

De asynchrone kortsluitankermachine als zelfopwekkende generator gekoppeld aan een windmolen

Citation for published version (APA):

Lagerweij, H. L. (1978). *De asynchrone kortsluitankermachine als zelfopwekkende generator gekoppeld aan een windmolen*. (TU Eindhoven. Vakgr. Transportfysica : rapport; Vol. R-325-D). Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1978

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

De asynchrone kortsluitankermachine
als zelfopwekkende generator gekop-
peld aan een windmolen

H.L. LAGERWEIJ

januari 1978

R-325-D

Stageverslag voor H.T.S.-E Arnhem;

werkzaamheden deels verricht in het kader:

"Projekt Wind Energie Ontwikkelingslanden" aan de T.H. Eindhoven,
Wind Energie Groep, vakgroep Transportfysica, afdeling Natuurkunde

<u>INHOUD:</u>	<u>PAG.</u>
1. INLEIDING	1
2. THEORETISCHE BESCHOUWINGEN	1
3. BEREKENING VAN MACHINEGROOTHEDEN	7
3.1. Bepaling van de parameters x	7
3.2. Voorbeeld met een 3 kW machine	9
3.3. Karakteristieken van een 3 kW machine	13
4. NABESCHOUWING	14
5. CONCLUSIE	19

1. INLEIDING

De asynchrone machine wordt voor 99% gebruikt als motor.

Wil men deze machine als generator laten werken dan kan dat zonder meer, indien men hem parallel met een bestaand net schakelt. De toerental variatie tussen nul en vollast ligt dan niet hoger dan + 4%.

De asynchrone generator gekoppeld aan een windmolen zou meer toerental variatie moeten bezitten en een net dient aanwezig te zijn.

In dit verslag zal nagegaan worden in welke mate de machine als zelfopwekkende generator te belasten is.

Ook zal worden nagegaan of de belasting invloed heeft op de uitgangsspanning.

2. THEORETISCHE BESCHOUWINGEN

De asynchrone machine, die behandeld zal worden, is drie-fasig uitgevoerd en heeft een kortgesloten rotor.

In fig. 1 is voor één fase het elektrische vervangschema van de machine getekend. In dat vervangschema zijn de rotor frequentie en rotor impedanties zo getransformeerd, dat de rotor frequentie gelijk is aan de stator frequentie. Tevens zijn de rotor impedanties terug getransformeerd naar het stator windingsgetal.

De index 1 en 2 betreffen resp. de stator en de rotor grootheden.

De slip s is per definitie $s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$

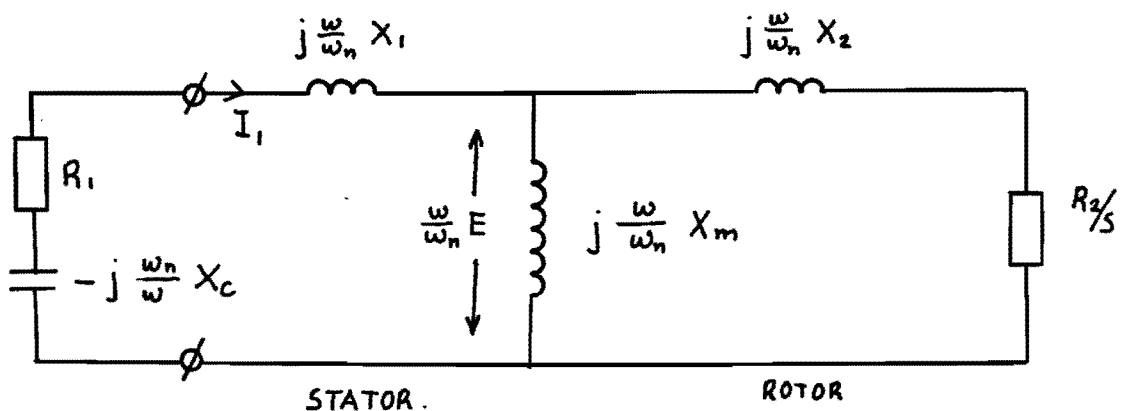


Fig. 1.

Naar de stator getransformeerd vervangschema van een asynchrone machine voor één fase.

De reactanties X_1 , X_2 , X_m en X_c zijn gegeven bij een vaste hoek frequentie ω_n .

Deze frequentie waaraan gerefereerd wordt is 50 Hz.

Uit fig. 1 ziet men dat de inwendige weerstand van de stator wikkeling ondergebracht is in R_1 . Stel dat de machine een toerental bezit van ongeveer ω_n . Wil er een energie-overdracht plaatsvinden, dan volgt uit de spanningsvergelijking dat de energie die in R_1 gedissipeerd wordt opgewekt moet worden door R_2/s .

Hieruit volgt dat de slip, s , negatief is. Wil er evenwicht zijn tussen de reactieve vermogens, dan moet de som van de reactieve belastingen nul zijn.

De spanningsvergelijking voor de asynchrone machine gekoppeld met een serie schakeling van weerstand en condensator is als volgt:

$$I_1 \left\{ R_1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_n} X_1 - \frac{\omega_n}{\omega} X_c \right) \right\} + I_2 \left\{ \frac{\left(\frac{R_2}{s} + j \frac{\omega}{\omega_n} X_2 \right) \cdot j \frac{\omega}{\omega_n} X_m}{\frac{R_2}{s} + j \frac{\omega}{\omega_n} (X_2 + X_m)} \right\} = 0 \quad (1)$$

Wanneer men de stroomsterkte I_1 elimineert, volgt uit de spanningsvergelijking de impedantievergelijking.

$$\frac{\left\{ R_1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_n} X_1 - \frac{\omega_n}{\omega} X_c \right) \right\} \left\{ \frac{R_2}{s} + j \frac{\omega}{\omega_n} (X_2 + X_m) \right\} + \left(\frac{R_2}{s} + j \frac{\omega}{\omega_n} X_2 \right) \cdot j \frac{\omega}{\omega_n} X_m}{\frac{R_2}{s} + j \frac{\omega}{\omega_n} (X_2 + X_m)} = 0 \quad (2)$$

Deze vergelijking is nul wanneer de noemer = ∞ en wanneer de teller is nul mits de noemer $\neq 0$.

Wil men meer over de grootheden van vergelijking (2) weten, dan moet deze uitgeschreven worden in een reëel (4a) en imaginair (4b) deel.

In het verdere betoog stellen we terwille van overmatig veel

$$\text{schrijfwerk } X_1 \approx X_2 = \frac{1}{2} X_d. \quad (3)$$

Dit mag als X_2 de getransformeerde reactantie is.

$$R_1 \frac{R_2}{s} - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 (X_m X_d) + 0,25 X_d^2 + X_c (X_m + 0,5 X_d) = 0 \quad (4a)$$

$$R_1 \frac{\omega}{\omega_n} (X_m + 0,5 X_d) + \frac{R_2}{s} \left\{ \frac{\omega}{\omega_n} (X_m + 0,5 X_d) - \frac{\omega_n}{\omega} X_c \right\} = 0. \quad (4b)$$

Het is nu belangrijk dat we inzicht krijgen in de volgende grootheden:

- a. De frequentie.
- b. De belasting.
- c. De draaiveld reactantie.

Om deze grootheden te analyseren zijn er drie parameters ingevoerd.

- De frequentie parameter
$$Y = \frac{\omega}{\omega_n} \sqrt{\frac{X_d}{X_c}} \quad (5)$$

- De belastingsweerstand parameter
$$\rho_1 = \frac{R_1}{\sqrt{X_d \cdot X_c}} \quad (6a)$$

De rotorweerstand parameter
$$\rho_2 = \frac{R_2}{\sqrt{X_d \cdot X_c}} \quad (6b)$$

- De draaiveld reactantie parameter
$$\mu = \frac{X_m}{X_d} \quad (7)$$

Substitueren we (5) (6) en (7) in de betrekkingen (4a) en (4b) dan volgt de formule 8a en 8b resp. reëel en imaginair deel.

$$\rho_1 \frac{\rho_2}{s} - Y^2 (\mu + 0,25) + \mu + 0,5 = 0 \quad (8a)$$

$$\rho_1 Y^2 (\mu + 0,5) + \frac{\rho_2}{s} \{ Y^2 (\mu + 0,5) - 1 \} = 0 \quad (8b)$$

Elimineer uit de formule (8a en 8b) ρ^2/s dan volgt een betrekking tussen de drie parameters.

$$-\frac{\rho_2}{s} = \frac{\mu + 0,5 - \gamma^2(\mu + 0,25)}{\rho_1} = \frac{\rho_1 \gamma^2(\mu + 0,5)}{\gamma^2(\mu + 0,5) - 1}$$

$$(\mu + 0,25)\gamma^4 - \left(\mu + 0,5 + \frac{\mu + 0,25}{\mu + 0,5} - \rho_1^2\right)\gamma^2 + 1 = 0 \quad (9)$$

Schrijven we de frequentie parameter γ expliciet dan ontstaat de volgende vergelijking

$$\gamma = \sqrt{\frac{\left(\mu + 0,5 + \frac{\mu + 0,25}{\mu + 0,5} - \rho_1^2\right) \pm \sqrt{\left(\mu + 0,5 + \frac{\mu + 0,25}{\mu + 0,5} - \rho_1^2\right)^2 - 4(\mu + 0,25)}}{2(\mu + 0,25)}} \quad (10)$$

Uit formule (10) zijn krommen te bepalen met γ en ρ_1 als variabelen en met μ als parameter

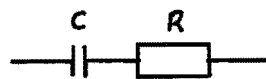
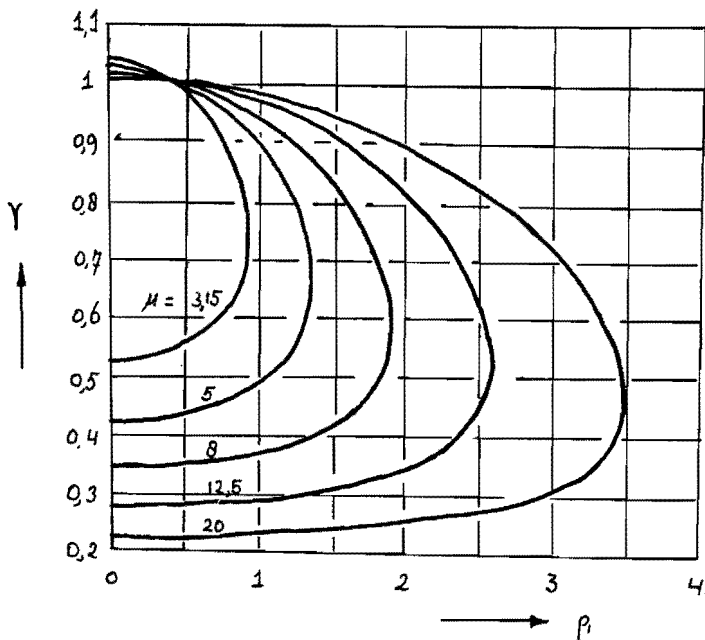


Fig. 2.

Fig. 2. De γ - ρ_1 krommen voor verschillende waarden van $\mu = \text{konstant}$.

Voor de afgebeelde krommen in fig. 2 zijn een aantal bijzondere punten te bepalen.

Ten eerste het geval dat $\rho_1 = 0$.

$\gamma(0)$ heeft twee waarden.

Uit formule (10) volgt dan:

$$\gamma(0) = \sqrt{\frac{\mu+0,5}{\mu+0,25}} \quad \text{en} \quad \gamma(0) = \frac{1}{\sqrt{\mu+0,5}}$$

hoge frequentie

lage frequentie

Ten tweede is het punt te bepalen waarvoor ρ_1 maximaal is.

Herschrijf formule (9) zodat ρ_1 expliciet geschreven wordt.

$$\rho_1 = \sqrt{-(\mu+0,25)\gamma^2 + \mu + 0,5 + \frac{\mu+0,25}{\mu+0,5} - \frac{1}{\gamma^2}} \quad (11)$$

ρ_1 heeft een extreme waarde voor γ wanneer de 1^e afgeleide naar nul gesteld wordt.

$$\frac{d\rho_1}{d\gamma} = \frac{\frac{1}{2}(-\mu+0,25)2\gamma + 2\frac{1}{\gamma^3}}{\rho_1} \quad (12)$$

$$-(\mu+0,25)\gamma + \frac{1}{\gamma^3} = 0 \quad (\text{stel teller is nul})$$

$$\gamma_{\text{extr}}^2 = \sqrt{\frac{1}{\mu+0,25}} \quad (13)$$

Substitueer γ_{extr}^2 in formule (11).

$$\rho_{1,\text{extr}} = \sqrt{\mu+0,5} - \sqrt{\frac{\mu+0,25}{\mu+0,5}} \quad (14)$$

Stel een bepaalde uitwendige belasting X_c en R_1 .

Hetgeen betekent dat ρ_1 konstant is.

De γ - ρ_1 krommen geven twee punten voor γ als ρ_1 is konstant (zie fig. 2).

De twee waarden voor γ welke voor een bepaald belastingsgeval in de grafiek tot uiting komen, geven de minimale en de maximale frequentie

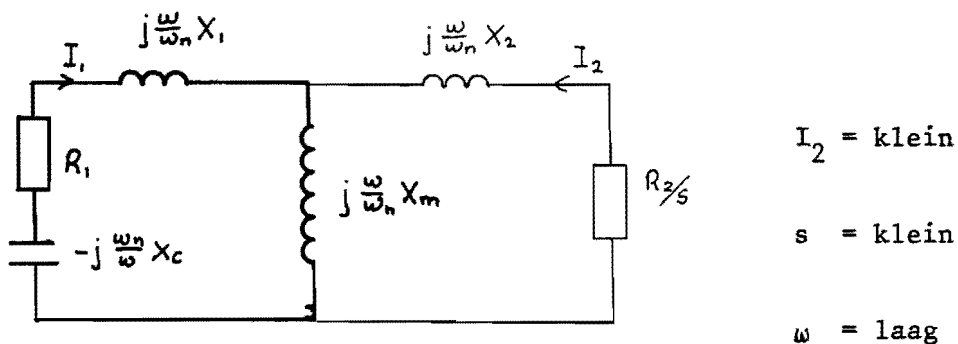
weer waar tussen de machine vermogen kan opwekken. De belastingsaf-

hankelijke μ zal tussen de waarden voor de maximale en de minimale

frequentie variëren van μ_u = onverzadigde draaiveld reactantie tot

μ_{min} = verzadigde draaiveld reactantie.

De minimale frequentie is de resonantie frequentie van de condensator en de onverzadigde draaiveld reactantie (zie fig. 3).

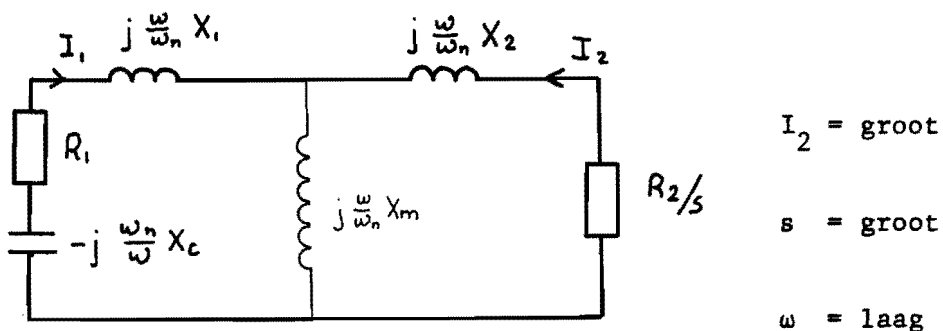


Vervangschema voor een laag toerental.

Fig. 3

De maximale frequentie is de resonantie frequentie van de condensator

en de gezamenlijke strooi reactanties $j \frac{\omega}{\omega_n} (X_1 + X_2)$ (zie fig. 4)



Vervangschema voor een hoog toerental.

Fig. 4

3. BEREKENING VAN DE MACHINEGROOTHEDEN

3.1. Bepaling van de parameters

Ga er van uit dat van de asynchrone machine de stator weerstand, de gereduceerde rotor weerstand de gezamenlijke strooi reactantie X_d de onverzadigde draaiveld reactantie X_{mu} en de magnetiserings kromme bekend zijn.

Wil men de generator toepassen voor een toerental gebied lager dan waarvoor de machine als motor fungeerde, dan moet met $\mu < \mu_u$ kiezen. Met de betrekking (14) berekent men de ρ_1 waarde. De formule (10) geeft de boven en ondergrens van γ .

Wanneer de twee parameters γ ρ_1 bepaald zijn, dan kan samen met de magnetiseringskromme de spanning, de stroom, het koppel bepaald worden. Als men geïnteresseerd is naar het maximum koppel en de stroom dan geeft de empirisch gevonden formule (zie ook fig. 7) weer dat het maximum optreedt voor $\gamma_{(T=\max)} = \gamma_{(\rho_{extr})} + 30\%$.

$\gamma_{(\rho_{extr})}$ formule (13)

Vervolgens berekent men μ voor het maximum koppel met formule (9). Het positieve deel van de vierkantsvergelijking levert de μ .

In het verdere betoog maakt men gebruik van de relatieve magnetiserings kromme $\frac{E}{U_n} = f(\frac{\mu}{\mu_u})$. U_n is de fase spanning van de machine voor 50 Hz aansluiting.

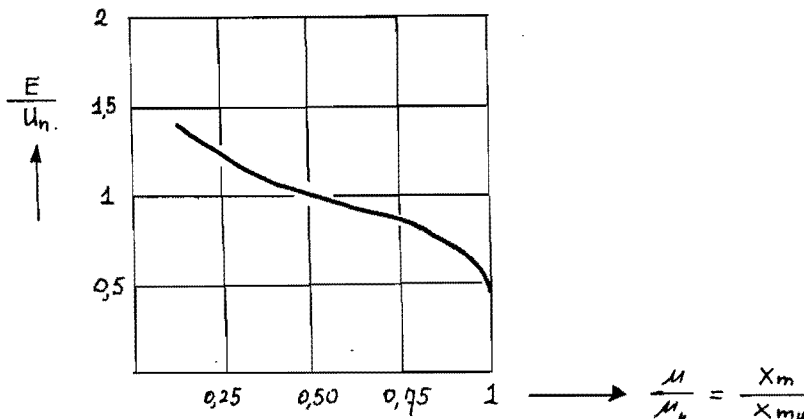


Fig. 5.

De relatieve magnetiserings kromme voor de asynchrone machine.

De stroom I_1 is rechtstreeks af te leiden uit de spanningsvergelijking (1) en fig. 1.

$$I_1 = \frac{\frac{\omega}{\omega_n} \cdot E}{\sqrt{R_1^2 + \left(0,5 \frac{\omega}{\omega_n} X_d - \frac{\omega_n}{\omega} X_c\right)^2}} \quad (15)$$

Met verwaarlozing van de statorverliezen is het elektrische draaiveld vermogen gelijk aan het elektrische uitgaande vermogen van de machine.

$$P_{el} = 3 I_1^2 R_1$$

$$P_{draaiveld} = \frac{T \omega}{p}$$

$$P_{el} \approx P_{draaiveld}$$

Na verwaarlozing van de statorverliezen

$$T = \frac{3 I_1^2 R_1 p}{\omega}$$

I_1 = stroom [A]

R_1 = weerstand [Ω]

T = koppel [Nm]

ω = hoekfrequentie [rad/s]
stator spanning

p = poolpaartal

(16)

Voor het koppel T vindt men na substitutie van (15) in (16) de formule (17).

$$T = \frac{3 p}{\omega} \left(\frac{\omega E}{\omega_n}\right)^2 \frac{R_1}{R_1^2 + \left(0,5 \frac{\omega}{\omega_n} X_d - \frac{\omega_n}{\omega} X_c\right)^2} \quad (17)$$

Voor de ideale kortsluitstroom geldt:

$$I_{1(k)} = \frac{U_n}{X_d} \quad (18)$$

Substitueer formule (5), (6) en (18) in (15) dan volgt hieruit een betrekking voor I_1 uitgedrukt in de drie parameters γ , ρ_1 en via fig. 5 ook μ .

$$\frac{I_1 \cdot U_n}{I_{1(k)} \cdot E} = \frac{\gamma^2}{\sqrt{(\rho_1 \gamma)^2 + (1 - 0,5 \gamma^2)^2}} \quad (19)$$

Evenzo geldt voor het kortsluit moment

$$T(k) = \frac{3 \rho \cdot U_n^2}{\omega_n \cdot 2 X_d} \quad (20)$$

Substitueer formule (5), (6) en (20) in (17).

Het koppel kan nu ook geschreven worden als functie van γ , ρ_1 en μ .

$$\frac{T}{T(k)} \cdot \left(\frac{U_n}{E}\right)^2 = \frac{2 \rho_1 \gamma^3}{\rho_1^2 \gamma^2 + (1 - 0,5 \gamma^2)^2} \quad (21)$$

3.2. Voorbeeld van een 3 kW machine

Gegeven

3-fase asynchrone machine

P = 3 kW

U = 380 V λ

I_d = 6,8 A

p = 2

f = 50 Hz

n = 1420 omw./min.

R_1 = 2 Ω

R_2 = 1,7 Ω gereduceerde weerstand

X_{d50Hz} = 6,1 Ω

$X_{\mu 50Hz}$ = 81 Ω

<u>Te berekenen</u>	T_{\max}	$I_1(T_{\max})$
	X_c	
	C	
	R_1	

Oplossing

Uit (21) volgt:

$$T = \frac{2 \rho_1 \gamma^3}{\rho_1^2 \gamma^2 + (1 - 0,5 \gamma^2)^2} \cdot \left(\frac{E}{U_n} \right)^2 \cdot T(k).$$

Om T_e te kunnen bepalen moeten de parameters ρ_1 en γ bekend zijn.

Tevens moet $\left(\frac{E}{U_n} \right)$ berekend worden.

Formule (7) $\mu_u = \frac{X_{mu}}{X_d} = \frac{81}{6,1} = 13,3.$

Wil men naar een lager toerental dan 1500 omw./min. dan moet $\mu < \mu_u$ gekozen worden.

Stel $\mu = 0,5 \mu_u$

$\mu = 6,7$

$$(14) \quad \rho_{1, \text{extr}} = \sqrt{\mu + 0,5} - \sqrt{\frac{\mu + 0,25}{\mu + 0,5}}$$

$$\rho_{1, \text{extr}} = \sqrt{6,7 + 0,5} - \sqrt{\frac{6,7 + 0,25}{6,7 + 0,5}}$$

$$\rho_{1, \text{extr}} = 1,71$$

$$(13) \quad \gamma_{(P, \text{extr})} = \sqrt[4]{\frac{1}{\mu + 0,25}}$$

$$\gamma_{(P, \text{extr})} = \sqrt[4]{\frac{1}{6,7 + 0,25}} = 0,615.$$

Het koppel bereikt zijn maximale waarde bij $\gamma = 1,3 \gamma_{(P, \text{extr})}$.
(Dit is een empirisch gevonden formule).

$$\gamma_{(T_{\text{max}})} = 1,3 \cdot 0,615 = 0,8.$$

Bereken μ voor het maximum koppel met de betrekking (9)

$$(\gamma^4 - \gamma^2)\mu^2 + (0,95\gamma^4 - 2\gamma^2 + P_1^2\gamma^2 + 1)\mu + 0,125\gamma^4 - 0,5\gamma^2 + 0,5P_1^2\gamma^2 + 0,5 = 0$$

$$\mu_{1,2} = \frac{-(0,95\gamma^4 - 2\gamma^2 + P_1^2\gamma^2 + 1) \pm \sqrt{(0,95\gamma^4 - 2\gamma^2 + P_1^2\gamma^2 + 1)^2 - 4(\gamma^4 - \gamma^2) \cdot (0,125\gamma^4 + (0,5P_1^2 - 0,5)\gamma^2 + 0,5)}}{2(\gamma^4 - \gamma^2)}$$

het positieve deel van de vierkantsvergelijking levert voor $\mu = 8,8$.

$$\frac{\mu}{\mu_u} = \frac{8,8}{13,3} = 0,66$$

Uit fig. 5 bepaalt men dan de $\frac{E}{U_n}$.

$$\frac{E}{U_n} = 0,93$$

Uit formule (20) volgt:

$$T(k) = \frac{3P \cdot U_n^2}{\omega_n \cdot 2 X_d}$$

$$T(k) = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2}{2\pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 6,1} = 76 \text{ Nm.}$$

Nu zijn alle variabelen bekend om het koppel uit te rekenen.

$$T = \frac{2 \times 1,71 \times 0,8^3}{(1,71 \times 0,8)^2 + (1 - 0,5 \times 0,8^2)^2} \times 0,93^2 \times 76 = 50 \text{ Nm.}$$

Uit formule (19) volgt de bijbehorende stroomsterkte.

$$I_1 = \frac{0,8^2}{\sqrt{(1,71 \times 0,8)^2 + (1 - 0,5 \times 0,8^2)^2}} \times 0,93 \times 36 = 14 \text{ A}$$

Hier toe dient eerst de $I_{1k} = \frac{U_n}{X_d}$ uitgerekend te worden.

$$I_{1k} = \frac{220}{6,1} = 36 \text{ A.}$$

Uit formule (4) volgt $\gamma^2 = \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \frac{X_d}{X_c}$

$$X_c = \frac{X_d \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{(1,3 \times \gamma_{(\beta, \text{extr})})^2} \quad (22)$$

Neem voor $\frac{\omega}{\omega_n} = 0,95$

$$X_c = \frac{6,1 \times (0,95)^2}{(1,3 \times 0,615)^2} = 8,66 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c} \quad (23)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 8,7} = 366 \mu F$$

Voor een driehoek geschakelde condensator keten is de capaciteit 1/3 van de waarde hierboven berekend.

$$C = 1/3 \cdot 366 = 122 \mu F.$$

Met (5) berekent men de weerstand R_1 .

$$R_1 = \rho_1 \sqrt{X_d \times X_c}$$

$$R_1 = 1,71 \sqrt{6,1 \times 8,7} = 12,5 \Omega.$$

Let wel dat R_1 de som is van de stator wikkelingsweerstand en de uitwendig aangebrachte weerstand

3.3. Karakteristieken van een 3 kW machine

Bepaalt men voor een bepaalde machine over een breed frequentiegebied de spanning, het koppel, de stroom, dan zijn voor de machine de volgende karakteristieken op te tekenen.

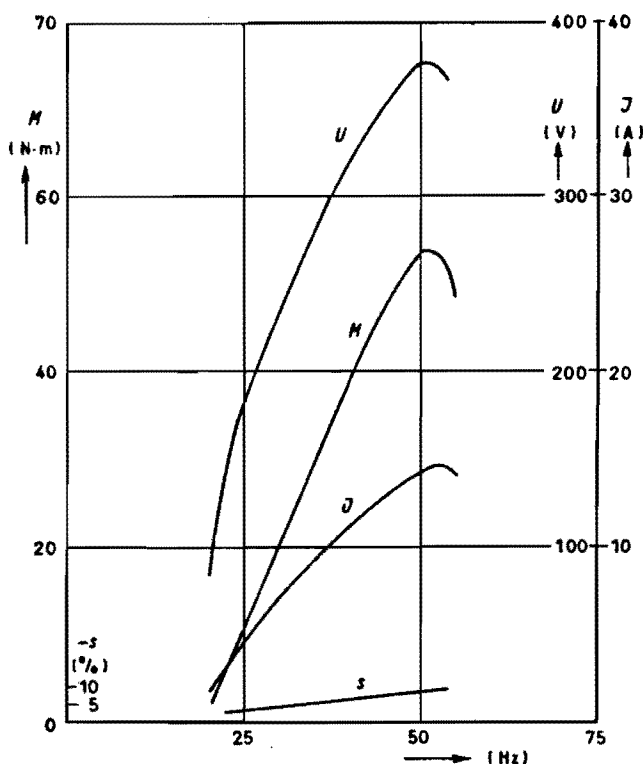


Fig. 6.

In fig. 6 zijn voor de waarden van $C = 100 \mu F$ en $R = 12,9 \Omega$ de spanning, stroom, koppel en de slip uitgezet als functie van de stator frequentie.

Wil men de machine toepassen voor lagere frequenties dan kiest men voor $\frac{\omega}{\omega_n}$ een lagere waarde: formule (22).

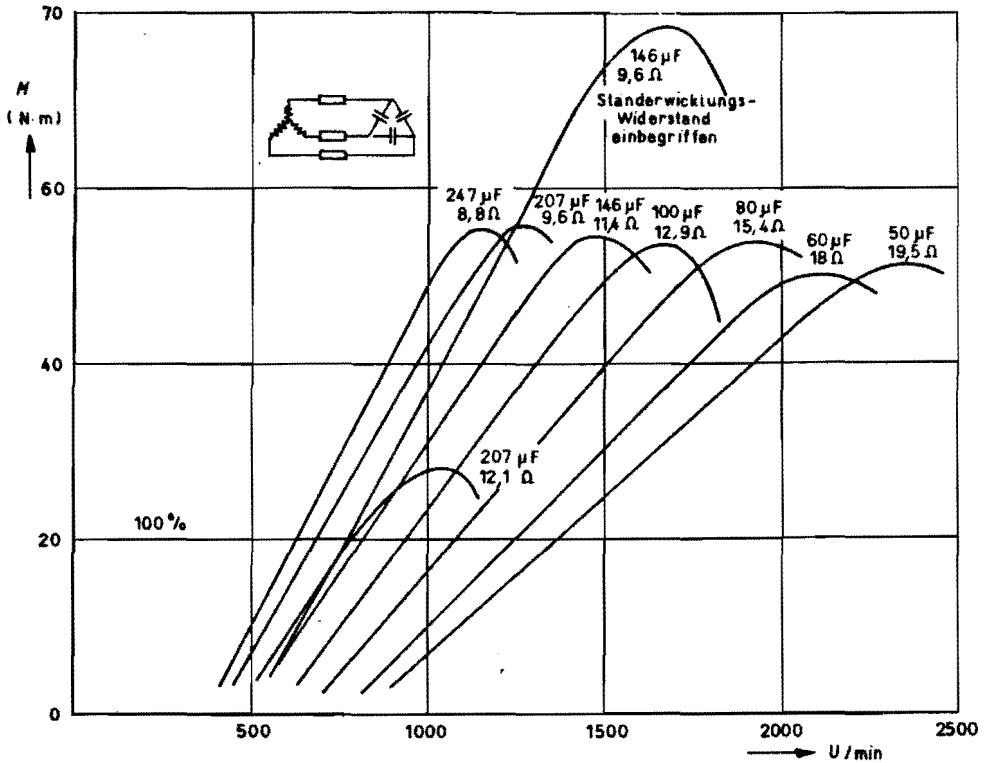


Fig. 7.

Fig. 7 geeft de koppel toerenkrommen van een 3 kW asynchrone machine belast met verschillende waarden voor de capaciteit en de weerstand.

Men ziet uit fig. 7 dat hoe lager het toerental is waarvoor het maximum koppel optreedt, des te groter de condensatoren dienen te zijn, zoals relatie (22) laat zien.

4. NABESCHOUWING

Past men liever niet 3 identieke weerstanden toe, dan is het aan te bevelen om de machine met een drie-fase gelijkricht brug af te sluiten. Deze brug levert dan een gelijkspanning aan één weerstand. De schakeling kan er dan als volgt uitzien.

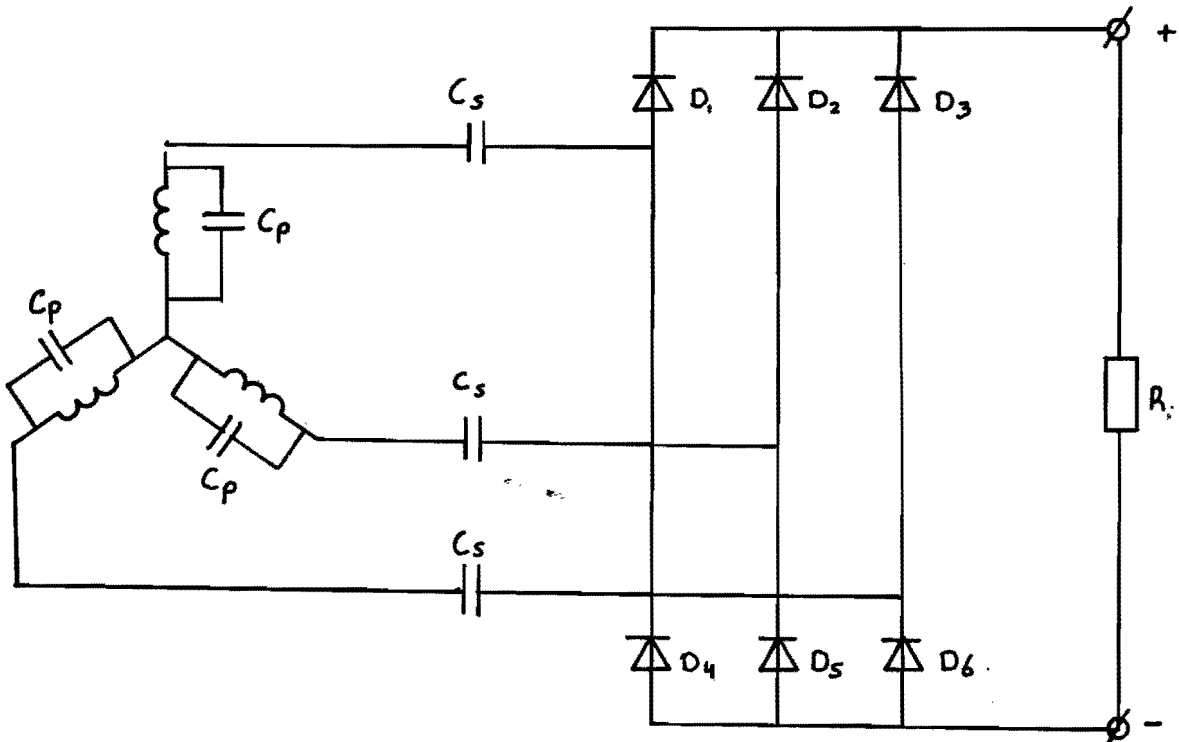


Fig. 8

De parallelkring van de spoel (machine) en de condensator C_p geeft voor een bepaald toerental een klemspanning U_o . Een uitwendige ohmse belasting (gelijkrichtbrug met weerstand R) beïnvloedt de belasting afhankelijke draaiveld reactantie zodanig dat de uitgangsspanning in elkaar zakt. De machine vraagt een extra capacatieve blindstroom component wanneer deze zwaarder belast wordt. De belastingsafhankelijke blindstroom component is te verkrijgen indien men in serie met de belasting condensatoren C_s aanbrengt. Op deze wijze is voor een bepaald toerental een constante uitgangsspanning te verkrijgen onafhankelijk van de belasting.

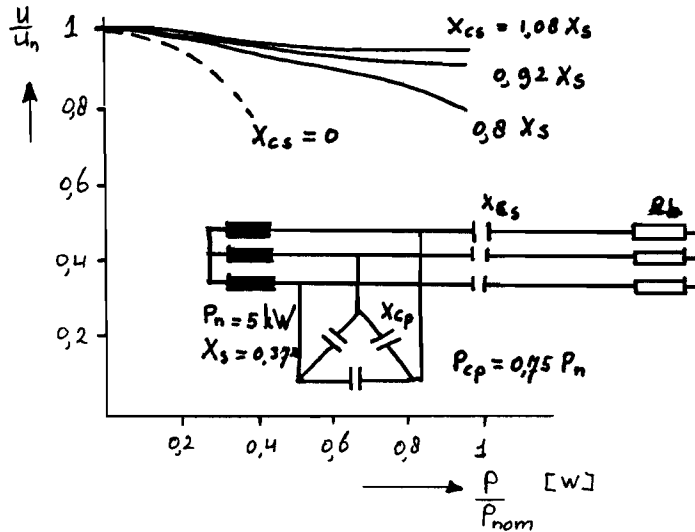


Fig. 9

De afhankelijkheid van de spanning van de belasting voor verschillende seriecondensatoren.

Wil men de machine koppelen aan een windmolen en wordt de eis gesteld dat de spanning constant moet zijn, dan moet de molen vrijwel een constant toerental bezitten (fig. 9).

Dit constante toerental is te verkrijgen met bladverstelling d.m.v. centrifugaal gewichten.

Wanneer men geen eis stelt aan de uitgangsspanning of frequentie, dan levert de machine bij bepaalde belastingen de koppeltoeren kromme zoals die in fig. 7 staan opgetekend.

Fig. 7 geeft tevens informatie over het toerengebied dat de machine kan volgen.

De koppeltoeren-kromme van de windmolen heeft een kwadratisch verloop. Wanneer we het toerental evenredig laten toenemen met de windsnelheid.

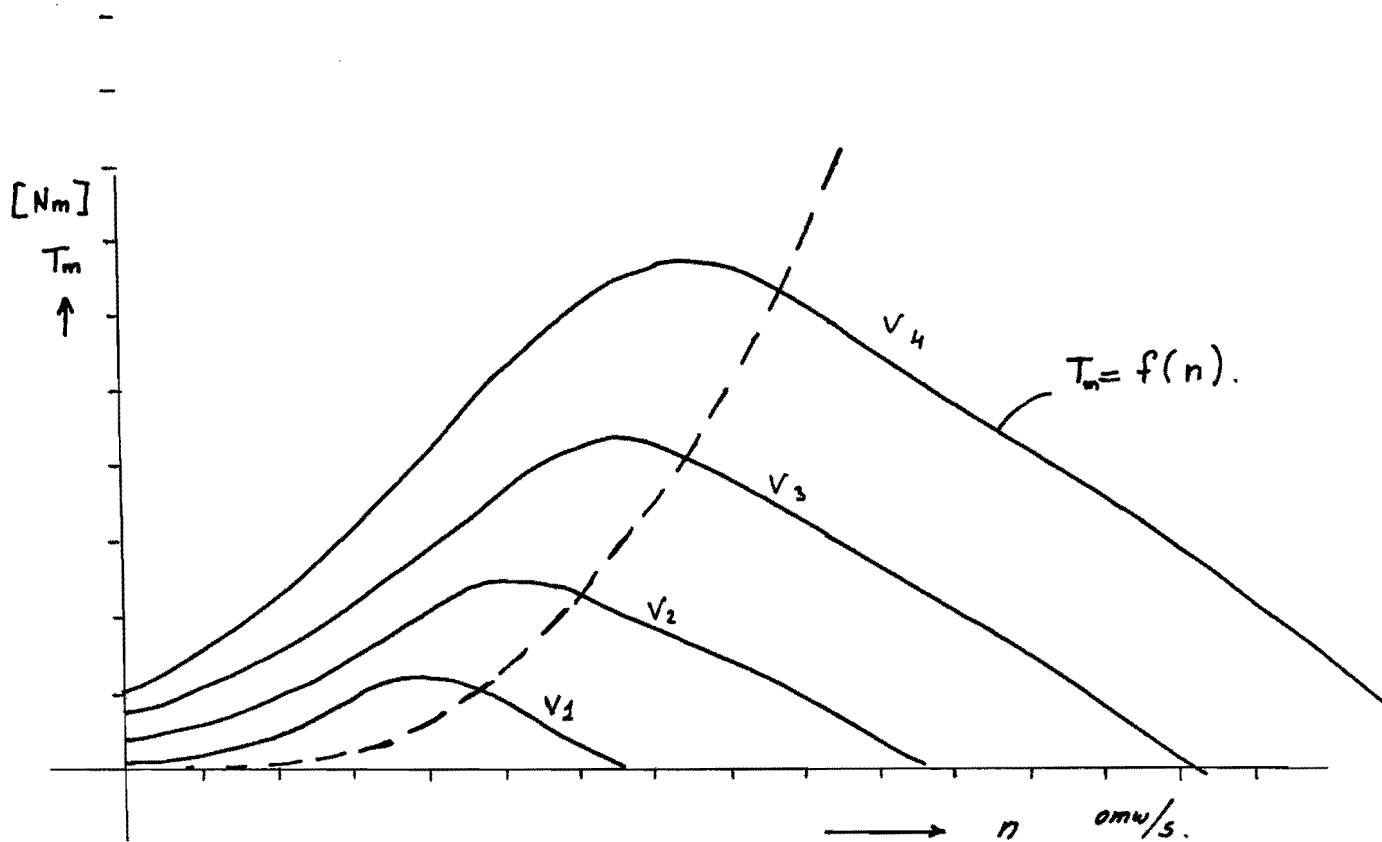


Fig. 10

Fig. 10. De koppeltoeren-kromme van een windmolen voor verschillende windsnelheden.

Belast men de molen volgens de gestreepte lijn (fig. 10) dan levert de molen zijn maximale vermogen. Het is daarom zaak om een belasting aan de molen te koppelen welke in ieder geval de gestreepte lijn benadert.

De asynchrone generator bezit lineaire koppeltoeren-kromme (zie fig. 7). Deze lineaire karakteristiek moet zodanig langs de parabolische karakteristiek liggen dat deze in een zo breed mogelijk toereengebied nog steeds een kleine afwijking t.o.v. elkaar vertonen.

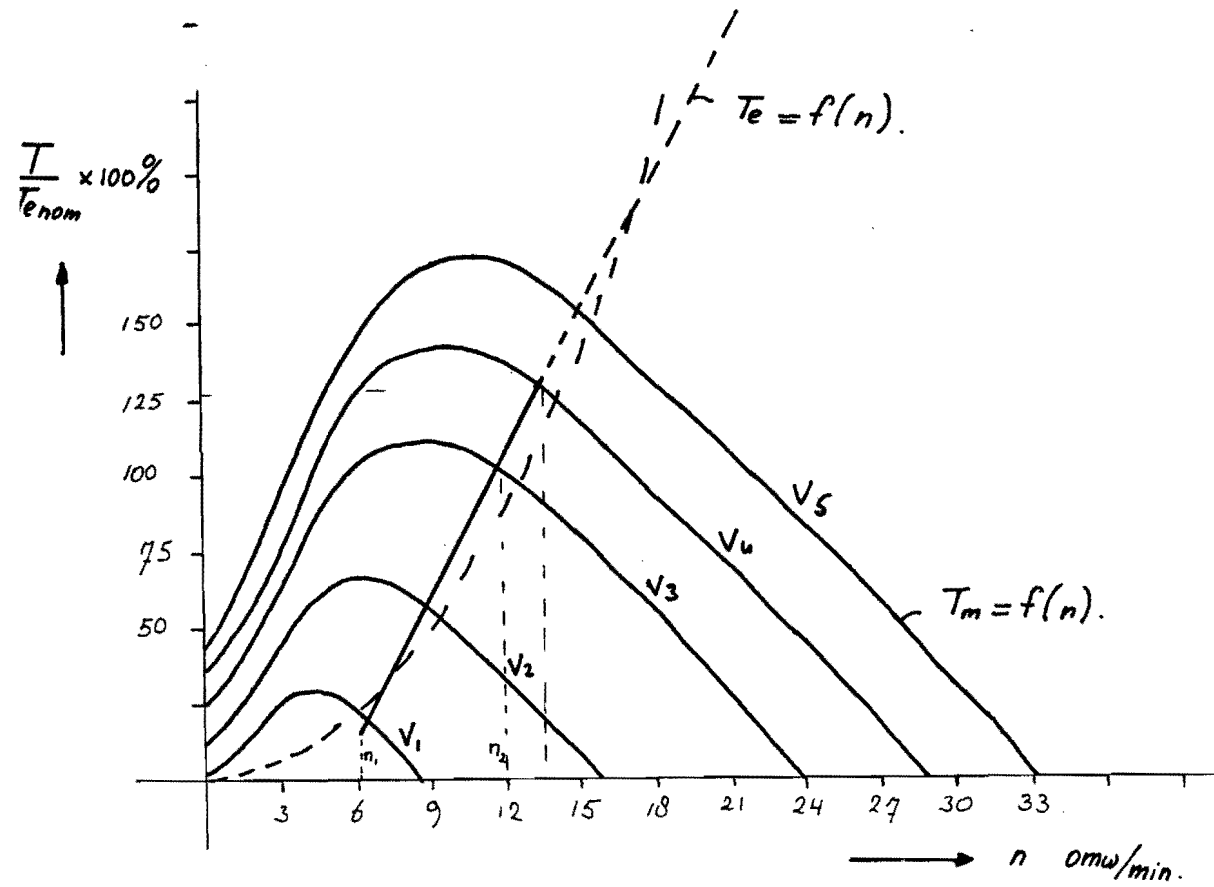


Fig. 11. De koppeltoeren-krommen van de molen en van de elektrische machine.

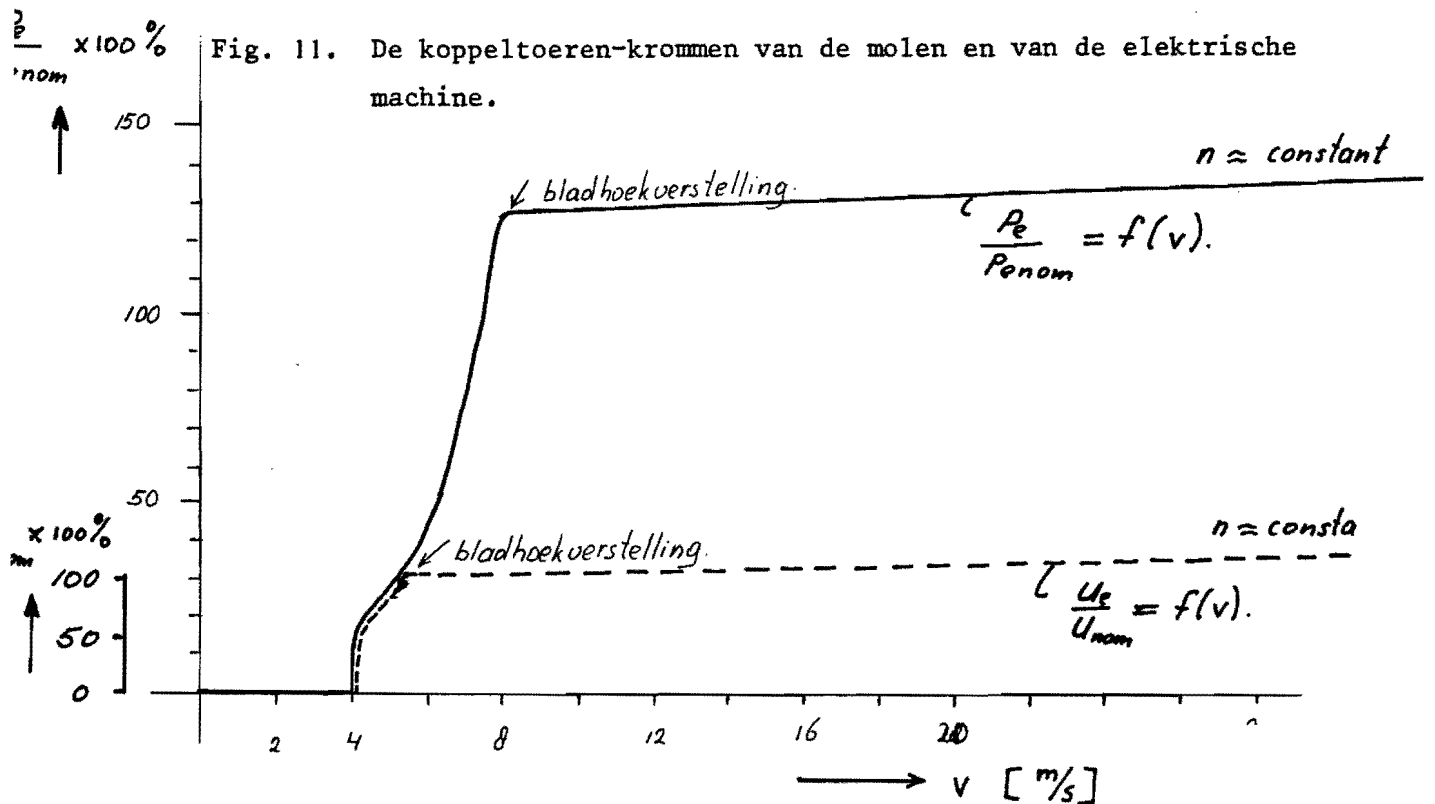


Fig. 12.

Het relatieve vermogen als functie van de windsnelheid indien aan de molen een vaste belasting is gekoppeld.

De relatieve spanning als functie van de windsnelheid.

Een tweede bijkomstigheid is het feit dat men voor hoge windsnelheden de molen wil beveiligen tegen een te hoog toerental, en te hoge axiaalkracht.

Het toerental is boven een bepaalde windsnelheid d.m.v. bladverstelling redelijk constant te houden.

Vanwege de bladverstelling neemt het koppel van de molen niet toe t.g.v. hogere windsnelheden.

De axiaalkrachten nemen relatief af omdat de snellopendheid sterk afneemt.

Uit fig. 11 blijkt dat de toerental variatie tussen minimale en nominaal twee keer bedraagt.

De koppeltoeren-kromme van de machine is lineair. Hieruit volgt dat voor een toerental verdubbeling vier keer zo groot vermogen opgewekt wordt.

De asynchrone machine heeft voor $P = \frac{P_{nom}}{4}$ nog een redelijk rendement 60 à 70%.

Indien er windsnelheden boven V_{nom} optreden, dan moet het toerental, constant gehouden worden.

Uit fig. 7 concludeert men een constant koppel als het toerental constant is.

Het vermogen zal dan voor hoge windsnelheden $P = \omega \cdot T$ constant blijven.

5. CONCLUSIE

De asynchrone machine kan onafhankelijk van een draaistroom net functioneren.

Mogelijke toepassingen gekoppeld met een windmolen zijn deze:

1^e. De machine gekoppeld aan een vaste weerstandsbelasting.

Gebruiksdoeleind: verwarming.

2^e. De machine zodanig uitvoeren met serie en parallel condensatoren dat voor een constant toerental de uitgangsspanning constant blijft.

(zie fig. 9).

Om het toerental constant te houden is hiervoor bladhoekinstelling d.m.v. centrifugaal gewichten vereist.

De tweede toepassing heeft als nadeel dat het vermogen dat uit de wind onttrokken kan worden voor bladverstelling evenredig met de windsnelheid toeneemt en niet met de derde macht zoals de optimale formule voor de windmolen laat zien.

De eerste toepassing zal dan ook veel meer energie aan de wind kunnen onttrekken dan de tweede, omdat de tweede toepassing al bij lage windsnelheden bladverstelling nodig heeft.