



Werkgroep OntwikkelingsTechnieken

De formule Virya

Computerberekeningen aan een kleine windmolen

Bertus de Jong
Ruurd van der Meulen

Januari 2007

Werkgroep OntwikkelingsTechnieken
Universiteit Twente
Postbus 217
7500 AE Enschede

T: 053-489 2845
F: 053-489 2671
E: wot@tdg.utwente.nl
W: www.wot.utwente.nl

1. Ten geleide

Bij de Werkgroep Ontwikkelings Technieken (WOT) kwam vanaf eind jaren 80 een toenemende vraag naar, zelf te maken, elektriciteitsopwekkende windmolens. Het antwoord daarop luidde vaak afwijzend, omdat het in elkaar zetten van een molen een erg ingewikkelde aangelegenheid is. Om teleurstellingen te voorkomen adviseerde ze dan ook kant en klaar commercieel verkrijgbare ontwerpen.

Inmiddels staat op het WOT-proefterrein een windgenerator met een vermogen van ongeveer 1 kW met een rotordiameter van 3,3 meter, de Virya 3.3. Deze combineert het verlangen zelf te bouwen en een betrouwbaar ontwerp. Het betreft een concept van het constructiebureau Kragten Design uit St.-Oedenrode, een bedrijf gespecialiseerd in het ontwerpen van kleine windmolens. Om te beoordelen of dit concept aanbevelenswaardig was, hebben we dit vanaf bouwtekeningen zelf gemaakt.

Aanvankelijk hebben we gerekend aan optimalisering van het uitgangsvermogen door middel van een elektronische mutator tussen de generator en accu. Hieruit bleek dat het vermogen niet kan toenemen. Thans kunnen we het oorspronkelijke ontwerp bij onze adviesaanvragers van harte aanbevelen.

De onderstaande uiteenzetting, die in het teken staat van die optimalisering, pretendeert niet volledig te zijn. Maar hopelijk wordt bij een aantal lezers de interesse gewekt, zodat er nóg meer aan elektriciteitsopwekkende molens kan worden gedaan, mogelijk zelfs op het WOT-terrein (er zijn nog generatoren).

Van de gelegenheid maak ik gebruik een aantal mensen te bedanken voor hun bijdrage, hetgeen tot de inzichten heeft geleid. Om te beginnen bij de heer A. Kragten voor de rondleiding op zijn bedrijf en zijn uitleg. Verder Bertus de Jong en Freddy Alferink, voor het werken aan onder meer een elektronische mutator.

Het feit dat hier over de Virya op internet gepubliceerd is betekent dat het overnemen van tekstdelen is toegestaan. Bronvermelding wordt daarbij op prijs gesteld.

Ruurd van der Meulen,

Maart 2003

Bij de tweede editie van De formule Virya

Van de Virya 3.3 die als acculader op het WOT-terrein staat worden helaas geen licenties meer verkocht. Er zijn wel een aantal nieuwere, alleen voor bedrijven. De WOT kan daar een overzicht van verstrekken. Voor meer informatie kan ook contact worden opgenomen met Kragten Design.

De inhoud van onderstaand rapport is ingrijpend veranderd. Er wordt dieper op de theorie ingegaan. De optimaliseringberekeningen zijn anders uitgevoerd, zodanig dat de realiteit beter wordt benaderd. Het computerprogramma dat hiervoor gebruikt wordt, is integraal opgenomen. Uiteraard met toelichting. De conclusie hieruit is dat het vermogen van de Virya bij gebruik van een aanpassende elektronische schakeling (de mutator), in sommige gevallen toch kan toenemen.

Ook opgenomen is een computerprogramma dat de opbrengst berekent van de niet-geoptimaliseerde molen.

Beide kunnen als leidraad worden gebruikt bij het rekenen aan (toekomstige) molens mochten de rotor- en generator karakteristieken daarvan bekend zijn.

De samenstellers van de inhoud zijn zeer zorgvuldig tewerk gegaan. Toch kunnen, noch zij, noch de WOT, aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schaden die op enigerlei wijze in verband staan met dit rapport. Voor opmerkingen, die kunnen leiden tot verbetering van de inhoud, houden zij zich aanbevolen.

Bertus de Jong,
Ruurd van der Meulen,

Januari 2007

2. *Inhoud*

1. Ten geleide.....	2
2. Inhoud.....	3
3. Lijst van gebruikte symbolen en afkortingen.....	4
4. De Virya.....	5
5. De wind.....	6
6. De rotor.....	6
7. De generator.....	8
8. De gelijkrichterdiodes.....	9
9. De accu.....	10
10. De toren.....	11
11. De windvaan.....	11
12. Beveiligingen.....	11
13. Van vermogenscoëfficiënt naar totaalrendement.....	12
14. Energieën en rendementen.....	13
15. Computerprogramma geoptimaliseerde WOT-configuratie.....	14
15.1. Berekening evenredigheidsconstante, generatorstroom en snellopendheid.....	14
15.2. Berekening overige gegevens.....	16
15.3. Grafieken geoptimaliseerde gegevens.....	19
16. Computerprogramma niet-geoptimaliseerde WOT-configuraties.....	22
16.1. Generator in delta-schakeling.....	22
16.2. Generator in ster-schakeling.....	24
16.3. Grafieken niet-geoptimaliseerde gegevens bij generator in ster-schakeling.....	25
16.4. Sankey-diagram niet-geoptimaliseerde Virya in ster-schakeling.....	28
16.5. Berekening jaaropbrengst aan de hand van de windsnelheidsverdeling.....	28
17. Vergelijking eerder genoemde configuraties.....	29
18. De toepassing van een andere windgenerator op de genoemde voorbeelden.....	30
18.1. Het gebruik van een andere rotor.....	31
18.2. Het gebruik van een andere generator.....	32
18.2.1. Bepaling van de lineaire of mechanische verliezen (c-factor).....	32
18.2.2. Bepaling van de evenredigheidsconstante (Eco).....	32
18.3. Het gebruik van een willekeurige aansluitkabel.....	34
18.4. Het gebruik van een andere accu.....	35
19. Conclusie.....	35
20. Literatuur.....	35

3. *Lijst van gebruikte symbolen en afkortingen*

Op alfabetische volgorde verschijnt hieronder een overzicht van de gebruikte afkortingen en symbolen, met tussen [] de eenheid indien van toepassing:

α – alfa: hoek windrichting t.o.v. normaal rotorvlak [°].
c-factor – generator-constante, verhouding mechanisch vermogen en toerental zonder elektrische belasting [Watt*sec/Omw.].
Bfact – belastingfactor: verhouding Rgen met Rbel [].
CDF – cumulatieve dichtheidsfunctie [].
Cp – coefficient of performance (ned.: vermogenscoëfficiënt): het aandeel van de energie die de rotor uit de wind haalt [].
Dfact – diodefactor: verhouding Rd met Rgen [].
 η – rendement [].
Eco – stroomafhankelijke generator-‘constante’: verhouding onbelaste uitgangsspanning en toerental [Volt*sec/Omw.].
Egen – onbelaste klemspanning generator [V].
EMK - onbelaste klemspanning generator [V].
Es – denkbeeldige interne spanningsbron generator [V].
EV – energie-verdelingsfunctie [].
f – frequentie [Herz].
 Φ – fie, magnetische flux [Wb, = Volt*sec.].
Iaccu – acculaadstroom [Ampère].
Igen – gelijkgerichte generatorstroom [Ampère].
k-factor – generator-constante, verhouding onbelaste generatorspanning met product flux en toerental [1/Omw.].
KDH – kansdichtheid-functie [].
Kfact – kabelfactor: verhouding Rk met Rgen [].
KWh – kilowattuur, = 3,6 Mjoule: eenheid van arbeid.
 λ – (dit is de letter, niet te verwarren met getal 1): lambda, snellopendheid λ [].
L – zelfinductie generator [Henry].
 λ – snellopendheid: verhouding tipsnelheid rotor en windsnelheid [].
N – toerental rotor en generator [Omw./sec.].
 ω – ohmega: hoeksnelheid, = $2\pi f$ [rad./sec.].
Omver – omzet- (= transformatie-) verhouding mutator [].
Paccu – vermogen naar de accu [Watt].
Pas – asvermogen van de generator [Watt].
Pd – verliesvermogen in de diodes [Watt].
Pel – elektrisch vermogen uit de generator = Pmech [Watt].
Pgen – vermogen dat generator levert [Watt].
Phys – hystereseverliezen, a.g.v. telkens (de-)magnetiseren [Watt].
 π – pi, constante: 3,1416.
Pkabel – vermogen uit de aansluitkabel van de generator [Watt].
Pmech – (denkbeeldig) mechanisch vermogen, = Pas – Phys = Pel [Watt].
PRgen – verliesvermogen in de generator [Watt].
PRk – verliesvermogen in de aansluitkabel [Watt].
Pwind – vermogen in de wind [Watt].
Q – kwaliteitsfactor generator, zegt iets over het vermogen [Joule*sec./Omw.].

ρ – rho: luchtdichtheid [kg/m³].
 r – straal rotor [m].
 R_{bel} – belastingweerstand [Ohm].
 R_d – diodeweerstand [Ohm].
 Ren_{el} – elektrisch rendement [].
 Ren_{mech} – mechanisch rendement generator [].
 Ren_{reg} – rendement van de mutator [].
 Ren_{to} – totaalrendement: product deelrendementen m.u.v. mutator en accu [].
 R_{gen} – interne Ohmse weerstand generator [Ohm].
 R_k – kabelweerstand [Ohm].
 R_s – schijnbare interne weerstand generator a.g.v. zelfinductie [Ohm].
 U_{accu} – klemspanning accu [Volt].
 U_d – drempelspanning diodes [Volt].
 U_{gen} – belaste klemspanning generator [V].
 U_{kabel} – spanning uit de aansluitkabel van de generator [Volt].
 v – windsnelheid [m/s].
 VWO – vermogens-windsnelheids-overbrengingsfunctie [].

4. *De Virya*

De Virya (fig. 1) wekt geen energie op, maar zet dit om. Stromingsenergie van de wind (in feite een afgeleide van zonne-energie en rotatie-energie van de aarde¹) wordt via mechanische energie getransformeerd naar elektrische energie. Dit gebeurt in resp. de rotor en de generator van de molen. Om dit gehele proces goed te doorgronden moeten we dus op de hoogte zijn van de manier waarop de afzonderlijke deelprocessen functioneren. Van belang zijn daarbij onder andere de wind en de karakteristieken van de rotor en generator. Ook komen aan de orde de toren en de beveiligingen.

¹ *Duurzame energie voor ontwikkelingslanden*, Cursusbundel van de Werkgroep Ontwikkelings Technieken, Enschede, 1996



Fig. 1. De Virya

5. *De wind*

De windsnelheid (v) is voor de omgezette energie enorm van belang omdat de energie die in de wind zit evenredig is met v^3 . De kinetische energie per massa-eenheid neemt kwadratisch toe en de hoeveelheid massa die voorbij komt waaien neemt evenredig met v toe². Bij een ideale molen is de output evenredig met v^3 , maar niet in de praktijk. Door gebruik te maken van een mutator kan men bij harde wind een betere benadering krijgen van het ideaal.

6. *De rotor*

Deze zet de stromingsenergie in de wind (P_{wind}) om in mechanische energie (rotatie-energie = P_{as}). De mate waarin dit lukt wordt aangeduid met de vermogenscoëfficiënt of in het engels coefficient of performance (C_p) (foutief soms ook wel een soort van rendement genoemd). Vaak wordt de rotorkarakteristiek aangegeven met een C_p - λ -kromme. Hierin stelt λ de snellopendheid van de rotor voor; dit is de verhouding tussen de tipsnelheid van de rotor en de windsnelheid. In fig. 2 wordt een voorbeeld van zo'n kromme gegeven zoals die voor de Virya geldt³.

² *Duurzame energie voor ontwikkelingslanden*, Cursusbundel van de Werkgroep OntwikkelingsTechnieken, Enschede, 1996

³ A. Kragten, *Explanation for measurements performed on a four poles generator equipped with neodymium magnets*, St.-Oedenrode, 1991

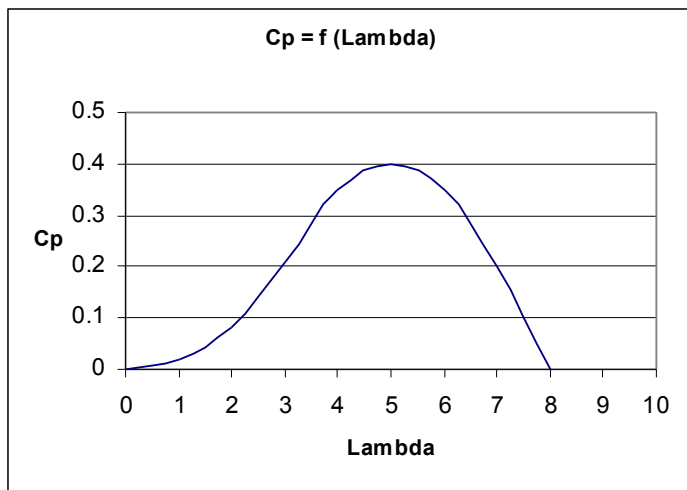


Fig. 2. Vermogenscoëfficiënt als functie van de snellopendheid bij de Virya 3.3

De C_p - λ -kromme van de rotor wordt bepaald door de vorm van de rotor en is onafhankelijk van v , zolang de stormbeveiliging niet ingrijpt (omdat dan de wind niet meer loodrecht op de rotor blaast).

Daaruit volgt dat het toerental van de rotor (N) evenredig met v moet zijn willen we het maximum aan energie uit de wind onttrekken. Voor de berekeningen is het van belang vast te stellen wat de overbrengingskarakteristiek is (zie onder hoofdstuk 14, 'Energieën en rendementen').

Behalve C_p bepalen verder de luchtdichtheid (ρ), de straal (r) en de stand van de rotor ten opzichte van de wind (α) (zie fig. 3) de hoeveelheid energie die de rotor oppikt (het asvermogen).

De rotor bestaat uit drie geschilderde houten bladen die elk een hoek maken van 7° met het 'vlak', zodat er door de wind een aandrijvende kracht (koppel) op ontstaat. Daardoor gaat de rotor draaien. De bladen zijn door middel van een verende constructie aan de generator bevestigd om trillingen uit te dempen. Het rotor'vlak' is trouwens in werkelijkheid een kegel met een zeer flauwe hoek van 176° , zie fig. 3. Bij het draaien zal de centrifugaalkracht de winddruk op de bladen compenseren.

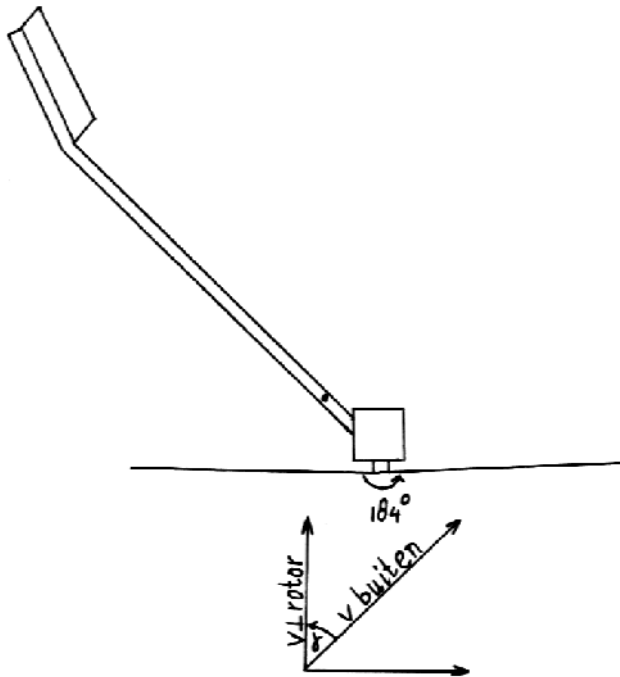


Fig. 3. Windsnelheid buiten ontbonden in een component loodrecht op de rotor.

7. De generator

De generator zet Pas om in elektrische energie. Ze levert een belaste klemspanning (U_{gen}) die afhankelijk is van het toerental N [Omw./sec.] en de belastingstroom (I_{gen}). De onbelaste klemspanning bedraagt: $E_{gen} = k \cdot \Phi \cdot N$, waarin k een machine-constante, Φ de totale flux van de magneten en spoelen, en N het toerental van de generator. Vaak wordt in plaats van het toerental gerekend met de hoeksnelheid $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ (met f de frequentie = N maal het aantal poolparen in de machine (bij ons twee)). Hier wordt verder gerekend met N ; dit kan door k aan te passen.

Bij aansluiting van een belastingweerstand (R_{bel}) daalt U_{gen} door de spanningsval over de inwendige Ohmse weerstand (R_{gen}) en schijnbare weerstand ($R_s = w \cdot L$, met L als zelfinductie). Deze R_s is dus principieel frequentieafhankelijk. De schijnbare weerstand manifesteert zich vooral bij hoge stromen en frequenties. Er gaat geen vermogen in verloren; periodiek wordt evenveel vermogen opgenomen als afgevoerd. Hij heeft dus ook geen invloed op het rendement van de generator. De spanning over R_s wordt in het vervolg met E_s aangeduid.

Het vermogen dat de generator levert (P_{gen}), is het product van U_{gen} en I_{gen} . We onderscheiden twee ter zake doende rendementen: het elektrische rendement en het mechanische rendement.

Het elektrische rendement heeft betrekking op de verliezen in de koperwikkelingen als hier een stroom doorheen vloeit. Deze koperverliezen zijn evenredig met de stroomsterkte in het kwadraat ($P = I_{gen}^2 \cdot R_{gen}$).

Het mechanische rendement heeft betrekking op de verliezen die ontstaan in de lagers van de generator en gemakshalve reken ik de hystereseverliezen er ook toe (dit zijn verliezen die in het ijzer ontstaan tijdens het magnetiseren en demagnetiseren bij wisselende magnetische velden). Ze zijn evenredig met N ($P_{phys} = c \cdot N$, c = machine-constante).

We hebben geen last van een tandwieloverbrenging. Dit gaat dan wel ten koste van het elektrische rendement, omdat het vermogen bij een laag toerental wordt onttrokken (en dientengevolge een hoge stroom met de bijbehorende verliezen in R_{gen}). Er zijn ook nog wervelstroomverliezen. Ten opzichte van de andere vermogens zijn ze zo klein dat ze mogen worden verwaarloosd.

De evenredigheidsconstante E_{co} is gedefinieerd als de onbelaste klemspanning per toerental (in $Omw./sec.$): $E_{gen} = E_{co} \cdot N$. In beginsel is E_{gen} evenredig met de flux Φ . Als gevolg van de stroom, die voornamelijk bij hoger toerental vloeit, treedt echter veldverzwakking op zodat E_{gen} minder stijgt dan aanvankelijk verwacht. Er kan daardoor een verband worden gelegd tussen E_{co} en de stroomsterkte I .

Verder is het erg lastig de waarde van L te bepalen, omdat er bij hogere stromen ook nog eens verzadigingsverschijnselen optreden waardoor L vermindert. Makkelijker is het om de invloed van de stroom op E_s te bepalen, en ook nu wordt uitgekomen op een stroomafhankelijke evenredigheidsconstante. De spanning E_s over de schijnbare weerstand is om precies te zijn een functie van I_{gen} en $w \cdot L$, waarbij L ook weer een functie is van I_{gen} . Uiteindelijk is dus E_s een functie van I_{gen} en evenredig met N .

Omdat de EMK evenredig is met de frequentie en R_s , wordt vaak een andere benadering gebruikt: de generator als stroombron. Deze, algemeen aanvaarde, zienswijze heeft wel gevolgen voor de berekening van het (totaal-)rendement van de Virya, hoewel een groot verschil van het resultaat in vergelijking met de huidige berekening niet erg waarschijnlijk is. De generator is een gemodificeerde elektromotor. Het ronddraaiende deel is vervangen door een ijzeren cilinder met enorm sterke permanente neodymium magneten. De stroom die hij opwekt wordt via een ondergrondse kabel naar de werkplaats van de WOT geleid, waar dit wordt gemeten (fig. 4).

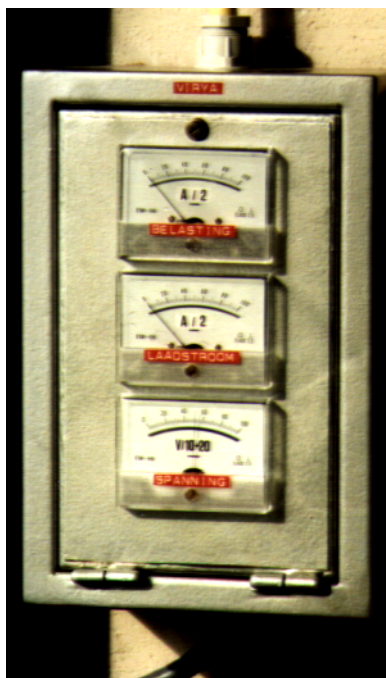


Fig. 4. Meetinrichting voor de laad- en ontlaadstroom en de accuspanning.

8. De gelijkrichterdiodes

De gelijkrichter zorgt voor de noodzakelijke omzetting van de wisselspanning, die de generator levert, in gelijkspanning die nodig is om de accu te laden. Dit kan, omdat een diode een elektronische component is die de eigenschap heeft stroom in één richting door te kunnen laten. Door nu 6 van deze diodes toe te passen, kan de 3-fasen spanning van de generator in gelijkspanning worden omgezet. Er zijn steeds twee diodes in geleiding. Omdat de (vermogens-)diodes een drempelspanning hebben van elk circa 0,85 Volt, is de totale drempelspanning $U_d = 1,7$ Volt. Deze spanning levert, als gevolg van de stroom, een verliespost op die gelijk is aan $I_{gen} \cdot U_d$. Dit vermogen wordt in de diodes omgezet in warmte, en wordt bij de Virya van de WOT afgevoerd via de toren. De verliespost moet op het generatorvermogen in mindering moet worden gebracht, willen we berekenen hoe groot de acculaadstroom is. In het hoofdstuk 14, 'Energieën en rendementen', wordt hier nader op ingegaan.

9. De accu

De accu zorgt ervoor dat de continuïteit van de windmolen verbetert. Dit komt doordat de accu wordt geladen in periodes van veel windaanbod. Bij weinig wind kan men dan over de energie, die in de accu is opgeslagen, beschikken.

Er zijn veel verschillende soorten accu's. De meest gebruikte zijn de lood-accu's, vanwege de gunstige prijs/kwaliteit-verhouding. Deze zijn er ook weer in verschillende soorten en prijsklassen, zoals de startaccu en de tractiebatterij. De eerste is het goedkoopst en is, vanwege de toepassing in auto's, alom verkrijgbaar. Ook in ontwikkelingslanden. Nadeel is dat hij gevoelig is voor diepontlading, een eigenschap die de tractiebatterij minder heeft. Er is ook nog een tussenvorm: de semie-tractiebatterij. Deze wordt bij de WOT toegepast.

De accu bij de WOT is beveiligd tegen overlading. Hierdoor wordt voorkomen dat er schadelijke en explosieve gassen ontstaan. De acculaadbeveiliging bestaat uit een elektronische schakeling, waaronder een 49-tal transistoren op een aluminium plaat van één vierkante meter (zie fig. 5). Hierdoor wordt de stroom van de molen omgezet in nuttige warmte als de accu vol is (bij een accuspanning van circa 28 Volt).

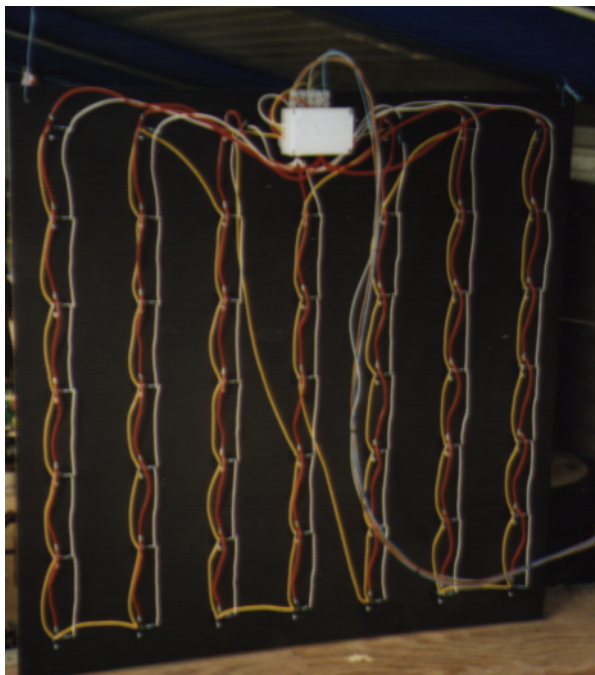


Fig. 5. Bedrading naar de transistoren op de stookplaat

De werking van de accu komt er kort gezegd op neer dat bij het opladen elektrische energie wordt omgezet in chemische energie. Bij het ontladen gebeurt het omgekeerde. De verliezen die hierbij bestaan worden uitgedrukt in het laadrendement of het energierendement. De laatste is het belangrijkste. Het geeft de verhouding tussen de afgegeven en toegevoerde energie, en heeft bij de loodaccu een waarde van circa 60%.

10. De toren

Deze vormt de basis van de windgenerator. Dit stalen gevaarte van zo'n twaalf meter hoog is zo ontworpen dat een flexibel geheel is. Eventuele trillingen afkomstig van de rotor door onbalans worden erin opgevangen. Je ziet hem dan 'buikdansen'.

11. De windvaan

Deze zorgt dat de rotor op de wind staat. Samen met de rotor vormt zij tevens de stormbeveiliging. Dat werkt als volgt: bij lage v hangt de vaan naar beneden en zijn de windkracht op de vaan en rotor zodanig dat de rotor op de wind gericht is. Bij toenemende windkracht gaat de scharnierend opgehangen vaan geleidelijk kantelen zodat de kracht op de rotor meer toeneemt dan op de vaan. Het gevolg is dat de staart van de molen zich op een nieuw evenwicht instelt waarbij de rotor uit de wind gedraaid is (het kruien). De v die de rotor daarbij treft wordt lager. Die v kan worden gevonden door v buiten vectoriëel te ontbinden (zie fig. 3). Het effect hiervan wordt bij toenemende v zeer groot: bij zo'n 7 m/s begint de rotor geleidelijk uit de wind te draaien en dit is dan dus tevens v die de rotor treft. Bij windkracht 12 (35 m/s) is de rotor ongeveer 75° uit de wind gedraaid. Hierdoor 'ziet' de rotor een v die strak begrensd is op 9 m/s. Realiseren we ons het exponentiële verband tussen de windsnelheid en het vermogen, dan is de invloed van de stormbeveiliging inderdaad gigantisch groot.

Uit bovenstaande blijkt dat 9 m/s de maximale windsnelheid is waarmee we hoeven te rekenen. Men zou ook kunnen uitgaan van v buiten, maar dan moeten we in verband met het uit de wind draaien een veranderende C_p - λ -kromme verdisconteren⁴. Dit vereenvoudigt het rekenwerk niet.

12. Beveiligingen

Bij de Virya kunnen twee vormen van beveiliging worden onderscheiden: de stormbeveiliging en de acculaadbeveiliging.

Twee aspecten van stormbeveiliging zijn reeds genoemd: de kegelvorm van de rotor en de windvaan. Verder kan de generator in noodgevallen via een stekkerverbinding eenvoudig worden losgenomen en kortgesloten. De generator draait daarbij zeer zwaar waardoor de rotor niet op hol slaat. Wordt er zelfs een vliegende storm verwacht, dan kan de scharnierend bevestigde toren ook nog worden neergelaten.

De acculaadbeveiliging is bij het hoofdstuk 'De accu' besproken.

⁴ A. Kragten, *Aanpassing van windmolen en generator*, St.-Oedenrode, 1994

13. *Van vermogenscoëfficiënt naar totaalrendement*

Zoals uit het bovenstaande naar voren is gekomen, moet N evenredig zijn met v om zoveel mogelijk energie uit de wind te halen. Als v toeneemt, zal het koppel dat de rotor levert dan kwadratisch toenemen, zodat het product van koppel en toerental, het vermogen dat de rotor aan de generator levert, inderdaad met de derde macht toeneemt. De molen zou dan bij elke windsnelheid het maximaal haalbare vermogen leveren. De werking van de elektronische mutator was hierop gebaseerd.

Toch is bovenstaande redenering niet de juiste. We hebben namelijk ook nog te maken met de generator. Als het maximaliseren van de energie uit de rotor het gevolg heeft dat het koppel kwadratisch toeneemt met v , dan dient het tegenwerkend koppel van de generator ook kwadratisch toenemen. De stroom die de generator levert, zou dus kwadratisch moeten toenemen. De koperverliezen nemen daarbij toe met de vierde macht van v , terwijl de energie in de wind ‘slechts’ toeneemt met de derde macht.

En zie nu: bij optimalisatie van de rotor op de wind, nemen de verliezen in de generator met toenemende v naar verhouding meer toe dan wat de rotor aan de generator levert. Het systeem als geheel is dus toch niet geoptimaliseerd! Het vermogen dat de generator levert, is lager dan we voor ogen hadden. Men zou de verliezen in de generator dus moeten beperken door de stroom te laten afnemen. Daarbij moeten (gaan) N en λ dus omhoog. Maar hoeveel? Als λ toeneemt, gaat dit onherroepelijk ten koste van C_p . Ergens zit dus een optimum. En nu we toch bezig zijn, ligt het voor de hand ook de mechanische verliezen in de optimalisering te betrekken, omdat blijkt dat deze betrekkelijk hoog zijn⁵. Tevens kunnen we de gelijkrichterverliezen in de optimalisering betrekken.

Resumerend: beschouwen we de rotor, dan moet λ constant zijn. Bekijken we de koperverliezen, dan moet λ zo hoog mogelijk zijn. Ten aanzien van de mechanische verliezen dient λ zo laag mogelijk te zijn.

Wat we eigenlijk zouden moeten hebben is niet een C_p - λ -kromme, maar een grafiek waarin het totaalrendement tegen λ is uitgezet. Het is eenvoudig in te zien dat bij toenemende v het toerental en de stroom toenemen, en dat de mechanische en koperverliezen zich daarbij verhoudingsgewijs steeds meer manifesteren. Deze totaalrendement- λ -kromme heeft, in tegenstelling tot de C_p - λ -kromme, dus een optimum die van v afhankelijk is. De consequentie is, dat, willen we een grafiek schetsen van de opbrengst van de molen als functie van de windsnelheid (want daar gaat het in eerste instantie om), we eerst de functie die de totaalrendement- λ -kromme representeert moeten opstellen, en vervolgens naar λ differentiëren.

Een complicatie treedt nog op bij het berekenen van de gelijkrichterverliezen. Deze zijn niet in een rendementsfunctie van λ uit te drukken. Een uitweg hierbij is te vinden door een bepaalde stroom aan te nemen ($I_{gen}(0)$) en de bijbehorende gelijkrichterverliezen. Vervolgens kan het optimum van λ bij deze stroom worden berekend, en daarna weer de stroom die de molen levert. Vervolgens weer de gelijkrichterverliezen, de snellopendheid en weer de generatorstroom, enz.

In deze berekening kan ook het verloop van $Eco(i)$ in rekening worden gebracht. Deze is immers ook een functie van de generatorstroom. Aldus ontstaat een iteratieve berekening van de evenredigheidsconstante, generatorstroom en snellopendheid. De gelijkrichterverliezen beïnvloeden de snellopendheid vooral bij een kleine stroom, de evenredigheidsconstante beïnvloedt deze juist vooral bij een grote stroom.

Alzo kunnen bij meerdere windsnelheden (bijvoorbeeld 1, 2, 3...10) de optimale waarden van $Eco(i)$, I_{gen} en λ worden bepaald. Uiteraard met de computer. Met deze optima kunnen,

⁵ A.Kragten, *Explanation for measurements performed on a four poles generator equipped with neodymium magnets*, St.-Oedenrode, 1991

tezamen met de bijbehorende windsnelheid, alle van belang zijnde gegevens worden berekend en in een grafiek worden weergegeven.

Daar we in dit stadium beschikken over een grafiek die het uitgangsvermogen tegen v uitzet, dienen we, om een elektronische schakeling (mutator) te realiseren die de molen op uitgangsvermogen optimaliseert, v te meten. Dit is lastig. We zouden een windmeter kunnen nemen, maar deze meet v buiten, terwijl het gaat om v die tegen de rotor blaast (als de rotor uit de wind is gedraaid, 'ziet' de rotor immers een windsnelheid die beduidend lager ligt). Om in dit probleem te voorzien is het mogelijk v impliciet te bepalen door de uitgangsspanning op de aansluitkabel te meten. Wat een eventuele mutator dan moet regelen, is een verband tussen stroom en spanning. Dit functievoorschrift kan worden gevonden door bij de eerder genoemde windsnelheden te bepalen wat de bijbehorende stromen en spanningen zijn, en deze in een curve tegen elkaar uit te zetten (zie fig. 8, § 14.3). Via een spreadsheet- of wiskundeprogramma kan het functievoorschrift dan worden gevonden. Tot slot moet dit in bijvoorbeeld een computer worden ingebakken, en het 'brein' van de regelaar is klaar.

14. *Energieën en rendementen*

Voor een uitgebreid overzicht van de gebruikte formules wordt naar de volgende hoofdstukken verwezen. Hieronder wordt, mede aan de hand van de deelrendementen, de berekening van het totaalrendement behandeld:

$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$ [Watt]... (1) (vermogen in wind, met πr^2 het rotoroppervlak [m^2])

$P_{as} = P_{wind} C_p$ [Watt]... (2) (asvermogen, met C_p de vermogenscoëfficiënt) [Watt]

$N = v \lambda / (2 \pi r)$ [Omw./s] (toerental)

$P_{phys} = c N$ [Watt] (hystereseverliezen, met c een machine-constante)

$P_{mech} = P_{as} - P_{phys}$ [Watt]... (3) (mechanisch vermogen)

P_{el} = totaal elektrisch vermogen, inclusief verliezen, moet gelijk zijn aan P_{mech} .

De formules van de deelrendementen ontstaan door die van de energieën op elkaar te delen:

' η_{aer} ' = (2)/(1) = C_p (deel energie die rotor omzet)

η_{mech} = (3)/(2) = $1 - P_{phys}/P_{as}$ (mechanisch rendement)

η_{el} = nu te bepalen

Bij de bepaling van de elektrische aspecten van de molen gaan we noodgedwongen omgekeerd tewerk, en beginnen we dus met het rendement. Voor de eenvoud worden een paar aannames gemaakt.

Definitie evenredigheidsconstante:

$E_{co} = E_{gen}/N$ [Volt*sec./Omw.], met E_{gen} de EMK van de generator [Volt]. Deze is stroomafhankelijk, zie hoofdstuk 6.

Definitie kwaliteitsfactor:

$Q = E_{co}^2/R_{gen}$ [Joule*sec./Omw.²], met R_{gen} de interne weerstand van de generator. Feitelijk zegt Q iets over de capaciteit van de generator.

Verder geldt:

$P_{el} = E_{co}^2 N^2 / (R_{gen} + B_{fact} R_{gen} + D_{fact} R_{gen} + K_{fact} R_{gen}) =$

$Q N^2 / (1 + B_{fact} + D_{fact} + K_{fact}) = P_{mech}$. Hierin zijn B_{fact} , D_{fact} en K_{fact} achtereenvolgens de verhouding tussen de belastings-, diode- en kabelweerstand met R_{gen} .

Hieruit volgt:

$$1+B_{\text{fact}}+D_{\text{fact}}+K_{\text{fact}} = Q \cdot N^2 / P_{\text{mech}}, \text{ dus } B_{\text{fact}} = Q \cdot N^2 / P_{\text{mech}} - (1+D_{\text{fact}}+K_{\text{fact}})$$

En het elektrisch rendement:

$$\eta_{\text{el}} = R_{\text{bel}} / (R_{\text{bel}} + R_{\text{gen}} + R_{\text{d}} + R_{\text{k}}) = B_{\text{fact}} / (1+B_{\text{fact}}+D_{\text{fact}}+K_{\text{fact}}) = 1 - P_{\text{mech}} \cdot (1+D_{\text{fact}}+K_{\text{fact}}) / (Q \cdot N^2)$$

Verder volgt de berekening van de optimale belastingsweerstand: $R_{\text{bel}} = B_{\text{fact}} \cdot R_{\text{gen}}$.

In fig. 6 is één en ander weergegeven. Voor de duidelijkheid is in het blokschema de generator onderverdeeld in twee delen: in het eerste deel worden de mechanische verliezen verwerkt, het tweede deel zet de mechanische energie verliesvrij om in elektrische energie. Het derde blok brengt de elektrische verliezen in rekening van de generator en gelijkrichterdiodes en aansluitkabel samen. Deze laatste twee worden niet in een deelrendement uitgedrukt, maar wel in het totaalrendement betrokken.

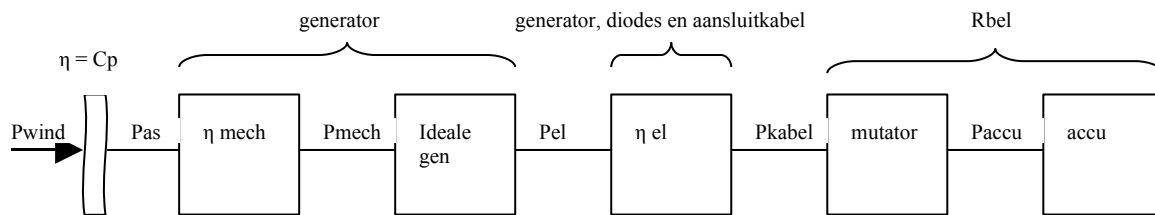


Fig. 6. Blokschema van het elektrische systeem van de Virya.

De zelfinductie van de generator wordt in dit blokschema niet tot uitdrukking gebracht, daar deze via de stroomafhankelijke evenredigheidsconstante wordt verdisconteerd.

Tot slot kan de formule die de totaalrendement- λ -kromme representeert worden berekend door de deelrendementen met elkaar te vermenigvuldigen.

Nog een aspect moet aan de orde komen, want de computer kan met bovengenoemd totaalrendement alleen rekenen als C_p in λ wordt uitgedrukt. Dit functievoorschrift van de rotorkarakteristiek komt ook in de volgende hoofdstukken aan de orde.

15. Computerprogramma geoptimaliseerde WOT-configuratie

In dit hoofdstuk komt de Virya aan bod indien deze op opbrengst geoptimaliseerd zou zijn. Eerst worden de evenredigheidsconstante, generatorstroom en snellopendheid iteratief bepaald, daarna volgen de overige gegevens en tot slot wordt het resultaat in grafieken getoond.

15.1. Berekening evenredigheidsconstante, generatorstroom en snellopendheid

Iteratieve bepaling evenredigheidsconstante, generatorstroom en snellopendheid met behulp van MAPLE voor een geoptimaliseerde WOT-configuratie, ten behoeve van daarna berekende overige gegevens zoals spanningen, stromen en vermogens.

> restart;	Reset, begin programma
> r:=1.65;	Straal rotor
> Eco(0):=22.96223718;	Aanvangswaarde evenredigheidsconstante
> Igen(0):=1;	Aanvangswaarde generatorstroom
> Ud:=1.7;	Drempelspanning diodes

> Rgen:=2.8:	Interne weerstand generator
> Rk:=1.5:	Weerstand aansluitkabel
> Rho:=1.225:	Dichtheid lucht
> c:=10:	Generator-constante in ster-schakeling
> v(3):=3:	Aanvangswaarde windsnelheid
> for n from 3 to 10 do	Berekening onderstaande voor v = 3 t/m 10
> for i from 0 to 19 do	Iteratieve bepaling Eco en Igen in 20 stappen
> Pwind:=evalf(0.5*Rho*Pi*r^2*v(n)^3):	Berekening vermogen in de wind
> Cp:=evalf(-0.3726228817*10^(-7)*l^9+0.6907705556*10^(-5)*l^7-0.0004588201720*1^5+0.01074697010*1^3+0.005851500020*1):	
	Functievoorschrift rotorkarakteristiek
> Pas:=evalf(Pwind*Cp):	Berekening asvermogen
> N:=evalf(v(n)*l/(2*Pi*r)):	Berekening toerental in Omw./sec.
> Phys:=evalf(c*N):	Berekening hystereseverliezen
> Pmech:=evalf(Pas-Phys):	Berekening mechanisch vermogen
> Renmech:=evalf(1-Phys/Pas):	Berekening mechanisch rendement
> Egen:=evalf(Eco(i)*N):	Berekening EMK
> Q:=evalf(Eco(i)^2/Rgen):	Berekening kwaliteitsfactor generator
> Kfact:=evalf(Rk/Rgen):	Berekening kabelfactor
> Rd:=evalf(Ud/Igen(i)):	Berekening diodeweerstand
> Dfact:=evalf(Rd/Rgen):	Berekening diodefactor
> Renel:=evalf(1-Pmech*(1+Dfact+Kfact)/(Q*N^2)):	
	Berekening elektrisch rendement tot mutator
> Rento:=evalf(Cp*Renmech*Renel):	Berekening totaalrendement tot mutator
> f1:=diff(Rento,l):	Differentieer totaalrendement naar l en
> simplify(f1):	reken dit uit
> l:=fsolve(f1=0,l=5..7):	Ken het eerst bepaalde optimum toe aan l en
> lambda(i):=l:	vervolgens aan de huidige lambda
> Bfact:=evalf(Q*N^2/Pmech-(1+Dfact+Kfact)):	
	Berekening belastingsfactor
> Eco(i+1):=evalf(-0.00002648447002*Igen(i)^4-0.01482670907*Igen(i)^2+Eco(0)):	
	Reken de nieuwe waarde van Eco uit
> Igen(i+1):=evalf(Egen/(Rgen+Rd+Rk+Bfact*Rgen)):	
	Bereken de nieuwe generatorstroom
> l:='l':	Ongedaan maken toekenning t.b.v. nieuwe ronde
> od:	Spring terug of stop bij i = 19
> print(v(n));	Druk de huidige waarde van v af
> for i from 18 to 19 do	Neem de 18e en 19e waarde van
> print(evalf([Eco(i),Igen(i),lambda(i)]));	Eco, Igen en lambda, druk deze af en
> od:	beëindig afdrukken hierna
> v(n+1):=v(n)+1:	Verhoog v met 1 en
> od:	spring terug of stop bij v = 10
3	Afgedrukte waarden windsnelheid,
[22.93973754, 1.230209848, 5.170364217]	Eco, Igen en lambda:
[22.93973754, 1.230209848, 5.170364217]	twee waarden ter bepaling significantie
4	
[22.87974698, 2.347211559, 5.405384526]	
[22.87974698, 2.347211559, 5.405384526]	

5

[22.75968889, 3.652810063, 5.602227644]

[22.75968889, 3.652810063, 5.602227644]

6

[22.56029117, 5.090224317, 5.783605492]

[22.56029117, 5.090224317, 5.783605492]

7

[22.26404916, 6.609201689, 5.956501083]

[22.26404917, 6.609201697, 5.956501082]

8

[21.85608614, 8.164949194, 6.124261851]

[21.85608613, 8.164949194, 6.124261852]

9

[21.32683971, 9.715300401, 6.288998770]

[21.32683972, 9.715300401, 6.288998769]

10

[20.67619700, 11.21959885, 6.451681659]

[20.67619704, 11.21959881, 6.451681655]

15.2. *Berekening overige gegevens*

Gebruik makende van de hierboven bepaalde optimale waarden van Eco, Igen en lambda worden in het hier onderstaande MAPLE-programma alle overige van belang zijnde gegevens berekend.

Vanwege de gelijkenis wordt voor de toelichting naar bovenstaand programma verwezen, tenzij anders vermeld.

> restart;

> r:=1.65:

> Ud:=1.7:

> Uaccu:=28:

> Rgen:=2.8:

> Rk:=1.5:

> Rho:=1.225:

> c:=10:

> Renreg:=0.8:

Rendement mutator 80%

> Pwind:=0.5*Rho*Pi*r^2*v^3:

> Cp:=-0.3726228817*10^(-7)*l^9+0.6907705556*10^(-5)*l^7-
0.0004588201720*l^5+0.01074697010*l^3+0.005851500020*l:

Berekening vermogenscoëfficiënt rotor

> Pas:=Pwind*Cp:

> N:=v*l/(2*Pi*r):

> Phys:=c*N:


```

> Pmech:=Pas-Phys:
> Renmech:=1-Phys/Pas:
> Egen:=Eco*N:
> Q:=Eco^2/Rgen:
> Kfact:=Rk/Rgen:
> Rd:=Ud/Igen:
> Dfact:=Rd/Rgen:
> Renel:=1-Pmech*(1+Dfact+Kfact)/(Q*N^2):
> Rento:=Cp*Renmech*Renel:
> Pkabel:=Pwind*Rento:           Berekening maximaal vermogen uit aansluitkabel
> Bfact:=Q*N^2/Pmech-(1+Dfact+Kfact):
> Rbel:=Bfact*Rgen:             Berekening optimale afsluitweerstand
> Ukabel:=Renel*Egen:           Berekening spanning uit de aansluitkabel
> Paccu:=Pkabel*Renreg:         Berekening maximaal vermogen naar de accu
> Iaccu:=Paccu/Uaccu:           Berekening acculaadstroom
> Omver:=Ukabel/Uaccu:         Berekening ideale omzetverhouding
> PRgen:=Igen^2*Rgen:           Berekening vermogensverlies in Rgen
> Pd:=Igen*Ud:                 Berekening verliezen in diodes
> PRk:=Igen^2*Rk:              Berekening verlies in aansluitkabel
> v:=3:                        Toekenning windsnelheid en eerder berekende
> Eco:=22.93973754:            evenredigheidsconstante,
> Igen:=1.230209848:           generatorstroom en
> l:=5.170364217:              snellopendheid
>

```

```

evalf([N,Pwind,Cp,Pas,Phys,Pmech,Renmech,Egen,Q,Rd,Dfact,Renel,Rento,Pkabel,Bfact,Rbel,Ukabel,Paccu,Iaccu,Omver,PRgen,Pd,PRk]);
Bereken de rest

```

```

[1.496161859, 141.4450060, .4042867393, 57.18434027, 14.96161859,
42.22272168, .7383616121, 34.32156039, 187.9398423,
1.381878061, .4935278790, .7963407758, .2377155325,
33.62367493, 7.934667753, 22.21706970, 27.33165803,
26.89893994, .9606764264, .9761306431, 4.237565556,
2.091356742, 2.270124405]

```

```

> v:=4:
> Eco:=22.87974698:
> Igen:=2.347211559:
> l:=5.405384526:
>
evalf([N,Pwind,Cp,Pas,Phys,Pmech,Renmech,Egen,Q,Rd,Dfact,Renel,Rento,Pkabel,Bfact,Rbel,Ukabel,Paccu,Iaccu,Omver,PRgen,Pd,PRk]);

```

```

[2.085560404, 335.2770512, .3962624907, 132.8577194, 20.85560404,
112.0021154, .8430230164, 47.71709435, 186.9581507,
.7242636453, .2586655876, .7528556620, .2514977580,
84.32142665, 5.466073214, 15.30500500, 35.92408467,
67.45714133, 2.409183618, 1.283003023, 15.42632589,
3.990259650, 8.264103155]

```

```

> v:=5:
> Eco:=22.75968889:
> Igen:=3.652810063:
> l:=5.602227644:
>
evalf([N,Pwind,Cp,Pas,Phys,Pmech,Renmech,Egen,Q,Rd,Dfact,Renel,Rento,Pkabel,Bfact,Rbel,Ukabel,Paccu,Iaccu,Omver,PRgen,Pd,PRk]);

[2.701885521, 654.8379908, .3842859302, 251.6450264, 27.01885521,
224.6261712, .8926310780, 61.49407388, 185.0012280,
.4653951261, .1662125450, .7169307198, .2459255646,
161.0414026, 4.310477026, 12.06933566, 44.08699066,
128.8331221, 4.601182932, 1.574535380, 37.36045981,
6.209777107, 20.01453204]

> v:=6:
> Eco:=22.56029117:
> Igen:=5.090224317:
> l:=5.783605492:
>
evalf([N,Pwind,Cp,Pas,Phys,Pmech,Renmech,Egen,Q,Rd,Dfact,Renel,Rento,Pkabel,Bfact,Rbel,Ukabel,Paccu,Iaccu,Omver,PRgen,Pd,PRk]);

[3.347234192, 1131.560048, .3692764557, 417.8584838, 33.47234192,
384.3861419, .9198955072, 75.51457799, 181.7738349,
.3339734939, .1192762478, .6876369408, .2335873481,
264.3181107, 3.643300939, 10.20124264, 51.92661339,
211.4544885, 7.551946022, 1.854521906, 72.54907408,
8.653381339, 38.86557540]

> v:=7:
> Eco:=22.26404916:
> Igen:=6.60920169:
> l:=5.956501083:
>
evalf([N,Pwind,Cp,Pas,Phys,Pmech,Renmech,Egen,Q,Rd,Dfact,Renel,Rento,Pkabel,Bfact,Rbel,Ukabel,Paccu,Iaccu,Omver,PRgen,Pd,PRk]);

[4.021846143, 1796.875447, .3517346942, 632.0234355, 40.21846143,
591.8049741, .9363655536, 89.54258023, 177.0313875,
.2572171466, .09186326665, .6636285524, .2185675580,
392.7386784, 3.211054157, 8.990951642, 59.42301291,
314.1909428, 11.22110510, 2.122250461, 122.3083315,
11.23564287, 65.52232047]

> v:=8:
> Eco:=21.85608614:
> Igen:=8.164949194:
> l:=6.124261852:

```

```
>
evalf([N,Pwind,Cp,Pas,Phys,Pmech,Renmech,Egen,Q,Rd,Dfact,Renel,Rento,Pkabel,Bfact,Rb
el,Ukabel,Paccu,Iaccu,Omver,PRgen,Pd,PRk]);
```

```
[4.725849922, 2682.216410, .3320405204, 890.6045324, 47.25849922,
843.3460332, .9469366060, 103.2885830, 170.6030362,
.2082070519, .07435966138, .6436268125, .2023699942,
542.8001190, 2.907869608, 8.142034897, 66.47930146,
434.2400952, 15.50857483, 2.374260765, 186.6659070,
13.88041363, 99.99959301]
```

```
> v:=9:
> Eco:=21.32683972:
> Igen:=9.715300401:
> l:=6.28899877:
```

```
>
evalf([N,Pwind,Cp,Pas,Phys,Pmech,Renmech,Egen,Q,Rd,Dfact,Renel,Rento,Pkabel,Bfact,Rb
el,Ukabel,Paccu,Iaccu,Omver,PRgen,Pd,PRk]);
```

```
[5.459592225, 3819.015161, .3105002484, 1185.805156, 54.59592225,
1131.209234, .9539587748, 116.4358483, 162.4407473,
.1749817227, .06249347238, .6266116326, .1856051456,
708.8288651, 2.682074909, 7.509809746, 72.96005701,
567.0630922, 20.25225330, 2.605716321, 264.2837733,
16.51601068, 141.5805928]
```

```
> v:=10:
> Eco:=20.67619703:
> Igen:=11.21959887:
> l:=6.451681656:
```

```
>
evalf([N,Pwind,Cp,Pas,Phys,Pmech,Renmech,Egen,Q,Rd,Dfact,Renel,Rento,Pkabel,Bfact,Rb
el,Ukabel,Paccu,Iaccu,Omver,PRgen,Pd,PRk]);
```

```
[6.223133496, 5238.703925, .2874499833, 1505.865356, 62.23133496,
1443.634021, .9586740377, 128.6707343, 152.6804013,
.1515205686, .05411448877, .6118443306, .1686064538,
883.2792912, 2.506024771, 7.016869360, 78.72645930,
706.6234330, 25.23655117, 2.811659260, 352.4623166,
19.07331808, 188.8190982]
```

> 15.3. *Grafieken geoptimaliseerde gegevens*

Uit bovenstaande berekende gegevens kunnen fig. 7a t/m d worden samengesteld:

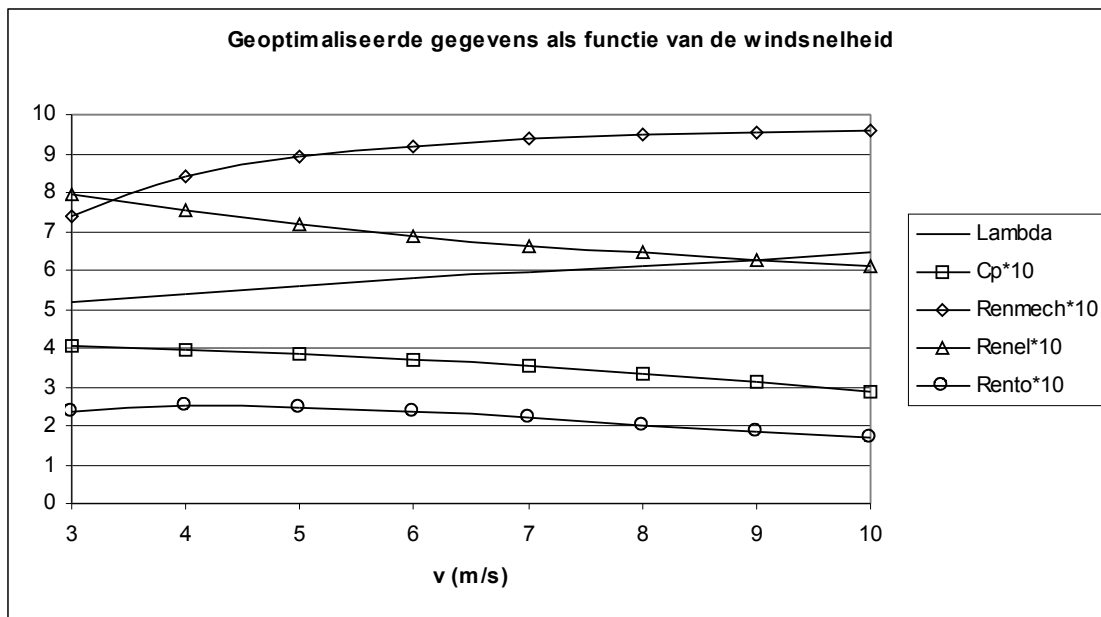


Fig. 7a. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid:

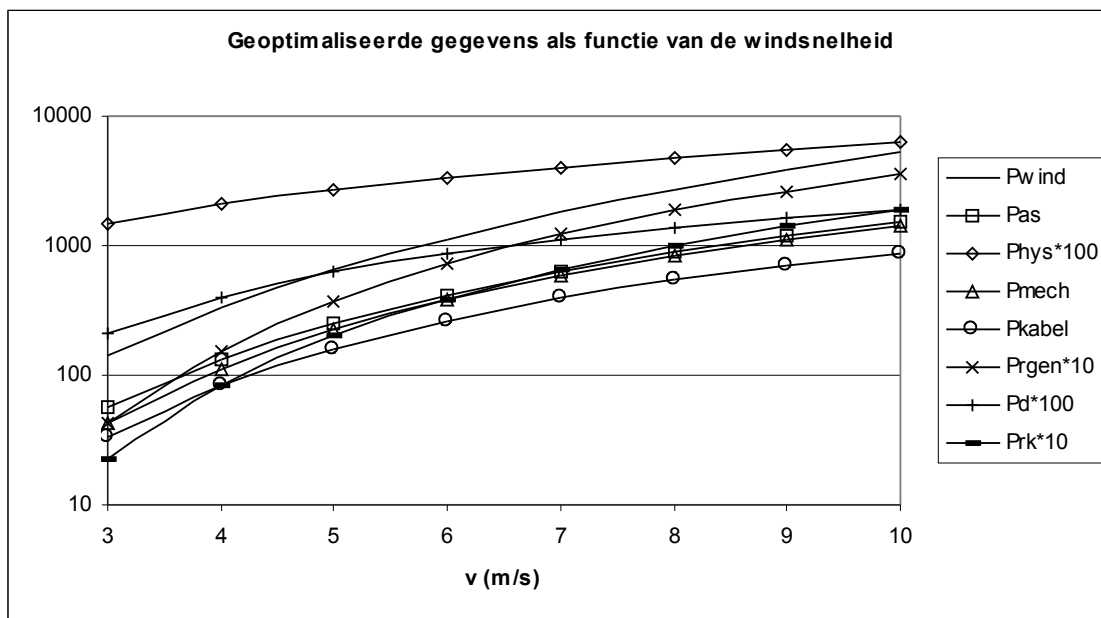
Lambda = snellopendheid []

Cp = vermogenscoëfficiënt []

Renmech = mechanisch rendement van de generator []

Renel = elektrisch rendement van de generator []

Rento = het totaalrendement []



Figuur 7b. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid:

Pwind = vermogen in de wind die tegen de rotor blaast [Watt]

Pas = het asvermogen van de generator [Watt]

Phys = hystereseverliezen in de generator [Watt]

Pmech = asvermogen minus hystereseverliezen [Watt]

P_{kabel} = het vermogen uit de aansluitkabel van de generator [Watt]

P_{Rgen} = vermogensverlies in R_{gen} [Watt]

P_d = vermogensverlies in de gelijkrichtdiodes [Watt]

P_{Rk} = de vermogensverliezen in de aansluitkabel [Watt]

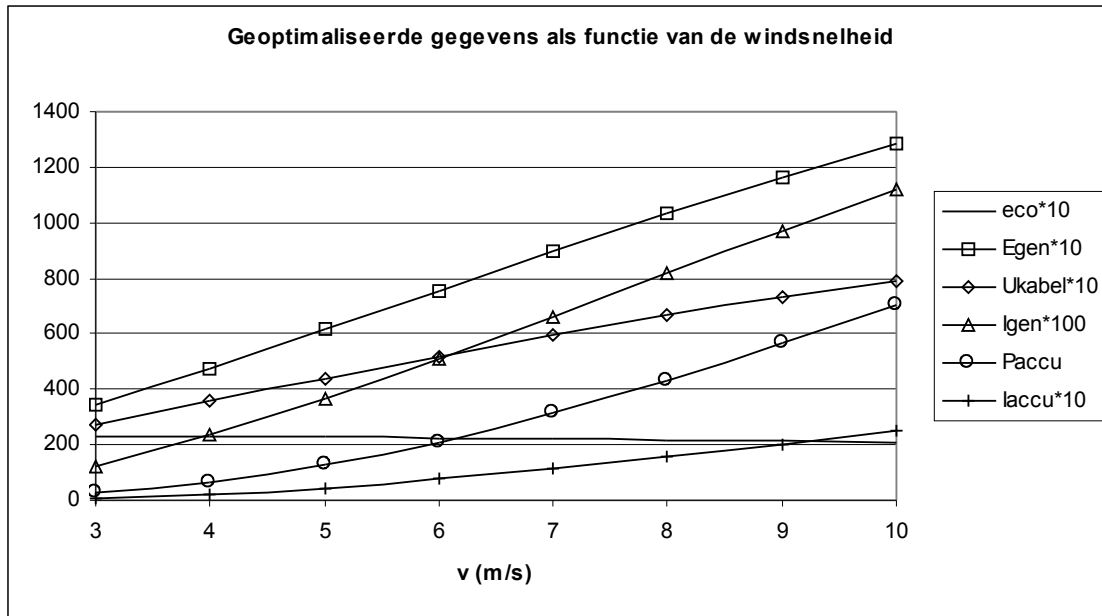


Fig. 7c. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid:

E_{co} = de evenredigheidsconstante van de generator [Volt*sec/Omw.]

E_{gen} = de opgewekte EMK van de generator [Volt]

U_{kabel} = de spanning op de aansluitkabel [Volt]

I_{gen} = de stroom die de generator levert (na gelijkrichting) [Ampère]

P_{accu} = het laadvermogen van de accu [Watt]

I_{accu} = de accu laadstroom [Ampère]

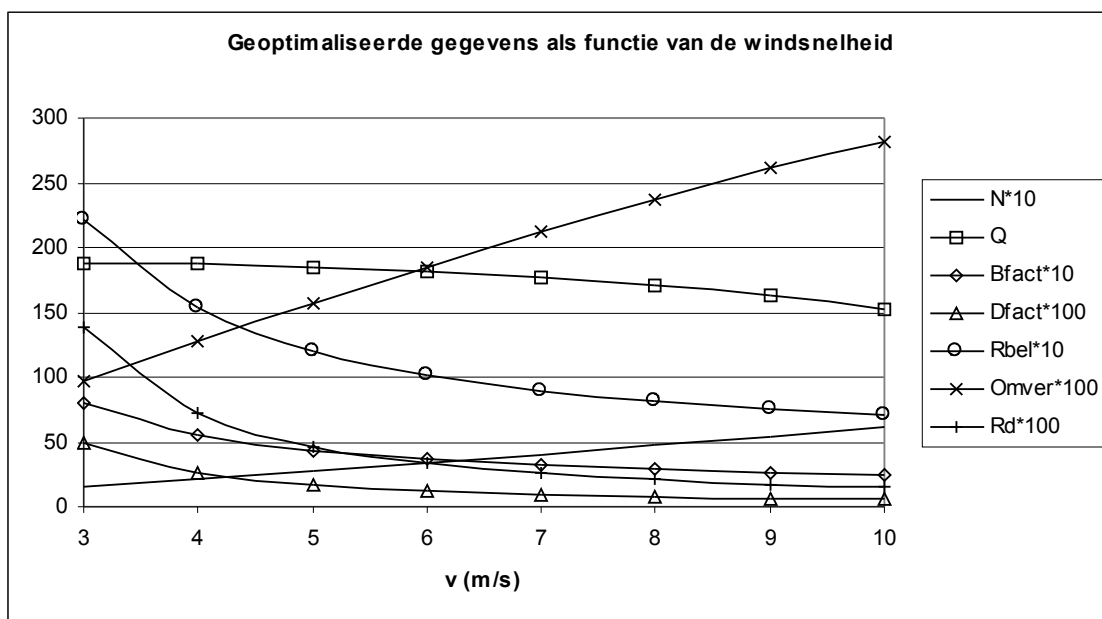


Fig. 7d. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid:

N = het toerental van de rotor en generator [Omw./sec.]

Q = de kwaliteitsfactor van de generator [Joule*sec./Omw²]

B_{fact} = de belastingfactor: verhouding tussen belasting- en generatorweerstand []

D_{fact} = de diodefactor: verhouding tussen diode- en generatorweerstand []

R_{bel} = de optimale belastingweerstand [Ohm]

Om_{ver} = de optimale omzetverhouding tussen U_{kabel} en U_{accu} (moet de mutator transformeren) []

R_d := de diodeweerstand [Ohm]

In fig. 8 is de eerder genoemde I_{gen} - U_{kabel} -curve weergegeven met daarin gemarkeerd de windsnelheden 3 t/m 10 m/s. Deze voldoet ongeveer aan het functievoorschrift: $I_{gen} = 0,00140 \cdot U_{kabel}^2 + 0,04621 \cdot U_{kabel} - 1,09473$

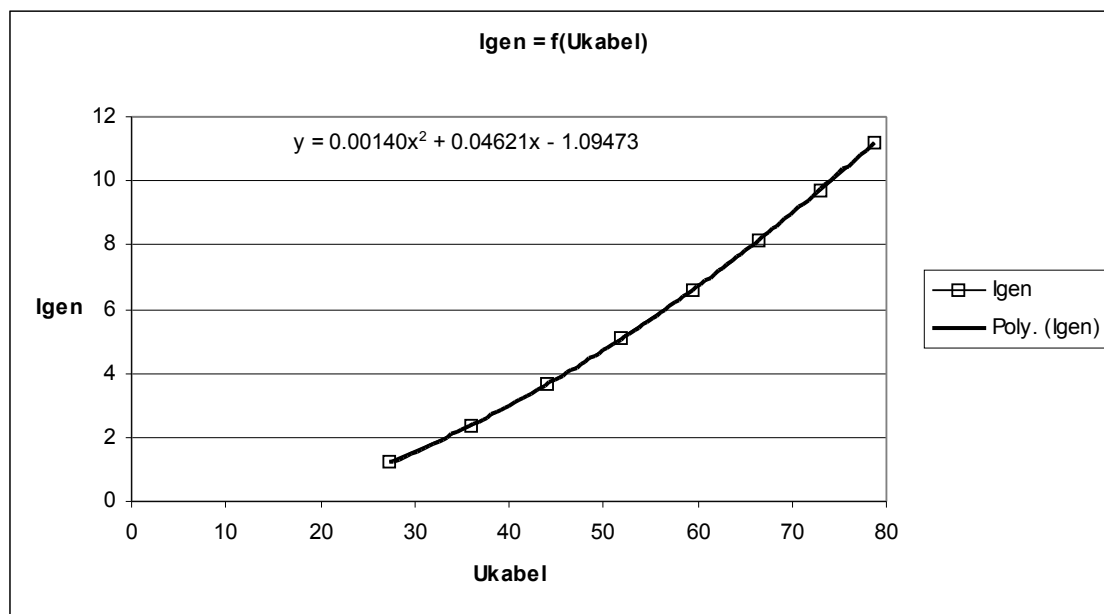


Fig. 8. $I_{gen} = f(U_{kabel})$ bij een geoptimaliseerde Virya met een aansluitkabel die een weerstand heeft van 1,5 Ohm.

16. Computerprogramma niet-geoptimaliseerde WOT-configuraties

In dit hoofdstuk komt de niet-geoptimaliseerde Virya aan bod, zoals die op dit moment op het WOT-terrein staat. Eerst wordt de opbrengst berekend als de generator in delta is geschakeld, daarna in ster. Vervolgens wordt het resultaat in grafieken getoond, en er wordt beëindigd met een berekening van de werkelijke jaaropbrengst met behulp van de lokale windsnelheidsverdeling.

16.1. Generator in delta-schakeling

Het hier volgende MAPLE-programma berekent iteratief de evenredigheidsconstante, snellopendheid en acculaadstroom van de niet-geoptimaliseerde Virya op het WOT-terrein als de generator daarvan in delta is geschakeld.

```

> restart;                               Reset, begin programma
> r:=1.65;                               Straal rotor
> Eco(0):=22.96223718/3^0.5;             Aanvangswaarde evenredigheidsconstante
> Rgen:=2.8/3;                           Interne weerstand generator
> c:=15;                                 Generatorconstante in delta-schakeling
> Ud:=1.7;                               Drempelspanning diodes
> Uaccu:=28;                             Accuspanning
> Rk:=1.5;                               Weerstand aansluitkabel
> Rho:=1.225;                             Dichtheid lucht
> v(4):=4;                               Aanvangswaarde windsnelheid
> for n from 4 to 10 do                  Berekening voor v = 4 t/m 10
> for i from 0 to 49 do                  Iteratieve bepaling Eco in 50 stappen
> N:=v(n)*l/(2*Pi*r);                   Berekening toerental
> Egen:=Eco(i)*N;                       Berekening EMK
> Igen:=(Egen-Ud-Uaccu)/(Rgen+Rk);       Berekening generatorstroom
> Pel:=Egen*Igen;                       Berekening elektrisch generatorvermogen
> Pwind:=0.5*Rho*Pi*r^2*v(n)^3;         Berekening vermogen in de wind
> Cp:=-0.3726228817*10^(-7)*l^9+0.6907705556*10^(-5)*l^7-
0.0004588201720*1^5+0.01074697010*1^3+0.005851500020*1:
> Pas:=Pwind*Cp;                         Functievoorschrift rotorkarakteristiek
> Phys:=c*N;                             Berekening asvermogen
> Pmech:=Pas-Phys;                       Berekening hystereseverliezen
> l:=fsolve(Pel=Pmech,l=3..8);           Berekening mechanisch vermogen
> lambda(i):=l;                          Los vergelijking op en ken waarde toe aan l
> Iaccu(i):=Igen;                        en vervolgens aan de huidige lambda(i)
> Eco(i+1):=evalf(-0.00002648447002/3^0.5*(Igen/3^0.5)^4-
0.01482670907/3^0.5*(Igen/3^0.5)^2+Eco(0)); Ken de tijdelijke waarde van Igen toe aan Iaccu(i)
>                                         Reken de nieuwe waarde van Eco uit
> l:=l';                                 Ongedaan maken toekenning t.b.v. nieuwe ronde
> od:                                     Spring terug of stop bij i = 50
> print(v(n));                           Druk huidige waarde v af
> for i from 48 to 49 do                  Neem 48e en 49e waarde van
> print(evalf([Eco(i),lambda(i),Iaccu(i)])); Eco, lambda en Iaccu en druk deze af en
> od:                                     beëindig afdrukken hierna
> v(n+1):=v(n)+1;                        Verhoog v met 1
> od:                                     Spring terug of stop bij v = 10
>
4                                         Afgedrukte waarden windsnelheid,
[13.25013344, 6.560851228, 1.57851264] Eco, lambda en acculaadstroom:
[13.25013344, 6.560851228, 1.57851264] twee waarden ter bepaling significantie
5
[13.20854627, 6.232547471, 4.11095285]
[13.20854627, 6.232547471, 4.11095285]
6
[13.11687773, 6.129280667, 6.91619022]

```

```

[13.11687773, 6.129280667, 6.91619022]
7
[12.96257681, 6.140006507, 9.87928625]
[12.96257681, 6.140006507, 9.87928625]
8
[12.73583000, 6.214791656, 12.89479074]
[12.73583000, 6.214791656, 12.89479074]
9
[12.43208369, 6.327644116, 15.85939230]
[12.43208369, 6.327644116, 15.85939230]
10
[12.05495831, 6.462954420, 18.67836725]
[12.05495831, 6.462954420, 18.67836725]

```

16.2. Generator in ster-schakeling

Onderstaand MAPLE-programma berekent iteratief de evenredigheidsconstante, snellopendheid en acculaadstroom van de niet-geoptimaliseerde Virya op het WOT-terrein als de generator daarvan in ster is geschakeld. Vanwege de gelijkenis wordt voor de toelichting naar de voorgaande delta-variant verwezen, tenzij anders vermeld.

```

> restart;
> r:=1.65:
> Eco(0):=22.96223718:
> Rgen:=2.8:
> c:=10:
> Ud:=1.7:
> Uaccu:=28:
> Rk:=1.5:
> Rho:=1.225:
> v(4):=4:
> for n from 4 to 10 do
> for i from 0 to 49 do
> N:=v(n)*l/(2*Pi*r):
> Egen:=Eco(i)*N:
> Igen:=(Egen-Ud-Uaccu)/(Rgen+Rk):
> Pel:=Egen*Igen:
> Pwind:=0.5*Rho*Pi*r^2*v(n)^3:
> Cp:=-0.3726228817*10^(-7)*l^9+0.6907705556*10^(-5)*l^7-
0.0004588201720*l^5+0.01074697010*l^3+0.005851500020*l:
> Pas:=Pwind*Cp:
> Phys:=c*N:
> Pmech:=Pas-Phys:
> l:=fsolve(Pel=Pmech,l=3..8):
> lambda(i):=l:
> Iaccu(i):=Igen:
> Eco(i+1):=evalf(-0.00002648447002*Igen^4-0.01482670907*Igen^2+Eco(0)):
> l:='l':

```

Generatorconstante in ster-schakeling


```

> od:
> print(v(n));
> for i from 48 to 49 do
> print(evalf([Eco(i),lambda(i),Iaccu(i)]));
> od:
> v(n+1):=v(n)+1:
> od:
>
4
[22.84579069, 4.727170744, 2.783278255]
[22.84579069, 4.727170744, 2.783278255]
5
[22.61936340, 4.581456919, 4.716116477]
[22.61936340, 4.581456919, 4.716116477]
6
[22.15773210, 4.682945972, 7.058746657]
[22.15773210, 4.682945972, 7.058746657]
7
[21.32422702, 4.966249305, 9.722078897]
[21.32422702, 4.966249305, 9.722078897]
8
[20.06491863, 5.357715613, 12.38491336]
[20.06491863, 5.357715613, 12.38491336]
9
[18.53034157, 5.772631004, 14.68873210]
[18.53034156, 5.772631006, 14.68873209]
10
[16.96024243, 6.153065287, 16.50247867]
[16.96024237, 6.153065297, 16.50247863]

```

16.3. *Grafieken niet-geoptimaliseerde gegevens bij generator in ster-schakeling*

Uit bovenstaande berekende gegevens kunnen fig. 9a t/m d worden samengesteld:

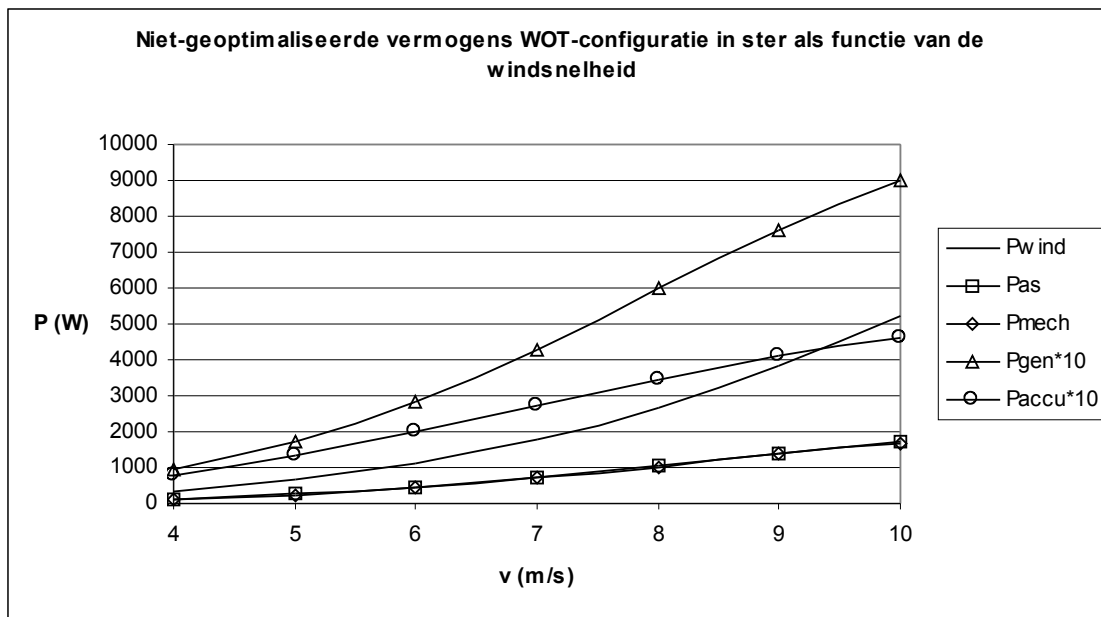


Fig. 9a. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid van de niet-geoptimaliseerde WOT-configuratie in ster:

P_{wind} = vermogen in de wind die tegen de rotor blaast [Watt]

P_{as} = het asvermogen van de generator [Watt]

P_{mech} = het asvermogen minus de hystereseverliezen [Watt]

P_{gen} = het elektrische vermogen geleverd door de generator [Watt]

P_{accu} = het laadvermogen van de accu [Watt]

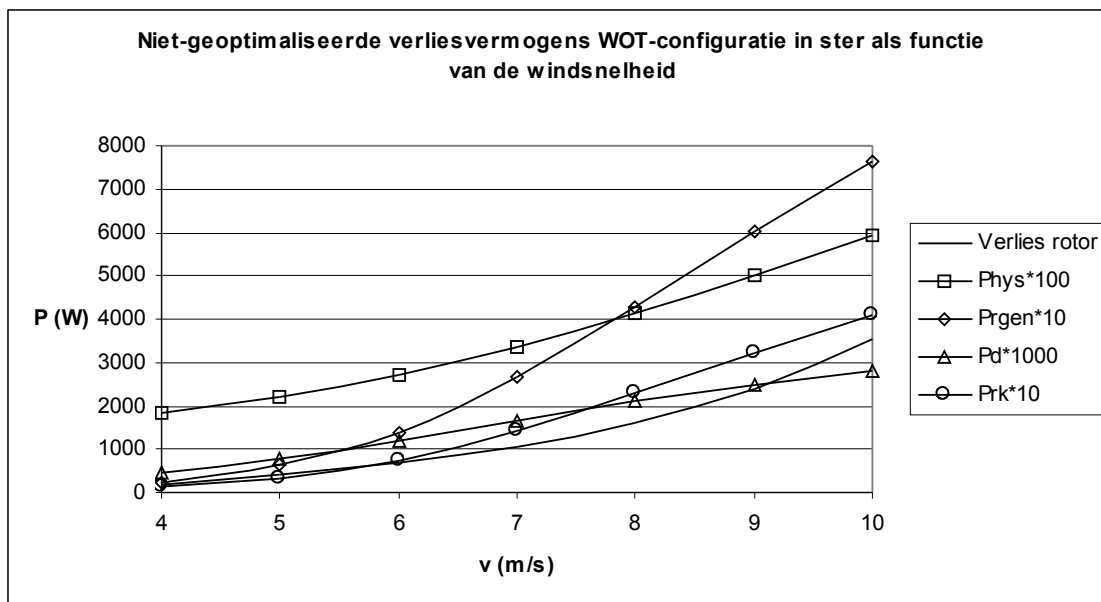


Fig. 9b. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid van de niet-geoptimaliseerde WOT-configuratie in ster:

Verlies rotor = het aandeel in P_{wind} dat de rotor niet omzet [Watt]

Phys = hystereseverliezen in de generator [Watt]
 PRgen = vermogensverlies in Rgen [Watt]
 Pd = vermogensverlies in de gelijkrichtdiodes [Watt]
 PRk = de vermogensverliezen in de aansluitkabel [Watt]

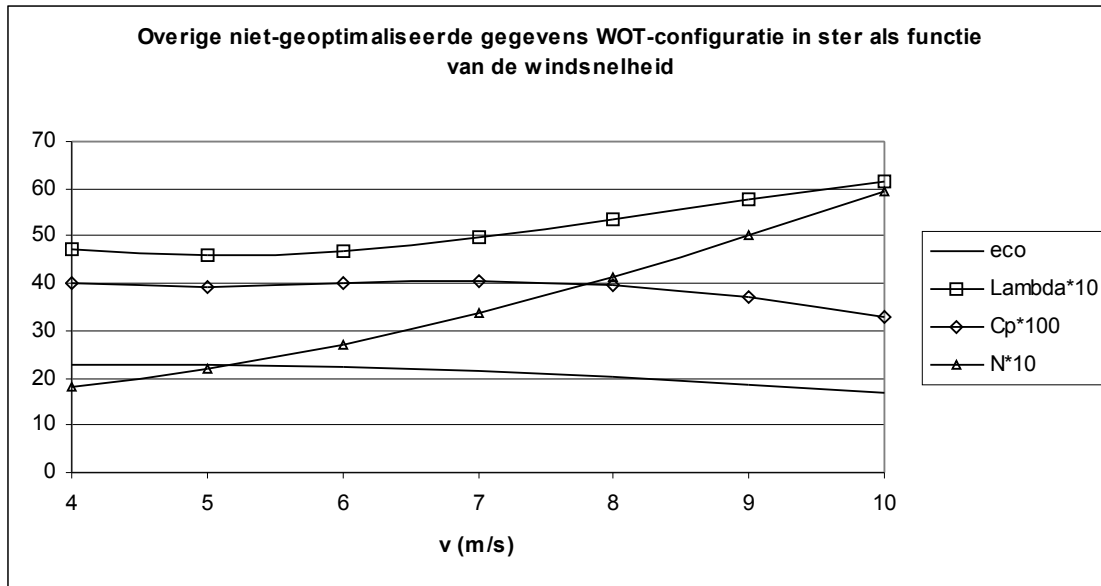


Fig. 9c. Diverse grootheden als functie van de windsnelheid van de niet-geoptimaliseerde WOT-configuratie in ster:

Eco = de evenredigheidsconstante van de generator [Volt*sec./Omw.]
 Lambda = snellopendheid []
 Cp = vermogenscoëfficiënt []
 N = toerental (in Omw./sec.)

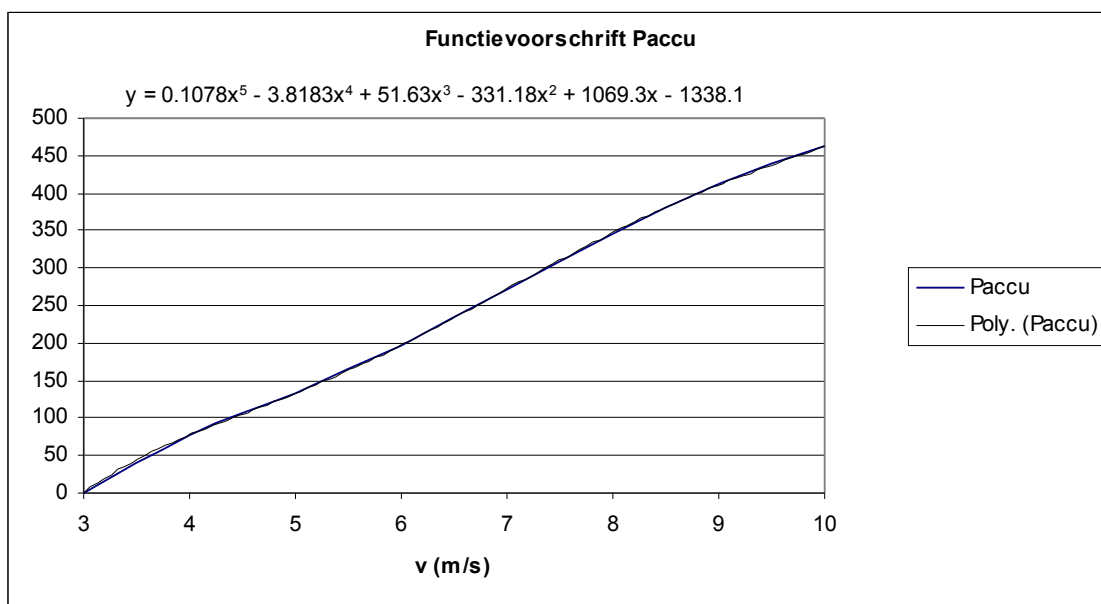


Fig. 9d. Paccu als functie van de windsnelheid.

16.4. Sankey-diagram niet-geoptimaliseerde Virya in ster-schakeling

Onderstaand Sankey-diagram toont overzichtelijk de grootte van de (verlies-)vermogens bij een windsnelheid op de rotor van 7 m/s:

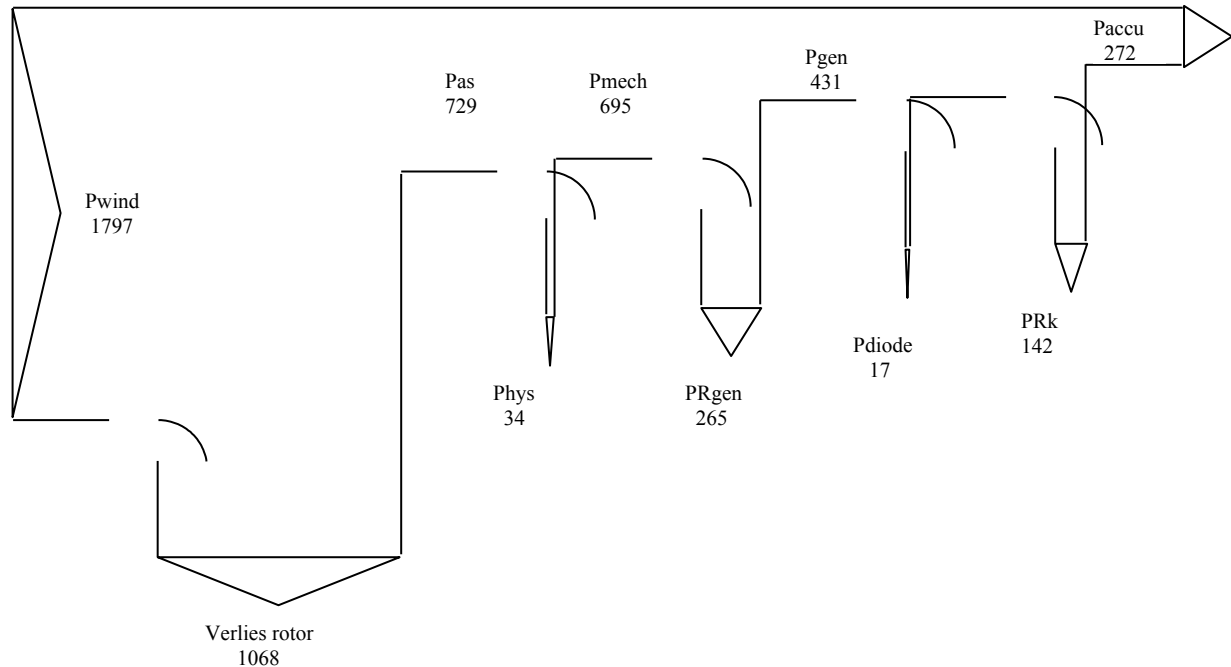


Fig. 10. Sankey-diagram van de niet-geoptimaliseerde WOT-acculader in ster bij een windsnelheid op de rotor van 7 m/s.

16.5. Berekening jaaropbrengst aan de hand van de windsnelheidsverdeling

In deze paragraaf wordt de werkelijk omgezette energie van de Virya berekend. Daarbij wordt uitgegaan van de huidige, niet-geoptimaliseerde situatie in ster. Dit sluit tevens aan bij de berekeningen in § 15.2., en de grafieken in § 15.3.

Het vermogen van de molen is een functie van de windsnelheid. Als bekend is hoelang op jaarbasis een bepaalde windsnelheid voorkomt, kan de geleverde energie door die windsnelheid worden berekend. Als men dit bovendien bij iedere voorkomende windsnelheid doet, en deze vermogens optelt, weet men de totale omgezette energie.

Een belangrijk hulpmiddel daarbij is een grafiek met daarin aangegeven de kans dat een bepaalde windsnelheid voorkomt. Deze kansdichtheid (KDH) verloopt via een zogenoemde Weibull-functie. Als men deze functie integreert over 0 tot oneindig, levert dat als uitkomst 1 op, want de kans dat het altijd min of meer waait, is uiteraard 100%.

Algemeen geldt dat de $KDH = f(v) = k/c^k \cdot v^{(k-1)} \cdot \exp(-(v/c)^k)$, waarin c en k respectievelijk de schaal- en vorm-parameter (beide reëel en > 0). Deze c en k moeten niet worden verward met de generator-constanten: ze hebben hier een andere betekenis. De waarden van c en k hangen af van de locatie: de terreinruwheid, de gemiddelde windsnelheid en de hoogte. Voor Twente⁶ geldt: $c = 4,19$ en $k = 1,75$. Hiermee kan in een grafiek de kans als functie van v worden geplot.

⁶ Ontwerpverantwoording Zelfbouwmolen, intern rapport van de Werkgroep OntwikkelingsTechnieken, Enschede, 2004

Omdat de rotor van de Virya bij benadering vanaf $v = 9$ m/s een constante windsnelheid ‘ziet’, valt de berekening van de totale verwachte energieopbrengst uiteen in twee delen. Van $v = 3$ (begin energielevering Virya) tot $v = 9$ m/s wordt de KDH vermenigvuldigd met de vermogens-windsnelheids-overbrengingsfunctie (VWO, § 15.3., fig. 9d) van de molen, alsmede met het aantal seconden per jaar. Het resultaat is de energieverdeling (EV): een kansfunctie van de geleverde energie van de Virya. Het geeft het aantal Joules dat per windsnelheid kan worden verwacht. Door deze EV nu te integreren over v tussen 3 en 9 m/s, berekent men de totale energiekans tussen het aanlopen en merkbaar kruien van de molen. Tussen $v = 9$ en 35 m/s wordt door een integraal van de KDH berekend hoelang deze situatie zich naar verwachting voordoet. Men krijgt dan de cumulatieve dichtheidsfunctie (CDF). Door deze tijd te vermenigvuldigen met het geleverde vermogen bij $v = 9$, berekent men deze energiekans. Tot slot moeten de energiekansen van beide intervallen worden opgeteld voor de totale verwachte jaaropbrengst. Het aantal kWh berekent men door het aantal Joules de delen door 1000 en 3600. Een en ander is verwerkt in het volgende MAPLE-programma: N.B. Omdat de molen voornamelijk accu’s laadt, is de werkelijk te benutten energie zo’n 40% minder, zie hoofdstuk 8, ‘De accu’.

> restart;	Reset, begin programma
> c:=4.19;	Toekenning c
> k:=1.75;	Toekenning k
> Rho:=1.225;	Dichtheid lucht
> r:=1.65;	Straal rotor
> KDH:=k/c^k*v^(k-1)*exp(-(v/c)^k);	Kans-dichtheid windsnelheid
> VWO:=0.10778*v^5-3.81831*v^4+51.63010*v^3-331.17678*v^2+1069.27534*v-1338.05684;	Vermogensfunctie Virya in ster
> EV:=KDH*VWO*365*24*3600;	Berekening energieverdeling
> E1:=evalf(int(EV,v=3..9));	Integreer EV over $v = 3$ t/m 9 en
E1 := 2379085765.	reken aantal joules stap 1 uit
> Uaccu:=28;	Toekenning accuspanning
> Iaccu9:=14.69;	Toekenning laadstroom bij $v = 9$
> CDF:=evalf(int(KDH,v=9..35));	Integreer KDH t.b.v. CDF en
CDF := .2212392506e-1	reken de kans uit dat v zit tussen 9 en 35
> Paccu9:=Uaccu*Iaccu9;	Bereken laadvermogen stap 2
> E2:=CDF*Paccu9*365*24*3600;	Bereken aantal Joules stap 2
E2 := 286978005.4	
> Etot:=E1+E2;	Tel E1 en E2 op,
Etot := 2666063770.	en reken dit uit
> kWh:=Etot/1000/3600;	Omrekenen Joules naar kWh
kWh := 740.5732695	Bereken totale hoeveelheid kWh per jaar
>	

17. *Vergelijking eerder genoemde configuraties*

Tot slot nog in twee grafieken een vergelijking van de opbrengst en snellopendheid van de eerder genoemde situaties:

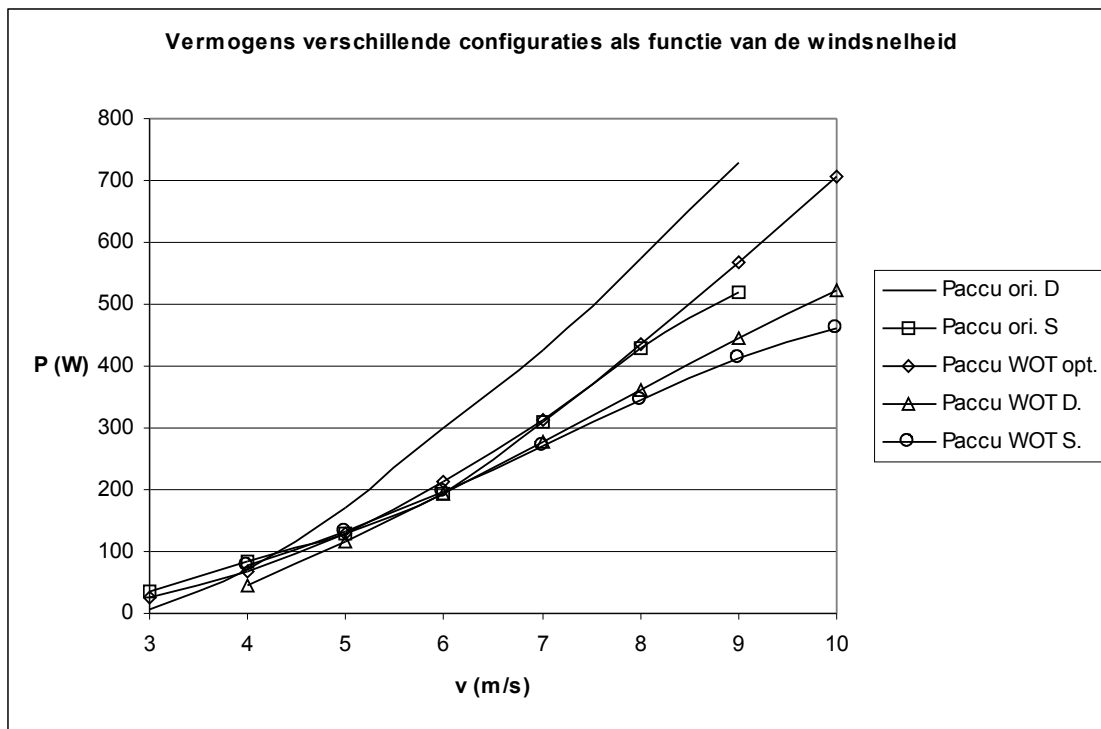


Fig. 11a. Vergelijking vermogens origineel en WOT-configuratie: delta, ster en geoptimaliseerd.

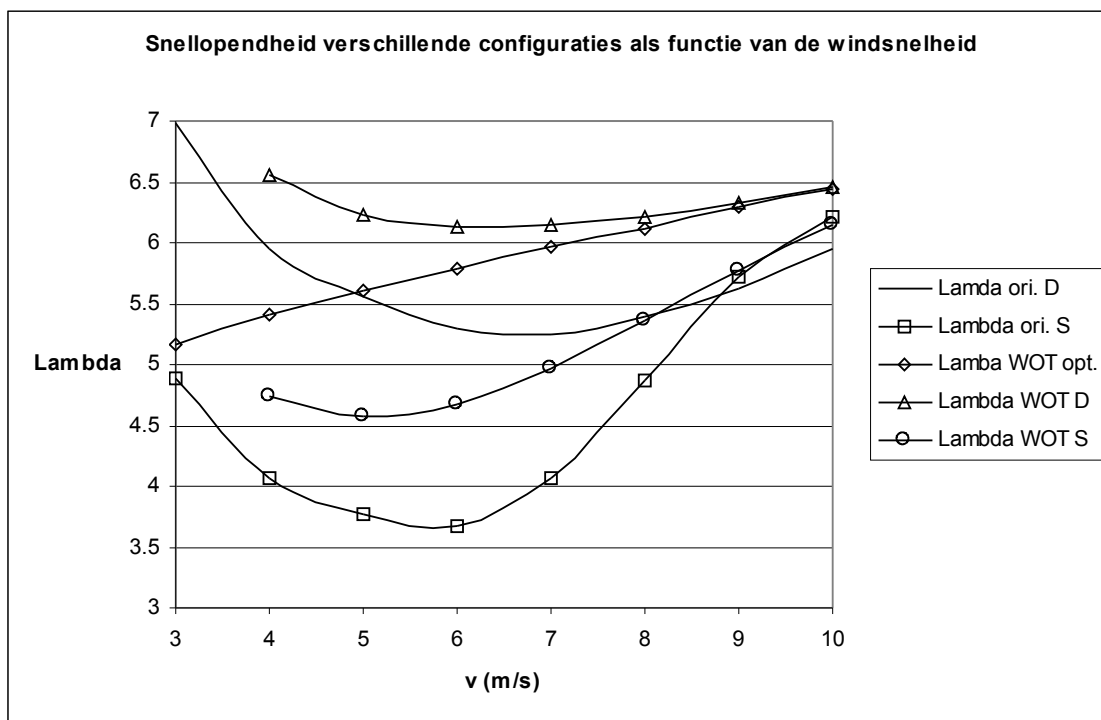


Fig. 11b. Vergelijking snellopendheid origineel en WOT-configuratie: delta, ster en optimaal

18. De toepassing van een andere windgenerator op de genoemde voorbeelden

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het geval dat men een molen wil doorrekenen, waarvan de rotor-, generator-, kabel- en accu-karakteristieken niet overeenkomen met de voorbeelden eerder genoemd in dit rapport. Het geeft aan wat men dan moet doen. Achtereenvolgens worden behandeld de rotor, de generator, de aansluitkabel en de accu.

18.1. *Het gebruik van een andere rotor*

Meestal wordt bij een molen de CP- λ -kromme van de rotor gegeven. Misschien ook het functie-voorschrift, maar als dit niet het geval is, is deze met MAPLE eenvoudig te bepalen. Voor een aantal waarden van λ moet dan de bijbehorende Cp-waarde bekend zijn. Als voorbeeld wordt hier het functie-voorschrift van de Cp- λ -kromme bepaald aan de hand van een aantal punten zoals die van de rotor van de Virya 3.3 bekend zijn (zie fig. 2).

> restart;	Reset, begin programma
> X:=[0,1,2,3,4,5,6,7,8];	Invoer Lambda
X := [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]	Bevestiging Lambda
> Y:=[0,0.02,0.08,0.21,0.35,0.4,0.35,0.2,0];	Invoer Cp
Y := [0, .02, .08, .21, .35, .4, .35, .2, 0]	Bevestiging Cp
> with(stats):with(describe):count(X);count(Y);	Tel de waarden
9	
9	Controle: het klopt.
> with(fit);	Activeer pakket
[leastmediansquare, leastsquare]	Beschikbaarheid pakket
> leastsquare[[x,y],y=a*x^9+b*x^7+c*x^5+d*x^3+e*x,{a,b,c,d,e}](X,Y);	Zoek functie
y = -.3726228817 10 ⁽⁻⁷⁾ x ⁹ + .6907705556 10 ⁽⁻⁵⁾ x ⁷ - .0004588201720 x ⁵	Gevonden functie
+ .01074697010 x ³ + .005851500020 x	Stel f1 = functie
> f1:=rhs(%);	
f1 := -.3726228817 10 ⁽⁻⁷⁾ x ⁹ + .6907705556 10 ⁽⁻⁵⁾ x ⁷	
- .0004588201720 x ⁵ + .01074697010 x ³ + .005851500020 x	Bevestiging f1
>	
points:=plot([[0,0],[1,0.02],[2,0.08],[3,0.21],[4,0.35],[5,0.4],[6,0.35],[7,0.2],[8,0]],style=point,symbol=diamond);	Plot punten
> grafiek:=plot({f1},x=0..8);	Plot grafiek op gegeven interval
> with(plots):display({points,grafiek});	Toon punten en grafiek op scherm

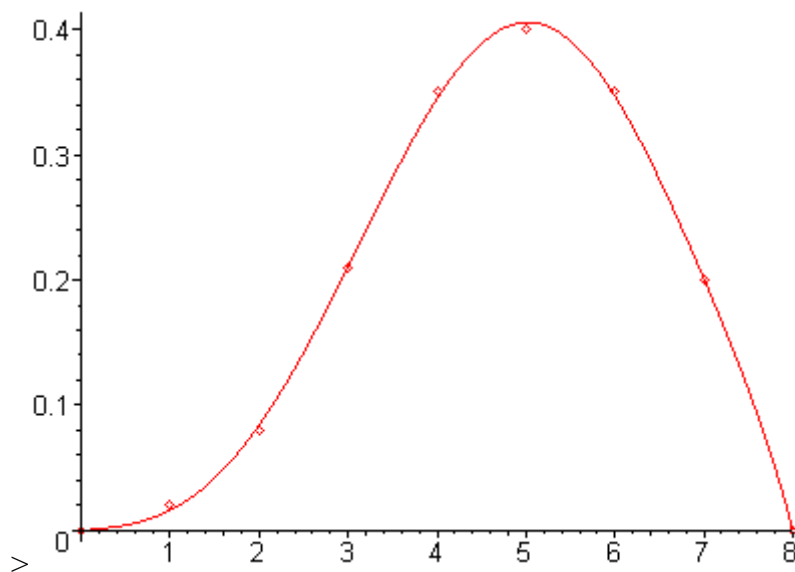


Fig. 12. Het blijkt dat er een mooie fitting ontstaat als de oneven machten t/m 9 worden genomen.

18.2. *Het gebruik van een andere generator*

Van de generator moeten de onbelaste en belaste mechanische vermogenscurven bekend zijn, om respectievelijk de lineaire verliezen en de evenredigheidsconstante te bepalen.

18.2.1. Bepaling van de lineaire of mechanische verliezen (c-factor)

Uit de onbelaste mechanische vermogenscurve blijkt wat het toegevoerde mechanische vermogen is, indien geen vermogen aan de generator wordt onttrokken. Dit toegevoerde vermogen gaat geheel op aan de hysteres- en lagerverliezen. Het zal blijken dat dit vermogen zo goed als evenredig met het toerental is. Door nu het vermogen (in Watt) te delen door het toerental (in Omw./s), berekent men de c-factor. Deze moet in het computerprogramma worden ingevoerd.

Overigens blijkt dat de c-factor in delta-schakeling hoger is dan in ster-schakeling. Dit komt waarschijnlijk doordat er in delta-schakeling door eventuele asymmetrieën in de generator, zelfs in onbelaste toestand, stromen vloeien in de spoelen die verliezen veroorzaken.

18.2.2. Bepaling van de evenredigheidsconstante (Eco)

Nu de c-factor bekend is, kan, met behulp van de mechanische vermogenskarakteristiek bij belasting, ook de stroomafhankelijke evenredigheidsconstante worden uitgerekend. Hieronder worden eerst de gegevens van de Virya in ster weergegeven en uitgerekend in een spreadsheet. Daarna wordt met MAPLE het functievoorschrift bepaald van het verband tussen de generatorstroom en de evenredigheidsconstante.

Excel:

N	Pas	c	c*N	Pmech	Rgen	Igen	EMK	Eco
---	-----	---	-----	-------	------	------	-----	-----

0	0	10	0	0	2,8	0	0#DEEL/0!
1	190	10	10	180	2,8	8,017837	22,44994
2	565	10	20	545	2,8	13,95145	39,06405
3	855	10	30	825	2,8	17,16516	48,06246
4	1075	10	40	1035	2,8	19,2261	53,83308
5	1250	10	50	1200	2,8	20,70197	57,96551
6	1375	10	60	1315	2,8	21,67124	60,67949
7	1490	10	70	1420	2,8	22,51983	63,05553

Toelichting tabel:

- De Pas-N-karakteristiek: de belaste, mechanische vermogenskarakteristiek zoals die door de fabrikant wordt gegeven of kan worden gemeten.
- c: de waarde van c zojuist bepaald.
- c*N: het product van c en N. Dit geeft de grootte van de mechanische of lineaire verliezen.
- Pmech: het verschil tussen Pas en c*N.
- Rgen: de weerstand van de generator zoals die met een Ohm-meter kan worden gemeten.
- Igen = $\sqrt{(Pmech/Rgen)}$.
- EMK = $\sqrt{(Pmech*Rgen)}$.
- Eco = EMK/N

Maple: omdat de eerste waarde van Eco niet kan worden uitgerekend, wordt daar de tweede waarde voor genomen.

```
> restart;
> X:=[0,8.018,13.951,17.165,19.226,20.702,21.671,22.520];
  X := [0, 8.018, 13.951, 17.165, 19.226, 20.702, 21.671, 22.520]
> Y:=[22.450,22.450,19.532,16.021,13.458,11.593,10.113,9.008];
  Y := [22.450, 22.450, 19.532, 16.021, 13.458, 11.593, 10.113, 9.008]
> with(stats):with(describe):count(X);count(Y);
8
8
> with(fit);
[leastmediansquare, leastsquare]
> leastsquare([x,y],y=a*x^4+b*x^2+c,{a,b,c})([X,Y]);
y = -.00002648447002 x^4 - .01482670907 x^2 + 22.96223718
> fl:=rhs(%);
fl := -.00002648447002 x^4 - .01482670907 x^2 + 22.96223718
>
points:=plot([0,22.450],[8.018,22.450],[13.951,19.532],[17.165,16.021],[19.226,13.458],[20.702,11.593],[21.671,10.113],[22.520,9.008]],style=point,symbol=diamond);
> grafiek:=plot({fl},x=0..28,y=-2..25);
> with(plots):display({points,grafiek});
```

Reset,
begin programma
Invoer Igen
Bevestiging Igen
Invoer Eco
Bevestiging Eco
Tel de waarden

Controle: het klopt
Activeer pakket
Beschikbaarheid
pakket
Zoek functie
Gevonden functie
Stel fl = functie
Bevestiging fl

Plot punten
Plot grafiek op
gegeven interval
Toon punten en
grafiek op scherm

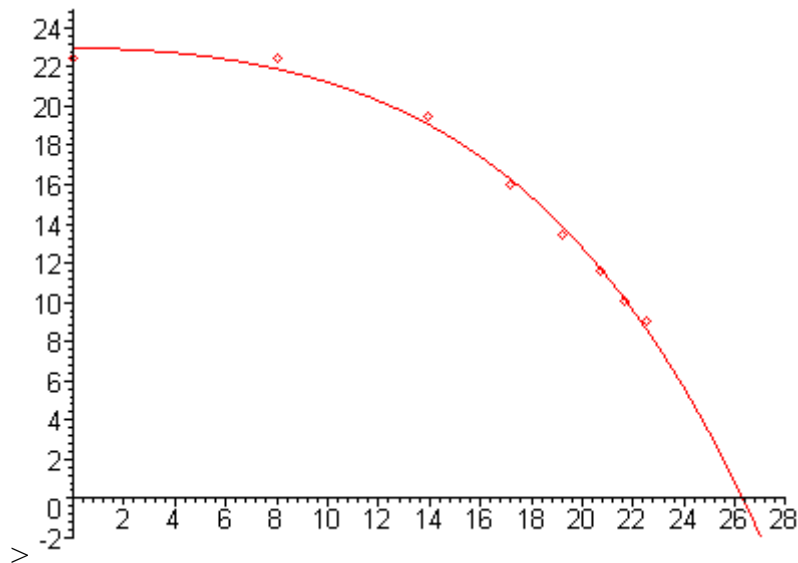


Fig. 13a. Het blijkt dat er een redelijke fitting ontstaat als gezocht wordt naar een vierde macht, een kwadratische term en een constante waarde. De waarden behorende bij de deltaschakeling kunnen eenvoudig uit de waarden van de ster-schakeling worden bepaald door de stroom te delen door een factor $\sqrt{3}$ (spanningsverhouding ster/driehoek).

```
> restart;
> Eco(0):=22.96223718/3^0.5:
> Eco:=-0.00002648447002/3^0.5*(Igen/3^0.5)^4-
0.01482670907/3^0.5*(Igen/3^0.5)^2+Eco(0):
> grafiek:=plot({Eco},Igen=0..50,y=-2..14):
> with(plots):display({grafiek});
```

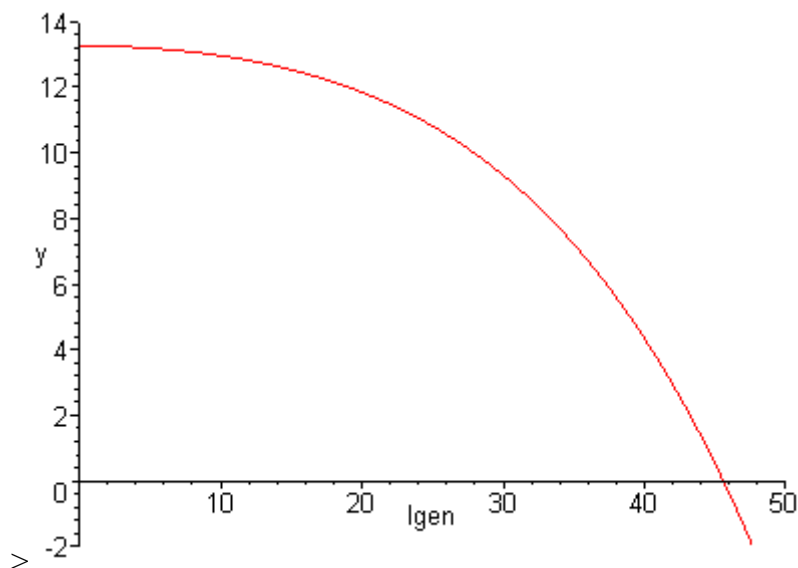


Fig. 13b.

18.3. *Het gebruik van een willekeurige aansluitkabel*

De weerstand van de aansluitkabel is eenvoudig te bepalen door de draden aan het ene eind met elkaar te verbinden, terwijl op het andere eind een weerstandsmeter wordt aangesloten.

Men moet de weerstand van de kabel tussen de gelijkrichter en de generator niet vergeten hierbij op te tellen. De gevonden waarde kan in het programma worden ingevoerd.

18.4. *Het gebruik van een andere accu*

Het voltage van de accu is afhankelijk van het aantal cellen maal de spanning per cel. Die varieert tussen de 1,85 Volt in ongeladen toestand tot 2,3 Volt in geladen toestand. Bij de Virya 3.3 op het WOT-terrein wordt gerekend met een maximum spanning van 27,8 Volt, daar er van 2 accu's met elk 6 cellen gebruik wordt gemaakt. De capaciteit hiervan bedraagt 140 Ah., deze is niet van invloed op de spanning.

Indien gebruik wordt gemaakt van een andere spanning, moet simpelweg deze waarde in het computerprogramma worden gewijzigd.

19. *Conclusie*

Vergelijken we de opbrengst van de Virya in de verschillende situaties, dan blijkt dat de weerstand van de aansluitkabel dramatisch van invloed is op de opbrengst. Dit komt als gevolg van de kabelverliezen en doordat de rotor veel minder energie uit de wind kan halen. Deze misaanpassing kan een mutator wel voor een belangrijk deel opheffen, maar dit geeft pas enig resultaat vanaf een windsnelheid op de rotor van 7 m/s. Meer en sneller effect geeft een dikkere aansluitkabel met een lage weerstand; deze oplossing is waarschijnlijk ook goedkoper. Toepassing van een mutator biedt geen verbetering, als er geen kabelweerstand is. Ook valt op dat door de kabelweerstand het verschil tussen delta- en ster-schakeling afneemt. De delta-variant wordt pas voordeliger vanaf een windsnelheid van 6 m/s, tegenover 4 m/s bij het originele concept (dus zonder kabelweerstand).

20. *Literatuur*

1. Dijken, R. H., *Kleine Elektrische Machines*, Leeuwarden, 1990
2. Kamminga-van Hulsen, Metha, *Computeralgebra met Maple*, Leeuwarden, 1996
3. Kragten, A., *Aanpassing van windmolen en generator*, St.-Oedenrode, 1994
4. Kragten, A., *Explanation for measurements performed on a four poles generator equiped with neodymium magnets*, St.-Oedenrode, 1991
5. Pelt, Th. P. van en Knol, E. H., *Elektriciteitsleer I*, Den Haag, 1983
6. Werkgroep OntwikkelingsTechnieken, *De Formule Virya*, Enschede, 2003
7. Werkgroep OntwikkelingsTechnieken, *Duurzame Energie voor Ontwikkelingslanden*, Enschede, 1996
8. Werkgroep OntwikkelingsTechnieken, *Ontwerpverantwoording Zelfbouwmolen*, Enschede, 2004
9. Woudenberg, G. J. van, *Inleiding (elektrische) aandrijftechniek*, Leeuwarden, 1988
10. Zwaagstra, O. B., *Elektrotechnische technologie 2*, Groningen, 1983