



Kragten Design

Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
Nederland

*Gespecialiseerd in het ontwerpen van elektriciteit
opwekkende windmolens en PM-generatoren*

ing. Adriaan Kragten

telefoon: 0413 475770
e-mail: info@kdwindturbines.nl
website: www.kdwindturbines.nl
bank nr. : NL 72 INGB 0002062399
BTW nr.: 064460447B01
Kamer van Koophandel nr. : 17241478

Adriaan Kragten, november 2017

Ideeën over een ideale naafdynamo

Moderne naafdynamo's hebben ten opzichte van banddynamo's een aantal duidelijke voordelen zoals een veel hoger rendement als het licht aan staat, een slipvrije aandrijving en een niet kwetsbare constructie in de naaf van het voorwiel. Zij hebben echter ook een aantal nadelen zoals energieverlies als de lamp niet aanstaat ten gevolge van wervelstromen in het statorblik, een lage frequentie van de opgewekte 1-fasenstroom wat bij lage toerentallen resulteert in flikkeren van het licht, een sterk pulserend koppel wat bij hoge toerentallen trillingen en lawaai kan geven en, afhankelijk van het fabricaat, een tamelijk hoge prijs.

De eerste drie nadelen zijn het gevolg van het feit dat een permanent magneet (PM) anker gebruikt wordt waarvan het magneetveld via ijzeren klauwen door een centrale spoel geleid wordt. In de spoel wordt een 1-fasen wisselstroom opgewekt. Deze nadelen kunnen voorkomen worden als de stator, waar de spoelen in liggen, geen ijzer bevat en als in plaats van een 1-fasen wisselstroom, een 3-fasen wisselstroom opgewekt wordt die gelijkgericht wordt. Voor mijn windturbines heb ik recentelijk een aantal PM-generatoren ontwikkeld waarbij er geen ijzer in de spoelen zit en die daardoor een zeer laag kleefkoppel en een hoog rendement hebben. Deze generatoren worden beschreven in hoofdstuk 6 van rapport KD 341 dat gratis van mijn website www.kdwindturbines.nl te kopiëren is. De ontwikkeling van deze generatoren bracht mij op het idee voor de, in mijn ogen, ideale naafdynamo.

Er zit een zekere verwantschap tussen een windmolengenerator en een naafdynamo. Ik heb zelfs een kleine windmolen ontwikkeld, de VIRYA-1.04, die gebruik maakt van een NEXUS naafdynamo. De bouwtekeningen van deze molen (en van nog zes andere) zijn vrijgegeven en gratis te kopiëren van mijn website. Een paar jaar geleden zijn er tien VIRYA-1.04 molens gebouwd door studenten van de TU-Twente. Eén van deze molens is te zien op de onderstaande foto. Onder het menu VIRYA-folders op mijn website staat een aparte Nederlandstalige folder waarin deze zeven vrijgegeven molens worden beschreven.

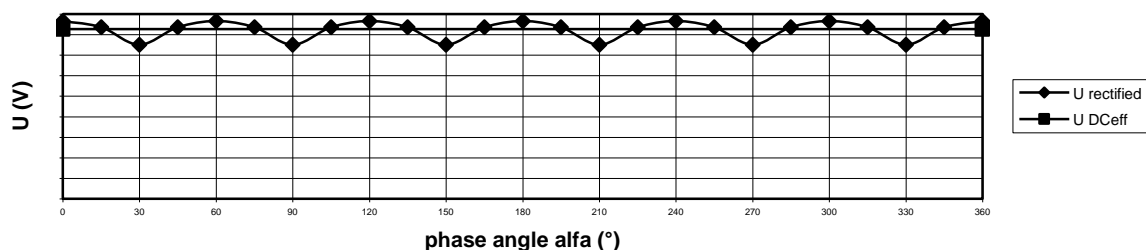


De VIRYA-1.04 met een NEXUS naafdynamo als generator

De meest recente PM-generator zonder ijzer in de spoelen die ik ontworpen heb, wordt beschreven in rapport KD 645. Bij deze 10-polige generator zit het draaiende anker binnenin en zit de stator met de spoelen aan de buitenkant. Voor een naafdynamo is dat onhandig en moet het anker met de magneten aan de buitenkant zitten net zoals dat bij een normale naafdynamo het geval is. Ik zal nu de ideale naafdynamo beschrijven zoals ik die in gedachten heb. Ik heb daarbij de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- 1) De dynamo is direct drive wat betekent dat er geen versnellende overbrenging in zit.
- 2) De dynamo mag niet groter zijn dan een moderne naafdynamo.
- 3) Er zit geen ijzer in de stator waardoor er geen wervelstromen worden opgewekt.
- 4) Er wordt een 3-fasen wisselstroom opgewekt die gelijkgericht wordt.

Een gelijkgerichte 3-fasenstroom heeft maar een beperkte rimpel op de spanning waarvan de frequentie zes maal zo hoog is als de frequentie van één van de fasenspanningen. Het spanningsverloop van een gelijkgerichte 3-fasenspanning wordt weergegeven in figuur 9 van rapport KD 340 voor gelijkrichting in ster. Deze figuur wordt overgenomen als figuur 1.



Figuur 1 Variatie van een in ster gelijkgerichte 3-fasen wisselspanning

Bij een gelijkgerichte 3-fasen wisselstroom kan de dynamo een relatief laag aantal polen hebben zonder dat bij lage toerentallen hinderlijke flikkeringen van het licht optreden. Daarom wordt voor een 10-polige dynamo gekozen waarvoor dus tien magneten nodig zijn.

Omdat er geen ijzer in de spoelen zit heeft de dynamo tussen de magneten een grote luchtspleet. Het magneetveld dat door de spoelen loopt wordt kleiner naarmate de spleet groter wordt en naarmate de magneten dunner zijn. Om toch nog een redelijk sterk magneetveld in de spoelen te krijgen moeten de magneten daarom behoorlijk dik zijn. Er wordt gebruik gemaakt van magneten die standaard leverbaar zijn en er zijn diverse leveranciers waar uit gekozen kan worden. Ik geef de voorkeur aan de Poolse leverancier ENES Magnesy website: www.enesmagnets.pl omdat die een zeer grote sortering neodmium magneten heeft en omdat de magneten van dit bedrijf relatief goedkoop zijn. Er werd gekozen voor een magneet met afmetingen $25 * 10 * 5$ mm die als kwaliteit N38 heeft. De remanentie B_r van deze kwaliteit is ongeveer 1.24 T. De remanentie is de magnetische fluxdichtheid in Tesla (T) wanneer de magneet wordt kortgesloten met een ijzeren brug die niet in verzadiging gaat. Een luchtspleet resulteert in verlaging van de fluxdichtheid maar berekening van de invloed van de luchtspleet op de fluxdichtheid die uiteindelijk door de spoelen gaat is te complex voor dit verhaal. De methode wordt wel gegeven in KD 645.

De prijs van de gekozen magneet is €0,79 inclusief BTW maar exclusief transportkosten wanneer minsten 80 magneten besteld worden. Bij fabricage van wat grotere aantallen dynamo's zit er dus voor ongeveer € 8 aan magneten in één dynamo wat mij acceptabel lijkt. Ik beperk me in dit verhaal tot alleen de constructie van het anker met de magneten en de stator met de spoelen. De constructie van de lagering en de bevestiging in de voorvork van de fiets moeten later nog verder uitgewerkt worden.

De tien magneten worden gelijmd in een stalen buis die gemaakt wordt van naadloze stalen buis van $60 * 2,5$ mm. Deze buis wordt in het aluminium huis van de dynamo geperst. De buis heeft een binnendiameter van 55 mm en een breedte van 25 mm. De breedte is dus gelijk aan de lengte van de magneten. Aan de binnenkant worden onder 36° , tien 10 mm brede en in het hart 0,1 mm diepe groeven gemaakt waar de magneten in gelijmd worden.

Bij een groefdiepte van 0,1 mm heeft de cirkel die inwendig aan de magneten raakt, een diameter van 45,2 mm. De magneten worden zo gepositioneerd dat er afwisselend vijf noord- en vijf zuidpolen ontstaan. De wanddikte van de buis moet behoorlijk groot gekozen worden omdat voorkomen moet worden dat het ijzer van de buis in verzadiging gaat. Als het ijzer in verzadiging zou gaan dan reduceert dat de sterkte van het magnetisch veld dat door de spoelen loopt. Ik heb gecontroleerd of het ijzer in verzadiging gaat en dat is niet het geval.

Uit de tien magneten komen tien gesloten magneetlussen. Elke magneetlus loopt door de stalen buis, dan door de helft van een noordpool, dan door de lucht aan de binnenkant van het anker en dan weer door de helft van een zuidpool. Vijf magneetlussen lopen rechtsom en vijf magneetlussen lopen linksom. Aangenomen wordt dat het deel van de magneetlus dat door lucht loopt ongeveer de vorm heeft van een cirkelsegment.

De stator waar de spoelen in liggen is van een kunststof bus gemaakt, bijvoorbeeld van het materiaal Delrin. De bus heeft een buitendiameter van 44 mm. Omdat de cirkel die inwendig raakt aan de magneten een diameter van 45,2 mm heeft, is de speling tussen de bus en de magneten dus 0,6 mm. De bus heeft een lengte van 25 mm, dus gelijk aan die van de stalen buis. De bus wordt op de as geperst of axiaal geklemd. De as is aan één kant hol en de stroomdraden die van de spoelen af komen worden door de holle as naar buiten gevoerd.

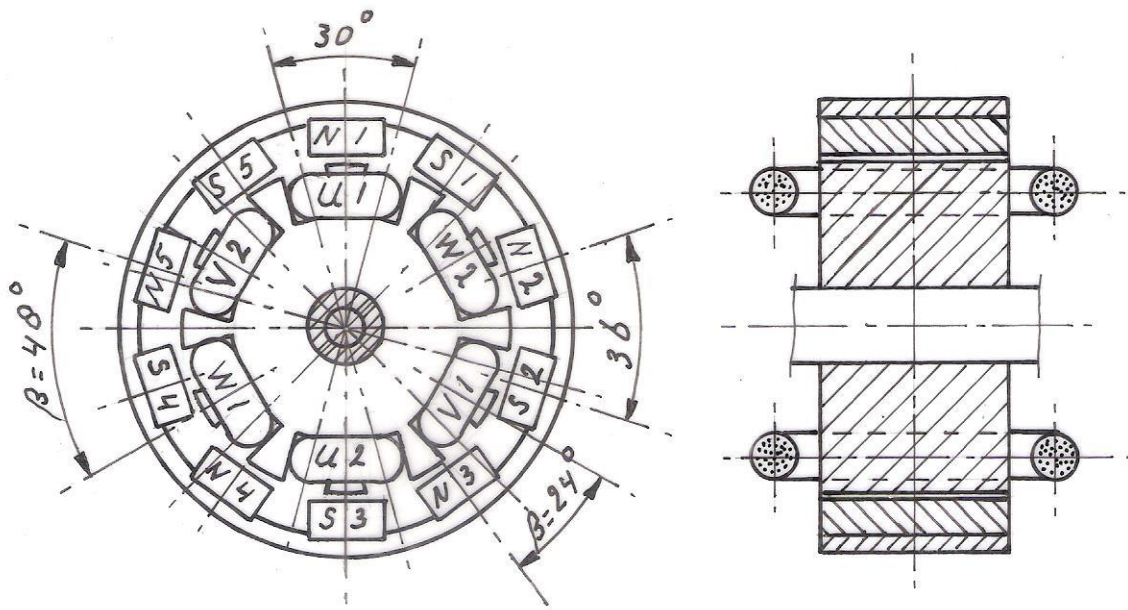
De stator van een 3-fasenwikkeling voor een 10-polig anker wordt aan de buitenkant voorzien van 12 groeven die evenwijdig aan de as lopen. De groeven worden genummerd van 1 – 12. Een groef heeft een breedte van 6 mm en een diepte van 7 mm en er is dus ruimte voor behoorlijk dikke spoelen. Voor elke spoel zijn twee groeven nodig en in 12 groeven kunnen dus zes spoelen gelegd worden. Er zijn dus twee spoelen beschikbaar voor elke fase. Een spoel heeft twee armen die in de groeven liggen en aan de linker en de rechter kant een spoelkop die de armen met elkaar verbindt. Voor een 10-polig anker is de hoek tussen het hart van twee aanliggende magneten 36° . De hoek tussen het hart van de twee armen van een spoel is maar 30° en de spanning opgewekt in de linker arm is daardoor niet precies in fase met de spanning opgewekt in de rechter arm. Maar bij een verschilhoek van 6° geeft dit maar een zeer beperkte reductie van de gesommeerde spanning in beide armen.

De drie fasen worden U, V en W genoemd. Er wordt een zogenaamde 1-laagswikkeling toegepast wat inhoudt dat er geen spoelkoppen zijn die elkaar overlappen. De zes spoelen liggen in de volgorde U1, W2, V1, U2, W1 en V2 en maken gebruik van de groeven met respectievelijk de nummers (1 + 2), (3 + 4), (5 + 6), (7 + 8), (9 + 10) en (11 + 12). Een vooraanzicht en een doorsnede van het anker en de stator wordt gegeven in figuur 2.

Het anker is getekend in de stand waarbij de noordpool N1 recht tegenover de spoel U1 staat. In figuur 2 is te zien dat voor deze stand van het anker de zuidpool S3 recht tegenover de spoel U2 staat. Beide spoelen van één fase worden samen buiten de stator gewikkeld op een wikkeldoorn en hebben daardoor op de doorn dezelfde wikkelrichting. De spoelen moeten echter zo in de stator gemonteerd worden dat de wikkelrichting in de stator verschillend is want anders versterken de spanningen in beide spoelen elkaar niet!

De drie fasenwikkelingen worden in ster aan elkaar gesoldeerd. De soldeerverbinding van het sterpunt wordt geïsoleerd en ligt ergens tussen de spoelkoppen. Er komen dus maar drie draden uit de as van de dynamo en deze drie draden worden verbonden met een 3-fasen gelijkrichter. Het valt te overwegen om de gelijkrichter in de dynamo onder te brengen en in dit geval komen er maar twee draden uit de dynamo waartussen dan gelijkspanning staat.

Voor een 10-polig anker staat het anker magnetisch weer in dezelfde positie als het 1/5 omwenteling ofte wel 72° verdraaid is. Een ankerhoek $\beta = 72^\circ$ komt daardoor overeen met een fasenhoek $\alpha = 360^\circ$. De fasenhoek α is daardoor vijf maal zo groot als de ankerhoek β . In figuur 2 is te zien dat voor de ankerhoek tussen N3 en V1 geldt dat $\beta = 24^\circ$. De bijbehorende fasenhoek α is daardoor 120° . In figuur 2 is te zien dat voor de ankerhoek tussen N5 en W1 geldt dat $\beta = 48^\circ$. De bijbehorende fasenhoek α is daardoor 240° . α is 0° voor U1 en er wordt daardoor een driefasenspanning opgewekt tussen de spoelen U1, V1 en W1.



Figuur 2 Anker en stator van een 10-polige, 3-fasen naafdynamo

Een 3-fasengelijkrichter bevat zes diodes waarvan er bij stergelijkrichting altijd maar twee in geleiding zijn. De meest gangbare gelijkrichters bevatten silicium diodes en in de geleidingsrichting staat over elke diode een spanningsval van ongeveer 0,7 V. Over de gehele gelijkrichter staat daarom een spanningsval van ongeveer 1,4 V. Dit is behoorlijk veel als de spanning waarop de lampen branden maar 6 V is en dit betekent dat er behoorlijk wat vermogen verloren gaat in de gelijkrichter. Nu zal de generator een hoog rendement hebben omdat er geen ijzerverliezen optreden maar het is zonde om weer een behoorlijk deel van het opgewekte vermogen in de gelijkrichter te verliezen. Dit probleem kan verminderd worden door een gelijkrichter te gebruiken waarin germanium diodes of waarin zogenaamde Schottky diodes worden toegepast. De spanningsval over een germanium diode is maar ongeveer 0,3 V en bij een Schottky diode varieert deze tussen 0,15 V en 0,46 V.

Er moet voorkomen worden dat de draden die in de groeven liggen weer terugveren en zodoende het draaiende anker kunnen raken. Bij kortsluitankermotoren worden hiervoor sluitkappen gebruikt maar daarvoor moeten de groeven bij het begin van de groef vernauwd zijn. Dit lijkt onhandig voor groeven in een kunststof stator. Het lijkt mogelijk om de zes spoelkoppen aan één kant van de stator met een touwtje naar binnen te trekken. Het kan nodig zijn om de wikkeling daarna te dompelen in schellak.

De dynamo levert na gelijkrichting een bijna rimpelvrije gelijkspanning en kan daardoor behalve voor 6 V gloeilampen ook voor LED-lampen gebruikt worden. Om bij een niet al te hoge fietssnelheid al voldoende spanning te leveren is een behoorlijk aantal windingen per spoel nodig. De bepaling van het optimale aantal windingen per spoel ligt buiten het bestek van dit verhaal maar kan door try and error gevonden worden. Het maximale vermogen dat de dynamo kan leveren bij een normale fietssnelheid kan ook pas bepaald worden als een prototype beschikbaar is.

Als blijkt dat het opgewekte vermogen te hoog is dan kan voor kortere magneten van 20 * 10 * 5 mm gekozen worden en moet de breedte van de ankerbuis en de statorbus 20 mm worden. Als blijkt dat het opgewekte vermogen te laag is dan kan voor langere magneten van 30 * 10 * 5 mm gekozen worden en moet de breedte van de ankerbuis en de statorbus 30 mm worden. Een voordeel is dat 30 mm lange magneten nog goedkoper zijn dan 25 mm lange magneten. Een bredere stator kan echter alleen als er voldoende ruimte is tussen de lagers en als het extra gewicht geen probleem is. Een alternatief is om twaalf magneten te gebruiken en een stator met negen spoelen die allemaal dezelfde wikkelrichting hebben. De spoelvolgorde is dan U1, V1, W1, U2, V2, W2, U3, V3 en W3. De stator wordt in dit geval voorzien van negen, 8 mm brede en 5 mm diepe groeven en er liggen twee windingen samen in één groef.

Doordat de dynamo een bijna rimpelvrije gelijkspanning levert, is hij ook geschikt om een 6 V accu mee op te laden. Als de accu bijna vol is zal voorkomen moeten worden dat hij overladen wordt en hiervoor is een stukje geavanceerde elektronica nodig. Waarschijnlijk is bij het gebruik van alleen verlichting ook elektronica nodig om te voorkomen dat bij hoge fietssnelheden de spanning te hoog wordt en de lamp doorbrandt.

Een 1-fase wisselstroom kan ook gelijkgericht worden als men LED-lampen wil gebruiken maar de DC stroom en de DC spanning fluctueren hiervoor sterk (zie figuur 4, KD 340). Omdat LED-lampen zeer snel reageren op spanningsvariaties zullen zij daarom flikkeren bij lage frequenties (tenzij condensatoren worden toegepast).

Door de dikke magneten en de 3-fasen statorwikkeling zal deze 10-polige naafdynamo vast wel wat duurder worden dan de meeste andere gewone naafdynamo's. Maar hij heeft unieke eigenschappen en ik verwacht dat mensen die daar prijs op stellen het waard zullen vinden om voor de dynamo wat meer uit te geven. Ten opzichte van de prijs van een complete fiets zullen de meerkosten maar beperkt zijn.

Het idee van deze nieuwe naafdynamo wordt hierbij vrijgegeven. Iedereen mag volgens dit idee naafdynamo's ontwikkelen en op de markt brengen. Ik ben niet van plan om de dynamo zelf verder te ontwikkelen maar wil wel adviezen geven aan hen die dat willen doen.