



Kragten Design

Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
Nederland

ing. Adriaan Kragten

telefoon: 0413 475770
e-mail: info@kdwindturbines.nl
website: www.kdwindturbines.nl

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

Adriaan Kragten, november 2017, herzien oktober 2020

Ideeën over een ideale naafdynamo

1 Inleiding

Deze notitie begint met de beschrijving van vier eenvoudige proefjes die ik verricht heb aan de dynamo's van twee fietsen. De eerste fiets is mijn oude Batavus Apache die voorzien is van een 8-polige banddynamo AXA HR en waarvan er in de koplamp een 2,4 W, 6 V halogeenlamp zit. De tweede fiets is mijn vrouw haar Koga Miyata Randonneur die voorzien is van een 28-polige NEXUS naafdynamo en waarvan er in de koplamp ook een 2,4 W, 6 V halogeenlamp zit. Een fiets werd zo opgehangen dat het voorwiel een paar cm vrij van de grond is. Er werd een zo hard mogelijke zet aan het voorwiel gegeven en er werd gemeten hoe lang het duurt totdat het wiel stil staat.

De eerste proef werd uitgevoerd met de Batavus terwijl de banddynamo niet tegen de band drukt. Het duurde ongeveer 110 seconden voordat het wiel stil stond. Bij de tweede proef stond de banddynamo wel tegen de band. De AXA HR banddynamo met een geribbeld rubberen wielje op de dynamo-as heeft een versnellende overbrenging met een overbrengingsverhouding van ongeveer 19 : 1. Het duurde ongeveer 2,5 seconden voordat het wiel stil stond en in het begin brandde de koplamp even. De lamp flikkerde niet wat komt doordat de frequentie van de opgewekte spanning vanwege de grote versnellende overbrenging erg hoog is en doordat een halogeenlamp een gloeispiraal met een zekere massa heeft waardoor de warmteontwikkeling gedempt wordt.

De derde proef werd uitgevoerd met de Koga Miyata met naafdynamo. De koplamp van deze fiets is voorzien van een schakelaar waarmee de lamp aan of uit gezet kan worden. Bij de derde proef stond de lamp uit. Het duurde ongeveer 25 seconden voordat het wiel stil stond. Bij de vierde proef stond de lamp aan. Het duurde ongeveer 12 seconden voordat het wiel stil stond. In het begin brandde de lamp continu maar aan het einde flikkerde de lamp.

Uit deze proefjes kan het volgende geconcludeerd worden. Bij het eerste proefje zonder banddynamo draait het wiel het langst omdat het wiel alleen afgeremd wordt door de lagerwrijving en door de aerodynamische wrijving tussen de lucht en het wiel. Het benodigde vermogen voor luchtwrijving is evenredig met de derde macht van het toerental en het toerental dat bereikt wordt door het wiel met de hand een zet te geven is zo laag dat de luchtwrijving bijna verwaarloosd mag worden. Het meeste vermogen is daarom nodig om de lagerwrijving te overbruggen maar die is ook maar gering voor goed afgestelde kogellagers. Daarom blijft het wiel zonder banddynamo erg lang doordraaien.

Als de banddynamo ingeschakeld wordt dan draait het wiel maar zeer kort. De lagerwrijving van het wiel wordt nu vermeerderd met de wrijving van de dynamo. De wrijving van de dynamo wordt veroorzaakt door de wrijving van de overbrenging, de wrijving van de dynamo glijlagers en de magnetische verliezen in het dynamoblik. Als de dynamo elektrisch vermogen levert dan is ook nog een koppel nodig om dit vermogen op te wekken.

Bij de naafdynamo is de tijd dat het wiel draait zonder dat de lamp aan is ongeveer het dubbele van de tijd dat het wiel draait met een brandende lamp. De tijd dat het wiel draait zonder dat de lamp brand is echter veel korter dan de tijd voor een wiel zonder banddynamo. Dit geeft aan dat een naafdynamo toch belangrijke magnetische verliezen heeft.

De tijd dat het wiel draait bij een naafdynamo en een brandende lamp is wel aanzienlijk langer dan de tijd dat het wiel draait bij een banddynamo en een brandende lamp. Dit komt omdat een banddynamo extra verliezen heeft in de overbrenging en in de glijlagers. Het nadeel van een banddynamo is dus dat hij erg zwaar loopt als het licht aan staat. Het voordeel van een banddynamo is dat er geen dynamoverliezen optreden als de dynamo niet tegen de band staat.

Bij een naafdynamo moeten altijd de magnetische verliezen opgewekt worden ook al staat de lamp niet aan en dat lijkt mij een belangrijk nadeel. Om te kunnen begrijpen waar deze magnetische verliezen bij een naafdynamo vandaan komen zou een naafdynamo van binnen bekeken moeten worden. Ik heb op een fietsbeurs eens een open naafdynamo gezien en die heeft de volgende hoofdcomponenten. In het ronddraaiende aluminium huis waar de spaken aan vast zitten is een dunne stalen bus geperst. Aan de binnenkant van deze bus zijn een groot aantal kleine langwerpige neodymium magneten gelijmd die zo gemonteerd zijn dat er afwisselend een noordpool en een zuidpool aan de binnenkant zit. Ik ga er van uit dat de geteste NEXUS naafdynamo 28 magneten en dus 14 noord- en 14 zuidpolen heeft. Rond de as zit één grote ronde spoel. Aan weerszijden van deze spoel zit een klauwanker dat gemaakt is van een paar lagen dun blik. Elk klauwanker heeft 14 klauwen en is zo gebogen dat het aan de binnenkant in de spoel valt en dat de klauwen aan de buitenkant vlak langs de magneten lopen. De 14 klauwen van het linker klauwanker vallen precies tussen de 14 klauwen van het rechter klauwanker. Bij een bepaalde stand van het anker loopt er een magnetisch veld door het hart van de spoel van links naar rechts. Als het anker één magneetsteek verdraaid is loopt het magnetisch veld echter van rechts naar links. Hierdoor wordt in de spoel een wisselspanning opgewekt.

Het telkens wisselen van de richting van het magneetveld in de twee klauwankers gaat echter gepaard met magnetische verliezen. Bij een ideale fietsdynamo zit er daarom geen ijzer in de spoelen maar zonder klauwankers kan het magnetisch veld niet zodanig geleid worden dat het door één centrale spoel loopt. Een ideale fietsdynamo moet daarom een geheel andere constructie hebben en in hoofdstuk 2 wordt beschreven hoe die eruit zou kunnen zien. Ik heb tientallen permanent magneet (PM) generatoren voor kleine windturbines ontworpen en sommige daarvan uitgebreid doorgemeten. Een overzicht van de PM-generatoren die ik ontwikkeld heb wordt gegeven in mijn rapport KD 341. Recentelijk heb ik een paar generatoren ontwikkeld waarbij er geen ijzer in de spoelen zit. Het generatortype dat beschreven wordt in rapport KD 645 bracht mij op het idee voor de ideale fietsdynamo

Er is een zekere verwantschap tussen een windmolengenerator en een fietsdynamo. 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. 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.

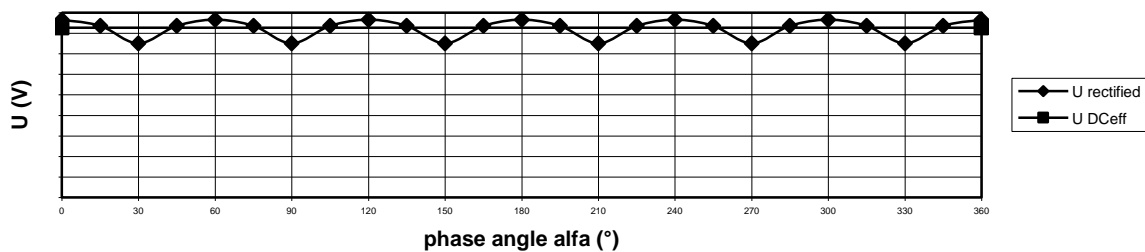


2 Beschrijving van een nieuw type naafdynamo

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 de dynamo geen kleefkoppel heeft.
- 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 12-polige dynamo gekozen waarvoor dus twaalf 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 neodymium magneten heeft en omdat de magneten van dit bedrijf relatief goedkoop zijn. Er werd gekozen voor een magneet met afmetingen 30 * 10 * 5 mm die als kwaliteit N42 heeft. De remanentie B_r van deze kwaliteit is ongeveer 1.3 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 deze notitie. De methode wordt wel gegeven in KD 645.

De prijs van de gekozen magneet is € 0,69 inclusief BTW maar exclusief transportkosten wanneer minsten 80 magneten besteld worden. Bij fabricage van wat grotere aantallen dynamo's zit er dus voor ongeveer € 9 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 twaalf 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 30 mm.

De breedte is dus gelijk aan de magneetlengte. Aan de binnenkant worden onder 30° , twaalf 10 mm brede en in het hart 0,1 mm diepe groeven gemaakt waar de magneten in gelijmd worden. Bij groter aantallen kunnen de groeven het beste met een trekfrees gemaakt 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 zes noord- en zes 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 twaalf magneten komen twaalf 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. Zes magneetlussen lopen rechtsom en zes 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 30 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 heeft een 1-laags, 3-fasenwikkeling met drie spoelen per fase. Het voordeel van een 1-laags wikkeling is dat er geen elkaar kruisende spoelkoppen zijn waardoor de spoelkoppen erg klein kunnen zijn en dit beperkt de breedte van de stator. De spoelen worden gelegd in een kunststof stator die aan de buitenkant voorzien van negen groeven die evenwijdig aan de as lopen. Een groef heeft een breedte van 8 mm en een diepte van 5 mm. De groeven worden genummerd met 1 – 9. Een spoel heeft een linker en een rechter arm en een voorste en een achterste spoelkop. De linker arm van een bepaalde spoel ligt samen met de rechter arm van de aanliggende spoel in één statorgroef. Hierdoor zijn er voor negen spoelen maar negen groeven nodig.

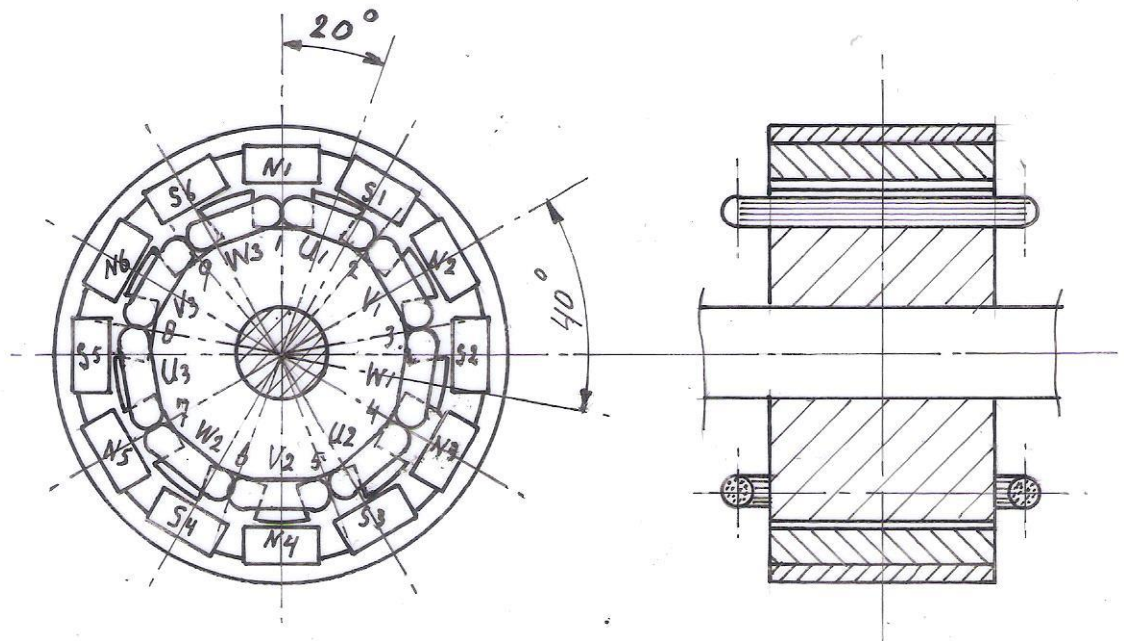
Voor een 12-polig anker is de hoek tussen het hart van twee aanliggende magneten 30° . De hoek tussen het hart van twee statorgroeven is 40° . Omdat de linker spoelarm echter in de rechter helft van een groef ligt en omdat de rechter spoelarm in de linker helft van een groef ligt is de gemiddelde steek tussen de linker en de rechter arm ook ongeveer 30° . Wanneer een noordpool de linker arm van een spoel passeert, dan passeert een zuidpool dus de rechter arm van een spoel. Dit houdt in dat de spanning die in de linker arm van een spoel opgewekt wordt in fase is met spanning die in de rechter arm van een spoel opgewekt wordt en dit geeft de maximale op te wekken spanning bij een bepaald toerental en een bepaald aantal windingen per spoel.

De drie fasen worden U, V en W genoemd. De negen spoelen liggen in de volgorde U1, V1, W1, U2, V2, W2, U3, V3 en W3 en maken gebruik van de groeven met respectievelijk de nummers (1 + 2), (2 + 3), (3 + 4), (4 + 5), (5 + 6), (6 + 7), (7 + 8), (8 + 9) en (9 + 1). 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 groef 1 staat. In figuur 2 is te zien dat voor deze stand van het anker de noordpool N2 recht tegenover de spoel V1 staat, dat de noordpool N4 recht tegenover de spoel V2 staat en dat de noordpool N6 recht tegenover de spoel V3 staat. De spanningen die in de drie spoelen van één fase worden opgewekt zijn dus met elkaar in fase en mogen bij elkaar opgeteld worden als de spoelen dezelfde wikkelrichting hebben. De drie spoelen van één fase worden samen buiten de stator gewikkeld op een wikkeldoorn en hebben daardoor op de doorn dezelfde wikkelrichting. De spoelen moeten zo in de stator gemonteerd worden dat de wikkelrichting in de stator ook gelijk is. 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 12-polig anker staat het anker magnetisch weer in dezelfde positie als het 1/6 omwenteling ofte wel 60° verdraaid is. Een ankerhoek $\beta = 60^\circ$ komt daardoor overeen met een fasenhoek $\alpha = 360^\circ$. De fasenhoek α is daardoor zes maal zo groot als de ankerhoek β . In figuur 2 is te zien dat voor de ankerhoek tussen N1 en U1 geldt dat $\beta = 20^\circ$. De bijbehorende fasenhoek α is daardoor 120° . In figuur 2 is te zien dat voor de ankerhoek tussen N2 en W1 geldt dat $\beta = 40^\circ$. De bijbehorende fasenhoek α is daardoor 240° . $\beta = 0^\circ$ en $\alpha = 0^\circ$ voor V1. Tussen de spoelen U1, V1 en W1 wordt daardoor een driefasenspanning opgewekt.



Figuur 2 Anker en stator van een 12-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 negen spoelkappen aan beide kanten 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. Ik denk wel dat het voor de gekozen magneetafmetingen aanmerkelijk hoger zal zijn dan dat van een normale naafdynamo.

Doordat de dynamo een bijna rimpelvrije gelijkspanning levert, is hij ook geschikt om een 6 V accu mee op te laden. Dit is vooral van belang voor mensen die lange fietstochten maken en die een GPS meenemen die regelmatig opgeladen moet worden. 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 zeer sterk (zie figuur 4, KD 340). Omdat LED-lampen zeer snel reageren op spanningsvariaties zullen zij daarom flikkeren bij lage frequenties. Een ander nadeel van een LED-lamp is dat het een diode is en dat een enkele diode daardoor maar één deel van de sinus gebruikt. Een enkele LED-lamp brandt dus gedurende de helft van de tijd helemaal niet en de frequentie waarin hij knippert, is gelijk aan de frequentie van de sinus. De frequentie waarmee een halogeenlamp knippert, is gelijk aan twee maal de frequentie van de sinus omdat het opgewekte vermogen maximaal is bij de hoogste waarde van de spanning en bij de laagste waarde van de spanning.

Het menselijk oog kan het knipperen niet meer volgen als de frequentie hoger is dan ongeveer 25 Hz en deze frequentie treedt bij een halogeenlamp dus op bij een rijsnelheid die de helft is van die bij een LED-lamp. Omdat halogeenlampen een gloeispiraal hebben die een zekere massa heeft wordt een fluctuerende lichtopbrengst ook veel sterker gedempt dan bij LED-lampen. Daarom worden normale naafdynamo's in combinatie met halogeenlampen gebruikt en niet in combinatie met LED-lampen, tenminste, als er geen extra elektronica wordt toegepast om de stroom gelijk te richten en de fluctuatie te dempen.

Door de dikke magneten en de 3-fasen statorwikkeling zal deze 12-polige naafdynamo vast wel 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.