

MASTER

Energiebesparing op het hulpvermogen aan boord van zeeschepen

de Visscher, A.G.

Award date:
1981

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

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

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

AFDELING DER WERKTUIGBOUWKUNDE

Vakgroep Aandrijftechniek

Energiebesparing op het
hulpvermogen
aan boord van zeeschepen

A.G. de Visscher

EM 81-29

Afstudeerwerk verricht o.l.v.:

Prof.dr.ir. W.M.J. Schlösser

Prof.ir. J.A. Schot

augustus 1981

T E C H N I S C H E H O G E S C H O O L E I N D H O V E N

Voorwoord

Dit afstudeerwerk is uitgevoerd in samenwerking met het CMO (Coördinatie Maritiem Onderzoek) te Rotterdam, als onderdeel van het project "Rationeel energie gebruik in de scheepvaart". Voor de begeleiding, welke ik binnen het CMO mocht ontvangen, wil ik hierbij een woord van dank richten aan A.C. Pijcke, Prof. ir. N. Dijkshoorn en R.J. de Vries.

Mijn dank gaat speciaal uit naar Prof. dr. ir. W.M.J. Schlösser en Prof. ir. J.A. Schot voor de actieve belangstelling, waarvan zij tijdens stimulerende gesprekken blijk gaven. Ook de organisatorische begeleiding van ir. J.A.M. Smits wil ik niet onvermeld laten.

De aard van deze studie maakte een intensieve gedachtenwisseling met personen en instanties binnen en buiten de T.H. noodzakelijk. Met name ir. W. de Jong, Prof. v. Vollenhoven, Prof. Nauta Lemke, Nedlloyd Rederijen, ASEA, Bolnes Dieselmotoren en Siemens zijn mij hulpzaam geweest bij de uitvoering van dit onderzoek.

Ook wil ik mijn erkentelijkheid uitspreken voor de medewerking die J.H.A. van Rooij verleende aan de totstandkoming van hoofdstuk 6.

In het bijzonder bedank ik verder Rieky de Visscher voor de wijze, waarop zij het type-werk heeft verzorgd.

<u>Inhoudsopgave</u>	<u>Blz.</u>
1. <u>Samenvatting</u>	7
2. <u>Inleiding</u>	8
3. <u>Historisch overzicht van het gebruik van elektrische energie a/b van zeeschepen</u>	14
4. <u>Energetische analyse van het hulpvermogen a/b van het m.s. "Nedlloyd Bahrain"</u>	20
5. <u>Besparingsmogelijkheden</u>	22
6. <u>Opwekking van elektriciteit</u>	25
6.1. <u>Uit de afgassen van de hoofdmotor</u>	25
6.2. <u>Asgeneratorsystemen</u>	27
6.2.1. Inleiding	27
6.2.2. Economische analyse van een modern asgeneratorsysteem	29
6.2.3. Asgeneratorsysteem met variabele frequentie	37
6.2.4. Conclusies	41a
6.2.5. Lijst van gebruikte symbolen	42
6.3. <u>Dieselaggregaten</u>	43
6.3.1. Inleiding	43
6.3.2. Het dieselmotorrendement	44
6.3.2.1. Inleiding	44
6.3.2.2. Optimale belastingsverdeling over meerdere aggregaten	46
6.3.2.3. Meerdere (eventueel verschillende) aggregaten	51
6.3.2.4. Conclusies	53
6.3.2.5. Lijst van gebruikte symbolen	54

6.3.3. Generatorrendement	55
6.3.3.1. Inleiding	55
6.3.3.2. Berekening generatorrendement als functie van p en $\cos\varphi$	55
6.3.3.3. Conclusies	59
6.3.3.4. Lijst van gebruikte symbolen	60
6.3.4. Het rendement van een dieselaggregaat	61
7. <u>Energiebesparing door $\cos\varphi$-verbetering</u>	63
7.1. <u>Inleiding</u> (wat is $\cos\varphi$)	63
7.2. <u>$\cos\varphi$-verbetering</u>	63
7.3. <u>Conclusies</u>	67
8. <u>Verbruik van elektriciteit</u>	68
8.1. <u>Energiebesparing door verminderd verbruik</u>	68
8.2. <u>Toerenregeling centrifugaalpompen</u>	71
8.2.1. Inleiding	71
8.2.2. Praktisch voorbeeld van mogelijke besparingen	73
8.2.3. Conclusies	77
8.2.4. Lijst van gebruikte symbolen	78
8.3. <u>Spanningsregeling inductiemotoren</u>	79
8.3.1. Inleiding	79
8.3.2. Besparingen	80
8.3.3. Conclusies	83
8.3.4. Lijst van gebruikte symbolen	84
9. <u>Algemene conclusies</u>	85
10. <u>Suggesties voor verder onderzoek</u>	87

<u>Literatuurlijst</u>	91
<u>Appendix A1</u>	97
<u>Energetische analyse van het hulpvermogen a/b van het m.s. "Nedlloyd Bahrain"</u>	
Inleiding	97
Verbruik	99
Opwekking	112
Bijlage 1	114
Bijlage 2	116
Bijlage 3	117
Gebruikte symbolen bij appendix A1	116
<u>Appendix A2</u>	119
<u>Optimale belastingsverdeling over meerdere diesel- motoren</u>	
Gebruikte symbolen bij appendix A2	121

1. Summary

This report describes some possible energy savings, concerning the auxiliary system aboard seagoing vessels.

Bunker prices have reached such a high level nowadays, that the costs of running a ship consist of fuel costs for more than 60%. The part for auxiliary power will be about 15% of the total energy costs. It is inevitable for both shipbuilders and shipowners to spend great effort in energy saving technics.

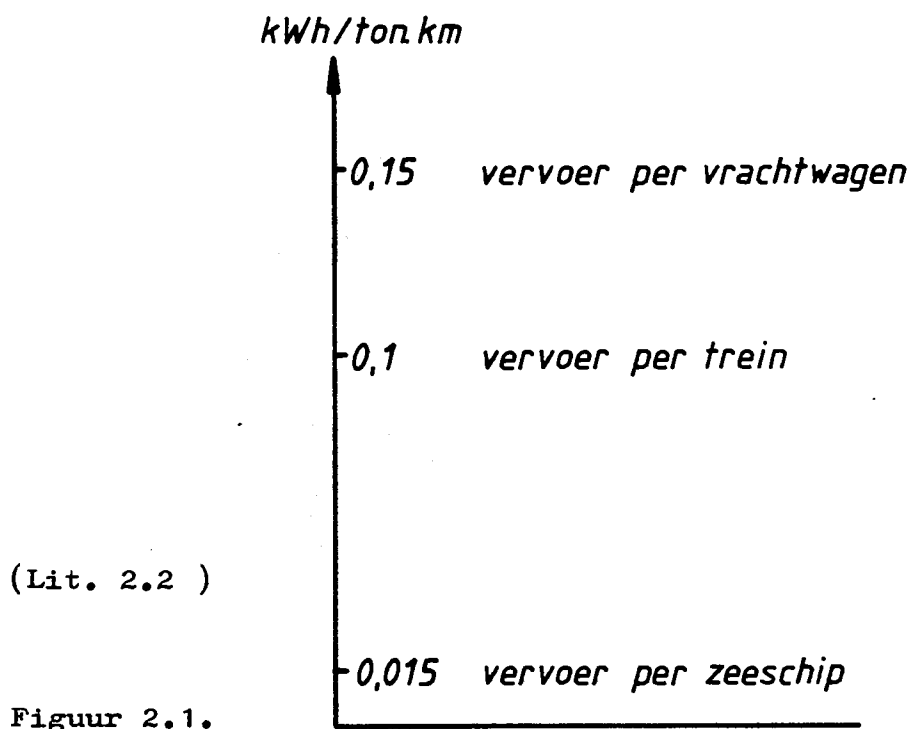
After a brief survey of electricity aboard sea ships in the past (chapter 3) and an analysis of electric energy use on a modern cargo ship (chapter 4) several energy saving technics will be discussed (chapter 5 to 8).

Special attention will be paid to the generation of electricity (chapter 6) such as waste heat recovery, shaft generator systems and diesel-driven generators, because most savings seem to appear in the generation-part of the electric system. In chapter 7 the importance of a high power factor will be explained while in chapter 8 some possible savings are enumerated in the user-part of the electric system.

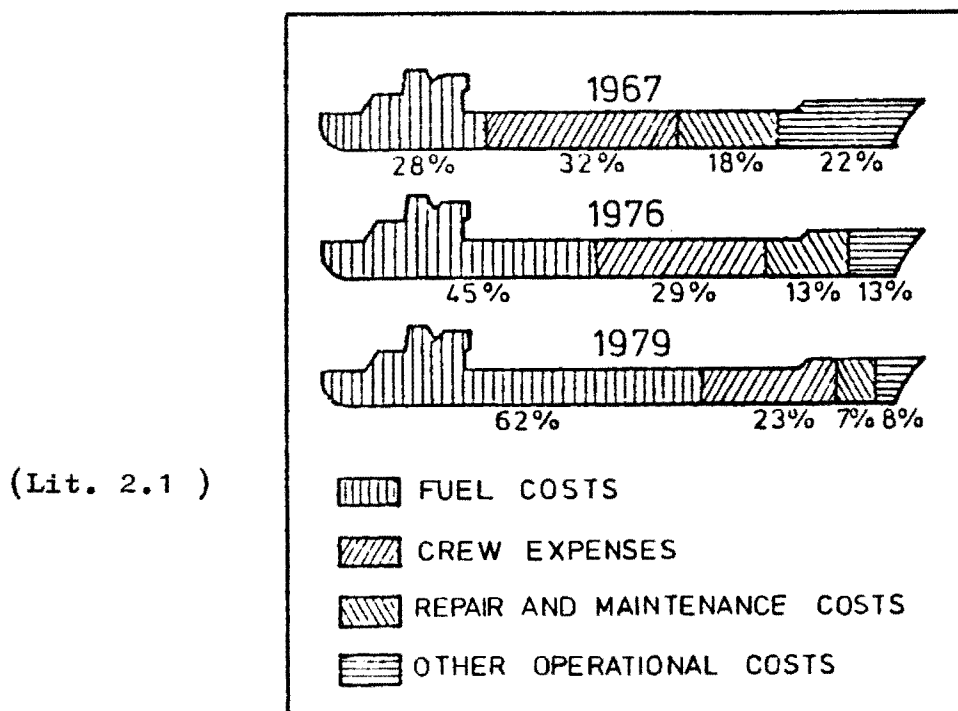
Conclusions can be found in chapter 9. Chapter 10 at last shows some suggestions for further investigation.

2. Inleiding

De Nederlandse grote handelsscheepvaart is een belangrijke schakel in het internationale transportgebeuren. Bijna 60% van het totale goederengewicht, dat onze grenzen passeert wordt vervoerd m.b.v. zeeschepen. Indien in plaats van het goederengewicht het aantal tonkilometers wordt vergeleken, zal het aandeel van zeeschepen zelfs nog groter zijn, omdat goederen per zeeschip vaak over grotere afstanden worden vervoerd dan bijvoorbeeld per trein of per vrachtwagen.



Energetisch gezien is goederenvervoer per zeeschip in vergelijking met andere vervoermiddelen een gunstige aangelegenheid. In figuur 2.1. is dit duidelijk te zien. Hier is voor een zeeschip, een trein en een vrachtwagen (de drie belangrijkste grensoverschrijdende vervoermiddelen) de energie uitgezet, die nodig is om één ton goederen over een afstand van één kilometer te verplaatsen. Toch is voor de handelsscheepvaart het aandeel van energiekosten



Figuur 2.2. Operational costs for a bulk carrier in 1967, 1976 and 1979.

in de totale exploitatiekosten onrustbarend hoog geworden (zie figuur 2.2.). Dit als gevolg van de sterke stijgingen van brandstofprijzen welke zijn ingezet tijdens de oliecrisis van 1973 (zie figuur 2.3., 2.4. en 2.5.). Om bovengenoemde redenen is het zeer wenselijk het energieverbruik aan boord van zeeschepen sterk te verminderen.

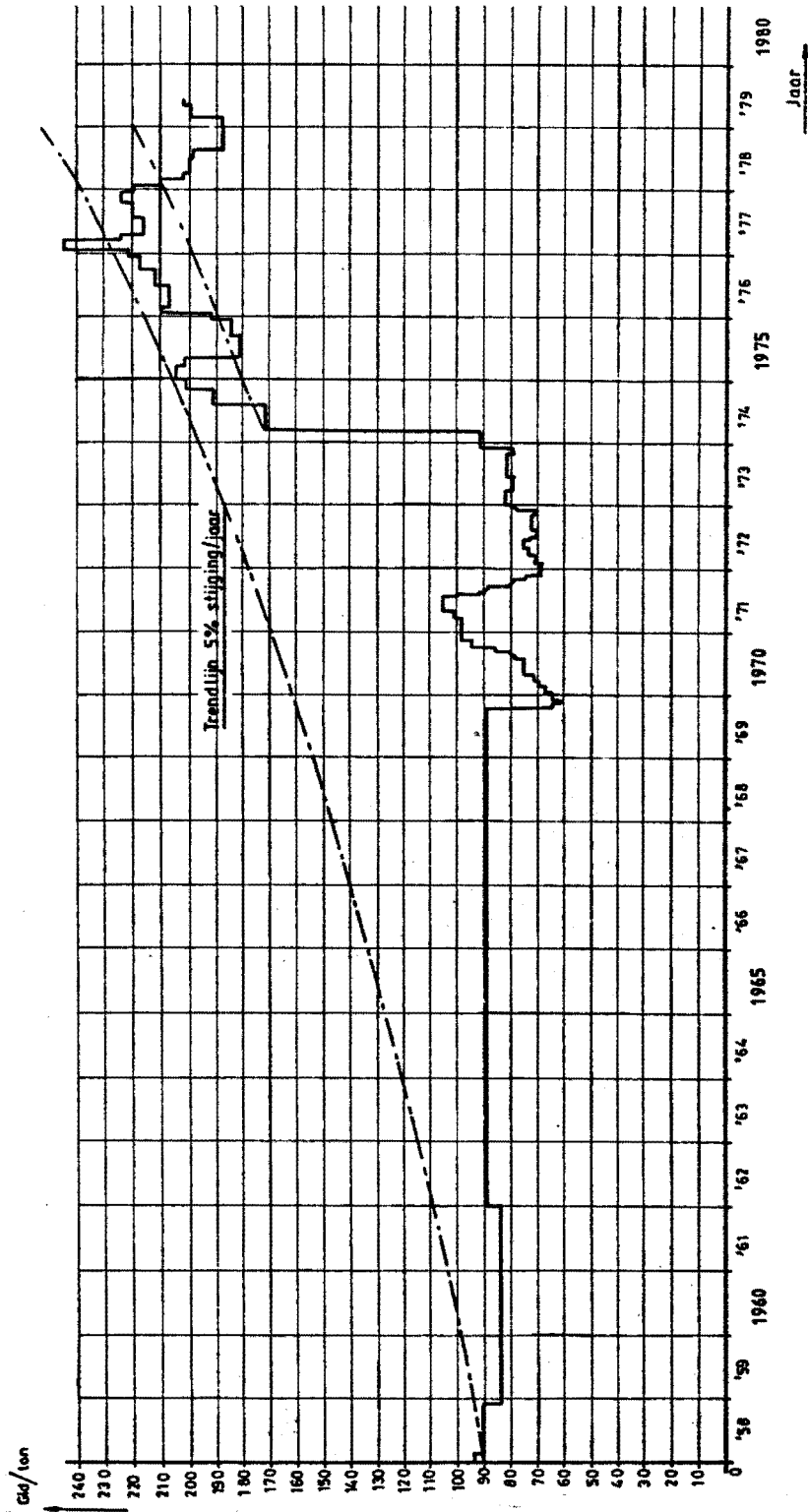
Voor het doorvoeren van energiebesparende maatregelen is echter nog een belangrijke motiverende faktor aanwezig. De positie van de Nederlandse scheepsbouw in internationale kringen is de laatste jaren sterk verzwakt. Voor deze tak van de Nederlandse industrie is het van levensbelang nieuwe systemen te ontwikkelen waarmee een sterke terugdringing van het energieverbruik aan boord van zeeschepen kan worden bereikt. Hopelijk kan hierdoor de concurrentiepositie t.o.v. andere maritieme landen worden verbeterd.

De energie, die nodig is voor de exploitatie van een schip kan globaal gesplitst worden in een energiestroom voor de voortstuwing van het schip (het hoofdvermogen) en een energiestroom voor de benodigde elektriciteit (het hulpvermogen). Hoewel de energie voor de

voortstuwing ongetwijfeld de grootste post is, wordt de invloed van het hulpvermogen vaak onderschat. De verdeling over hulp- en hoofdbedrijf is sterk afhankelijk van het type schip, maar een goed gemiddelde kan worden gevonden in 13%/87% voor het aantal tonnen olie voor respectievelijk het hulp- en hoofdbedrijf. Het hulpvermogen wordt echter met behulp van een duurdere soort olie (Marine Diesel Oil) opgewekt, dan het hoofdvermogen (Marine Fuel Oil). (zie hiervoor figuur 2.4.). Hierdoor verschuift de economische verdeling naar 17%/83%. Dus: van de totale brandstofkosten is 17% nodig voor het hulpvermogen; 83% wordt gebruikt voor de voortstuwing. Het aandeel van elektriciteitskosten is dus zeker niet te verwaarlozen. Absoluut gezien komen de brandstofkosten voor de produktie van elektrische energie neer op f500.000,- à f1.000.000,- per jaar voor een gemiddeld vrachtschip. Besparingen op deze post zullen zeker welkom zijn. Dit verslag gaat over mogelijke besparingen op de brandstofrekening voor elektrische energie. Na een historisch overzicht van het gebruik van elektriciteit a/b van zeeschepen (hoofdstuk 3) en een energetische analyse van een vrachtschip (hoofdstuk 4) zal een aantal besparingsmogelijkheden worden doorgelicht (hoofdstuk 5 t/m 8). In hoofdstuk 9 zijn de belangrijkste conclusies samengevat. Hoofdstuk 10 tenslotte bevat een aantal suggesties voor verder onderzoek.

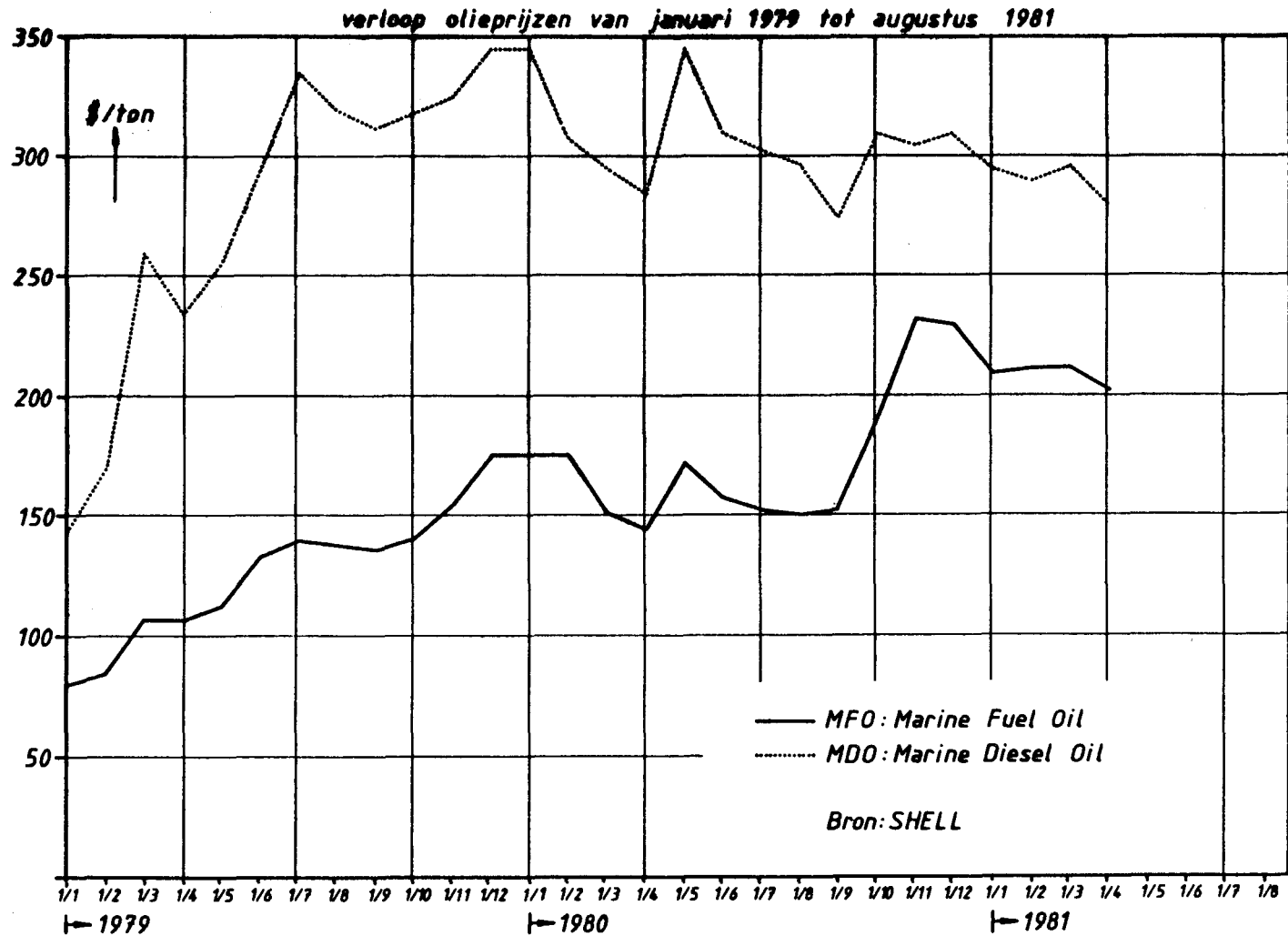


Afb. 1. Verloop officiële maximum prijzen hoogzwaaiige zware stookolie vanaf 1958 - 1978
Zone 1, aanvoer per 300 tons tanklichter

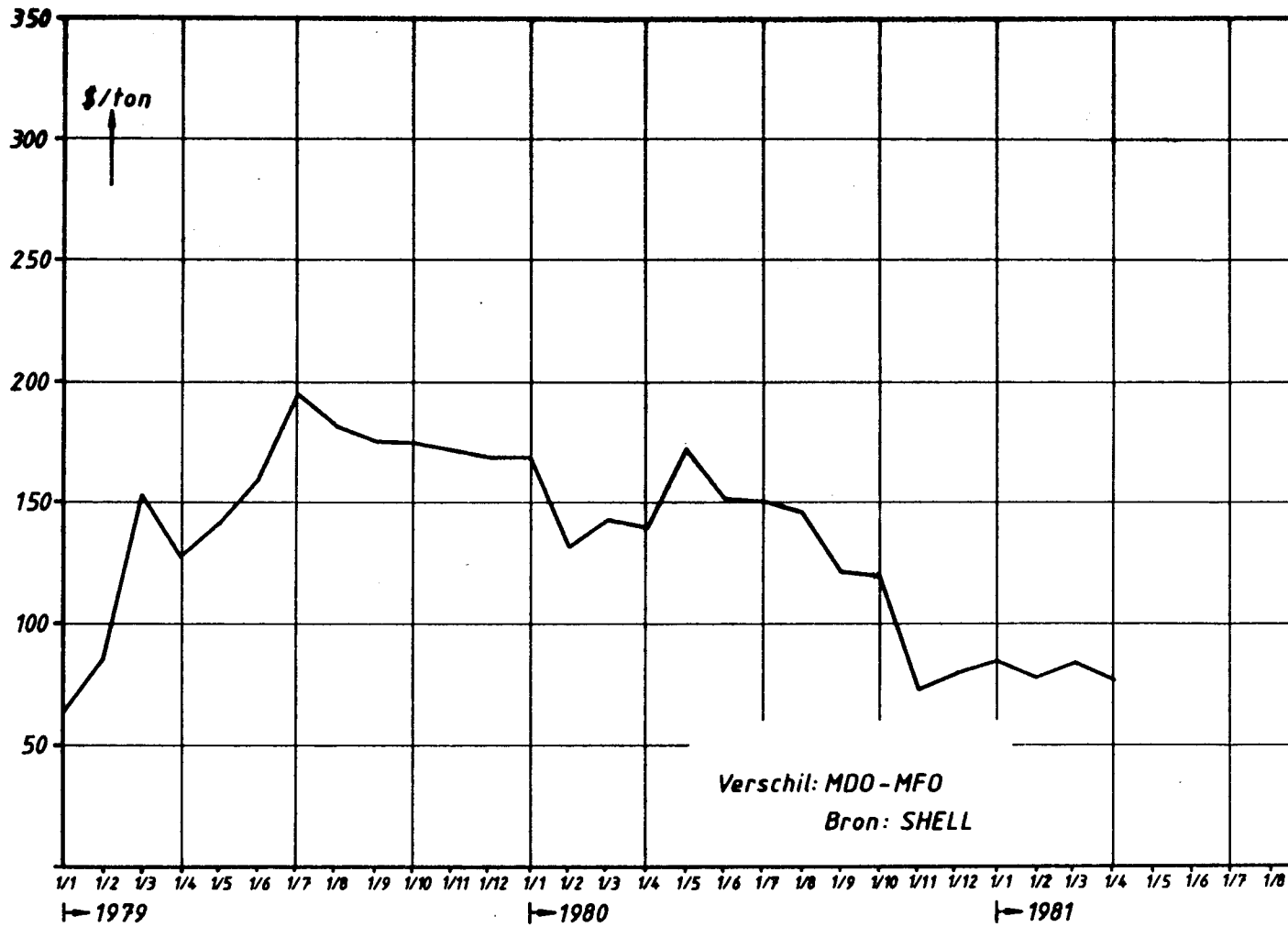


Figuur 2.3. Uit: "Krachtwerktuigen"

Figuur 2.4.



Figuur 2.5.



3. Historisch overzicht van het gebruik van elektrische energie aan boord van zeeschepen

Omstreeks het jaar 1870 is men begonnen met het gebruik van elektriciteit a/b van zeeschepen. In de beginjaren werd deze vorm van energie hoofdzakelijk voor verlichtingsdoeleinden gebruikt. In die tijd werden nog koolspitslampen toegepast bij een spanning van 65 Vdc. Figuur 3.1. geeft een voorbeeld van "instructies voor het gebruik van elektrische apparatuur" a/b van de "City of Berlin", één van de eerste schepen, voorzien van elektrisch licht. Later werden ook elektromotoren toegepast. Hiervoor werd een spanning van 220 Vdc gekozen. Voor verlichting bleef de spanning voorlopig 65 Vdc.

In 1891 werden de eerste aanbevelingen gedaan, omtrent het gebruik van elektrische energie a/b van schepen, door "Lloyds Register of Shipping". Deze aanbevelingen waren echter niet bindend en het duurde nog tot 1920 alvorens de eerste voorschriften werden opgesteld.

In de periode tot de tweede Wereldoorlog volgden geen revolutionaire ontwikkelingen. Het gebruik van elektriciteit werd geleidelijk uitgebreid en de spanning voor verlichting werd opgevoerd tot 220 Vdc.

Vooraf in de periode 1945-1965 vond een spectaculaire toename plaats van het opgestelde elektrische vermogen. Bedroeg dit vermogen vlak voor de oorlog ongeveer 70 kW voor een gemiddeld vrachtschip, tegenwoordig is a/b van een modern vrachtschip al gauw 1500 à 2500 kW elektrisch vermogen geïnstalleerd. In deze periode zijn ook vele belangrijke technische ontwikkelingen geweest. Als voorbeeld wordt genoemd de ontwikkeling van een statische omzetter, die in asgeneratorsystemen kan worden toegepast. (Het patent hiervoor werd reeds in 1945 aangevraagd! Zie figuur 3.2.)

DIRECTIONS FOR WORKING ELECTRIC LIGHT APPARATUS.

ORIENT STRAM NAVIGATION COMPANY.

S. S.

SALOON LIGHTS.—The Glasses of these should be cleaned, and the Carbons looked to before the light is required. If during the time of lighting, any one light should be unsteady, or go out, it should be shut off by turning the black handle of the switch, in the same manner as if it was a gas tap.

CAUTION! Never undo the glass of a lamp when generator is in action, without first turning off the current.

ARC LAMP.—The long Carbon should be placed at the top, and should have a blunt point. It burns twice as fast as bottom one.

CAUTION! Never touch the Carbons or working parts of lamp without shutting off the current by means of the switch.

THE SWITCH should be kept always "Central" during the day; and the Saloon or Deck lights started or stopped by turning the handle in the direction marked.

GENERATOR.—The lubricators and the driving belt should be looked to every day; the brushes should be taken off and cleaned at least once a week. When put back they should be moved laterally to a new place so as to equalize the wear.

Revolutions of Generator per minute _____

Revolutions of Engine .. _____

NOTE.—The speed must be slackened if the copper contacts in the saloon lamps are found to melt at point where carbon touches.

On no account must the circuit of the current be shortened, or the position of the wires altered.

IMPORTANT! Never touch any part of the Electric lighting gear with both hands without first ascertaining that the current is off or you will make yourself the conductor of the current and receive a severe shock.

Figuur 3.1. Instrukties voor het gebruik van elektrische apparatuur a/b van de "City of Berlin". (± 1870)

(Lit. 3.3)

Zu der Patentschrift 972 148
Kl. 21d² Gr. 45 01
Internat. Kl. H 02j —

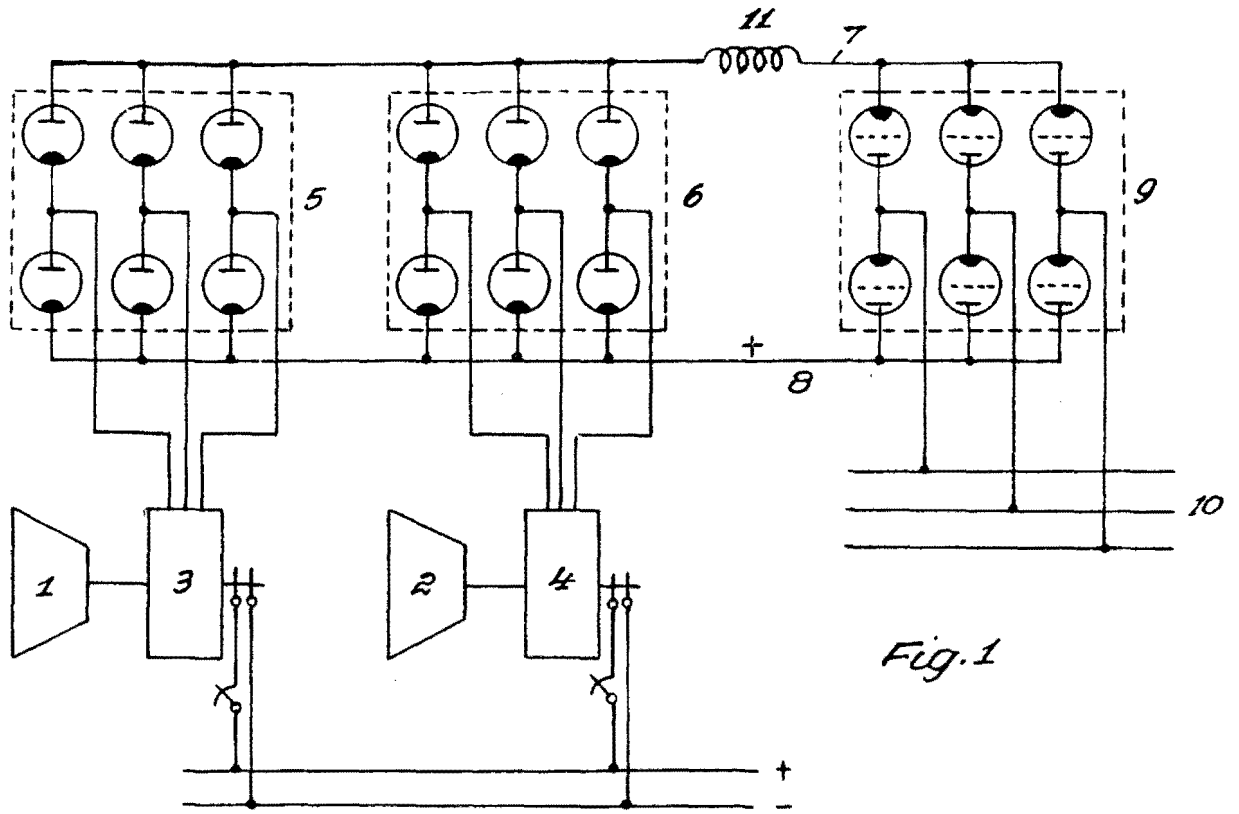


Fig. 1

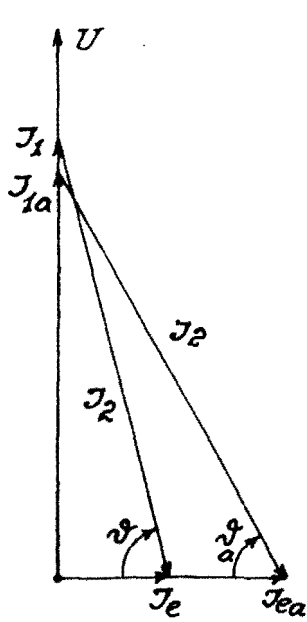


Fig. 2

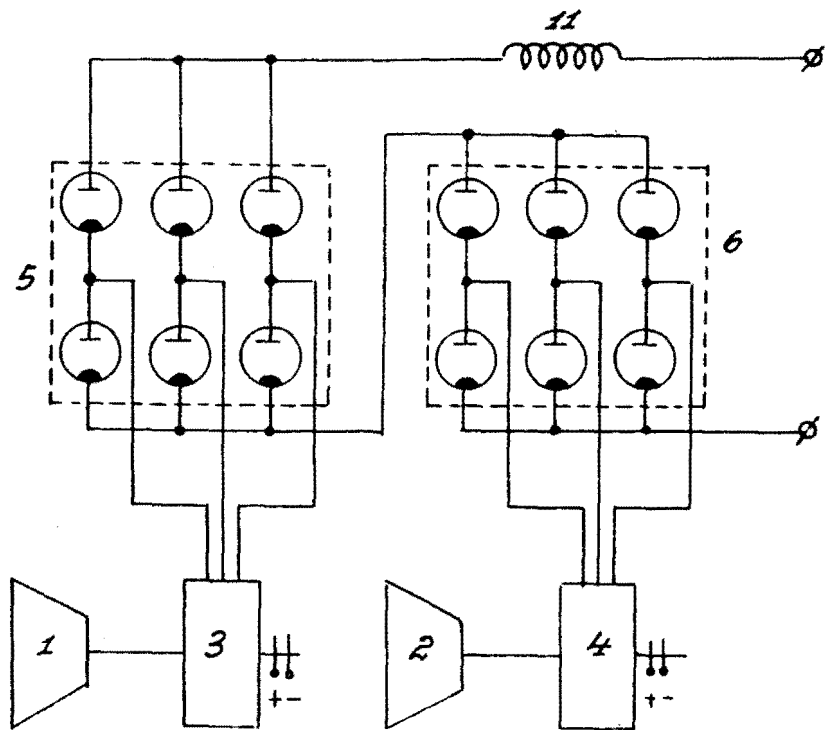
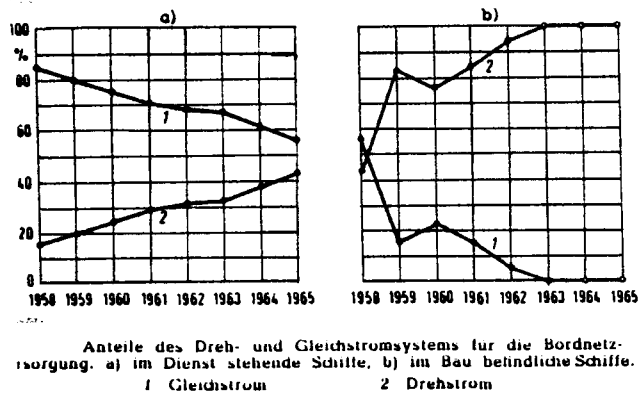


Fig. 3

Figuur 3.2.



Figuur 3.3.

(Lit 3.2)

Tot 1950 was, afgezien van een aantal uitzonderingen, de stroomsoort algemeen 220 Vdc. Hierna werden steeds meer wisselstroomsystemen toegepast. Eerst druppelsgewijs, met de grote doorbraak omstreeks 1960 (zie figuur 3.3.). Meestal werd 440V / 60Hz of 380V / 50Hz gekozen.

Aan de toepassing van wisselstroom in plaats van gelijkstroom lag een aantal belangrijke voordelen ten grondslag:

- Wisselstroominstallaties vragen minder onderhoud dan gelijkstroominstallaties. Vooral de vervanging van gelijkstroommotoren (met zijn commutator en borstels) door nagenoeg onderhoudsvrije inductiemotoren droeg hiertoe bij.
- Wisselstroominstallaties zijn kleiner, lichter en goedkoper dan gelijkstroominstallaties. Dit werd belangrijk, toen het opgestelde vermogen sterk werd uitgebreid.
- Wisselstroom is beter schakelbaar dan gelijkstroom.

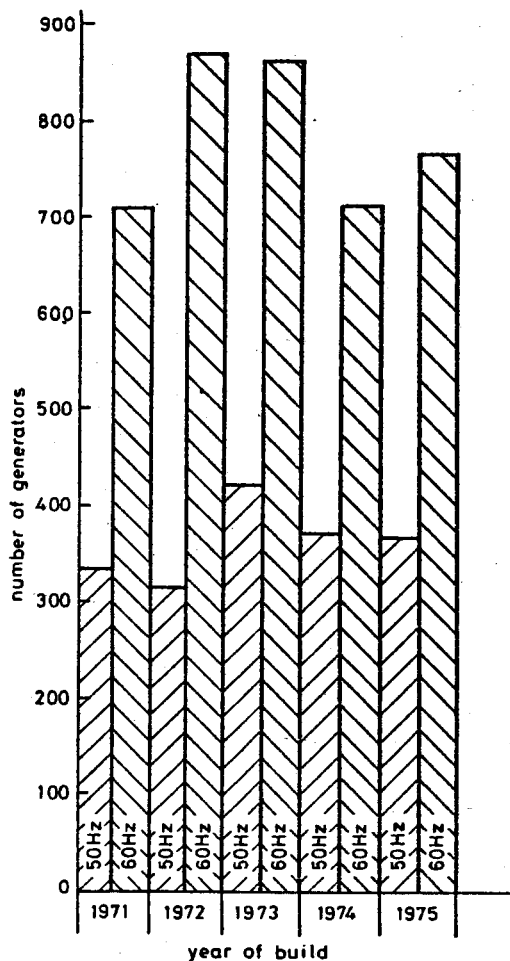
Het feit, dat inductiemotoren moeilijker regelbaar in toerental zijn dan gelijkstroommotoren, is de belangrijkste oorzaak, dat invoering van wisselstroomsystemen zo lang op zich liet wachten. Het probleem van de toerenregeling heeft men op verschillende manieren proberen op te vangen:

- men zocht naar andere systemen, waarbij toerenregeling van de elektromotor niet noodzakelijk was.
- men paste 2-toeren-regeling toe door middel van poolomschakeling van de inductiemotor.
- installatie van hydraulische overbrengingen.

- toepassing van omvormers van wisselstroom naar gelijkstroom in de zogenaamde lierhuizen.

Het is in dit verband nog interessant te vermelden, dat in de "gelijkstroomtijd" vaak een elektrotechnicus deel uitmaakte van de bemanning, welke vooral belast was met het onderhoud van de gelijkstroommachines. Met de komst van wisselstroomsystemen verdween de elektrotechnicus. Zijn (gereduceerde) taak moest worden overgenomen door scheepswerktuigkundigen.

Na de ontwikkeling van goede (en goedkope) vermogenshalfgeleiders konden deze componenten met succes worden gebruikt voor toerenregeling van gelijkstroommotoren vanuit het wisselstroomnet. Deze situatie treft men ook nu nog aan. Hoewel inmiddels goede statische omzeters zijn ontwikkeld voor de regeling van inductiemotoren, blijkt dit alternatief bij ontwerpers van scheepsinstallaties nog niet zo in trek te zijn. Vooral de hoge prijs is een probleem.



(Lit. 3.3)

Figuur 3.4.

Hoewel de laatste 20 jaar op elektronisch gebied veel is veranderd (moderne navigatieapparatuur, automatisering van de machinekamer), hebben zich op elektrotechnisch gebied weinig grote ontwikkelingen voorgedaan. De stroomsoort is nog steeds 440V/60Hz of 380V/50Hz, behoudens een aantal uitzonderingen, waar een hogere spanning wordt toegepast. Meestal wordt voor 60 Hz gekozen (zie figuur 3.4.)

4. Energetische analyse van het hulpvermogen a/b van het m.s.
"Nedlloyd Bahrain"

Bovengenoemde analyse is uitgevoerd teneinde enig inzicht te krijgen in de energiehuishouding van het hulpvermogen a/b van zeeschepen. Er is gekozen voor het m.s. "Nedlloyd Bahrain", omdat dit schip een machinekamer-inrichting heeft, welke grote overeenkomsten vertoont met vele andere schepen uit de Nederlandse koopvaardijvloot; vooral wat betreft de voortstuwing (langzaamlopende dieselmotor, niet-verstelbare schroef) en opwekking van elektriciteit (dieselaggregaten).

Het m.s. "Nedlloyd Bahrain" is een enkelschroef multipurpose motorvrachtschip geschikt voor het vervoer van stukgoed, zware stukken, containers en stortlading. De lengte van het schip bedraagt 170 meter, de breedte 27 en de holte tot het bovendek 16 meter. De deadweight bij een ontwerpdiepgang van 10 meter is 21.500 ton. De ruimten hebben een gezamenlijke inhoud van 34.700 m³, welke kunnen worden beladen tot een gezamenlijk gewicht van 6000 ton. De voortstuwing geschiedt door een 2-takt 7-cylinder scheepsdieselmotor welke een maximum continu vermogen van 16.800 pk (12.400 kW) kan leveren bij 122 toeren per minuut. De snelheid die hiermee gehaald kan worden bedraagt ongeveer 18 knoop.

Voor de resultaten van de analyse wordt verwezen naar appendix A1. De belangrijkste resultaten, kort samengevat, luiden:

- Het gemiddeld, uit de generatoren opgenomen elektrisch vermogen (371 kW), is laag t.o.v. zowel het totaal opgestelde vermogen (2100 kW) als het vermogen van een enkel aggregaat (700 kW). Hierdoor is het gemiddeld specifiek brandstofverbruik hoog. (247 g/kWh)
- Het grootste verbruikersgebied is het hotelbedrijf (31%), waarvan de kombuis en de airconditioning relatief grote individuele verbruikers zijn.
Een ander groot verbruikersgebied is de hoofdmotor (24%).

- De meeste elektrische energie wordt gebruikt voor inductiemotoren (72%). "Verlichting" speelt in de energiehuishouding een ondergeschikte rol (3%).

opmerking: Het betreft hier een analyse van één enkel schip. Verschillen met andere schepen kunnen aanzienlijk zijn voor wat betreft energieverbruik en verdeling over de verbruikers. Dit als gevolg van o.a. verschillen in klimaat, het aantal koelruimen en/of koelcontainers aan boord en de haventijd/zeetijd-verhouding.

5. Besparingsmogelijkheden

In het resterende deel van dit verslag zal een aantal besparingsmogelijkheden worden besproken. Hierbij wordt, evenals in de analyse van het vorige hoofdstuk, een splitsing aangehouden in twee delen: de opwekking van elektrische energie (hoofdstuk 6) en het verbruik van elektrische energie (hoofdstuk 8). Het tussenliggende hoofdstuk 7 handelt over $\cos\phi$ -verbetering en betreft zowel de opwekking als het verbruik.

Uitvoerig zal worden ingegaan op verschillende mogelijkheden van elektriciteitsopwekking. Eventuele besparingen zullen hier effectief zijn omdat deze het totale elektrisch vermogen omvatten. Besparingen bij individuele elektrische apparaten (de verbruikers-kant) zijn vaak geringer in absolute zin. Bovendien staan aan boord van een schip zoveel elektrische verbruikers opgesteld (enige honderden), dat het bijzonder moeilijk is iedere verbruiker apart te onderzoeken op energieverbruik. Alleen algemene adviezen kunnen worden gegeven om op verscheidene manieren tot een betere energiehuishouding te komen.

Bij de behandeling van de verschillende besparingsmogelijkheden zal, zeker bij rekenvoorbeelden, vaak gebruik worden gemaakt van gegevens van het m.s. "Nedlloyd Bahrain". Van dit schip zijn, onder andere door de analyse, vele onmisbare gegevens bekend voor het kwantitatief bepalen van mogelijke energiebesparingen. Op enkele plaatsen zal echter ook naar andere of andere soorten schepen worden verwezen, indien de situatie dat wenselijk maakt. Verder wordt hier uitdrukkelijk vermeld, dat alleen naar motorschepen is gekeken. Schepen, uitgerust met een ander soort voortstuwing worden buiten beschouwing gelaten.

Vaak zal een energiebesparing ten koste gaan van extra investeringen van installaties die extra moeten worden opgesteld. Op plaatsen waar een energiebesparing kwantitatief wordt bepaald, zal, indien mogelijk, ook de economische haalbaarheid van de extra investering worden beschouwd. Energiebesparing kan niet los

gezien worden van kostenbesparing. Een energiebesparing zal zeker niet geaccepteerd worden, indien dit niet leidt tot exploitatiekostenvermindering.

Bij de bepaling van de jaarlijkse kosten van een investering wordt steeds gebruik gemaakt van de annuïteiten-methode; een bepaalde investering kost, over de afschrijvingsperiode, ieder jaar evenveel. In figuur 5.1. zijn enige lijnen van konstante annuïteit getekend als functie van de looptijd van de investering en het rentepercentage. In het vervolg zal steeds een annuïteitspercentage van 20% worden aangehouden, wat voortkomt uit een looptijd van 10 jaar (na deze periode wordt een schip vaak verkocht, de restwaarde van de energiebesparende installatie wordt verwaarloosd) en een rentevoet van 15%. De jaarlijkse investeringskosten bedragen dan:

$$(\text{jaarlijkse investeringskosten}) = (0.2) \cdot (\text{aanschafprijs})$$

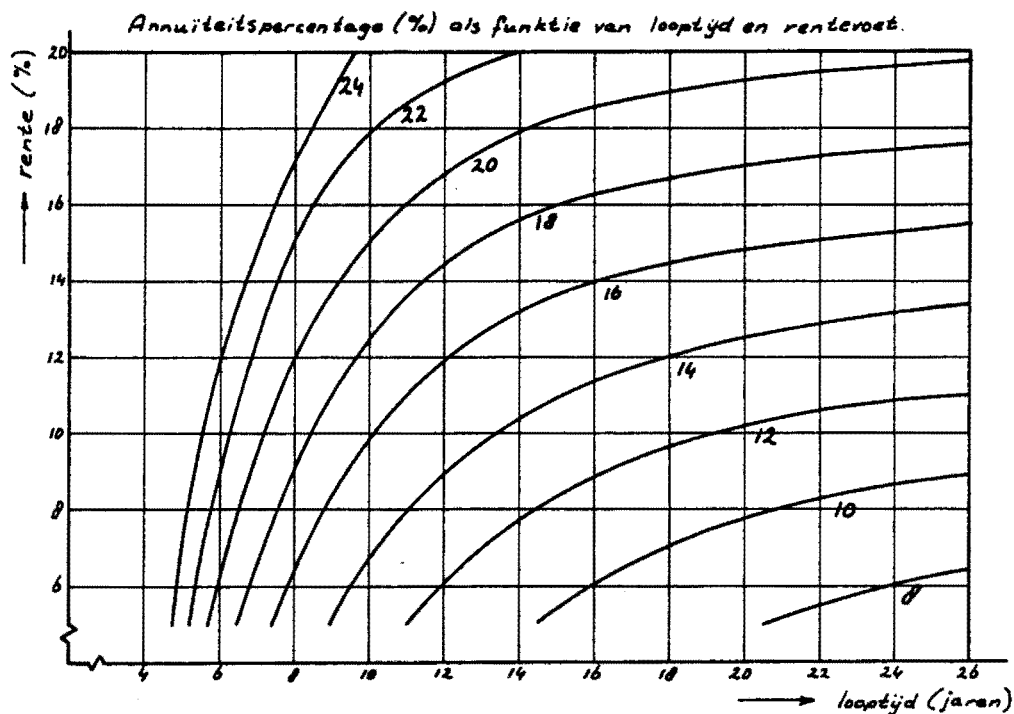
Tot slot wordt hier nog ingegaan op het belang van de aandacht die gevestigd moet worden op rendementen van installaties die moeten worden aangeschaft. Als tijdens het ontwerp van een schip bijvoorbeeld een elektrische generator moet worden gekozen, dan zal de keuze in hoge mate bepaald worden door de aanschafprijs. Het rendement is vaak een secundair beslissingscriterium. Door de hoge prijs van elektrische energie a/b van zeeschepen (17 à 22 ct/kWh), kan een duurdere generator, echter met een beter rendement, toch een betere keuze zijn. Het volgende voorbeeld illustreert dit.

Neem aan dat een elektrische generator van 600 kW gedurende de helft van de tijd elektrische energie levert bij een belastingsgraad van 80%. Gedurende de resterende tijd wordt geen energie geleverd. Rekenend met een prijs van 20 ct/kWh bedragen de jaarlijkse energiekosten ongeveer f420.000,-. Werd echter een generator aangeschaft, met een 1% hoger rendement, dan zou dit een jaarlijkse kostenbesparing van f4200,- opleveren. Rekenend volgens de annuïteitenmethode met een annuïteitspercentage van

20%, mag de generator met het 1% hogere rendement dus $f4200; / 0.2 = f21.000,-$ meer kosten. Een generator van genoemd type kost ongeveer $f100.000,-$ zodat gezegd kan worden:

" Indien de keuze gemaakt moet worden tussen twee generatoren, A en B, waarbij A een 1% hoger rendement heeft dan B, dan mag generator A 20% meer kosten dan generator B."

Uitkomsten van dezelfde strekking zullen ook gelden voor andere direkt of indirect elektriciteitsverbruikende apparaten, welke gedurende een groot gedeelte van de tijd operationeel moeten zijn. Voorbeelden hiervan zijn sommige inductiemotoren, pompen en ventilatoren.



Figuur 5.1.

6. Opwekking van elektriciteit

6.1. Uit de afgassen van de hoofdmotor

Verreweg de grootste energiebesparing is mogelijk, door voor de opwekking van elektrische energie tijdens zeebedrijf gebruik te maken van de thermische energie, die aanwezig is in de uitlaatgassen van de hoofdmotor. Zou a/b van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" op deze manier in de gehele elektriciteitsbehoefte kunnen worden voorzien (tijdens zeebedrijf), dan werd een energiebesparing van ruim 60% bereikt!

Voor de opwekking van elektriciteit uit de afgassen van de hoofdmotor zijn echter zeer uitgebreide en vooral ook dure installaties nodig; de zogenaamde "Waste Heat Recovery Plants" (W.H.R.P.).

In het kader van een studie-opdracht is door J.H.A. van Rooij (student aan de afdeling werktuigbouwkunde van de Technische Hogeschool te Eindhoven) een onderzoek verricht naar de mogelijkheden van bovengenoemde methode van elektriciteitsopwekking. Ook werd gekeken naar mogelijk nuttig gebruik van andere afvalwarmtebronnen a/b van een schip, zoals bijvoorbeeld het koelwater van de hoofdmotor. De resultaten van genoemde studie worden (apart ingebonden) aan dit verslag toegevoegd. De conclusies worden hier herhaald:

- Het thermisch vermogen in de inlaatlucht en het koelwater van de voortstuwingsdieselmotor is meer dan voldoende om in de totale warmtebehoefte te kunnen voorzien.

<p>De warmtebehoefte aan boord van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" bedraagt ongeveer 1000 kW, terwijl ruim het achtvoudige aan thermisch vermogen aanwezig is in de beide bovenvermelde posten.</p>

- Installatie van een "Waste Heat Recovery Plant" is een goede mogelijkheid om energie te besparen. Economisch blijkt zo'n systeem haalbaar, ook voor schepen met een relatief lage zeefactor.

Met "zeefactor" wordt een getal tussen 0 en 1 bedoeld dat aangeeft welk gedeelte van de tijd een schip gemiddeld op zee vertoeft.

- Bij normaal zeebedrijf kan een W.H.R.P. vaak meer vermogen leveren dan nodig is voor de elektriciteits- en warmteproductie. Een overschot kan nuttig worden gebruikt voor de voortstuwing.

Bij "normaal zeebedrijf" wordt uitgegaan van een hoofdmotorvermogen dat 80% bedraagt van het nominaal vermogen.

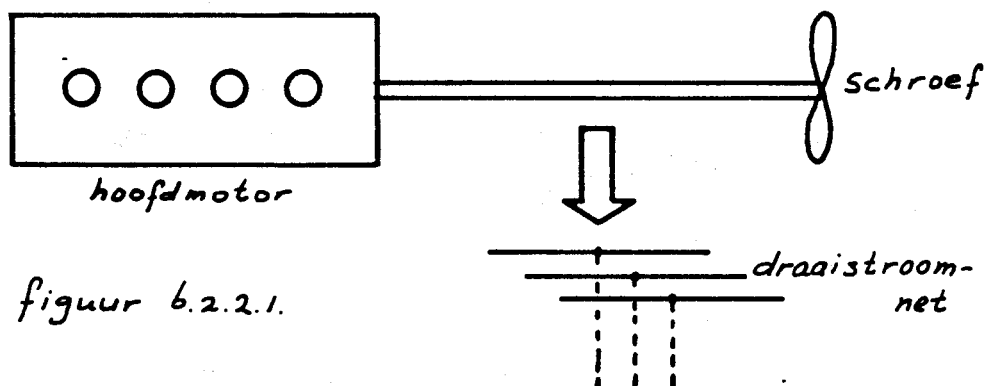
- Warmte-opslag is met de huidige stand van de techniek niet interessant voor toepassing a/b van schepen. Vooral de geringe energiedichtheid van opslagmedia is een beperkende faktor.

Er is nagegaan wat de mogelijkheden zijn van een warmte-accumulator, waarin tijdens zeebedrijf een overschot aan warmte wordt opgeslagen. Tijdens havenbedrijf wordt de opgeslagen energie gebruikt voor de productie van elektriciteit.

6.2. Asgeneratorsystemen

6.2.1. Inleiding

De opwekking van elektrisch vermogen tijdens zeebedrijf kan, behalve op manieren zoals elders in dit hoofdstuk beschreven, ook geschieden met behulp van een asgeneratorsysteem. Met een dergelijk systeem is het mogelijk het benodigde elektrische vermogen te betrekken uit de voortstuwingsdieselmotor (hoofdmotor). Schematisch is dit weergegeven in figuur 6.2.1.1.



Met "asgeneratorsysteem" wordt de gehele installatie bedoeld, die nodig is om vanuit de hoofdmotoras het draaistroomnet te voorzien van elektrische energie. Het woord "asgenerator" wordt gereserveerd voor de elektrische generator, welke in een asgeneratorsysteem vaak mechanisch aan de hoofdmotoras is gekoppeld.

De toepassing van een asgeneratorsysteem, dus het gebruik van de hoofdmotor als opwekker van elektrische energie, heeft een aantal belangrijke voordelen ten opzichte van een dieselaggregaat:

- 1) De hoofdmotor gebruikt een minder dure soort brandstof (MFO) dan de hulpmotor (MDO). Het prijsverschil is sterk wisselend in de tijd. Op het moment van dit schrijven bedraagt het verschil ongeveer 80 \$/ton. (zie figuur 2.5)
- 2) De hoofdmotor heeft in het algemeen een lager specifiek brandstofverbruik dan de hulpmotor. Het verschil is uiteraard afhan-

- kelijk van de gekozen dieselmotoren. Een goed gemiddelde is 15%.
- 3) Doordat de hulpmotor tijdens zeebedrijf kan worden stilgezet, zal deze aanzienlijk minder onderhoud vergen. Het extra onderhoud aan de hoofdmotor zal verwaarloosbaar zijn.
 - 4) Omdat het aantal bedrijfsuren van de hulpmotor(en) wordt vermindert, zullen deze ook minder smeerolie verbruiken. De winst zal zeker opwegen tegen het extra smeerolieverbruik van de hoofdmotor.

Uiteraard zijn er ook nadelen:

- 1) Asgeneratorsystemen zijn vaak duur.
- 2) Het vermogen van de hoofdmotor moet groter worden gekozen, of het voortstuwingsvermogen moet worden vermindert (meestal 5 à 10%).
- 3) Een asgeneratorsysteem heeft meestal, in vergelijking met de generator van een dieselaggregaat, een lager rendement.

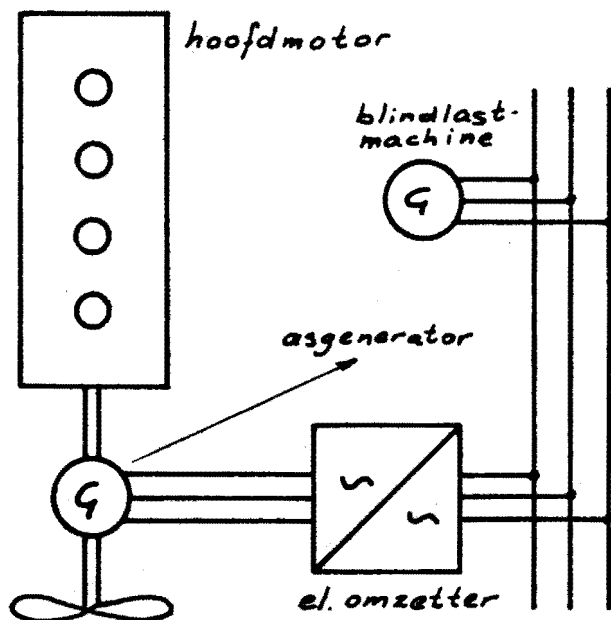
Er is altijd al een behoefte geweest elektrisch vermogen te betrekken uit de voortstuwingsdieselmotor. Reeds in de gelijkstroomtijd werden asgeneratorsystemen op grote schaal toegepast in vissersschepen, sleepboten, coasters en binneschepen. Het betroffen dan betrekkelijk kleine generatoren (tot ± 35 kW) welke veelal gekombineerd werden met bufferbatterijen op 24 of 110 V. De vereiste konstante (gelijk)spanning kon met betrekkelijk eenvoudige middelen worden gerealiseerd. Met de invoering van wisselstroom a/b van zeeschepen (hoofdstuk 3) werd echter een nieuwe eis geïntroduceerd. Namelijk die van een konstante netfrequentie. Indien de hoofdmotor voorzien is van een niet-verstelbare schroef, zal de schroefas draaien met een sterk veranderend toerental. Extra maatregelen moeten worden getroffen, om vanuit dit sterk wisselende toerental tot een spanning van konstante frequentie te komen.

In dit hoofdstuk wordt een aantal asgeneratorsystemen onderzocht op economische toepasbaarheid. Hierbij wordt steeds verondersteld, dat de voortstuwingsdieselmotor van het langzaamlopende type is (ordegrootte toerental: 120 RPM). De schroefas drijft verder rechtstreeks een niet-verstelbare schroef aan (zie figuur 6.2.2.6.a). Deze vorm van scheepsaandrijving komt veel voor in de Nederlandse handelsvloot. Nieuwbouwschepen worden zelfs bijna uitsluitend met dit soort voortstuwing uitgerust vanwege vooral het gunstige speci-

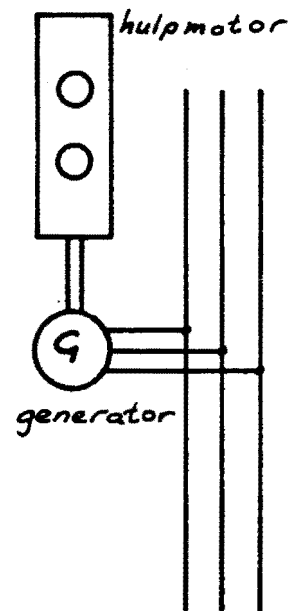
fieke brandstofverbruik, het geringe onderhoud en de goede toepasbaarheid van zware olie. Indien een rendabel asgeneratorsysteem wordt gevonden voor bovengenoemde voortstuwingsinstallatie, dan zal ook zeker een rendabel asgeneratorsysteem kunnen worden gevonden voor een andere voortstuwingsinstallatie, met bijvoorbeeld een snellopende dieselmotor en/of een verstelbare schroef. Bij deze installaties ontbreekt in ieder geval één belangrijk probleem: laag toerental en/of veranderend toerental van de hoofdmotor.

6.2.2. Economische analyse van een modern asgeneratorsysteem

In figuur 6.2.2.1. is een voorstelling gegeven van een asgeneratorsysteem, zoals tegenwoordig vaak wordt toegepast.



Figuur 6.2.2.1.



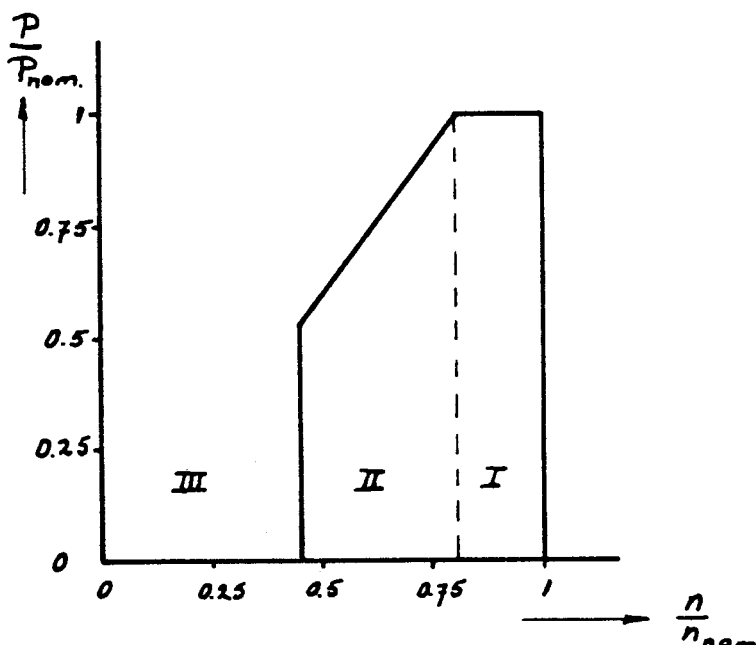
Figuur 6.2.2.2.

In de schroefas, waarvan de ordegrrootte van het nominale toerental 120 RPM is, wordt een elektrische generator opgenomen. De uitgangsklemmen van deze generator worden via een elektronische omzetter met het draaistroomnet verbonden. De elektronische omzetter zorgt voor een konstante netfrequentie. De levering van blindvermogen wordt verzorgd door een aparte synchrone generator: de blindlastmachine.

De asgenerator is dusdanig overgedimensioneerd, dat ook bij een hoofdmotortoerental, lager dan het nominale toerental, het volle (nominale) elektrisch vermogen kan worden geleverd (gebied I in figuur 6.2.2.3.).

Figuur 6.2.2.3.

Maximaal door het asgeneratorsysteem te leveren elektrisch vermogen als functie van het hoofdmotortoerental.



Wordt het toerental van de hoofdmotor verder teruggeschroefd (men wil langzamer varen), dan kan niet meer het volle vermogen uit het asgeneratorsysteem worden getrokken (gebied II). Bij nog verdere verlaging van het toerental moet het asgeneratorsysteem van het net worden afgeschakeld en moet de elektrische belasting worden overgenomen door bijvoorbeeld een dieselaggregaat. (gebied III).

Hierna zal de toepassing van een asgeneratorsysteem volgens bovenstaand concept economisch worden vergeleken met een dieselaggregaat volgens figuur 6.2.2.2. Beide opwekkers hebben een nominaal elektrisch vermogen van 600 kW. (Deze keuze is niet willekeurig; indien gestreefd wordt naar een belastingsgraad 80%, dan kan juist het zeevermogen geleverd worden van het m.s. "Nedlloyd Bahrain". (zie appendix A1)

De volgende punten zijn bij de economische analyse van belang:

1) Investeringskosten (I)

Er wordt hier van uitgegaan, dat het asgeneratorsysteem een ex-

tra investering vormt. Hoewel men zich kan voorstellen, dat door toepassing van een asgeneratorsysteem bijvoorbeeld één dieselaggregaat kan vervallen, is dit om veiligheidsredenen vaak niet acceptabel. De kosten van het beschreven asgeneratorsysteem bedragen ongeveer f800.000,-. Rekening houdend met een annuïteitspercentage van 20% worden de investeringskosten:

$$I = 160.000 \text{ gld/jr}$$

2) Brandstofkosten (ΔB)

Door eerdergenoemde voordelen van een asgeneratorsysteem boven een dieselaggregaat blijken de brandstofkosten te verminderen. De winst in brandstofkosten kan worden geschreven als:

$$\Delta B = \frac{9}{1000} \cdot \frac{b_h \cdot K_d}{\eta_g} \cdot \left[1 - \frac{b_v}{b_h} \cdot \frac{\eta_g}{\eta_{ag}} \cdot \frac{K_f}{K_d} \right] \cdot \alpha_z \cdot P_z \text{ gld/jr}$$

Met de numerieke waarden:

$$\begin{aligned} b_h &= 240 \text{ g/kWh} & K_f &= 500 \text{ gld/ton} & \eta_g &= 0.94 \\ b_v &= 210 \text{ g/kWh} & K_d &= 725 \text{ gld/ton} & \eta_{ag} &= 0.82 \end{aligned}$$

$$\text{volgt: } \Delta B = 520 \cdot \alpha_z \cdot P_z \text{ gld/jr}$$

De faktor $1 - \frac{b_v}{b_h} \cdot \frac{\eta_g}{\eta_{ag}}$ bepaalt de energiebesparing van het asgeneratorsysteem t.o.v. het dieselaggregaat. Deze faktor is echter nagenoeg nul, waardoor geconcludeerd kan worden, dat met genoemd asgeneratorsysteem nagenoeg geen energiebesparing kan worden bereikt. Ofwel: er wordt niet minder brandstof verbruikt.

De formule voor ΔB kan worden herschreven tot:

$$\Delta B = \frac{9}{1000} \cdot \frac{b_h}{\eta_g} \cdot \left[K_d - K_f \right] \cdot \alpha_z \cdot P_z \text{ gld/jr}$$

De besparingen zijn dus kostenbesparingen en komen uitsluitend voort uit het absolute prijsverschil van MDO en MFO.

3) Onderhoudskosten (ΔO)

Extra onderhoud van asgeneratorsysteem en hoofdmotor kan worden verwaarloosd. Het verminderde onderhoud van de dieselaggregaten wordt evenredig verondersteld met de minder geleverde energie en geschat op:

$$\Delta O = 30 \cdot \alpha_z \cdot P_z \text{ gld/jr}$$

4) Smeeroliekosten (ΔS)

Het extra smeerolieverbruik van de hoofdmotor wordt verwaarloosd. Rekenend met een specifiek smeerolieverbruik van 2 g/kWh voor de hulpmotoren en een smeerolieprijs van 1200 gld/ton wordt de winst in smeeroliekosten:

$$\Delta S = 20 \cdot \alpha_z \cdot P_z \text{ gld/jr}$$

De extra investering van het asgeneratorsysteem zal rendabel worden indien geldt:

$$\Delta B + \Delta O + \Delta S > I$$

$$\text{of: } \alpha_z \cdot P_z > 280$$

Na invoering van de belastingsgraad $p_z = \frac{P_z}{P_n}$ ($P_n = 600 \text{ kW}$) volgt de eis:

$$\alpha_z \cdot p_z > 0.47$$

In onderstaande figuur is deze eis grafisch weergegeven.

x multi-purpose-schip

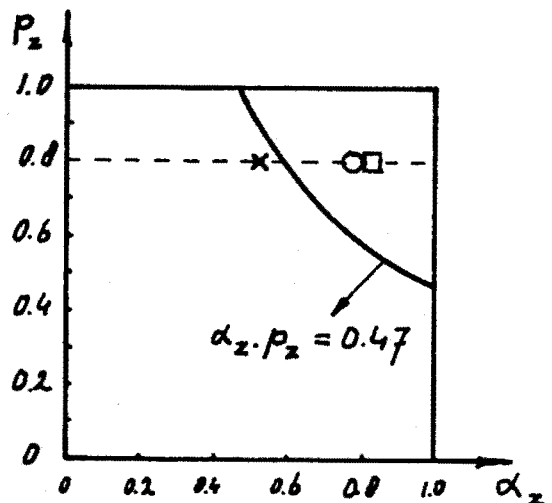
$$\alpha_z = 0.50 \text{ à } 0.55$$

o Ro-Ro-schip

$$\alpha_z = 0.75 \text{ à } 0.80$$

□ containerschip

$$\alpha_z = 0.80 \text{ à } 0.85$$



Figuur 6.2.2.4.

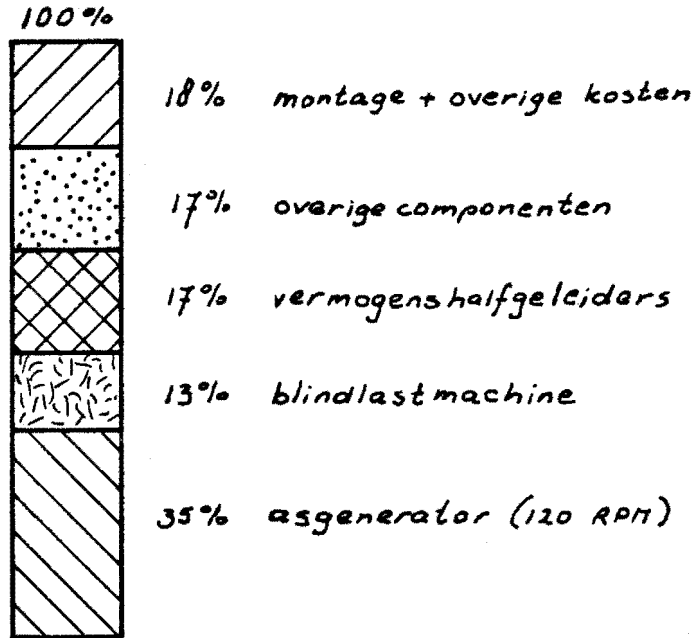
De investering van het asgeneratorsysteem wordt dus rendabel, indien voor een bepaald schip een combinatie van belastingsgraad (p_z) en zeefactor (α_z) wordt gevonden, die leidt tot een bedrijfs- punt boven de hyperbool $\alpha_z \cdot p_z = 0.47$. In figuur 6.2.2.4. is ook

nog de zeefactor opgenomen van verschillende soorten schepen. Er is verder aangenomen, dat de elektrische belasting bij het ontwerp van het schip dusdanig goed kon worden voorspeld, dat de belastingsgraad van het asgeneratorsysteem tijdens zeebedrijf op 80% uitkomt. Hierdoor ontstaan de ingetekende bedrijfsgebieden van de verschillende soorten schepen.

Uit deze eenvoudige kosten-baten-analyse blijkt, dat de installatie van een asgeneratorsysteem a/b van een schip met hoge zeefactor (bijvoorbeeld een Ro-Ro-schip of een containerschip) een rendabele investering kan zijn bij de huidige verschillen van olieprijsen voor MDO en MFO. Voor een multi-purpose-schip (bijvoorbeeld het m.s. "Nedlloyd Bahrain") is dit hier niet het geval. Uiteraard kan door verschillen in numerieke waarden van bijvoorbeeld rendementen en brandstofverbruiken de hyperbool in figuur 6.2.2.4. juist onder het bedrijfspunt van een multi-purpose-schip komen te liggen. Dan nog is installatie van een asgeneratorsysteem echter discutabel. Ook kan worden opgemerkt, dat de investeringskosten (I) hoofdzakelijk moeten worden terugverdiend door de winst in brandstofkosten (ΔB). De andere besparingsposten (ΔO en ΔS) zijn in absolute zin wel groot, maar gering t.o.v. de besparingen op brandstofkosten. Verder bleek, dat ΔB vrijwel uitsluitend voortkomt uit het absolute prijsverschil van MDO en MFO. Hierop heeft een ontwerper van scheepsinstallaties of asgeneratorsystemen uiteraard geen enkele invloed. De enige invloed die voor genoemde personen resteert is die op de investeringskosten, ofwel de aanschafprijs van het asgeneratorsysteem.

In hoeverre genoemde invloed kan (of in de toekomst zal kunnen) reiken wordt hierna besproken.

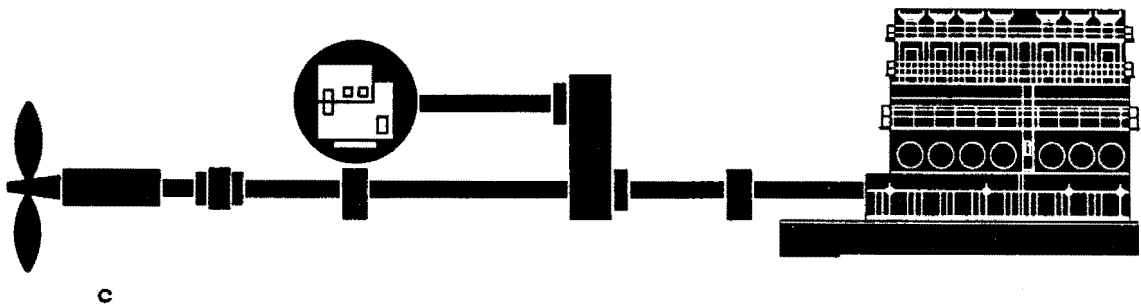
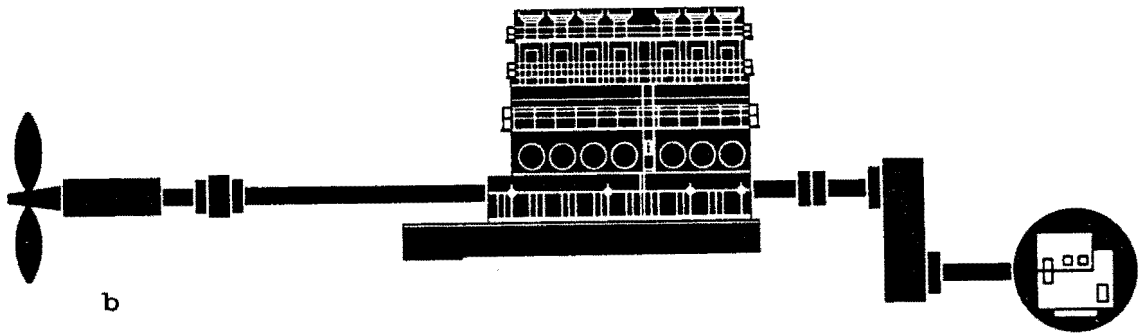
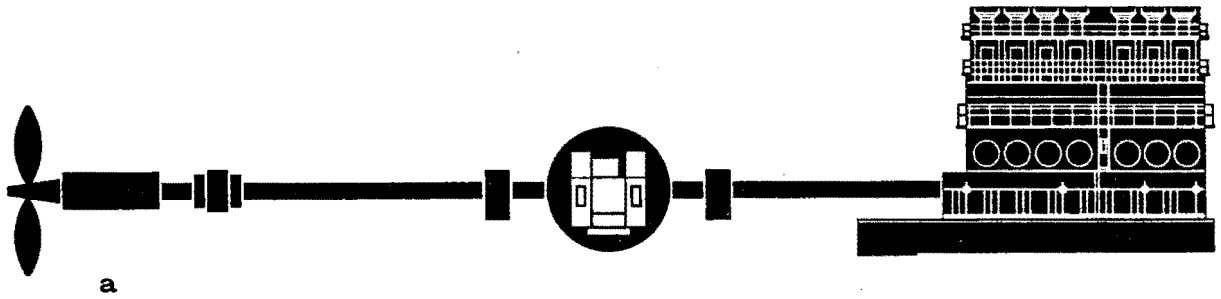
Van het asgeneratorsysteem volgens figuur 6.2.2.1. is in figuur 6.2.2.5. een globale kostenspecificatie gegeven. De beide roterende machines, "asgenerator" en "blindlastmachine", bepalen samen vrijwel de helft van de totale prijs. De overige helft wordt gesplitst in drie ongeveer gelijke delen: "vermogenshalfgeleiders" (thyristoren en dioden), "overige componenten" (elektronische componenten + bijvoorbeeld ook smoorspoelen) en "montage + overige kosten".



Figuur 6.2.2.5.

Er is geen reden om aan te nemen, dat de posten "asgenerator", "blindlastmachine" en "montage + overige kosten" in de naaste toekomst in prijs zullen dalen (minder sterk zullen stijgen dan het inflatiepercentage doet vermoeden). Kostenverlagingen zijn wel te verwachten bij "vermogens-" en "overige componenten", maar zullen niet sensationeel zijn. Schattingen lopen uiteen van 10 à 30%, wat neer komt op 3 à 10% van het totale asgeneratorsysteem. Hieruit volgt, dat in de naaste toekomst de uitkomsten van de kosten-baten analyse weinig zullen veranderen, rekening houdend met een gelijkblijvend prijsverschil van MDO en MFO.

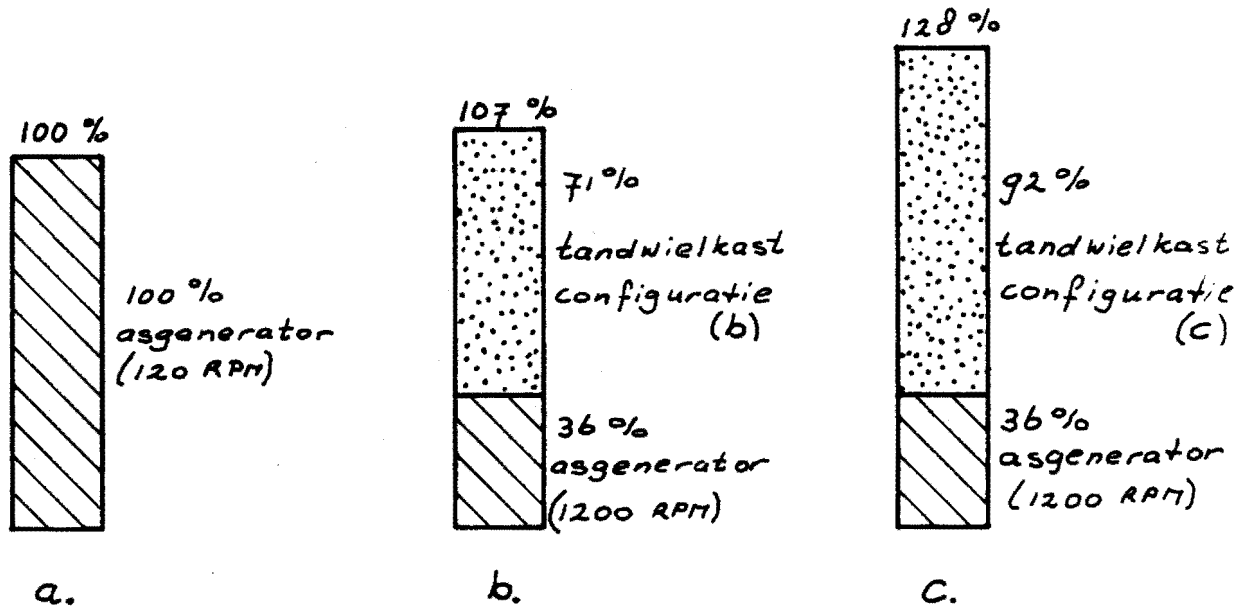
De vraag is, of op een andere manier kostenverlaging kan worden bereikt. In figuur 6.2.2.5 valt onmiddellijk de grote prijsinvloed van de asgenerator op. Het feit, dat deze generator zijn vermogen moet leveren bij een laag toerental (orde: 120 RPM), is de belangrijkste reden voor de hoge prijs (± f300.000,-). Ter vergelijking: een generator van hetzelfde vermogen (600 kW), echter geschikt voor het tienvoudige toerental (1200 RPM) kost ongeveer f100.000,-. Zo'n "snellopende" generator kan ook gebruikt worden als asgenerator, indien bijvoorbeeld gebruik wordt gemaakt van een tandwieloverbrenging. In figuur 6.2.2.6. zijn hiervoor twee principe-oplossingen geschetst. Ter vergelijking toont figuur 6.2.2.6.a. de eerder besproken configuratie (zie ook figuur 6.2.2.1.); een langzaamlopende generator



Figuur 6.2.2.6.

(120 RPM) wordt in de schroefas opgenomen. In de figuren b en c wordt voor een snellopende generator (1200 RPM) gekozen in combinatie met een tandwieloverbrenging met omzetverhouding 1 : 10.

Opmerking: De oplossing volgens figuur c kan op bezwaren stuiten, omdat de mogelijkheid bestaat, dat hierdoor de machinekamer moet worden verlengd.



Figuur 6.2.2.7.

In figuur 6.2.2.7. is een (relatieve) kostenspecificatie te zien van alleen de asgenerator (eventueel in combinatie met een tandwielkast) van de respectievelijke systemen volgens figuur 6.2.2.6. Onmiddellijk valt op, dat de combinatie snellopende generator/tandwielkast niet goedkoper is dan de langzaamlopende generator. Het kostenverschil tussen a en b is, rekening houdend met prijsonnauwkeurigheden, niet significant. Mogelijkheid c is duidelijk duurder dan b. De reden hiervan is, dat in de hier toegepaste tandwielkast de schroefas moet worden doorgevoerd, hetgeen bij mogelijkheid b niet het geval is.

Met behulp van een tandwieloverbrenging is wel een beter rendement te halen. Hoewel in de tandwielkast enig verlies is te verwachten, blijkt het betere rendement van de snellopende generator t.o.v. de langzaamlopende generator te overheersen.

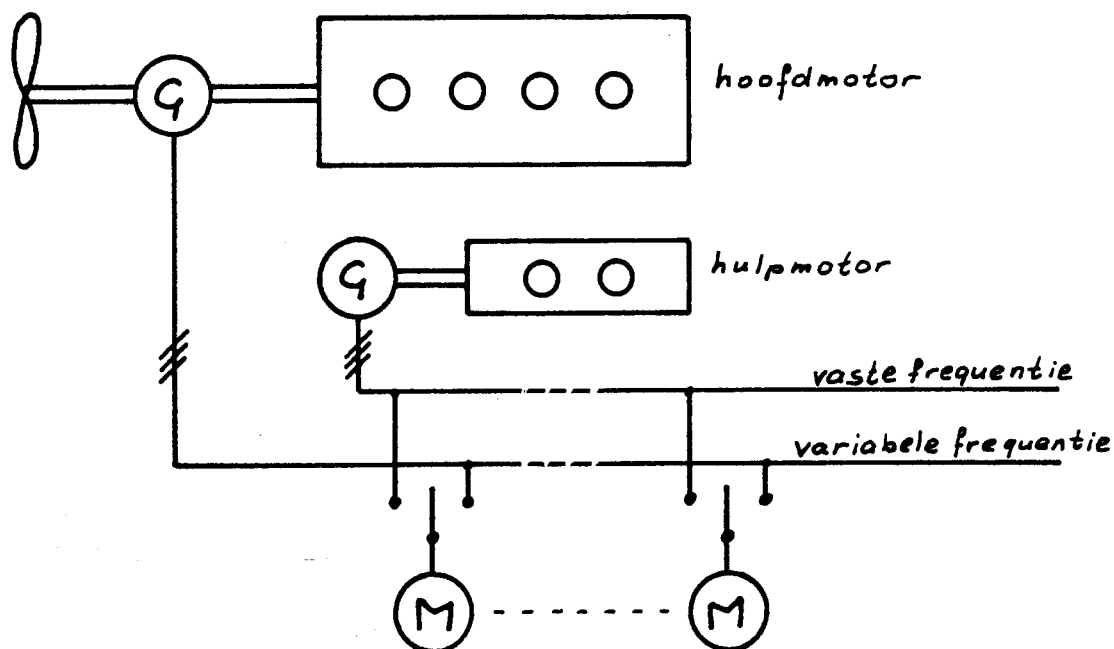
langzaamlopende generator		$\eta = 88\%$
snellopende generator	$\eta = 94\%$	} $\eta = 91\%$
tandwieloverbrenging	$\eta = 97\%$	

Deze geringe rendementsverbetering weegt echter niet op tegen de extra investeringskosten.

Opmerking: Bovenstaande berekeningen en analyses zijn, behalve voor het 600 kW-asgeneratorsysteem, ook uitgevoerd voor een zelfde installatie van 900 kW. De uitkomsten zijn niet noemenswaardig verschillend. In het algemeen kan worden gezegd, dat bij schaalvergroting de rendementen in geringe mate toenemen; de investeringskosten stijgen iets meer dan evenredig met het opgestelde vermogen.

6.2.3. Asgeneratorsysteem met variabele netfrequentie

Het grootste bezwaar van een asgeneratorsysteem volgens figuur 6.2.2.1. is de hoge prijs. Hierdoor blijven toepassingsmogelijkheden beperkt, vooral voor schepen met lage zeefactor α_z en/of lage belastingsgraad p_z . Hoewel een groot deel van de prijs van het asgeneratorsysteem wordt bepaald door de asgenerator zelf (eventueel in combinatie met een tandwieloverbrenging), is het grootste deel nodig voor de systemen, die zorgen voor een konstante netfrequentie. Indien deze laatste eis (voor een deel van de elektrische belasting) wordt verlaten, kan een aanzienlijke daling van de kostprijs worden bereikt. Een mogelijk systeem wordt geschetst in figuur 6.2.3.1. Hier wordt een 2-rails-systeem voorgesteld i.p.v. het gangbare 1-rail-systeem. De extra rail voert een spanning van variabele frequentie, opgewekt door middel van een asgenerator, waarvan de as direkt aan de schroefas is gekoppeld. De klemmen van de asgenerator worden verder rechtstreeks met de spanningsrail verbonden. De frequentie is dus evenredig met het toerental van de hoofdmotor. Door deze configuratie is de elektronische omzetter alsmede



Figuur 6.2.3.1.

de blindlastmachine overbodig geworden.

De spanning aan de rail van variabele frequentie wordt evenredig met de frequentie veranderd, dus:

$$\frac{U}{f} = \text{konstant}$$

Dit om de luchtspleetinductie van aangesloten inductiemotoren konstant te houden.

Het systeem heeft vele voordelen. De belangrijkste zijn:

- 1) De prijs van het asgeneratorsysteem kan sterk worden vermindert (vergelijk figuur 6.2.2.5.)
- 2) Elektrisch aangedreven pompen voor de hoofdmotor (brandstof-, smeerolie-, koelwater-), alsmede ventilatoren voor de aanvoer van verbrandingslucht worden, indien aangesloten op de rail van variabele frequentie, automatisch in toeren geregeld. Smoren is nagenoeg overbodig geworden, waardoor een aanzienlijke energiebesparing kan worden bereikt (zie paragraaf 8.2.). (Genoemde pompen en ventilatoren bepalen samen

ruim eenderde van het totaal elektrisch vermogen tijdens zeebedrijf a/b van het m.s. "Nedlloyd Bahrain"; zie appendix A1).

Als nadelen kunnen worden genoemd:

- 1) Vanwege de variabele frequentie kunnen niet alle elektrische verbruikers worden aangesloten.
- 2) Er moet een omschakeling kunnen plaatsvinden naar de rail van van konstante frequentie (zie figuur 6.2.3.1),
dus: - extra rail
 - extra schakelapparatuur
- 3) Aangesloten inductiemotoren kunnen bij verlaagde frequentie extra koeling nodig hebben.

Opmerking: In het verleden werd een variabel toerental van hoofdmotorpompen ook wel gerealiseerd door deze pompen mechanisch aan de hoofdmotoras te koppelen. Een groot nadeel van een dergelijk systeem is, dat de pompen niet kunnen worden gebruikt als de hoofdmotor stil staat. Toch is dit vaak nodig i.v.m. vóórsmering en het op temperatuur houden van de hoofdmotor. Een elektrische tussentrap in de vorm van een (as)generator/elektromotor is daarom zeer gewenst. Indien een pomp moet worden gebruikt, als de hoofdmotor buiten bedrijf is, kan de elektromotor van die pomp worden overgeschakeld op de rail van konstante frequentie. Deze wordt gevoed door dieselaggregaten.

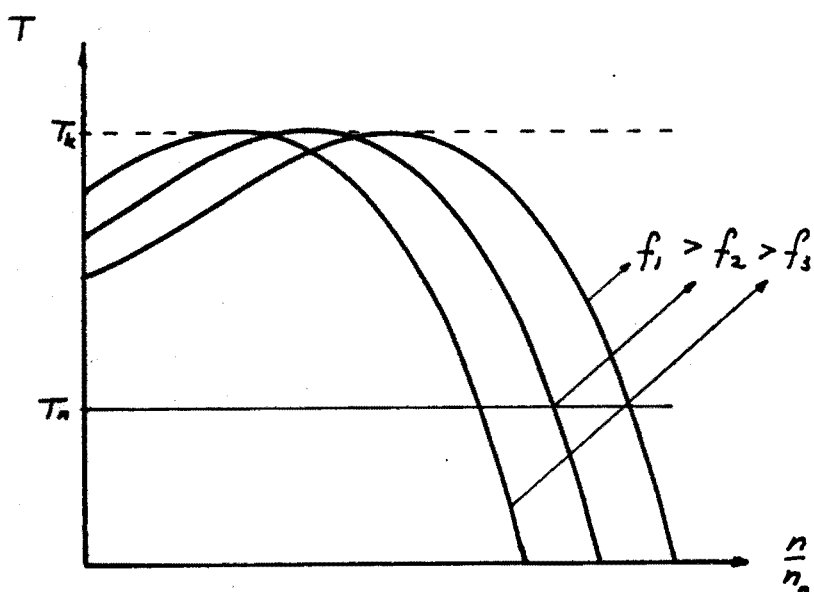
Hoewel een spanning van variabele frequentie wordt opgewekt, kan, buiten de genoemde pompen en ventilatoren voor de hoofdmotor, nog een aantal andere verbruikers worden aangesloten op de rail van variabele frequentie. Verschillende soorten verbruikers zullen hierna worden onderzocht op deze mogelijkheid.

- Verlichting: niet mogelijk, door sterk veranderende verlichtingssterkte bij variabele frequentie (dus variabele spanning, want $U/f = \text{konstant}$).
- Elektrische verwarming: eventueel mogelijk, indien de belasting wordt aangepast. Bij verlaagde frequentie moeten meer verwarmingselementen worden bijgeschakeld of er moet gebruik worden

gemaakt van een elektronische sturing van het vermogen (bijvoorbeeld met behulp van een mutator).

- Induktiemotoren:

Omdat U/f konstant wordt gehouden, is voor aangesloten inductiemotoren, bij verlaagde frequentie, het enige effect, dat het synchrone toerental daalt. Het koppel, dat kan worden geleverd, blijft gelijk (zie figuur 6.2.3.2.).



Figuur 6.2.3.2.

Voor verbruikers, welke een konstant koppel vragen bij een variabel toerental (bijvoorbeeld zuigercompressoren), wil dit zeggen, dat bij verlaging van de frequentie een evenredig kleiner vermogen wordt geleverd. Bij continu werkende apparaten is frequentieverlaging dus alleen toegestaan, indien deze apparaten zijn overgedimensioneerd. Intermitterend werkende apparaten kunnen echter zonder bezwaar aan de rail van variabele frequentie worden aangesloten. Bij verlaagde frequentie zal de gemiddelde "aan"-tijd (duty-cycle) groter worden. Voorbeelden voor dergelijke apparaten zijn vries- en luchtcompressoren.

Als laatste kan nog worden opgemerkt dat in volle zee, onder bepaalde omstandigheden, het gehele elektrische vermogen door het net van variabele frequentie (dus door de asgenerator) kan worden geleverd. Vaak zal in volle zee namelijk het hoofdmotortoe-

rental op een vrijwel konstante (vaste) waarde worden ingesteld. De hulpmotoren kunnen worden stilgezet. Er moet dan wel aan een aantal voorwaarden worden voldaan:

- het schip vertoeft in volle zee; dus geen manoeuvreeromstandigheden.
- een zodanig toerental van de hoofdmotor, dat de netfrequentie niet meer dan 2.5% van de nominale waarde afwijkt.
- een automatisch startende hulpmotor moet aanwezig zijn, die onmiddellijk het elektrisch vermogen kan overnemen, indien de noodzaak ontstaat om plotseling het hoofdmotortoerental te wijzigen.

Een analyse wat betreft economische haalbaarheid van dit type asgeneratorsysteem wordt hier niet uitgevoerd. Er zijn te veel onbekende grootheden, zoals de aanschafprijs van de volledige installatie en de vraag welke belastingen kunnen worden aangesloten en wanneer. Wel kan gezegd worden, dat ook hier een hoge zee-factor een gunstige invloed zal hebben. Verder kan worden voorgesteld, dat juist koelschepen geschikt kunnen zijn voor een asgeneratorsysteem met variabele frequentie. Indien de lading eenmaal op temperatuur is gebracht, zal de duty-cycle van de koelcompressoren gering zijn (alleen de "lekwarmte" moet worden verpompt). Als het hoofdmotortoerental niet te laag is, kunnen de inductiemotoren van genoemde compressoren (zoals eerder beschreven) zonder bezwaar aan de rail van variabele frequentie worden aangesloten.

6.2.4. Conclusies

- Moderne asgeneratorsystemen met statische frequentie-omzeters zijn duur; in de naaste toekomst komt hierin weinig verandering.
- Met bovengenoemde systemen kunnen besparingen worden bereikt a/b van een schip met hoge zeefactor en/of hoge belastingsgraad.
- De besparingen zijn kostenbesparingen en komen vrijwel uitsluitend voort uit het absolute prijsverschil van MDO en MFO; er ontstaat geen noemenswaardige energiebesparing.
- Toepassing van een tandwieloverbrenging met het doel een snellopende asgenerator te kunnen gebruiken, leidt niet tot betere resultaten.

- De investeringskosten voor een asgeneratorsysteem met variabele frequentie zijn veel lager dan voor een asgeneratorsysteem met vaste frequentie.
- Aan een asgeneratorsysteem met variabele frequentie kunnen, behalve pompen en ventilatoren voor de hoofdmotor, ook nog een aantal andere elektrische verbruikers worden aangesloten; vooral inductiemotoren.
- Het overige elektrische vermogen moet worden geleverd m.b.v. dieselaggregaten.

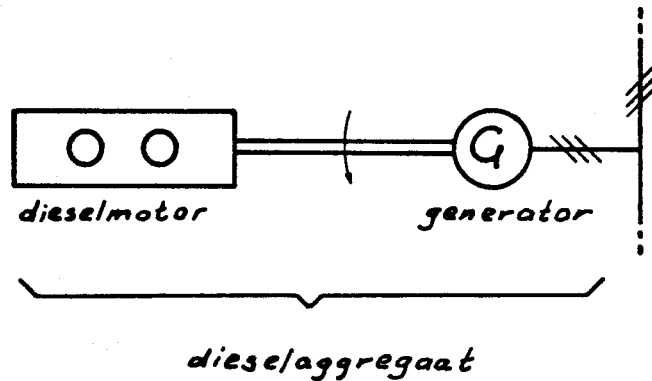
N.B.: De uitwerking van paragraaf 6.2.2. is beperkt gebleven, omdat een aantal leveranciers van asgeneratorsystemen belangrijke (toegezegde) gegevens tot op heden niet aan mij beschikbaar heeft gesteld.

6.2.5. Lijst van gebruikte symbolen

<u>symbool</u>	<u>benaming</u>	<u>eenheid</u>
ΔB	besparingen op brandstofkosten	gld/jr
b_h	specifiek brandstofverbruik hulpmotor	g/kWh
b_v	specifiek brandstofverbruik hoofdmotor	g/kWh
f	frequentie	Hz
I	investeringskosten	gld/jr
K_d	prijs MDO	gld/ton
K_f	prijs MFO	gld/ton
n	toerental	RPM
n_n	nominale waarde n	RPM
ΔO	besparingen op onderhoudskosten	gld/jr
P	vermogen	kW
P_n	nominale waarde P	kW
P_z	gemiddeld elektrisch vermogen tijdens zeebedrijf	kW
p_z	gemiddelde belastingsgraad van een as-generatorsysteem tijdens zeebedrijf	-
ΔS	besparingen op smeeroliekosten	gld/jr
T	koppel	Nm
T_k	kipkoppel	Nm
T_n	nominale waarde T	Nm
U	spanning	V
α_z	"zeefactor"; faktor die aan geeft, welk gedeelte van de tijd een schip op zee vertoeft	-
η_{ag}	totaal rendement v.e. asgeneratorsysteem	-
η_g	rendement v.e. generator gekoppeld aan een hulpmotor	-

6.3. Dieselaggregaten

6.3.1. Inleiding



Figuur 6.3.1.1.

Meestal wordt elektrische energie aan boord van zeeschepen opgewekt met behulp van dieselaggregaten. Wordt tijdens zeebedrijf gebruik gemaakt van andere opwekkingsmethoden*, dan zal tijdens havenbedrijf toch vaak een dieselaggregaat nodig zijn, omdat die andere opwekkingsmethoden alleen aangewend kunnen worden indien de voortstuwingsmotor operationeel is. Een dieselaggregaat zal dus vaak een belangrijke plaats innemen voor wat betreft de opwekking van elektrische energie. Voor een goede energiehuishouding zal een hoog rendement van een dergelijk aggregaat dan ook noodzakelijk zijn.

In deze paragraaf zal, aan de hand van een aantal praktische gegevens, het rendement van de dieselmotor (6.3.2.) en de generator (6.3.3.) worden besproken. Het rendement van het compleet aggregaat volgt tenslotte in 6.3.4.

Speciaal de invloed van de belastingsgraad is onderzocht, omdat deze parameter een belangrijke invloed op het rendement blijkt te oefenen.

* zie 6.1. en 6.2.

6.3.2. Het dieselmotorrendement

6.3.2.1. Inleiding

Uit de analyse van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" volgt, dat de belastingsgraad van de dieselaggregaten laag is. Deze belastingsgraad bedraagt meestal 25 à 60% en komt (zelfs bij piekbelastingen) niet boven 75%. De oorzaak hiervan is, dat tijdens de ontwerpfase van het schip niet goed bekend was, hoe hoog de elektrische belasting zou worden. Hierdoor zijn de aggregaten ruim overgedimensioneerd. Het specifiek brandstofverbruik van een dieselmotor blijkt sterk te stijgen bij afnemende belastingsgraad. Een voorbeeld hiervan wordt getoond in figuur 6.3.2.1. Hierin is het (relatief) specifiek brandstofverbruik uitgezet tegen de belastingsgraad. Het minimaal brandstofverbruik (dat optreedt bij ongeveer 80% van de maximale belasting) wordt op 100% gesteld. Een dergelijke kromme geldt in feite voor één cilinder eenheid van een bepaald type dieselmotor. Omdat echter met dimensieloze grootheden wordt gewerkt, geldt figuur 6.3.2.1. voor iedere dieselmotor, opgebouwd uit een aantal cilinders van het zelfde type.

Achtereenvolgens zal nu nagegaan worden, wat de invloed op het brandstofverbruik zal zijn bij niet optimale parallelschakeling van de dieselmotoren en wat diezelfde invloed zal zijn bij het gebruik van meerdere dieselmotoren in plaats van één. Eigenlijk zou voor de analyse van bovengenoemde invloeden ook het generatorrendement meegenomen moeten worden. Niet de dieselmotoren worden parallel geschakeld, maar de dieselaggregaten. Dit is echter niet gedaan om de volgende redenen:

- de rendementsinvloed van de generator is aanzienlijk kleiner dan die van de dieselmotor.
- een onderverdeling in kleine (cilinder) eenheden zoals bij de dieselmotor het geval is, is bij de generator niet aanwezig, waardoor de nog te behandelen vergelijkingen niet mogelijk zouden zijn.

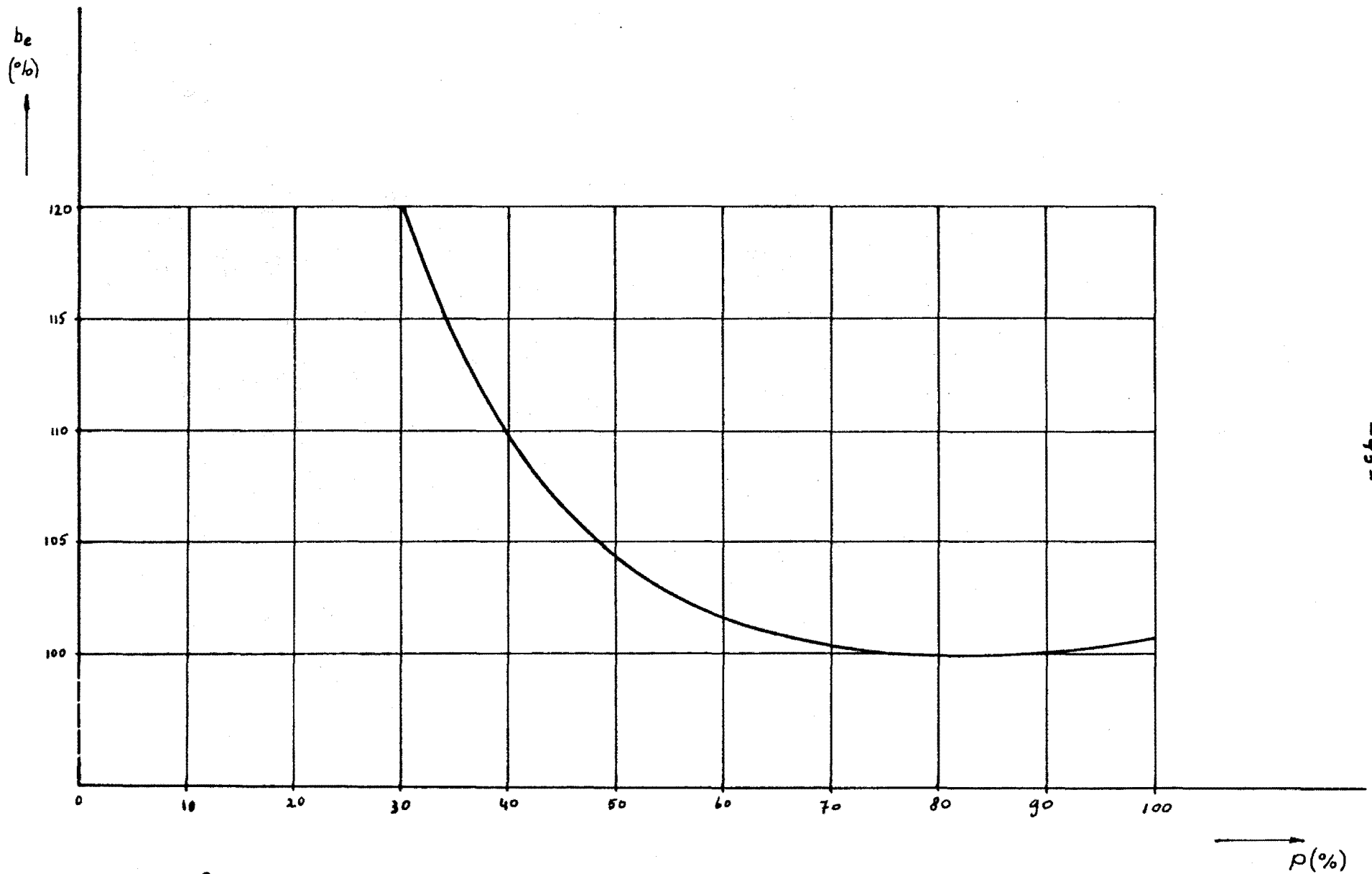


fig. 6.3.2.1. relatief specifiek brandstofverbruik
van een dieselmotor

6.3.2.2. Optimale belastingsverdeling over meerdere aggregaten

Indien het gewenst vermogen groter is, dan het vermogen dat een enkel aggregaat kan leveren, dan zullen meerdere aggregaten parallel moeten draaien. De vraag hierbij is, hoe de belastingsverdeling moet zijn voor een zo laag mogelijk brandstofverbruik en hoe groot de variatie is in dit verbruik, indien van het punt van optimale belastingsverdeling wordt afge-
weken.

Als meerdere dieselmotoren met identieke brandstofverbruikskrommen parallel draaien, dan blijkt optimaal bedrijf te resulteren als iedere motor evenveel vermogen levert; de belastingsgraden van de dieselmotoren moeten gelijk zijn. Stel bijvoorbeeld, dat twee gelijke dieselmotoren A en B met een brandstofverbruikskromme volgens figuur 6.3.2.1. parallel draaien, waarbij A meer vermogen levert dan B. Indien motor A minder gaat leveren (en dus B meer; het totaal geleverd vermogen wordt konstant verondersteld) dan zal door het niet lineair zijn van de brandstofverbruikskromme een gunstiger brandstofverbruik ontstaan. Een analytische afleiding hiervan wordt gegeven in appendix A2.

In figuur 6.3.2.2. is een voorbeeld gegeven van twee gelijke parallel draaiende dieselmotoren. Bij de berekening van de ingetekende krommen van konstant brandstofverbruik is uitgegaan van figuur 6.3.2.1. Op de horizontale en vertikale as zijn de relatieve vermogens van de beide dieselmotoren uitgezet (p_1 en p_2). Indien beide motoren parallel draaien (gearceerde gedeelte) kan het (relatief) specifiek brandstofverbruik worden afgelezen voor een bepaalde belastingsgraad ($p_1 + p_2$) en voor een bepaalde belastingsverdeling over beide motoren. Optimale belastingsverdeling treedt inderdaad op indien iedere dieselmotor evenveel vermogen levert ($p_1 = p_2$). Verder blijkt, dat een relatief grote afwijking van het punt van optimale parallel-

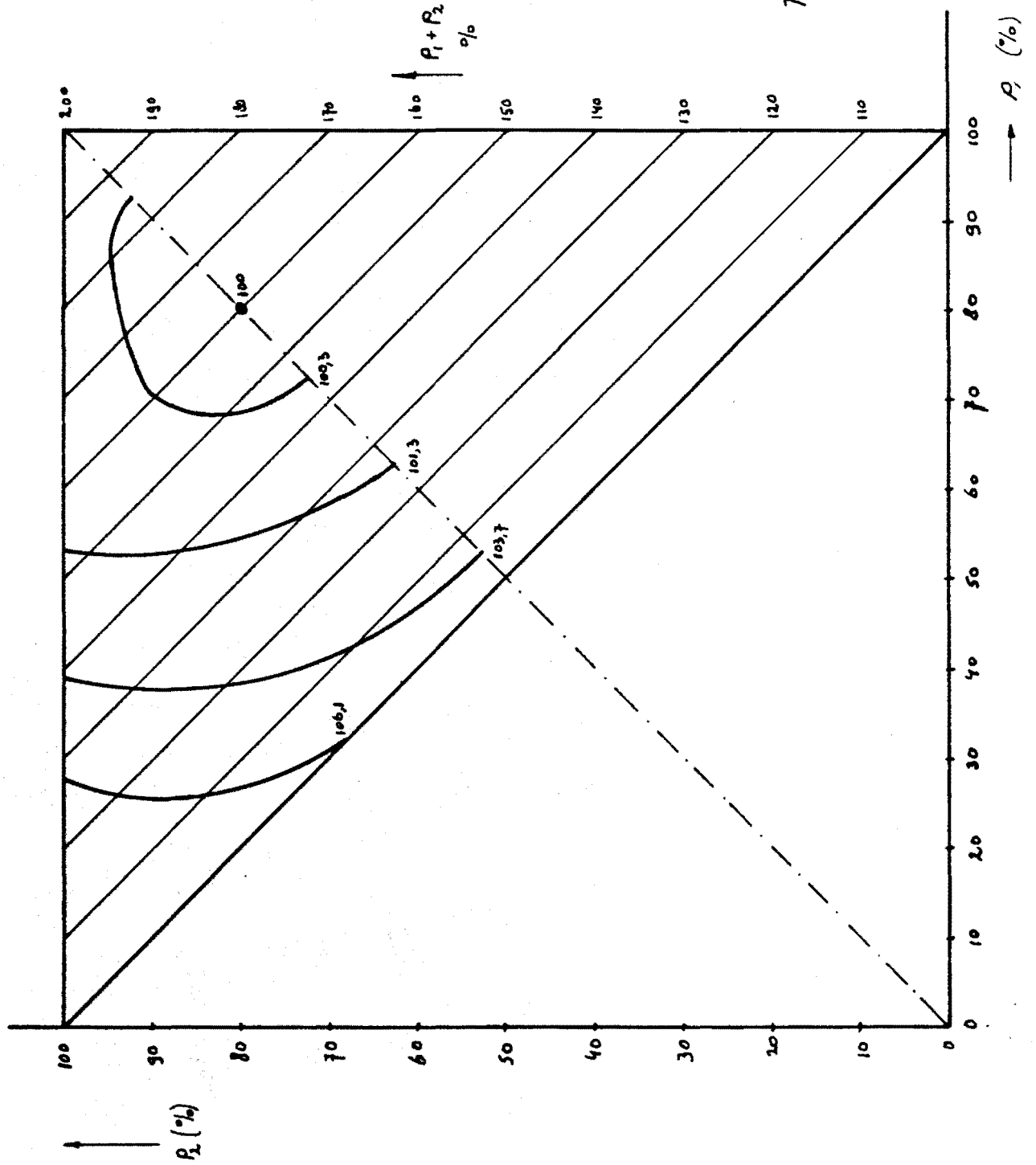


fig. 6.3.2.2.

schakeling relatief weinig invloed heeft op het specifiek brandstofverbruik, vooral bij hoge belastingsgraad $p_1 + p_2$.

Bij de totstandkoming van figuur 6.3.2.2. is uitgegaan van twee dieselmotoren met een identiek brandstofverbruik als functie van de belastingsgraad. Door vele oorzaken kunnen echter verschillen ontstaan tussen de beide brandstofverbruikskrommen. Neem bijvoorbeeld aan, dat motor (p_1) een verbruikskromme heeft volgens figuur 6.3.2.1. en dat de overeenkomstige kromme van motor (p_2) 3% hoger ligt. Het (relatief) specifiek brandstofverbruik als functie van de vermogensverdeling over de motoren volgt nu uit figuur 6.3.2.3. Het specifiek brandstofverbruik is uiteraard hoger geworden, maar ook het punt van optimale belastingsverdeling is verschoven. Voor optimaal bedrijf moet motor (p_1) nu 6 à 7% meer vermogen leveren dan in het geval van identieke verbruikskrommen.

Uit voorgaande verhandeling volgt, dat het geen praktisch nut heeft veel moeite te doen om de belastingsgraad van dieselmotoren nauwkeuring gelijk te maken (houden). Men kan zich tevreden stellen met een situatie, waar bij benadering geldt:
 $P_1 = P_2$.

In figuur 6.3.2.4. worden, op dezelfde manier als in figuur 6.3.2.2. twee dieselmotoren parallel geschakeld. De motoren zijn in dit geval echter verschillend; wel zijn ze opgebouwd uit identieke cylindereenheden. Motor (p_1) kan tweemaal zoveel vermogen leveren (heeft tweemaal zoveel cylindereenheden) dan motor (p_2). Een "halve" motor (50%) en een "hele" motor (100%) draaien dus parallel, zodat een totaal van 150% geleverd kan worden.

Er draaien nu in feite een aantal kleine identieke dieselmotoren (de cylindereenheden) parallel. Volgens de afleiding in appendix A2 moet voor optimaal bedrijf iedere cylindereenheid evenveel vermogen leveren; de belastingsgraden moeten gelijk zijn. Dieselmotoren welke zijn samengesteld uit genoemde cy-

fig. 6.3.2.3

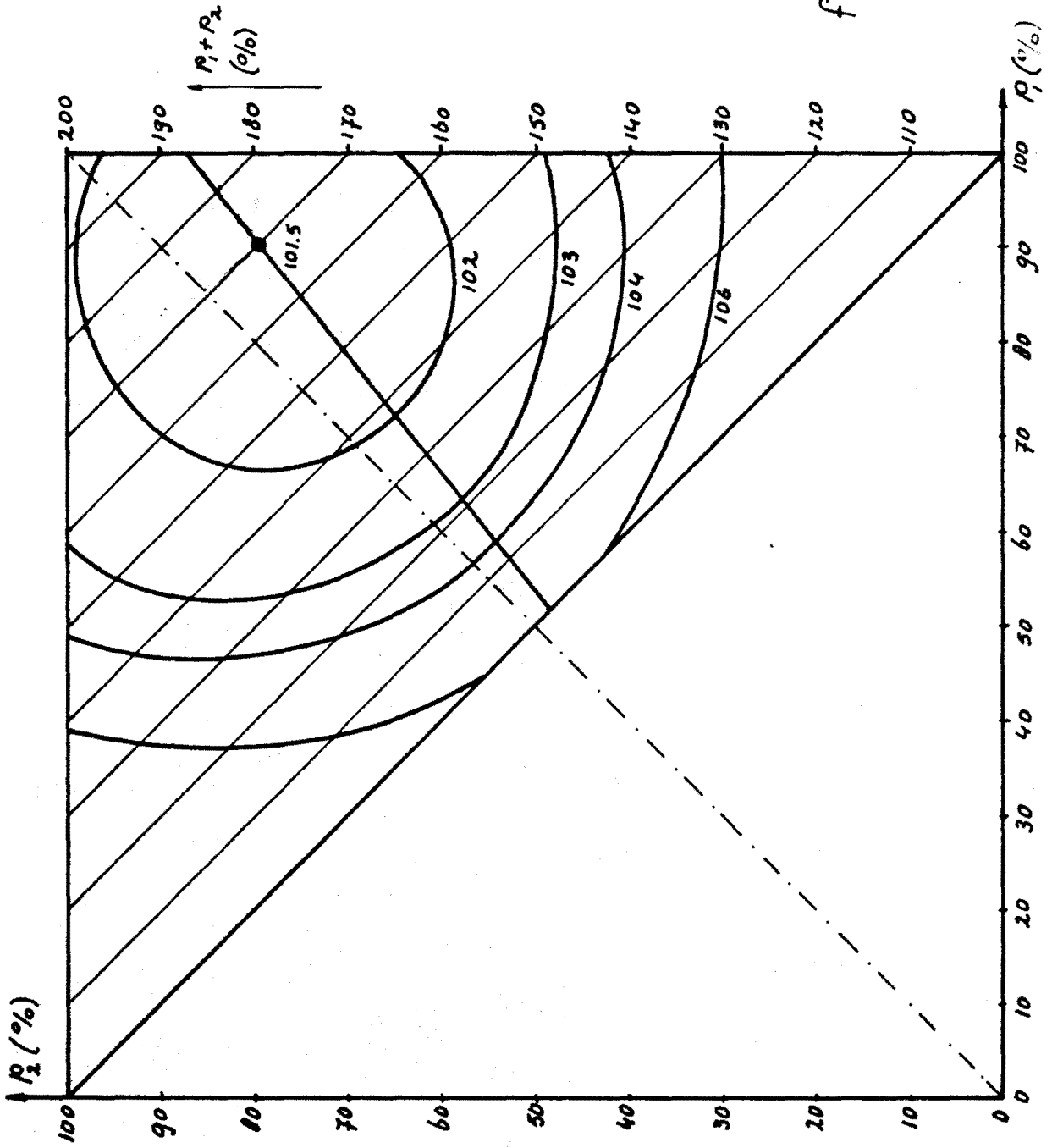
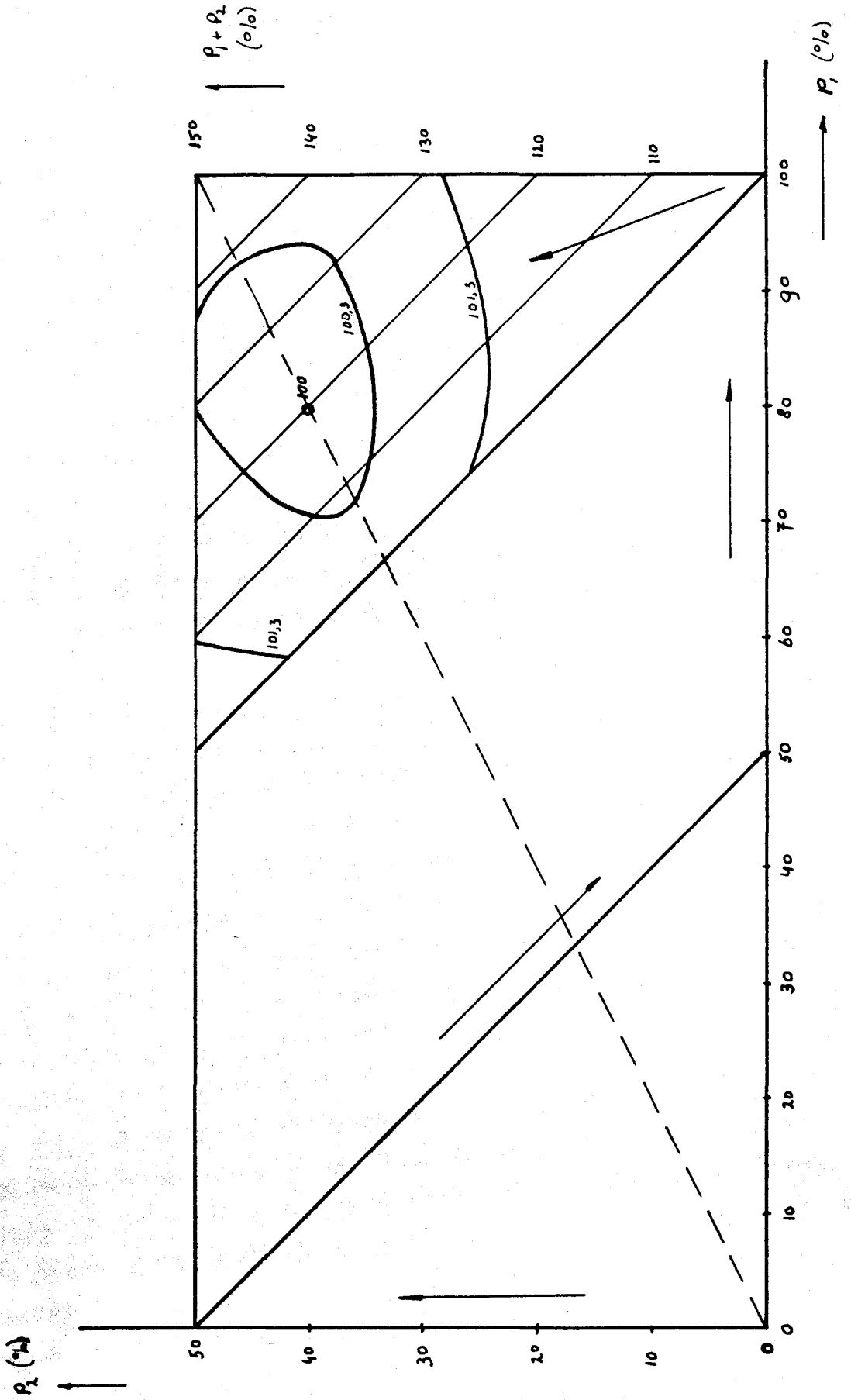


fig. 6.3.2.4.



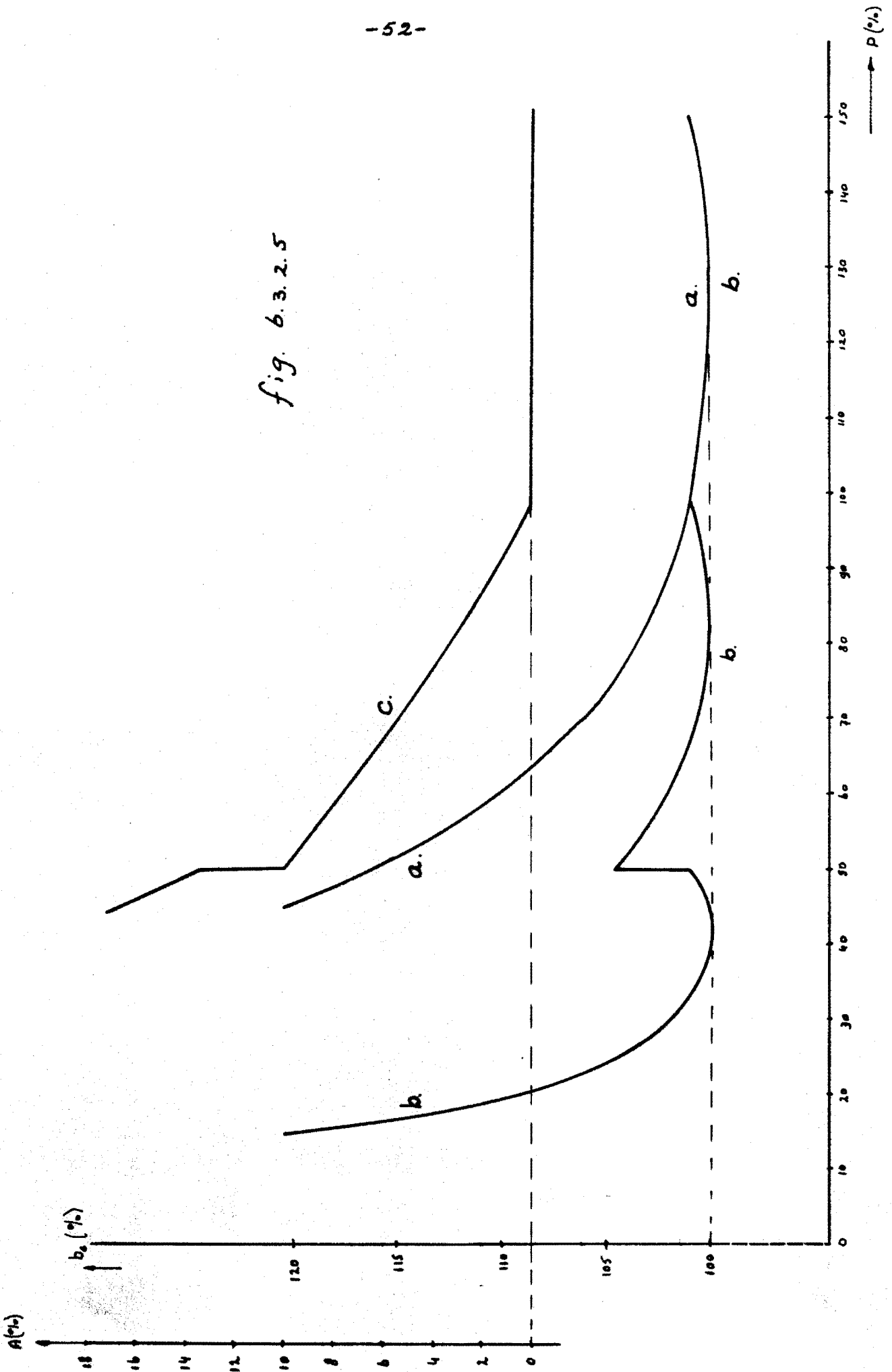
lindereenheden moeten dus ook gelijke belastingsgraden hebben.

In figuur 6.3.2.4. kan bij toenemende belasting het specifiek brandstofverbruik als volgt bepaald worden (volgens de richting van de pijlen). Bij een vermogen kleiner dan 50% draait alleen dieselmotor (p_2) en volgt het specifiek brandstofverbruik uit figuur 6.3.2.1. door $p = 2p_2$ te stellen. Komt de belasting boven 50%, dan wordt het vermogen overgenomen door dieselmotor (p_1). Motor (p_2) wordt stilgezet. Het brandstofverbruik is af te lezen uit figuur 6.3.2.1. met $p = p_1$. Bij een belasting boven 100% draaien beide motoren parallel en wordt een bedrijfspunt gekozen, ergens in het gearceerde gebied. Het optimale punt blijkt inderdaad daar te liggen, waar de belastingsgraad van beide motoren gelijk is. ($p_1 = 2p_2$). Ook hier geldt echter, dat afwijking van het optimale punt weinig invloed heeft op het specifiek brandstofverbruik.

6.3.2.3. Meerdere (eventueel verschillende) aggregaten

Hoewel drie gelijke aggregaten aanwezig zijn wordt de elektrische energie a/b van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" in feite met behulp van één aggregaat opgewekt. In tijden van lage elektrische vermogensafname zal het specifiek brandstofverbruik hoog zijn (figuur 6.3.2.1.). Er zal nu nagegaan worden, wat de besparingen kunnen zijn, indien voor de opwekking van elektrische energie meerdere (kleinere) dieselmotoren worden gebruikt. In figuur 6.3.2.5. is hiervan een voorbeeld gegeven. Op de zelfde manier als in figuur 6.3.2.4. is hier gebruik gemaakt van een "halve" en een "hele" dieselmotor (50 en 100%). (Voor het m.s. "Nedlloyd Bahrain" zou dit een goede keuze zijn. De elektrische belasting op zee is ongeveer tweemaal zo hoog (100%) dan die in de haven (50%). Bij parallelschakeling kan 150% geleverd worden, waardoor dus ook nog rekening is gehouden met een veiligheidsfactor van 1,5.) Bij een bepaalde belasting draait een zo klein mogelijke dieselmotor (of -kombinatie). Op deze manier ontstaat kromme b in figuur 6.3.2.5.

fig. 6.3.2.5



Bij toenemende belasting wordt voor een andere combinatie gekozen, als de bestaande combinatie het gevraagde vermogen niet meer kan leveren (dit ontstaat bij $p = 50\%$), of als een andere combinatie een gunstiger specifiek brandstofverbruik heeft (dit ontstaat bij $p = 98\%$). Indien voor één motor wordt gekozen ($p = 150\%$), dan ontstaat kromme a. Kromme c geeft tenslotte de relatieve besparing van kromme b ten opzichte van a. Duidelijk zijn de grote besparingen te zien bij lage belastingen.

6.3.2.4. Conclusies

- Bij lage belastingsgraad van een dieselmotor treedt een sterke stijging op van het specifiek brandstofverbruik.
- Optimale belastingsverdeling over meerdere dieselmotoren treedt op als de belastingsgraden van de motoren gelijk zijn. Dit geldt echter alleen, als de motoren zijn opgebouwd uit identieke cilindereenheden, waardoor de brandstofverbruikskrommen gelijk zijn.
- Relatief kleine verschillen in brandstofverbruikskrommen brengen relatief grote verschuivingen met zich mee van het punt van optimale vermogensverdeling.
- Als door continue meting de brandstofverbruikskrommen niet exact bekend zijn, heeft het om bovenstaande redenen geen zin de belastingsgraden nauwkeurig gelijk te maken (houden).
- Een relatief grote afwijking van het punt van optimale vermogensverdeling resulteert in een slechts geringe toename van het specifiek brandstofverbruik.
- Grote energiebesparingen zijn mogelijk indien gekozen wordt voor meerdere kleinere (eventueel verschillende) aggregaten. Uiteraard zal voor ieder schip apart de grootte van deze aggregaten moeten worden gekozen, afhankelijk van de te verwachten belasting-tijd curve.

6.3.2.5. Lijst van gebruikte symbolen

Zie appendix A2.

6.3.3. Generatorrendement

6.3.3.1. Inleiding

Niet alleen het specifiek brandstofverbruik van de hulp-dieselmotor, maar ook het rendement van de daaraan gekoppelde elektrische draaistroomgenerator draagt bij tot het totale rendement van het dieselaggregaat. Het generatorrendement is vooral afhankelijk van de belastingsgraad $p (= \frac{P}{P_{nom}})$ en de $\cos\varphi$.

Aan boord van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" zijn Heemaf-generatoren opgesteld, waarvan onderstaande rendementen als functie van p en $\cos\varphi$ bekend zijn.

	$p = 1$	$p = 3/4$	$p = 1/2$
$\cos\varphi = 0.8$	93.7	93.3	92.0
$\cos\varphi = 1.0$	95.1	94.7	93.6

tabel 6.3.3.1.

Voor verdere gegevens over de elektrische generator wordt verwezen naar appendix A1.

Om ook bij andere waarden van p en $\cos\varphi$ het rendement te kennen is een berekening gemaakt voor $\eta_g = f(p, \cos\varphi)$.

6.3.3.2. Berekening generatorrendement als functie van p en $\cos\varphi$

Het betreft hier een generator met een cilindrische rotor, waarvoor geldt: $x_d = x_q = x$.

Het verliesvermogen P_v in de generator kan gesplitst worden in:

$$P_v = P_{mech} + P_{ij} + P_{d,r} + P_{d,s} + P_{extra}$$

waarin: - $P_{d,r}$ evenredig is met U_p^2

- $P_{d,s}$ evenredig is met I_s^2

- $P_{mech} + P_{ij} + P_{extra} = P_o$ (weinig afhankelijk van p en $\cos\varphi$)

Zodat ook geschreven kan worden: $P_v = P_o + a_1 \cdot U_p^2 + a_2 \cdot I_s^2 \dots (1)$

Uit $P = 3UI_s \cdot \cos\varphi$ volgt: $I_s^2 = \frac{1}{9U^2} \cdot \left(\frac{P}{\cos\varphi}\right)^2 \dots\dots\dots (2)$

Uit $P = 3\frac{UU_p}{x} \cdot \sin\theta$ en figuur 6.3.3.1. volgt:

$$U_p \cdot \cos\varphi = U + U_p \cdot \sin\theta \cdot \text{tg}\varphi$$

$$U_p \cdot \sin\theta = \frac{Px}{3U}$$

$$U_p \cdot \cos\theta = U + \frac{Px}{3U} \cdot \text{tg}\varphi$$

$$U_p^2 = \left(U + \frac{Px}{3U} \cdot \text{tg}\varphi\right)^2 + \left(\frac{Px}{3U}\right)^2$$

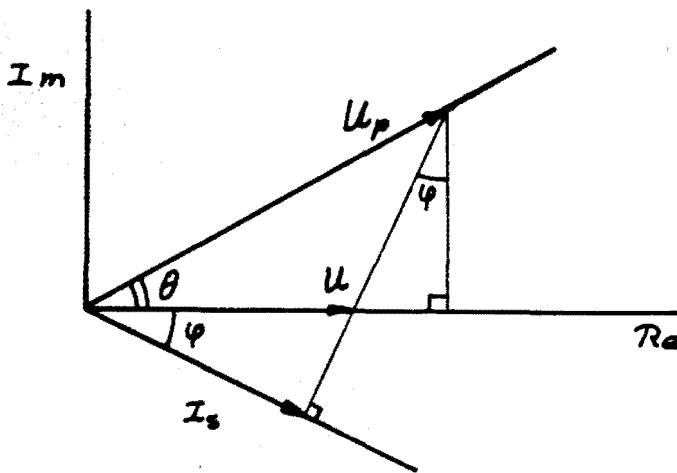


fig. 6.3.3.1.

$$U_p^2 = U^2 + \frac{2}{3}Px \cdot \text{tg}\varphi + \left(\frac{Px}{3U}\right)^2 \cdot (1 + \text{tg}^2\varphi)$$

$$= U^2 + \frac{2}{3}Px \cdot \text{tg}\varphi + \left(\frac{Px}{3U}\right)^2 \cdot \frac{1}{\cos^2\varphi}$$

$$U_p^2 = U^2 + \frac{2}{3} \cdot x \cdot (P \text{tg}\varphi) + \left(\frac{x}{3U}\right)^2 \cdot \left(\frac{P}{\cos\varphi}\right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

(2) en (3) ingevuld in (1) geeft:

$$P_v = P_o + a_1 \cdot U^2 + \frac{2}{3} \cdot a_1 \cdot x \cdot P \cdot \text{tg}\varphi + \left[\left(\frac{x}{3U}\right)^2 \cdot a_1 + \left(\frac{1}{3U}\right)^2 \cdot a_2 \right] \cdot \left(\frac{P}{\cos\varphi}\right)^2 \dots (4)$$

Verder geeft $p \triangleq \frac{P}{P_{\text{nom}}}$ ingevuld in (4):

$$\frac{P_v}{P} = \frac{P_o}{P_{\text{nom}}} \cdot \frac{1}{p} + \frac{a_1 \cdot U^2}{P_{\text{nom}}} \cdot \frac{1}{p} + \frac{2}{3} \cdot x \cdot a_1 \cdot \text{tg}\varphi + P_{\text{nom}} \left[\left(\frac{x}{3U}\right)^2 \cdot a_1 + \left(\frac{1}{3U}\right)^2 \cdot a_2 \right] \frac{p}{\cos^2\varphi}$$

of: $\frac{P_v}{P} \triangleq \frac{b_1}{p} + b_2 \cdot \text{tg}\varphi + b_3 \cdot \frac{p}{\cos^2\varphi} \dots\dots\dots(5),$

waarbij U, de spanning aan de klemmen van de generator, konstant is.

Het rendement volgt nu uit:

$$\eta_g = \frac{P}{P + P_v} = \frac{1}{1 + \frac{P_v}{P}} \approx 1 - \frac{P_v}{P} \dots\dots\dots(6)$$

(5) ingevuld in (6) geeft tenslotte:

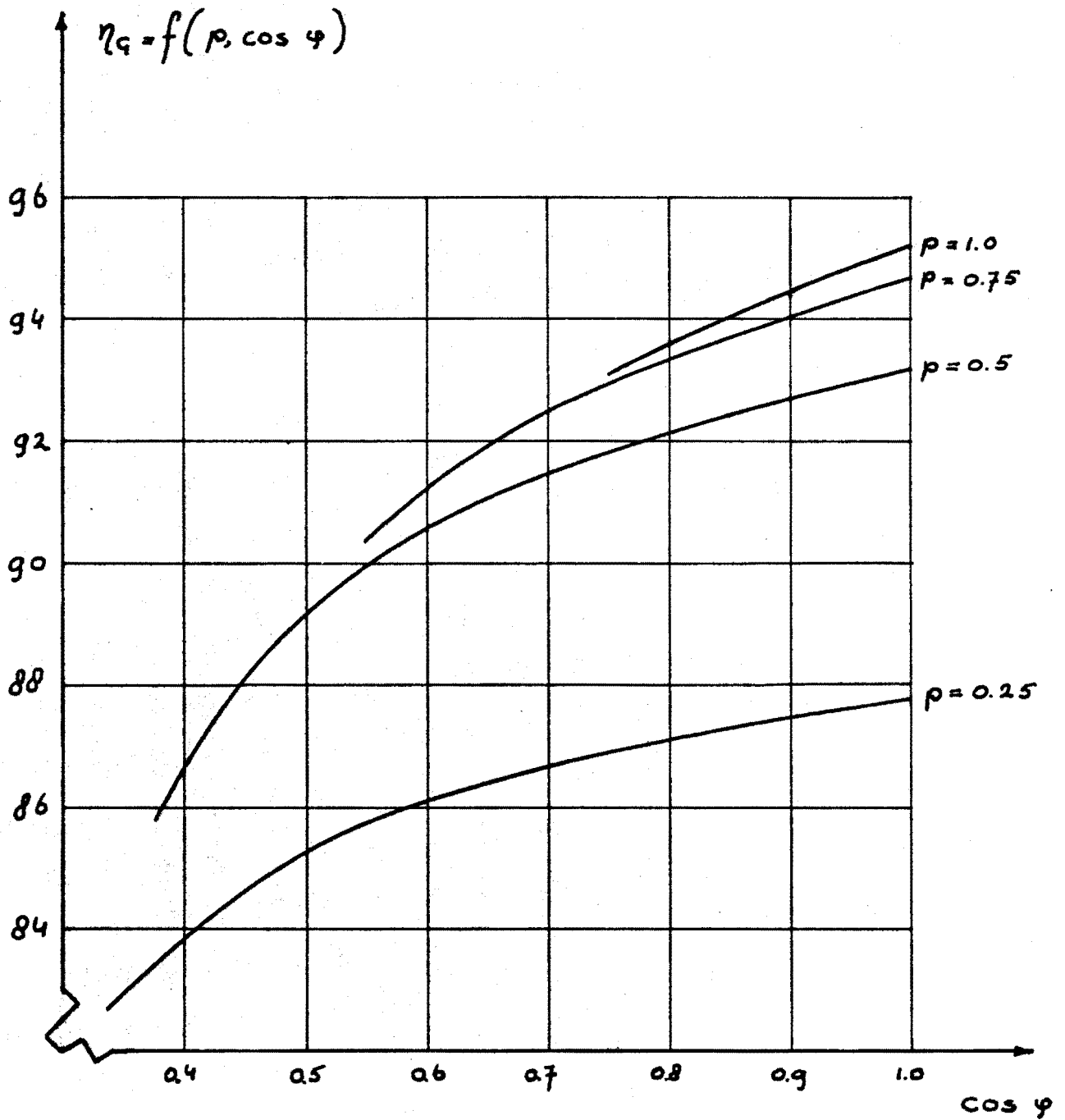
$$\eta_g = 1 - \left[\frac{b_1}{p} + b_2 \cdot \text{tg}\varphi + b_3 \cdot \frac{p}{\cos^2\varphi} \right]$$

De konstanten b_1 , b_2 en b_3 kunnen met behulp van tabel 6.3.3.1. worden bepaald.

In goede benadering geldt: $b_1 = 0.029$
 $b_2 = 0.007$
 $b_3 = 0.019$

Figuur 6.3.3.2. toont het generatorrendement η_g als functie van $\cos\varphi$ voor verschillende waarden van de belastingsgraad p. Voor een lagere belastingsgraad is een lagere $\cos\varphi$ toegestaan. Dit als gevolg van een maximaal toelaatbare stroom. Uit de restrictie $\cos\varphi \geq 0.75$ voor $p = 1$ wordt berekend: $\cos\varphi \geq (0.75)p$.

fig. 6.3.3.2.



6.3.3.3. Conclusies

- De belastingsgraad p is ook bij de generator sterk van invloed op het rendement. Een rendementsverlaging van ruim 6% treedt op bij $p=0.25$ ($P = 175\text{kW}$) ten opzichte van $p = 1$. Onder bepaalde omstandigheden komt deze belastingstoestand voor a/b van het m.s. "Nedlloyd Bahrain". (zie appendix A1)
- De invloed van de $\cos\varphi$ op het generatorrendement is beduidend kleiner. (ongeveer 2% variatie bij $p = 0.75$ voor $\cos\varphi = 0.7 \dots 0.95$)
Toch is hier een belangrijke besparing mogelijk, omdat $\cos\varphi$ -verbetering kan worden bereikt zonder extra investeringen. (zie hoofdstuk 7)

6.3.3.4. Lijst van gebruikte symbolen

<u>symbool</u>	<u>benaming</u>	<u>eenheid</u>
a_1, a_2	konstanten	-
b_1, b_2, b_3	konstanten	-
I_s	effektieve waarde statorstroom	A
p	$= \frac{P}{P_{nom}}$: de belastingsgraad van de generator	-
P	vermogen, onttrokken aan de generator	kW
P_o	$= P_{mech} + P_{ij} + P_{extra}$	kW
$P_{d,r}$	rotor-koperverlies	kW
$P_{d,s}$	stator-koperverlies	kW
P_{extra}	extra verliezen, niet onder te brengen in andere posten	kW
P_{mech}	mechanische verliezen	kW
P_{nom}	nominale waarde P	kW
P_v	totaal verliesvermogen generator	kW
U	klemspanning	V
U_p	Poolspanning	V
x	synchroon reactantie	Ω
x_d	synchroon langsreactantie	Ω
x_q	synchroon dwarsreactantie	Ω
φ	fasehoek tussen I_s en U	rad
θ	poolhoek	rad
η_g	generatorrendement	-

6.3.4. Het rendement van het dieselaggregaat

Figuur 6.3.4.1. toont het relatief specifiek brandstofverbruik van een compleet dieselaggregaat als functie van de belastingsgraad. Deze grafiek is ontstaan uit de figuren 6.3.2.3. en 6.3.3.2. ($\cos\varphi = 0.9$). De grootte b_e^* geeft procentueel aan, hoeveel brandstof nodig is voor de opwekking van 1 kWh elektrische energie. Hierbij is het minimaal optredend verbruik op 100% gesteld. Indien het dieselaggregaat bijvoorbeeld voor de helft belast is, dan zal ongeveer 6% meer brandstof nodig zijn voor de opwekking van 1 kWh elektrische energie, dan bij volle belasting het geval is. Bij een belastingsgraad van 30% is het specifiek verbruik zelfs met 28% gestegen ten opzichte van het nominaal verbruik. Het belang van een hoge belasting van een dieselaggregaat wordt hier benadrukt.

Het maximaal rendement van de generator bij $\cos\varphi = 0.9$ bedraagt volgens figuur 6.3.3.2. 94,5. Het minimaal specifiek brandstofverbruik van de dieselmotor volgens figuur 6.3.2.1. is 224 g/kWh. Beide gegevens samengevoegd levert een minimaal specifiek brandstofverbruik van het totale aggregaat van $224/0.945 = 237$ g/kWh, dus:

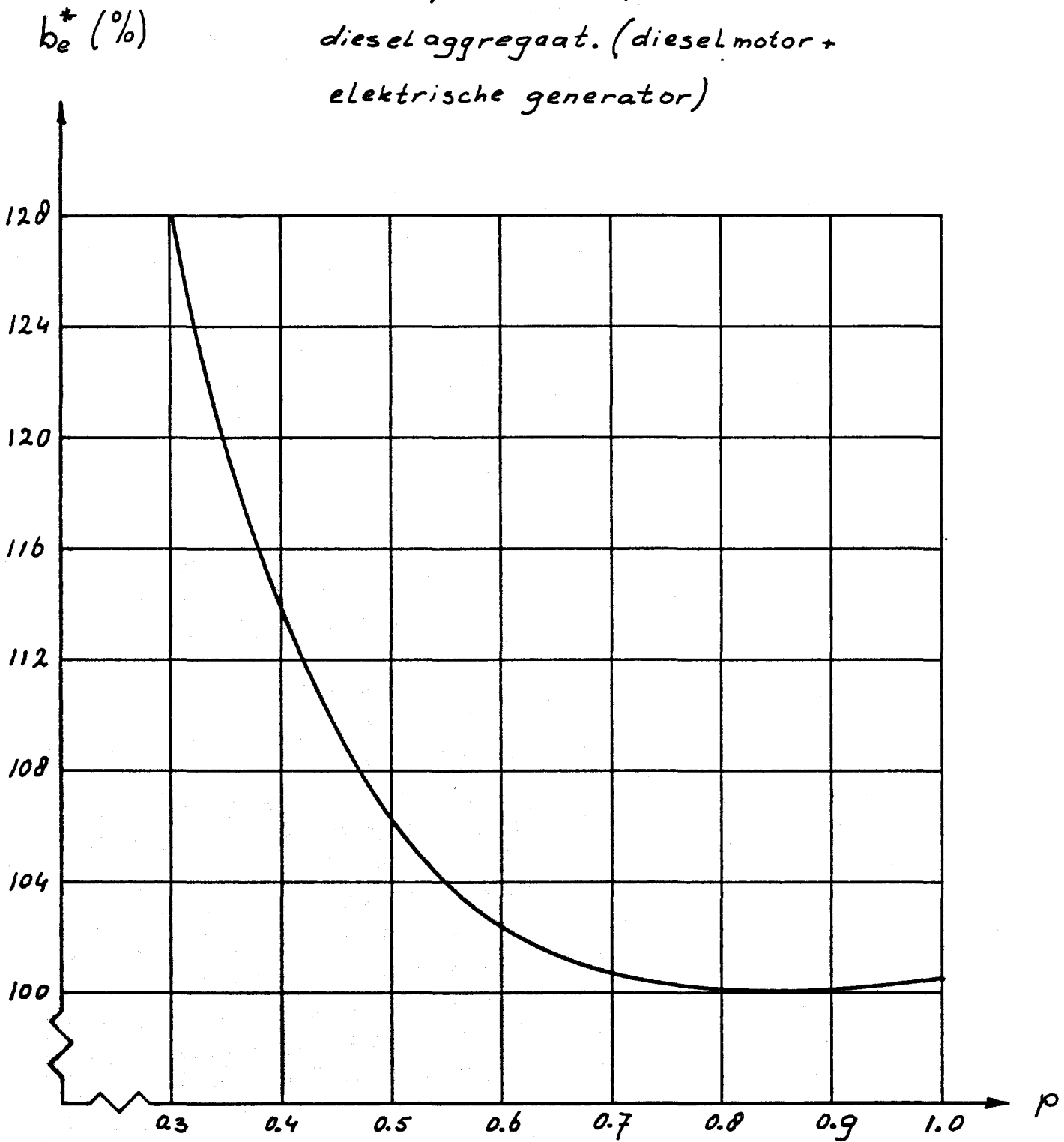
$$(b_e^*)_{\min} = 237 \text{ g/kWh}$$

Bij 30% van de nominale belasting is dit verbruik toegenomen tot 303 g/kWh.

Rekenend met een huidig prijsnivo van 725 gld/ton voor Marine Diesel Oil wordt de brandstofprijs van elektrische energie 17 à 22 ct/kWh !

fig. b.3.4.1.

relatief brandstofverbruik v.e.
diesel aggregaat. (diesel motor +
elektrische generator)



7. Energiebesparing door $\cos\varphi$ -verbetering

7.1. Inleiding (wat is $\cos\varphi$)

Vele elektrische machines, die werken m.b.v magnetische velden, hebben voor de opbouw van dat veld een magnetiseringsstroom nodig, welke 90° najlt t.o.v. de aangelegde spanning. (zie figuur 7.1.). Deze magnetiseringsstroom I_b wordt ook wel "blindstroom" genoemd, omdat deze niet bijdraagt tot de energie-omzetting. Dit in tegenstelling tot de "werkzame stroom" I_w . Het werkzame vermogen bedraagt $P = UI_w = UI\cos\varphi$, het blindvermogen $Q = UI_b = UI\sin\varphi$. Deze beide vermogens vektorieel opgeteld levert het schijnbare vermogen $S = UI$. In figuur 7.2. is dit alles in een wijzer-diagram weergegeven.

We bekijken figuur 7.3., waar een inductiemotor via een leiding is aangesloten op een generator. Bij de opbouw van het magnetische veld in één fase van de motor, wordt de daarvoor benodigde magnetische energie onttrokken aan de generator. Bij de afbraak van het veld wordt deze energie weer teruggegeven aan de generator. Hoewel de totale magnetische energie in de motor konstant blijft, zal er een permanente uitwisseling van magnetische energie zijn, in de drie fasen afzonderlijk, tussen generator en motor. Dit uit zich in een extra stroom, welke energieverliezen in de generator en de leidingweerstand R veroorzaakt. Bij een hoge blindstroom (in relatie tot de werkzame stroom) spreekt men van een "slechte-" of "lage $\cos\varphi$ " ($\cos\varphi = 0.6$ à 0.7). Bij lage blindbelasting wordt gesproken over een "goede-" of "hoge $\cos\varphi$ " ($\cos\varphi = 0.9$ à 0.95). Een slechte $\cos\varphi$ ontstaat voornamelijk door een lage belastingsgraad van de aangesloten inductiemotoren. Figuur 7.4. laat zien, dat de $\cos\varphi$ sterk daalt bij afnemende belastingsgraad $p = P/P_{nom}$. Het betreft hier een gemeten kromme aan een 11 kW motor.

7.2. $\cos\varphi$ -verbetering

Verbetering van de $\cos\varphi$ kan op twee voor de hand liggende manieren gebeuren:

- a) door het verhogen van de belastingsgraad van inductiemotoren
- b) door blindlast-compensatie

ad a) Verreweg het grootste deel van het elektrische vermogen a/b van zeeschepen wordt afgenomen door inductiemotoren (zie appendix A1: $\pm 75\%$). De $\cos\varphi$ wordt dan ook voor een belangrijk deel bepaald door de belastingsgraad van diezelfde inductiemotoren (zie figuur 7.4.)

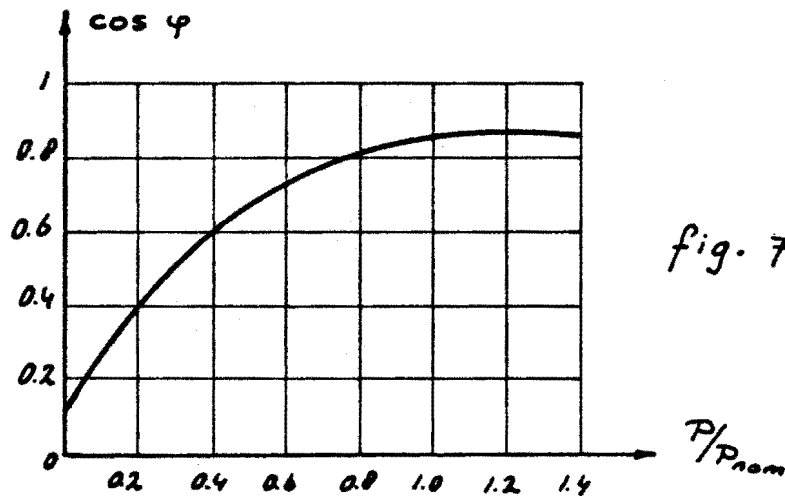
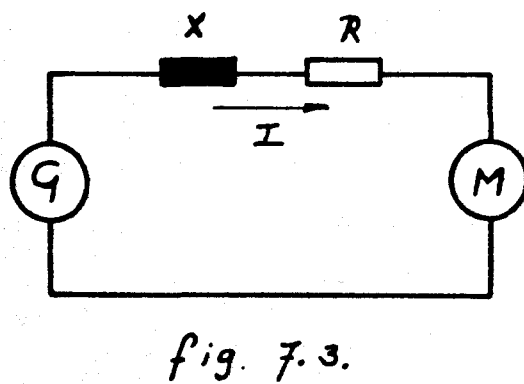
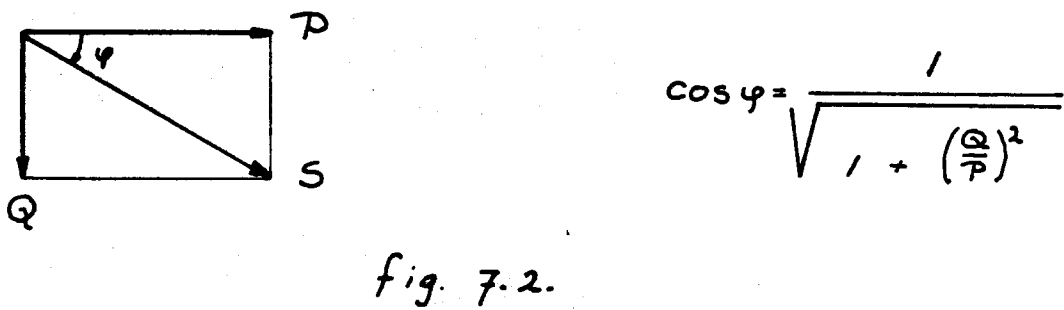
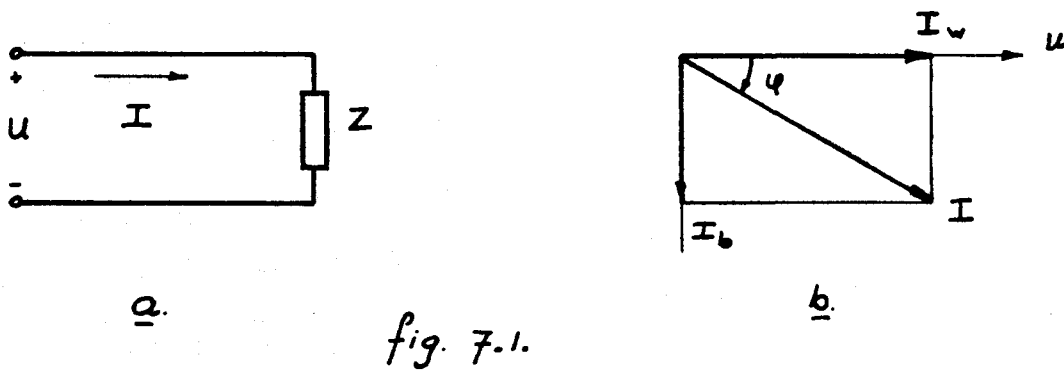


fig. 7.4.

Vaak wordt het vermogen van een inductiemotor onnodig veel groter gekozen dan het vermogen dat gevraagd wordt door de aan de as gekoppelde mechanische belasting (meestal een pomp of ventilator). Hierdoor wordt de $\cos\varphi$ onnodig laag. Door tijdens het ontwerp ieder lastproces nauwkeurig te onderzoeken en daarna een zo klein mogelijke inductiemotor te kiezen, kan de $\cos\varphi$ worden verbeterd. Dit leidt dan weer tot minder energieverliezen in de kabels en generator (zie figuur 6.3.3.2.)

Uit laatstgenoemde figuur blijkt, dat de mogelijke besparingen relatief gering zijn. Toch zijn het belangrijke besparingen, omdat er geen extra investeringen nodig zijn! De investeringen kunnen zelfs lager zijn, omdat voor kleinere inductiemotoren gekozen wordt.



ad b) Blindvermogen kan behalve door de generator ook door een parallel aan de inductiemotor geschakelde condensator geleverd worden. (zie figuur 7.5.). De blindstroom vloeit nu niet meer door de generator en de leiding. De magnetiseringsenergie pendelt heen en weer tussen de condensator en de motor. Het gebruik van een dergelijke condensator noemt men "blindlastcompensatie".

Blindlastcompensatie heeft voor- en nadelen:

Voordelen

- minder energieverlies in de generator
- minder spanningsverlies over de leiding (X en R)
- minder energieverlies in de leiding (R)

Nadelen

- extra investering
- mogelijke overspanning aan de klemmen van een juist uitgeschakelde inductiemotor

Vanwege het laatstgenoemde nadeel kan compensatie niet verder worden doorgevoerd dan tot een $\cos\varphi$ van ± 0.95 .

Stel nu als voorbeeld, dat een inductiemotor gedurende 100% van de tijd het net belast met een vermogen van 20 kW bij een $\cos\varphi$ van 0.7. Met behulp van condensatoren wordt de $\cos\varphi$ op 0.95 gebracht, waarvoor een condensatorbelasting van ongeveer 15 kVAR nodig is. Een dergelijke condensatorbatterij brengt een extra investering van f650,- met zich mee.

Uit figuur 6.3.3.2. en de wetenschap, dat ook in de leidingen nog enige energiewinst is te behalen, kan geconcludeerd worden, dat een energiebesparing van 2% haalbaar is. Rekenend met een energieprijis van 20 ct/kWh (uitsluitend brandstofkosten), wordt een jaarlijkse kostenbesparing van ongeveer $9000 \times 20 \times 0.02 \times 0.2 = f720,-$ bereikt. Installatie van een condensatorbatterij is in dit geval dus zeker rendabel; de investering wordt in minder dan één jaar terugverdiend.

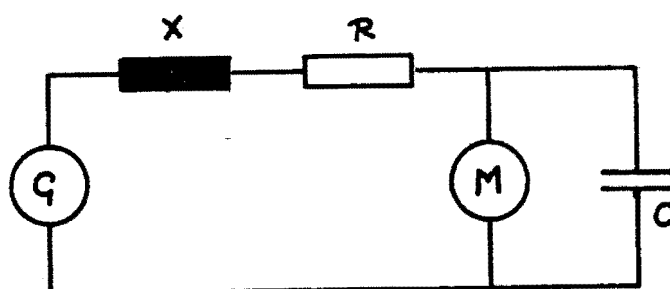


fig. 7.5.

De vraag, of blindlastcompensatie een rendabele zaak is, moet voor iedere induktiemotor apart worden bekeken. Belangrijke grootheden hierbij zijn:

- het percentage van de tijd, dat de induktiemotor actief is
- de $\cos\varphi$ van de motor
- de $\cos\varphi$ -afhankelijkheid van het rendement van de generator
- de prijs van condensatorbatterijen
- de prijs van elektrische energie

7.3. Conclusies

- een hogere $\cos\varphi$ leidt tot minder energieverbruik aan boord van schepen.
- $\cos\varphi$ -verbetering kan o.a. worden bereikt door de belastingsgraad van induktiemotoren te verhogen. Bij het ontwerp van de elektrische installatie moet overdimensionering van induktiemotoren zoveel mogelijk te worden voorkomen. Op deze manier kan een energiebesparing worden bereikt, welke geen extra investeringen kost.
- ondanks de extra investering van condensatoren, kan blindlastcompensatie in bepaalde gevallen rendabel zijn.

8. Verbruik van elektriciteit

8.1 Energiebesparing door verminderd verbruik

Een zeer effectieve energiebesparing wordt bereikt, als een bepaalde verbruiker (bijvoorbeeld een ventilator af de kombuis) wordt afgeschakeld, in tijden dat de diensten van deze verbruiker gemist kunnen worden. De bereidheid van de bemanning actief mee te werken aan energiebesparing is hierbij essentieel. Hoewel bij deze vorm van energiebesparing een zekere mate van automatisering mogelijk is, zal dit in vele gevallen, sociaal gezien, niet te verwezenlijken zijn. De kok bijvoorbeeld wil zelf bepalen, wanneer hij zijn kombuis nodig heeft. Hij zal vooralsnog niet accepteren, dat het thuisfront zijn "dienstregeling" bepaalt.

Behalve technische veranderingen zoals elders in dit verslag beschreven, is het daarom ook belangrijk bij de bemanning een positieve houding ten aanzien van het onderwerp "energiebesparing" te bewerkstelligen. Dit moet op een zodanige manier gebeuren, dat deze positieve houding ook inderdaad tot een veranderd (energiebesparend) gedrag leidt. Een positieve houding ten aanzien van energiebesparing zal in vele gevallen zeker aanwezig zijn, maar blijkt niet, of niet noemenswaardig, tot energiebesparing te leiden. Een aantal oorzaken kan hiervoor worden genoemd:

- Er wordt gestreefd naar een situatie met minder energieverbruik, die op het eerste gezicht minder aantrekkelijk lijkt (en misschien ook is) dan de huidige situatie.
- Het is vaak niet bekend, welke en hoeveel invloed een individueel bemanningslid heeft op de energiehuishouding van een bepaald apparaat.
- Het is bij de bemanningsleden niet bekend welke invloed besparing op de verschillende verbruikers of verbruikersgebieden heeft op het totale energieverbruik.
- Doordat de huidige meetmogelijkheden beperkt zijn, (alleen het totaal geleverde elektrisch vermogen wordt globaal aangegeven)

is het niet mogelijk eventuele (geringe) energiebesparingen te meten. Hierdoor volgt geen beloning op energiebesparend gedrag in de vorm van een gevoel van betrokkenheid. ("Door bediening van dat apparaat op die wijze heb ik zoveel energie bespaard")

De onwetendheid van de bemanning omtrent het onderwerp energiebesparing kan worden ondervangen door een goede voorlichting. Waar besparingen mogelijk zijn, hoeveel en wat de invloed is op het totale energieverbruik zijn hierbij belangrijke gegevens. Alleen het geven van voorlichting leidt echter weinig of niet tot energiebesparend gedrag. Studies in de Verenigde Staten hebben dit aangetoond en worden bevestigd door een recent onderzoek aan de Rijksuniversiteit te Leiden. (Lit. 8.1.1.)

Hoewel het laatstgenoemde onderzoek werd uitgevoerd onder particuliere burgers, kan aangenomen worden, dat de globale conclusies van het onderzoek ook voor bemanningsleden van schepen zullen gelden. Deze conclusies worden hier kort samengevat:

- Het geven van voorlichting over energiebesparing wordt algemeen gewaardeerd door de potentiële bespaarder.
- De effectiviteit van het geven van voorlichting op grote schaal, als methode om energiebesparing te bewerkstelligen, is gering.
- Grote energiebesparingen zijn mogelijk, indien informatie over het eigen energieverbruik wordt gegeven aan de potentiële bespaarder.
- Deze informatie moet wel snel volgen op het energiebesparend gedrag, zodat er een duidelijke relatie ontstaat tussen gedrag en consequentie.
- Men heeft behoefte aan het weergeven van het eigen energieverbruik in grafieken en in meer- of minder verbruik (ten opzichte van een bepaald norm-verbruik) in procenten.
- Goede voorlichting kan hierbij een ondersteunende taak vervullen.
- Indien energiebesparend gedrag op deze wijze wordt bewerkstelligd, gaat men zelf op zoek naar nieuwe besparingsmogelijkheden (Men vindt het interessant; men wordt enthousiast.).

De resultaten van het onderzoek wijzen een duidelijke richting aan, hoe energiebesparend gedrag van de bemanning kan worden bevorderd. Behalve goede voorlichting is een duidelijke en nauwkeurige informatie nodig over het energieverbruik. Om dit te bereiken zijn veel uitgebreidere metingen van het elektriciteitsverbruik nodig, dan tot nu toe het geval is. Er moet verder een mogelijkheid zijn de meetresultaten te kunnen registreren, te verwerken en op een geschikte wijze te presenteren aan de bemanning.

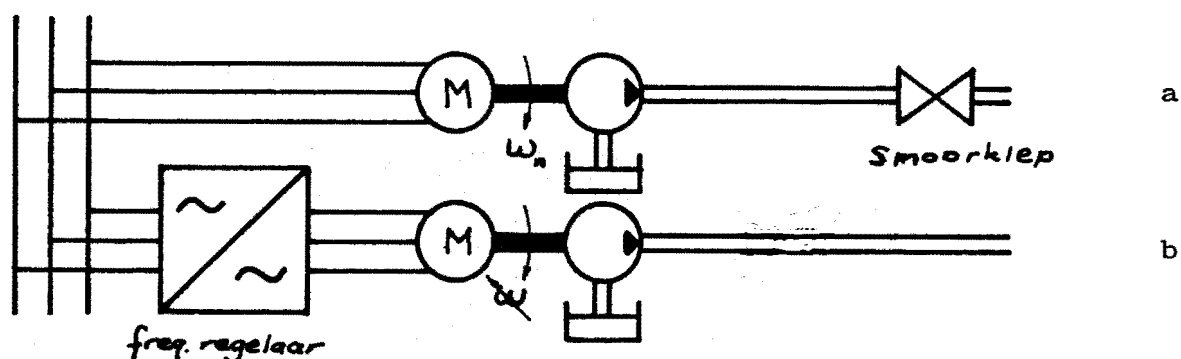
Wat de belangrijkste uitbreiding, de metingen van het elektriciteitsverbruik, betreft, kan in eerste instantie gedacht worden aan een splitsing van het totale verbruik in verschillende verbruikersgebieden, zoals dat ook bij de analyse van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" is gebeurd. (zie appendix A1, figuur 3 t/m 6). Het energieverbruik van grote individuele apparaten (in het geval van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" bijvoorbeeld: de kombuis en de airconditioning-compressor) kan apart worden gemeten en geregistreerd.

8.2. Toerenregeling centrifugaalpomp

8.2.1. Inleiding

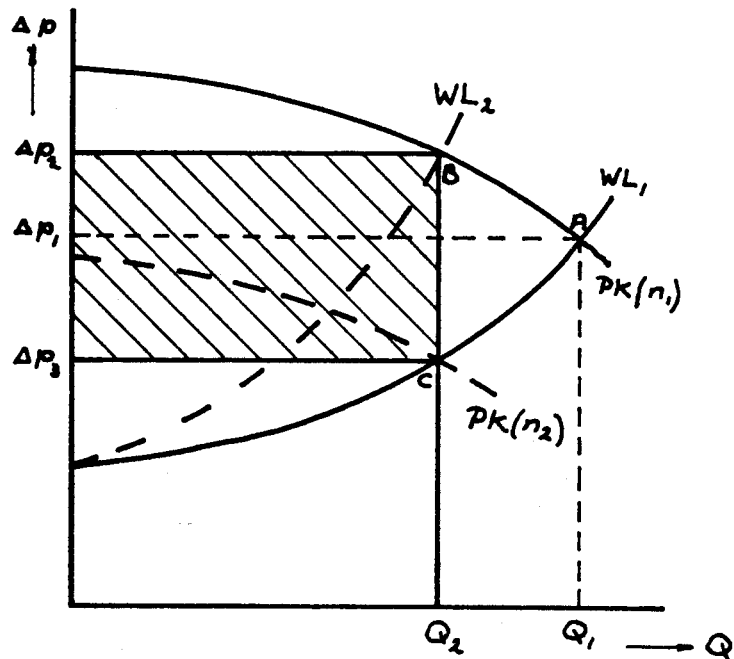
Aan boord van zeeschepen staan vele centrifugaalpompn opgesteld voor het verplaatsen van vloeistoffen, zoals brandstof, smeero- lie, zoetwater en zoutwater. Meestal worden deze pompn aange- dreven door een induktiemotor welke, indien direkt aan het boord- net gekoppeld, met een vrijwel konstant toerental draait dat di- rekt samenhangt met de netfrequentie. Ook het toerental van de centrifugaalpomp zal dus nagenoeg konstant zijn.

Eventueel gewenste volumestroomregeling wordt algemeen bewerk- stelligd d.m.v. een smoorklep in de pompleiding. Verandering van de volumestroom kan echter ook geschieden door toerenrege- ling van de centrifugaalpomp; dus van de elektromotor.



Figuur 8.2.1.1.

Beide systemen worden afgebeeld in de figuren 8.2.1.1.a en 8.2.1.1.b. Toerenregeling blijkt energetisch gunstiger te zijn dan smoring. Dit zal duidelijk gemaakt worden aan de hand van figuur 8.2.1.2., waar voor de pomp en de leiding van figuur 8.2.1.1. de karakteristieken $\Delta p = f(Q)$ zijn opgenomen.



Figuur 8.2.1.2.

De pompkarakteristiek bij nominaal toerental $PK(n_1)$ snijdt de nominale weerstandslijn WL_1 in het punt A. Hierbij wordt de nominale volumestroom Q_1 geleverd. In dit werkpunt wordt een vermogen $\Delta p_1 \cdot Q_1$ opgenomen (rendementsinvloeden worden hier even buiten beschouwing gelaten). Stel nu, dat de wens bestaat, de volumestroom te verminderen van Q_1 tot Q_2 . Dit kan op de twee eerder vermelde manieren gebeuren:

1) Smoring

Door het verder sluiten van de smoorklep verschuift de weerstandslijn WL_1 naar WL_2 , waardoor met de pompkarakteristiek $PK(n_1)$ het nieuwe werkpunt B wordt bereikt. De volumestroom is hierdoor gedaald van Q_1 tot Q_2 . Het vermogen dat nu wordt opgenomen bedraagt $\Delta p_2 \cdot Q_2$.

2) Toerenregeling

Het toerental van de centrifugaalpomp wordt verlaagd van n_1 tot n_2 , waardoor de pompkarakteristiek verschuift van $PK(n_1)$ tot $PK(n_2)$. Samen met de ongewijzigde weerstandslijn WL_1 wordt instelpunt C bereikt. Hier bedraagt het opgenomen vermogen $\Delta p_3 \cdot Q_2$.

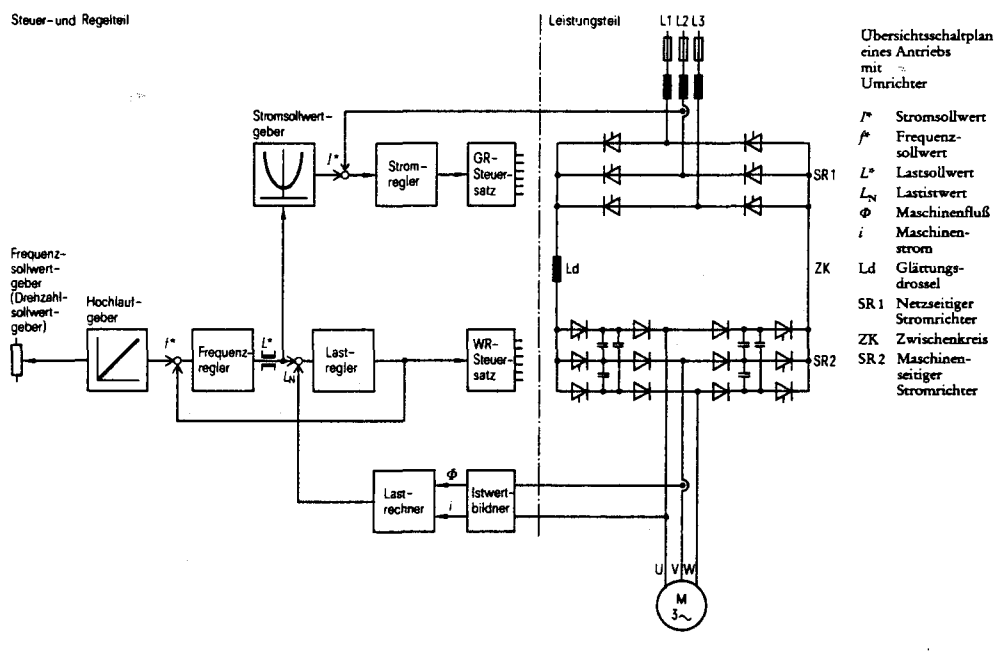
In het geval van toerenregeling wordt dus beduidend minder vermogen opgenomen dan bij smoring van de volumestroom. Het verschil bedraagt $(\Delta p_2 - \Delta p_3)Q_2$ en wordt in figuur 8.2.1.2. voorgesteld door het gearceerde oppervlak.

Voor volumestroomregeling komen vooral die pompen in aanmerking die nodig zijn voor de goede werking van de voortstuwingsdieselmotor, zoals brandstof-, smeerolie- en koelwaterpompen. Indien het geleverde vermogen van de hoofdmotor op een lagere waarde wordt ingesteld, dan kan de volumestroom van genoemde pompen worden verkleind. Kiest men voor toerenregeling, dan kan de pomp op één of andere manier aan de hoofdmotor gekoppeld worden. Bijvoorbeeld via een asgenerator van variabele frequentie, zoals beschreven in paragraaf 6.2.3.. Voor een zeekoelwaterpomp is dit laatste niet zonder meer mogelijk. De volumestroom van deze pomp zal niet alleen afhangen van het hoofdmotorvermogen. Ook de zeewatertemperatuur heeft hierop een sterke invloed. Indien het zelfde koelend effect moet worden gehandhaafd, dan zal de pomp in zeeën met warm water een grotere volumestroom moeten leveren, dan in zeeën met koud water. Dit verschijnsel treedt vooral op bij schepen, die pendelen tussen warme tropische en koude Europese wateren (bijvoorbeeld het m.s. "Nedlloyd Bahrain"). Een faktor 2 à 4 in volumestroomvariatie van de zeewaterpomp is hierbij niet ongewoon. Extra regeling van de volumestroom van deze pomp zal dus steeds noodzakelijk zijn.

Hierna zullen de mogelijke besparingen worden onderzocht, die ontstaan indien een inductiemotor van 40 kW, welke aan een zeekoelwaterpomp is gekoppeld, in toeren wordt geregeld d.m.v een statische frequentie-omzetter.

8.2.2. Praktisch voorbeeld van mogelijke besparingen

Hoewel ook andere vormen van toerenregeling denkbaar zijn, wordt in dit voorbeeld gebruik gemaakt van een statische frequentie-omzetter volgens figuur 8.2.2.1. Met dit type regelaar kan het toerental van de inductiemotor traploos gevarieerd worden van

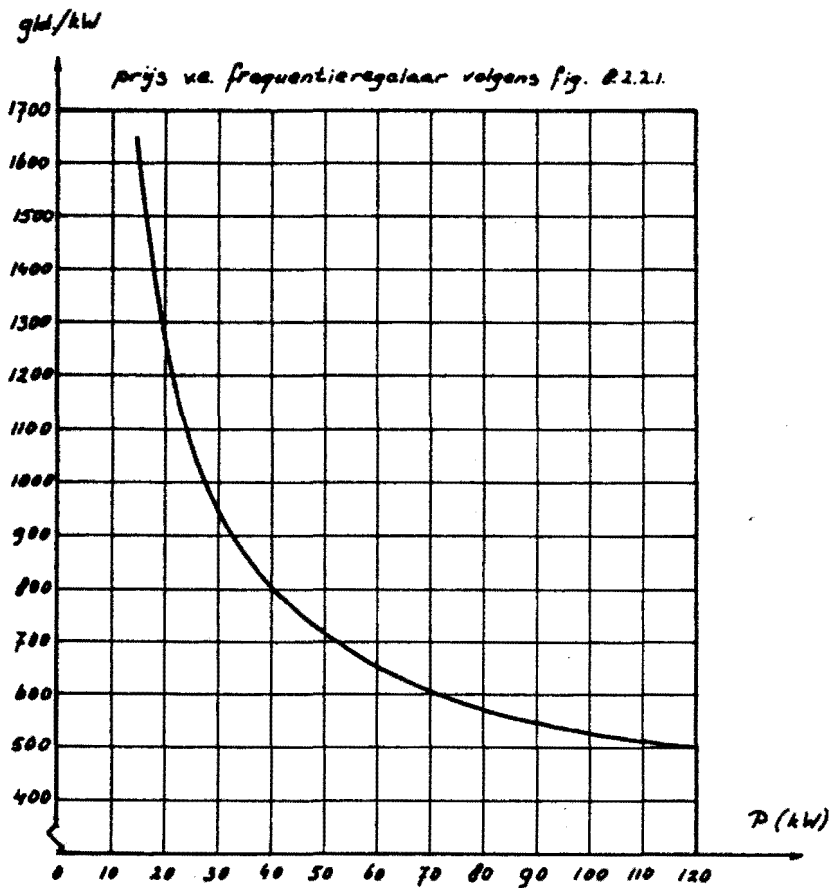


Figuur 8.2.2.1.

$\pm 5\%$ tot 100% van het nominale toerental. De elektronische omzetter wordt tussen het net en de inductiemotor geplaatst (zie ook figuur 8.2.1.1.b). De voordelen van deze methode van toerenregeling zijn vooral het geringe onderhoud en het hoge rendement ($\pm 90\%$). Alleen de hoge prijs kan een beperkende factor zijn (figuur 8.2.2.2.). Verder is nog vermeldenswaardig, dat het bouwvolume van de elektronische frequentie-omzetter ongeveer 0.5 à 1 m^3 bedraagt.

In figuur 8.2.2.3. zijn enige praktische karakteristieken gegeven voor verschillende toerentallen van een centrifugaalpompe, geschikt voor water. Tevens is in dezelfde figuur een leidingkarakteristiek opgenomen.

Door nu de volumestroom van de centrifugaalpompe op twee manieren te variëren (smoren of toerenregeling), ontstaan krommen van opgenomen vermogen uit het boordnet volgens figuur 8.2.2.4. Bij de totstandkoming van de vermogenskrommen is rekening gehouden met het rendement van de centrifugaalpompe en de elektronische-omzetter. De grote besparingen in het geval van toerenregeling vallen onmiddellijk op.

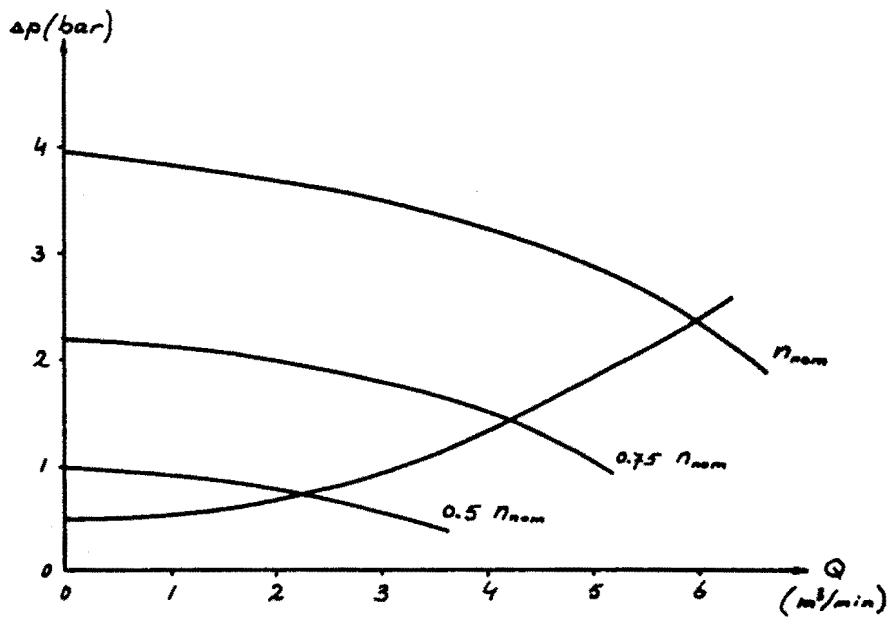


Figuur 8.2.2.2.

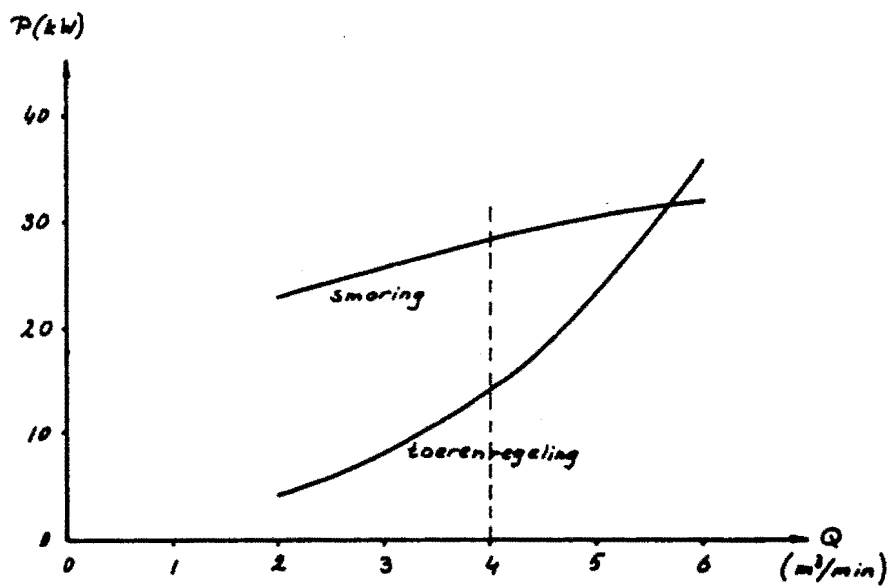
Om eerder genoemde reden, zal de gemiddelde volumestroom ver onder de nominale waarde ($6 \text{ m}^3/\text{min}$) liggen. Stel bijvoorbeeld, dat de gemiddeld benodigde volumestroom $\frac{2}{3} \cdot Q_{\text{nom}}$ bedraagt; dus $4 \text{ m}^3/\text{min}$. Door middel van toerenregeling kan dan gemiddeld ongeveer 14 kW bespaard worden in tijden dat de zeewaterpomp operationeel is. In het geval van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" is dit laatste gedurende ongeveer 50% van de tijd het geval (zie appendix A1). Uitgaande van een kWh-prijs van 0.2 gld/kWh worden de jaarlijkse besparingen:

$$B = \frac{9000}{2} \cdot 14 \cdot 0,2 = 12.600 \text{ gld/jr}$$

Voor de elektronische regelaar wordt een vermogen van 45 kW gekozen. De prijs hiervan kan uit figuur 8.2.2.2. worden bepaald en bedraagt f33.750,-.



Figuur 8.2.2.3.



Figuur 8.2.2.4.

Wordt met een annuïteitspercentage gerekend van 20%, dan bedragen de jaarlijkse investeringskosten:

$$I = 6750 \text{ gld/jr}$$

De jaarlijkse investeringskosten bedragen ongeveer de helft van de jaarlijkse besparingen, waardoor installatie van een elektronische frequentie-omzetter in dit geval zeker rendabel is. Er dient nog te worden opgemerkt, dat hier is uitgegaan van een schip, dat relatief veel in de haven ligt ($\pm 50\%$). Voor een schip dat een groter gedeelte van de tijd op zee vertoeft (bijvoorbeeld een containerschip), zullen de besparingen evenredig groter zijn.

8.2.3. Conclusies

- Voor een centrifugaalpomp, waarvan de gemiddeld benodigde volumestroom ver onder de nominale waarde ligt, zijn grote energiebesparingen mogelijk door het toepassen van toerenregeling i.p.v. smoring.
- Ondanks de hoge prijs van toerenregelaars voor induktiemotoren, kan installatie van deze apparaten rendabel zijn.
- Vooral zeekoelwaterpompen komen hiervoor in aanmerking.

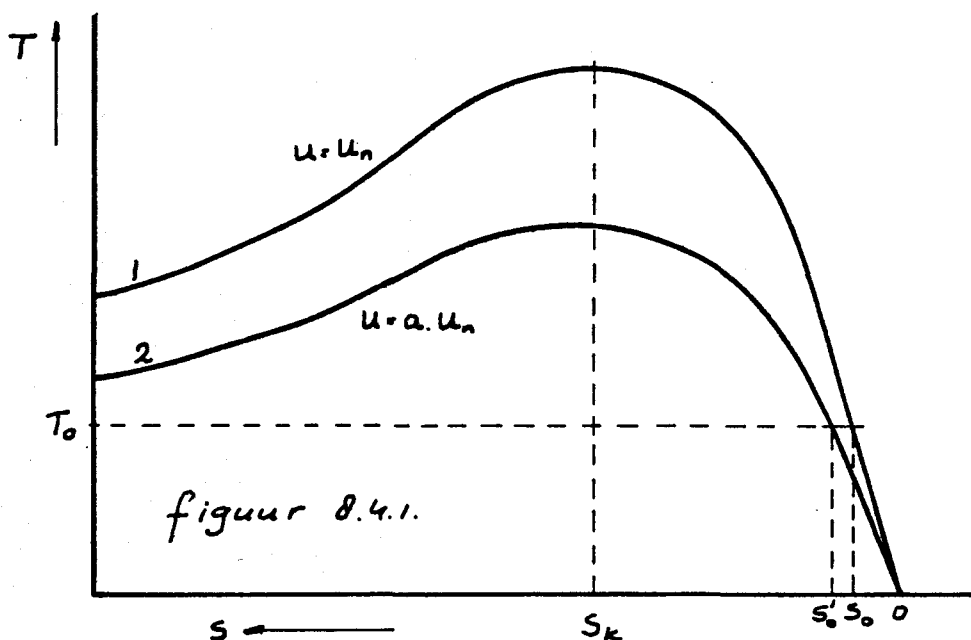
8.2.4. Lijst van gebruikte symbolen

<u>symbool</u>	<u>benaming</u>	<u>eenheid</u>
B	jaarlijkse besparingen	gld/jr
I	jaarlijkse investeringskosten	gld/jr
$n; n_{1,2,3}$	toerental	R.P.M.
n_{nom}	nominale waarde n	R.P.M.
P	vermogen	kW
$\Delta P; \Delta P_{1,2,3}$	drukverschil over de centrifugaalpomp	bar
$Q; Q_{1,2}$	volumestroom door de centrifugaalpomp	m^3/min

8.3. Spanningsregeling inductiemotoren

8.3.1. Inleiding

Vele publikaties zijn recentelijk verschenen over het onderwerp "Energiebesparing in inductiemotoren door spanningsverlaging". Dit naar aanleiding van een vorig jaar op de markt gekomen produkt onder de naam "Power Chopper", dat spanningsverlaging als resultaat en energiebesparing tot doel heeft.



Het principe is eenvoudig. Als een inductiemotor laag belast is, zal het potentieel te leveren koppel relatief groot zijn (kromme 1 in fig. 8.4.1.). Door de klemspanning aan de motor te verlagen ontstaat kromme 2, waarbij het belastingskoppel T_0 nog steeds geleverd kan worden. Het elektrisch vermogen, dat uit het net wordt opgenomen is echter afgenomen, wat later in deze paragraaf zal blijken. Besparingen zijn alleen mogelijk, als de inductiemotor niet vol belast is, omdat anders een spanningsverlaging niet is toegestaan.

De spanningsverlaging wordt gerealiseerd door fase-aansijding. Figuur 8.4.2.a toont het één-fase prinsipeschema; drie-fase-uitvoeringen werken op dezelfde wijze. De (vervormde) spannings- en stroomvormen volgen uit figuur 8.4.2.b.

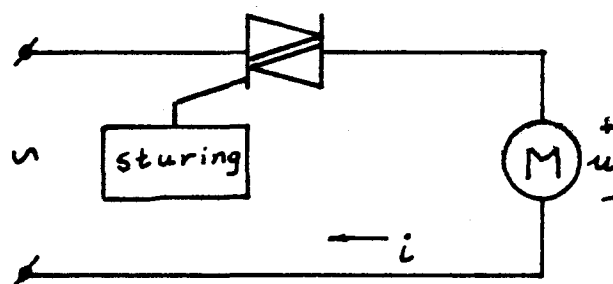


fig. 8.4.2.a.

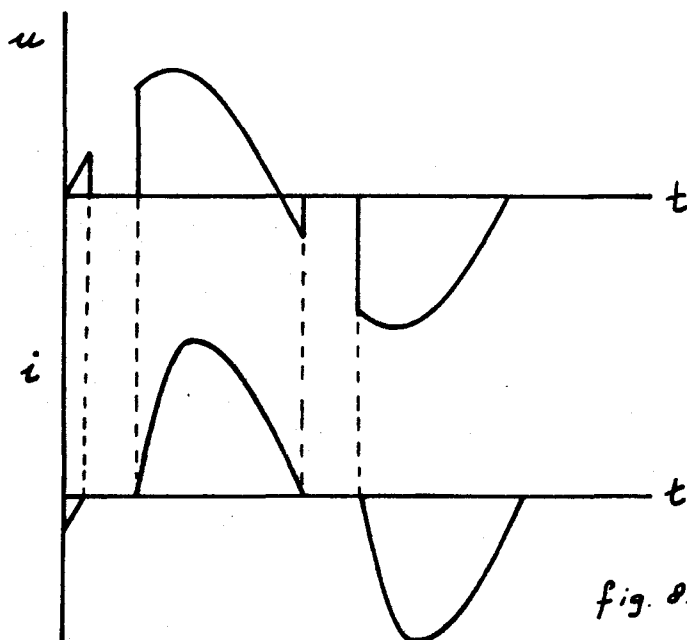


fig. 8.4.2.b.

8.3.2. Besparingen

De vermogensbalans van een inductiemotor kan globaal geschreven worden als:

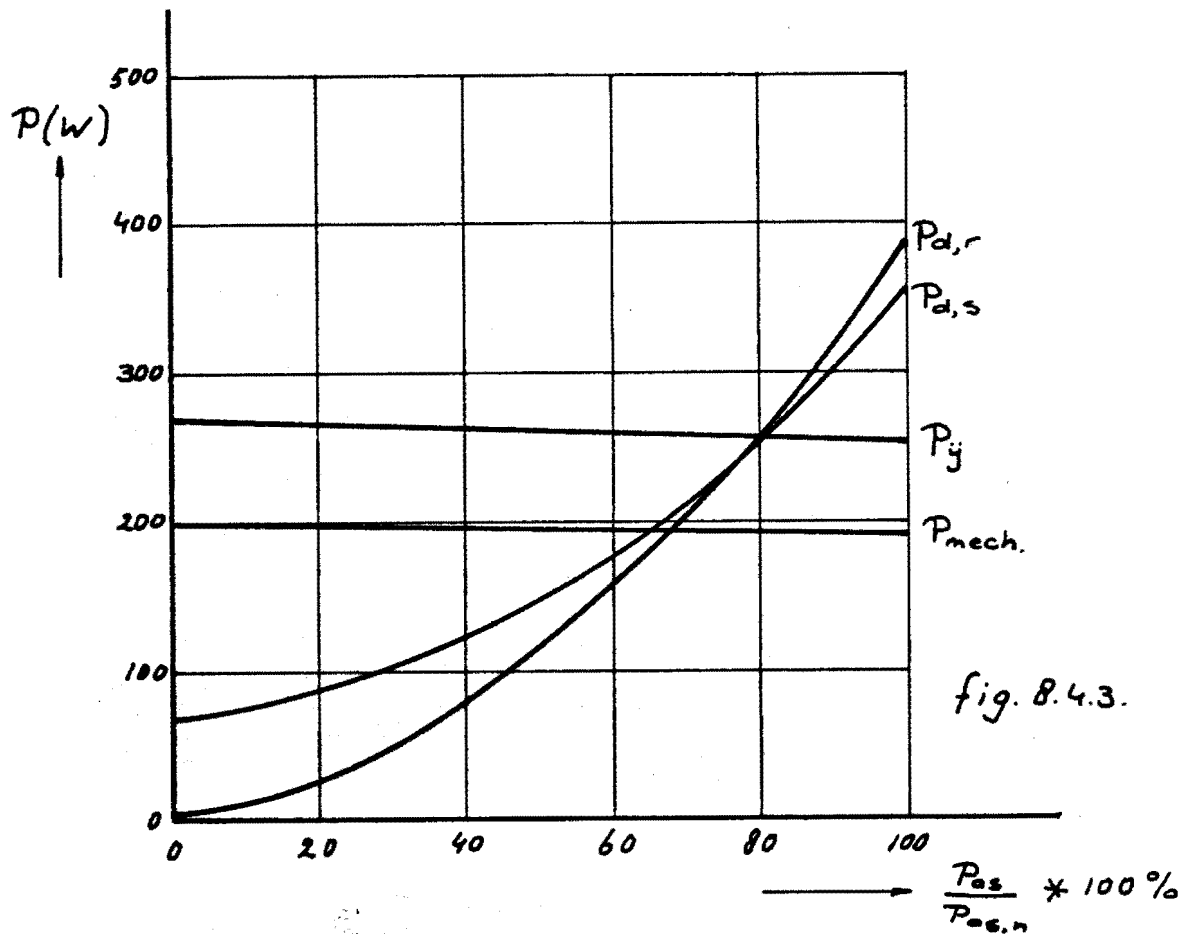
$$P_{\text{net}} = P_{\text{mech}} + P_{d,s} + P_{ij} + P_{d,r} + P_{as}$$

waarin: $P_{d,s}$ evenredig is met I_s^2

P_{ij} ongeveer evenredig is met U^2 (de ijzerverliezen treden voornamelijk op in de stator)

$P_{\text{mech}} + P_{d,r} + P_{as} = P_1$; het vermogen, dat de luchtspleet oversteekt.

In figuur 8.4.3. zijn de verschillende verliesposten in een 11 kW (4-polige) inductiemotor weergegeven als functie van de belastingsgraad.



Als bij lage belastingsgraad de spanning aan de motorklemmen verlaagd wordt van U tot aU ($0 < a < 1$, zie fig. 8.4.1.), dan zal dit vooral invloed hebben op $P_{d,s}$, P_{ij} , $P_{d,r}$ en P_{as} ; P_{mech} blijft nagenoeg konstant.

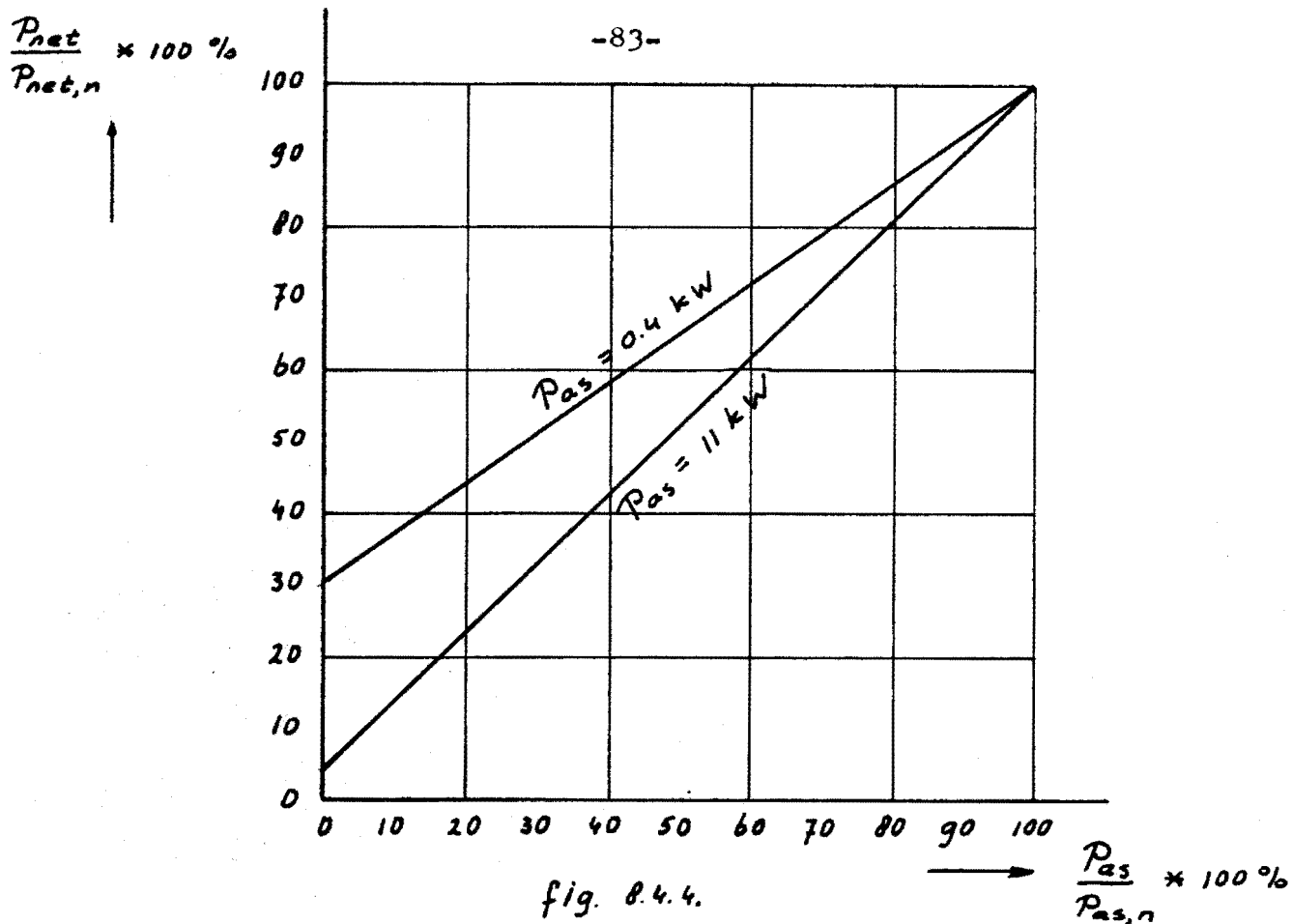
- P_1 zal gelijk blijven, omdat het synchrone toerental onveranderd blijft en omdat wordt aangenomen, dat het belastingskoppel toeren-onafhankelijk is. Het rotor-verlies-vermogen $P_{d,r}$ zal toenemen van $s_o P_1$ tot $s_o' P_1 \approx \frac{1}{a^2} s_o P_1$, als wordt uitgegaan van een gelinealiseerde koppel-slip-kromme bij kleine slip s (fig. 8.4.1). Het nuttige asvermogen P_{as} zal dus met een gelijk bedrag worden verminderd.
- P_{ij} en $P_{d,s}$ zullen beide afnemen als de spanning wordt ver-

laagd. De invloed van P_{ij} zal groter zijn dan die van $P_{d,s}$ (fig. 8.4.3.). P_{ij} zal afnemen tot ongeveer $a^2 \cdot P_{ij}$.

Bij spanningsverlaging treedt dus enerzijds een vermogenswinst op in P_{ij} en $P_{d,s}$ en anderzijds een vermogensverlies in P_{as} (ofwel in $P_{d,r}$). Aan de hand van de praktische gegevens van figuur 8.4.3. zal hierna een eventuele energiebesparing worden afgeschat.

De invloeden van P_{ij} en $P_{d,r}$ werken elkaar tegen. Bij spanningsverlaging wordt P_{ij} kleiner en $P_{d,r}$ groter, beide met dezelfde faktor a^2 . Uit de literatuurbronnen blijkt, dat de spanningsdaling niet groter dan 20 à 30% kan zijn (a niet kleiner dan 0.8 à 0.7). Wordt nu als voorbeeld uitgegaan van een gemiddelde belastingsgraad van 50%, dan blijkt na spanningsdaling de som van P_{ij} en $P_{d,r}$ nagenoeg niet te zijn veranderd. Uit deze gegevens kan bij benadering geconcludeerd worden, dat de vermogenswinst in P_{ij} wordt teniet gedaan door het extra vermogensverlies in $P_{d,r}$. Eventuele besparingen kunnen dan ook alleen verwacht worden in het stator-koperverlies $P_{d,s}$. De spanningsinvloed op $P_{d,s}$ is minder eenvoudig te beschrijven dan voor de overige verliesposten. Wel kan gezegd worden, dat juist bij deellast de invloed van $P_{d,s}$ relatief gering is (ongeveer 1% van $P_{as,n}$ in fig. 8.4.3). Van deze geringe verliespost is een gedeelte te besparen, zodat de totale besparing, gerelateerd aan $P_{as,n}$ belangrijk minder dan 1% zal zijn. De extra investering voor de fase-aansnijder ($\pm f2000,-$) zal dan ook niet worden terugverdiend bij de huidige prijzen van elektrische energie aan boord van schepen (17 à 22 ct/kWh).

Bovenstaande resultaten golden voor een 11 kW inductiemotor. Voor grotere motoren zullen de conclusies niet anders zijn. Voor zeer kleine motoren (Fractional Horse-power Motors) kan de (relatieve) energiebesparing wel aanzienlijk zijn (orde: 10%). Dit als gevolg van het feit, dat bij deze klasse van inductiemotoren de verschillende verliesposten relatief veel groter zijn. (zie figuur 8.4.4, waar het opgenomen elektrisch vermogen is uitgezet als functie van het asvermogen, voor de besproken 11kW-motor en voor een 0.4kW-motor).



De bijdrage van kleine inductiemotoren aan het totale energieverbruik aan boord van schepen is echter gering (zie figuur 10, appendix A1), waardoor ook hier geen energiebesparing van betekenis, laat staan kostenbesparing, is te verwachten.

8.3.3. Conclusies

- energiebesparing door spanningsverlaging kan alleen worden bereikt als de belastingsgraad van de inductiemotor kleiner is dan 100%.
- de energiebesparing zal zeer gering zijn (minder dan 1% bij een gemiddelde belastingsgraad van 50% bij een inductiemotor van 11 kW).
- de prijzen van additionele installaties zijn dusdanig hoog, dat een kostenbesparing niet kan worden bereikt.

8.3.4. Lijst van gebruikte symbolen

<u>symbool</u>	<u>benaming</u>	<u>eenheid</u>
a	faktor, die spanningsverlaging aangeeft $U = aU_n$	-
i	momentane statorstroom	A
I_s	effektieve statorstroom	A
P_{as}	nuttig asvermogen	kW
$P_{as,n}$	nominale waarde P_{as}	kW
$P_{d,r}$	rotor-koperverlies	kW
$P_{d,s}$	stator-koperverlies	kW
P_l	luchtspleetvermogen	kW
P_{mech}	mechanische verliezen	kW
$P_{mech,n}$	nominale waarde P_{mech}	kW
P_{net}	aan het net onttrokken elektrisch vermogen	kW
$P_{net,n}$	nominale waarde P_{net}	kW
P_{ij}	ijzerverliezen	kW
s	slip	-
s_o	slip bij $T = T_o$ en $U = U_n$	-
s'_o	slip bij $T = T_o$ en $U = aU_n$	-
s_k	kipslip	-
T	koppel	Nm
T_o	belastingskoppel	Nm
u	momentane spanning	V
U	effektieve spanning	V
U_n	nominale effektieve spanning	V

9. Algemene conclusies

Hoewel bij de verschillende hoofdstukken conclusies zijn opgenomen, zullen de belangrijkste hier worden samengevat.

1) Energetische analyse van het m.s. "Nedlloyd Bahrain"

- de belastingsgraad van dieselaggregaten is laag, waardoor het specifiek brandstof verbruik hoog is
- relatief grote verbruikersgebieden zijn het hotelbedrijf en de hoofdmotor

2) Gebruik afvalwarmte van de voortstuwingmotor

- hier zijn verreweg de grootste energiebesparingen mogelijk
- in de uitlaatgassen van de hoofdmotor is vaak voldoende energie aanwezig om in de totale elektriciteitsbehoefte tijdens zeebedrijf te kunnen voorzien
- voor de totale warmtebehoefte zijn andere warmtebronnen van de hoofdmotor ruimschoots toereikend

3) Asgeneratorsystemen

- moderne asgeneratorsystemen zijn duur, maar hiermee zijn grote besparingen mogelijk
- besparingen zijn geen energie-, maar kostenbesparingen en komen vrijwel uitsluitend voort uit het prijsverschil van zware- en dieselolie

4) Dieselaggregaten

- de prijs van elektrische energie, opgewekt m.b.v. een dieselaggregaat, bedraagt 17 à 22 ct/kWh (alleen brandstofkosten)

- het rendement van een dieselaggregaat blijkt sterk afhankelijk te zijn van de belastinggraad en (in mindere mate) van de $\cos\varphi$
- grote energiebesparingen zijn mogelijk indien de grootte van de dieselaggregaten kan worden aangepast aan het gevraagde elektrisch vermogen
- dit laatste kan o.a. gebeuren door het installeren van meerdere (eventueel verschillende) aggregaten
- het heeft weinig zin de belastingsgraden van de dieselaggregaten nauwkeurig gelijk te maken, indien de rendementskrommen niet nauwkeurig bekend zijn; mogelijke besparingen zullen overigens gering zijn.

5) $\cos\varphi$

- een hogere $\cos\varphi$ leidt tot minder energieverbruik en kan worden bereikt zonder extra investeringen
- de levering van blindvermogen m.b.v. condensatoren kan in sommige gevallen goedkoper zijn dan m.b.v. generatoren

6) Voorlichting / informatie

- het geven van voorlichting over energiebesparing wordt gewaardeerd, maar leidt niet tot daadwerkelijke besparingen
- een goede voorlichting in combinatie met informatie over het eigen energieverbruik brengt wel energiebesparing met zich mee

7) Toerenregeling centrifugaalpompen

- grote energiebesparingen zijn mogelijk door het regelen van de volumestroom d.m.v. toerenregeling i.p.v. smoring

10. Suggesties voor verder onderzoek

1. Nuttig gebruik van afvalwarmte van de voortstuwingsmotor

Hierdoor zijn verreweg de grootste besparingen mogelijk. Grote hoeveelheden afvalwarmte (van verschillende temperatuurnivo's) zijn aanwezig, maar worden slechts in geringe mate nuttig gebruikt. Een uitgebreid onderzoek is noodzakelijk naar de mogelijkheden van afvalwarmtegebruik. Speciaal moet worden onderzocht hoe de exergetische waarde van afvalwarmte kan worden verhoogd (bijvoorbeeld opvoering van de koelwatertemperatuur) en hoe op een meer efficiënte manier mechanische (elektrische) energie kan worden gewonnen uit de afvalwarmtebronnen (bijvoorbeeld verbetering van het ketelrendement door toepassing van andere stoffen dan stoom).

2. Asgeneratorsystemen

In dit verslag is een beperkt aantal asgeneratorsystemen besproken voor een bepaald voortstuwingsstelsel. Andere asgeneratorsystemen moeten worden onderzocht om een compleet beeld te krijgen. Speciaal economische aspecten moeten een belangrijke rol spelen, waarbij samenwerking met de asgenerator-industrie onontkoombaar is. Door onafhankelijke onderzoekers wordt hier nog bijzonder weinig aandacht aan besteed.

De mogelijk- en moeilijkheden van een asgeneratorsysteem met variabele frequentie dienen nader te worden onderzocht. Speciaal welk deel van de elektrische zeebelasting kan worden aangesloten en een technisch/economische analyse.

3. Verhoging van de belastingsgraad van dieselaggregaten

In dit verslag werd aangetoond, hoe uitermate belangrijk

een hoge belastingsgraad is voor een goede energiehuishouding. Een aantal middelen staan ter beschikking om dit laatste te bereiken. Het zal in ieder geval noodzakelijk zijn de strakke scheiding van opwekking en verbruik van elektrische energie te verlaten. Omdat een zeeschip een autonoom bedrijf is, zijn er mogelijkheden de opwekking aan te passen aan het verbruik en omgekeerd (een voorbeeld hiervan werd al genoemd: het asgeneratorsysteem van variabele frequentie).

Een aanpassing van het verbruik aan de opwekking kan worden verkregen d.m.v. "load-shedding"; het zodanig beïnvloeden van de totale elektrische belasting door schakelen van individuele verbruikers, dat piekbelastingen worden vermeden. Hierdoor kunnen opwekkers kleiner worden gekozen, waardoor de belastingsgraad (en dus het rendement) stijgt. Dit schakelen van belastingen moet worden geautomatiseerd; door sturing m.b.v. een (kleine) computer kan een gewenst schakelpatroon worden gerealiseerd. Een bijkomend voordeel is, dat een betere bewaking van het hulpvermogen wordt verkregen; het onnodig "aan" staan van individuele verbruikers kan worden vermeden. Een eventueel onderzoek kan het beste i.s.m. de Technische Hogeschool te Delft plaatsvinden, omdat daar de nodige simulatietechnieken en apparatuur aanwezig zijn, die voor dit onderzoek noodzakelijk zijn. Kontakten hiervoor zijn reeds gelegd.

Verder is het voor een hoge belastingsgraad van de opwekker noodzakelijk om reeds in de ontwerpfase van het schip een goede voorspelling te kunnen doen t.a.v. de werkelijk optredende elektrische belasting. Dit blijkt tot op heden niet mogelijk te zijn. Gedacht kan worden aan de ontwikkeling van een computerprogramma, waarmee de verschillende processen a/b van een schip reeds in de ontwerpfase gesimuleerd kunnen worden voor verschillende randvoorwaarden. In Noorwegen wordt al geëxperimenteerd met dit soort technieken; resultaten zijn onbekend.

4. Opwekking in het algemeen

Voor een energiezuinige opwekking van zowel het hulp- als het hoofdvermogen kunnen deze beide niet los van elkaar be- zien worden. Zeker voor schepen met een hoog elektrisch verbruik kan de keuze van opwekking van het hoofdvermogen worden beïnvloed door de wijze van elektriciteitsopwekking en omgekeerd. Er bestaat behoefte aan een integrale aanpak van alle opwekkers a/b van zeeschepen, waarin o.a. opge- nomen: het voortstuwingsstelsel, de opwekking van elektri- citeit uit de afvalwarmte van de voortstuwingsmotor en het nuttig gebruik van overige warmte, de opwekking van elek- triciteit d.m.v. asgeneratorsystemen en dieselaggregaten. Als functie van enige belangrijke variabelen zoals: vereist voortstuwingsvermogen, elektrisch vermogen in de haven en op zee, het soort schip en de zeefactor kan een optimaal opwekkingssysteem worden gevonden.

5. Metingen

Aan monitoring van het elektrisch systeem wordt a/b van zeeschepen in het algemeen bijzonder weinig aandacht ge- schonken. Meestal wordt alleen een globale indicatie gege- ven omtrent het totaal geproduceerd elektrisch vermogen. Om verschillende redenen is het noodzakelijk de metingen uit te breiden:

- om de bemanning te motiveren actief mee te werken aan energiebesparing, zal zij uitgebreide informatie moeten krijgen over haar eigen energieverbruik. In hoofdstuk 8 werd hierop al gewezen. Onderzocht moet worden welke me- tingen nodig zijn en op welke manier zij moeten worden gevisualiseerd. Samenwerking met andere disciplines zo- als de sociale psychologie kan hierbij van groot nut zijn.

- In dit verslag moest een schatting worden gemaakt van bepaalde grootheden, omdat metingen niet beschikbaar waren. Als voorbeeld wordt genoemd de gemiddeld benodigde hoeveelheid koelwater (8.2.). Om een definitieve uitspraak te kunnen doen over het al of niet rendabel zijn van additionele toerenregelaars zullen metingen noodzakelijk zijn.

- Zouden uitgebreide metingen a/b van bestaande schepen beschikbaar zijn, dan kon hiervan zodanig gebruik worden gemaakt bij het ontwerp van nieuwe schepen, dat de elektrische belasting beter voorspeld zou kunnen worden. Het belang hiervan werd reeds onderstreept.

Literatuurlijst

Algemeen

1. D.S.S. Rotterdam
Speciale uitgave t.g.v. de tewaterlating van het D.S.S.
Rotterdam (1959)
2. Electric power in ships
Marine Engineering / Log, april 1979
3. Generating and distribution of electricity in ships
K.W. Downham
Marine electronics, 1976
4. Elektrische installaties aan boord van moderne koopvaardij-
schepen
C. Müller
pt-e 32 (1977) 6
5. Aircraft carrier electrical power system design practices
V.B. Smith
Naval Engineers Journal, August 1977
6. Energiegebruik aan boord van schepen
A.W.M. Meyers
Marineblad 1979 n. 4
7. Rationeel energie gebruik in de scheepvaart
NMI-rapport n. SRC 275, 1979
8. Is 660 V a suitable voltage for ships?
W. de Jong
S. en W. 44ste jaargang n.11, 1977

Speciaal bij de hoofdstukken

Hoofdstuk 2

1. Hull forms and propulsion plants in the 1980's
Svern Milch
S. en W. 47ste jaargang n.26, 1980
2. Economics of tomorrow's sea transport
Kristen Knudsen
S. en W. 47ste jaargang n.1, 1980

Hoofdstuk 3

1. Schiffselektrotechnik 1978
A. Wangerin
Hansa 116. n.2, 1979
2. Elektrotechnische Problemen auf Schiffe und im Hafen
A. Wangerin
ETZ-A Bd.87 H.24, 1966
3. Marine electrical installations
D. Gray
Proc. IEE, Vol.125 n.11R, Nov. 1978
4. Review of marine a.c. installations
D. Gray
Proc. IEE, Vol 111 n.2, Febr. 1964
5. Vergelijkende studie betreffende hydraulische en elektrische aandrijvingen gericht op dekwerktuigen aan boord van zeegaande schepen
W.v.Laar
afstudeerverslag THD (E), 1978

Hoofdstuk 5

1. Application guidelines for Energy efficient motors

H. Cowern

IEEE IAS, 1979

2. Was bringt uns die Verbesserung des Wirkungsgrades von elektrischen Maschinen?

G. Fritzsche

Maschinenbautechnik 29/8, 1980

Hoofdstuk 6.1.: zie appendix A2

Hoofdstuk 6.2.

1. Shaft generator systems and electrical energy on board; aspects on methods and economy
E. Gott
ASEA-publicatie, januari 1980
2. Gebrauchswertstufen der Energieumwandlung auf Motorschiffen
G. Breunig
Seewirtschaft 10/3, 1978
3. Bordenergie von der Schiffswelle
Schiff und Hafen, Heft 3, Jahrgang 30, 1978
4. Auxiliary power from diesel main machinery and independently driven generators
A. Norris
Shipb. and Mar. Eng. Int., March 1980
5. Stern gear arrangement and electric power generation in ships propelled by controllable pitch propellers
C. Kapsenberg
TNO-rapport, 1968
6. New economical type electric power generating system developed by MHI
Zosen 22, März 1978

7. Fortschritte und Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der Silizium-Leistungshalbleiter
K.H. Ginsbach, D. Silben
E und M Jahrgang 95, Heft 5, 1977

Hoofdstuk 6.3.

1. The diesel engine to drive a ship
J.R. Woodward
University of Michigan USA, 1971
2. Advanced engineering mathematics
C. Ray Wylie
Mc Graw Hill, 1975
3. Optimal power flows
J. Carpentier
Business Press, Vol.1, n.1, April 1979
4. The application of the medium speed diesel engine for generation of electrical power
Presented at the General Meeting held at the Institute of Marine Engineers, January 1976
5. Proper parallel operation is essential for effective engine/generator performance
W.M. Kauffmann
Power, May 1980
6. Control, Supervision and Data Processing in Diesel Power Stations
A. Weber
Siemens Review XLV, n.4, 1978
7. Electrical Machines
M. Kostenko, L. Piotrovsky
vol.2 Third Edition, 1974

Hoofdstuk 7.

1. Optimal rating of an induction motor for a given load diagram

E. Ben-Dov, R.G. Harley

IEEE, Vol. PAS 99, n.6, Nov/Dec 1980

Hoofdstuk 8.1.

1. Energiebesparing, hoe is het mogelijk?

Vakgroep sociale en organisatiepsychologie R.U.-Leiden
maart 1981

2. New tools for changing behavior

A.N. Deibert, A.J. Harmon

Van Loghum Slaterus Deventer, 1975

Hoofdstuk 8.2.

1. Roterende stromingsmachines

H. Laméris

Dictaat Technische Hogeschool Eindhoven

2. Toerental - regeling en energiebesparing

Aandrijftechniek, april 1980

3. Energieeinsparung durch Drehzahl veränderbare elektrische Antriebe

Elektrotechnische Zeitschrift, Heft 5, 1980

4. Die Pumpen, Arbeitsweise- Berechnung- Konstruktion

H. Schulz

Springer-Verlag, 1959

Hoofdstuk 8.3.

1. Improvement in energy efficiency of induction motors by means of voltage control

N. Mohan

IEEE, Vol. PAS-99. n.4, July / Aug 1980

2. Energy saving devices for a.c. motors
R. Merritt
Instruments and Control Systems, March 1980
3. Power Factor Controller
Electical Energy Management, Oct. 1979
4. Power factor control cuts motor energy use
R.C. Fox
Electrical Systems, March 1980
5. Electrical Machines
M. Kostenko, L. Piotrovsky
vol.2 Third Edition, 1974

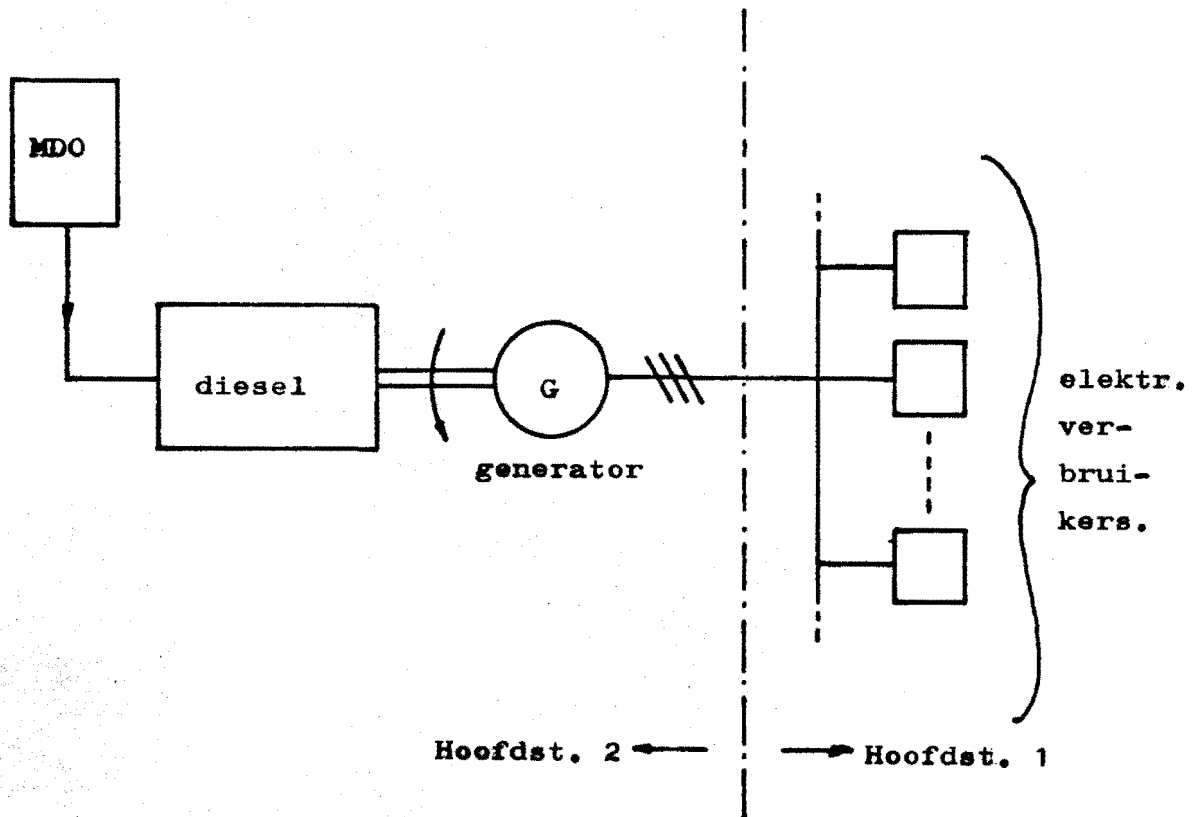
Appendix A1

Energetische analyse van het hulpvermogen aan boord van het m.s.
"Nedlloyd Bahrain"

Inleiding

De analyse is globaal in twee delen gesplitst (zie fig. 1):

- hoofdstuk 1: Het gedeelte na de generator.
("Waar blijft het opgewekte elektrische vermogen?")
- hoofdstuk 2: Het diesel/generator - gedeelte.
("Wat gebeurt er met de energie in de toegevoerde brandstof?")



Figuur 1

Hoofdstuk 1

De figuren 2a en 2b tonen belastingscurven van opgenomen vermogens uit de generatoren. De gegevens van figuur 2a zijn overgenomen uit het machine-journaal. Men mag hieruit niet te veel conclusies trekken, omdat het journaal op dit punt niet altijd nauwkeurig wordt bijgehouden. Toch kan een redelijk inzicht worden verkregen in de sterk wisselende belasting al naar gelang de plaats waar het schip zich bevindt of de functie die het verricht (varen, stilliggen, laden/lossen).

Tijdens los- en laadperioden is de belasting zeer sterk wisselend. Tijdens zeebedrijf fluktueert de elektrische belasting binnen de getoonde grenzen veel minder.

Een nauwkeuriger (maar beperkter) belastingscurve wordt getoond in figuur 2b. Het elektrisch vermogen is hier ieder uur nauwkeurig opgenomen. De tijdschaal van figuur 2b betreft het traject:

27 oktober 1980:	London haven
28 oktober 1980: 0 - 1 uur	voorbereidingen voor vertrek
1 uur	vertrek
1 -18 uur	London-Rotterdam
18 uur	aankomst R'dam haven

Er zijn twee duidelijk onderscheidbare belastingssituaties aan te wijzen:

- zeebedrijf
- havenbedrijf

Deze beide situaties zijn gekozen voor een nadere uitsplitsing van de elektrische energiestromen. De resultaten zijn te vinden in de figuren 3 en 4.

Er is een onderverdeling gemaakt naar de volgende verbruikersgebieden:

- ME : hoofdmotor (pompen, ventilatoren)
- AE : hulpmotoren (pompen, ventilatoren)
- M : machinekamer (ventilatoren, werkplaatsapp. enz.)
- H : hotelbedrijf (aircond., kombuis, ventilatoren, enz.)
- C : ladingbehandeling (ventilatoren, koelcontainers, kranen)
- G : algemeen (navigatieapp., stuurinrichting, enz.)

Het betreft hier steeds gemiddelde waarden. Voor iedere verbruiker (motoren, lampen, verwarmingselementen, enz.) is

$$\bar{P} = \frac{1}{T_c} \int_{T_c} P(t) dt \quad \text{bepaald.}$$

waarin:

\bar{P} = gemiddeld opgenomen vermogen door de verbruiker.

T_c = cyclustijd van de rondreis

$P(t)$ = vermogen van de verbruiker als functie van de tijd

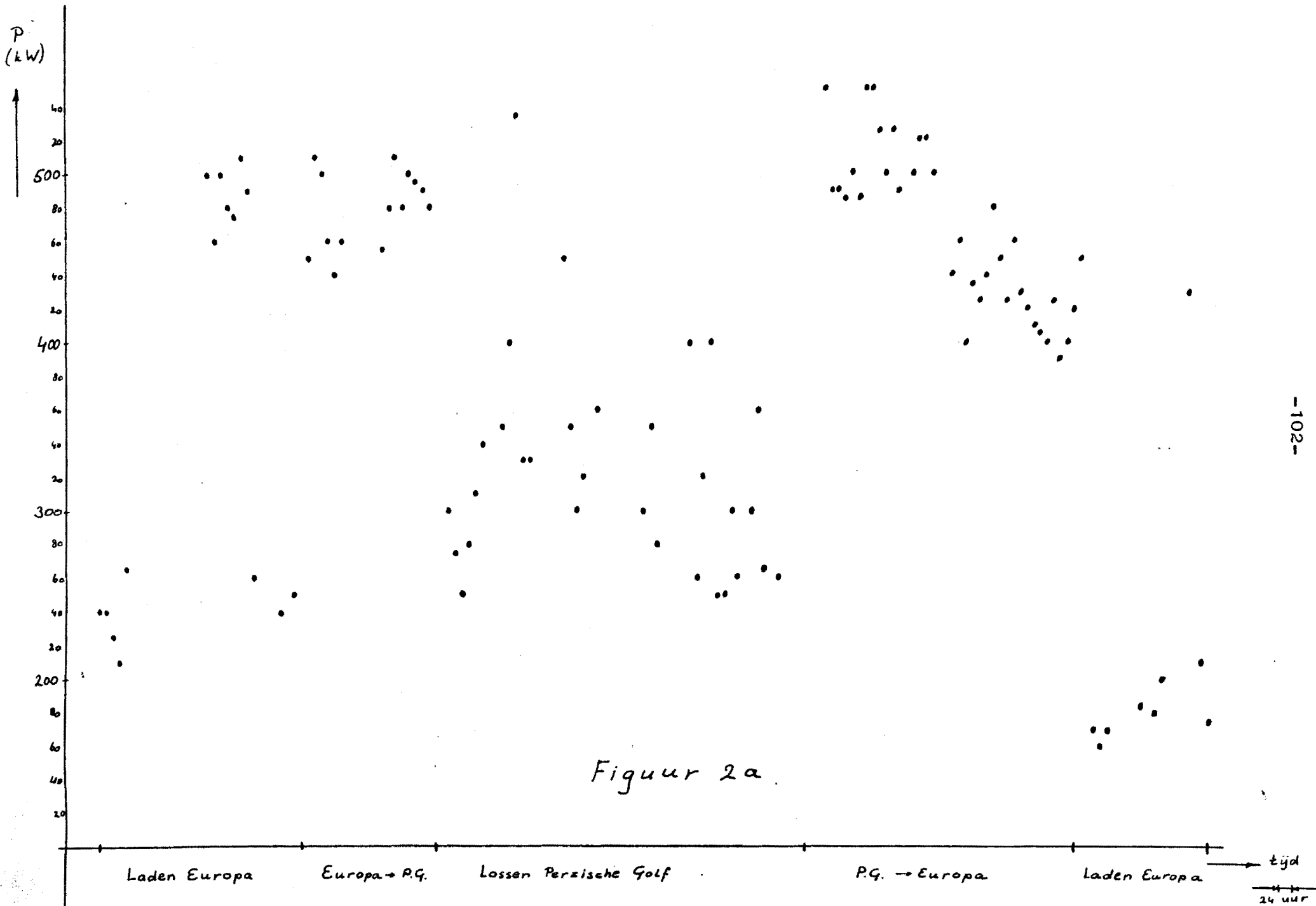
Hoewel voor bovenstaande integraal vaak een schatting moet worden gemaakt, blijkt de totale belasting van alle verbruikers samen toch redelijk overeen te komen met de werkelijk optredende belasting.

Bespreking Sankey-diagrammen

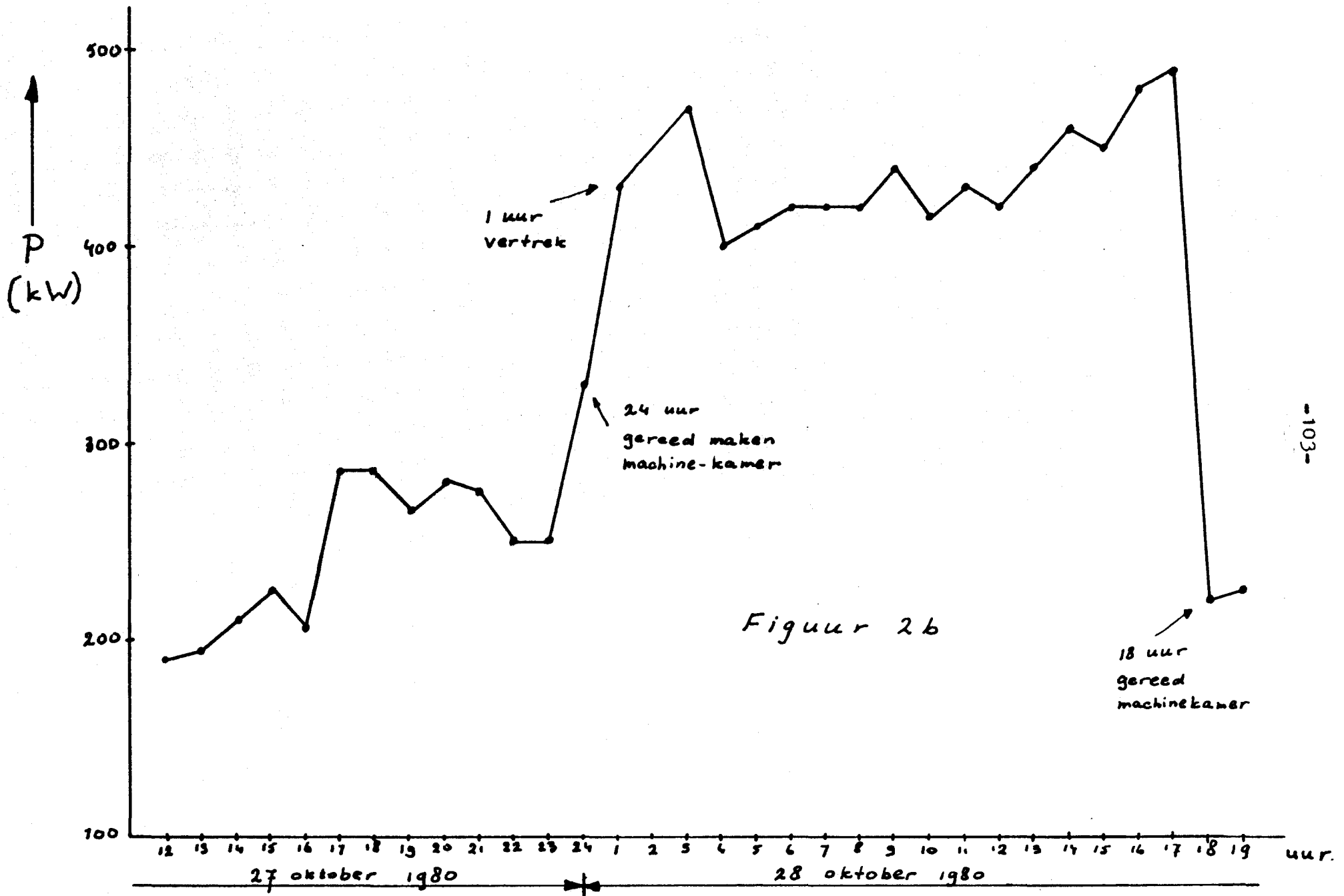
- Duidelijk zijn in figuur 3 (zeebedrijf) de beide grootste verbruikersgebieden te onderscheiden. De elektrische energie voor de hoofdmotor is bestemd voor motoren van koelwater-, brandstof-, smeeroliepompen, ventilatoren, brandstofcentrifuges en luchtcompressoren.
- Tijdens havenbedrijf is niet alleen de belasting veel lager, ook de verdeling is anders geworden (figuur 4).
- Rekening houdend met 47% haven- en 53% zeebedrijf kunnen de resultaten van figuur 3 en 4 gemiddeld worden tot fi-

guur 5 (gemiddeld haven/zee). Uit deze figuur blijkt, dat van de totaal geproduceerde elektrische energie het grootste gedeelte bestemd is voor het hotelbedrijf en de hoofdmotor.

- Een verdere uitsplitsing van het hotelvermogen vindt in figuur 6 plaats. Opvallend is de grote invloed van de airconditioning, welke bestaat uit compressoren, ventilatoren en koelwater-pompen.
- In figuur 7 is een onderverdeling gemaakt naar soorten verbruikers. De grote invloed van inductiemotoren (vooral voor pompen en ventilatoren) valt onmiddellijk op. In de figuren 9 en 10 is nog een analyse gemaakt van het opgestelde inductiemotorenpark. De hystogrammen spreken voor zich. In figuur 10.c. is af te lezen, dat inductiemotoren in het vermogensgebied van 10 tot 40kW het grootste gedeelte verbruiken van de energie die alle inductiemotoren samen opnemen. (De "uitschieter van 50-60 kW is afkomstig van twee verbruikers: de airconditioning-compressor en de zee-koelwaterpomp)
- Tijdens energiebesparings-discussies wordt vaak de nadruk gelegd op "verlichting". In dit geval is dit zeker niet gerechtvaardigd. Slechts 3% van het totale vermogen wordt voor verlichting gebruikt (zie figuur 7). Bovendien is de grootste verbruiker op verlichtingsgebied de machinekamer, waar met het oog op veiligheid steeds een goede verlichting noodzakelijk is (zie figuur 8). Uit deze laatste figuur blijkt ook, dat besparing op verlichting in het hotelbedrijf weinig effect heeft.

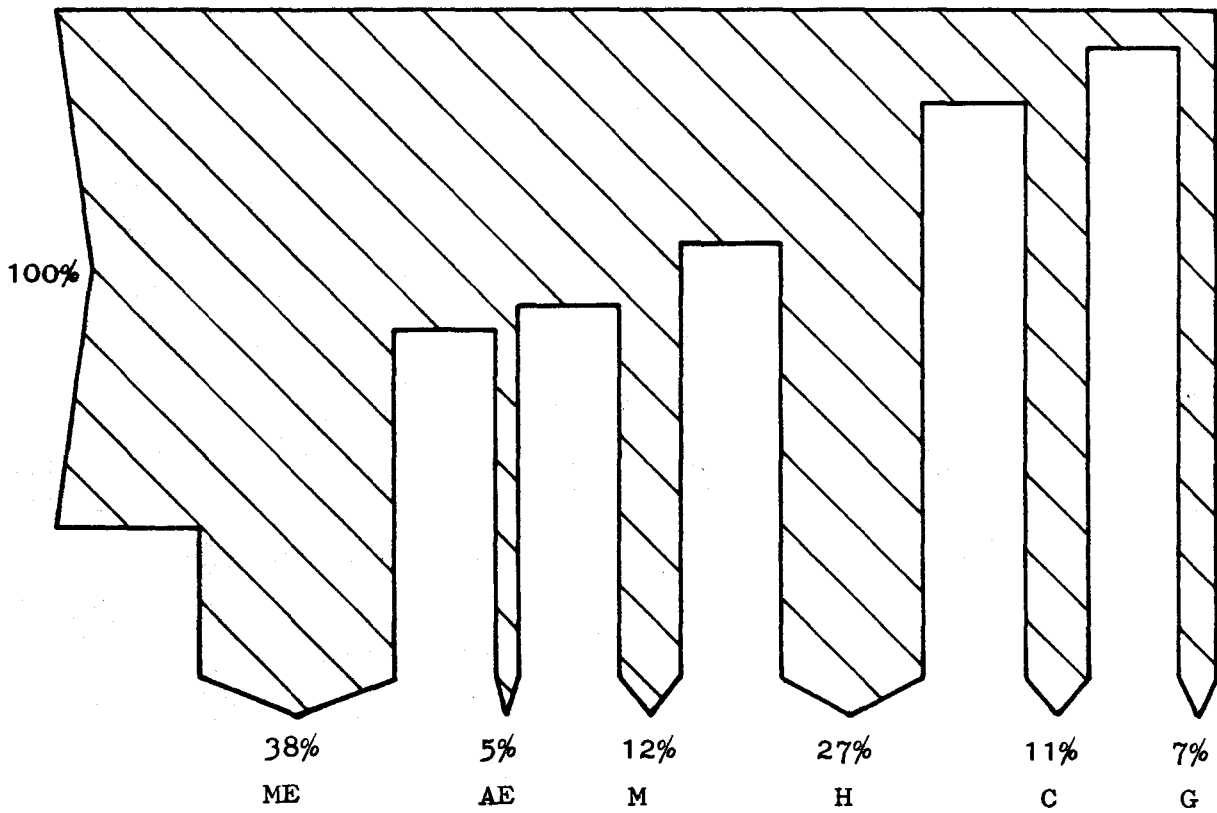


Figuur 2a



Figuur 2b

ZEEBEDRIJF

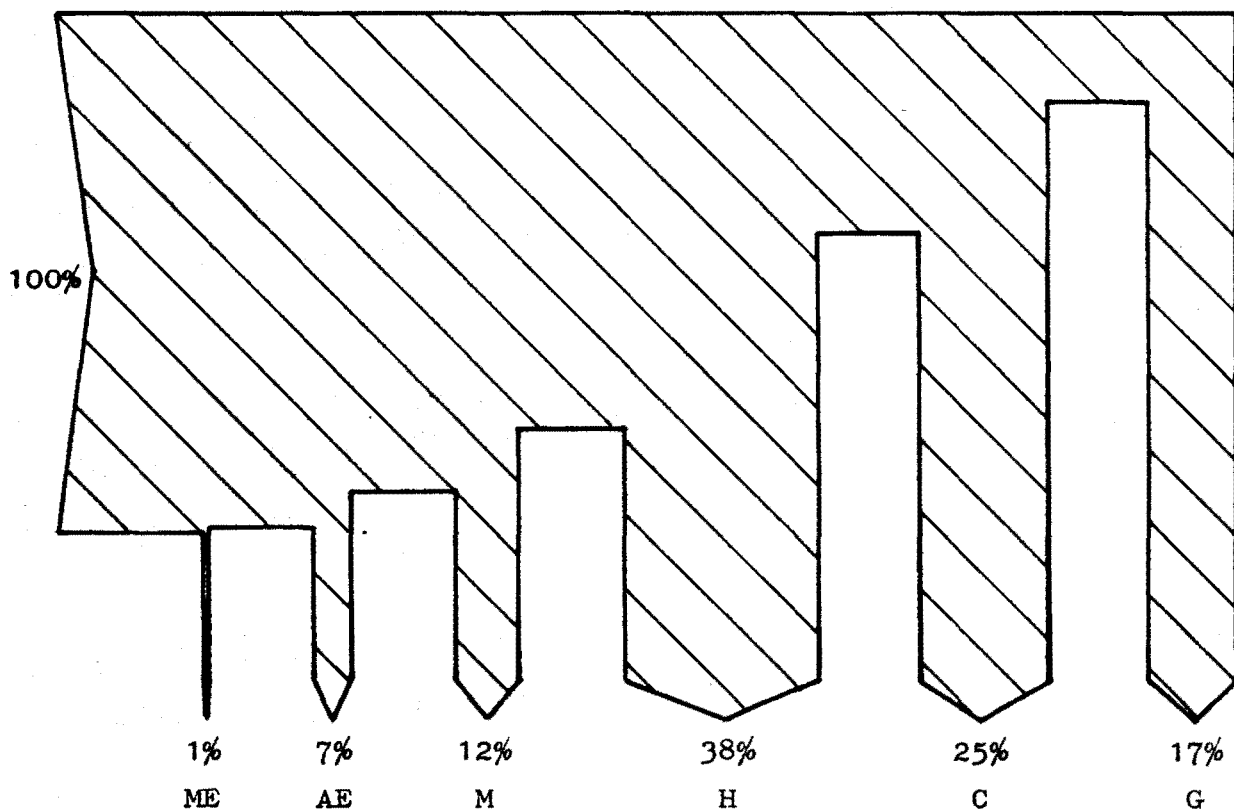


Gemiddelde belasting: 437kW (100%)

- ME=hoofdmotor: 167kW (38%)
- AE=hulpmotoren: 20kW (5%)
- M =machinekamer: 52kW (12%)
- H =hotelbedrijf: 119kW (27%)
- C =ladingbehandeling: 48kW (11%)
- G =overige: 31kW (7%)

Figuur 3

HAVENBEDRIJF

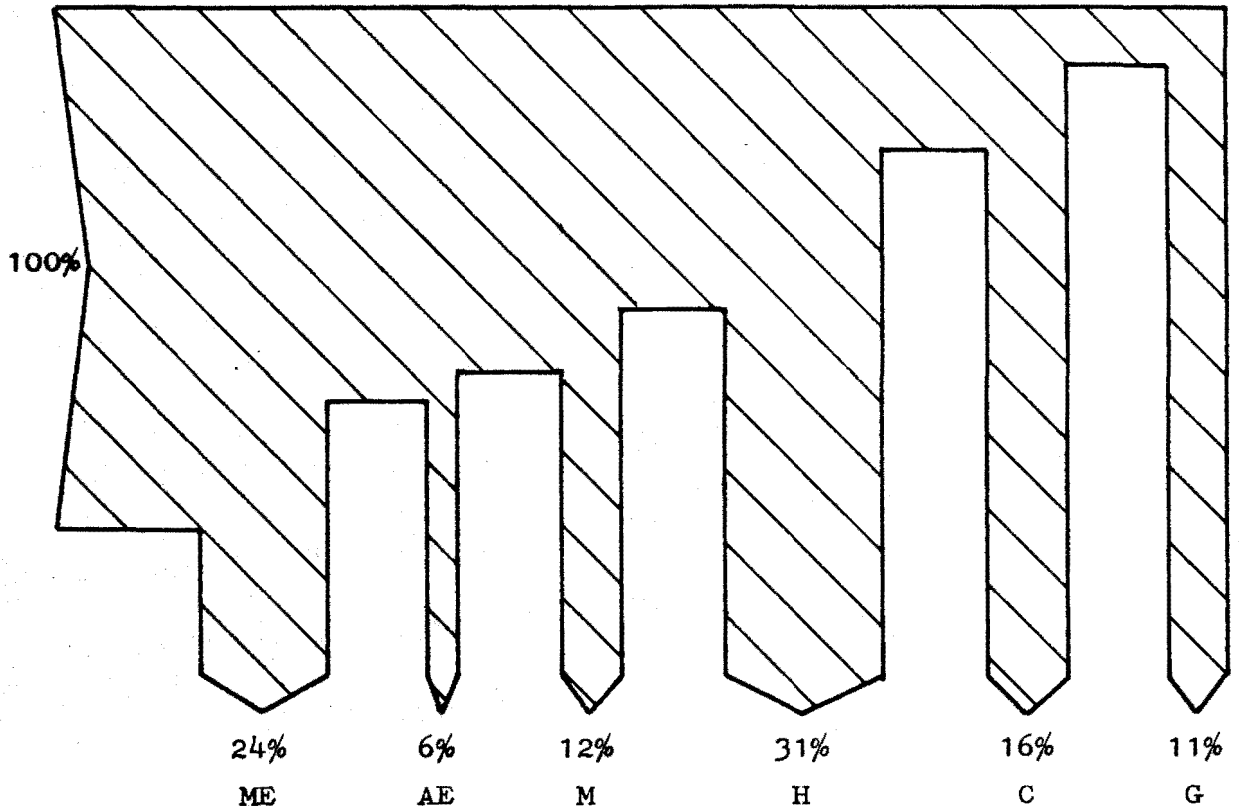


Gemiddelde belasting: 296kW (100%)

ME=hoofdmotor:	3kW (1%)
AE=hulpmotoren:	20kW (7%)
M =machinekamer:	37kW (12%)
H =hotelbedrijf:	112kW (38%)
C =ladingbehandeling:	73kW (25%)
G =overige:	51kW (17%)

Figuur 4

GEMIDDELD HAVEN/ZEE

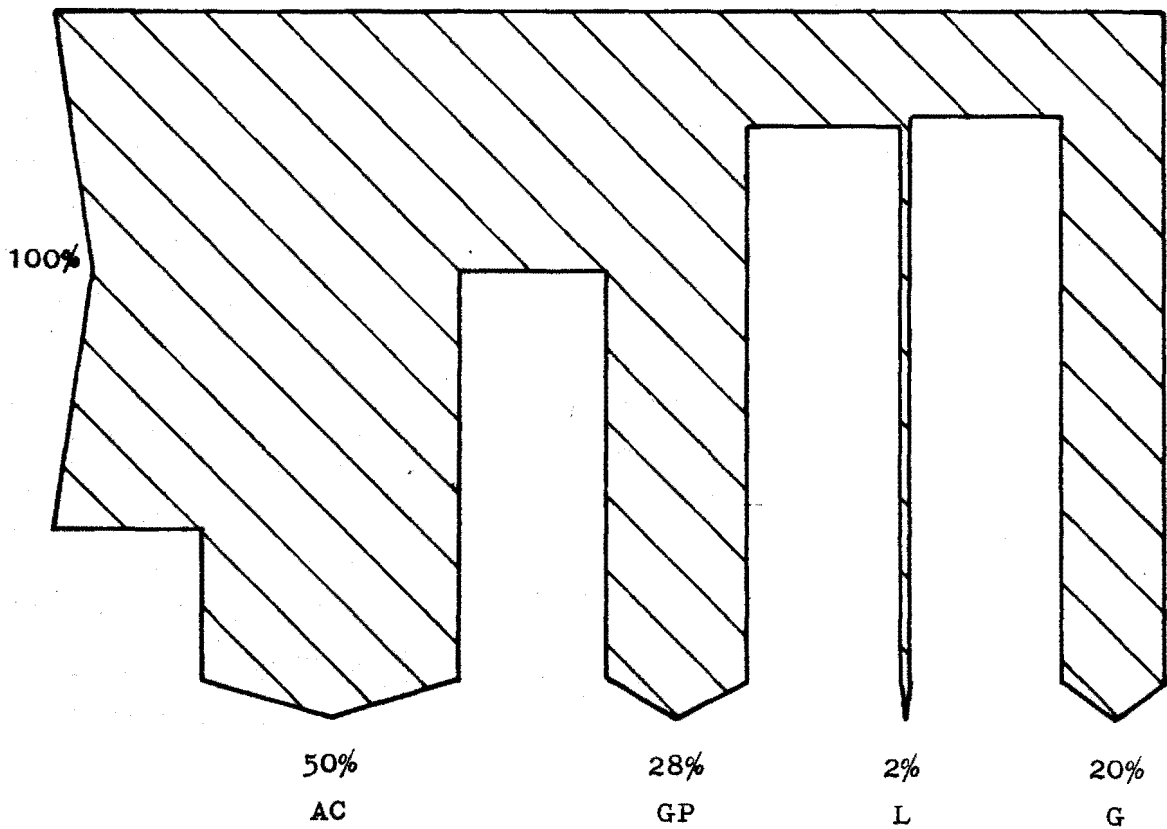


Gemiddelde belasting: 371kW (100%)

ME=hoofdmotor:	90kW (24%)
AE=hulpmotor:	20kW (6%)
M =machinekamer:	45kW (12%)
H =hotelbedrijf:	116kW (31%)
C =ladingbehandeling:	60kW (16%)
G =overige:	40kW (11%)

Figuur 5

HOTELBEDRIJF



Gemiddelde belasting: 116kW (100%)

AC=airconditioning: 58kW (50%)

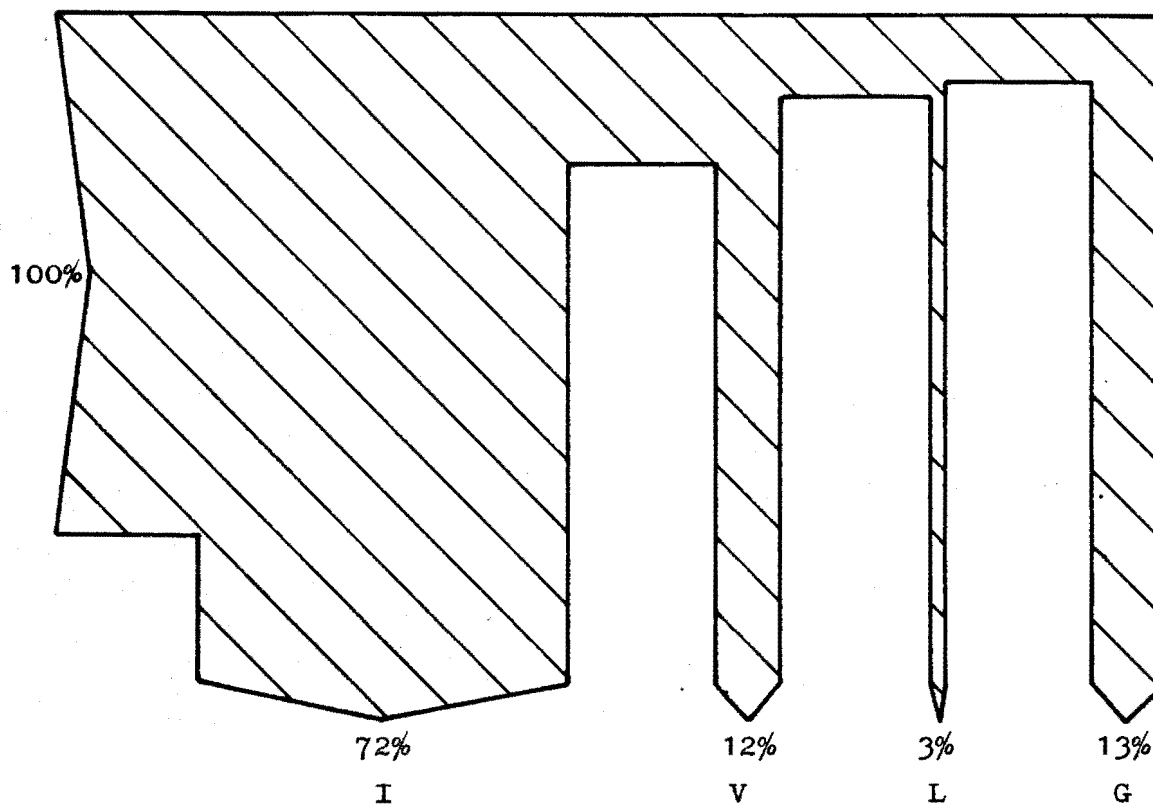
GP=kombuis: 33kW (28%)

L =verlichting: 2kW (2%)

G =overige: 23kW (20%)

Figuur 6

SOORTEN VERBRUIKERS



Gemiddelde belasting: 371kW (100%)

I=induktie motoren: 267kW (72%)

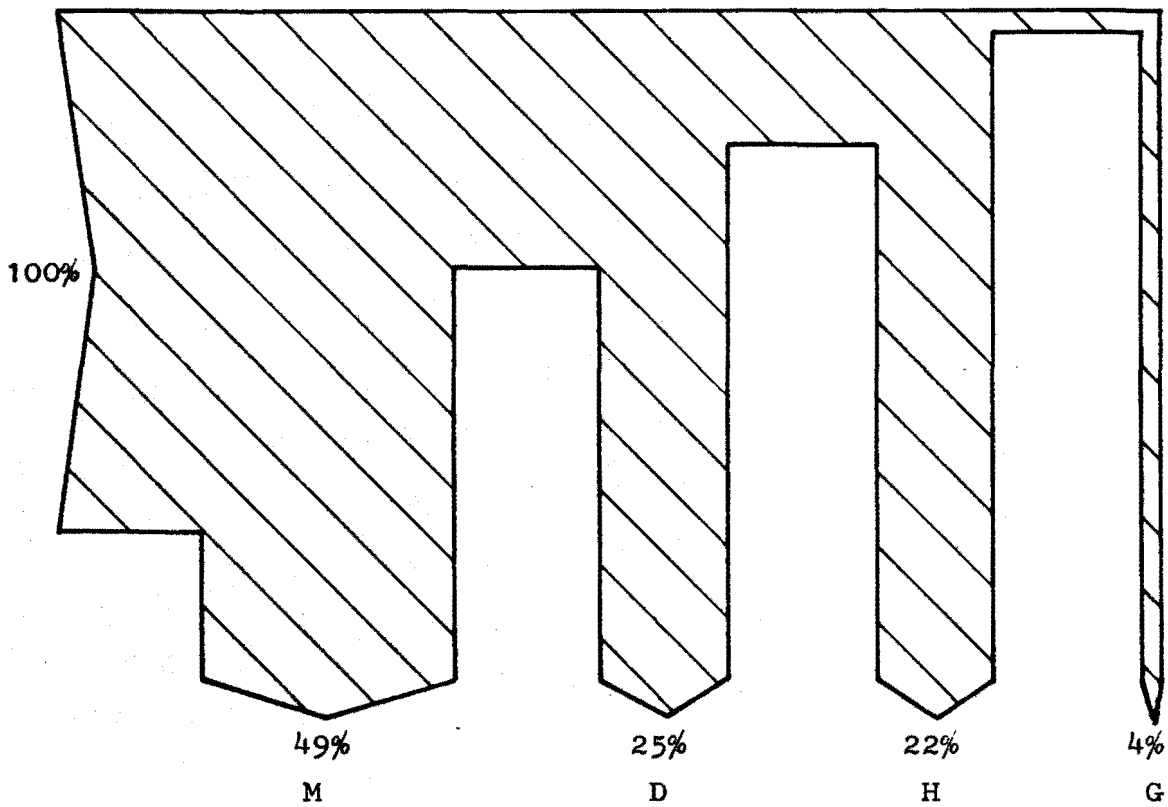
V=verwarming: 44kW (12%)

L=verlichting: 13kW (3%)

G=overige: 47kW (13%)

Figuur 7

VERLICHTING



Gemiddelde belasting: 13kW (100%)

M=machinekamer: 6.4kW (49%)

D=dekverlichting: 3.2kW (25%)

H=hotelbedrijf: 2.9kW (22%)

G=overige: 0.5kW (4%)

Figuur 8

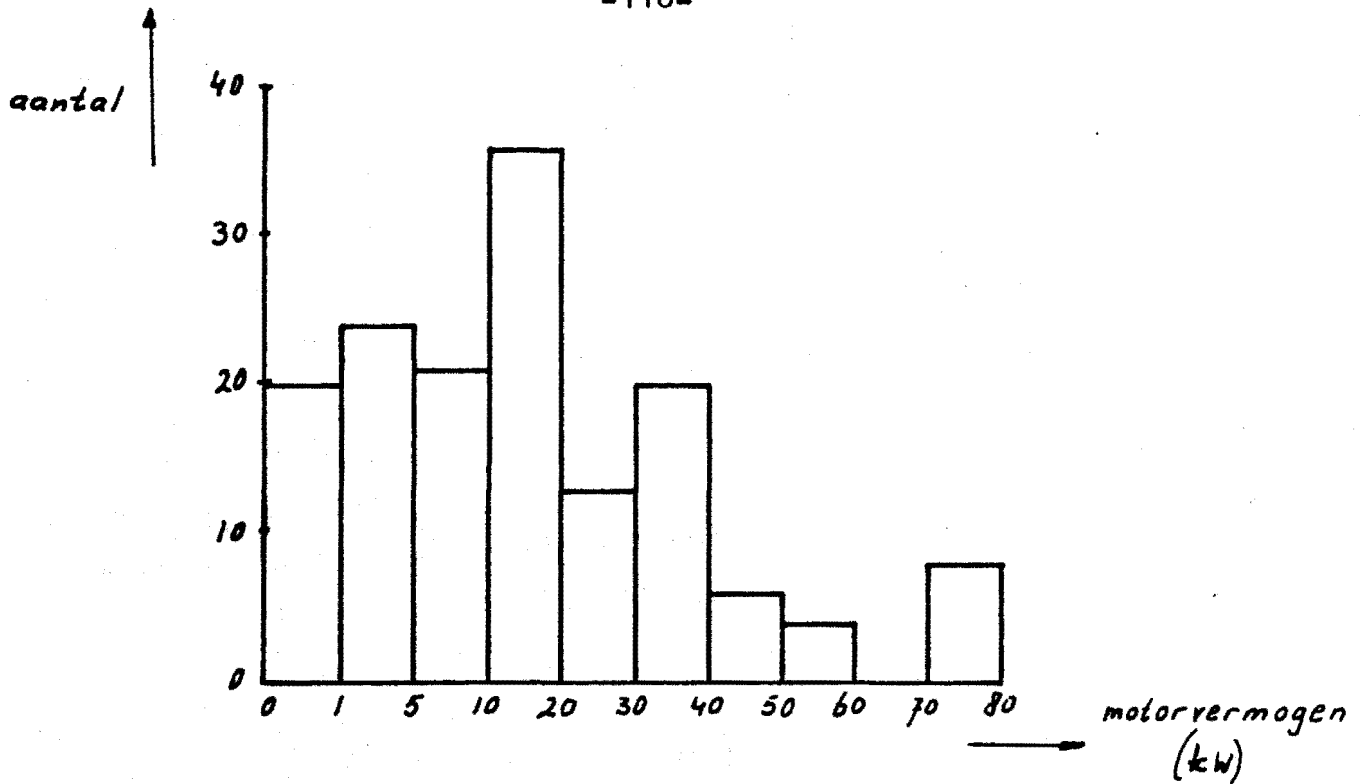


fig. ga. aantal opgestelde inductiemotoren als functie van hun grootte

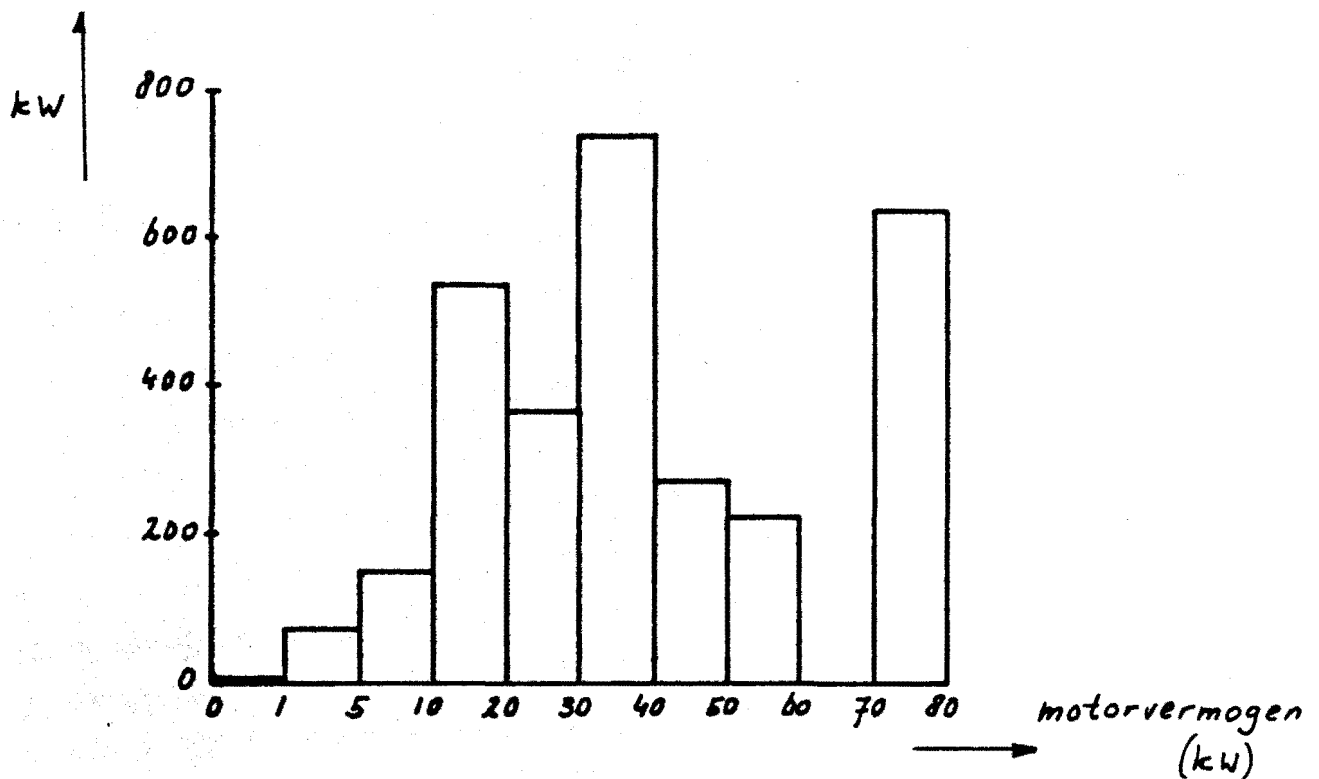
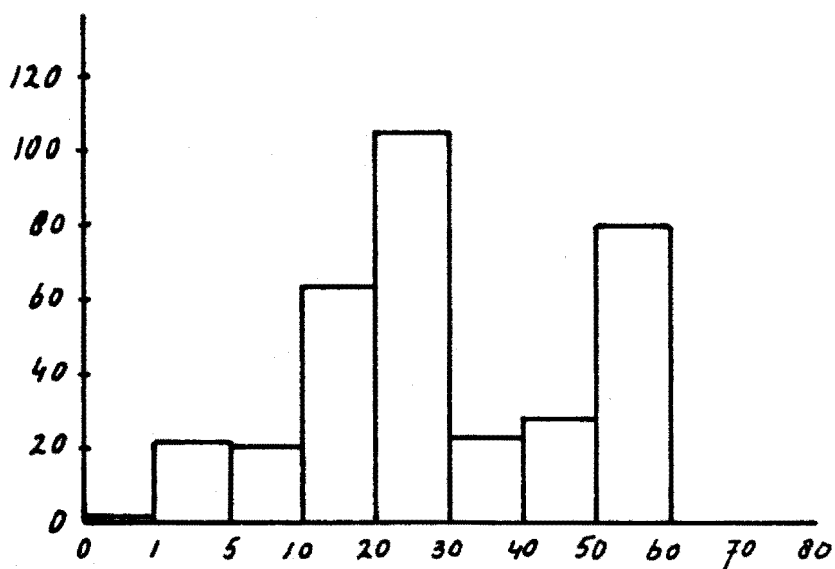


fig. gb. opgesteld vermogen van inductiemotoren als functie van hun grootte

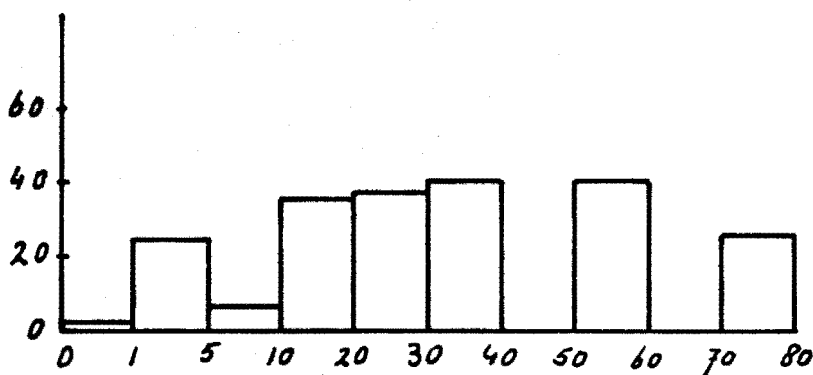
kw ↑



a. zeebedrijf.

motorvermogen (kw) →

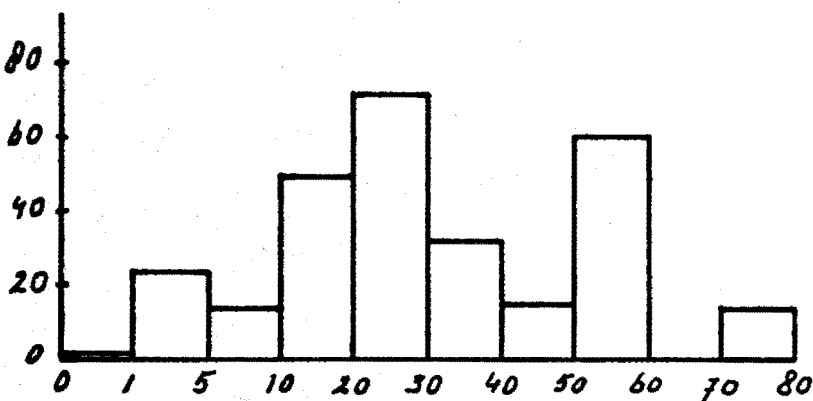
kw ↑



b. havenbedrijf.

motorvermogen (kw) →

kw ↑



c. gemiddeld haven/zee

motorvermogen (kw) →

fig. 10. gemiddeld verbruikt vermogen van inductiemotoren als functie van hun grootte

Hoofdstuk 2

Voor de analyse van de opgestelde hulpmotoren is aan boord van het m.s. "Nedlloyd Bahrain", "Nedlloyd Baltimore" en "Nedlloyd Barcelona" een aantal metingen verricht (tijdens zeebedrijf). Voor het m.s. "Nedlloyd Bahrain" zijn deze gegevens in bijlage 1 op bladzijde 114 uitgewerkt.

Voor ontbrekende (of duidelijk onbetrouwbare) gegevens is gebruik gemaakt van opgaven door de betreffende fabrikant of van gemeten waarden op de beide andere schepen.

Uit de metingen a/b van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" volgt een as-rendement van de dieselmotor van 42.4%, bij een belastingsgraad van 59%. Dit komt overeen met een specifiek brandstofverbruik van 199 (g/kWh). Op de proefstand bedroeg dit verbruik 224 g/kWh. Het is onwaarschijnlijk, dat de prestatie van de dieselmotor na installatie op het schip is verbeterd, zodat de gemeten waarde van het specifiek brandstofverbruik als "te laag" moet worden aangemerkt.

Ook de percentages van de verschillende verliesposten zullen verschillen vertonen met de werkelijkheid door onvoldoende nauwkeurige metingen. (Het feit, dat het koelwaterverlies als sluitpost moest worden genomen heeft hier ook mee te maken)

Om toch enig inzicht in de prestaties van de dieselmotor te krijgen, is in bijlage 3 op bladzijde 117 een aantal proefstandgegevens opgenomen. Deze gegevens waren voor de geïnstalleerde dieselmotor (8 FCHD 240/720) niet (meer) aanwezig, maar volgens opgave van de fabrikant komen de in bijlage 3 getoonde gegevens van de dieselmotor 9 FFHD 240/1000 aardig overeen met die van de 8 FCHD 240/720.

voor het generatorrendement geldt: (opgave heemaf)

	vollast	3/4 last	1/2 last
$\cos\varphi = 0.8$	93.7	93.3	92.0
$\cos\varphi = 1$	95.1	94.7	93.6

Naast de Sankey-diagrammen in bijlage 3 zijn de specifieke brandstofverbruiken (in g/kWh) van de 9 FFHD 240/1000 bij verschillende belastingstoestanden aangegeven. Tussen haakjes zijn de overeenkomstige specifieke brandstofverbruiken van de 8 FCHD 240/720 te zien.

De werkelijk opgestelde dieselmotor heeft dus een hoger specifiek brandstofverbruik. De diagrammen geven wel een goed inzicht in de verdeling over de verschillende verliesposten.

Een andere methode om de prestaties van de dieselmotor te bepalen is het berekenen van het gemiddelde specifieke brandstofverbruik over een rondreis.

Uit: totale reisduur: 83 dagen
 \bar{P}_e : 371 kW
 η_g : 0,92
totaal verstoekte olie: 198,6 ton MDO*

volgt: $\bar{b}_e = 247$ g/kWh

In vergelijking met de proefstandgegevens is dit een aanmerkelijke waarde.

* bron: brandstoflijsten Nedlloyd Bahrain.

Bijlage 1

Gemeten gegevens "Nedlloyd Bahrain" op 3 november 1980.

(trajekt Gibraltar-Marseille)

$$P_e = 440 \text{ kW}$$

$$b_e = 199 \text{ g/kWh}$$

$$b_g = 7337 \text{ g/kWh (opgave Stork)}$$

$$\Delta T_g = 327 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_k = 6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{gemiddelde van metingen aan boord van de Barcelona en de Baltimore, omdat de Bahrain-meting } (\Delta T_k = -0,5 \text{ }^\circ\text{C}) \text{ niet betrouwbaar is})$$

$$\Delta p = 2,5 \text{ bar}$$

$$Q = 210 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{via } \Delta p \text{ uit pompkarakteristiek})$$

$$\eta_g = 0,92 \quad (\text{opgave Heemaf})$$

Hieruit volgt (m.b.v. formules in bijlage 2):

$$P_b = 1128 \text{ kW (100\%)}$$

$$P_{as} = 478 \text{ kW (42,4\%)}$$

$$P_g = 370 \text{ kW (32,8\%)}$$

$$P_s = 17 \text{ kW (1,5\%)*}$$

Zie volgende bladzijde.

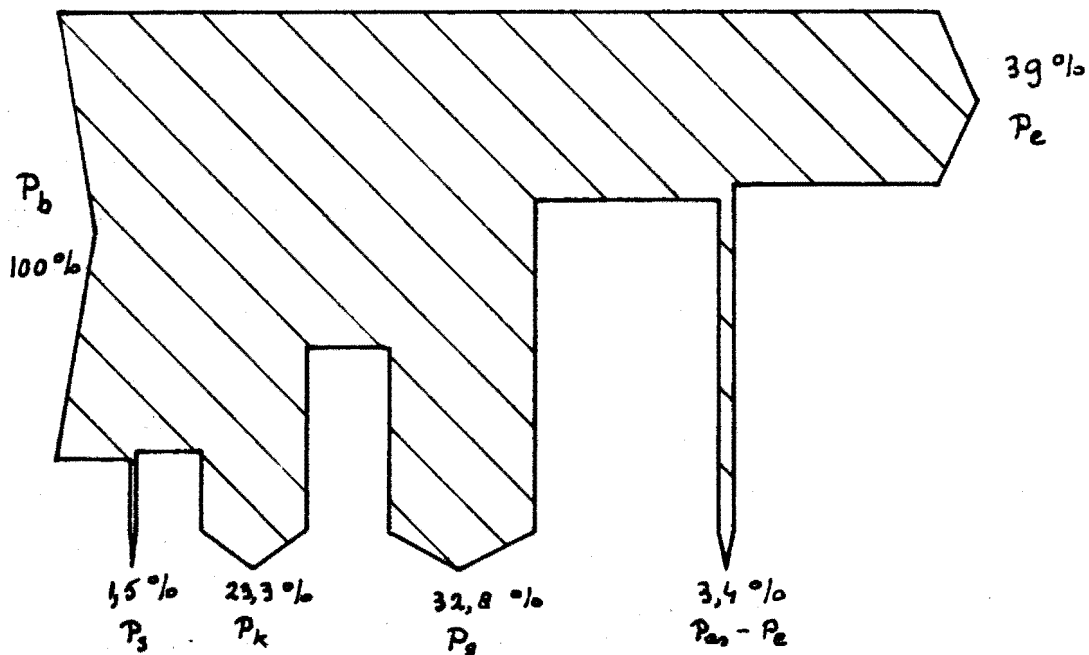
$$P_k = 263 \text{ kW (23,3%)**}$$

$$P'_k = 1512 \text{ kW}$$

Het totale hulpkoelwatersysteem ($P'_k = 1512 \text{ kW}$) wordt gebruikt voor hulpmotorkoeling ($P_k = 263 \text{ kW}$) en koeling van ATM-condensators, AC-condensators, vries-condensators, luchtcompressoren en generatoren.

* schatting

** sluitpost



Warmtebalans van de dieselmotor 8 FCHD 240/720, verkregen uit meetresultaten aan boord van het m.s. "Nedlloyd Bahrain" d.d. 3 november 1980.

Het afgenomen asvermogen bedraagt: $P_{as} = 478 \text{ kW}$

De belastingsgraad is dus: $\frac{478}{1010 \times 0.736} = 0.64$

Bijlage 2:

Asvermogen: $P_{as} = \frac{P_e}{\eta_g} \text{ (kW)}$

Brandstof: $P_b = \frac{b_e C_b}{3,6 \cdot 10^6} \cdot P_{as} \text{ (kW)}$

Uitlaatgassen: $P_g = \frac{(b_g + b_e) C_g \Delta T_g}{3,6 \cdot 10^6} \cdot P_{as} \text{ (kW)}$

Koelwater: $P'_k = \frac{\rho_w C_w Q \Delta T_k}{3600} \text{ (kW)}$

- P_b = m.b.v. brandstof toegevoerd vermogen (kW)
 P_g = d.m.v. uitlaatgassen afgevoerd vermogen (kW)
 P'_k = d.m.v. koelwater afgevoerd vermogen (kW)
 P_k = d.m.v. koelwater afgevoerd vermogen van de dieselmotor (kW)
 P_{as} = asvermogen dieselmotor (kW)
 P_e = elektrisch afgenomen vermogen (kW)
 ΔT_k = temperatuursverschil over koelwaterkoeler ($^{\circ}\text{C}$)
 ΔT_g = temperatuursverschil afgassen - omgeving ($^{\circ}\text{C}$)
 b_e = specifiek brandstofverbruik diesel (g/kWh)
 b_g = specifiek luchtverbruik diesel (g/kWh)
 C_b = stookwaarde dieselolie (= 42700) (kJ/kg)
 C_g = soortelijke warmte uitlaatgassen (= 1,13) (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)
 C_w = soortelijke warmte zeewater (= 4,18) (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)
 Q = volumestroom koelwaterpomp (m 3 /h)
 Δp = drukverschil over koelwaterpomp (bar)
 η_g = generatorrendement
 ρ_w = soortelijke massa zeewater (= 1025) (kg/m 3)



STORK-WERKSPoor DIESEL
ZWOLLE

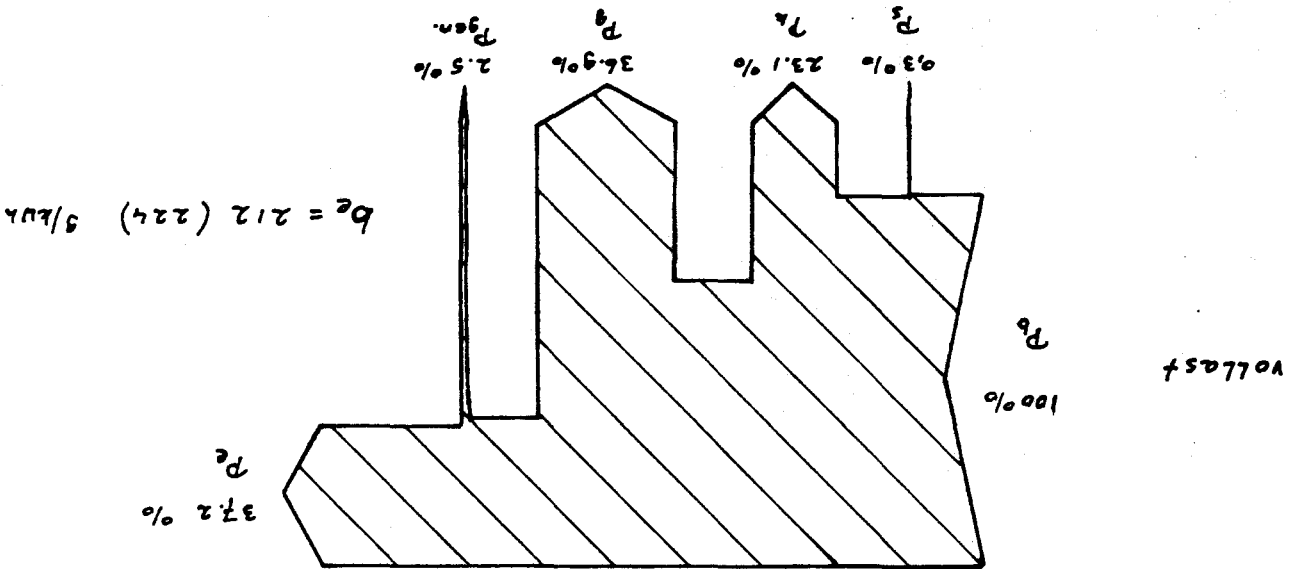
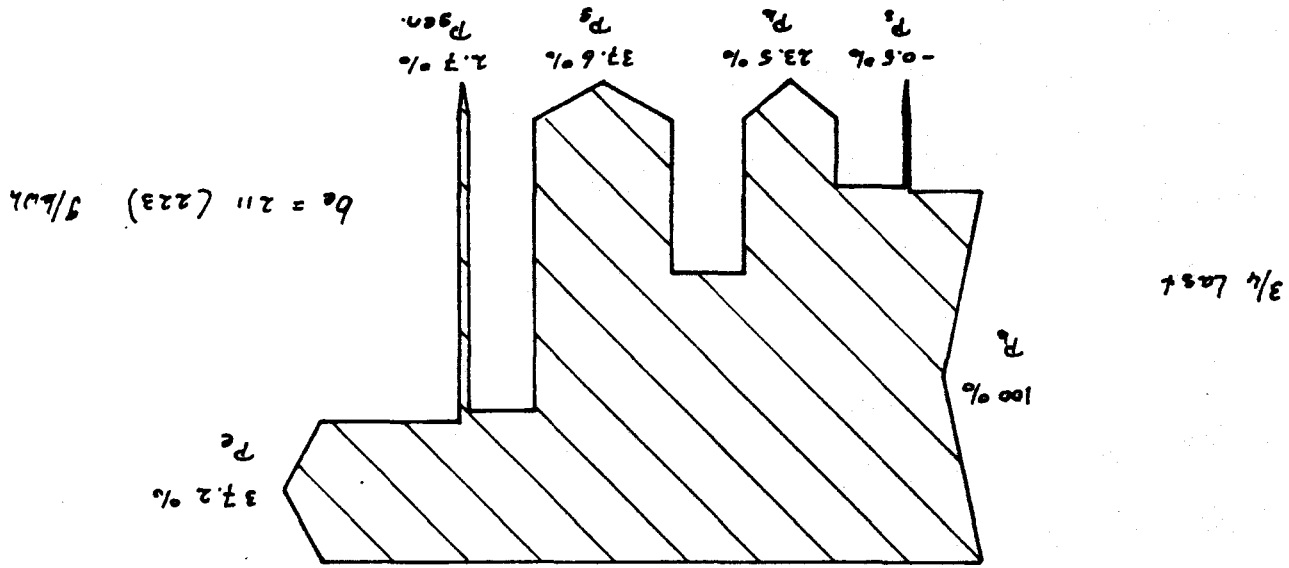
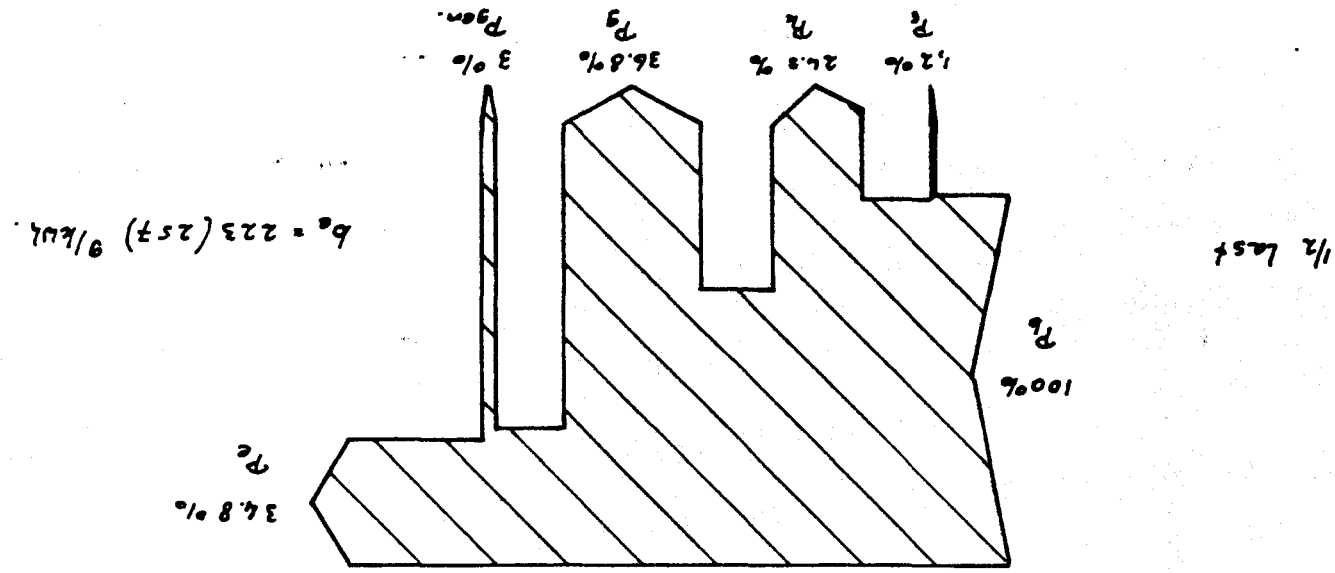
Not nr.: 79/37

Motortype : 9 FFHD 240/1000
 Toerental : 1000 omw/min.
 Brochure vermogen: 1471 KW (2000 pk)
 Drukvolgr.spec. : VTR 251- G6T 18, 7IV MH 103
 Kleptiming : 67-67-53-39
 Voorinspuiting : 170 vt
 Pomp cap. ruwwater : 57 m³/h - separate pomp/afwijkend van standaard
 zoetwater: 50 m³/h
 smeerolie: 37 m³/h
 Koelwaterthermostaat: 63° → 71° c.

Warmtebalans volgens F 42-240-042-010

afgevoerde warmte in kj/sec. (kcal/h).

	Vollast	3/4 last	1/2 last
Medium	1471 kW (2000 pk)	1103 kW (1500 pk)	736 kW (1000 pk)
Vermogen	1471 (126,5 x 10 ⁴)	1103 (94,5 x 10 ⁴)	736 (63 x 10 ⁴)
Uitlaatgassen	1367,5 (117,5 x 10 ⁴)	1041,5 (89,5 x 10 ⁴)	716 (61,5 x 10 ⁴)
Motorkoelwater	442 (38 x 10 ⁴)	361 (31 x 10 ⁴)	279,5 (24 x 10 ⁴)
Spoellucht	267,5 (23 x 10 ⁴)	145,5 (12,5 x 10 ⁴)	64 (5,5 x 10 ⁴)
Smeerolie	151,5 (13 x 10 ⁴)	145,5 (12,5 x 10 ⁴)	128 (11 x 10 ⁴)
TOTAAL	3699,5 (318 x 10 ⁴)	2796,5 (240 x 10 ⁴)	1923,5 (165 x 10 ⁴)
Toegevoerde warmte	3707 (318,5 x 10 ⁴)	2764 (237,5 x 10 ⁴)	1943,5 (167 x 10 ⁴)
Rest	7,5 (0,5 x 10 ⁴)	- 2,5 (-2,5 x 10 ⁴)	20 (2 x 10 ⁴)
Motorkoelwater	442 (38 x 10 ⁴)	361 (31 x 10 ⁴)	279,5 (24 x 10 ⁴)
Turbine	99 (8,5 x 10 ⁴)	73,4 (6,3 x 10 ⁴)	45,5 (3,9 x 10 ⁴)
Blok + koppen	343 (29,5 x 10 ⁴)	287,6 (24,7 x 10 ⁴)	234 (20,1 x 10 ⁴)
Temperatuur °C			
Aangezogenlucht	30	30	30
na turbine(uitl.g.)	415	400	360
motor koelwater	71	71	71



Bylage 3. g FFD 240/1000

Appendix A2: Optimale belastingsverdeling over meerdere dieselmotoren

Stel er draaien N (niet noodzakelijk gelijke) dieselmotoren parallel. Iedere motor levert P_i (kW) bij een specifiek brandstofverbruik van b_i (g/kWh),

dan geldt: $\bar{b}_e = \frac{1}{\sum_i P_i} \cdot \sum_i b_i \cdot P_i$; $\sum_i \Delta \cong \sum_{i=1}^N$

verder geldt: $\sum_i P_i = P_t$, het totaal opgewekte vermogen.

De voorwaarde voor optimale belastingsverdeling over de N motoren wordt met behulp van de methode van Lagrange als volgt bepaald:

$$\bar{b}_e = \sum_i \frac{b_i \cdot P_i}{P_t} = \sum_i \frac{b_i \cdot P_i}{P_t} + \lambda' \sum_i P_i - \lambda' P_t,$$

waarin λ' een konstante is. (Lagrange Multiplier)

Voor een minimaal gemiddeld brandstofverbruik moet gelden:

$$\frac{\partial \bar{b}_e}{\partial P_i} = \sum_i \left[\frac{\partial (b_i \cdot P_i)}{\partial P_i} \cdot \frac{1}{P_t} + \lambda' \right] = 0, \text{ voor iedere } i$$

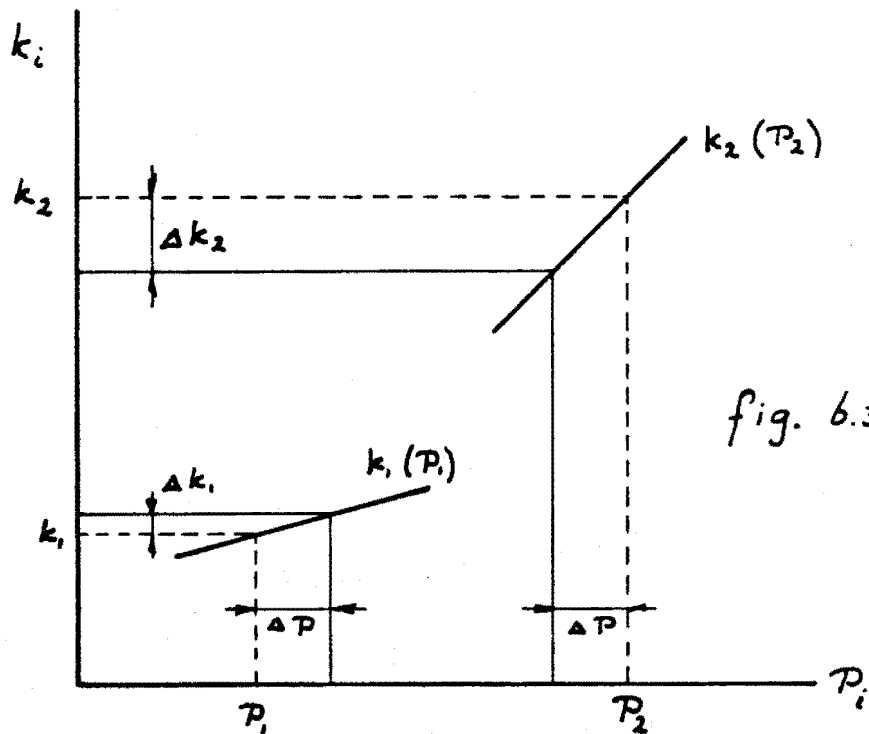
dus: $\boxed{\frac{\partial (b_i \cdot P_i)}{\partial P_i} = \lambda}$; $\lambda = -\lambda' \cdot P_t = \text{konstant.}$

$(b_i \cdot P_i)$ is een kostenfunctie k_i (g/h bij een bepaalde P_i). Voor een minimaal gemiddeld brandstofverbruik moet de helling van de kostenfunctie voor iedere dieselmotor gelijk zijn. Aan de hand van een voorbeeld is dit eenvoudig te begrijpen.

In figuur 6.3.2.2. zijn twee (stukken van) kostenfuncties $k_i = b_i P_i$ getekend, van twee parallel draaiende dieselmotoren. Het werkpunt P_1, P_2 is volgens voorgaande theorie niet optimaal. (de hellingen van de kostenfuncties zijn niet gelijk). Door opwekker (2) ΔP minder en opwekker (1) ΔP meer te laten leveren, wordt

Δk :

$$\Delta k = \left[(k_1 + \Delta k_1) + (k_2 - \Delta k_2) \right] - \left[(k_1) + (k_2) \right] = \Delta k_1 - \Delta k_2 < 0, \text{ dus gunstiger!}$$



Inderdaad is het werkpunt P_1, P_2 niet optimaal. Indien de hellingen van de kostenfuncties wel gelijk zijn, zullen kleine variaties in de belastingsverdeling geen verandering in Δk teweeg brengen. Het zal nu ook duidelijk zijn, dat in het geval van N identieke opwekkers de belastingsgraad voor iedere opwekker gelijk moet zijn.

Neem nu aan, dat N verschillende opwekkers parallel draaien. De opwekkers zijn echter wel opgebouwd uit identieke basiseenheden (cylinder-eenheden van een dieselmotor). Iedere dieselmotor is een veelvoud n_i groter dan de basiseenheid. De basiseenheid heeft een specifiek brandstofverbruik van $b_o(P)$. De i^e dieselmotor heeft dus een specifiek brandstofverbruik van $b_o\left(\frac{P_i}{n_i}\right)$.

Voor optimaal bedrijf moet nu gelden:

$$\frac{\partial [b_i(P_i) \cdot P_i]}{\partial P_i} = \frac{\partial [b_o\left(\frac{P_i}{n_i}\right) \cdot P_i]}{\partial P_i} = \frac{\partial [b_o\left(\frac{P_i'}{n_i}\right) \cdot \frac{P_i'}{n_i}]}{\partial \left(\frac{P_i'}{n_i}\right)} = \frac{\partial [b_o(P_i') \cdot P_i']}{\partial (P_i')} = \lambda$$

Hierbij is dus voor iedere opwekker zijn vermogen teruggebracht tot de basiseenheid. Ook hier geldt, dat voor iedere dieselmotor de belastingsgraad gelijk moet zijn.

Gebruikte symbolen bij appendix A2

<u>symbool</u>	<u>benaming</u>	<u>dimensie</u>
A	relatieve besparing	-
b_o	specifiek brandstofverbruik van een basiseenheid	g/kWh
b_e	relatief specifiek brandstofverbruik	-
\bar{b}_e	gemiddeld specifiek brandstofverbruik	(g/kWh)
b_i	specifiek brandstofverbruik van i^e dieselmotor	g/kWh
k_1	kostenfunctie b.P.	g/h
k_2		
k_i		
Δk	verandering van de kostenfunctie	g/h
Δk_1		
Δk_2		
n_i	vergrotingsfaktor i^e dieselmotor t.o.v. de basiseenheid	-
P	vermogen	kW
P_1		
P_2		
P_i		
P_t		
ΔP	verandering van het vermogen	kW
P	belastingsgraad	-
P_1		
P_2		
λ, λ'	konstanten (Lagrange)	-

