendheid' en dus toerentalbegrenzing. Wat we in systeem B missen is de mogelijkheid om op een eenvoudige manier een aanloopstand toe te voegen. Immers, we zullen de bladen eerst heen, dus naar de werkstand, daarna terug moeten regelen. Konstruktief is dit niet aantrekkelijk, althans niet in dit relatief eenvoudige ontwerp.

Je kunt je nu afvragen waarom niet direkt systeem A wordt gekozen; we hebben hier toch alles wat we willen: Gunstige aanloophoek en maximum toeren regeling.

Welnu, beide systemen blijken voor- en nadelen te bezitten en om hier niet al te diep op in te gaan zal worden volstaan met een korte beschouwing van enkele belangrijke kenmerken in beide systemen.



Afb. 6
Systeem A.

Afb. 7
Systeem B.

Voor- en nadelen systeem A en B

Systeem A is veiliger en heeft een hoog startkoppel. Systeem B regelt mooier en heeft een laag startkoppel. Veiliger regelen voor systeem A wil zeggen: Bij (zeer) sterke wind kan het 'overtrek' effect door de wind zélf worden ingeleid waardoor een toerentaldaling plaatsvindt en daardoor ook een vermogensdaling.

Door deze toerentaldaling blijkt, in kritieke situaties (storm), de windbelasting op de gehele moleninstallatie sterk af te nemen door de, laten we zeggen transparante werking in het draaivlak van de bladen (wind kan er makkelijk doorheen). Dit maakt systeem A zeer veilig.

In systeem B vindt het tegengestelde plaats; om de bladen te verstellen wordt specifiek naar het toerental gekeken. Bij toenemende wind moet het toerental steeds iets hoger worden om de gewenste bladverstelling te verkrijgen. Het verval van toerental bij sterke wind, zoals zich dat in systeem A voordoet, blijft in systeem B achterwege waardoor een meer konstante vermogensafgifte is verzekerd. De windlast echter kan in kritieke situaties hoog oplopen waardoor de kans op schade wordt vergroot.

We staan hier dus voor de keuze waarvan in het begin van dit hoofdstuk sprake was.

Welk systeem?

Na lang experimenteren met beide systemen hebben de volgende argumenten mij de doorslag gegeven om voor systeem A te kiezen.

1 De toegepaste bladen lenen zich beter voor systeem A dan voor systeem B (heeft te maken met bladdoorbuiging).

2 De jaaropbrengst van de molen met een aanloopstand (systeem A) is **duidelijk hoger** dan zonder deze voorziening; systeem A levert al lang, systeem B wacht op meer wind om op te starten.

3 Door een herziene veerconstructie in systeem A is de regeling zodanig verbeterd dat vermogensreductie door ongewenste 'overtrek' sterk is verminderd, doch met opzet niet geheel is weggenomen i.v.m. besproken veiligheid.

Omdat het bloed kruipt waar het niet gaan kan is de opzet van het regelmechanisme uiteindelijk zo gekozen dat beide systemen kunnen worden toegepast zodat voor nieuwsgierigen nog een gaatje open blijft om te experimenteren. De regeling is hierdoor universeel te noemen.

Startkoppel

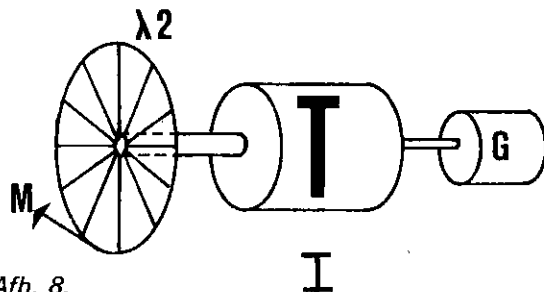
Voor belangstellenden werd opgemeten in welke mate het startkoppel in systeem A wordt verbeterd door het toepassen van een gunstige aanloophoek. Uitgaande van een werkstand van vijf graden zal een aanloophoek van 25 graden een ongeveer zes maal zo hoog startkoppel opleveren t.o.v. het startkoppel bij vijf graden. Dit houdt in dat de molen, afhankelijk van transmissie, generator e.d. tussen 1,5 en 3 meter per seconde windsnelheid kan aanlopen.

Suggestie: Systeem A gebruiken in situaties waarbij een hoog startkoppel wordt vereist. (Is meestal het geval.)

Systeem B gebruiken voor installaties welke zeer licht draaien dus makkelijk kunnen aanlopen op een werkhoek van vijf graden. Ook kan systeem B worden toegepast wanneer de generator tevens als motor kan werken. Bij voldoende wind, gemeten met windmeter, wordt de generator enkele seconden als motor gebruikt om molen op te starten.

Systeem A echter verdient voorkeur i.v.m. veiligheid.

WAAROM TWEE BLADEN ?



Afb. 8.

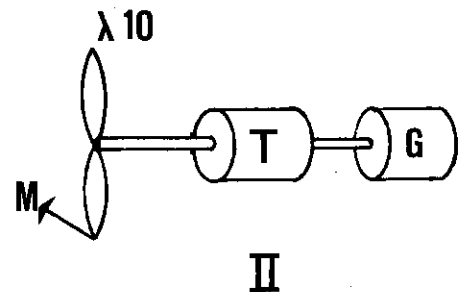
Voor het opwekken van elektriciteit is een generator nodig welke doorgaans op een hoog toerental draait. Om i.v.m. kostprijs en verliezen de versnellende overbrenging zo klein mogelijk te houden is het raadzaam een molen te kiezen welke uit zichzelf al snel draait (snelloper). Zowel molen als overbrenging kunnen hierdoor uit lichtere onderdelen worden samengesteld.

Bovendien heeft de snelloper het voordeel dat deze uit weinig materiaal kan worden opgebouwd en op relatief eenvoudige wijze is te voorzien van een toerentalbeveiliging.

De snellopendheid wordt aangeduid door λ . (Lambda) en geeft aan hoeveel maal de tip van het rotorblad zich sneller beweegt dan de toestromende wind. Hoe minder bladen worden gebruikt, hoe groter de snellopendheid.

Op welke manier de snellopendheid van de molen in de kostprijs van de versnellende overbrenging is betrokken kunnen we het beste met het voorbeeld in afb. 8 demonstreren.

Twee molens: molen I met een snellopendheid van 2 ($\lambda = 2$, veelbladige langzaamloper) en molen II met een snellopendheid van 10 ($\lambda = 10$, tweebladige snelloper). Diameter beide molens even groot. De generator G van molen I heeft **hetzelfde vermogen en toerental** als de generator van molen II.



Het vermogen van molen I wordt opgewekt bij een vijf maal lager toerental dan bij molen II. Het koppel M (kracht op de as) zal daarom bij molen I vijf maal hoger zijn dan bij molen II. Ook de overzet verhouding van de versnellende overbrenging moet bij molen I vijf maal meer zijn dan bij molen II.

Al met al komt het hier op neer dat de versnellingskast (transmissie) in molen I, 3,5 maal zo zwaar zal uitvallen en 2,5 maal meer zal kosten dan die van molen II, (gegevens catalogus) nog afgezien van het vele rotorblad materiaal van molen I en het gewicht hiervan.

Vandaar snellopers voor elektriciteitsopwekking.

Wie nu bedenkt waarom de snellopendheid niet zo hoog wordt gekozen dat de transmissie helemaal achterwege kan blijven, moet beseffen dat de aerodynamische wetten aan grenzen zijn gebonden. Voor tweebladige rotors is een snellopendheid van 10 à 11 wel zo ongeveer het maximum. Hierboven zal, of het rendement snel afnemen, ofwel de profielconstructie wordt zo 'slank' dat niet voldoende mechanische sterkte aanwezig is.

Het gebruik van één blad i.p.v. twee kan hier nog wat verbetering brengen ten gunste van een kleinere overzet verhouding van de transmissie, doch de nadelen van een éénbladige rotor zijn slechts met zeer veel kunst en vliegwerk te omzeilen. Denk alleen maar eens aan de onbalans tijdens ijzel of rijp.