

Opwekking van warmte met een windmolen in het buitengebied

ing. A. Kragten

januari 2021
herzien maart 2021 (hoofdstuk 6 toegevoegd)

KD 709

Het is toegestaan om dit rapport te kopiëren voor privé gebruik.

Ontwerpbureau Kragten Design
Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
Nederland
telefoon: 0413 475770
e-mail: info@kdwindturbines.nl
website: www.kdwindturbines.nl

Bevat	pagina
1 Introductie	3
2 Methoden om met een windmolen warmte op te wekken	5
2.1 Algemeen	5
2.2 Mechanische transmissie en waterrem	5
2.3 Directe omzetting van elektrische energie in warmte	6
2.4 Netgekoppelde molen plus warmtepomp	7
3 Keuze van het ontwerp van de molen	8
4 Bepaling van de opbrengst	9
5 Onderzoek naar een alternatieve PM-generator van Hefei Top Grand	13
6 Gebruik van één windturbine voor vier of acht woonhuizen in een woonwijk	14
7 Referenties	15

1 Introductie

In het begin van 2021 ontving ik een brief van de gemeente Meierijstad waarin werd aangekondigd dat men bezig is om een plan te ontwikkelen waarin wordt aangegeven hoe iedereen in de gemeente vóór 2050 van het aardgas afgesloten gaat worden. Dit plan heet officieel de Transitievisie Warmte. Alle Nederlandse gemeentes moeten voor 2022 op papier zetten hoe zij dit denken te gaan aanpakken. Het kan nog wel tien jaar duren voordat de eerste wijken werkelijk worden afgesloten maar het gaat een keer gebeuren. De reden hiervoor is dat Nederland een aanzienlijke reductie van de CO₂ uitstoot moet realiseren en dat het oppompen van aardgas aardbevingen in Groningen veroorzaakt wat grote schade aan gebouwen geeft.

De gemeente Meierijstad heeft op haar website al een deel ingeruimd waar informatie over dit onderwerp gegeven wordt en waar antwoord gegeven wordt op veel gestelde vragen. Men komt hier via: <https://www.meerijstad.nl/duurzaamheid/vragen-over-de-transitievisie-warmte-43684/>. Op 5 januari 2021 werd er een digitaal vragenuur over dit onderwerp gegeven en de chatsessie hierover is terug te kijken op Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=xBs5NXiMY1w>. Ik heb zelf niet meegedaan aan deze chatsessie omdat ik de brief van de gemeente te laat ontvangen heb. Wel heb ik een e-mail gestuurd met opmerkingen waar de gemeente weer op gereageerd heeft.

De gemeente geeft op haar website drie manieren hoe de transitie zou kunnen plaatsvinden. Men gaat hiervoor eerst naar de hierboven vermelde website en volgt dan het pad: Vragen over de Transitievisie Warmte – Wat kan er in de plaats van aardgas – Welke technieken bestaan er om woningen aardgasvrij te maken. Er worden dan drie technieken gegeven namelijk: warmtenet, elektrische oplossing en groen gas.

Ik woon zelf in het buitengebied van Boskant en heb daarom speciaal belangstelling voor de technieken die voor het buitengebied geschikt zijn. Een warmtenet valt volgens mij bij voorbaat af omdat de huizen in het buitengebied ver uit elkaar staan. Daardoor zijn zeer lange buizen nodig om de huizen met het warmtenet te verbinden met daardoor veel te hoge warmteverliezen. De optie groen gas is alleen toepasbaar als daarvoor het bestaande gasnet gebruikt kan worden maar er zijn nu al zeer veel huizen in het buitengebied die niet op het gasnet aangesloten zijn. De plaatselijke opwekking van biogas is eigenlijk alleen geschikt voor boerderijen waar men dieren houdt en daardoor over veel organisch materiaal beschikt dat vergist kan worden. Daardoor blijft voor de meeste huizen in het buitengebied alleen de elektrische oplossing over.

Er is nog een vierde optie die door de gemeente niet genoemd wordt en dat is het stoken van hout. De mensheid stookt al duizenden jaren hout en de natuur weet al miljoenen jaren hoe de bijproducten van houtverbranding opgenomen moeten worden omdat er altijd bosbranden geweest zijn. Het stoken van hout heeft alleen grote nadelen als de mensen dicht bij elkaar wonen omdat men dan in elkaars rook zit. Voor het buitengebied is er nagenoeg geen hinder als de huizen ver genoeg uit elkaar staan. Daarbij is de ene houtkachel de andere niet. Er bestaan zeker houtkachels met een zeer volledige verbranding waardoor de uitstoot van schadelijke gassen geminimaliseerd is. Het grote voordeel van hout is dat men dit het gehele jaar door kan verzamelen en een voorraad voor de winter kan aanleggen die benut kan worden als er behoefte is. Het nadeel is dat een behoorlijk groot terrein nodig is als men zijn eigen hout wil laten groeien en dat het heel wat jaren duurt voordat de houtopstand voldoende hoog is om geoogst te kunnen worden. Als men over tien jaar op het stoken van hout zou willen overgaan dan moet men nu al bomen of struiken aanplanten.

Er is nog een vijfde optie die door de gemeente ook niet genoemd wordt en dat is het opslaan van zomerse warmte voor de winter. Omdat de warmtebehoefte van een vrijstaand huis in het buitengebied behoorlijk hoog is, zelfs als het huis optimaal geïsoleerd is, is een behoorlijke capaciteit van de warmtebuffer nodig. Deze methode vergt daardoor behoorlijk wat ruimte maar lijkt mij zeker toepasbaar voor huizen in het buitengebied. Het creëren van de juiste warmtebuffer en het onttrekken van de juiste hoeveelheid warmte aan de warmtebuffer vereist een speciale techniek die nog ontwikkeld zal moeten worden.

De elektrische oplossing zal voor de meeste huizen de meest voor de hand liggende keuze zijn. De elektriciteit wordt meestal niet rechtstreeks middels een weerstand omgezet in warmte maar er wordt een warmtepomp gebruik die ongeveer werkt als een omgekeerde koelkast. Een warmtepomp bevat een compressor die elektrisch wordt aangedreven. De compressor haalt warmte uit een toegevoerd medium. Dit kan gewoon de buitenlucht zijn of de afgevoerde warme lucht uit een ventilatiesysteem maar ook water dat rondgepompt wordt door de grond. Als men 's zomers de grond opwarmt dan heeft men al een behoorlijk hoge begintemperatuur van het medium waardoor de warmtepomp een hogere eindtemperatuur heeft. Bij een warmtepomp kan men tot ongeveer vier maal meer warmteenergie winnen dan er elektrisch wordt toegevoegd. Een nadeel is dat de eindtemperatuur maar laag is en dat een warmtepomp daardoor momenteel alleen te gebruiken is in combinatie met vloerverwarming.

De benodigde elektriciteit kan gewoon uit het net komen maar dit is een erg dure oplossing. Men kan de elektriciteit ook zelf opwekken met zonnepanelen of met een windmolen. Het grote nadeel van zonnepanelen is dat de meeste energie in de zomer opgewekt wordt terwijl de warmtebehoefte het grootst in de winter is. Men doet alsof het net hierbij als een buffer gebruikt wordt maar dit is maar schijn. Elke kWh die op een bepaald ogenblik gebruikt wordt moet op dat ogenblik opgewekt worden. De grote toevoer van elektriciteit aan het net door zonnepanelen maakt alleen dat de centrales op fossiele brandstof 's zomers minder hard hoeven te werken. Men spaart dus brandstof uit maar de meeste centrales moeten gewoon stand by staan en het net moet ook gewoon beschikbaar zijn. De waarde van de toegevoerde energie in de zomer is daardoor veel lager dan de waarde van de afgenomen energie in de winter. Er is ook een grote kans dat men 's winters toch nog een paar grote kolencentrales nodig zal hebben om de grote energiebehoefte in de winter te kunnen dekken als iedereen gaat verwarmen met een warmtepomp. De CO2 reductie die dan in de woonhuizen gerealiseerd wordt, wordt dan in de centrale weer gedeeltelijk teniet gedaan.

Door de salderingsregeling die momenteel nog geldt, krijgt iemand net zo veel terug voor de energie die hij 's zomers levert als hij moet betalen voor de energie die hij 's winters afneemt maar dit is een vorm van subsidie. De overheid zal dit vast afschaffen zodra er zeer veel mensen zonnepanelen hebben. Het zal zo ver komen dat je voor een kWh die je 's zomers aan het net levert maar bijvoorbeeld 5 eurocent ontvangt terwijl je voor een kWh die je 's winters afneemt wel 25 eurocent moet gaan betalen. Dit zal erin resulteren dat de terugverdientijd van zonnepanelen zeer veel langer wordt dan hij nu is.

Windmolens leveren meer vermogen naarmate het harder waait en het waait nu eenmaal harder in de winter dan in de zomer. Daardoor loopt de energieopbrengst van windmolens veel meer in de pas met de warmtebehoefte in de winter dan bij zonnepanelen. Als de salderingsregeling afgeschaft wordt, kunnen windmolens daardoor veel gunstiger zijn dan zonnepanelen vooral op plaatsen waar veel wind is. Ik houd mij al meer dan veertig jaar professioneel bezig met het ontwikkelen van kleine windmolens en heb meer dan 700 technische notities geschreven over allerlei onderwerpen die hier mee te maken hebben. Vanaf 1-1-2018 ben ik met pensioen en niet meer commercieel actief maar ik onderhoud nog wel een eigen website: www.kdwindturbines.nl. Op deze website staan onder het menu KD-reports bijna honderd KD-rapporten en handleidingen die vrijgegeven zijn en die door iedereen gratis gekopieerd mogen worden. Bijna alle rapporten zijn Engelstalig maar van het belangrijkste rapport KD 35, is er ook een Nederlandstalige versie (ref. 1). Ik raad aan om te beginnen met de notitie: "Volgorde van KD-rapporten voor zelfstudie" die bovenaan staat in de lijst met KD-reports. Deze notitie geeft in twee pagina's aan wat er bij komt kijken om een windmolen te ontwerpen en over welke onderwerpen ik welke KD-rapporten geschreven heb.

Op mijn website staat ook een filmpje van 14 minuten waarbij ik geïnterviewd wordt bij mijn windmolens. Ik ben ook actief op het Nederlandse Ecologieforum en op het Amerikaanse forum van Otherpower. Omdat ik veel theoretische en praktische ervaring heb met kleine windmolens, vind ik het mijn plicht om bij te dragen aan de energietransitie door dit rapport te schrijven over de toepassing van windmolens om warmte op te wekken. Omdat afsluiting van het gas een Nederlandse aangelegenheid is, is het rapport in het Nederlands.

2 Methoden om met een windmolen warmte op te wekken

2.1 Algemeen

Het opwekken van warmte met een windmolen is niet nieuw. In de jaren 80 heb ik een rondreis gemaakt door Denemarken waar de bakermat ligt van de grote netgekoppelde windmolens. Er werd daar toen een molen met een 6-bladige rotor met een diameter van ongeveer 6 m geproduceerd die bedoeld was voor warmteopwekking. Omdat Denemarken geen gas heeft, werd er veel elektrisch verwarmd en dat was een kostbare aangelegenheid, met name omdat er toen nog geen warmtepompen waren. De molen was geen succes omdat er de nodige technische problemen mee waren en omdat de werkelijke opbrengst veel lager was dan door de fabrikant geclaimd werd. In 2014 ben ik naar de windenergiebeurs in Husum in Duitsland geweest en daar was toen een stand van een Deense fabrikant van een molen bedoeld om warmte op te wekken. Deze molen had een haakse overbrenging in de kop en een verticale as die door het hart van de toren liep. Aan de voet van de toren zat een waterrem die bestond uit een op de verticale as geplaatst schoepenwiel dat in een bak met water liep. Door de wrijving werd het water warm en het warme water werd afgevoerd naar het woonhuis.

Zelf heb ik een molen gebouwd, de VIRYA-4.2, met een 2-bladige houten rotor met een diameter van 4,2 m op een 12 m hoge toren. De molen was bedoeld was om een 48 V accu op te laden. Ik heb er nooit echte accu's aan gehangen maar wel een spanningsregelaar met dump load. De spanning werd door de spanningsregelaar op 52 V gehouden waardoor de belasting voor de windmolen bijna het zelfde was als voor een 48 V accu. De opgewekte energie werd in de dump load in warmte omgezet. De dump load stond in een hoek van mijn huiskamer. Als het hard waaide dan werd het daar lekker warm omdat het maximum vermogen dat opgewekt werd 1100 W was. Maar bij matige wind merkte je er niet veel van. Dit geeft aan dat de rotordiameter in Brabant toch behoorlijk wat groter moet zijn dan 4,2 m als de opgewekte energie direct in warmte wordt omgezet.

2.2 Mechanische transmissie en waterrem

De Deense molen die ik op de beurs in Husum gezien heb was uitgerust met dit systeem. Bij een windmolen neemt het opgewekte mechanische vermogen toe met de derde macht van de windsnelheid. Het toerental bij de optimale snellopendheid λ neemt evenredig toe met de windsnelheid. De snellopendheid λ is de verhouding tussen de tipsnelheid en de ongestoorde windsnelheid. Het mechanisch vermogen van de rotor neemt daardoor toe met de derde macht van het toerental. Een waterrem is, net als een windmolen, ook een stromingsmachine en daardoor neemt het opgenomen mechanische vermogen ook toe met de derde macht van het toerental. Dit betekent dat als de waterrem de juiste geometrie heeft, dat de rotor bij elke windsnelheid bij de snellopendheid draait waarbij het opgewekte vermogen maximaal is. Dit is dus een voordeel van een dergelijk systeem.

Een groot nadeel is echter dat een roterende verticale as door het hart van de toren nodig is en dat deze as voor een hoge toren op veel plaatsen gelagerd moet worden om te voorkomen dat hij bij hoge toerentallen uitbuigt vanwege een verschijnsel dat zwiep genoemd wordt en dat vergelijkbaar is met knik bij een gedrukte staaf. Een ander nadeel van de verticale as is dat deze een reactiekoppel op de kop uitoefent. Als de molen voorzien is van een beveiliging waarbij de rotor bij hoge windsnelheden uit de wind draait, dan heeft dit reactiekoppel een ongunstige invloed op de beveiliging. De opgewekte warmte neemt dus toe met de derde macht van de windsnelheid en de temperatuur in het huis is daarom lastig te regelen. Een ander nadeel is dat de waterrem bij de torenvoet zit en dat er er dus behoorlijk lange leidingen tussen de molen en het woonhuis zijn die goed geïsoleerd moeten zijn. Vanwege al deze nadelen zou ik daarom deze optie niet willen aanbevelen.

2.3 Directe omzetting van elektrische energie in warmte

Mijn eigen VIRYA-4.2 werkte volgens dit principe. De warmte werd gedeeltelijk gedissipeerd in zware transistoren en in een groot aantal 100 W weerstanden die op een aluminium koelplaat zaten. De molen stond ongeveer 40 m vanaf het woonhuis en de stroom liep door een grondkabel van $4 * 2,5 \text{ mm}^2$. De 3-fasen permanent magneet generator van de molen werd gelijkgericht in de torenvoet en de grondkabel werd verdeeld in twee bundels van twee draden waardoor voor de gelijkstroom eigenlijk één draad van 5 mm^2 beschikbaar was. De warmteverliezen in de leidingen zijn bij een laadspanning van 52 V en niet al te hoge stromen dan nog beperkt. Maar als het om grotere vermogens gaat dan is het aan te raden om voor een hogere spanning te kiezen. Alleen kan dan niet meer gebruik gemaakt worden van een generator die gemaakt wordt van een standaard kortsluitanker motor met de standaard wikkeling en waarbij het standaard kortsluitanker vervangen wordt door een permanent magneet (PM) anker. Deze procedure om een PM-generator te maken wordt uitgelegd in hoofdstuk 3 van mijn rapport KD 341 (ref. 2).

In plaats van een spanningsregelaar die de laadspanning constant houdt door net de juiste hoeveelheid energie in de bijbehorende dump load te dissiperen zou men voor de belasting ook kunnen kiezen voor alleen een weerstand. Als de 3-fasen wisselstroom gelijk gericht wordt, dan heeft men maar één weerstand nodig waar dan gelijkstroom (met een kleine rimpel) door loopt. Gelijkrichting van een 3-fasen wisselstroom wordt uitgelegd in mijn rapport KD 340 (ref. 3). De stroom die door de weerstand loopt neemt evenredig toe met de spanning. Het opgewekte vermogen neemt daardoor kwadratisch toe met de spanning. De opgewekte belaste spanning voor een bepaalde weerstand neemt evenredig toe met het rotortoerental. Het gedissipeerde vermogen in de weerstand neemt daardoor kwadratisch toe met het rotortoerental. Het opgewekte vermogen van de windmolenrotor neemt echter tot de derde macht toe met het rotortoerental. Dit houdt in dat er voor één vaste weerstand maar één windsnelheid is waarbij de rotor bij zijn optimale snelopenheid draait. Deze windsnelheid wordt de ontwerpwindnelheid of designwindnelheid V_d genoemd. Voor hogere windsnelheden dan V_d draait de rotor wat te snel en voor lagere windsnelheden dan V_d draait de rotor wat te langzaam.

Voor hele lage windsnelheden is de belasting die door de weerstand veroorzaakt wordt zo sterk dat de rotor afgeknepen wordt zodat hij bijna stil staat. Wanneer de belastingsweerstand permanent aan de generator gekoppeld zou worden dan wil de rotor ook niet vanuit stilstand aanlopen. Er is daarom een spanning gestuurde of toerental gestuurde schakelaar nodig die er voor zorgt dat belastingweerstand onder een bepaald toerental los gekoppeld wordt en dat hij pas boven een ander hoger toerental weer gekoppeld wordt. Metingen aan een PM-generator voor een weerstandsbelasting worden gegeven in hoofdstuk 9 van mijn rapport KD 78 (ref. 4). Het rendement bij een weerstandbelasting is bijna constant over een groot toerenbereik.

Het moet mogelijk zijn om er voor te zorgen dat de matching tussen de rotor en de generator verbeterd wordt en dat de rotor dus altijd bij zijn optimale snelopenheid draait door de waarde van de weerstand te verlagen bij toename van het rotortoerental. Men krijgt dan een spanningsregelaar met dump load die de spanning niet constant houdt maar zodanig laat variëren dat de belasting ook een derdemachtskromme is en de rotor dus de maximale hoeveelheid energie aan de wind onttrekt. Zelfs bij een installatie waarbij dit gerealiseerd is houdt men als nadeel dat er niet meer warmte opgewekt wordt als er door de generator aan elektrische energie geleverd wordt.

Een voordeel van het direct opwekken van warmte in een weerstand is dat men deze warmte kan bufferen in een niet al te grote warmtebuffer waardoor men de energiefluctuaties van de windmolen kan afvlakken en zelfs een aantal windstille dagen kan overbruggen als de buffer groot genoeg is. Een ander voordeel is dat het systeem onafhankelijk van het net functioneert en dat de verwarming dus niet uitvalt als het net uitvalt. Maar we hebben in Nederland voorlopig nog een erg stabiel net en dit voordeel lijkt me dus niet erg belangrijk.

2.4 Netgekoppelde molen plus warmtepomp

Als men met een niet al te grote molen toch een redelijke hoeveelheid warmte wil opwekken dan komt men er niet onderuit om een warmtepomp te gebruiken net zoals dat bij zonnepanelen gedaan wordt. Omdat warmtepompen echter ontwikkeld worden om gebruikt te worden in combinatie met het net, zal de windmolen netgekoppeld moeten zijn.

Er zijn twee manieren om een molen aan het net te koppelen. De oudste en simpelste manier is om voor de generator een asynchrone motor te gebruiken. Een asynchrone motor draait belast bij een wat lager toerental dan het synchrone toerental dat afhangt van het aantal polen en van de netfrequentie. Bij een netfrequentie van 50 Hz hoort een synchroon toerental van 1500 omw/min voor een 4-polige motor. Het belaste toerental als motor hangt af van het koppel maar is ongeveer 1435 omw/min bij het nominaal vermogen. De motor kan ook als generator gebruikt worden maar moet dan juist sneller draaien dan het synchrone toerental. Dit komt voor gebruik als generator neer op ongeveer 1565 omw/min bij het nominale vermogen. Dit houdt in dat bij variatie rond het nominale vermogen het toerental zal variëren tussen ongeveer 1500 en 1600 omw/min wat betekent dat de rotor bijna met een constant toerental draait en dat er daarom maar één windsnelheid V_d is waarbij de snellopendheid van de rotor gelijk is aan de optimale snellopendheid. Bij hogere windsnelheden draait de rotor te langzaam en bij lagere windsnelheden draait de rotor te snel. Er is een windsnelheid waarbij de generator onbelast precies zo snel draait dat de frequentie 50 Hz is. Onder deze windsnelheid wordt de frequentie te laag en gaat de generator dus weer als motor werken. Daarom moet de generator bij te lage windsnelheden van het net ontkoppeld worden en mag hij pas weer gekoppeld worden als het toerental weer hoog genoeg is.

Bij een bepaalde windsnelheid kan dit tot frequent koppelen en ontkoppelen leiden en daarom moet er in het koppelmechanisme een zekere vertraging zitten. Deze manier van netkoppeling wordt tegenwoordig haast niet meer toegepast omdat de rotor alleen bij V_d bij zijn optimale snellopendheid draait. Bij andere windsnelheden draait de rotor te snel of te langzaam en dit leidt tot een verlaging van de vermogenscoëfficiënt C_p . Uitleg over de C_p en de aerodynamische theorie wordt gegeven in de eerste hoofdstukken van mijn rapport KD 35 (ref. 1).

Bij moderne netgekoppelde molens wordt de opgewekte 3-fasen wisselstroom eerst gelijkgericht. Op de gelijkgerichte stroom zit nog een kleine rimpel die afgevlakt kan worden met condensatoren. De opgewekte gelijkspanning neemt toe met het toerental van de rotor. Bij netkoppeling kan één fase van het net gebruikt worden of kunnen drie fasen van het net gebruikt worden. 1-fase netkoppeling is alleen mogelijk voor kleine vermogens. Ik ga er vanuit dat 3-fasen netkoppeling gebruikt wordt. Daarom is een 3-fase inverter nodig. Met deze inverter wordt de gelijkgerichte spanning van de windmolen omgezet in een 3-fasen wisselstroom van de juiste frequentie van 50 Hz, de juiste faseaansluiting en de juiste fasenspanning van iets meer dan 230 V.

Het is onwaarschijnlijk dat hiervoor een inverter gebruikt kan worden die voor zonnepanelen ontwikkeld is. Dit heeft diverse oorzaken. De eerste oorzaak is dat er bij een zonnepaneel maar een beperkt verschil is tussen de spanning waarbij het paneel zijn maximale vermogen afgeeft en de onbelaste open spanning. Een inverter voor een zonnepaneel hoeft dus niet bestand te zijn tegen extreem hoge ingangsspanningen. Bij een windmolen kan de maximale onbelaste open spanning tijdens windstoten wel een factor vier hoger worden dan de nominale spanning (wanneer de molen gebruikt wordt voor acculaden). De tweede oorzaak is dat de spanning van een zonnepaneel maar traag fluctueert. De inverter is over het algemeen uitgerust met "maximum power point tracking". Dit betekent dat hij de spanning continu een beetje laat stijgen of dalen en meet of dit verhoging of verlaging van het vermogen geeft. Op deze manier regelt hij de spanning zodanig dat het maximum vermogen afgenomen wordt. Omdat de spanningsvariëaties bij zonnepanelen traag verlopen werkt dit goed. De spanning bij windmolens kan bij variabele windsnelheden veel sneller fluctueren en dan kan een normale inverter het niet meer bijbenen.

Inverters voor windmolens moesten daarom vroeger speciaal ontwikkeld worden. Waarschijnlijk zijn er momenteel al inverters in de handel die een zon- en een windmodus hebben. Ik betwijfel echter of een zonnepaneel en een windmolen gelijktijdig op dezelfde inverter aangesloten kunnen worden. Maar dit is mijn vakgebied niet en iemand anders zal dit moeten uitzoeken.

Ik heb een paar jaar geleden iemand ontmoet die een tamelijk grote veelbladige windmolen met een diameter van 7 m aan het net gekoppeld had met een inverter die hij in Denemarken gekocht had. De windmolen was voorzien van een grote Chinese axial flux PM-generator zonder ijzer in de spoelen. De generator maakte een behoorlijk hard tikkend geluid als de molen aan het net gekoppeld was. De man dacht dat dit aan de generator lag maar ik betwijfelde dat omdat een generator zonder ijzer in de spoelen van zichzelf geen sterke koppelfluctuaties kan hebben. We hebben toen de inverter vervangen door een weerstandsbelasting en toen was het tikkend geluid verdwenen. Het moet dus veroorzaakt zijn door de inverter omdat die bij de omzetting van de gelijkstroom naar de 3-fasen wisselstroom sterke koppelstoten in de generator veroorzaakte. Bij de keuze van de inverter moet er dus rekening mee gehouden worden dat deze geen sterke koppelstoten in de generator veroorzaakt omdat dit dan leidt tot een hinderlijke geluidsproductie.

3 Keuze van het ontwerp van de molen

Mijn ervaringen met de VIRYA-4.2 geven aan dat een rotordiameter van 4.2 m zeker te klein is als de opgewekte energie direct in warmte omgezet wordt. Als een inverter gebruikt wordt dan krijg je al ongeveer vier maal meer warmte maar ik denk dat dat nog steeds niet genoeg is om te maken dat de molen een substantieel aandeel in de energieopwekking voor een vrijstaand huis in het buitengebied levert. Dit komt ook omdat de gemiddelde windsnelheden in Brabant maar laag zijn en omdat de torenhoogte van mijn molen maar 12 m was. In de loop van de tijd zijn de bomen die er rond mijn terrein staan behoorlijk hoog geworden waardoor de rotor bij sommige windrichtingen behoorlijk wat last van windschaduw van deze bomen had. Het spreekt vanzelf dat het hart van de rotor van de molen zo hoog moet staan dat de rotor in ieder geval vanuit de meest gangbare windrichting vrij aangestroomd wordt. Ik denk daarom dat een torenhoogte van 15 m tot 18 m nodig is. Een dergelijke hoge toren zal een aanzienlijk deel van de kostprijs van de molen uitmaken maar hoe groter de rotordiameter, hoe geringer het aandeel.

Een zeer belangrijk aspect van een windmolen is de veiligheid. Dit betekent dat het toerental van de rotor en de axiale kracht of thrust die op de rotor werkt boven een bepaalde windsnelheid beperkt moeten worden. Alle door mij ontworpen molens zijn voorzien van het zogenaamde "hinged side vane safety system". Algemene informatie over systemen die de rotor uit de wind draait wordt gegeven in mijn rapport KD 485 (ref. 5). Het door mij gebruikte systeem voor een rotor met een normaal aerodynamisch profiel wordt in detail beschreven in rapport KD 213 (ref. 6). Dit systeem is technisch eenvoudig en het heeft een stabiele regelstrategie. De rotor is excentrisch opgesteld rechts t.o.v. de torenas. Het vierkante vaanblad steekt aan de linkerkant uit buiten de rotor en hangt aan twee of drie roestvrij stalen deurscharnieren. Bij lage windsnelheden hangt het vaanblad bijna recht omlaag. Bij zeer hoge windsnelheden staat het vaanblad bijna horizontaal waardoor de aerodynamische kracht die erop werkt veel lager is dan wanneer de vaan bijna omlaag zou staan. De rotor draait hierdoor bij zeer hoge windsnelheden ongeveer 70° uit de wind. Hoe ver de rotor bij middelhoge windsnelheden uit de wind draait hangt af van de verhouding tussen het gewicht van de vaan en het oppervlak. De vaan van de VIRYA-4.2 was gemaakt van 9 mm watervast hechthout en de molen had bij deze vaan een rated windsnelheid van ongeveer 9,5 m/s.

De maximale rotordiameter die voor dit systeem mogelijk is wanneer gebruik gemaakt wordt van een vaanblad dat uit één plaat hechthout gemaakt is, wordt bepaald door de maximale plaatafmetingen die te koop zijn. De grootste platen hebben een afmeting van 1,53 * 3,1 m.

Ik heb eerder al eens een molen ontworpen die gebruik maakt van een vaanblad van $1,53 * 1,55$ m en waarbij er dus precies twee vaanbladen uit een standaard plaat gehaald kunnen worden. Deze molen heeft een rotordiameter van 6,5 m en de molen wordt de VIRYA-6.5 genoemd. De molen wordt beschreven in drie openbare rapporten KD 578 (ref. 7), KD 579 (ref. 8) en KD 624 (ref. 9). Er zijn geen gedetailleerde tekeningen van de molen beschikbaar maar de hoofdmaten worden in de rapporten gegeven. De rotorberekeningen en de generatorkarakteristieken staan in KD 578. De kopgeometrie wordt gegeven in hoofdstuk 5 van KD 579. De molen heeft een toren die bestaat uit drie buizen van 6 m lang die 0,6 m in elkaar geschoven worden. De buisdiameter neemt naar beneden toe. De totale torenhoogte is ongeveer 16,2 m. De torenberekeningen worden gegeven in hoofdstuk 6 van KD 579.

Ik kom met dit eigen ontwerp omdat er in de markt zeer weinig bruikbaar te koop is met ongeveer deze rotordiameter. Er is een Nederlandse fabrikant EAZ, die een netgekoppelde molen levert met een rotordiameter van 13,2 m maar dat is echt veel te groot voor een individueel huishouden. Deze molen is dan ook speciaal ontwikkeld voor gebruik bij boerderijen waar men een behoorlijke elektrische basislast heeft. Maar het lijkt nuttig om te na te gaan of er misschien toch ergens iets bruikbaar te koop is. Men moet wel alert zijn bij Chinese ontwerpen omdat de opbrengst daarvan vaak sterk overdreven wordt en de kwaliteit vaak slecht is. Het verder uitontwikkelen van de VIRYA-6.5 is nog een hele klus waar ikzelf niet veel tijd aan wil besteden. Maar de beschikbare rapporten kunnen wel gebruikt worden om na te gaan wat er van een dergelijke molen verwacht mag worden.

Bij het oorspronkelijke ontwerp zoals dat in KD 578 beschreven wordt, wordt gebruik gemaakt van een 4-polige asynchrone motor die versneld wordt aangedreven door de rotor middels een standaard 2-traps tandwielkast. Dit concept is dus netgekoppeld volgens de klassieke manier. In KD 624 wordt een 46-polige direct drive generator beschreven en met deze generator zou de molen geschikt moeten zijn om rechtstreeks de asynchrone motor van een centrifugaalpomp aan te drijven. Maar het lijkt ook heel goed mogelijk om deze versie te gebruiken voor netkoppeling met een inverter. Omdat de spanning tamelijk hoog is, zijn maar dunne leidingen nodig tussen de molen en de inverter. Ik geef aan de versie met een direct drive generator de voorkeur omdat daar het minst aan kapot kan gaan en omdat er ook geen extra geluidsproductie, rendementsverlies en mogelijk olie lekkage van een tandwielkast is.

De VIRYA-6.5 heeft een 3-bladige rotor met een rotordiameter van 6,5 m en houten bladen met een constante koorde en een constant profiel. Dergelijk bladen zijn daarom gemakkelijk te maken en er is veel minder houtverlies dan bij taps toelopende bladen. Het gebruikte Gö 711 profiel heeft een lage C_d/C_l verhouding over een groot α -bereik (α is de aanstroomhoek) en de rotor zal daardoor toch een hoge maximale C_p hebben. De ontwerpsnellopendheid is 6 wat niet hoog is voor een snellopende rotor. De rotor zal daarom weinig geluid produceren als hij zodanig belast wordt dat hij dicht bij zijn optimale snellopendheid draait. Houten bladen hebben als voordeel dat zij geluiddempend zijn en eenvoudig te recyclen als de molen aan het einde van zijn levensduur is. Ze moeten wel zeer goed behandeld worden met minstens twee lagen epoxy en minsten één laag aluminium verf.

De 46-polige PM-generator is zeker het lastigste onderdeel om te maken. Een hoog pooltal is nodig als de molen direct gekoppeld wordt aan de asynchrone motor van een centrifugaalpomp. Maar als de molen gebruikt wordt voor netkoppeling is de frequentie niet belangrijk en mag de generator minder polen hebben.

Het is misschien mogelijk om een Chinese axial flux generator te gebruiken. Recentelijk heb ik uitgezocht of de originele radial flux generator van de VIRYA-4.2 vervangen zou kunnen worden door een axial flux generator van Hefei Top Grand. Ik heb ooit een kleine generator van dit merk gekocht en doorgemeten en de ervaringen zijn best goed. In rapport KD 707 (ref. 10) wordt aangegeven hoe de door de fabrikant gegeven karakteristieken voor een weerstandsbelasting omgezet kunnen worden in de karakteristieken voor een 48 V accubelasting. Als er belangstelling is voor de VIRYA-6.5, dan wil ik wel uitzoeken of één van de grotere typen van Hefei Top Grand misschien geschikt is.

4 Bepaling van de opbrengst

Het door de rotor opgewekte mechanische vermogen P wordt gegeven door formule 4.1 uit KD 35 (ref. 1). Deze formule geldt als de rotor haaks aangestroomd wordt. Als de molen uitgevoerd is met een beveiliging die de rotor bij hoge windsnelheden uit de wind draait met een scheefhoek δ , dan blijkt het vermogen af te nemen met $\cos^3\delta$. Het mechanische vermogen voor een scheefhoek δ , P_δ , wordt dan gegeven door formule 7.10 uit KD 35. Deze formule wordt gekopieerd als formule 1.

$$P_\delta = C_p * \cos^3\delta * \frac{1}{2}\rho V^3 * \pi R^2 \quad (\text{W}) \quad (1)$$

Het toerental bij scheve aanstroming blijkt af te nemen met $\cos\delta$. Het toerental voor een scheefhoek δ , n_δ wordt gegeven door formule 7.1 uit KD 35. Deze formule wordt gekopieerd als formule 2.

$$n_\delta = 30 * \lambda * \cos\delta * V / \pi R \quad (\text{omw/min}) \quad (2)$$

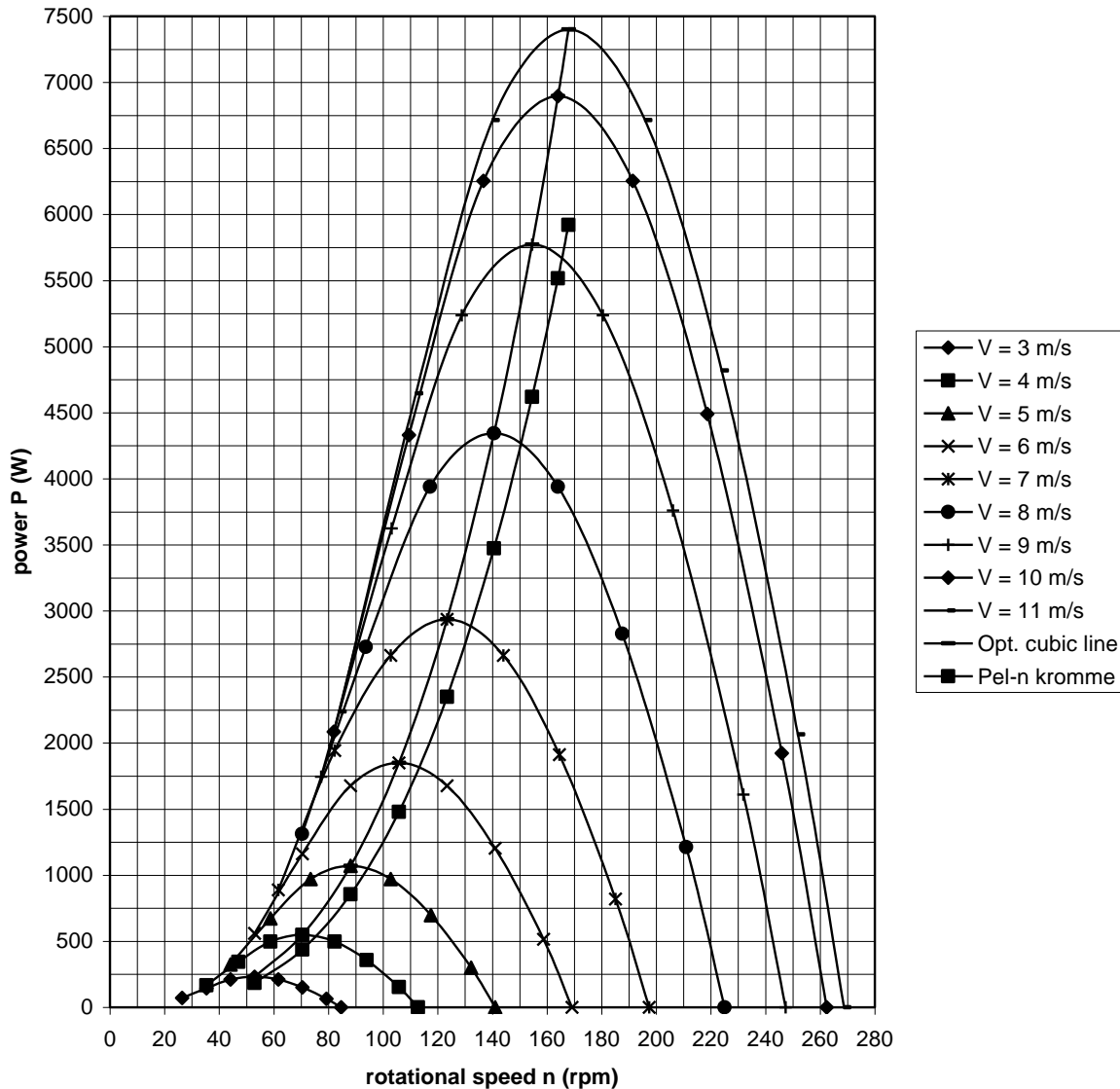
In deze formules is C_p de vermogenscoëfficiënt (-), δ de scheefhoek ($^\circ$), ρ de luchtdichtheid (kg/m^3), V de ongestoorde windsnelheid (m/s), R de straal van de rotor (m) en λ de snellopendheid (-). In hoofdstuk 8 van KD 35 wordt uitgelegd hoe met behulp van deze twee formules, de C_p - λ kromme van de rotor en de δ - V kromme van de beveiliging, de P - n krommen van de rotor voor diverse windsnelheden bepaald kunnen worden. Voor de VIRYA-6.5 rotor werd dit gedaan in hoofdstuk 5 van KD 578 en het resultaat wordt gegeven in figuur 4 van KD 578. Deze figuur werd gekopieerd als figuur 1 maar de $P_{\text{generator}}$ lijnen voor een overbrengingsverhouding van de tandwielkast voor $i = 12,4$ en $i = 15,3$ werden weggelaten.

De P - n krommen van de rotor hebben een maximum voor de ontwerpsnellopendheid $\lambda_d = 6$. De bijbehorende C_p waarde is 0,43. De C_p - λ kromme wordt gegeven in figuur 1 van KD 578. De δ - V kromme wordt gegeven in figuur 3 van KD 578. De P - n krommen zijn op een bepaalde schaal gelijkvormig met de C_p - λ kromme.

Door de punten van maximum vermogen van de P - n krommen kan een kromme getrokken worden. Dit blijkt een derdemachtskromme te zijn en deze kromme wordt de optimum derdemachtskromme genoemd. Voorlopig wordt ervan uitgegaan dat de inverter zo geprogrammeerd kan worden dat de P_{mech} - n kromme van de generator de optimale derdemachtskromme van de rotor volgt. Omdat de inverter echter een minimale ingangsspanning nodig heeft om te kunnen functioneren, zal dit niet lukken voor erg lage windsnelheden. Voorlopig wordt er daarom vanuit gegaan dat de optimum derdemachtskromme alleen gevolgd wordt voor windsnelheden hoger dan 3 m/s maar deze windsnelheid zou zelfs nog wat lager kunnen zijn. Dit betekent dat het geringe vermogen dat in windsnelheden lager dan 3 m/s zit, niet gewonnen wordt.

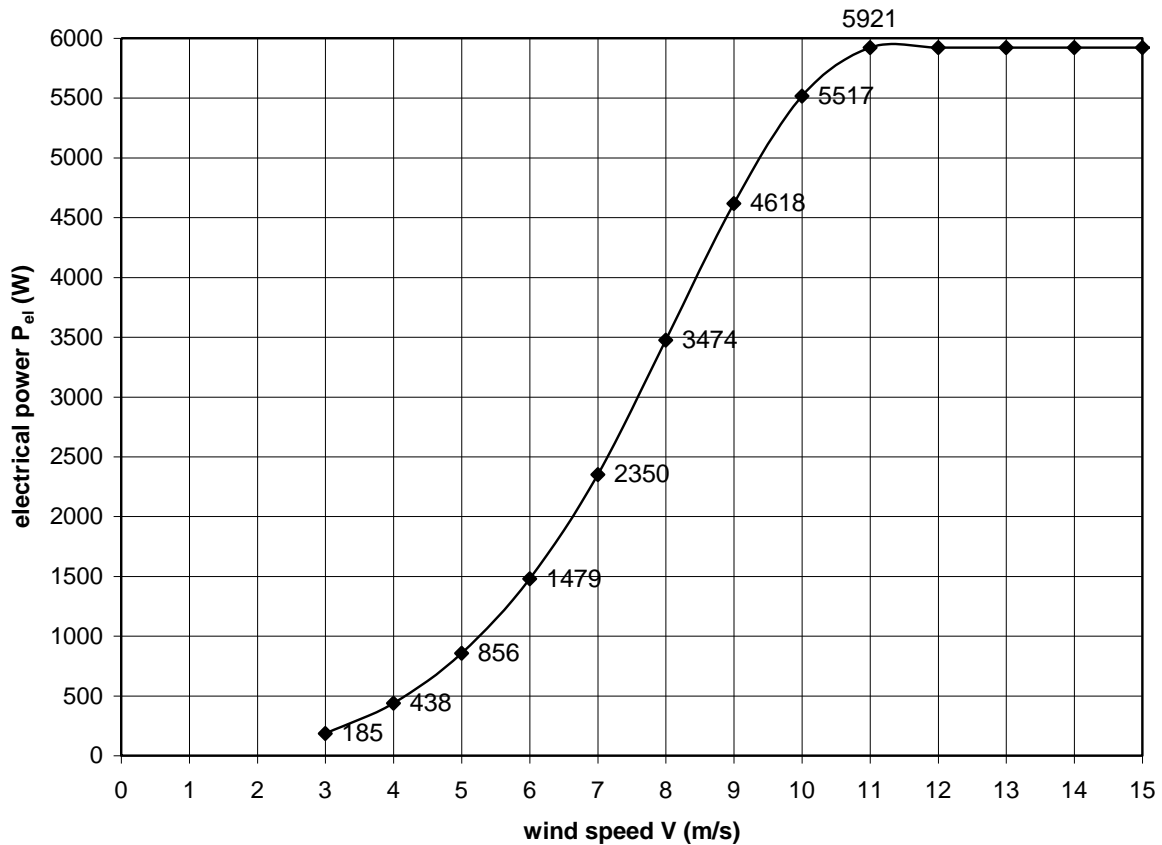
Het opgewekte elektrische vermogen is lager dan het mechanische vermogen van de rotor omdat de generator en de inverter een bepaald rendement hebben. In KD 78 werd voor een generator met bouwgrootte 90 gemeten dat het rendement voor een weerstandsbelasting van niet al te lage weerstandswaarden ongeveer 80 % (ofte wel 0.8) is over een groot toerenbereik (zie figuur 26, KD 78). Het rendement van kortsluitankermotoren neemt toe met de bouwgrootte en dat zal ook het geval zijn voor PM-generatoren die van kortsluitankermotoren zijn afgeleid. De 46-polige PM-generator maakt gebruik van een motorbehuizing met bouwgrootte 180 wat dus zeer veel groter is. Een belasting zodanig dat de optimale derdemachtskromme gevolgd wordt, is vergelijkbaar met een weerstandsbelasting omdat de ingangsspanning ook toeneemt met toenemend toerental. Het daarom redelijk om aan te nemen dat voor de VIRYA-6.5 generator minstens een rendement van 0.85 gehaald wordt.

Moderne inverters halen zeer hoge rendementen en een gemiddeld rendement van 0.94 lijkt redelijk. Dit komt neer op een totaal rendement van generator plus inverter van ongeveer 0.8. De P_{el} -n kromme van de generator wordt nu gevonden door de optimum derdemachtskromme met een factor 0.8 te vermenigvuldigen. De op deze manier gevonden P_{el} -n kromme wordt ook weergegeven in figuur 1.



figuur 1 P-n krommen van de rotor voor diverse windsnelheden, optimum kubische lijn en geschatte P_{el} -n kromme van de generator na de inverter.

Het werkpunt voor een bepaalde windsnelheid is dus het snijpunt van de P-n kromme voor die windsnelheid met de optimum derdemachtskromme. De opbrengst voor een bepaalde windsnelheid wordt gevonden door vanuit het werkpunt recht omlaag te gaan totdat de P_{el} -n kromme wordt gesneden. Voor elke windsnelheid werd het opgewekte elektrische vermogen op deze manier bepaald en uitgezet in de P_{el} -V kromme van figuur 2.



figuur 2 Geschatte P_{el} -V kromme voor de VIRYA-6.5 bij gebruik van een inverter

In figuur 2 is te zien dat het maximale elektrische vermogen dat bij een windsnelheid van 11 m/s (en hoger) wordt opgewekt bijna 6 kW is. Dit is toch heel acceptabel voor een windmolen met een rotordiameter van 6,5 m. Nu zullen in Brabant hoge windsnelheden maar weinig voorkomen en daarom moet voor een schatting van de jaaropbrengst met een veel lagere windsnelheid gerekend worden. Gemiddelde windsnelheden worden per provincie opgegeven voor een hoogte van 10 m in open terrein. De molen heeft echter een torenhoogte van 16,2 m waardoor de windsnelheid toch behoorlijk wat hoger zal liggen dan op 10 m hoogte, tenminste als het terrein voldoende open is.

Het opgewekte vermogen bij een gemiddelde windsnelheid van bijvoorbeeld 5 m/s is ook hoger dan bij een constante windsnelheid van 5 m/s omdat windsnelheden hoger dan de gemiddelde windsnelheid sterker bij dragen aan de jaaropbrengst. Dit is eenvoudig te zien in figuur 2. Stel we hebben een constante windsnelheid van 5 m/s. Het opgewekte vermogen is dan 856 W. Stel we hebben 1 uur een windsnelheid van 7 m/s en 1 uur een windsnelheid van 3 m/s. De gemiddelde windsnelheid is dan ook 5 m/s. Het vermogen bij 7 m/s is 2350 W. Het vermogen bij 3 m/s is 185 W. Het gemiddelde vermogen is dus $(2350 + 185) / 2 = 1267,5$ W. Dit is 411,5 W hoger en dus een factor $1267,5 / 856 = 1,48$ hoger dan bij een constante windsnelheid van 5 m/s. Omdat de windsnelheden in Nederland zeer sterk fluctueren, is de factor in werkelijkheid nog aanzienlijk groter dan 1,48. Ik ga er voorlopig vanuit dat de gemiddelde windsnelheid ter hoogte van het hart van de rotor 4 m/s is maar dat de P_{el} -V kromme afgelezen mag worden bij een windsnelheid van 5 m/s. Gedurende een jaar wordt dan gemiddeld een vermogen van 856 W opgewekt.

Dit vermogen wordt toegevoegd aan het net of aan de warmtepomp. Omdat bij een windmolen het opgewekte vermogen goed synchroon loopt met de warmtebehoefte wordt voorlopig aangenomen dat al het vermogen opgenomen wordt door de warmtepomp.

Voor een warmtepomp spreekt men niet over het rendement maar over de COP waarde wat een afkorting is van coëfficiënt of performance. Het is de verhouding tussen de geleverde hoeveelheid warmte per seconde en het opgenomen elektrische vermogen van de compressormotor. De COP waarde hangt af van de temperatuur van het medium waar de warmte aan onttrokken wordt en van de temperatuur van het water (of de lucht) die gebruikt wordt om het huis te verwarmen. Hoe hoger de temperatuur van het medium en hoe lager de verwarmingstemperatuur, hoe hoger de COP waarde. Informatie over dit onderwerp wordt o.a. gegeven op Wikipedia waar ook een rekenvoorbeeld wordt gegeven. Op de website: www.duurzaamheiloo.nl/warmtepomp/ staat een leuk grafiekje waarin de COP waarde gegeven wordt voor drie verschillen temperaturen van het verwarmingswater, 35 °C, 45 °C en 55 °C als functie van de temperatuur van het medium. Het lijkt redelijk om van een gemiddelde COP waarde van ongeveer 4,1 uit te gaan. Dit houdt in dat een door de molen opgewekt vermogen van 856 W een verwarmingsvermogen van ongeveer 3500 W oplevert. In één jaar levert dit een hoeveelheid warmte-energie van $24 * 365 * 3500 = 30660000 \text{ Wh} = 30660 \text{ kWh}$.

In het rekenvoorbeeld op Wikipedia staat dat 1 m³ aardgas een energieinhoud heeft van 35,2 MJ. Maar omdat de CV-ketel een bepaald rendement heeft, komt niet al deze energie te gunste aan de verwarming. Stel dat het rendement van de CV-ketel 0,9 is. 1 m³ aardgas geeft dan $0,9 * 35,2 = 31,68 \text{ MJ}$ aan nuttige warmte. Er staat ook dat 1 kWh electriciteit een energieinhoud heeft van 3,6 MJ. 1 kWh electriciteit komt dus overeen met $3,6 / 31,68 = 0,114 \text{ m}^3$ aardgas. 30660 kWh komt dus overeen met $30660 * 0,114 = 3495 \text{ m}^3$ aardgas. In het rekenvoorbeeld staat dat 1 m³ aardgas € 0,60 kost. Er wordt dus per jaar voor $0,6 * 3495 = € 2097$ aan aardgas bespaard. Dit is toch een aanzienlijk bedrag. Daarbij komt dat aardgas waarschijnlijk steeds duurder zal worden en dat de besparing dus zal toenemen.

In één m³ gas zit dus ongeveer negen maal zo veel nuttige warmte als in een kWh electriciteit maar één m³ gas is maar drie maal zo duur (als 1 kWh electriciteit € 0,20 kost). Dit geeft al aan dat het verwarmen met gas veel goedkoper is dan het verwarmen met electriciteit zonder een warmtepomp te gebruiken.

Het is wel de vraag of de VIRYA-6.5 voldoende goedkoop in serie geproduceerd kan worden zodanig dat de aanschafprijs en de kosten van onderhoud voldoende laag zijn om de molen in een redelijk termijn te kunnen terug verdienen. Hoe duur de molen gaat worden kan pas bepaald worden als hij helemaal uitgetekend is (wat ik dus niet ga doen), als er een prototype van gebouwd is dat stevig uitgetest is en als er een fabrikant gevonden kan worden die de molen in serie wil bouwen en de molen op de markt wil brengen. Ik ben bijna 74, al een paar jaar met pensioen en ik ga me hier dus niet mee bezig houden.

5 Onderzoek naar een alternatieve PM-generator van Hefei Top Grand

In hoofdstuk 3 wordt geopperd dat het misschien mogelijk is om de 46-polige radial flux generator te vervangen door een axial flux generator van Hefei Top Grand. Ik heb de twee typen van Hefei Top Grand bekeken waarbij de vermogens het dichtst in de buurt liggen van dat wat nodig is. Dit zijn de TGET620-5KW-200R met een massa van 110 kg en de TGET700-5KW-100R met een massa van 135 kg. Van het eerste type ligt het punt voor het nominale elektrische vermogen $P_{el} = 5000 \text{ W}$ voor $n = 200 \text{ omw/min}$ te ver rechts van de P_{el} -n kromme zoals die gegeven wordt in figuur 1. Van het tweede type ligt het punt voor $P_{el} = 5000 \text{ W}$ voor $n = 100 \text{ omw/min}$ te ver links van de P_{el} -n kromme. Geen van beide types zijn dus bruikbaar los van het feit dat zelfs het lichtste type al een behoorlijke massa heeft. Maar de originele 46-polige generator met bouwmaat 180 zal ook behoorlijk zwaar zijn.

In rapport KD 710 (ref. 11) wordt aangetoond dat een lichter type van Hefei Top Grand, de TGET450-5KW-300R met een massa van 46 kg, geschikt is voor de kleinere VIRYA-5B3 windmolen die een rotordiameter van 5 m heeft. Hier zal uiteraard minder vermogen door geleverd worden dan door de VIRYA-6.5 maar een kleinere molen kan nog steeds interessant zijn voor netkoppeling en de opwekking van warmte met behulp van een warmtepomp.

6 Gebruik van één windturbine voor vier of acht woonhuizen in een woonwijk

Tot nu toe werd uitgegaan van één windturbine voor één woonhuis in het buitengebied. Als een kleine windturbine bij een woonhuis acceptabel is in het buitengebied waarom zou dan een wat grotere windturbine niet acceptabel zijn in een woonwijk. Mensen die voorstander zijn van windenergie zijn vaak toch tegenstander van windturbines als die vlak bij hun huis gebouwd zouden worden maar dan hebben we het wel over megawatt turbines.

In hoofdstuk 6 van rapport KD 713 (ref. 12) wordt de VIRYA-9 beschreven en er wordt vanuit gegaan dat deze molen gebruikt wordt voor vier woonhuizen en geplaatst wordt op het snijpunt van de perceelgrenzen. De rotorberekeningen voor de VIRYA-9 worden gegeven in rapport KD 714 (ref. 13).

In hoofdstuk 3 werd al gesproken over de windturbine van EAZ die een rotordiameter van 13,2 m heeft maar die veel te groot is voor een individueel huishouden. Maar stel nu eens dat men van deze molen er één gebruikt voor acht woonhuizen. Omdat het opgewekte vermogen evenredig is met het bestreken rotoroppervlak, komt één molen met een rotordiameter van 13,2 m ongeveer overeen met twee molens met een rotordiameter van 9,3 m als de torens even hoog zijn en als de C_p van de rotor en het generatorrendement gelijk zijn. Informatie over deze molen van EAZ kan gevonden worden op de website: www.eazwind.com.

De molen van EAZ heeft een 3-bladige rotor met houten wieken, een direct drive PM-generator, een beveiliging met bladverstelling, een toren van ongeveer 18 m hoog en wordt met een vaan op de wind gericht. De molen is netgekoppeld en primair bedoeld voor boerderijen maar acht woonhuizen zullen een basislast hebben die in de winter bij gebruik van een warmtepomp van dezelfde orde grootte is. De molen heeft houten wieken en een niet al te hoge optimale snellopendheid waardoor de geluidsproductie maar gering zal zijn. Omdat de generator direct drive is, is er ook geen geluidsproductie van een tandwielkast. De molen zal schaduw hinder geven voor een bepaalde stand van de zon maar die hinder zal maar voor een beperkte tijd optreden. Men zal deze hinder voor lief moeten nemen of men moet een systeem installeren waarbij de molen bij teveel schaduw hinder stil gezet wordt.

Voor de woonhuizen denk ik aan door garages geschakelde vrijstaande huizen die met de achtertuinten aan elkaar grenzen. Elk perceel heeft een breedte 9 m en een diepte van 27 m. Het perceeloppervlak is dus 243 m². Vier huizen liggen daardoor op een perceel van 18 m breed en 54 m diep. De huizen hebben een breedte van 6 m en een diepte van 10 m. De garages hebben een breedte van 3 m en een diepte van 8,5 m. De achterkant van de garage valt samen met de achterkant van het woonhuis. De voorkant van het woonhuis valt daardoor 1,5 m terug t.o.v. de voorkant van de garages waardoor de vooringang aan de zijkant kan zitten. De voortuinen zijn 5 m diep en de achtertuinten zijn daardoor 12 m diep en 9 m breed. De achtertuinten van twee maal twee huizen grenzen dus aan elkaar en op het snijpunt van de perceelgrenzen wordt één VIRYA-9 windmolen geplaatst. Een bovenaanzicht wordt gegeven in figuur 2 van KD 713. De molen ligt dus 12 m af van de achtergevel van elk van de vier huizen. De molen van EAZ wordt geplaatst op het hart van twee maal vier percelen.

Omdat gekozen wordt voor door garages geschakelde vrijstaande huizen heeft elk huis minstens één kant van het dak die gunstig gericht is t.o.v. de zon. De optimale positie van de huizen is zodanig dat de nok van het dak van oost naar west loopt. Daardoor is één kant van het dak op het zuiden gericht. Deze kant van het dak kan dan voorzien worden van netgekoppelde zonnepanelen. Op de noordkant van het dak kan dan eventueel een dakkapel aangebracht worden.

Voor wat betreft de zonnepanelen heeft elk huis zijn eigen individuele inverter waarmee de panelen aan het net gekoppeld wordt. De windmolen heeft één netgekoppelde inverter die speciaal ontworpen is voor gebruik met een windmolen en die zodanig afgesteld is dat de rotor bij zijn optimale snellopendheid draait waarbij de geluidsproductie ook minimaal is. Men zal voor de VIRYA-9 de jaaropbrengst van de molen met zijn vieren moeten delen. Voor de molen van EAZ zal men de jaaropbrengst met zijn achten moeten delen.

Het moet wel zo zijn dat men de opbrengst van de windmolen per huis mag salderen met de hoeveelheid afgenomen elektrische energie. Als dit toch niet zou mogen, dan moet de inverter de door de molen opgewekte energie splitsen en elk huis zijn deel geven zodat de warmtepomp van elk huis werkelijk gebruik maakt van de door de windmolen opgewekte energie waardoor dus alleen het overschot teruggeleverd wordt.

De toren van de molen van EAZ bestaat uit drie, 6 m lange secties met een naar beneden toenemende buisdiameter en is vrijstaand (dus zonder tuidraden). Bij gebruik van de EAZ windmolen bij een boerderij is er voldoende plaats om een 18 m hoge toren te kunnen kantelen maar ik weet niet of de toren daar ook werkelijk geschikt voor is. Bij 12 m diepe achtertuinen kan dit zeker niet. Voor gebruik in een woonwijk is waarschijnlijk een toren nodig waarvoor zes, 3 m lange buizen in elkaar geschoven kunnen worden zodat de toren met ingeschoven buizen maar 3 m hoog is en men onderhoud kan plegen zonder dat de toren plat gelegd hoeft te worden. Geen van de eigenaars zal het prettig vinden als zijn tuin daarvoor vrij gehouden moet worden.

De toren van de VIRYA-9 moet nog ontworpen worden maar zal ook wel 18 m hoog moeten zijn en ook uit in elkaar schuivende buizen moeten bestaan als men de molen niet plat wil leggen.

7 Referenties

- 1 Kragten A. Rotorontwerp en matching voor horizontale as windturbines, februari 2017 (de oorspronkelijk 1^e Engelstalige versie van dit rapport is al van 1999), gratis openbaar rapport KD 35, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 2 Kragten A. Development of the permanent magnet (PM) generators of the VIRYA windmills, mei 2007, herzien december 2020, gratis openbaar rapport KD 341, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 3 Kragten A. Rectification of 3-phase VIRYA windmill generators, mei 2007, herzien april 2017, gratis openbaar rapport KD 340, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 4 Kragten A. Measurements performed on a generator with housing 5RN90L04V equipped with neodymium magnets, maart 2001, herzien maart 2015, gratis openbaar rapport KD 78, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 5 Kragten A. Safety systems for small wind turbines which turn the rotor out of the wind at high wind speeds, februari 2012, herzien mei 2016, gratis openbaar rapport KD 485, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 6 Kragten A. Method to check the estimated δ -V curve of the hinged side vane safety system and checking of the δ -V curve of the VIRYA-4.2 windmill, december 2004, gratis openbaar rapport KD 213, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 7 Kragten A. Calculations executed for the 3-bladed rotor of the grid connected VIRYA-6.5 windmill ($\lambda_d = 6$, Gö 711 airfoil, wooden blades) provided with the hinged side vane safety system, februari 2015, herzien januari 2016, gratis openbaar rapport KD 578, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.

- 8 Kragten A. Extended calculations for the grid connected VIRYA-6.5 windmill, maart 2015, herzien maart 2018, gratis openbaar rapport KD 579, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 9 Kragten A. Ideas about a direct drive 46-pole PM-generator for the VIRYA-6.5 windmill meant for driving the 2.2 kW asynchronous motor of a centrifugal pump, January 2017, gratis openbaar rapport KD 624, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 10 Kragten A. Replacement of the original radial flux PM-generator of the VIRYA-4.2 by the axial flux PM-generator of Hefei Top Grand type TGET380-10kW-1200R for 48 V battery charging, september 2020, gratis openbaar rapport KD 707, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 11 Kragten A. Calculations executed for the 3-bladed rotor of the VIRYA-5B3 windmill ($\lambda_d = 6$) meant for connection to the axial flux generator of Hefei Top Grand type TGET450-5KW-300R for grid connection, January 2021, gratis openbaar rapport KD 710, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 12 Kragten A. Opslag van duurzaam opgewekte warmte in een waterbuffer voor vier door garages geschakelde vrijstaande huizen, maart 2012, gratis openbaar rapport KD 713, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 13 Kragten A. Calculations executed for the 3-bladed rotor of the VIRYA-9 windmill ($\lambda_d = 6$) meant for connection to the biggest axial flux generator of Hefei top Grand type TGET770-H-10KW-100R for grid connection, maart 2012, (niet openbaar) rapport KD 714, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.