

MASTER

Statische regeling van de arbeidsfactor van een inverter die gebruikt kan worden bij aansluiting van een windturbine op een zwak elektriciteitsnet

de Groot, J.H.

Award date:
1985

[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

4070



Technische Hogeschool Eindhoven

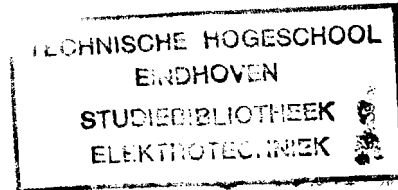
Afdeling der Elektrotechniek

Vakgroep Elektromechanica en Vermogenselektronica

blz.

rapport nr. EMV 85.05

AFSTUDEERVERSLAG



Statische regeling van de
arbeidsfactor van een inverter
die gebruikt kan worden bij
aansluiting van een windturbine
op een zwak elektriciteitsnet.

EMV 85.05

J.H. de Groot.

Hoogleraar: Prof. Ir. J.A. Schot

Mentoren: Ir. L.J.J. Offringa,
Ir. W.J. de Zeeuw.

Eindhoven, februari 1985.

De afdeling der Elektrotechniek van de
Technische Hogeschool Eindhoven aanvaardt
geen verantwoordelijkheid voor de inhoud
van stage- en afstudeerverslagen.

INHOUDSOPGAVE

	blz.
1	1.1
1.1	1.2
2	2.1
3	3.1
3.1	3.1
3.2	3.3
3.3	3.9
3.4	3.11
3.5	3.13
3.6	3.15
4	4.1
5	5.1
5.1	5.1
5.2	5.4
6	6.1
6.1	6.1
6.2	6.3
6.3	6.10
6.4	6.12
6.5	6.15
6.5.1	6.18
6.6	6.22
7	7.1
7.1	7.1
7.2	7.2
7.3	7.6
7.4	7.10
7.5	7.11
7.6	7.12
8	8.1
8.1	8.1
8.2	8.3
8.3	8.4
8.4	8.6
8.5	8.7
9	9.1
9.1	9.1
9.2	9.4
9.3	9.5
10	10.1
10.1	10.1
10.2	10.2
Lijst van symbolen	11.1
Lijst van verwijzingen	11.2
Lijst van bijlagen	11.3
Bijlagen	11.4

1. SAMENVATTING

Dit verslag is een uitwerking van de mogelijkheden en de toepassingen die ontstaan bij regeling van de arbeidsfactor van een inverter door regeling van de ontsteekhoek.

Toepassing van geforceerde kommutatie maakt het mogelijk de inverterontsteekhoek in principe van 90° tot 270° te variëren, waardoor de inverter zowel blindvermogen kan opnemen als afgeven.

Met name voor levering van elektrisch vermogen aan een zwak net biedt de beschreven regeling belangrijke voordelen.

Door stabilisatie van de aansluitspanning, die zo gerealiseerd kan worden, kan het maximum van te leveren vermogen verhoogd worden. Hierdoor kan de grens die bepaald wordt door de maximale thermische belastbaarheid van de (kabel)verbinding dicht benaderd worden.

Bij geringe vermogenslevering kan het invertorsysteem ook als $\cos \varphi$ -kompensator voor medegebruikers van het elektriciteitsnet gebruikt worden om transportverliezen te minimaliseren.

In een laboratoriumopstelling zijn experimenten met een 12-pulsig invertorsysteem gedaan om de ontworpen regelstrategie te beproeven, op een vermogensnivo van ca. 20 kW.

1.1. SUMMARY

This report is about the possibilities and applications of power-factor control of an inverter, by means of firing-angle control. Because of forced commutation the firing angle can be varied (in principle) from 90 to 270 degrees. Therefore the inverter can be used both as reactive power source and as sink.

Specially for feeding electrical power into a weak AC-grid the controller which will be described has important advantages. By stabilizing the AC-voltage the inverter-controller allows an increase of maximum power to be fed into the grid, a maximum set by increase of voltage.

Hereby the (active) power-flow approximates the maximum power-flow capacity, set by the maximum (cable) current level.

At low power level the inverter system can be used as a $\cos \varphi$ -compensator for other loads connected to the same grid, to minimize dissipation.

In an experimental set-up the designed control strategy was successfully tested with a twelve-pulse current source inverter at about 20 kW power level.

2. VOORWOORD

Het voorliggende verslag betreft het afstudeerwerk dat ik verricht heb binnen de vakgroep Elektromechanica en Vermogenselektronica van de Technische Hogeschool Eindhoven. Dit project als afsluiting van de opleiding tot elektrotechnisch ingenieur had betrekking op een vermogenselektronica systeem, waaraan ik van februari 1984 tot februari 1985 gewerkt heb (met uitzondering van 3 1/2 maand in de zomer toen een buitenlandse bedrijfsstage plaatsvond).

Een aanleiding tot het verrichten van dit onderzoek was het probleem van een elektriciteitsverbruiker die door zijn afgelegen locatie te kampen had met sterk wisselende netspanning. Een oplossing hiervoor, het leggen van een dikkere kabel zou een kostbare aangelegenheid worden.

Daarom werd gezocht naar een andere mogelijke oplossing in de vorm van het plaatsen van een kleine elektriciteitsopwekker, waarbij echter de spanningstabilisatie nog steeds een probleem zou blijven.

De in dit verslag beschreven regeling zal behalve voor dit ene praktijkgeval ook voor vermogens-elektronische energie-teruglevering in het algemeen waarschijnlijk met voordeel toegepast kunnen worden.

De omschrijving van de afstudeeropdracht luidde:

Onderzoek betreffende de mogelijkheden van statische regeling van de arbeidsfactor door een inverter. Dit is van belang voor een windturbine die aan een zwak elektriciteitsnet gekoppeld is. Tevens ontwerp en bouw van een laboratorium prototype.

Na literatuurstudie op het gebied van vermogenselektronica-systemen en arbeidsfactorregeling (hoofdstuk 4) en inventarisatie van voorkomende elektriciteitsnet-configuraties (hoofdstuk 3) is naar een vereenvoudiging van de probleemstelling gezocht. Aan de hand van een nieuwe voorstelling (hoofdstuk 7) is een regelstrategie ontwikkeld (hoofdstuk 8).

De hiervan afgeleide regeling is vervolgens met behulp van een microprocessor uitgevoerd en getest.

In de laboratoriumopstelling (hoofdstuk 9) bleek het noodzakelijk om behalve de netspanning ook het vermogen dat aan het elektriciteitsnet werd 'teruggeleverd' te regelen (hoofdstuk 8). Deze vermogensregeling is ook uitgevoerd.

Voor het testen van de regeling is gebruikgemaakt van een 12-pulsig stroominvertorsysteem dat binnen de vakgroep al ontwikkeld en gebouwd was.

Voor de vele praktische aanwijzingen en opbouwende kritiek, waardoor mijn afstudeerwerk zeer voorspoedig verlopen is, wil ik mijn begeleiders, evenals alle andere betrokkenen uit de vakgroep, en in het bijzonder de heer Offringa hierbij dank zeggen.

J. H. de Groot

Eindhoven, februari 1985.

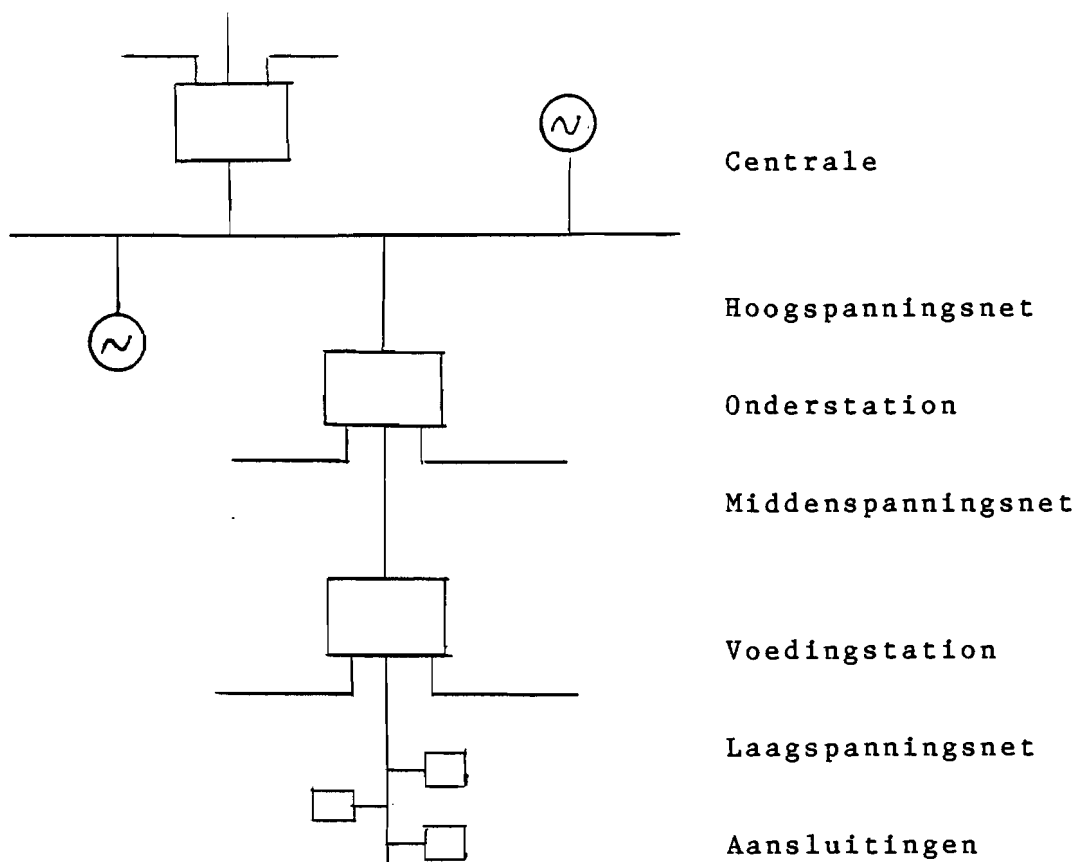
3. ELEKTRICITEITSNETTEN

3.1 STRUKTUUR VAN HET ELEKTRICITEITSNET

In Nederland is het elektriciteitsnet opgebouwd uit verschillende deelnetten met verschillende spanningsnivo's.

Het kan ruwweg onderscheiden worden in drie delen: hoog-, midden- en laagspanningsnet.

De samenhang van deze deelnetten wordt geïllustreerd door de schematische voorstelling in figuur 1.



figuur 1: Opbouw elektriciteitsnet.

Het hoogspanningsnet bestaat zelf ook uit delen die op spanningsnivo's van 110 kV tot 380 kV bedreven worden. Deze delen zijn allemaal met grote transformatoren aan elkaar gekoppeld. Het toepassen van verschillende technieken bij de aanleg van dit net dat in de loop der jaren is opgebouwd, is de oorzaak van het gebruik van meer dan één spanningsnivo. De reden waarom hoge spanningen gebruikt worden is dat dan de bijzonder hoge vermogens (honderden Megawatts) bij lagere stromen getransporteerd kunnen worden. Dit is voordelig met het oog op verliezen in de geleider vanwege dissipatie. De geleiderdoorsnede kan daardoor kleiner gekozen worden dan bij lagere bedrijfspanning het geval zou zijn, en dit is voordelig met het oog op de aanlegkosten van het elektriciteitsnet.

Vanuit het hoogspanningsnet worden onderstations gevoed waar de spanning getransformeerd wordt naar middenspanningsnivo van 10 kV tot 50 kV.

Omdat dit middenspanningsnet veel uitgebreider is dan het hoogspanningsnet zijn de vermogensstromen per verbinding kleiner, zodat met lagere spanning gewerkt kan worden. Dit is behalve voor de verliezen ook van belang voor de veiligheid en isolatie.

In de derde plaats is er het laagspanningsnet dat via de distributietransformatoren in het netstation op het middenspanningsnet is aangesloten. Op dit nog meer uitgebreide net zijn de verbruikers aangesloten. Hier zijn de vermogensstromen nog kleiner en voornamelijk uit veiligheidsoverwegingen de spanning lager: 380 V lijnspanning of 220 V fasespanning.

Om redenen van blindvermogen transport door het inductieve hoogspanningsnet kan de spanning in dit net sterk variëren [1]. Toch is het belangrijk bij de verbruiker een constante spanning aan te bieden.

Dit is mogelijk dankzij de regelbare transformatieverhouding in de onderstationen waardoor de spanning aan de uitgang op (zoals in het volgende wordt aangenomen) 10 kV wordt afgeregeld. Vanaf dit punt is de spanning alleen afhankelijk van de netimpedanties en de

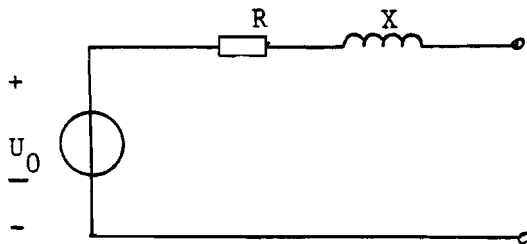
aangesloten belasting.

Er treedt dus een spanningsval op over de 10 kV-verbinding, de distributietransformator en de laagspanningsverbinding.

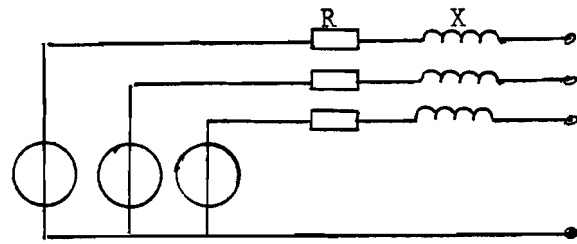
In Nederland zijn vrijwel alle midden- en laagspanningsverbindingen met grondkabels uitgevoerd zodat in het vervolg 'de verbinding' als 'de kabel' aangeduid zal worden.

3.2 MODELFORMING

Om tot een voor ons doel bruikbaar model van de werkelijkheid te komen moet het complexe elektriciteitsnet voorgesteld worden door een vereenvoudigde voorstelling volgens het Thevenin-theorema. Er kan dan gerekend worden met een ideale spanningsbron in serie met een impedantie met een reëel deel (weerstand R) en een imaginair deel (reactantie X). Dit wordt voorgesteld in figuur 2a.



figuur 2a



figuur 2b

Eén en driefasig netmodel

Het driefasennet wordt dan voorgesteld door drie dergelijke bronnen parallel geschakeld (zie figuur 2b). Omdat steeds wordt uitgegaan van een symmetrische belasting wordt voor het gemak de nulleider impedantieloos verondersteld.

Om tot deze vereenvoudiging te komen verdienen de volgende vijf aspecten de aandacht:

1) Keuze van netcomponenten.

Er is een grote diversiteit aan kabels en transformatoren aan te treffen. In een willekeurige Nederlandse situatie zijn de lengte en het geleidermateriaal van midden- en laagspanningskabels van belang, als ook de grootte en het type van de transformator. Om tot een concreet geval te komen wordt een keuze gemaakt. Het in het navolgende genoemde 'netmodel' bestaat uit de volgende componenten:

- 10 km $3 \cdot 95 \text{ mm}^2$ koper middenspanningskabel;
- 1 km $4 \cdot 95 \text{ mm}^2$ aluminium laagspanningskabel;
- 100 kVA, 5% distributie transformator.

De keuze van de kabellengten in dit netmodel berust op de inschatting van de Nederlandse situatie waarin betrekkelijk veel voedingsstations (transformatorhuisjes) met distributietransformatoren voorkomen. Op grotere afstanden zijn de onderstations bij de uitlopers van het hoogspanningsnet opgesteld. De gekozen kabeltypes komen in de praktijk veel voor. De distributie transformator is berekend op zo'n 50 huisaansluitingen [3].

2) Referentiespanning.

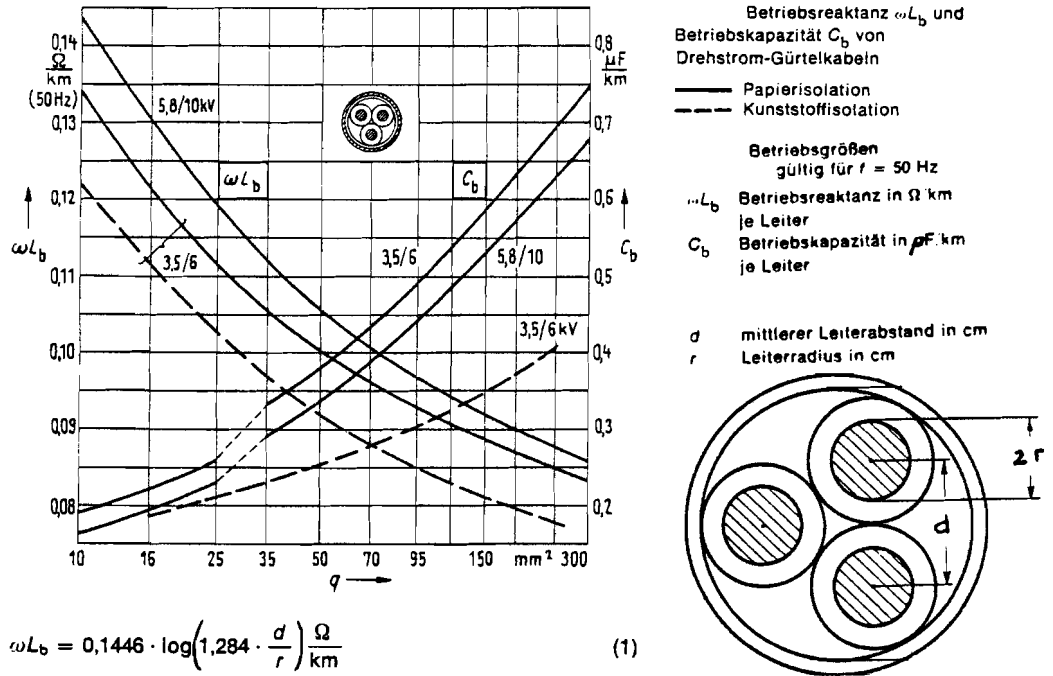
Zoals in het voorgaande is gesteld kan uitgegaan worden van een konstante 10 kV (gekoppelde)spanning aan de uitgang van het onderstation.

3) Kabelimpedanties.

In figuur 3 is een model van een kabel gegeven. De weerstand van de geleider is R (ohm) en de reactantie X .

De condensator C symboliseert de capaciteit tussen de geleiders.

figuur 4a



$$\omega L_b = 0,1446 \cdot \log\left(1,284 \cdot \frac{d}{r}\right) \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (1)$$

Zusammenstellung der Wirkwiderstände (bei 20 °C), Gewichte, Querschnitte und Durchmesser verschiedener Seile

figuur 4b

Seilnennquerschnitt mm ²	Aluminium-Stahl		Dmm	R	Gewicht kg/km	Kupfer		Dmm	R	Gewicht kg/km	E-AlMgSi (Aldrey)			Gewicht kg/km
	q _{Al} mm ²	q _{St} mm ²				q	Dmm				R	q	Dmm	
10	—	—	—	—	—	10	4,1	1,81	90	—	—	—	—	
15	15,3	2,55	5,4	0,1873	82	15,9	5,1	1,14	143	15,9	5,1	2,09	44	
25	23,8	4,0	6,8	0,1203	97	24,2	6,3	0,746	219	24,2	6,3	1,37	67	
35	34,3	5,7	8,1	0,837	140	34	7,5	0,526	310	34	7,5	0,967	94	
50	48,3	8,0	9,6	0,594	196	49	9,0	0,366	447	49	9,0	0,671	135	
70	69,9	11,4	11,7	0,413	284	66	10,5	0,277	597	66	10,5	0,508	181	
95	94,4	15,3	13,6	0,306	383	93	12,5	0,1952	846	93	12,5	0,358	256	
120	122	19,8	15,5	0,236	494	117	14,0	0,1553	1061	117	14,0	0,285	322	
150	149	24,2	17,1	0,1934	605	147	15,7	0,1240	1337	147	15,7	0,228	406	
185	184	29,8	19,0	0,1568	746	182	17,5	0,1004	1651	182	17,5	0,1840	501	
240	243	39,5	21,9	0,1188	987	243	20,2	0,0752	2208	243	20,2	0,1382	670	
300	304	49,5	24,5	0,0945	1236	299	22,5	0,0609	2726	299	22,5	0,112	827	
400	434	56,3	28,8	0,0666	1653	400	26,0	0,0456	3643	400	26,0	0,0838	1105	
500	490	63,6	30,6	0,0588	1866	500	29,1	0,0365	4551	500	29,1	0,0670	1381	
550	550	71,3	32,4	0,0524	2092	—	—	—	—	—	—	—	—	

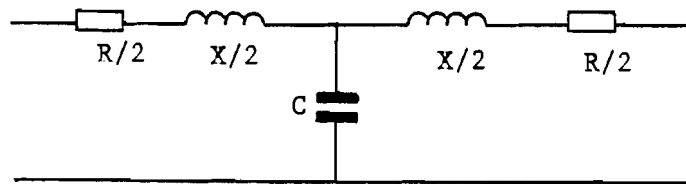
figuur 4c

 Belastbarkeit von papierisolierten Dreimantelkabeln mit Bleimantel und H-Kabeln mit Bleimantel oder unbewehrtem Aluminiummantel in A¹⁾
 (nach VDE 0255; 1.68)

Kupfer				Nennquerschnitt des Leiters mm ²	Aluminium			
$U_0 = 8,7$ kV und 11,6 kV		$U_0 = 17,3$ kV			$U_0 = 8,7$ kV und 11,6 kV		$U_0 = 17,3$ kV	
Verlegung in				mm ²	Erde		Luft	
Erde	Luft	Erde	Luft		Erde	Luft	Erde	Luft
120	115	—	—	25	92	85	—	—
145	140	135	130	35	110	105	105	96
175	165	160	155	50	130	125	125	115
215	205	200	195	70	165	160	155	150
255	245	240	230	95	195	190	185	180
290	280	270	265	120	220	220	210	205
325	320	305	300	150	250	250	235	235
365	360	340	340	185	285	285	265	265
420	420	390	390	240	325	330	305	310
465	480	435	440	300	365	380	345	350
530	560	500	510	400	420	440	400	410
580	620	540	570	500	470	500	445	460

20 °C 30 °C 20 °C 30 °C Umgebungs-temperatur 20 °C 30 °C 20 °C 30 °C

1) Gültig für direkt in Erde verlegte Einzelkabel bei EVU-Last und bei einem spezifischen Erdboden-Wärmewiderstand von 100 grd · cm W bzw. gültig für Einzelkabel frei in Luft.



figuur 3: Kabelmodel.

Deze grootheden hangen af van het materiaal en de dimensies van de kabel.

Aan de hand van grafieken en tabellen [4] kan het één en ander afgeleid worden.

In grafiek 4a zijn capaciteiten en reactanties per kilometer van verschillende kabels als functie van de geleiderdoorsnede gegeven. Tabel 4b geeft de weerstand bij verschillende doorsneden, voor aluminium en koper geleiders. Van tabel 4c tenslotte is af te leiden wat de stroombelastbaarheid I_{max} als functie van de geleiderdoorsnede is, ook weer voor verschillende soorten kabels.

Voor de middenspanningskabel van 10 km lengte en $3 \cdot 95 \text{ mm}^2$ koperdraad is nu uit tabel 4b en grafiek 4a af te leiden dat voor de totale geleiderweerstand en -reactantie geldt:

$$R = 2 \, \Omega \quad X = 1 \, \Omega$$

Uit tabel 4c volgt dat de maximale geleiderstroom $I_{MAX} = 255 \text{ A}$ bedraagt.

De capaciteit van deze kabel is $C = 3 \, \mu\text{F}$. Dit leidt tot een laadstroom van 10 A:

$$I = 2 \pi f C U = 314 \text{ s}^{-1} \cdot 3 \, \mu\text{F} \cdot 10 \text{ kV} = 10 \text{ A}.$$

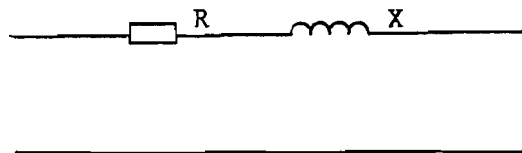
Deze stroom is verwaarloosbaar ten opzichte van de maximale geleiderstroom; de geringe waarde kan verklaard worden door de geringe kabellengte en de betrekkelijk lage bedrijfspanning.

Op soortgelijke wijze is voor de laagspanningskabel af te leiden:

$$\begin{array}{ll}
 R = 0,3 \, \Omega & X = 0,1 \, \Omega \\
 C = 0,3 \, \mu\text{F} & I = 195 \, \text{A}
 \end{array}$$

Nog duidelijker dan bij de middenspanningskabel kan hier de laadstroom en daarmee het effect van de capaciteiten verwaarloosd worden.

Een vereenvoudigd model van een kabel ziet er dan als volgt uit:



figuur 5: Vereenvoudigd kabelmodel.

4) Transformatieverhouding.

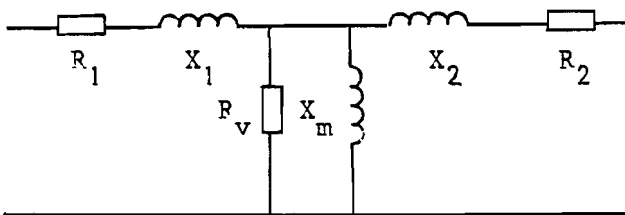
Het is een zinvolle bewerking om de voorstelling van het distributienet waarin een 10 kV/380 V transformator voorkomt om te rekenen naar een model zoals in figuur 2a met slechts één spanningsnivo, de fasespanning aan de laagspanningszijde: 220 V. Impedanties aan de primaire zijde moeten dan door de factor $(U_{\text{prim.}}/U_{\text{sek}})^2$ gedeeld worden. Dit leidt tot een nieuwe referentiespanning (220 V) en nieuwe impedanties voor de middenspanningskabel:

$$R = 3 \, \text{m}\Omega \quad X = 1,5 \, \text{m}\Omega$$

5) Transformatorimpedanties.

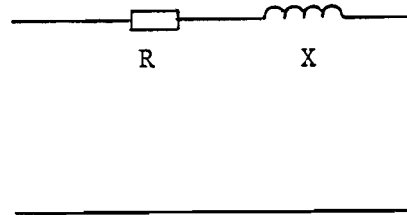
Een transformatormodel waarin alles gereduceerd is tot één spanningsnivo ziet er uit als in figuur 6a is weergegeven. Hierin stellen R_1 en R_2 de weerstanden van de primaire resp. sekundaire wikkelingen voor en X_1 en X_2 de respectievelijke spreidingsreactanties. R_V en X_m representeren resp. de effecten van de ijzerverliezen en de magnetisatiestroom. De z.g. relatieve kortsluitspanning \mathcal{E}_r is een gebruikelijke grootte om de

transformatorimpedanties aan te geven. ϵ_r is als volgt omschreven: Bij kortsluiting aan de secundaire zijde zal bij een spanning van $\epsilon_r \cdot U_{nom}$ aan de primaire zijde de nominale stroom gaan lopen (U_{nom} is de nominale primaire spanning). Dit betekent dat bij normaal bedrijf bij vollast een spanningsverandering van eveneens $\epsilon_r U_{nom}$ optreedt over de transformator zoals deze in figuur 6a is voorgesteld. Deze spanning kan voornamelijk toegeschreven worden aan de spreidingsreactanties. De ohmse weerstand speelt een veel geringere rol: de weerstand is ongeveer 1/5 van de reactantie.



figuur 6a

Transformatormodel



figuur 6b

Vereenvoudigd transformator-model

Een vereenvoudiging van dit model is mogelijk omdat de invloed van de magnetiseringsstroom en het ijzerverlies bij nominale belasting te verwaarlozen is in de bepaling van spanningsvariatiës. Dit leidt tot een model als in figuur 6b staat afgebeeld.

Voor hoogspanningstransformatoren komt men waarden van ϵ_r tegen van 0,15 à 0,20 ; voor distributietransformatoren die veel 'harder' moeten zijn (geringere toelaatbare spanningsvariatiës) van ca. 0,05 [5].

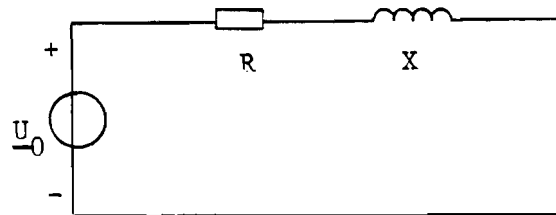
Voor een 100 kVA transformator met $\epsilon_r = 0,05$ komt dit neer op een model volgens figuur 6b met $R = 15 \text{ m}\Omega$ en $X = 75 \text{ m}\Omega$ (omgerekend naar de sekundaire 220 V zijde).

Samenvatting van alle behandelde aspecten leidt tot een tweepoort voorstelling volgens figuur 7 met de waarden:

$$R = 0,003 + 0,015 + 0,3 = 0,32 \Omega$$

$$X = 0,0015 + 0,075 + 0,1 = 0,18 \Omega$$

$$U_0 = 220 \text{ V.}$$



figuur 7: netmodel voorstelling.

Hiermee is het netmodel volledig beschreven.

Uit vergelijking van de impedantiewaarden is af te leiden dat de invloed van de impedantie van de middenspanningskabel verwaarloosbaar klein is. Dit komt omdat deze kabel bestemd is voor zeer vele verbruikers en niet slechts voor de ene waarvoor het model is afgeleid. De laagspanningskabel daarentegen is de overwegende factor in de bepaling van de impedantie. Nogmaals zij opgemerkt dat het hoogspanningsnet geen invloed heeft op het model; dit deelnet wordt als het ware 'oneindig sterk' verondersteld.

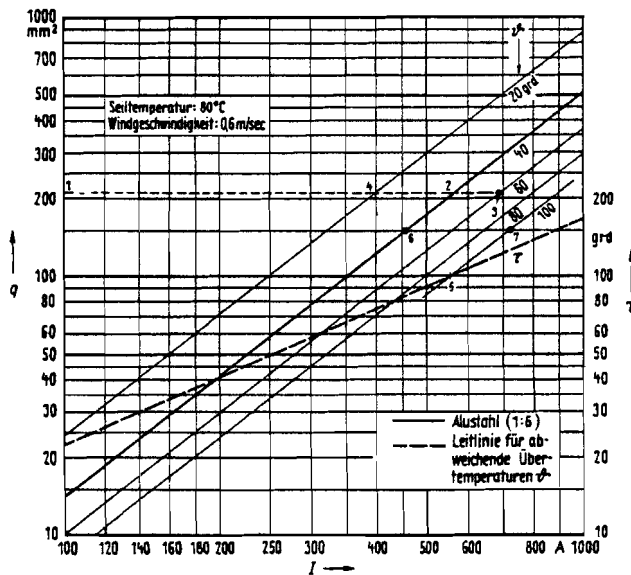
3.3 ALGEMENE SITUATIES

Aan de hand van de voorgaande beschouwingen is eenvoudig de uitgangsimpedantie van een net dat anders opgebouwd is af te leiden, anders opgebouwd in de zin van de in het voorgaande genoemde punten.

Het zal voor kunnen komen, zeker in het buitenland, dat met name laagspanningsverbindingen bovengronds zijn uitgevoerd, of dat geen vaste referentiespanning aangenomen kan worden aan de uitgang van een middenspanningstransformator.

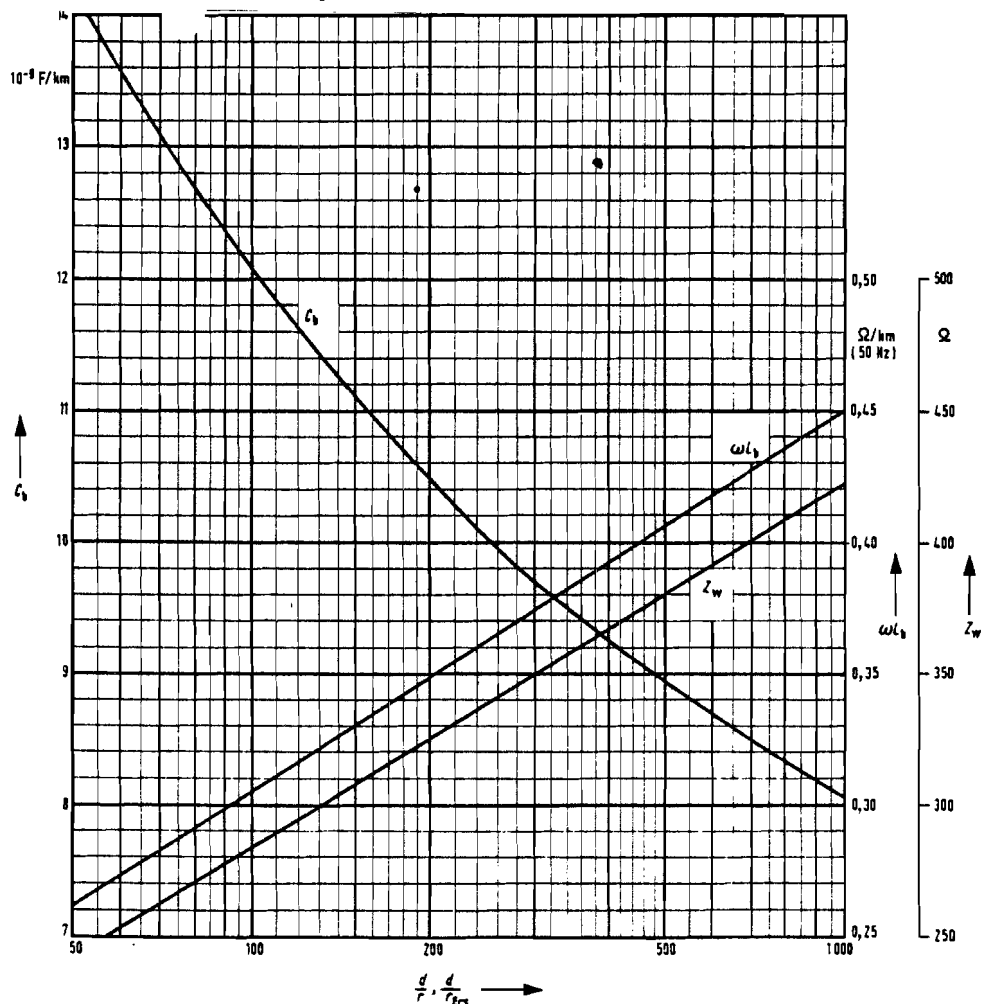
Van belang worden dan de impedanties van een bovengrondse verbinding. Hierover wordt door de figuren 8a en 8b informatie

figuur 8a


 Belastbarkeit von
Aluminium-Stahl-, Kupfer- und
E-AlMgSi(Aldrey)-Seilen

- i_L Leitertemperatur in °C
- ϕ Leiterüber Temperatur gegen-
über Lufttemperatur in grd
- q Leiterquerschnitt in mm²

figuur 8b



$$\omega L_b = 0,1446 \cdot \log \left(1,284 \cdot \frac{d}{r} \right) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$C_b = \frac{24,14}{\log \frac{d}{r}} \frac{\text{nF}}{\text{km}}$$

$$Z_w = \sqrt{\frac{L_b}{C_b}} \approx 141 \cdot \log \frac{d}{r} = 935 \cdot \omega L_b \Omega$$

 Bei Bündelleitern: r_{Ers} an Stelle von r einsetzen.

 Betriebsgrößen von Frei-
leitungen, gültig für $f = 50$ Hz

- ωL_b Betriebsreaktanz in Ω/km
je Leiter
- C_b Betriebskapazität in nF/km
je Leiter
- Z_w Wellenwiderstand in Ω
je Leiter
- d mittlerer Leiterabstand in cm
- r Leiterradius in cm
- r_{Ers} Bündel-Ersatzradius in cm

verschafft [4].

Door figuur 8a wordt de stroombelastbaarheid van een bovengrondse verbinding gegeven als functie van de geleiderdoorsnede. Hierbij spelen, zoals staat aangegeven, ook de omgevingstemperatuur en de windsnelheid een rol.

Figuur 8b geeft de reactantie en de capaciteit per kilometer, nu als functie van de verhouding geleiderafstand/geleiderradius.

3.4 ZWAKKE NETTEN.

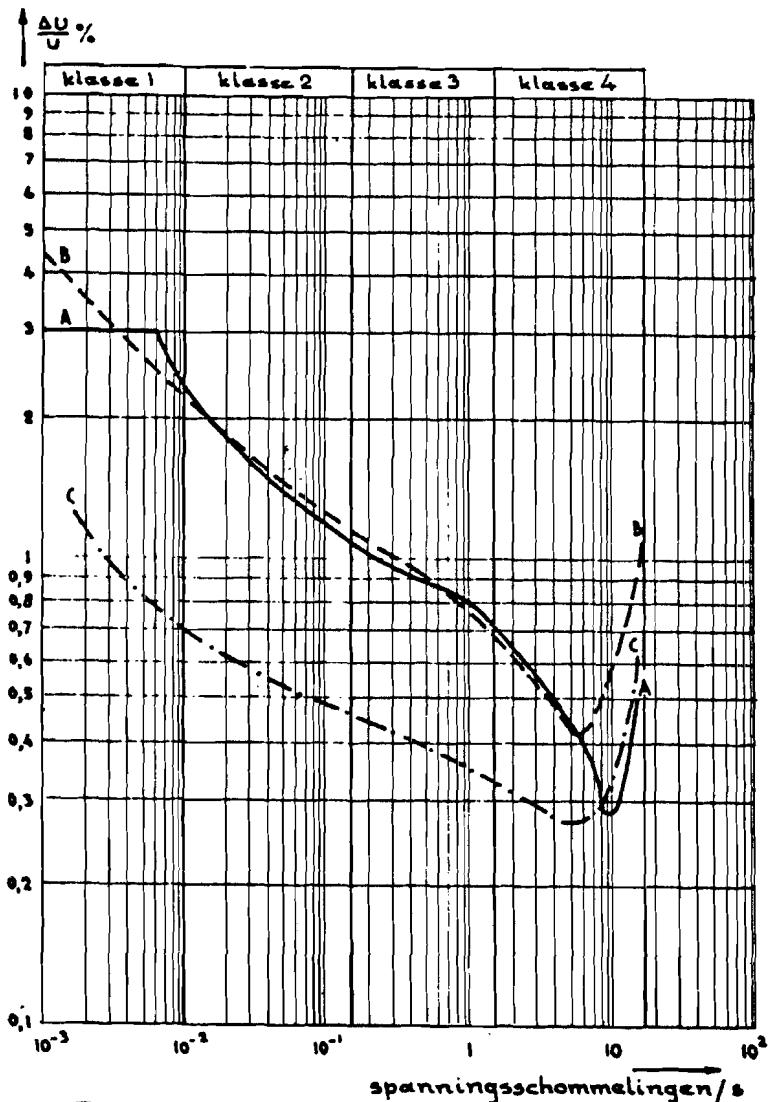
In de formulering van de afstudeeropdracht is sprake van een windturbine, gekoppeld aan een 'zwak net'. Nu blijkt de aanduiding 'zwak' voor een net niet in het jargon van de Nederlandse elektriciteitsbedrijven voor te komen, althans niet gedefinieerd te zijn. Daarom wordt nu ingevoerd:

DEFINITIE: Een zwak elektriciteitsnet is een net waarbij door onttrekking van een gewenst vermogen, bij een arbeidsfactor van 0,9 inductief, de spanning op het aansluitpunt meer dan 10 % daalt.

Deze definitie is van belang voor met name een statisch geval waarbij sprake is van een konstante vermogensonttrekking aan het net waarbij dus een konstante spanningsafwijking optreedt. Deze benadering sluit aan op de omschrijving van de afstudeeropdracht waarin sprake is van statische regeling van de arbeidsfactor.

Voor een beoordeling van het elektriciteitsnet in dynamische zin is de z.g. flikkerkromme van belang die als figuur 8c is opgenomen. Hierbij is 'hinderlijkheid' van lichtflikkering als gevolg van spanningsfluctuaties als maatstaf gehanteerd. De hinderlijkheid is afhankelijk van de frequentie waarmee de lichtflikkering optreedt. Aan spanningsfluctuaties van ca. 5 maal per seconde worden volgens de grafiek de strengste eisen gesteld. Bij gebruik van een

figuur 8c:
Flikkerkromme.



geldt als één spanningsschommeling

Kromme herkomst:

A = flikkercurve

B = AIEE (hinderlijkheidsgrens)

C = AIEE (zichtbaarheidsgrens)

Klasse	Aantal fluctuaties per tijdseenheid	Apparatuur
1	minder dan 30 per uur	automatisch werkende vloeistofpompen, luchtverversingsapparatuur, koelkasten, centrale verwarmingsapparatuur
2	30 per uur tot 10 per minuut	afzonderlijke liften, hijswerktuigen
3	10 per minuut tot 1,5 per seconde	vlamboogovens, bewegende lichtreclames, lastoestellen*, groepen liften
4	1,5 tot 18 per seconde	zuigercompressoren, automatisch werkende puntlastoestellen

belasting die bijvoorbeeld 5 maal per seconde in- en uitgeschakeld wordt, moet het net volgens deze benadering beduidend 'zwaarder' zijn dan bij een statisch geval waarbij de zelfde belasting is ingeschakeld.

Uit de ingevoerde definitie spreekt een relativiteit: het net wordt gerelateerd aan de belasting ervan.

Het in het voorgaande omschreven netmodel kan aldus als 'zwak' gekwalificeerd worden als het gewenste vermogen bij de gegeven arbeidsfactor 33 kW. overschrijdt.

Deze 10 % -grens is afgeleid van de normen van de Nederlandse elektriciteitsbedrijven die dit als maximaal toelaatbare spanningsdaling stellen (NEN 3173). Als maximale spanningsstijging stellen zij 5 % (NEN 400). In het vervolg zullen deze voorschriften als het 'spanningscriterium' aangeduid worden.

3.5 KEUZE VAN DE NETIMPEDANTIE.

Bij hoge verwachte belastingen moet de netimpedantie kleiner gekozen worden dan bij lage. In de loop der jaren echter kan de vraag naar elektrisch vermogen dermate toegenomen zijn dat het net toch zwak genoemd kan worden.

Het elektriciteitsbedrijf gaat dan over tot verzwaring van het net: er worden grotere distributietransformatoren geïnstalleerd en/of dikkere kabels gelegd, of er wordt zelfs een nieuw voedingsstation aangelegd.

Naast de spanningsafwijkingen kan ook de thermische belasting van een kabel, veroorzaakt door dissipatie in de geleider, een grens stellen aan het af te nemen vermogen. De thermische belasting is niet afhankelijk van de kabellengte, de spanningsafwijking is ermee evenredig, zodat bij relatief korte verbindingen de dissipatie een grens stelt aan het transportvermogen, en bij lange de spanningsafwijking.

De overgang hiertussen hangt af van de specificaties van de kabel in kwestie. Over het algemeen is de belastbaarheid thermisch veel groter dan op grond van het spanningscriterium vereist is. Dit is omdat men de transportverliezen laag wil houden.

Behalve door het verzwaren van het net kan men soms door het toepassen van kleine décentrale elektriciteitsopwekkers, zoals warmte/kracht centrales en water- of windturbines, ook een oplossing voor de problemen van zwakke netten vinden. Deze lokale 'minicentrales' verminderen namelijk het vermogen wat 'van buiten' moet worden toegeleverd. Met name voor verafgelegen grote verbruikers waarvoor een lange en dus dure kabel nodig zou zijn kan dit een goede oplossing zijn.

Als het gegenereerde vermogen precies het te verbruiken vermogen is kan volstaan worden met een zeer dunne kabel omdat dan het verwachte vermogen, gezien door het elektriciteitsbedrijf, nul is. In dit theoretische geval zou de kabel zelfs helemaal weggelaten kunnen worden.

Niet alleen voor eigen lokale behoefte maar ook voor overige verbruikers kunnen décentrale opwekkers energie leveren. De verbinding moet dan sterk genoeg zijn om het energietransport in de omgekeerde richting te kunnen verwerken. In plaats van daling kan nu stijging van de spanning verwacht worden. Hiervoor is dus volgens het spanningscriterium een maximum van 5 % voorgeschreven. Ook in dit geval maakt een lagere netimpedantie een groter vermogenstransport mogelijk, en ook nu kan gesproken worden van een zwak net als de spanning te sterk zal gaan afwijken van de nominale bij een te verwachten maximum van terug te leveren vermogen.

Als het teruggeleverde vermogen niet konstant is kan ook aan de hand van figuur 8c en de fluctuatiefrequentie een tweede maatstaf aangelegd worden. Voor windenergie bijvoorbeeld zijn vermogensspectra bekend [2] waarin vermogen afhankelijk van de fluctuatiefrequentie gegeven wordt. Hiervan is ook een (meer

stringente) grens af te leiden voor de toelaatbare netimpedantie bij een gegeven windvermogen-spectrum. In het kader van dit afstudeerwerk is deze overweging niet verder uitgewerkt.

Mocht het net te zwak zijn dan zal in de praktijk, zeker als de opwekker niet onder het beheer van de elektriciteitsmaatschappij valt, veel vaker het terug te leveren vermogen beperkt worden dan dat het net zal worden verzwaard.

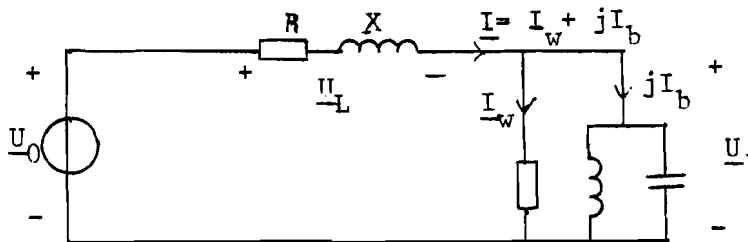
3.6: BLINDVERMOGEN.

Behalve het actieve vermogen speelt ook de arbeidsfactor ofwel het reaktieve vermogen een rol bij de spanningsvariaties en de thermische belasting. De invloed van het reaktief vermogen ofwel de blindstroom op de spanningvariatie zal uitgewerkt worden in hoofdstuk 4 wat handelt over 'spanningskompensatie'. De mogelijkheid van spanningsbeïnvloeding door blindstroom, die daar beschreven wordt, kan benut worden om 'schijnbare netverharding' te realiseren. Door een goede regeling van de arbeidsfactor kan namelijk de spanning binnen zekere grenzen van de belasting konstant gehouden worden. Verder zullen de grenzen van de spanningsafwijkingen (-10 % en + 5 %) pas bij grotere vermogensafname respectievelijk -teruglevering bereikt worden. In hoofdstuk 5 worden enkele blindstroomregelingen beschreven.

4. SPANNINGSKOMPENSATIE

Zoals al eerder is aangeduid is het mogelijk met blindstroomregeling de spanning te beïnvloeden. Over het algemeen is blindstroom een ongewenst verschijnsel: hoewel het geen energetisch nut heeft veroorzaakt het toch een verhoging van de lijnstroom en daarmee de dissipatie in de verbinding tussen de centrale en de verbruiker. Blindstroom wordt veroorzaakt doordat een aangesloten belasting niet zuiver resistief is maar ook capacitief of, meestal, inductief.

Behalve op de dissipatie heeft blindstroom ook een effect op de spanning op het aansluitpunt. Om dit effect toe te lichten wordt uitgegaan van een situatie zoals in figuur 9 is voorgesteld: een netaansluiting van een niet zuiver resistieve belasting.



figuur 9: Netaansluiting.

Het imaginaire deel ervan is gesymboliseerd door een parallelschakeling van een spoel en een condensator. Hiermee wordt aangegeven dat dat de blindstroom I_b zowel positief als negatief van teken kan zijn.

In deze figuur zijn diverse complexe grootheden aangegeven:

\underline{U}_0 : bronspanning;
 $\underline{I} = I_w + jI_b$: lijnstroom met reële (watt)komponent en
 imaginaire (blindstroom)komponent;
 $\underline{Z} = R + jX$: netimpedantie;
 \underline{U}_L : spanning over de kabel;
 \underline{U}_1 : spanning op het aansluitpunt.

Hiervoor gelden de volgende uitdrukkingen:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_1 + \underline{U}_L \quad (1)$$

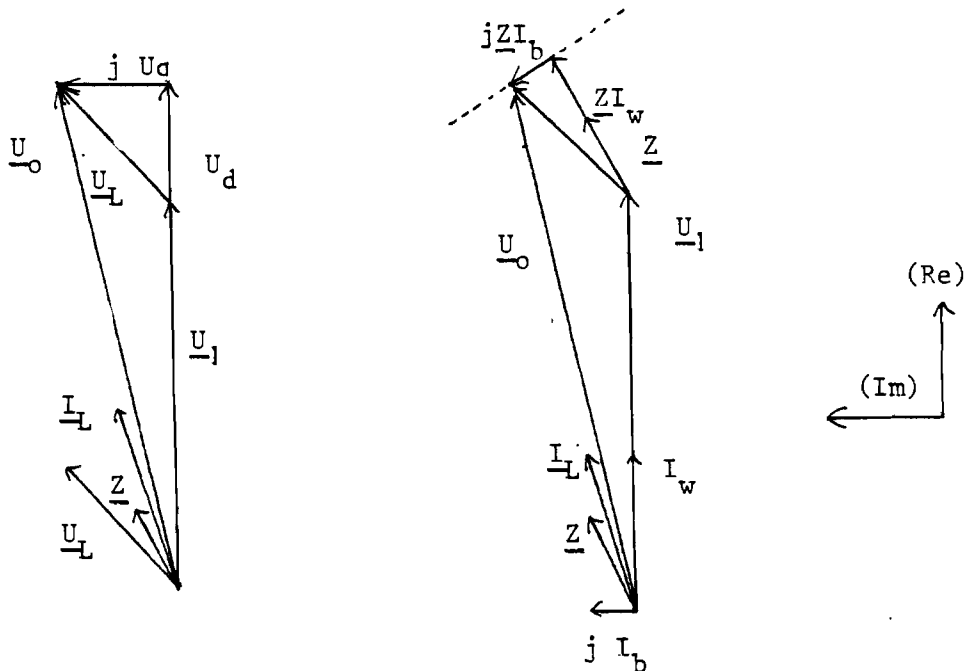
$$\underline{U}_L = \underline{I} * \underline{Z} = (R \cdot I_w - X \cdot I_b) + j(X I_w + R I_b) \quad (2)$$

Stel $\underline{U}_L = U_d + jU_q$,

waarbij $U_d = \text{Re} (\underline{U}_L) = R I_w - X I_b \quad (3)$

$$U_q = \text{Im} (\underline{U}_L) = X I_w - R I_b \quad (4)$$

In een vectordiagram kunnen deze vectoren als volgt worden weergegeven (zie figuur 10a):



figuur 10a

figuur 10b

Vectorvoorstellingen

Wat het teken van \underline{I}_b aangaat valt op te merken dat dit negatief is bij een ohms-inductieve belasting waarbij de stroom naijlt op de spanning. Er is gekozen voor verbruikersconventie.

In figuur 10a is de blindstroom dus positief van teken, evenals de wattstroom.

De vector \underline{U}_L kan ook op een andere manier ontleed worden:

$$\underline{U}_L = \underline{Z} \cdot \underline{I} = \underline{Z} \cdot \underline{I}_w + j \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I}_b$$

Zo kan deze figuur enigzins gewijzigd voorgesteld worden (zie figuur 10b).

Omdat in deze figuur 10b de vector $j \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I}_b$ niet loodrecht staat op \underline{U}_1 is het mogelijk, binnen zekere grenzen, met behulp van blindstroom de verhouding U_1 / U_0 en dus U_1 zowel te vergroten als te verkleinen.

In zwakke netten zijn spanningsvariaties een belangrijk probleem. Hier is dus wat aan te doen door de blindstroom regelbaar te

maken.

Verder is de waarde van de reactantie van de kabel van belang. Wanneer namelijk $U_L \ll U_0$ geldt als goede benadering voor de spanningsdaling ΔU :

$$\Delta U = U_0 - U_1 \approx U_d \quad (5)$$

$$\Delta U_{MAX} = U_0 \cdot 0,1 = 22 \text{ V} \quad (6)$$

$$U_d = R \cdot I_W - X \cdot I_b \quad (3)$$

Stel nu dat een verbruiker uitsluitend wattvermogen vraagt. Als ten gevolge van de daarvoor benodigde wattstroom geldt: $R \cdot I_W > 22 \text{ V}$, kan door een positieve blindstroom deze spanningsdaling gereduceerd worden. Dan moet gelden:

$$X \cdot I_b \geq R \cdot I_W - \Delta U_{MAX} \quad (7)$$

Bij grotere reaktantie X in de verbinding kan dan met minder blindstroom hieraan voldaan worden. Dit zou als voordeel hebben dat de blindstroomverliezen $R \cdot I_b^2$ dan lager zijn.

Als echter $X \ll R$ zal spanningskompensatie niet mogelijk zijn. In dat geval zou met toenemende I_b U_1/U_0 na een kleine stijging al snel weer gaan afnemen.

Het toepassen van 'zachtere' distributietransformatoren (met meer spreidingsinduktantie) of het toepassen van extra smoorspoelen in serie hiermee zijn dan mogelijke oplossingen. De spanning van het deel van het net vanaf deze reaktanties tot aan de verste uitlopers zou hierdoor geregeld kunnen worden als de regelaar hierop is aangesloten. Als nadeel hebben de (grotere) reaktanties dat wanneer de blindstroomregeling buiten bedrijf is de toegenomen gevoeligheid van de spanning voor blindstroom ongunstig is: de spanningsvariaties zullen dan juist groter zijn. Als een serie smoorspoel toegepast zou worden kan deze in zo'n geval kortgesloten kunnen worden.

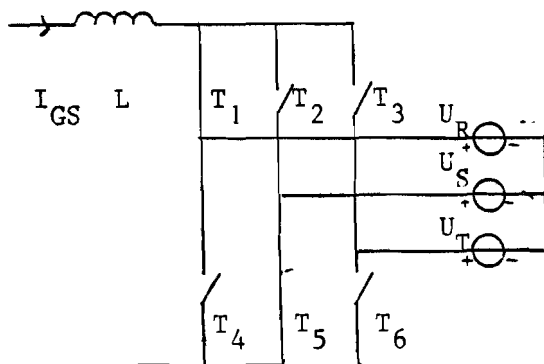
5. REGELING VAN DE ARBEIDSFACITOR

5.1. OVERZICHT VAN SYSTEMEN

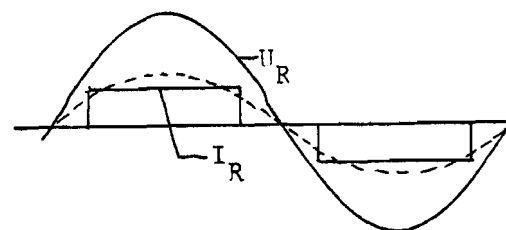
Voor de regeling van de arbeidsfactor waarop het afstudeerwerk betrekking heeft zijn verschillende methoden denkbaar die elk hun specifieke voor- en nadelen hebben. De regelaar van de arbeidsfactor wordt ook wel blindstroomregelaar genoemd.

Systeem 1: INVERTOREN.

In het kort komt de werking van een inverter erop neer dat de gelijkstroom door deze gelijkstroom-wisselstroom omzetter beurtelings steeds door twee fasen van het wisselspanningsnet gestuurd wordt (zie figuur 11a). Er ontstaan zo blokvormige fasestromen (zie figuur 11b).



figuur 11a



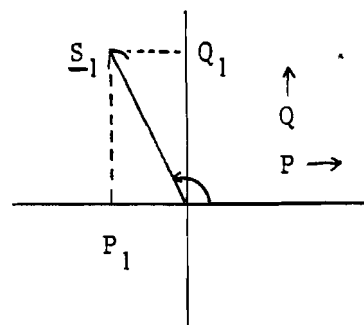
figuur 11b

Gelijkstroom- wisselstroom omzetting.

Dit sturen of schakelen gebeurt synchroon met de netfrequentie; het moment ervan wordt bepaald door het ontsteekmoment van de schakelelementen. Dit moment wordt door de ontsteekhoek α uitgedrukt. Deze hoek α is de hoek waarmee de grondharmonische van de fasestroom op de spanning najlt: Bij $\alpha = 0^\circ$ zijn de stroom

en spanning precies in fase (zoals in figuur 11b), bij $\alpha = 180^\circ$ precies in tegenfase. Voor $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ wordt dus inductief blindvermogen uit het wisselspanningsnet door de omzetter opgenomen; voor $180^\circ < \alpha < 360^\circ$ wordt inductief blindvermogen geleverd. Voor $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ wordt energie aan het net geleverd en voor $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ wordt energie opgenomen.

In een diagram (figuur 12) kan dit worden voorgesteld aan de hand van vier kwadranten.



figuur 12: Vier kwadranten.

In deze figuur wordt de lengte van de getekende vector bepaald door de waarden van de gelijkstroom en de wisselspanning.

Q , en P , zijn respectievelijk het door de omzetter opgenomen watt- en blindvermogen.

In de praktijk wordt een dergelijk systeem wel toegepast voor opwekking van zuiver blindvermogen [6], meestal echter wordt door een invertor zowel actief als reactief vermogen aan het driefasennet geleverd of onttrokken. In zo'n geval heeft dit systeem, evenals het volgende, het nadeel dat aan de gelijkspanningszijde de spanning en stroom met $\cos \alpha$ variëren, wat meestal ongewenst is. Desgewenst kan dit probleem ondervangen worden door toepassing van een chopper aan de gelijkspanningszijde.

Systeem 2: MUTATOREN.

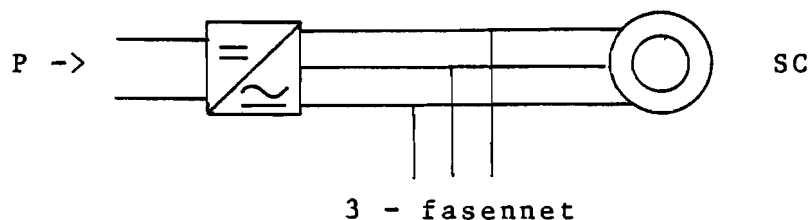
Mutatores zijn aan invertoren verwant. Het belangrijkste verschil ertussen is dat mutatoren voor het schakelen afhankelijk zijn van een externe zogenaamde kommutatiespanning. Dit komt later in hoofdstuk 6 nogmaals aan de orde.

Ze kunnen door deze afhankelijkheid slechts blindvermogen opnemen

omdat de ontsteekhoek de 180° niet mag overschrijden. In combinatie met condensatorbanken, parallel geschakeld aan de wisselspanningszijde, kan echter het blindvermogen zowel positief als negatief regelbaar worden.

Stelsel 3: SYNCHRONE CONDENSATOREN.

Synchrone machines leveren bij overbekrachtiging blindvermogen. Dergelijke machines kunnen speciaal hiervoor ontworpen worden en worden dan ook wel synchrone condensatoren (S.C.) genoemd. In windenergiesystemen worden ze wel toegepast waarbij via een mutator de energie aan het net wordt aangeboden (zie figuur 13).



figuur 13: Mutator/synchrone condensator-combinatie

De machine levert dan het blindvermogen dat de mutator, waarvan de ontsteekhoek kleiner is dan 180° , opneemt, en bovendien eventueel aan het net zelf. Tevens vermindert het de netvervuiling, veroorzaakt door de mutator.

Vanwege draaiende delen van de machine is het echter wellicht een duur systeem. Toch wordt het wel toegepast, zelfs in zeer grote HVDC-installaties [10].

Stelsel 4: GESCHAKELDE CONDENSATORBANKEN.

Deze blindstroomopwekkers, ook wel aangeduid met de afkorting T.S.C. (thyristor switched capacitors), worden ondermeer toegepast als $\cos \varphi$ -compensatoren voor motoren bij verbruikers, en als spanningsstabilisatoren bij lange hoogspanningslijnen. De condensatoren kunnen stuk voor stuk geschakeld worden, een

continue regeling is echter niet mogelijk. Uitschakeling vindt plaats bij stroomnuldoorgang wat overeenkomt met het moment van maximale spanning. Inschakeling kan daarom alleen plaatsvinden op het moment waarop de momentane netspanning hiermee overeenkomt, eens per periode dus. Hierdoor is sprake van een beperkte reaktietijd van het systeem.

Systeem 5: GESCHAKELDE SPOELEN.

Deze spoelen, ook wel met T.C.R. (thyristor controlled reactors) aangeduid, hoeven in tegenstelling tot condensatoren niet op één bepaald moment per periode ingeschakeld te worden.

Wel dient men, zeker in het geval waarin ijzerkernen toegepast worden, op hoge inschakelstromen verdacht te zijn. Door fase aansnijding is dus een snellere en continue regeling mogelijk. Helaas worden hierbij wel hogere harmonischen opgewekt. Spoelen nemen blindvermogen op. Door dit systeem te combineren met een (niet geregelde) condensatorbank is blindvermogen zowel variabel op te nemen als te leveren. De condensatorbank kan dan tevens als harmonischen filter dienst doen.

Systeem 1, de invertor, heeft het voordeel dat geen volumineuze en kostbare condensatorbanken nodig zijn.

Samen met systeem 2, de mutator, heeft het bovendien het voordeel dat de blindvermogenregeling gepaard kan gaan met vermogenslevering, wat het dus zeer geschikt maakt voor de regeling van de arbeidsfactor bij energieteeruglevering aan een zwak net.

5.2. TOEPASSING

Door de regeling van de arbeidsfactor ofwel de blindstroom kan bij transport van een zeker vermogen door de kabel het verliesvermogen in de kabel als ook de spanning op het aansluitpunt beïnvloed worden.

Voor het eerste, het verliesvermogen P_v , geldt:

$$P_v = 3 \cdot R \cdot (I_w^2 + I_b^2)$$

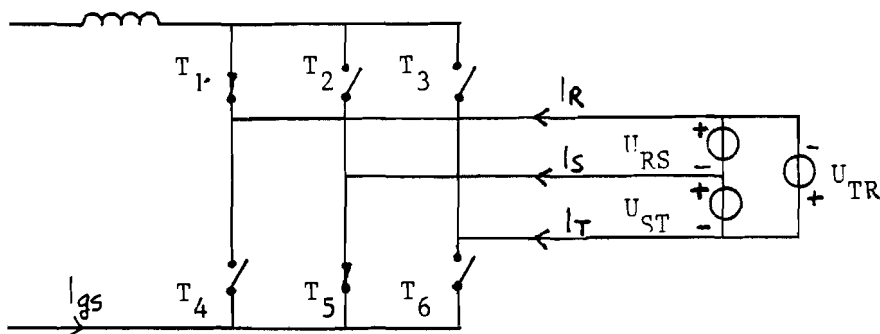
(R is de weerstand van de kabel). Bij een zeker transportvermogen, en dus een zekere wattstroom I_w , kan P_v geminimaliseerd worden door de blindstroom I_b op nul af te regelen. Dit is blindstroomcompensatie: compensatie van de blindstroom die op andere aansluitpunten van het zelfde net opgewekt wordt. Het net 'ziet' dan een arbeidsfactor van +1 of -1, afhankelijk van de richting van de vermogensstroom. Het tweede aspect, de beïnvloeding van de spanning is in hoofdstuk 4 al aan de orde geweest. Deze beïnvloeding is met 'spanningscompensatie' aangeduid. Het is afhankelijk van de grootte van de vermogensstroom door de kabel of nu blindstroomcompensatie dan wel spanningscompensatie plaats zou moeten vinden. Deze overweging wordt in hoofdstuk 7, over de regeling van de ontsteekhoek, verder uitgewerkt.

6. INVERTORBESCHRIJVING.

Bij het opstellen van dit hoofdstuk is gebruik gemaakt van informatie uit [7], [8] en [9].

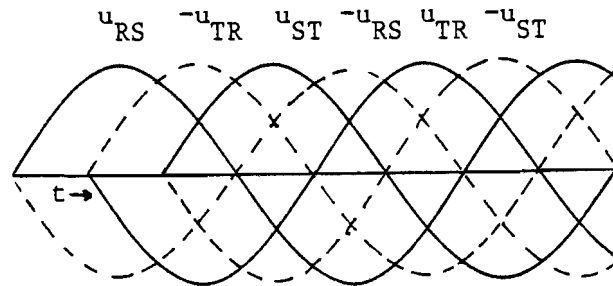
6.1. INLEIDING.

Voor omzetting van elektrische energie waarbij gelijkstroom overgaat in wisselstroom, wordt een inverter gebruikt die schematisch is voorgesteld in figuur 14.



figuur 14: Schematische invertervoorstelling

Door een smoorspoel wordt aan de gelijkstroomzijde een konstante stroom opgedrukt. Door een juiste manier van schakelen kan de stroom beurtelings in de verschillende fasen van het (driefasen)wisselspanningsnet gestuurd worden. Steeds zijn hierbij twee van de zes schakelaars gesloten, in figuur 14 dus T_1 en T_5 .



figuur 15: Gekoppelde spanningen

In figuur 15 zijn de drie gekoppelde netspanningen aangegeven:

u_{RS} , u_{ST} en u_{TR} , als ook $-u_{RS}$, $-u_{ST}$ en $-u_{TR}$.

In de tijd volgen deze zes elkaar aldus op:

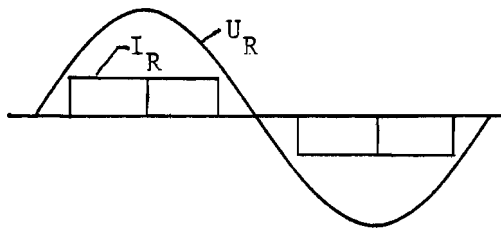
u_{RS} , $-u_{TR}$, u_{ST} , $-u_{RS}$, u_{TR} en $-u_{ST}$.

Aan deze 'zes' spanningsbronnen wordt successievelijk en periodiek de gelijkstroom toegevoerd. Men spreekt daarom ook wel van een zespulsige omzetter. Zes keer per periode (van 360 graden) wordt dus een andere combinatie van schakelaars gekozen. Het is niet moeilijk deze combinaties af te leiden:

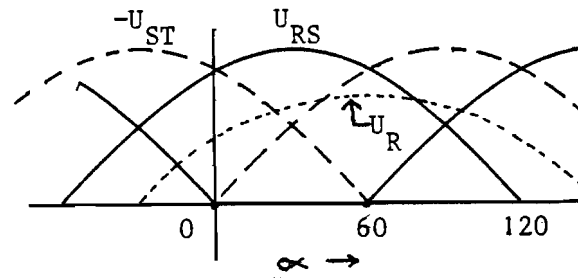
T1	T1	T2	T2	T3	T3
T5	T6	T6	T4	T4	T5
u_{RS}	$-u_{TR}$	u_{ST}	$-u_{RS}$	u_{TR}	$-u_{ST}$

Elke schakelaar blijkt twee maal achtereenvolgend een periode van 60 te geleiden.

Voor een bepaalde fase ziet het stroom- en spanningsverloop er dan als volgt uit (zie figuur 16a):



figuur 16a



figuur 16b

u_R is een van de drie fasespanningen, naast u_S en u_T , die ten opzichte van een sterpunt tezamen dezelfde drie gekoppelde spanningen opleveren (zie figuur 17). Zo geldt bijvoorbeeld

$$u_{RS} = u_R - u_S.$$

De z.g. ontsteekhoek α geeft aan op welk moment van een periode de stroom aan één der fasen wordt aangeboden. In figuur 16a geldt $\alpha = 0^\circ$. Het komt erop neer dat nu de grondharmonische van de lijnstroom precies in fase is met de desbetreffende fasespanning. Per definitie is α nul als wordt geschakeld op het moment dat de desbetreffende gekoppelde spanning hoger wordt dan de voorafgaande ($-u_{ST}$ in figuur 16b). Dit heet het natuurlijke ontsteekmoment. De ontsteekhoek kan in principe elke waarde tussen 0° en 360° aannemen.

Voor $\alpha > 90^\circ$ ijlt de grondharmonische van de stroom meer dan 90° na op de spanning. Hierdoor wordt de richting van de energiestroom omgekeerd. Men spreekt dan van wisselrichting in plaats van gelijkrichting omdat de energie naar de wisselspanningszijde stroomt.

6.2: KOMMUTATIE.

Bij elke overgang van 'schakelaarkombinaties' wordt de stroom overgenomen door een andere schakelaar aan de zelfde gelijkspanningsrail. Deze overgang heet kommutatie. Als

schakelaars worden veelal thyristoren gebruikt. Het in geleiding brengen van zo'n element gebeurt door aan de sturingang een z.g. ontsteekpuls toe te dienen.

Laten we als voorbeeld overgang T1/T5 - T1/T6 beschouwen (zie figuur 14).

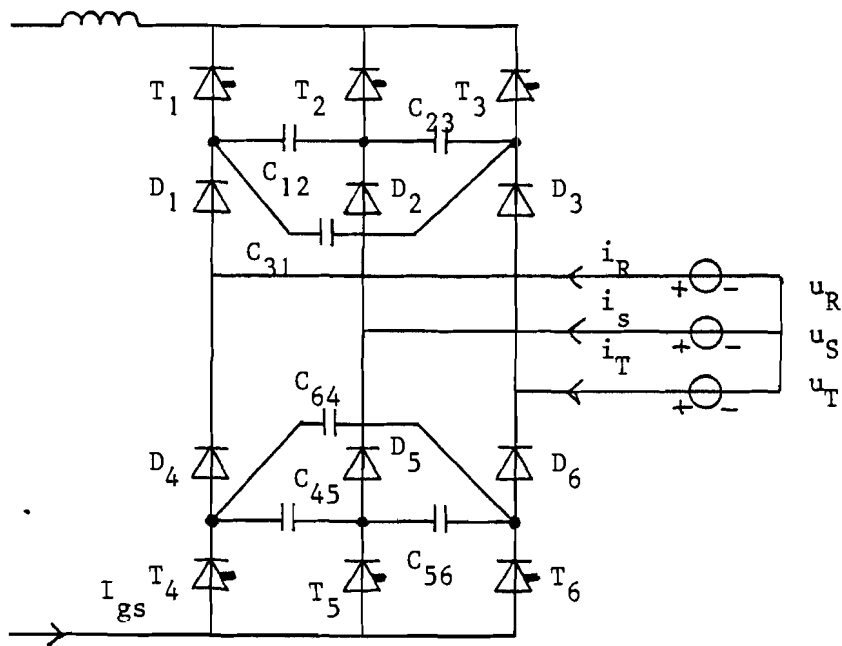
Bij sluiting van T6 moet de 'vorige' schakelaar, T5, snel geopend worden, anders zou er een hoge kortsluitstroom door de fasen ontstaan. Echter, aangezien in het praktische geval de schakelaars (thyristoren) slechts in één richting geleiden zal nadat de ruimtelading, die in de geleidende thyristor T5 aanwezig is, weggevloeid is, T5 een onderbreking van het circuit realiseren.

Vanwege het sterk inductieve karakter van de stroom aan de gelijkspanningsingang is het anderzijds niet mogelijk T5 te openen voordat T6 gesloten wordt.

Als $\alpha < 180^\circ$ zal de waarde van de 'volgende' spanning ($-u_{TR}$) hoger zijn bij inschakelen dan de oude (u_{RS}). Hierdoor ontstaat over de schakelthyristor T5 een negatieve spanning waardoor deze vanzelf uit geleiding gaat. Dit heet netkommutatie: de netspanning levert de tegenspanning (kommutatiespanning) voor T5. Als $\alpha > 180^\circ$ lukt dit niet meer: $-u_{TR} < u_{RS}$.

Op een andere wijze moet nu de kommutatiespanning aangelegd worden; men spreekt dan van geforceerde kommutatie.

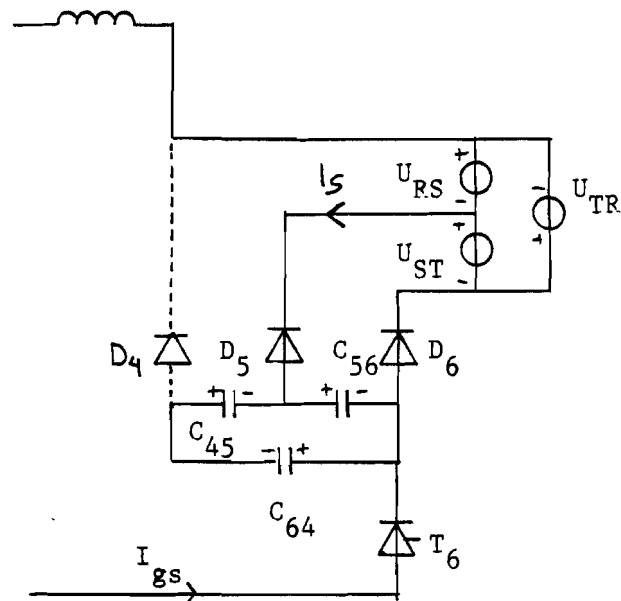
De omzeterschakeling wordt hiertoe uitgebreid met dioden en condensatoren (zie figuur 17):



figuur 17

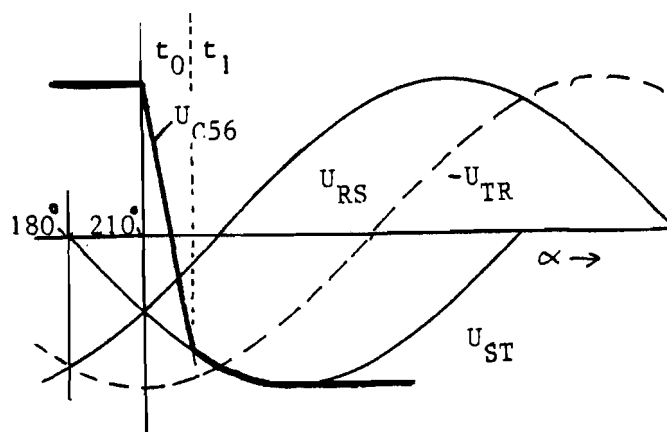
De condensatoren leveren nu de kommutatiespanning. Meer in detail gaat het als volgt in zijn werk (zie figuren 18a en 18b): Als b.v. voor $\alpha = 210^\circ$ T6 onstoken wordt neemt deze de stroom I_{gs} , die dan nog door T5 loopt, over. T5 gaat uit geleiding omdat $u_{C56} > 0$ waardoor bij het ontsteken van T6 een negatieve spanning over T5 aangebracht wordt.

Via het condensatornetwerk en diode D5 kan de stroom I_{gs} nog enige tijd door fase S blijven lopen.



figuur 18a: Kommutatie-circuit

Met gelijkstroom $\frac{2}{3} I_{gs}$ wordt zo C_{56} (parallel aan C_{45} en C_{64}) ontladen totdat de condensatorspanning $u_{C56} < u_{ST}$. Dan wordt de stroom I_{gs} van D_5 door D_6 overgenomen (diodekommutatie) en wordt C_{56} verder geleidelijk ontladen tot $u_{C56} = -\hat{u}$ (zie figuur 18b).



figuur 18b: Condensator-ontlading.

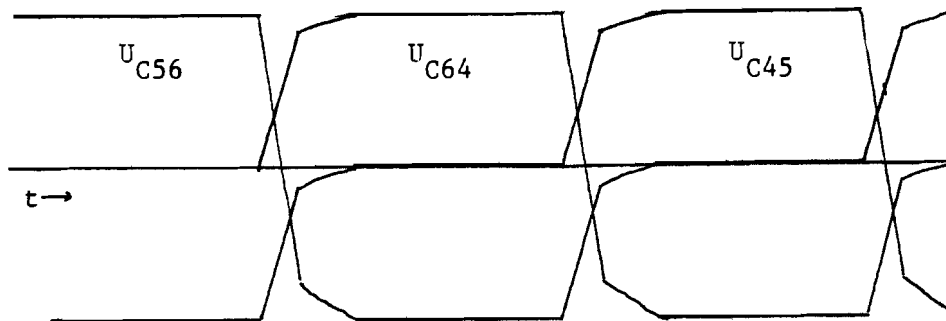
\hat{u} is de topwaarde van de gekoppelde spanning.

Tijdens deze geleidelijke ontlading blijft D_5 nog een kleine

stroom voeren:

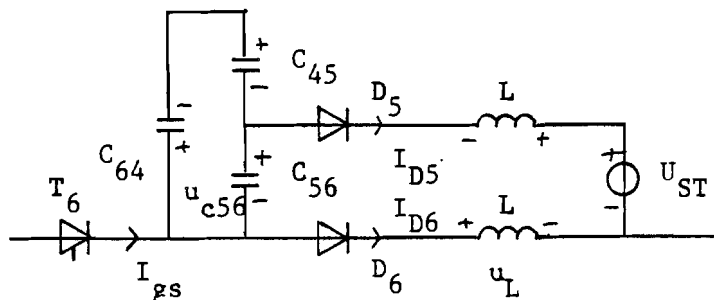
$$i_{D5} = \frac{3}{2} C \, d u_{ST} / dt.$$

Tegelijk worden C_{45} en C_{64} opgeladen met $I_{gs}/3$ zodat het verloop van de drie condensatorspanningen er als volgt komt uit te zien (figuur 19):



figuur 19: Condensatorspanning-verloop.

In de praktijk is het zo dat aan de wisselspanningszijde inductiviteit (L) in de faselijnen aan te treffen is. De diodekommutatie verloopt dan langzamer omdat de fasestromen niet abrupt afgebroken kunnen worden. Er is dan sprake van een LC-slingerkring (zie figuur 20).



figuur 20: Kommutatie-slingerkring

Bij het begin van de diodekommutatie (op $t = t_1$) loopt I_{gs} door D_5 . i_{D5} neemt daarna af volgens

$$i_{DS}(t) = I_{gs} \cdot \cos(\omega_0(t-t_1))$$

waarin: $\omega_0 = 1 / \sqrt{(2L \cdot \frac{3}{2}C)} = 1 / \sqrt{(3LC)} \quad (8)$

totdat $i_{DS} = 0$ op $t = t_2$.

Op $t = t_1$ geldt $u_{C56} = -u_{ST} = \hat{u} \sin \alpha$ (zie figuur 18b). Tijdens de diodekommutatie ($t_1 < t < t_2$) daalt u_{C56} , ten gevolge van de ontlaadstroom $i_{DS}(t)$, met de waarde

$$-\Delta u_{C56} = -\frac{2}{3C} \int_{t_1}^{t_2} i_{DS} dt = I_{gs} \sqrt{(2L / \frac{3}{2}C)}$$

Nu wordt ingevoerd:

$$Z_0 = (2L / -C) = (4L / 3C) \quad (9)$$

zodat

$$-\Delta u_{C56} = I_{gs} \cdot Z_0$$

Door de diodekommutatie bereikt u_{C56} de waarde

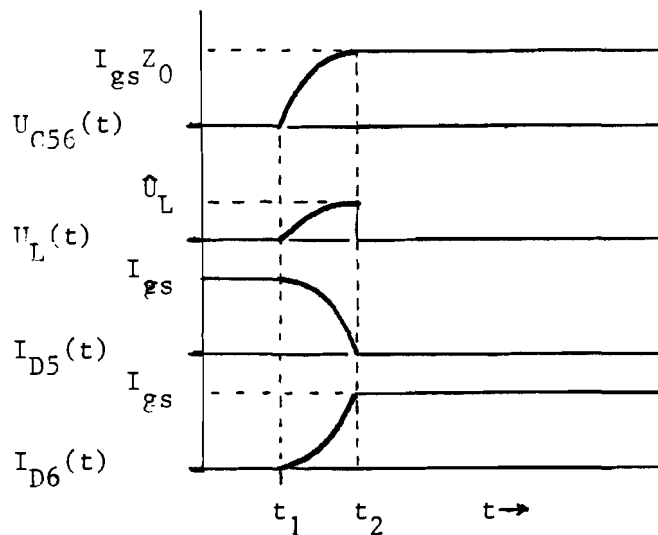
$$u_{C56}(t_2) = u_{C56}(t_1) - \Delta u_{C56} = \hat{u} \sin \alpha - I_{gs} \cdot Z_0 \quad (10)$$

Gedurende de diodekommutatie treedt een spanningspiek op aan de aansluitklem van de S-fase ter grootte van

$$-\hat{u}_L = -\frac{1}{2} \Delta u_{C56} = \frac{1}{2} I_{gs} \cdot Z_0 = I_{gs} \sqrt{(L / 3C)} \quad (10a)$$

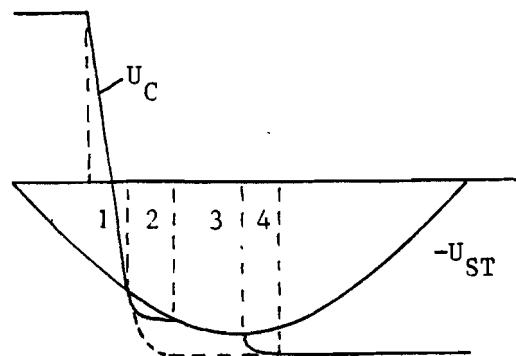
en aan de T-fase ter grootte van $+\hat{u}_L$.

Ook dit wordt geïllustreerd door figuur 21.



figuur 21: Kommutatie verschijnselen.

Bij geringe extra ontlading Δu_{C56} als gevolg van de diodekommutatie zal een derde ontladingsfase volgen als u_{ST} de waarde $-u_{C56}$ zal overschrijden (zie figuur 22), en tenslotte een vierde wanneer ongeveer 60 graden later ten gevolge van de diodekommutatie waarbij D2 de stroom van D1 overneemt, een piek op u_{ST} ontstaat ter grootte van $-\hat{u}_L$ waardoor de spanning die de condensator op dat moment heeft ($-\hat{u}$) overschreden wordt.



figuur 22: Vier condensator-ontladingsfasen.

Er is in feite nog een fenomeen, wat echter bij een inductieve wisselspanningsverbinding en zeker bij grotere stromen

verwaarloosd kan worden. Het betreft het opladen van C_{45} wanneer C_{56} ontladen wordt. Wanneer namelijk $u_{C_{45}}$ de waarde u_{R_5} overschrijdt zal D_4 in geleiding gaan (zie figuur 18a). Hierdoor zal i_{D_5} al iets afnemen voordat de beschreven diodekommutatie begint, waardoor $-\Delta u_{C_{56}}$ minder zal zijn, omdat $-\Delta u_{C_{56}} = i_{D_5}(t_1) \cdot Z_0$. Als eenmaal de diodekommutatie op gang komt, gaat vanwege de spanningspiek over de inductantie in de S-fase (\hat{u}_L) D_4 weer uit geleiding omdat dan $u_{C_{45}} < u_{R_5} + \hat{u}_L$, zodat dit slechts een kortstondig en vrij onbelangrijk verschijnsel is. (met name in [8] is dit ook beschreven).

6.3. DIMENSIONERING.

Een interessante grootte is de grenswaarde I_g van de gelijkstroom waarboven de beschreven derde en vierde ontladingsfasen niet meer voorkomen, waardoor de condensatorspanning een verloop als van de stippellijn in figuur 22 krijgt. Uit deze figuur is op te maken dat dan moet gelden:

$$\hat{u} \sin \alpha - I_{gs} \cdot Z_0 < -\hat{u} \quad (11)$$

en

$$\begin{aligned} \hat{u} \sin \alpha - I_{gs} \cdot Z_0 < \hat{u} \left(\sin \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right) - \hat{u}_L = \\ = \hat{u} \left(\sin \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right) - I_{gs} \cdot Z_0 / 2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$(11) \Rightarrow I_{gs} > \frac{\hat{u}}{Z_0} (1 + \sin \alpha) \quad (\text{maximaal } 2 \frac{\hat{u}}{Z_0} \text{ voor } \alpha = 90^\circ)$$

$$(12) \Rightarrow I_{gs} > \frac{2\hat{u}}{Z_0} \left(\cos \alpha - \frac{5\pi}{6} \right) \quad (\text{maximaal } 2 \frac{\hat{u}}{Z_0} \text{ voor } \alpha = \frac{5}{6}\pi = 150^\circ)$$

Hierbij is het tijdsverloop van ontlaadfase 1 verwaarloosd. In wisselrichtbedrijf ($180^\circ < \alpha < 360^\circ$) geeft (11) de grens

$$I_{gs} > \frac{\sqrt{3}\hat{u}}{Z_0} \quad \text{voor } \alpha = 180^\circ \text{ of } \alpha = 360^\circ$$

$$\text{en (12): } I_{gs} > \sqrt{3} \frac{\sqrt{3}\hat{u}}{Z_0} \quad \text{voor } \alpha = 180^\circ .$$

Er kan dus gesteld worden: $I_g = \sqrt{3} \hat{u} / Z_0$ (12a)

Voor de maximale condensatorspanning geldt volgens (10):

$$\hat{u}_c = u_{C_{MAX}} = - \hat{u} \sin \alpha + I_g \cdot Z_0 \quad (13)$$

met een bovengrens

$$\hat{u}_{C_{MAX}} = \hat{u} + I_g \cdot Z_0 \quad \text{voor } \alpha = 90^\circ \text{ of } \alpha = 270^\circ$$

Deze maximale spanningsbelastbaarheid moet ook gelden voor de thyristoren.

De hersteltijd t_q van de thyristoren, de tijd waarna ze, na kommutatie, een positieve (blokkeer)spanning kunnen verdragen, moet kleiner zijn dan de ontlaadtijd van het condensatornetwerk tot nul volt:

$$t_q < \frac{3}{2} C \hat{u} / I_g$$

Zo is een minimale condensatorwaarde af te leiden van de maximale gelijkstroom en de thyristorhersteltijd.

Een tweede overweging voor de bepaling van de condensatorwaarde betreft de maximaal toelaatbare spanningspiek op het net of over de condensatoren en de thyristoren:

$$\hat{u}_L = \frac{1}{2} I_g \cdot Z_0 = I_g \sqrt{L / 3 C} \quad (10a)$$

$$u_{\text{piek}} \text{ (gekoppelde spanning) } = \hat{u}_{C_{MAX}} = \hat{u} + 2 \hat{u}_L = \hat{u} + I_g \cdot Z_0$$

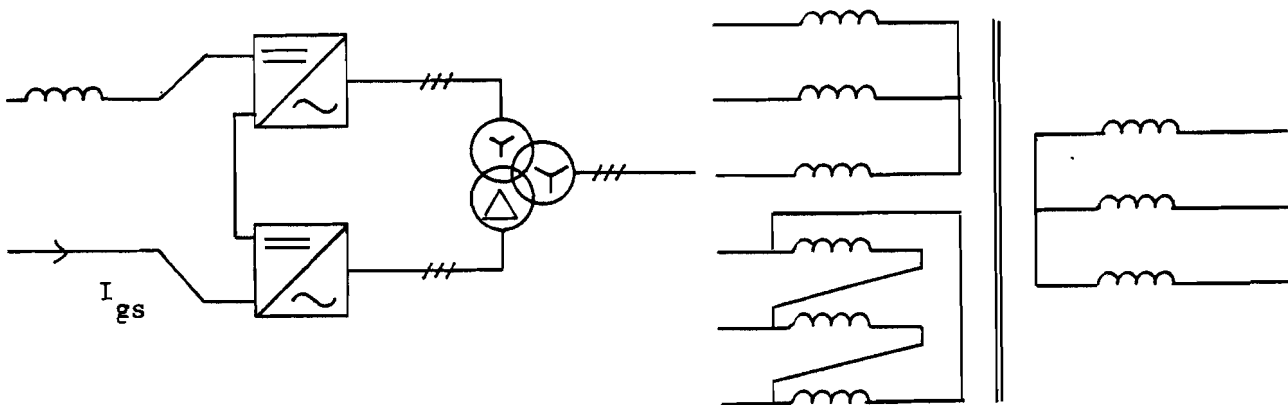
Op grond van deze overwegingen kan het nodig of gewenst zijn C groter te kiezen dan de in het voorgaande gevonden minimale waarde.

6.4. NETVERVUILING.

Een belangrijk aspect van de beschreven inverter is de netvervuiling die deze veroorzaakt.

In de eerste plaats zijn er de z.g. hogere harmonischen die ten gevolge van de blokvormige fasestromen optreden. Deze blokvorm kan namelijk opgevat worden als een sinusvormige stroom met netfrequentie (grondharmonische), en daarop gesuperponeerd een aantal hogere harmonischen. In dit geval treden hogere harmonischen met respectievelijke frequenties van $6N \pm 1$ op, met $N = 1, 2, 3, \dots$ en met amplitudes $I / (6N \pm 1)$, waarbij \hat{i}_1 de amplitude van de grondharmonische is.

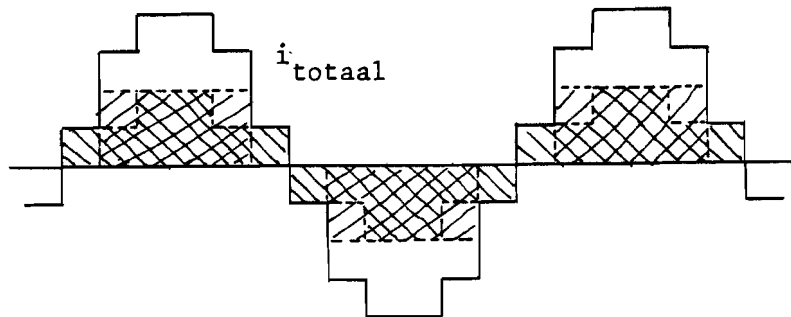
Door deze zogenaamde zespulssige inverter aan gelijkspanningszijde in serie te schakelen met een identieke omzetter en deze m.b.v. een $\lambda - \Delta$ transformator te koppelen aan wisselspanningszijde ontstaat een 12-pulsig systeem (zie figuur 23a).



figuur 23a
12-pulsige inverter

figuur 23b
Transformatorkoppeling

In figuur 23b wordt de transformatorkoppeling nader toegelicht. Als uitgangsstroom van de transformator ontstaat een 'trapjeskromme' zoals is aangegeven in figuur 24.



figuur 24: '12-pulsige' wisselstroom

Hierin is met de arceringen aangegeven hoe de uitgangsstroom wordt verkregen als sommatie van de twee ingangsstromen.

De optredende harmonischen zijn nu $6N \pm 1$ met $N = 2, 3, 4, \dots$ waardoor de belangrijkste (laagste) storende harmonischen nu de 11^e en de 13^e zijn, met amplituden $\hat{i}_1 / 11$ en $\hat{i}_1 / 13$.

Door verdere uitbreiding is zo de harmonische vervorming te reduceren. De kostprijs van de extra elementen en de transformator zal bij deze uitbreiding een beperkende factor zijn.

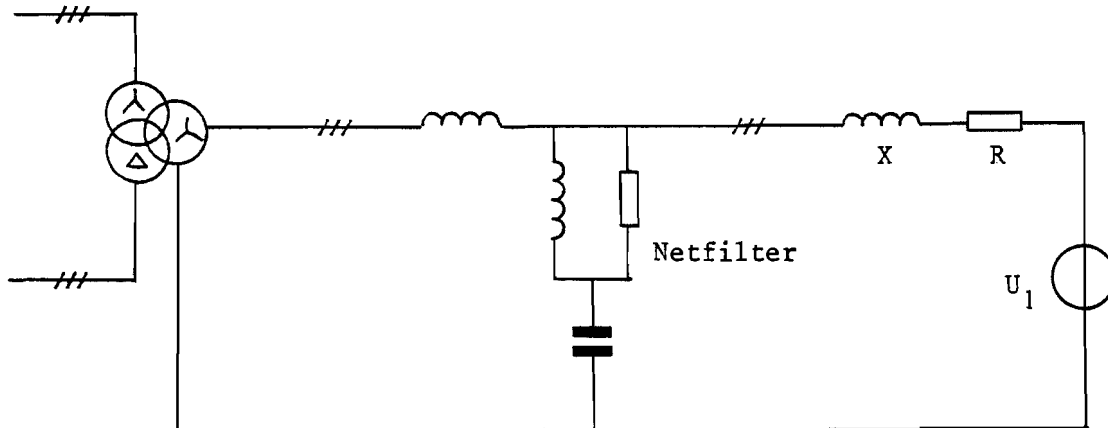
Een andere mogelijkheid tot vermindering van de netvervuiling is het toepassen van filters welke afgestemd zijn op de $6N \pm 1$ frekwenties.

In de laboratoriumopstelling waarmee geëxperimenteerd is en die in hoofdstuk 9 verder beschreven wordt, is een 12-pulsig systeem gekozen.

Een tweede aspekt van de netvervuiling betreft het ontstaan van kommutatiepieken, wat inherent is aan het beschreven invertersysteem. Uit het voorgaande is gebleken dat dit beperkt kan worden door toepassing van grotere kommutatiecondensatoren. Als uitdrukking voor deze pieken bleek namelijk te gelden:

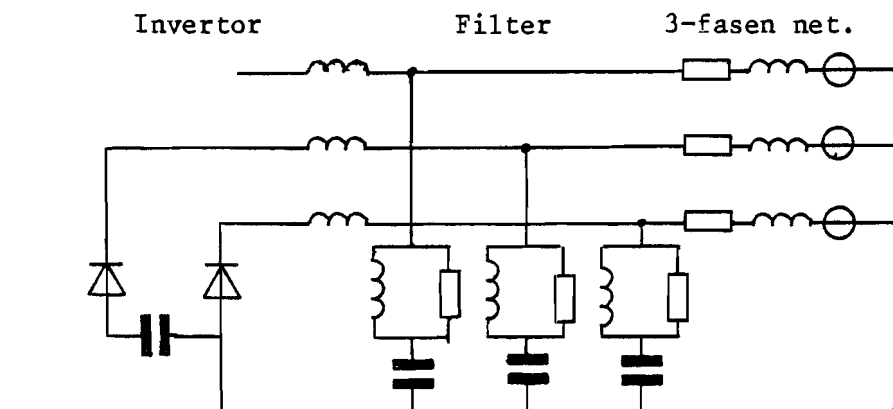
$$\hat{u}_L = \frac{1}{2} I_{gs} \cdot Z_0 = \frac{1}{2} I_{gs} \sqrt{(4L / 3C)} \quad (10a)$$

Een andere oplossing is het toepassen van een LC-filter aan de inverter-uitgang (zie figuur 25).



figuur 25: Toepassing netfilter

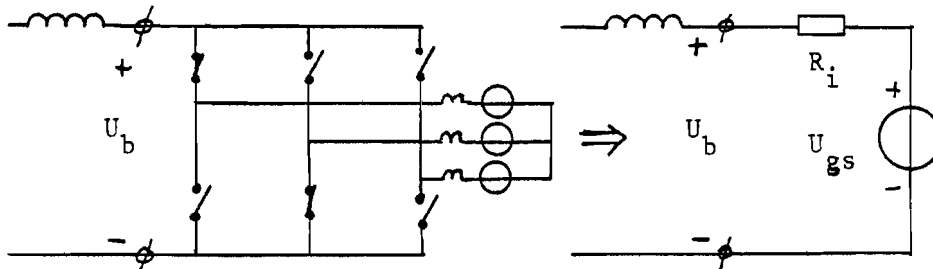
Nu worden de inductieve fasestromen door het filter opgenomen bij kommutatie in de inverter, waardoor dankzij de demping in het filter nog slechts geringe opslingering optreedt. Tijdens okommutatie ziet het werkzame deel van de slingerkring er als volgt uit (zie figuur 26):



figuur 26: Kommutatie-slingerkring

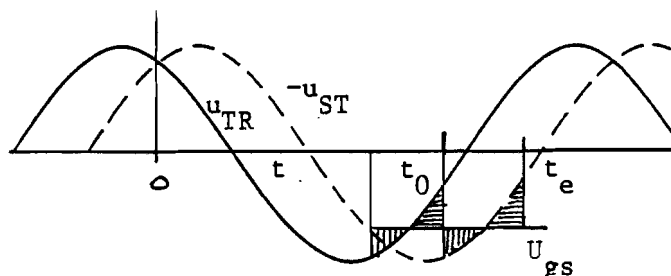
6.5. VERVANGINGSSCHEMA GELIJKSPANNINGSZIJDE

Zowel voor de gelijkspanning-ingangszijde als voor de wisselspanning-uitgangszijde van de inverter is een vervangingsschema op te stellen. Hierbij zijn het om te zetten elektrisch vermogen en de ontsteekhoek α de belangrijkste bepalende grootheden. Voor de gelijkspanningszijde is het vervangingsschema als volgt afgeleid:



figuur 27: Vervangingsschema gelijkspanningszijde

Als we de invertoringang voorstellen door middel van een ideale gelijkspanningsbron U_{gs} met een quasi-ingangsweerstand R_i (zie figuur 27) kan aan de hand van figuur 28 een afleiding voor de gemiddelde waarde van deze gelijkspanning U_b gemaakt worden. De smoorspoel aan de ingang van de inverter (zie figuur 27) vereffent het momentane spanningsverschil met de thyristorbrug.



figuur 28: Afleiding van U_{gs}

Voor de waarde U_{gs} moet gelden:

$$U_{gs} = \frac{1}{t_e - t_0} \int_{t_0}^{t_e} -u_{ST} dt$$

Het tijdsverloop ($t_e - t_0$) bij de zespulsige invertor is $1/6$ van een periodetijd. Zo is af te leiden dat

$$U = \frac{3}{\pi} \hat{u} \cos \alpha \quad (14)$$

waarin \hat{u} de amplitude van de gekoppelde wisselspanning is.

$\hat{u} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_1$ zodat

$$U_{gs} = \frac{3 \sqrt{6}}{\pi} U_1 \cos \alpha \quad (15)$$

In het voorgaande is al een beschouwing gewijd aan de afhankelijkheid van U_1 (de effectieve waarde van de grondharmonische van de fasespanning) van de fasestroom (zie hoofdstuk 4, vergelijkingen 3 en 5):

$$U_1 = U_0 - \Delta U = U_0 - R I_W + X I_b \quad (16)$$

$$I_W = I \cos \varphi \quad (17)$$

$$I_b = I \sin \varphi \quad (18)$$

Als nu alleen de invloed van $\underline{I}_1 = \underline{I} - \underline{I}_0$ op de spanning U_1 beschouwd wordt, kan U_{10} als invertor-nulllastspanning ingevoerd worden: $U_{10} = U_1$ voor $\underline{I}_1 = 0$.

Dan geldt overeenkomstig vergelijking (16):

$$U_1 = U_{10} - R I_{W1} + X I_{b1} \quad (16a)$$

$$I_{W1} = I_1 \cos \alpha \quad (17a)$$

$$I_{b1} = -I_1 \sin \alpha \quad (18a)$$

Voor het vervolg van de afleiding zal als vereenvoudiging U_0 in plaats van U_{10} gebruikt worden.

Voor I_1 valt af te leiden:

$$P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \alpha \quad (19)$$

Bovendien geldt: $P_1 = I_{gs} U_{gs} \Rightarrow I_{gs} = P_1 / U_{gs} \quad (20)$

Uit substitutie van (19) en (15) in (20) volgt:

$$I_{gs} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{gs} \quad (21)$$

Uit substitutie van (21), (17a) en (18a) in (16a) volgt

$$U_{gs} = U_0 - (R \cos \alpha - X \sin \alpha) I_{gs} \sqrt{6}/\pi$$

waaruit volgt (met (14) en (15)):

$$\begin{aligned} U_b &= 3/\pi \hat{u} \cos \alpha = 3 \sqrt{6}/\pi U_1 \cos \alpha = \\ &= 3\sqrt{6}/\pi U_0 \cos \alpha - [3\sqrt{6}/\pi (R \cos \alpha - X \sin \alpha) \sqrt{6}/\pi^2 \cos \alpha] I_{gs} \end{aligned} \quad (22)$$

De eerste term in vergelijking 22 stelt de ideale bronspanning U_{gs} voor uit figuur 27 en de tweede term de ingangsweerstand R :

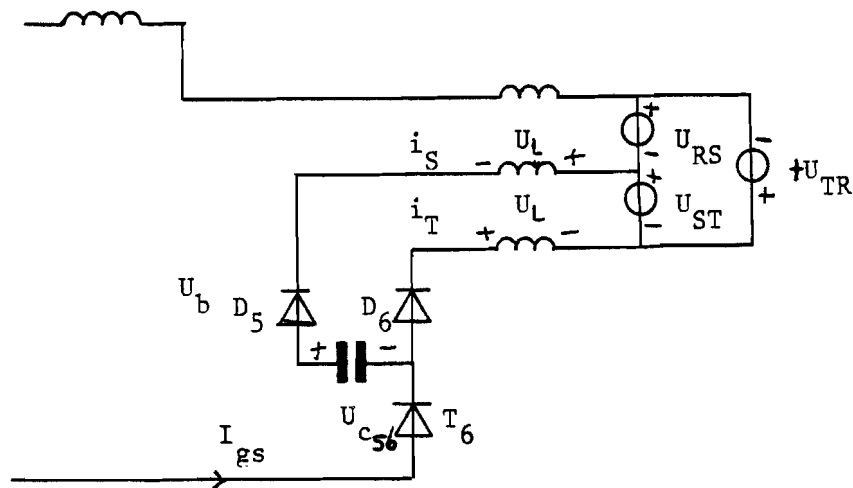
$$U_{gs} = 3\sqrt{6}/\pi U_0 \cos \alpha \quad (23)$$

$$R_i = 18/\pi^2 (R \cos \alpha - X \sin \alpha) \cos \alpha \quad (24)$$

Bij vergelijking 24 zij opgemerkt dat de weerstand R_i' nul wordt voor $\alpha = \arctan (R / X)$ en voor $\alpha = \pi + \arctan (R / X)$.

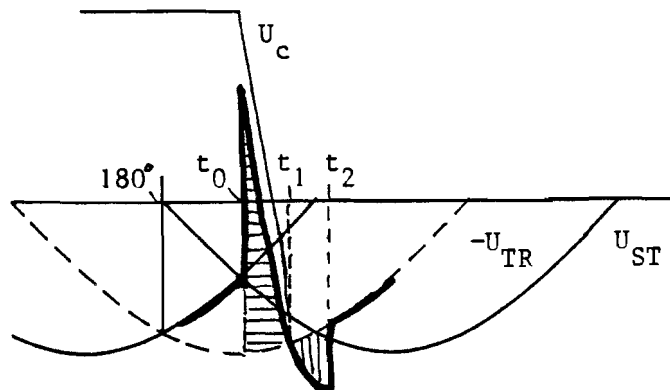
6.5.1. KOMMUTATIE-INVLOEDEN

Behalve de bovenstaande beschouwing is ook de kommutatie van belang voor het opstellen van het gelijkspanningsmodel. Hierbij wordt er vanuitgegaan dat het filter een 'goede' wisselspanningsvorm doet ontstaan zodat in het model van figuur 29 de lijnreaktanties en het filter zelf niet opgenomen behoeven te worden.



figuur 29: Kommutatie-slingerkring

Bijvoorbeeld bij het ontsteken van T6 zal aan de gelijkspanningsrail de spanning U niet direct de waarde $-u_{TR}$ aannemen, maar een verloop vertonen zoals in figuur 30 is aangegeven met de dik getrokken lijn.



figuur 30: Verloop ingangsspanning

Het kommutatieverschijnsel is in twee delen te splitsen. Voor $t_0 < t < t_1$, het eerste deel, treedt een gemiddelde afwijking van de in het voorgaande gevonden U_{GS} op ter grootte van $\overline{\Delta U_{b_1}}$, en voor $t_1 < t < t_2$, het tweede deel, $\overline{\Delta U_{b_2}}$.

Stel $T_1 = t_1 - t_0$ en $T_2 = t_2 - t_1$.

Als uitdrukking voor de totale $\overline{\Delta U_b}$ is dan te geven:

$$\overline{\Delta U_b} = 6 f (T_1 \overline{\Delta U_{b_1}} + T_2 \overline{\Delta U_{b_2}}) \quad (25)$$

waarin $f = \omega / 2\pi$ de netfrequentie is.

De factor $6 f$ beduidt dat 6 maal per netspanningsperiode het kommutatieverschijnsel optreedt.

Deel 1 ($t_0 < t < t_1$): Hiervoor geldt :

$$\begin{aligned} U_b &= u_{RS} + u_L + u_{C_{56}} = \\ &= -u_{TR} + (-u_{ST} + u_L - u_{C_{56}}) \end{aligned} \quad (26)$$

Eveneens geldt :

$$u_L(t) = 0$$

$$u_{c_{SB}}(t) = \hat{u}_c - \frac{1}{\frac{3}{2}C} I_{gs}(t - t_0) \quad (27)$$

$$u_{ST}(t) \approx \hat{u} \sin \alpha \quad (28)$$

$$\Rightarrow \Delta u_{b_1}(t) = -u_{ST}(t) + \left(\hat{u}_c - \frac{I_{gs}}{\frac{3}{2}C} (t - t_0) \right) \quad (29)$$

Bovendien geldt: $\hat{u}_c = I_{gs} \cdot Z_0 - \hat{u} \sin \alpha \quad (13)$

$$\Delta U_b(t_1) = 0 \quad (30)$$

zodat

$$\Delta U_{b_1} = \frac{1}{2} \Delta U_b(t_0) = \frac{1}{2} I_{gs} \cdot Z_0 - \hat{u} \sin \alpha \quad (32)$$

Voor vergelijking (28) is benaderend aangenomen dat u_{ST} konstant is in het tijdsinterval $[t_0, t_1]$. Ook vergelijking (13) geeft, om dezelfde reden, een benadering van de werkelijkheid:

$$u_{ST}(t_1) = u_{ST}(t_0) = \hat{u} \sin \alpha$$

De tijdsduur $T_1 = t_1 - t_0$ is af te leiden uit de ontlaadtijd van het condensator netwerk van \hat{u}_c tot u_{ST} :

$$\hat{u}_c - I_{gs} \cdot T_1 / \left(\frac{3}{2} C \right) = \hat{u} \sin (\alpha + \omega T_1) \approx \hat{u} (\sin \alpha + \omega T_1 \hat{u} \cos \alpha)$$

$$T_1 \frac{I_{gs} Z_0 - 2 \hat{u} \sin \alpha}{\hat{u} \omega \cos \alpha + 2 I_{gs} / \left(\frac{3}{2} C \right)}$$

$$\Rightarrow T_1 \approx \frac{3}{2} C \cdot Z_0 - 3 \frac{C}{I_{gs}} \hat{u} \sin \alpha = (\sqrt{3 L C}) - 3 \frac{C}{I_{gs}} \hat{u} \sin \alpha \quad (33)$$

Zo is af te leiden door samenvoeging van (32) en (33):

$$\begin{aligned}
 T1 \cdot \overline{\Delta U_{b1}} &= (\sqrt{3 L C} - 3 \frac{C}{I_{gs}} \hat{u} \sin \alpha) (\frac{1}{2} I_{gs} \cdot Z_0 - \hat{u} \sin \alpha) \\
 &= I_{gs} \cdot L - 2 \sqrt{3 L C} \hat{u} \sin \alpha + 3 \frac{C}{I_{gs}} (\hat{u} \sin \alpha) \quad (34)
 \end{aligned}$$

Deel 2 ($t_1 < t < t_2$):

Voor $t = t_1$ geldt $\Delta U_{b2} = 0$ en $i_{D5} = -i_S = I_{gs}$.

Vervolgens daalt de stroom in de S-fase ($= -I_{D5}$) tot nul volgens de beschrijving van de slingerkring van figuur 20:

$$i_{D5}(t) = I_{gs} \cdot \cos(\omega_0(t-t_1))$$

De stroom in de T-fase stijgt tot I_{gs} (zie figuur 21, i_{D5} en i_{D6}).

Nu pas kommuteert dus de lijnstroom.

Voor U_b geldt in deze periode:

$$U_b(t) = -u_{TR} - u_L(t) \quad (35)$$

De lijnkommutatie vindt plaats gedurende de tijd $T2 = t_2 - t_1$, een kwart van de slinger-periodesduur. Voor $T2 \cdot \overline{\Delta U_{b2}}$ is af te leiden, met inachtneming van (8) en (9):

$$T2 \overline{\Delta U_{b2}} = - \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} I_{gs} Z_0 \sin \omega_0 t \, dt = - I_{gs} Z_0 / 2 \omega_0 = - I_{gs} L \quad (36)$$

Als samenvoeging van (34) en (36) kan volgens (25) gesteld worden:

$$\overline{\Delta U_b} = 6 f [-2 \sqrt{3 L C} \hat{u} \sin \alpha + 3 \frac{C}{I_{gs}} (\hat{u} \sin \alpha)] \quad (37)$$

Opgemerkt dient te worden dat vanwege de aannamen van vergelijkingen (13) en (28) ook dit een benadering van de werkelijkheid is.

In de laboratoriumopstelling zijn de volgende waarden aan te treffen:

$$\hat{u} = 233 \text{ V}$$

$$C = 12 \text{ } \mu\text{F}$$

$$L = 300 \text{ } \mu\text{H}$$

Voor $\alpha = 210^\circ$ en $I_{gs} = 100 \text{ A}$ geldt bijvoorbeeld: $U_b = 8,8 \text{ V}$

Dit is ca. 5 % van $U_{gs} = U_b = 3/\pi \hat{u} \cos \alpha = -193 \text{ V}$.

Markant is de geringe invloed die I_{gs} op deze waarde heeft.

(Dit in tegenstelling tot mutatoren waar geldt

$\overline{\Delta U_b} = 3/\pi \omega L I_{gs}$ wat voor dezelfde L en I_{gs} op 9 V zou uitkomen.)

Met name vanwege de weerstand in de smoorspoel zal waarschijnlijk toch enige toename van U_b met I_{gs} blijken.

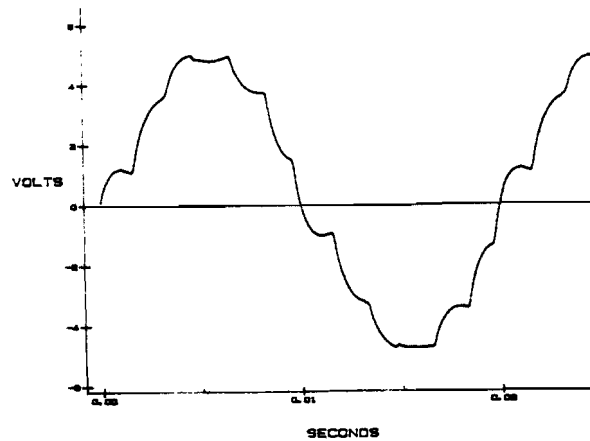
Tot besluit dient opgemerkt te worden dat de gegeven afleiding slechts geldig is voor $I_{gs} > I_g$, de grenswaarde die in 6.3 uit vergelijking 12a is afgeleid: $I_g = \sqrt{3} \hat{u} / Z_o = 70 \text{ A}$.

Voor $I_{gs} < I_g$ moet een andere, tamelijk gecompliceerde afleiding gemaakt worden. In het kader van dit afstudeerwerk is dit niet uitgewerkt.

6.6 VERVANGINGSSCHEMA WISSELSpanningsZIJDE.

Ten gevolge van de toepassing van een twaalf-pulsig systeem voor de invertor en een filter aan de uitgang wordt door de omzetter een goede wisselstroomvorm bereikt. Hierdoor treedt weinig harmonische vervorming op in het wisselspanningsnet.

De trapjeskromme van figuur 24 wordt zo omgevormd tot de stroomvorm die wordt weergegeven in figuur 31.

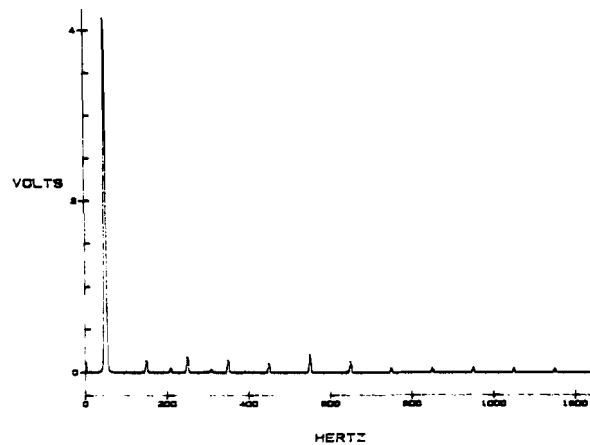


$$I_1 = 35 \text{ A}$$

$$\alpha = 210^\circ$$

figuur 31: Invertor wisselstroomvorm

De gemeten harmonische vervorming staat uitgedrukt in figuur 31a.

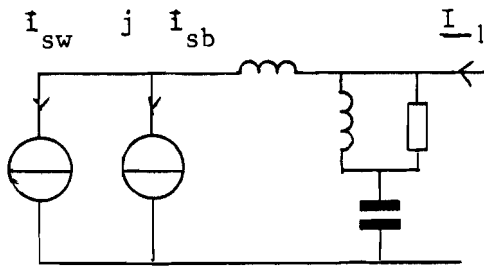


$$I_1 = 35 \text{ A}$$

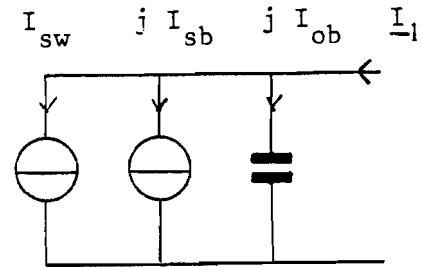
$$\alpha = 210^\circ$$

figuur 31a: Frequentie spectrum

Deze vervorming wordt vervolgens voor het opstellen van een wisselspanningsmodel verwaarloosd. In dit model worden de opwekking van de grondharmonische stromen voorgesteld als in figuur 32a.



figuur 32a



figuur 32b

Wisselspanningsmodellen

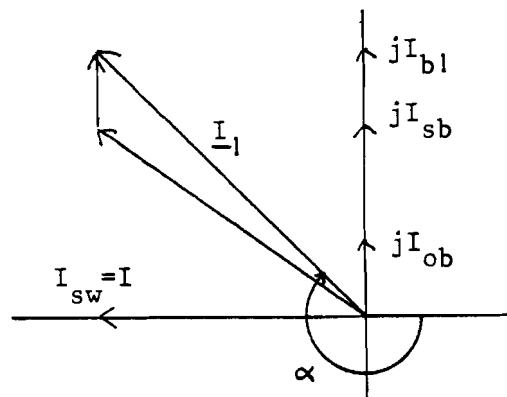
Hierin symboliseert de stroombron I_{sw} de levering van wattstroom (vermogen) en I_{sb} de levering van blindstroom.

Het filter in deze figuur kan voor 50 Hz opgevat worden als een condensator die de blindstroom I_{ob} opwekt. Dit is in figuur 32b aangegeven.

Over de vectoriële voorstelling \underline{I}_1 van de grondharmonische stroom van het invertorsysteem is op te merken dat gekozen is voor verbruikersconventie.

$$\underline{I}_1 = I_{sw} + j(I_{ob} + I_{sb}) = I_{w1} + j I_{b1} .$$

Deze stromen zijn in figuur 33 in een vectordiagram voorgesteld.



figuur 33: Stroomvectoren.

In de rest van dit verslag wordt I_{ob} niet meer van I_{sb} onderscheiden en wordt de vereenvoudiging $I_{b1} = -I_1 \sin \alpha$ en $I_{w1} = I_1 \cos \alpha$ gehanteerd.

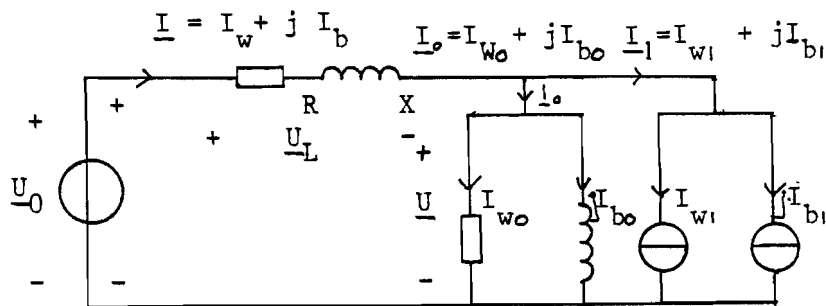
7. REGELING VAN DE ONTSTEEKHOEK

7.1. SITUATIEBESCHRIJVING

In hoofdstuk 4 over de spanningskompensatie is aangegeven dat door regeling van de blindstroom de spanning van een aansluiting op het lichtnet te beïnvloeden is.

In hoofdstuk 5 over de regeling van de arbeidsfactor staan methoden aangegeven waarmee deze regeling te realiseren is. Nu zal uitgewerkt worden hoe een optimale instelling van de arbeidsfactor gevonden kan worden. Dit wordt toegespitst op de regeling van de ontsteekhoek van een inverter.

Hiertoe wordt teruggekommen op de voorstelling van figuur 9.



figuur 34: Netaansluiting met inverter.

Aan een belasting die op het net is aangesloten (lokale belasting), zoals in figuur 9 is aangegeven, wordt een inverter parallel geschakeld. Een voorstelling hiervan wordt in figuur 34 gegeven. Volgens het wisselspanningsmodel uit hoofdstuk 6 is de inverter hierin aangegeven door twee stroombronnen die de opwekking van actief en reaktief vermogen symboliseren. Ter bepaling van de tekens van blind- en wattstroom wordt voor zowel de lokale belasting als de inverter verbruikersconventie

aangenomen.

In het netwerk van figuur 34 zijn verschillende stromen te onderscheiden:

$\underline{I}_0 = I_{w0} + j I_{b0}$: De stroom van de lokale belasting met blindstroomkomponent I_{b0} en wattstroomkomponent I_{w0} .

$\underline{I}_1 = I_{w1} + j I_{b1}$: Invertorstroom, eveneens in blind- en wattstroom uitgesplitst.

Het net 'ziet' de som van deze stromen:

$$\underline{I} = \underline{I}_0 + \underline{I}_1 = I_w + j I_b ; \quad I_w = I_{w0} + I_{w1}$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1}$$

In een gegeven net is van deze stroom \underline{I} het verliesvermogen P_v en de spanningsvariatie ΔU af te leiden.

7.2 BEREKENINGEN.

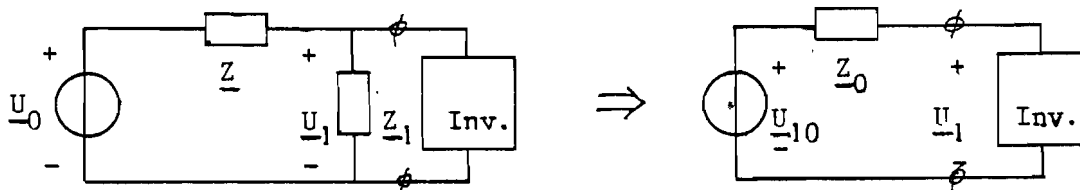
In een berekeningsprogramma worden de bovengenoemde grootheden P_v en ΔU als functie van \underline{I} bepaald.

Een listing van dit programma is als bijlage B.1 aan te treffen. De waarden van het net, R , X , U_0 , I_{MAX} , en die van de lokale belasting zijn invoergegevens. De laatste wordt beschreven door een wattvermogen bij de nominale spanning, en een arbeidsfactor, inductief dan wel capacitief. De ontsteekhoek α van de invertor wordt als variabele gebruikt. De andere invertorgrootheid, P_1 , is een parameter.

Het programma bepaalt eerst de impedanties van de lokale belasting. Vervolgens wordt het net in combinatie met deze belasting omgerekend naar een niet ideale spanningsbron (volgens het Thevenin-theorema) wat in figuur 35 verduidelijkt wordt.

\underline{U}_{10} is nu de invertor-nulllastspanning en \underline{Z}_0 de

uitgangsimpedantie.



figuur 35: Bepaling Thévenin eenpoort voorstelling.

Voor deze waarden geldt:

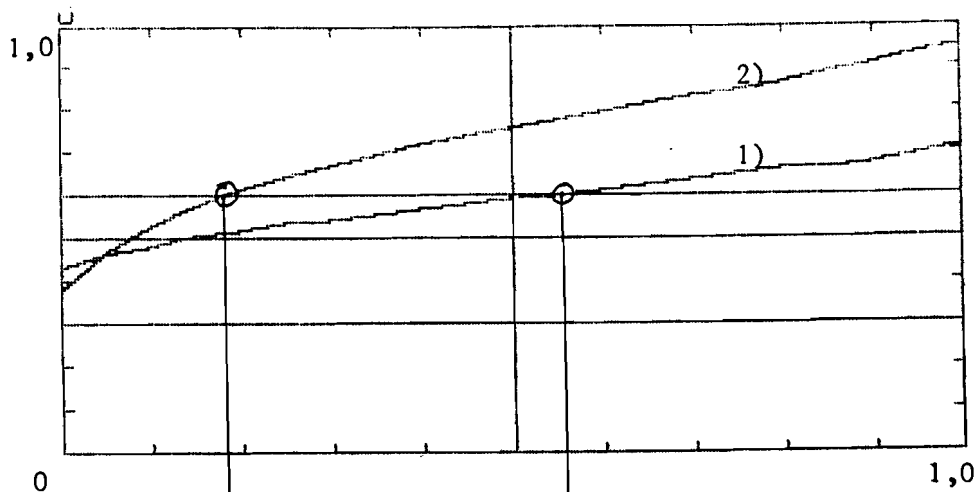
$$\underline{U}_{10} = \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z} + \underline{Z}_1} \underline{U}_0 \quad ; \quad \underline{Z}_0 = \underline{Z} \cdot \underline{Z}_1 / (\underline{Z} + \underline{Z}_1)$$

Vervolgens wordt voor een reeks α door iteratie de grootte van de inverterwattstroom vastgesteld, zodanig dat precies het vooropgestelde invertervermogen P_i wordt geleverd. Het vermogen van de lokale belasting echter zal nu van de opgegeven waarde verschillen omdat de aansluitspanning U_1 van de nominale waarde verschilt. De arbeidsfactor ervan wordt wel constant verondersteld.

Op deze wijze is een praktijksituatie zo goed mogelijk nagebootst.

Als uitkomst van de berekening worden de relatieve spanning $u_1 = (U_1 / U_0)$ en de relatieve kabelverliezen p_v als functie van α verkregen. De genormeerde kabelverliezen zijn verkregen uit het quotiënt I^2 / I_{MAX}^2 .

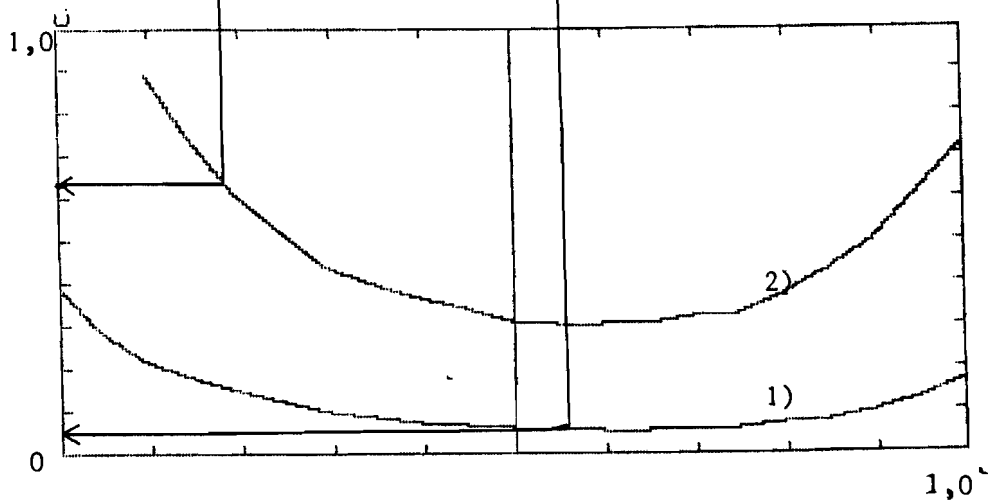
Grafieken van de genormeerde waarden u_1 en p_v worden weergegeven in figuur 36, voor twee waarden van het invertervermogen, -50 kW en -100 kW. De nominale lokale belasting P_0 was vastgesteld op 20 kW bij een arbeidsfactor van 0,9 inductief.


 figuur 36a: $u_1(\alpha)$

 1) $P = -50 \text{ kW}$

 2) $P_e^e = -100 \text{ kW}$

 x: $(10^\circ / \text{div.})$

 y: $u_1 \quad (5\% / \text{div.})$

 figuur 36b: $p_v(\alpha)$

 1) $P = -50 \text{ kW}$

 2) $P_e^e = -100 \text{ kW}$

 x: $(10^\circ / \text{div.})$

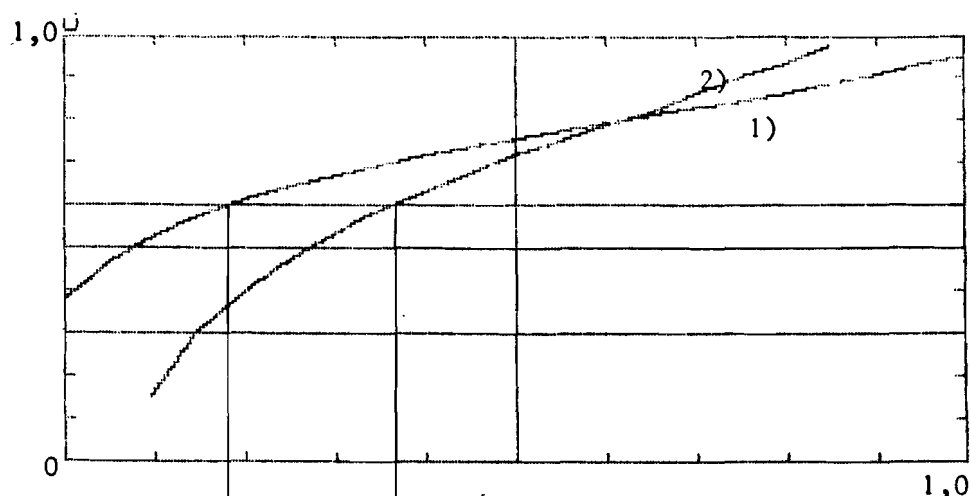
 y: $p_v \quad (10\% / \text{div.})$

 figuur 36: grafieken van $u_1(\alpha)$ en $p_v(\alpha)$

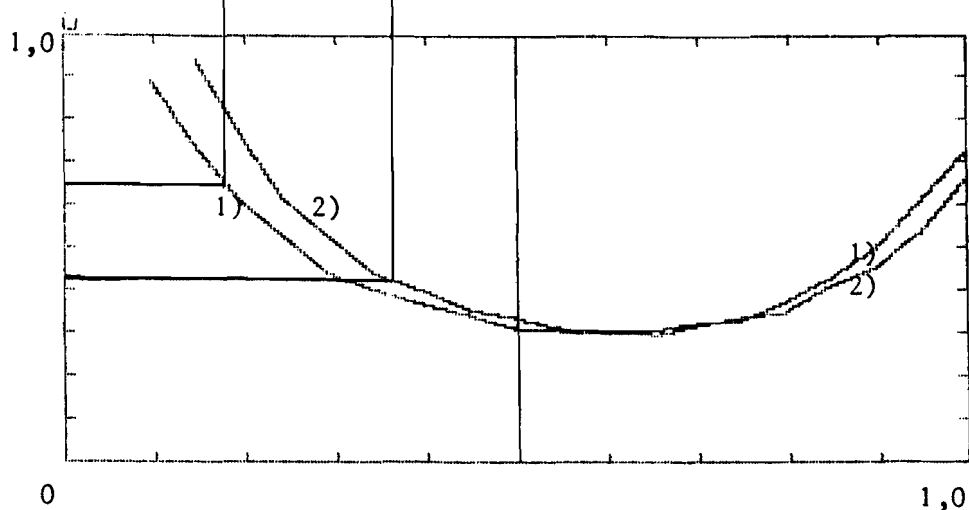
Bij deze grafieken is op te merken dat bij het eerste geval, $P_1 = -50 \text{ kW}$, p_v te minimaliseren is waarbij u_1 binnen de grenzen van het spanningscriterium blijft: $u_1 < 1,05$.

Voor $P_1 = -100 \text{ kW}$ is dit niet meer mogelijk, en daarom zal α blijkens deze grafiek verlaagd moeten worden tot 148° .

Onvermijdelijk neemt hierdoor het verliesvermogen toe.


 figuur 37a: $u_1(\alpha)$

 1) $X = 0,18 \Omega$

 2) $X = 0,36 \Omega$
 $x: \alpha \quad (10^\circ/\text{div.})$
 $y: u_1 \quad (5\%/\text{div.})$

 figuur 37b: $p_v(\alpha)$

 1) $X = 0,18 \Omega$

 2) $X = 0,36 \Omega$
 $x: \alpha \quad (10^\circ/\text{div.})$
 $y: p_v \quad (5\%/\text{div.})$

figuur 37: Grafieken van $u_1(\alpha)$ en $p_v(\alpha)$,
bij verdubbelde lijnreactantie.

In figuur 37 is dit geval opnieuw in een grafiek opgenomen. Tevens is nu een situatie waarbij de kabelinductiviteit X verdubbeld is doorgerekend. De verlieskromme is hierdoor nagenoeg gelijk gebleven, de spanningskromme echter heeft nu een veel steiler verloop, en bij $\alpha = 160^\circ$, bij een geringer kabelverlies, is nu aan het spanningscriterium voldaan. Deze verschillen met de vorige situatie waren op grond van vergelijking 7 te verwachten.

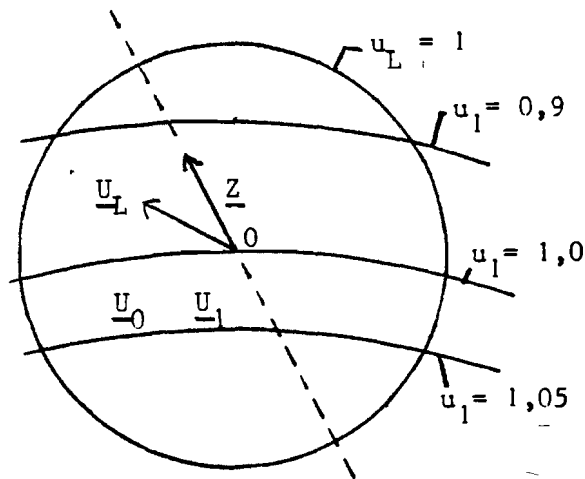
Van de twee gevallen waarvan in figuur 36 grafieken zijn gegeven zijn verschillende regelcriteria af te leiden. In het eerste geval is de regeling optimaal te noemen als de kabelverliezen minimaal

zijn. Als het vermogenstransport door de kabel bij deze regeling zo groot wordt dat hierdoor het spanningscriterium overschreden zou worden, moet spanningskompensatie plaatsvinden. Er wordt dan op de maximaal toelaatbare spanning afgeregeld. Bij een dergelijk hoge teruglevering moet de invertorontsteekhoek over het algemeen kleiner dan 180° gekozen worden om het nodige blindvermogen op te nemen. Omgekeerd, als de vermogensstroom een andere richting heeft en de spanningsdaling meer dan 10 % bedraagt, zal de invertor extra blindvermogen moeten leveren, meer nog dan door de lokale belasting wordt opgenomen. Dan zal α zeker de 180° te boven gaan.

Als in deze laatste twee gevallen door extra blindstroom de thermische belastbaarheid van de kabel overschreden zal worden moet er op een derde manier ingegrepen worden: de vermogensstroom door de kabel zal beperkt moeten worden. Als sprake is van teruglevering kan dit gebeuren door bijvoorbeeld het inschakelen van een dummielast of door beperking van het opgewekte vermogen. In het andere geval zal op enigerlei wijze de lokale belasting verkleind moeten worden of het invertorvermogen vergroot.

7.3. HET \underline{u}_L - VLAK.

In figuur 38 kan het voorgaande, de verschillende regelgebieden en regelcriteria in beeld gebracht worden. Dit \underline{u}_L - vlak is in feite een deelvergroting van het vectordiagram 10b.


 figuur 38: \underline{u}_L -vlak

\underline{U}_L stelt de complexe kabelspanningsvector voor:

$$\underline{U}_L = \underline{U}_0 - \underline{U}_1 = \underline{I} \underline{Z} .$$

\underline{u}_L is een genormeerde grootte hiervan:

$$\underline{u}_L = \underline{U}_L / U_{LMAX} = \underline{U}_L / (I_{MAX} \cdot Z) .$$

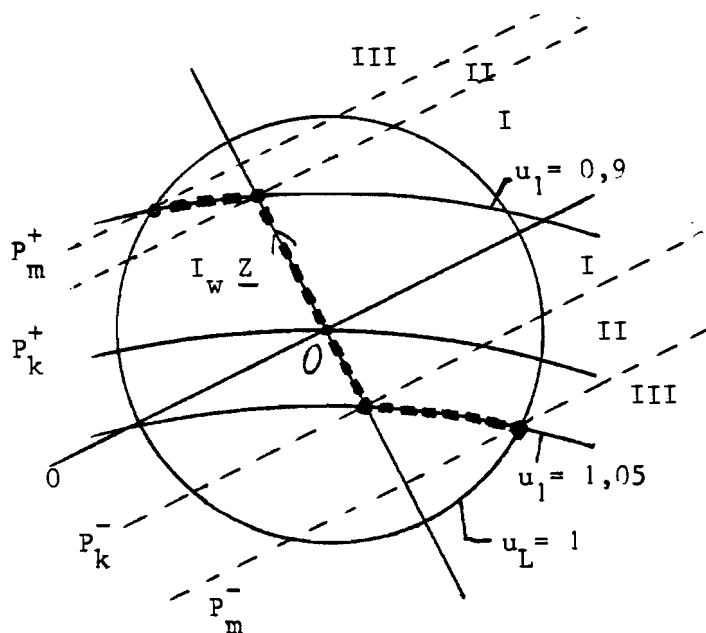
Het nulpunt van dit vectordiagram stelt overeenkomstig figuur 10b het eindpunt van de \underline{U}_1 - vector voor.

In het vlak zijn u_L - cirkels aangegeven met de waarden 0,9 , 1,0 en 1,05 . Als \underline{u}_L vanuit de oorsprong in een punt in het gearceerde ringgebied hiertussen eindigt is aan het spanningscriterium voldaan.

Verder is een cirkel getekend welke U_{LMAX} aangeeft: $u_L = 1$. Als $u_L < 1$ is aan het vermogenscriterium voldaan.

Het bovengenoemde ringgebied, afgebakend door de cirkel $u_L = 1$ cirkel is het gebied waarin de \underline{u}_L - vector volgens beide criteria mag liggen.

Vervolgens kan men nagaan voor welke karakteristieke wattstromen I aan het spanningscriterium voldaan kan worden voor $I_b = 0$. Bij deze waarden snijdt de lijn waarop de $I_w \cdot \underline{Z}$ vector ligt de grenzen van het ringgebied (zie figuur 39).


 figuur 39: \underline{u} -vlak met regelgebieden.

Lijnen van constante wattstroom kunnen loodrecht op de \underline{Z} - lijn getrokken worden. Deze lijnen zijn bij benadering lijnen van konstant vermogen; bij benadering, omdat de aansluitspanning niet konstant is, maar met ca 10 % varieert. Bij de gevonden wattstromen horen karakteristieke vermogens P_k^+ voor het snijpunt met de cirkel $u_1 = 0,9$ en P_k^- voor het snijpunt met de cirkel $u_1 = 1,05$. In bijlage B.2 staat de afleiding voor het netmodel uit hoofdstuk 4 de getallenwaarden hiervan:

$$P_k^+ = + 40,2 \text{ kW} \quad ; \quad P_k^- = - 24,0 \text{ kW} .$$

Als deze karakteristieke vermogens overschreden worden moet een \underline{u}_L - punt op de rand van het ringgebied gekozen worden. Dit betekent dat dan de voor de spanningscompensatie minimaal vereiste blindstroom door de kabel loopt.

Bij een toenemende vermogensstroom (wattstroom) zal zo de cirkel $u_L = 1$ bereikt worden. Het bijbehorende transportvermogen mag niet overschreden worden. Voor deze vermogens P_m^+ en P_m^- is ook in bijlage B.2 afgeleid:

$$P_m^+ = + 70,2 \text{ kW} \quad ; \quad P_m^- = - 99,0 \text{ kW} .$$

Ook voor de vermogensstroom $P = 3 U_1 I \cos \varphi$ door de kabel kan een normering ingevoerd worden: $p = P / (3 U_1 I_{MAX}) = I_w / I_{MAX}$.

De vier gevonden getallenwaarden van vermogenstroom hebben als genormeerde waarden:

$$\begin{aligned}
 p_k^+ &= 0,35 & ; & \quad p_m^+ = 0,61 \\
 p_k^- &= -0,18 & ; & \quad p_m^- = -0,73
 \end{aligned}$$

Deze waarden geven in zekere zin een benuttingsgraad van de kabel aan. Bij een vermogenstroom met $p = \pm 1$ is dan sprake van volledige benutting. Omdat spanningskompensatie (en dus blindstroom) nodig is in het boven beschreven voorbeeld, kan dit niet bereikt worden. Als echter de kabelreactantie vergroot zou worden kan in dit opzicht nog een verbetering bereikt worden voor het geval van teruglevering. Voor $X = 0,73 \Omega$ kan zonder dat spanningskompensatie nodig is de kabel volledig thermisch belast worden ($p = -1$).

Zo zijn er dus in het \underline{u}_L - vlak verschillende regelgebieden aan te geven met daarbij behorende regelcriteria. Steeds zal \underline{u}_L op de stippellijn in figuur 39 afgeregeld worden.

- | | | | | |
|-----|---|---|---|---|
| I | : | $-0,18 < p < 0,35$ | : | $\cos \varphi$ - regeling: de arbeidsfactor wordt op + of - 1 afgeregeld. |
| II | : | $-0,73 < p < -0,18$
en $0,35 < p < 0,61$ | : | spanningsregeling: u wordt op 1,05 resp 0,9 afgeregeld. |
| III | : | $p > 0,61$ of $p < -0,73$ | : | vermogensregeling (-beperking): het transportvermogen wordt begrensd. |

7.4. KABELVERLIEZEN.

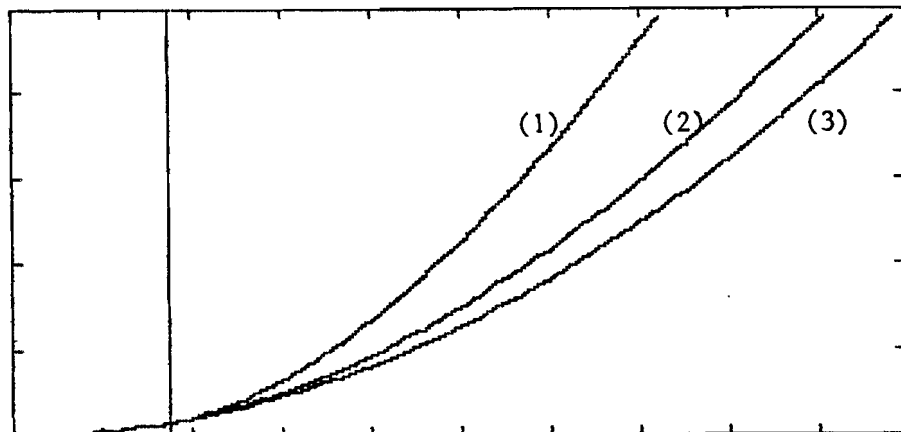
In regelgebied I zal bij optimale regeling de kabeldissipatie P_v geminimaliseerd worden, in gebied II echter zal het sterk met de vermogensstroom gaan toenemen tot aan het dissipatie-maximum. Voor het genormeerde kabelverliesvermogen $p_v = I^2 / I_{MAX}^2$ als functie van $p = I_W / I_{MAX}$, het genormeerde transportvermogen, is grafiek (1) in figuur 40 afgebeeld.

Deze figuur heeft steeds betrekking op vermogensteruglevering. Ook voor het geval van verdubbelde kabelreactantie is een $p_v(p)$ - kromme opgenomen (2). Een derde grafiek stelt de kabelverliezen voor als de spanningscompensatie achterwege blijft (3). u_1 zal hierbij oplopen tot 1,27. Deze kromme is vrijwel identiek aan die met spanningscompensatie voor $X = 0,73 \Omega$.

Het hiervoor gebruikte rekenprogramma is in bijlage B.3 opgenomen.

x: p_v (10 % / div.)
y: p_v (20 % / div.)

- 1) $X = 0,18$
- 2) $X = 0,36$
- 3) Geen spanningscompensatie.



figuur 40: Verlies- als functie van transportvermogen bij teruglevering.

De grens tussen regelgebied I en II staat met een verticale lijn aangegeven. Hoewel p_v sterk toeneemt met $-p$ in gebied II wordt toch bij teruglevering de transportcapaciteit dankzij de spanningscompensatie aanzienlijk verhoogd. Hierdoor kan bijvoorbeeld een windturbine een veel groter piekvermogen aan het net kwijt. De verhoging van de kabelverliezen wordt daardoor meer dan goedge maakt. Voor elke kilowatt van benut windvermogen neemt

de opbrengst aan het eind van de verbinding, bij het 'harde invoedingspunt' toe. In geval (1) is het rendement $(|p| - p_v) / |p|$ voor maximaal kabelverlies bij teruglevering toch nog 88 %. Voor $p = +1$ is het 83 % .

7.5. REGELAAR

Voor de ingangssignalen van een regelaar die het bovenstaande verwezenlijkt kan volstaan worden met twee signalen welke U_1 en I_1 beschrijven. Hiervan zijn met behulp van elektronische schakelingen het faseverschil hiertussen en de effectieve fasespanning en -stroom waarden af te leiden.

In regelgebied I wordt de kabelblindstroom op nul afgeregeld (door φ op 0° of 180° af te regelen), in gebied II wordt U_1 op z'n uiterste waarde afgesteld. Voor beide regelgebieden is slechts één uitgangssignaal van de regelaar nodig, n.l. voor de ontsteekhoek.

Aan de hand van vergelijking van de waarde $I_w = I \cdot \cos \varphi$ met $I_{wk} = P_k / 3 U_1$ en $I_{wm} = P_m / 3 U_1$ kan de regelaar bepalen of het systeem zich in gebied I ,II of III bevindt. In het laatste geval is een tweede uitgangssignaal, voor vermogensregeling, nodig. Dit zal in het volgende hoofdstuk verder aan de orde komen.

Als regelaar wordt een μ -processor gebruikt die analoog/digitaal en digitaal/analoog omzetters heeft voor de koppeling aan het invertorsysteem.

Met een BASIC- programma wordt de regelstrategie vastgelegd en vervolgens door de komputer uitgevoerd.

Een flow-diagram van een regelprogramma waarbij gebied III en de daarbij behorende vermogensregeling nog buiten beschouwing blijft, is in bijlage B.4 aan te treffen. De programma-listing is als bijlage B.5 opgenomen.

De beschrijving van de elektronische schakelingen die de komputer-ingangssignalen U_1 , I_1 en I_w afleiden van de meetsignalen u en i is terug te vinden in bijlage B.6.

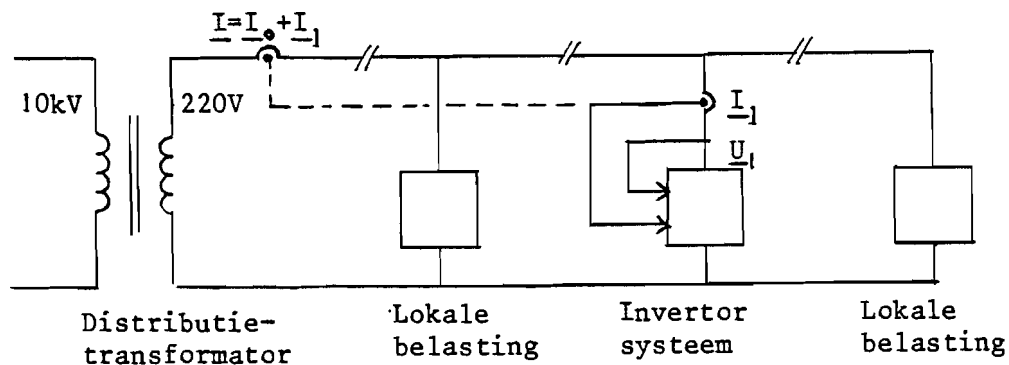
Een verdere uitzetting van de regelaar en het gehele

regelsysteem is in hoofdstuk 9 aan te treffen.

7.6. BEPERKT REGELSYSTEEM

In plaats van een regelsysteem dat in het voorgaande is beschreven kan een aangepaste versie gebruikt worden die niet naar de lokale belasting 'kijkt', maar zich tot de inverter beperkt.

Dit heeft een praktische vereenvoudiging tot gevolg omdat anders op enige afstand \underline{I} en dus \underline{I}_0 gemeten moet worden (zie figuur 40a).



figuur 40a: Nieuwe meetsignalen

Nu wordt eenvoudig \underline{I}_1 , de inverterstroom beschouwd, en in plaats van U_0 nu U_{10} , de inverter-nullastspanning ($U_{10} = U_0$ voor $I_1 = 0$).

Het geval kan en zal zich voordoen dat U_{10} beduidend van U_0 afwijkt. Dit is dan het gevolg van een spanningsafwijking, veroorzaakt door aanzienlijke vermogensafname (of eventueel teruglevering) op andere aansluitpunten van hetzelfde net. Om dan toch aan het spanningscriterium te voldoen moeten de waarden van het gedefinieerde kritische vermogen (maximaal toelaatbaar vermogen wat bij arbeidsfactor = ± 1 aan het net geleverd of onttrokken kan worden) aangepast worden. Hiermee wordt de grens tussen regelgebieden I en II verlegd. In bijlage

B.7 wordt hiervoor een exacte berekening gegeven, in deze paragraaf wordt volstaan met een vereenvoudiging ervan die een benadering van het resultaat geeft.

$$\begin{aligned} \text{Stel} \quad U_{10} &= U_1 + R I_{\omega 1} - X I_{b1} \\ \text{en} \quad U_M &= U_{10} + R I_{\omega k1} \end{aligned}$$

Hierin is $I_{\omega k1}$ de invertor wattstroom waarvoor (bij $\alpha = 180^\circ$) precies de maximale spanning $U_M = 1,05 U_0$ bereikt wordt.

$$\begin{aligned} I_{\omega k1} &= (U_M - U_{10}) / R = \\ &= (U_M - U_1 - R I_{\omega 1} + X I_{b1}) / R . \\ P_{k1} &= 3 I_{\omega k1} U_1 = . \\ &= 3 U_M (U_M - U_1 - R I_{\omega 1} + X I_{b1}) / R . \end{aligned}$$

Het maximaal terug te leveren vermogen zonder spanningscompensatie neemt toe naarmate U_{10} lager is.

De bovengrens van regelgebied II, bepaald door de maximale stroombelasting van de kabel, is niet exact te geven daar deze grens ook van de (nu onbekende) lokale belasting afhangt. Een indicatie voor deze belasting echter is af te leiden uit het spanningsverschil $U_{10} - U_0$, en een schatting van de gemiddelde arbeidsfactor. Hiervan kan men een zekere \underline{I}_0 afleiden.

Vervolgens kan men uit het verschil met de in 6.3 (en bijlage B.2) afgeleide maximale \underline{I} de maximale \underline{I}_1 bepalen, en daaruit het vermogen $P_{m1} = 3 U_M I_{\omega 1} = 3 U_M I_1 \cos \alpha$.

Dit wordt eveneens in bijlage B.7 uitgewerkt.

Voor het aldus beschreven beperkte regelsysteem met de nieuwe grenzen voor regelgebied II is nu alleen de te volgen regelstrategie voor regelgebied I nog vast te stellen. Het is namelijk nu niet mogelijk I_b op nul af te regelen daar deze waarde niet gemeten wordt. In plaats daarvan kan men ook nu op dezelfde manier een schatting van de lokale belasting maken en aan de hand daarvan de regeling uitvoeren.

8. VERMOGENSREGELING

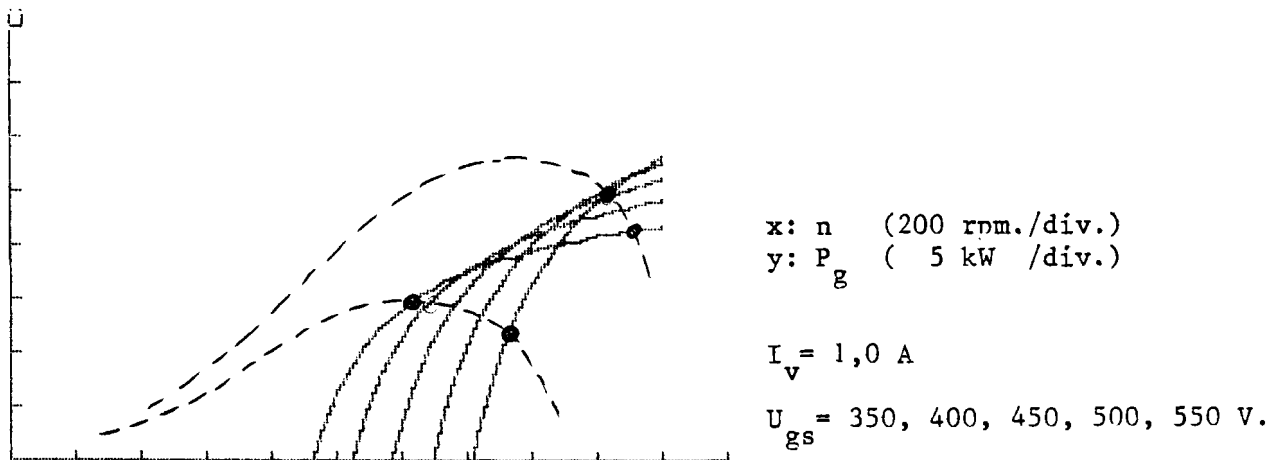
8.1. GELIJKSPANNING-VERMOGEN RELATIE.

Zoals in het vorige hoofdstuk is aangegeven, zal bij grote opgewekte vermogens er op toegezien moeten worden dat het net niet overbelast wordt. Voor windturbines kan hierin voorzien worden door automatische bladhoekverstelling. Een regelaar zou bijvoorbeeld ook een dummielast kunnen inschakelen, of met overtollig vermogen een accubatterij kunnen voeden.

Echter, ook in de beschreven regelgebieden I en II, als de arbeidsfactor resp. de spanning konstant gehouden wordt, kan vermogensregeling nodig zijn.

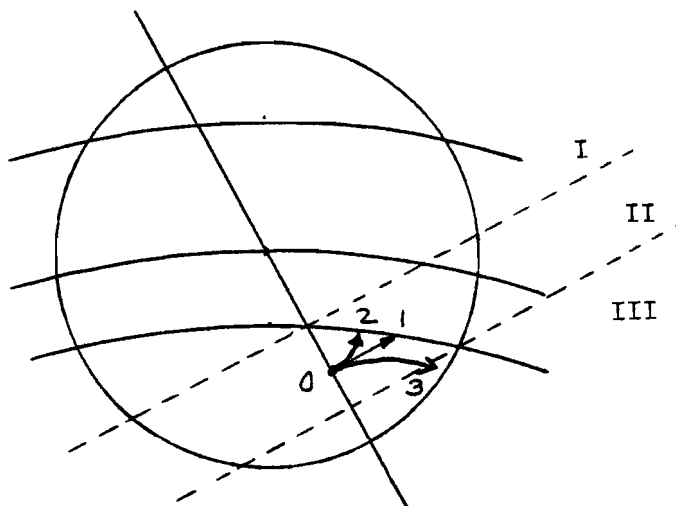
Het is namelijk zo dat door de regeling van de ontsteekhoek de gelijkspanning aan de invertoringang ook zal veranderen. Tenzij dit bijvoorbeeld door een chopper in de gelijkspanningstrap weer teniet gedaan wordt zal dit over het algemeen resulteren in een verandering van het vermogen dat door de inverter opgenomen wordt aan de gelijkspanningszijde.

Voor het geval van een opwekker in de vorm van een synchrone windturbine zijn bijvoorbeeld $P_g(n)$ - krommen bekend [11] die het opgewekte vermogen P_g als functie van n , het generatortoerental, geven, bij een konstante generatorbekrachtiging (zie figuur 41).



figuur 41: vermogen - toerental krommen

Deze krommen hebben de gelijkspanning U_{gs} als parameter. Als dus U_{gs} verandert zullen over het algemeen P_g en n veranderen. Het mogelijk te benutten windvermogen als functie van n is door een stippellijn in de figuur aangegeven voor twee verschillende windsnelheden. Afhankelijk van de windsnelheid zal P_g toe- of af kunnen nemen. (voor P_g is generator conventie aangenomen zodat $P_g = -P_i$). In het u_L - vlak is dit effect ook weer te geven (zie figuur 42):



figuur 42: vermogen afhankelijk van ontsteekhoek

Als een zeker werkpunt (0) verlegd moet worden (omdat het niet aan zowel het spannings- als het vermogenscriterium voldoet) zou bij

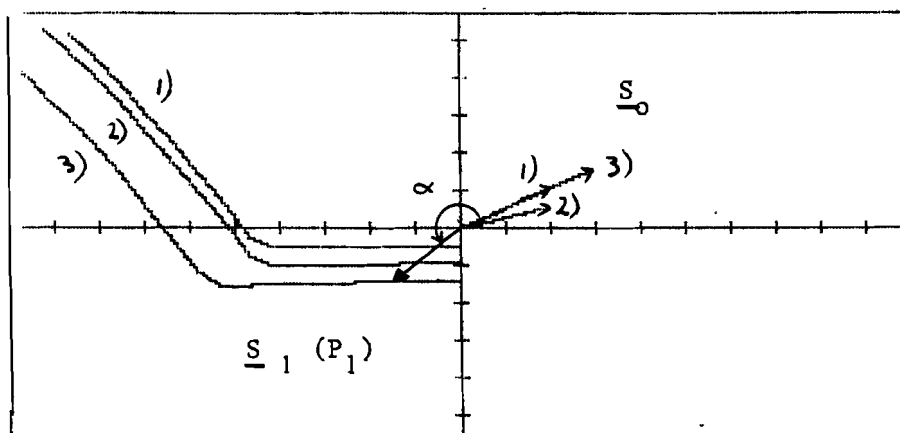
ontsteekhoekregeling waarbij het vermogen constant blijft traject 1 gevolgd worden. Als het vermogen hierbij zou afnemen zal volgens traject 2 een ander eindpunt bereikt worden. Echter, als in dit voorbeeld P_g zou toenemen zal volgens traject 3 niet zonder meer een goed nieuw instelpunt gevonden kunnen worden, maar zal tevens dit vergrote vermogen door een andere regeling beperkt moeten worden.

8.2. HET VERLOOP VAN DE GELIJKSPANNING.

Voor de gelijkspanning U_{gs} geldt als eenvoudige benadering (voor zogenaamd leemtevrij bedrijf waarbij de ingangs-smoorpoel continu stroom voert):

$$U_{gs} = 3 \sqrt{6} / \pi U_1 \cos \alpha \quad (18)$$

Volgens de beschreven regelstrategie zal α afhangen van de lokale belasting en het invertorvermogen (zie figuur 43):



figuur 43:

x: P_1 (10 kW / div.)
y: Q_1 (10 kVA/ div.)

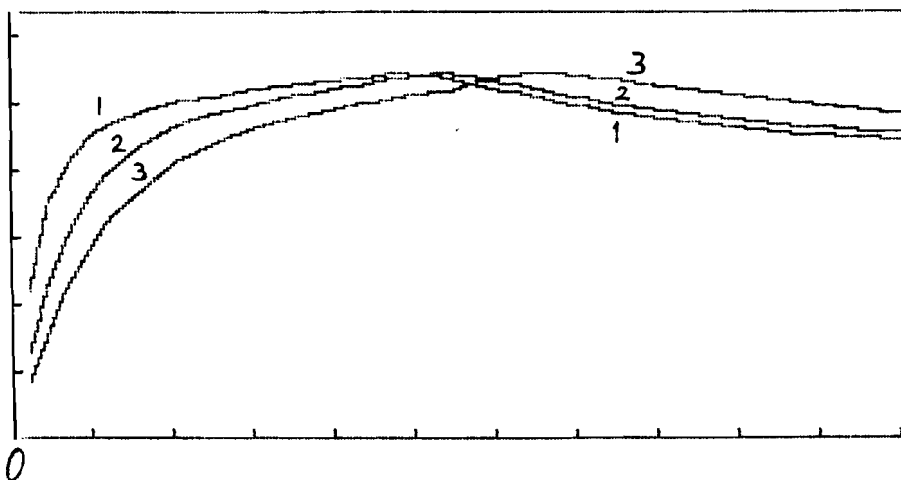
- 1) $P_0 = 20 \text{ kW}$, $\varphi = -27^\circ$
- 2) $P_0 = 20 \text{ kW}$, $\varphi = -15^\circ$
- 3) $P_0 = 30 \text{ kW}$, $\varphi = -27^\circ$.

figuur 43: Schijnbaar invertorvermogen

In deze figuur wordt met \underline{S}_0 het schijnbare vermogen van de lokale belasting getypeerd, welke van ohms-inductieve aard is, en met \underline{S}_1 dat van de invertor. Bij gering invertorvermogen $|P_1|$ zal α tussen 270° en 180° liggen om het blindvermogen van de lokale belasting te compenseren. Als $|P_1|$ toeneemt daalt α tot ongeveer 180° . Als

vervolgens regelgebied II betreden zal worden zal de inverter blindvermogen gaan opnemen, en zo daalt α tot beneden 180° . Het verloop van \underline{S}_1 als functie van P_1 kan dus door de stippellijn in figuur 43 voorgesteld worden.

Hier vanuit gaande kan α en dus U_{gs} als functie van $|P_1|$ afgeleid worden (zie figuur 44).



figuur 44: $U_{gs}(-P_1)$

x: $-P_1$ (10 kW / div.)
y: U_{gs} (100 V / div.)

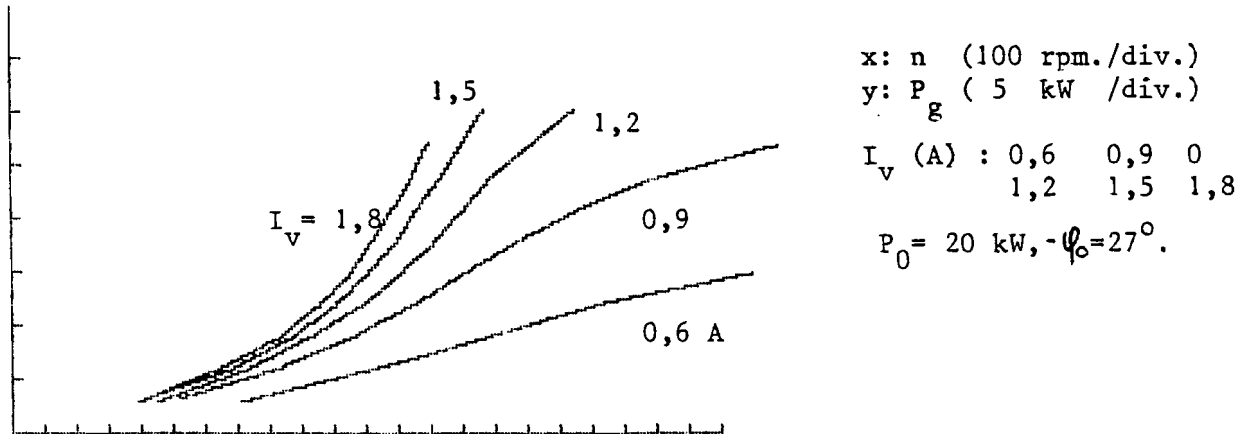
- 1) $P_0 = 20$ kW, $\varphi = -15^\circ$
- 2) $P_0 = 20$ kW, $\varphi = -27^\circ$
- 3) $P_0 = 30$ kW, $\varphi = -27^\circ$

figuur 44: verloop van de gelijkspanning

U_{gs} zal bij toenemend vermogen eerst vanaf 0 toenemen omdat α daalt vanaf 270° tot ca. 180° . Ook zal U_{gs} enigszins toenemen omdat U_1 een stijgende functie van $|P_1|$ is. In regelgebied II aangeland zal U_{gs} weer gaan dalen omdat α tot beneden 180° daalt. De grafiek van figuur 44 is bepaald met behulp van het berekeningsprogramma dat in bijlage B.8 is aan te treffen.

8.3. NIEUWE VERMOGEN-TOERENTAL RELATIE

In de $P_g(n)$ - kromme die in 8.1 besproken is kan nu de afhankelijkheid $U_{gs}(|P_1|)$ verwerkt worden. Het resultaat van deze bewerking is voor verschillende generatorbekrachtigingen in figuur 45 gegeven.

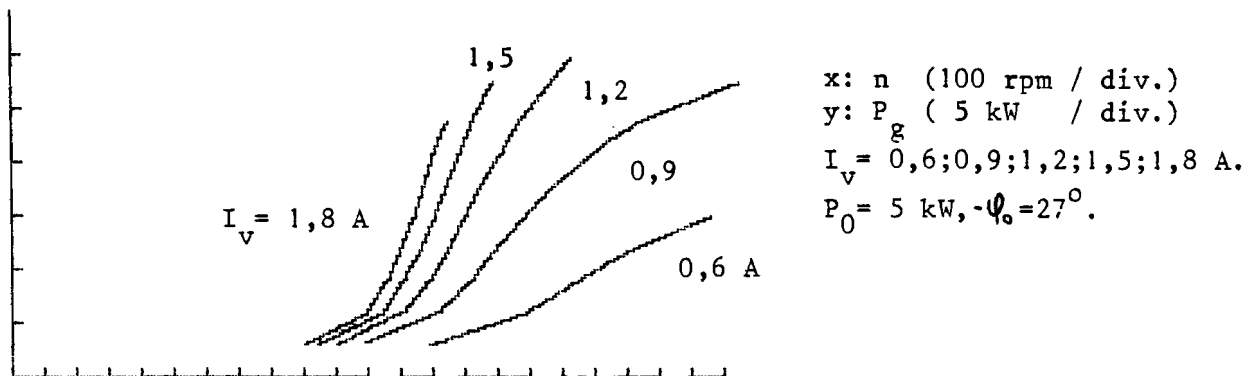


figuur 45: nieuwe vermogen-toerental krommen

Om tot deze krommen te komen is gebruik gemaakt van het vorige programma voor de relatie $U_{gs}(|P_g|)$ en van een $P_g(n, U_{gs}, I_v)$ berekeningsprogramma [12] dat in bijlage B.9 is opgenomen. I_v is de veldstroom (bekrachtigingsstroom) van de synchrone generator.

Markant aan deze grafieken is dat ze theoretisch door de oorsprong lopen. Dit heeft als voordeel dat ook bij een gering toerental (bijvoorbeeld bij lage windsnelheid) vermogen geleverd kan worden. Anderzijds kan dan vermogen bespaard worden omdat de kabelblindstroom op nul wordt afgeregeld.

Deze nieuwe grafieken zijn bij benadering gelijk aan de oude voor $P_g \gg P_0$. In dit voorbeeld geldt dit bij de hoge toerentallen. Wanneer P_0 verlaagd wordt, wordt de overeenkomst ook voor lagere toerentallen duidelijk (zie figuur 46).



figuur 46: nieuwe vermogen-toerentalkrommen
 bij lage lokale belasting

8.4. VELDREGELING

Met de generatorbekrachtiging, dus met de veldstroom I_v , kan nu het vermogen geregeld worden. Het kan op een bepaalde wenswaarde afgesteld worden of zo groot mogelijk gekozen worden. Het eerste is over het algemeen het geval als de energiebron beheersbaar is, bijvoorbeeld bij waterkracht, het laatste bijvoorbeeld bij windturbines.

In dit laatste geval kan door voortdurende variatie van de de veldstroom het maximum van het vermogen gevonden worden. Het vermogen kan uit de reeds aanwezigeingangssignalen U_1 , I en φ bepaald worden. De regelaar meet dus als het ware een $P_g(I_v)$ - kromme en stelt op het maximum in.

Een andere optimaliseringsmethode gaat uit van de evenredigheid van het vermogensoptimum met n^3 (n is het generatortoerental). Bij een dergelijke regeling moet dus n als extraingangssignaal voor de regelaar gebruikt worden.

In de laboratoriumopstelling (zie hoofdstuk 9) waar de energiebron (een gelijkstroommachine) beheersbaar is, wordt het vermogen steeds op een wenswaarde afgeregeld. Deze wenswaarde is met een potentiometer in te stellen.

8.5. GELIJKSPANNING REGELING.

Door een ander verband tussen U_{gs} en P_1 te creëren zal een andere $P_g(n)$ - kromme, zoals er in figuur 45 zijn gegeven, ontstaan.

Dit kan gerealiseerd worden door een chopper op te nemen aan de gelijkspanningszijde van de inverter. Een nieuwe $U_{gs}(P_1)$ relatie zou de vermogen-toerentalkromme aan de functie $P_g = n^3$ gelijkvormig kunnen maken, zodat een vermogensoptimalisatie voor windturbines door veldregeling niet meer nodig is. Door regeling van de chopper kan de optimalisatie dan sneller en wellicht beter beheersbaar gerealiseerd worden.

Het generator toerental hoeft dan minder sterk te variëren wat, het turbine traagheidsmoment in acht nemende, een duidelijk voordeel is.

Voor het geval van beheersbare vermogensbronnen is het voordeel dat met een vaste ingangs-gelijkspanning, bijvoorbeeld door aanwezigheid van een accubattarij, nu ook ontsteekhoekregeling mogelijk is.

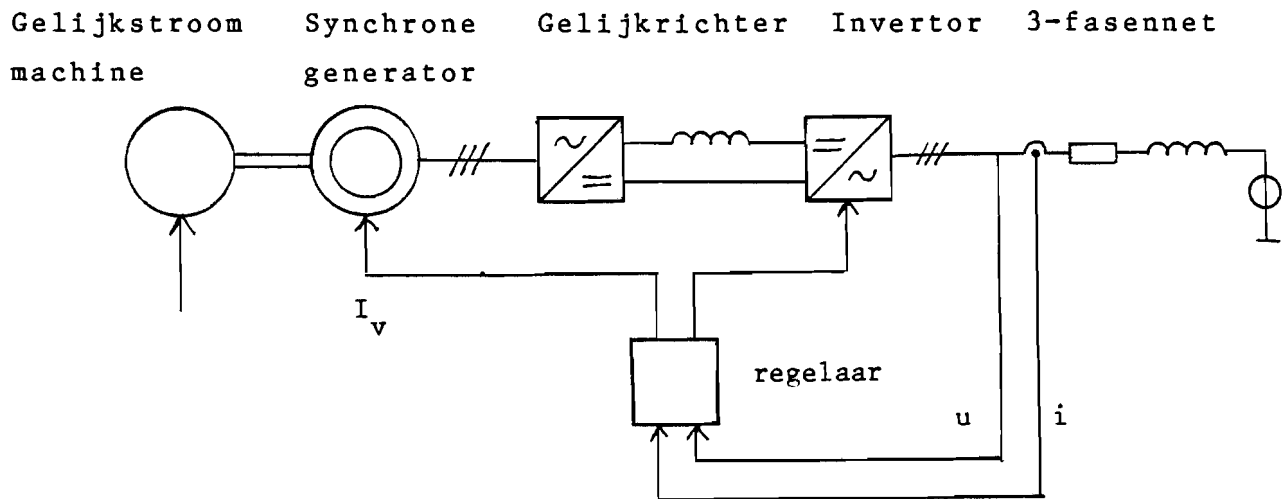
Voor een systeem dat een generator bevat zonder de beperking van een vaste spanning in de gelijkstroom-tussentrap (bijvoorbeeld door toepassing van een accubattarij) met door toepassing van een chopper de bekrachtiging vrij, dan wel binnen ruimer grenzen, kiezen, wat in een beter functioneren van de generator kan resulteren.

Met name wat betreft de regeltechniek en dynamica ligt er voor gelijkspanningregeling nog een heel onderzoeksveld open.

9. LABORATORIUMOPSTELLING

9.1. SYSTEEMBESCHRIJVING

Zoals gezegd werd de regelstrategie voor de regeling van de arbeidsfactor van het invertorsysteem gerealiseerd door gebruikmaking van een micro-processor. Schematisch kan het hele systeem voorgesteld worden aan de hand van figuur 47 en 48.



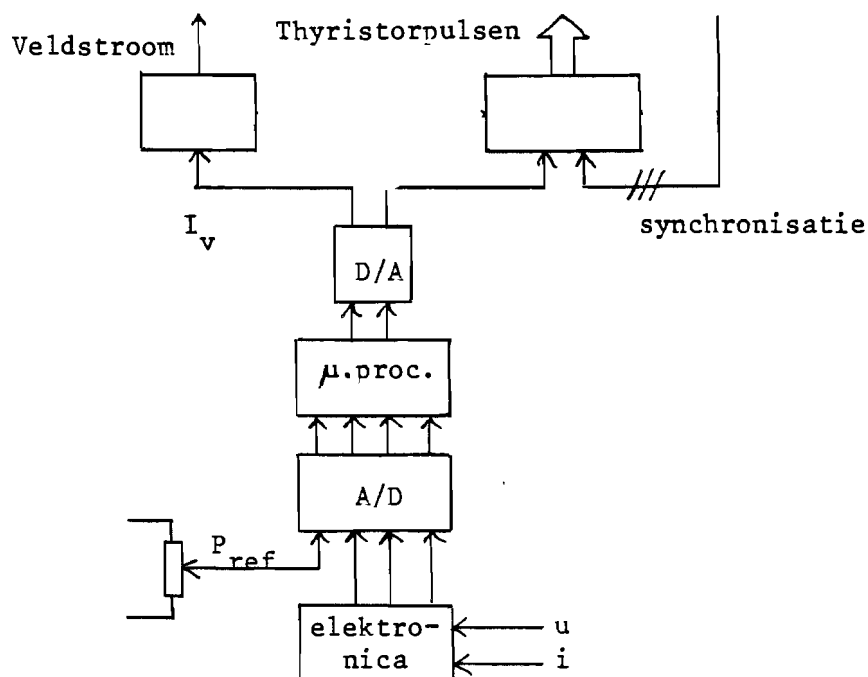
figuur 47: Vermogens(deel)systeem.

In figuur 47 zijn die delen aangegeven waardoor de vermogensstroom loopt. Een gelijkstroommachine drijft een synchrone generator aan. Hierdoor wordt bijvoorbeeld een wind- of waterkracht aangedreven opwekkingsstelsel nagebootst.

Door de rotorklemspanning van de gelijkstroommachine in te stellen wordt een toerental van de machinekombinatie ingesteld; door de bekrachtiging van de synchrone generator de amplitude van de opgewekte wisselspanning. In een diodebrug wordt deze spanning vervolgens gelijkgericht. Door een smoorspoel wordt een gelijkstroom aan het in hoofdstuk 6 beschreven invertorsysteem

aangeboden, wat vervolgens een 'zwak' elektriciteitsnet voedt. Een verzwakking van het net is eenvoudig gerealiseerd door een spoel en weerstand in serie met het aanwezige 380 Volt driefasennet op te nemen. De lokale belasting, ter sprake gebracht in 7.1, is aangebracht door drie spoelen via een 3-fasen variac aan het zwakke net te koppelen. Zo is het blindvermogen dat door de invertor geleverd moet worden te variëren waardoor het regelgedrag van het invertorsysteem beproefd kan worden. Een regelbare weerstand die het wattvermogen van de lokale belasting zou representeren is niet aangebracht omdat de vermogensregeling (zie hoofdstuk 8) al aan de hand van de veranderingen van de gelijkspanning als gevolg van ontsteekhoekvariatie voldoende geanalyseerd kon worden.

In figuur 48 wordt de besturing van dit systeem nader aangegeven.



figuur 48: Regelsysteem

Door een stroomtransformator en een spanningsdeler worden de

wisselstroom en -spanning aan elektronische schakelingen aangeboden. Hierbij was een uitgangspunt dat de drie fasen symmetrisch belast zijn zodat met 2 in plaats van 6 meetsignalen volstaan is.

Door de elektronische schakelingen worden met zeer geringe rimpel en vrijwel ongevoelig voor kommutatieverstoringen drie signalen U , I en φ afgeleid (gelijkspanningen); deze signalen geven de effectieve waarden van spanning en stroom aan alsook het faseverschil ertussen. De schakelingen bestaan uit integratoren die door sample/hold circuits periodiek bemonsterd worden. Na bemonstering worden de integratoren steeds ge-reset. Het zijn dus integrate/dump sample/hold circuits.

De volledige beschrijving van deze elektronica is in bijlage B.6 aan te treffen.

Een vierde signaal dat aan de micro-processor wordt toegevoerd geeft een wenswaarde voor het invertorvermogen aan. Dit is volgens 8.4 met een potentiometer Pref. ingesteld.

De vier signalen worden door middel van analoog/digitaal-omzeters aan de computer aangeboden in 8-bits voorstelling. In een BASIC-regelprogramma is vastgelegd wat de relatie tussen de waarden van de vier ingangssignalen en de computer-uitgangssignalen zal zijn. Deze twee uitgangssignalen zijn weer analoog, verkregen uit digitaal/analoog omzeters. De ene wordt aan een thyristor-besturingscircuit toegevoerd, de ander aan een regelbare veldvoeding. De thyristor-besturingsschakeling geeft aan de hand van dit signaal, alsmede van netspanning-synchronisatie signalen, de ontsteekpulsen voor de twaalf thyristoren.

Hiermee is de ontsteekhoek-regeling gerealiseerd.

Het tweede signaal geeft aan hoe de veldvoeding ingesteld wordt. Van deze voeding, een gestuurde stroombron, is de beschrijving aan te treffen in bijlage B.12. Hiermee wordt de bekrachtiging van de synchrone generator geregeld, en daarmee het

invertervermogen.

9.2. IJKING.

Voor het invoeren van de ingangsgrootheden in het regelprogramma moet eerst ijking plaatsvinden. Hiervoor is een meetprogramma opgesteld (zie bijlage B.13). Deze ijking komt neer op het vinden van een lineaire vergelijking die het verband aangeeft tussen het in het programma ingevoerde getal van 0 tot 255 (8-bits) en de echte waarde in volt, ampere of graden. Deze software-matige ijking wordt gecontroleerd door de aanwijzing van weekijzermeters (voor spanning en stroom) en een oscilloscoop (voor de fase-instelling).

De aldus verkregen waarden worden door een beeldscherm aangegeven. Hierbij kunnen ook afgeleide grootheden, zoals arbeidsfactor, invertervermogen en kabelverliesvermogen direkt aangegeven worden.

De twee grootheden die door het regelprogramma steeds afgeregeld worden, moeten nauwkeurig voorgesteld worden. De spanningsmeting is hiervan de moeilijkste. Men diene te bedenken dat een schijnbaar alleszins redelijke 1 % meetfout tot 2,2 volt spanningsafwijking leidt. Dit is echter 20 % van de maximaal toelaatbare spanningsstijging. Door toepassing van een 'drempel' in de spanningsensor-schakeling, waardoor in plaats van de volledige nu alleen de top van de halve spanningsperiode gemeten en geïntegreerd wordt, is de gevoeligheid opgevoerd. De integrator maakt een nauwkeuriger meting mogelijk dan met topdetectie waarmee ten gevolge van kommutatieverstoringen gemakkelijk een grote meetfout kan ontstaan. Nu is niet de amplitude van een kommutatiepiek maar de oppervlakte ervan bepalend voor de meetfout. Bij verhoging van de 'drempelwaarde' zal de relatieve invloed van de verstoring toenemen. Voor de keuze van de drempelwaarde moet dus een compromis gevonden worden. 1 % bleek de maximaal haalbare nauwkeurigheid.

Misschien is de voorspelbare kommutatieverstoring (een functie van I_1 en α) met het principe van bijvoegen van het ontbrekende te reduceren waardoor nog een verbetering te bereiken is.

Aan de hand van de berekeningen uit 7.6 wordt steeds de invertor-nullastspanning uitgerekend. Omgekeerd kan zo gecontroleerd worden of de aanname van de netimpedantie juist is. Anders zou namelijk de berekende nullastspanning niet konstant zijn, maar afhankelijk zijn van de ontsteekhoek en het geleverde vermogen van de invertor, wat per definitie niet correct is.

9.3. UITVOERING

Na ontwerp, bouw, programmering, ijking en debugging van de microprocessor regeling is allereerst een regeling uitgevoerd waarbij slechts één uitgangssignaal, voor de ontsteekhoekregeling, afgeleid werd (zie bijlage B.4). In het regelprogramma worden eerst enkele systeemconstanten ingevoerd. Daarna wordt de grens voor regelgebied I uitgerekend en gemeten wat de waarden van spanning, stroom en fase zijn. Vervolgens wordt getest aan welke kant van deze grens het werkpunt van het systeem zich bevindt. Afhankelijk daarvan wordt een regelactie ondernomen (bijstelling van de ontsteekhoek) om de blindstroom op nul, of de spanning op de maximale waarde af te regelen. Na elke regelstap van α wordt opnieuw een meting en een test uitgevoerd. Regelgebied III is bij het experimenteren geheel buiten beschouwing gelaten.

Voor regelgebied I bleek de regeling prima te functioneren. Echter toen in regelgebied II spanningskompensatie moest plaatsvinden bleek steeds een instabiliteit op te treden. Bij spanningsbeperking door verlaging van de ontsteekhoek tot onder 180 bleek door een verlaagde spanning in de gelijkstroomtussentrap het generatorvermogen toe te nemen waardoor de spanning op het net juist steeg. In 8.1, figuur 42,

is dit effect door traject (3) aangegeven.

Hieruit bleek de noodzaak om ook een vermogensregeling uit te voeren. Dit is door veldregeling van de synchrone generator gerealiseerd (zie 8.4).

Na een eenvoudige uitbreiding van het regelprogramma en de bouw van een regelbare veldvoeding kon ook het aldus uitgebreide systeem beproefd worden (zie bijlagen B.10 en B.11 voor het flowdiagram en de listing van het programma).

Het regelprogramma controleert nu eerst of het invertorvermogen aan de ingestelde wenswaarde gelijk is. Zoniet dan wordt dit door stapsgewijze aanpassing van de generator-veldstroom bereikt. Ook nu wordt na iedere stap een nieuwe meting en test uitgevoerd. Na instelling van het juiste vermogen wordt het hierboven beschreven programma uitgevoerd. Na een actie hierin uitgevoerd te hebben, wordt weer teruggesprongen naar het begin van het nieuwe programmadeel.

Door een ingestelde vertraging is met het oog goed te volgen hoe het systeem een instelpunt zoekt wat aan het spannings- en vermogenscriterium voldoet, en dit ook vindt. Hiermee is de werking van de regelstrategie in de laboratoriumopstelling aangetoond.

10. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

10.1. CONCLUSIES.

Door gebruikmaking van een u_L - vlak (zie 7.3) is heel inzichtelijk te maken wat bij een gegeven (zwak) elektriciteitsnet de beste instelling van de fase-hoek tussen spanning en stroom is, gegeven een spanningscriterium voor maximale netspanningsafwijking (+5 % of -10 % van de nominale waarde). In dezelfde figuur is de grens voor de kabelstroom aan te geven die een absolute bovengrens aan het te transporteren vermogen stelt.

Bij gering vermogenstransport is het voordelig de kabelblindstroom te elimineren, bij grote vermogens is blindstroom juist nodig om aan het spanningscriterium te voldoen.

Bij vermogensafname uit het net moet dan inductief blindvermogen aan het net geleverd worden. Door een invertor kan dit gerealiseerd worden door instelling van de ontsteekhoek tussen 180° en 270° . Bij teruglevering moet inductief blindvermogen worden opgenomen uit het net, bijvoorbeeld door instelling van de invertorontsteekhoek tussen 90° en 180° .

In dit laatste geval kan door reductie van de spanningsstijging op het aansluitpunt, benaderend uitgedrukt door $-\Delta U = R I_w - X I_b$ het terug te leveren wattvermogen waarbij het spanningscriterium niet overschreden wordt aanzienlijk vergroot worden: ongeveer een factor 4 vergeleken met terugleverig waarbij de blindstroom nul is. Dit geldt voor een afgeleid model voor een zwak net waarin van de impedantie de reaktantiewaarde X ongeveer de helft bedraagt van de weerstand R .

De impedantie wordt voornamelijk bepaald door de impedanties van de laagspanningskabel en de distributietransformator.

Wanneer de reaktantie in de netverbinding vergroot wordt, kan nog een verhoging van het maximaal vermogenstransport bereikt worden, tot aan de grens die bepaald is door de maximale kabelstroom (thermisch).

Als bij een laag invertorvermogen de blindlast van overige verbruikers van het net gecompenseerd wordt, zal de spanning in de gelijkstroom-tussentrap van de invertor dalen. Als een windturbine het vermogen opwekt heeft dit een gunstig effect op de benutting van de windenergie omdat het minimale generatortoerental waarbij opwekking kan plaatsvinden lager komt te liggen.

Wanneer door de ontsteekhoekregeling met het generatorvermogen de gelijkspanning stijgt, ontstaat er een elektrisch-vermogen-toerental relatie die de karakteristiek van maximaal te benutten windenergie (evenredig met n^3) beter benadert dan die voor het geval waarin sprake is van een konstante gelijkspanning.

10.2. AANBEVELINGEN.

Op een aantal punten is het onderzoek dat in het kader van dit afstudeerproject gedaan is nog verder of vollediger uit te werken.

Er kan vervolgonderzoek plaatsvinden met betrekking tot aspecten van de elektriciteitsnetten, de regeling, de regelaar zelf en het invertorsysteem.

1. ELEKTRICITEITSNETTEN.

Op meerdere plaatsen in dit afstudeerverslag is gesproken over de mogelijke voordelen van toepassing van verhoogde lijnreaktanties. Ook het nadeel ervan, wanneer de arbeidsfactor-regeling buiten bedrijf is, werd aangegeven.

Wellicht is het de moeite waard de mogelijkheden te onderzoeken

van toepassing van een systeem waarin met afstandsbesturing een spoel, die dan in serie met de kabel in de verbinding is opgenomen, kortgesloten kan worden wanneer de regeling buiten bedrijf raakt.

Een tweede punt betreft de flikkerkromme (zie 3.4).

Nagegaan kan worden, voor toepassing van windenergie, hoe het hanteren van deze kromme (de criteria voor spanningsfluctuaties) leidt tot eisen voor netimpedantie, maximaal terug te leveren vermogen en regelsnelheid.

Een derde punt heeft betrekking op de maximale thermische belastbaarheid van de energiekabel. Hiervoor is een waarde van maximale lijnstroom van 195 Ampere aangehouden.

Deze waarde is belangrijk voor het vaststellen van een grens tussen regelgebied II en III (zie 7.3).

In plaats van deze konstante waarde kan men in dynamische zin een andere grens aanleggen. Een kabel kan men namelijk zonder problemen vanwege de warmtecapaciteit gedurende korte tijd boven de maximale stroomwaarde belasten. Zo kan men met enige geheugenwerking een zekere variabele grens aanleggen en deze in het regelprogramma invoeren.

2. REGELING.

In de afstudeeropdracht was sprake van statische regeling van de arbeidsfactor. Als vervolg kan onderzocht worden hoe een meer dynamische regeling uitgevoerd kan worden. Hierdoor zouden ook (mogelijk hinderlijke) spanningsfluctuaties beperkt kunnen worden.

Hiertoe zou men het (trage) BASIC-regelprogramma kunnen compileren (vertalen naar een lagere maar snellere machinetaal) en misschien snellere regelmethodes (sneller dan eenvoudige stapsgewijze veranderingen van uitgangssignalen) kunnen invoeren.

Aansluitend op 8.4 en 8.5 zou de dynamische reactie van het gehele invertorsysteem, inclusief generator, op de ontsteekhoekregeling onderzocht kunnen worden. Wat 8.5 aangaat zou ook bekeken kunnen worden of de fluctuaties van windvermogen door een snelle gelijkspanningregeling gereduceerd kunnen worden. Zo kan misschien een tussenvorm gevonden worden van maximalisatie en afregeling op konstante waarde van vermogen. Hiertoe zou met een speciale besturing van de gelijkstroommachine in de laboratoriumopstelling een windturbine-gedrag bij variërende windsnelheid gesimuleerd kunnen worden.

3. REGELAAR.

In de laboratoriumopstelling werd gebruik gemaakt van een ITT-2020 microprocessorsysteem. Daar dit in de praktijk erg onhandig zal zijn toe te passen zou een kleine microprocessor-module beter gebruikt kunnen worden. Hiervoor zou het gehele regelprogramma in assembleertaal geschreven moeten worden waardoor een goedkope, handzame en snelle regelaar verkregen wordt.

4. INVERTORSYSTEEM.

Zoals in 8.5 staat vermeld, kan een uitbreiding van het invertorsysteem met een chopper in de gelijkstroom-tussentrap overwogen worden. Hiermee kan dan gelijkspanningregeling uitgevoerd worden. De microprocessor-regelaar kan hiervoor een stuursignaal genereren.

Als combinatie van inverter en chopper kan ook een pulsbreedte-gemoduleerde inverter gebruikt worden waardoor tevens met een kleiner uitgangsfILTER voor beperking van netvervuiling volstaan kan worden.

LIJST VAN SYMBOLEN

\underline{U}_0	Nullastspanning, als complex getal en vector.
\underline{U}_I	Klemspanning op het aansluitpunt, als complex getal en vector.
\underline{U}_L	Kabelspanning, als complex getal en vector. ($\underline{U} = \underline{U}_0 - \underline{U}_L$).
U_0, U_I, U_L	Effectieve waarden van resp. \underline{U}_0 , \underline{U}_I en \underline{U}_L .
ΔU	Spanningsdaling $U_0 - U_I$ (effectieve waarde).
$\underline{I}_0 = I_{w0} + j I_{b0}$	Stroom door een lokale belasting, als complex getal en vector, met I_{w0} en I_{b0} als watt- resp. blindstroom component (verbruikersconventie).
$\underline{I}_I = I_{wI} + j I_{bI}$	Invertorstroom, als complex getal en vector, met I_{wI} en I_{bI} als watt- resp. blindstroom component. (verbruikersconventie).
$\underline{I} = I_w + j I_b$	Lijnstroom, als complex getal en vector, met I_w en I_b als watt- resp. blindstroomcomponent. ($\underline{I} = \underline{I}_0 + \underline{I}_I$)
I, I_0, I_I	Effectieve waarden van resp. \underline{I} , \underline{I}_0 en \underline{I}_I .
I_{MAX}	Maximale lijnstroom (thermisch maximum, effectieve waarde).
$P_0 = 3 U_I I_{w0}$	Wattvermogen van de lokale belasting ($P_0 > 0$).
$P_I = 3 U_I I_{wI}$	Wattvermogen van de invertor ($P_I < 0$).
$P = 3 U_I I_w$	Vermogenstransport door de kabel ($P = P_0 + P_I$).
$\underline{Z} = R + j X$	Netimpedantie (uitgangsimpedantie van het net, lijn- of kabelimpedantie), als complex getal en vector.
Z	Absolute waarde van \underline{Z} .
\underline{u}_I, u_I	Genormeerde waarden (door deling door U_0) van \underline{U}_I en U_I .
\underline{u}_L, u_L	Genormeerde waarden (door deling door $Z I_{MAX}$) van \underline{U}_L en U_L .
p, p_0, p_I	Genormeerde vermogenswaarden van resp. P , P_0 en P_I , verkregen door deling van de resp. wattstromen door I_{MAX} .
p_v	Genormeed kabelverliesvermogen: $p_v = I^2 / I_{MAX}^2$.
U_{gs}	Invertorgelijkspanning (-ingangsspanning).
I_{gs}	Invertorgelijkstroom.
α	Invertor ontsteekhoek.

LIJST VAN VERWIJZINGEN

- [1] Collegedictaat 'Energieopwekking en transmissie I',
prof.ir. M. Antal.
- [2] Windengineering, vol. 1 (1977), no 2: Effects of wind
fluctuations on windmill behaviour, W. der kinderen,
J. van Meel, P. Smulders.
- [3] Rapport van de V.D.E.N.: 'Het ontwerpen van
distributienetten, deel 2: Belastingswaarden.
- [4] Overgenomen uit: AEG Handbücher 9: Rechnungsgrößen für
Hochspannungsanlagen, Heinrich Langrehr.
- [5] Collegedictaat 5.502: Grondslagen Elektrische
Energietechniek II, prof. dr. ir. W.C.M. van den Heuvel.
- [6] IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.
PAS-100, no. 9, September 1981: New static VAR-control
using Forced-Commutated Inverters.
- [7] Collegedictaat 5.011: Vermogenslektronica, Ir. P. van
Oosterhoudt en Ir. W.J. de Zeeuw.
- [8] Rapport EMV 83-12, T.H.E., vakgroep E.M.V.:
Selbstgeführter Stromrichter für die Einspeisung von
Windenergie in ein Dreiphasennetz, I. Dvorakova.
- [9] Rapport EMV 84-36, T.H.E., Vakgroep E.M.V.:
Stromen en spanningen in de twaalfpulsige mutator met
regelbare arbeidsfactor, Ir. L.J.J. Offringa.
- [10] ASEA Journal, vol 55 (1982), no. 6: Itaipu, the worlds
largest HVDC-intertie.
- [11] Rapport EM 82-11/R-570-D, T.H.E., vakgroep E.M.V.:
Berekeningen en metingen aan een borstelloze synchrone
generator die door een windturbine wordt aangedreven,
J.A.N. de Bonte.
- [12] Ontleend aan het vermogen-toerental berekeningsprogramma,
besproken in [11].

LIJST VAN BIJLAGEN

	blz.
B.1 Listing programma netberekening	11.4
B.2 Afleiding P_k^+ , P_k^- , P_m^+ en P_m^-	11.6
B.3 Listing programma $p_v(p)$ - berekening	11.7
B.4 Flowdiagram voor ontsteekhoekregeling	11.8
B.5 Listing programma ontsteekhoekregeling	11.10
B.6 Beschrijving elektronica voor ingangsignalen	11.13
B.7 Berekeningen bij 7.6: Beperkt regelsysteem	11.17
B.8 Listing programma $U_{gs}(P, I)$ - berekening	11.20
B.9 Listing programma $P_g(U_{gs}(P, I), I_v, n)$ - berekening	11.21
B.10 Flowdiagram ontsteekhoek- en veldregeling.	11.24
B.11 Listing programma ontsteekhoek- en veldregeling.	11.26
B.12 Beschrijving regelbare veldvoeding	11.29
B.13 Listing meetprogramma	11.30

BIJLAGE 1: Listing programma netberekening

```
10 REM NETBEREKENINGEN, NETBER FILE
20 PRINT "P.VERLIES (1) OF DU (2)": INPUT T9
30 PRINT " ALFA.BEGIN = (?)": INPUT AB
40 PRINT "PRINT(1) OF PLOT(2)": INPUT T1
50 IF T1 = 1 GOTO 310
60 PRINT "RASTER(1), ASSEN(2), NIETS(3)": INPUT T2
70 IF T2 = 3 GOTO 220
80 HGR : HCOLOR= 7
90 REM TEKEN ASSEN EN/OF RASTER
100 HPLOT 0,0 TO 279,0: HPLOT TO 279,159
110 HPLOT TO 0,159: HPLOT TO 0,0
120 FOR I = 0 TO 279 STEP 28
130 IF T2 = 1 THEN HPLOT I,0 TO I,159
140 IF T2 = 2 THEN HPLOT I,156 TO I,159
150 IF T2 = 2 THEN HPLOT I,0 TO I,3
155 HPLOT 140,0 TO 140,159
160 NEXT I
170 FOR I = 0 TO 159 STEP 16
180 IF T2 = 2 THEN HPLOT 0,159 - I TO 3,159 - I
190 IF T2 = 2 THEN HPLOT 276,159 - I TO 279,159 - I
200 IF T2 = 1 THEN HPLOT 0,159 - I TO 220,159 - I
204 IF T9 = 2 THEN HPLOT 0,79 TO 279,79
205 IF T9 = 2 THEN HPLOT 0,63 TO 279,63
206 IF T9 = 2 THEN HPLOT 0,111 TO 279,111
210 NEXT I
220 U0 = 220
230 IM = 195
240 R2 = 0.32
250 X2 = 0.18
260 PA = 20000
270 PI = 4 * ATN (1)
280 FI = 26
290 QA = PA * TAN (FI * PI / 180)
300 PRINT "ALFA = ", "PV =", "DU1.REL ="
310 PT = - 100000
320 FOR ALFA = AB TO 230 STEP 5
330 R1 = 3 * U0 * U0 / PA
340 X1 = 3 * U0 * U0 / QA
350 T1 = - 1 * X1 * X2 * R1
```

BIJLAGE 1 (vervolg)

```

360 T2 = X1 * R1 * R2
370 N1 = R1 * R2 - X1 * X2
380 N2 = X1 * R1 + X1 * R2 + R1 * X2
390 T3 = T1 * N1 + T2 * N2
400 T4 = T2 * N1 - N2 * T1
410 N3 = N1 * N1 + N2 * N2
420 R = T3 / N3
430 X = T4 / N3
440 EO = UO * X1 * R1 / SQR (N3)
450 QT = - 1 * PT * TAN ((180 - ALFA) * PI / 180)
460 ID = PT / (3 * EO)
470 IQ = QT / (3 * EO)
480 A = ID / 10
490 B = IQ / 10
500 GOSUB 530
510 GOSUB 580
520 GOTO 660
530 REM SUBR BEREKEN U1
540 UD = R * ID + X * IQ
550 UQ = X * ID - R * IQ
560 U1 = SQR (EO * EO - UQ * UQ) - UD
570 RETURN
580 REM SUBR. BEREKEN FLOSS
590 IW = ID + PA / (3 * U1)
600 IB = IQ + QA / (3 * U1)
610 PL = R2 * (IW * IW + IB * IB)
620 PV = (IW * IW + IB * IB) / (IM * IM)
630 LL = PA * U1 * U1 / (UO * UO)
640 P1 = LL + PT
645 DU1R = U1 / UO
650 RETURN
660 REM ITERATIE FTURBINE
670 GOSUB 530
680 T = U1 * ID - PT / 3
690 IF ABS (T) < 500 GOTO 760
700 IF SGN (T) = SGN (A) GOTO 730
710 A = - A / 3
720 B = - B / 3
730 ID = ID - A
740 IQ = IQ - B
750 GOTO 670
760 GOSUB 580
770 IF T1 = 1 GOTO 850
790 PRINT INT (ALFA), INT (1000 * PV) / 1000, INT (DU1R * 1000) / 1000
800 IF T9 = 2 GOTO 840
810 IF ALFA = AB THEN HPLOT (ALFA - 130) * 2.8,159 - PV * 159
820 IF ALFA > AB THEN HPLOT TO (ALFA - 130) * 2.8,159 - PV * 159
830 GOTO 850
840 IF ALFA = AB THEN HPLOT (ALFA - 130) * 2.8,159 - (DU1R - 0.75) * 320
845 IF ALFA > AB THEN HPLOT TO (ALFA - 130) * 2.8,159 - (DU1R - 0.75) *
850 NEXT ALFA
860 END
    
```

BIJLAGE 2: Afleiding P_k^+ , P_k^- , P_m^+ , P_m^- .

```

10 REM BEREKENING PMAX EN PKAR, PKAR-FILE
20 PRINT "UMAX = (?)": INPUT UM
30 IM = 195
40 UO = 220
50 R = 0.32
60 X = .18
70 R2 = R * R; X2 = X * X; M2 = IM * IM; Z2 = R2 + X2
80 C1 = - 2 * UM * R
90 UD = (UO * UO - UM * UM - Z2 * M2) / (2 * UM)
100 UQ = - SQR (UO * UO - (UM + UD) * (UM + UD))
110 IF UM < UO THEN UQ = - UQ
120 IW = (UD * R + X * UQ) / Z2
130 IB = (R * UQ - X * UD) / Z2
140 U1 = SQR (UO * UO - UQ * UQ) - UD
150 PRINT "IWMAX = "; IW
160 PRINT " IB = "; IB
170 PRINT "P MAX = "; 3 * IW * UM
180 PRINT "PMNORM= "IW / IM
190 W = C1 * C1 - 4 * Z2 * (UM * UM - UO * UO)
200 IK = (C1 + SQR (W)) / (2 * Z2)
210 PRINT ""
220 PRINT "IWKAR = "; IK
230 PRINT "P KAR = "3 * IK * UM
240 PRINT "PKNORM= "; IK / IM
250 PRINT ""
260 PRINT "PM/PK = "; IW / IK
    
```

URUN

UMAX = (?)

?231

IWMAX = -142.87596

IB = -132.708176

P MAX = -99013.0403

PMNORM= -.732697231

IWKAR = -34.6513566

P KAR = -24013.3902

PKNORM= -.177699265

PM/PK = 4.12324289

URUN

UMAX = (?)

?198

IWMAX = 119.010285

IB = 154.471849

P MAX = 70692.1095

PMNORM= .610309156

IWKAR = 67.6946786

P KAR = 40210.6391

PKNORM= .347152198

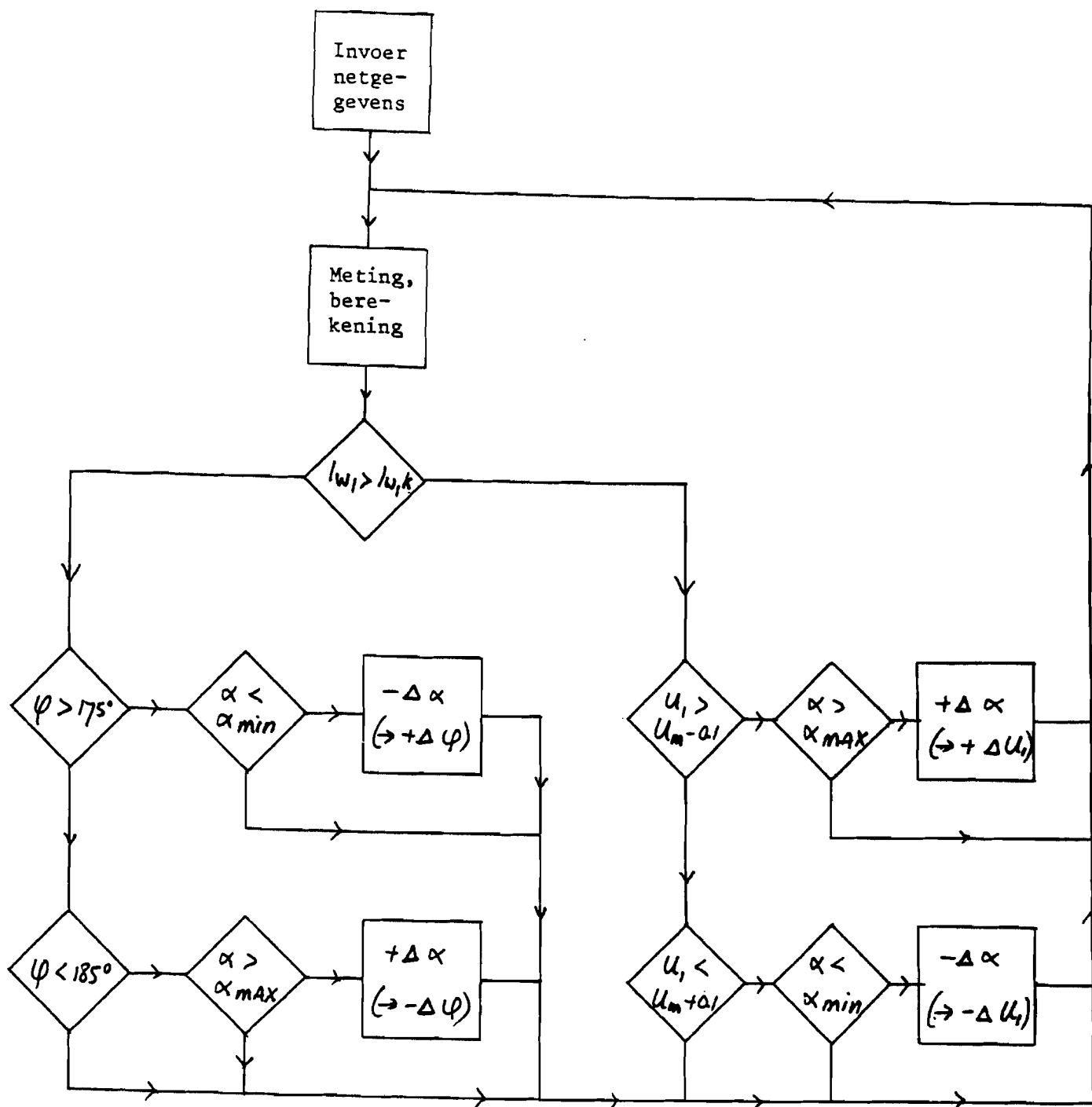
PM/PK = 1.75804491

BIJLAGE 3: Listing programma p (p) - berekening

```

10  REM  Q1(P) EN PV(P) FUNCTIE, Q1 FILE
20  REM  P EN PK < 0 !! (BIJLAGE 7.3)
30  PRINT "PRINT(1) OF PLOT(2)": INPUT T1
40  IF T1 = 1 GOTO 220
50  PRINT "RASTER(1), ASSEN(2), NIETS(3)": INPUT T2
60  IF T2 = 3 GOTO 220
70  HGR : HCOLOR= 7
80  REM  TEKEN ASSEN EN/OF RASTER
90  HPLOT 0,0 TO 279,0: HPLOT TO 279,159
100 HPLOT TO 0,159: HPLOT TO 0,0
110 FOR I = 0 TO 279 STEP 28
120 IF T2 = 1 THEN HPLOT I,0 TO I,159
130 IF T2 = 2 THEN HPLOT I,156 TO I,159
140 IF T2 = 2 THEN HPLOT I,0 TO I,3
150 NEXT I
160 FOR I = 0 TO 159 STEP 32
170 IF T2 = 2 THEN HPLOT 0,159 - I TO 3,159 - I
180 IF T2 = 2 THEN HPLOT 276,159 - I TO 279,159 - I
190 IF T2 = 1 THEN HPLOT 0,159 - I TO 220,159 - I
200 NEXT I
220 PRINT "P1 (KW)", "Q1 (KVAR)      PV (KW)
230 U0 = 220
240 UM = 231: IM = 195:
250 R = 0.32
260 X = 0.18
270 PD = 3 * R * IM * IM
280 Z2 = R * R + X * X
290 A1 = Z2
300 B1 = 2 * UM * R
310 C1 = UM * UM - U0 * U0
320 W = B1 * B1 - 4 * A1 * C1
330 D1 = ( - B1 + SQR (W)) / (2 * A1)
340 PK = 3 * UM * D1
350 IF T2 < 3 THEN HPLOT - D1 * 280 / IM,0 TO - D1 * 280 / IM,159
360 FOR T = 1 TO 80 STEP 1
370 IB = 0
380 IW = T * - 3
390 REM  BEREKEN U1
400 UD = R * IW
410 UQ = X * IW
420 U1 = SQR (U0 * U0 - UQ * UQ) - UD
430 P = 3 * U1 * IW
440 IF P > PK GOTO 510: REM  WEINIG NEGATIEVE VERM.STROOM
450 U1 = UM
460 A = Z2
470 B = - 2 * U1 * X
480 C = IW * IW * Z2 + 2 * U1 * R * IW + U1 * U1 - U0 * U0
490 W = B * B - 4 * A * C
500 IB = ( - 1 * B - SQR (W)) / (2 * A)
510 Q1 = 3 * IB * U1
520 PV = (IW * IW + IB * IB) * R * 3
530 PRINT 0.01 * INT (P / 10), 0.01 * INT (Q1 / 10), 0.01 * INT (PV / 10)
535 IF T = 1 THEN HPLOT 0,159
540 HPLOT TO - IW * 280 / IM,159 - PV * 160 / PD
550 NEXT T
560 END
    
```

BIJLAGE 4: Flowdiagram voor ontsteekhoekregeling



Toelichting bij Flow-diagram, B.4

- 1 Invoer netgegevens, de waarden van X , R , U_0 , U_M en I_{MAX} .
- 2 Meting van U_1 , I en φ .
 Berekening van $I_W = I \cos \varphi$, $I_b = I \sin \varphi$ en I_{wk} : de maximale wattstroom, volgens het spanningscriterium, waarbij $I_b = 0$.
- 9 Vaststelling of het systeem zich in regelgebied I (voor $\cos \varphi$ - regeling) of regelgebied II (spanningsregeling) bevindt. ($I_W < 0$)
- 10, 11 Vaststellen of de arbeidsfactor te sterk van -1 afwijkt.
- 12, 13, 14, 15 Begrenzing van α .
- 16, 17 Toename of afname van α waardoor φ afneemt resp. toeneemt, en dus $|I_b|$ afneemt.
- 18 Vaststellen of U_1 de maximale waarde overschrijdt.
- 19 Vaststellen of als gevolg van spanningskompensatie U_1 meer dan noodzakelijk beperkt wordt.
- 20, 21 Vergroten resp. verkleinen van de spanningskompensatie.

BIJLAGE 5: Listing programma ontsteekhoekregeling

```

5  REM  ONTSTEEKHOEKREGLING, FILE ALFA
10  U0 = 220
20  UM = 240
30  IM = 200
40  R = 0.8
50  X = 0.16
60  ALFA = 180
70  H1 = 150
80  H2 = 210
90  REM  RESP. ALFA-MIN , ALFA-MAX
100 DEELAY = 0
110 A = - 16384 + (256 * 4)
120  REM  INPUT SLOT 4
130 PI = ATN (1) * 4
140 T = 0
150  GOSUB 790: REM  READ FI
160  GOSUB 840: REM  READ U1
170  GOSUB 900: REM  READ I
180 ID = I * COS (FI * 3.1416 / 180)
190 IQ = I * SIN (FI * 3.1416 / 180)
200  REM  BEREKENING ID2 = D2, GRENS II EN III
210 R2 = R * R:X2 = X * X:M2 = IM * IM
220  REM  BEREKENING ID1=D1, GRENS I EN II
230 A1 = R2 + X2
240 B1 = 2 * UM * R
250 C1 = UM * UM - U0 * U0
260 W = B1 * B1 - 4 * A1 * C1
270 D1 = ( - B1 + SQR (W)) / (2 * A1)
280 PKR = 3 * UM * D1
290  HOME
300  VTAB 3: PRINT " U0 =          ( V )
310  VTAB 5: PRINT " U1 =          ( V )
320  VTAB 7: PRINT " I =           ( A )
330  VTAB 9: PRINT " FI =          ( GRADEN )
340  VTAB 11: PRINT " PI =         ( KW )
350  VTAB 13: PRINT " PL =         ( KW )
360  VTAB 15: PRINT " AF = "
370  VTAB 17: PRINT " ID =         ( A )
380  VTAB 19: PRINT " IQ =         ( A )
390  VTAB 21: PRINT "ALFA=        ( GRADEN)
400  VTAB 23: PRINT "P.KR=        ( KW )
410 T = T + 1
420 IF T > 25 GOTO 140
430  GOSUB 1010: REM  READ , PRINT DATA
440  VTAB 1: HTAB 7: PRINT "
450 IF ID > D1 GOTO 590
460  REM  ZO JA: WEINIG TERUGLEVERING
470 IF U1 > UM - 0.5 GOTO 530
480 IF ALFA > = H2 GOTO 410
490 ALFA = ALFA + 1
500  VTAB 1: HTAB 7: PRINT "TOENAME  U1"

```

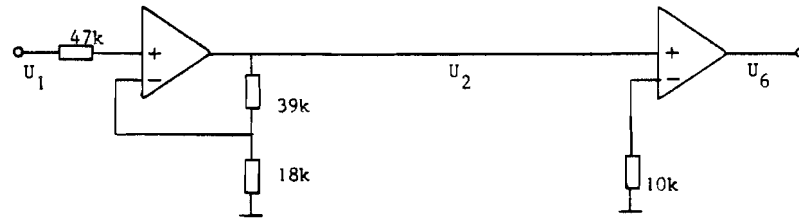
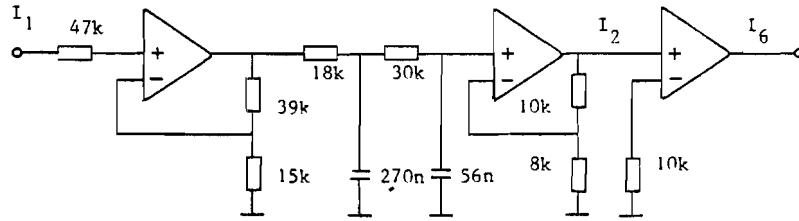
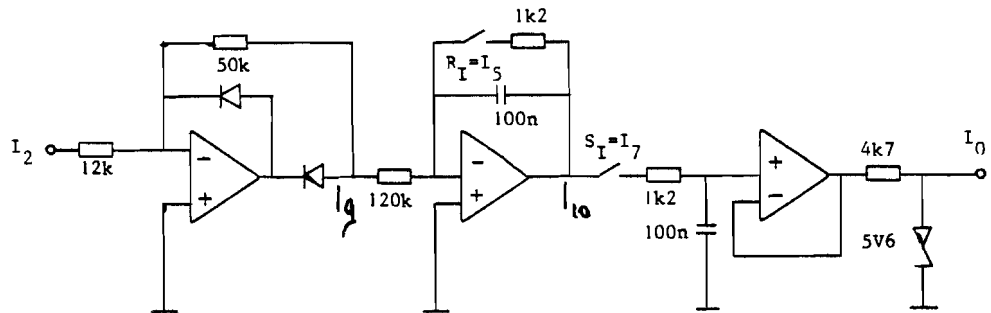
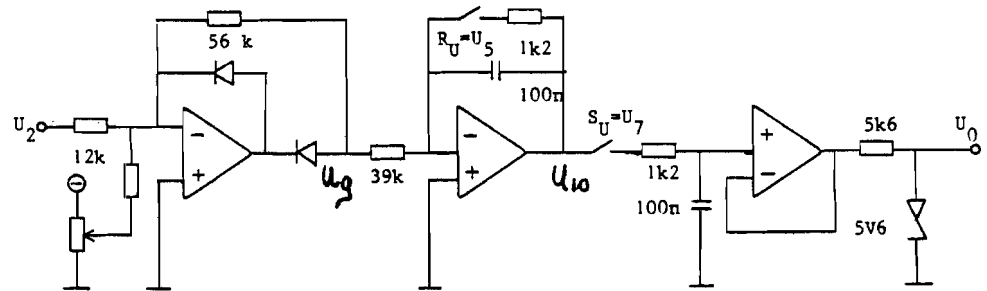
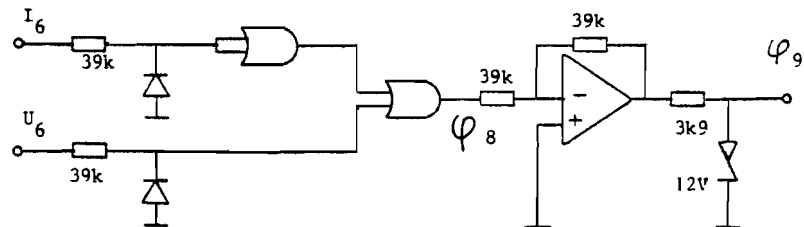
BIJLAGE 5 (vervolg)

```
510 GOSUB 960: REM OUTPUT ALFA
520 GOTO 410
530 IF U1 < UM + 0.5 GOTO 410
540 IF ALFA < = H1 GOTO 410
550 ALFA = ALFA - 1
560 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "AF NAME U1"
570 GOSUB 960: REM OUTPUT ALFA
580 GOTO 410
590 IF FI > 178 GOTO 650
600 IF ALFA < = H1 GOTO 410
610 ALFA = ALFA - 1
620 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "TOENAME FI "
630 GOSUB 960: REM OUTPUT ALFA
640 GOTO 410

650 IF FI < 182 GOTO 410
660 IF ALFA > = H2 GOTO 410
670 ALFA = ALFA + 1
680 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "AF NAME FI "
690 GOSUB 960: REM OUTPUT ALFA
700 GOTO 410
710 REM SUBROUTINE DELAY
720 TM = DEELAY * 115
730 TELLER = 0
740 TELLER = TELLER + 1
750 VTAB 1: PRINT TELLER
760 IF TELLER < = TM GOTO 740
770 RETURN
780 REM SUBROUTINE READ FI, KANAAL 1.
790 POKE A + 1,1
800 F = PEEK (A)
810 FI = (F + 140) * 0.579
820 RETURN
830 REM SUBROUTINE READ U1, KANAAL 2.
840 POKE A + 1,2
850 U = PEEK (A)
860 UT = U * 0.152 + 215
870 U1 = 0.5 * (U1 + UT)
880 RETURN
890 REM SUBROUTINE READ I, KANAAL 0
900 POKE A + 1,0
910 II = PEEK (A)
920 I = II * 50 / 255
930 RETURN
940 REM SUBROUTINE OUTPUT ALFA
950 REM SLOT 1, KANAAL 1
960 OUT = (ALFA - 120) * 255 / 180
970 POKE - 16256 + 1 * 16 + 1,OUT
980 GOSUB 710: REM SUBROUTINE DELAY
990 RETURN.
```


BIJLAGE 5: (vervolg)

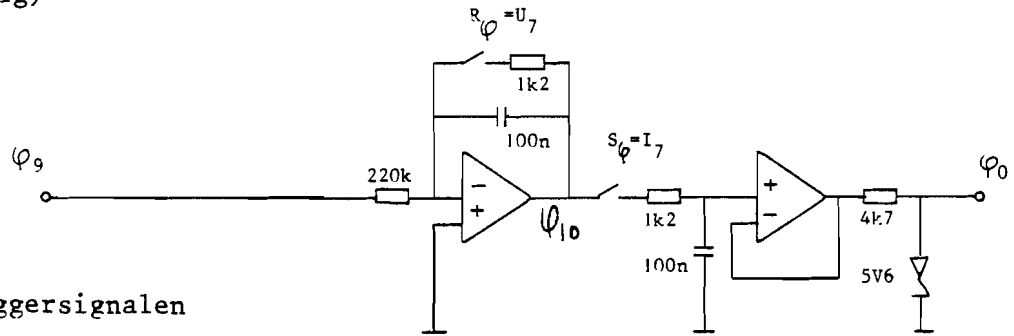
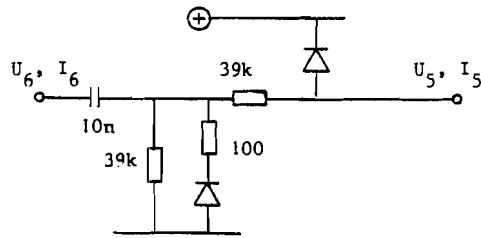
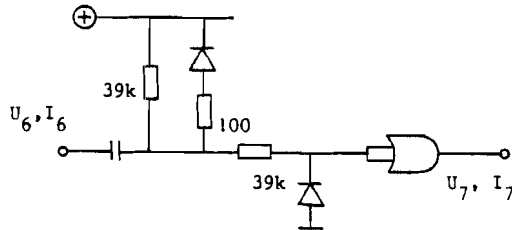
```
1000 REM SUBROUTINE MEET, PRINT DATA
1010 GOSUB 900: REM READ I
1020 GOSUB 790: REM READ FI
1030 GOSUB 840: REM READ U1
1040 AF = COS (FI * 3.1416 / 180)
1050 ID = I * AF
1060 IQ = I * SIN (FI * 3.14 / 180)
1070 P1 = U1 * ID * 3
1080 PL = R * I * I * 3
1090 PO = P1 - PL
1100 VTAB 7: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * I)
1110 VTAB 3: HTAB 7: PRINT INT (U0)
1120 VTAB 5: HTAB 7: PRINT INT (U1)
1130 VTAB 9: HTAB 7: PRINT INT (FI)
1140 VTAB 11: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (0.1 * P1)
1150 VTAB 13: HTAB 7: PRINT 0.001 * INT (PL)
1160 VTAB 15: HTAB 7: PRINT 0.001 * INT (1000 * AF)
1170 VTAB 17: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (ID * 100)
1180 VTAB 19: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * IQ)
1190 VTAB 21: HTAB 7: PRINT ALFA
1200 VTAB 23: HTAB 7: PRINT 0.001 * INT (PKR)
1210 RETURN
```

BIJLAGE 6 : Beschrijving elektronica voor ingangssignalen
Ingangsversterkers

**Integrate/dump,
sample/hold**

Fase-detektie


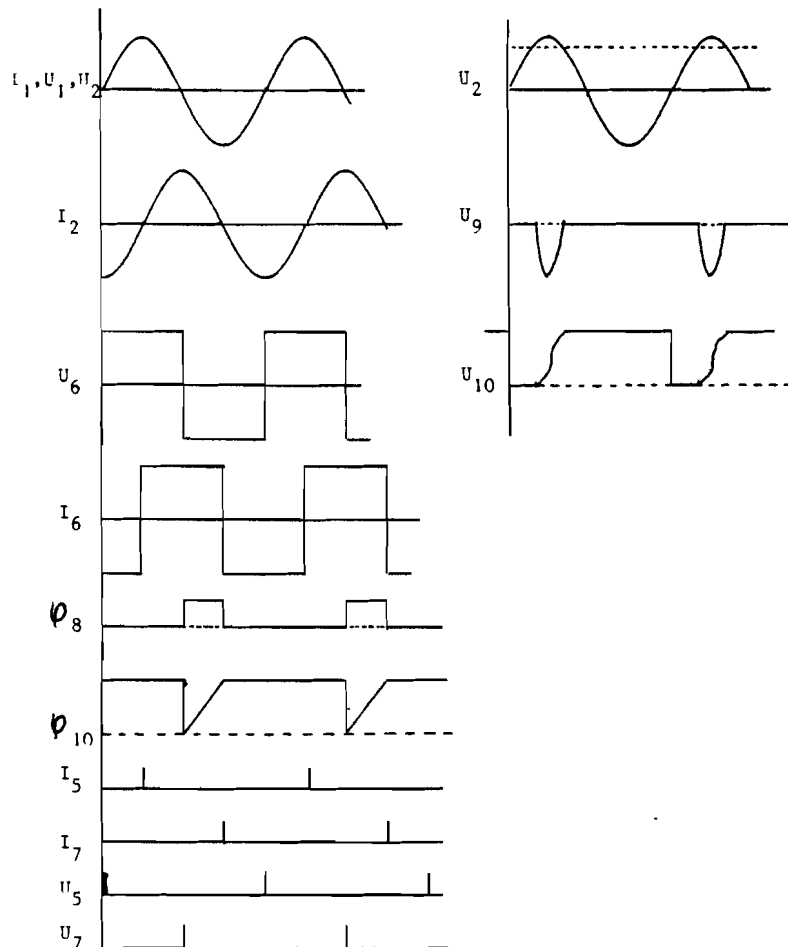
4741 quad opamp

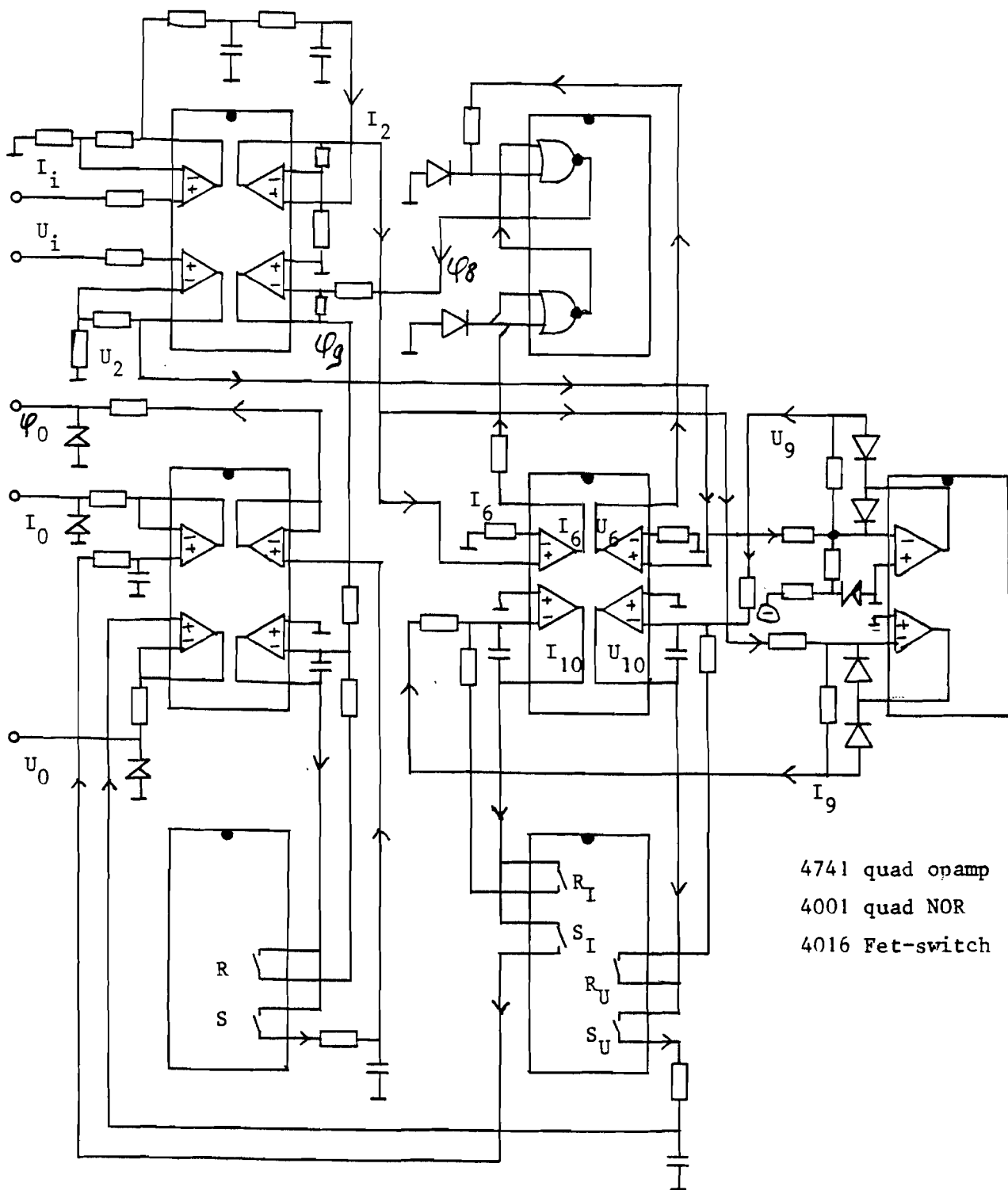
4001 quad NOR

4016 Fet-switch

BIJLAGE 6 (vervolg)

Afleiding van triggersignalen


4741 quad onamp
 4001 quad NOR
 4016 Fet-switch

Spanningsvormen


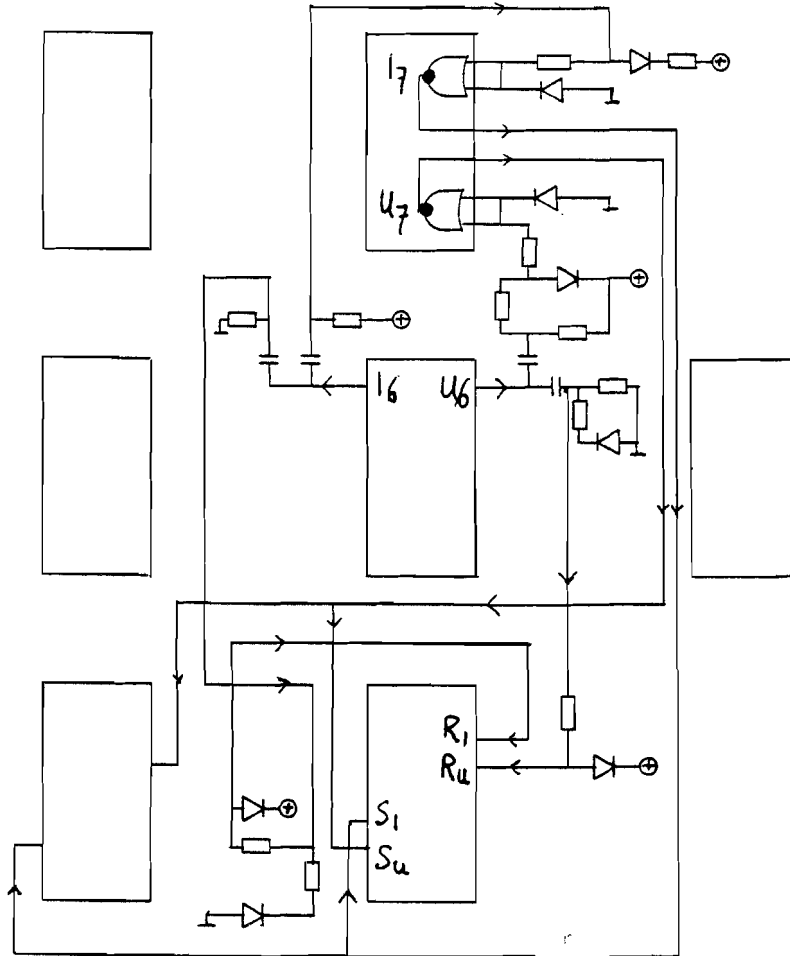
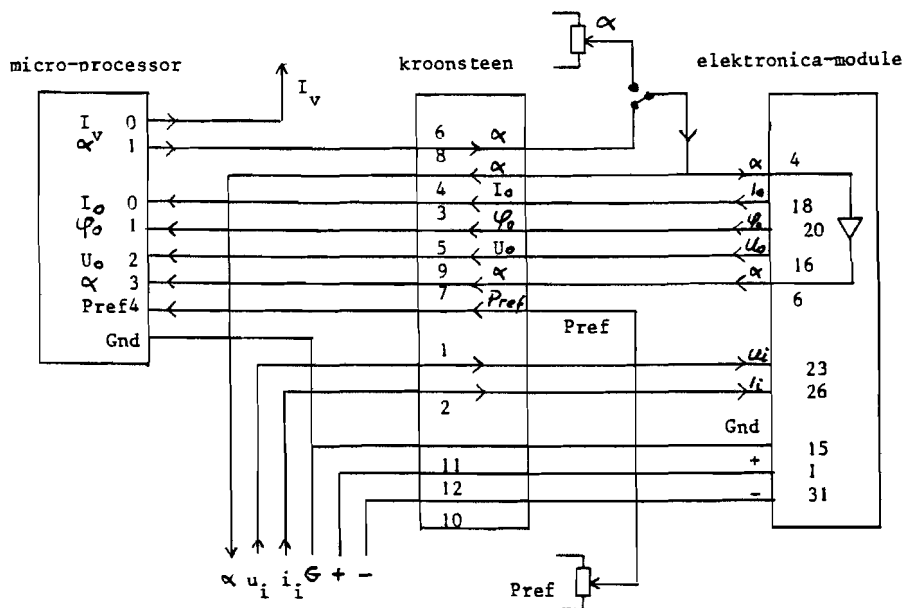
BIJLAGE 6 (vervolg)
Beschrijving van de print


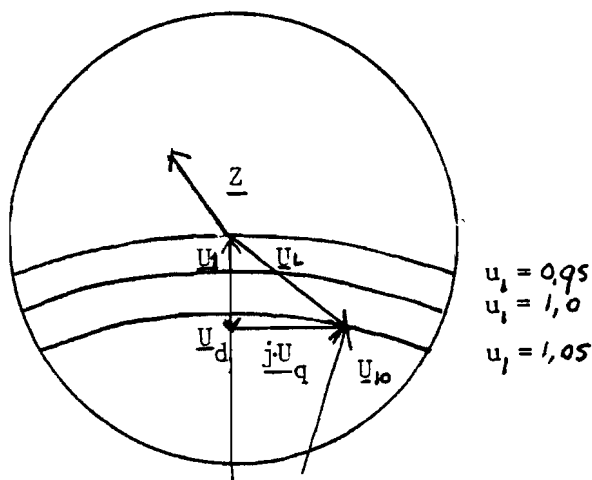
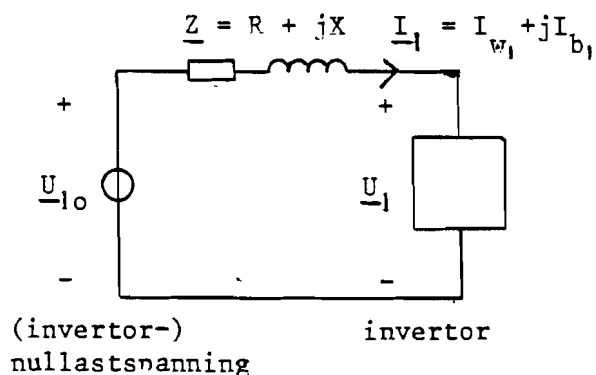
4741 quad opamp

4001 quad NOR

4016 Fet-switch

BIJLAGE 6 (vervolg)

 Circuit van
triggersignalen

 Overzicht van
aansluitingen


BIJLAGE B.7: BEPERKT REGELSTEEEM


Stel:

$$U_{10} = U_1 \text{ voor } I_1 = 0 \quad (1)$$

$$U_d = R I_{w1} - X I_{b1} \quad (2)$$

$$U_q = R I_{b1} + X I_{w1} \quad (2)$$

$$I_1^2 = I_{w1}^2 + I_{b1}^2$$

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$I_{w1} = I_1 \cos \alpha$$

$$I_{b1} = -I_1 \sin \alpha$$

Uit het vectordiagram is af te leiden:

$$(U_1 + U_d)^2 + (U_q)^2 = U_{10}^2 \quad (3)$$

Substitueer (1) en (2) in (3):

$$(U_1 + R I_{w1} - X I_{b1})^2 + (R I_{b1} + X I_{w1})^2 = U_{10}^2$$

$$\Rightarrow U_{10}^2 = U_1^2 + U_1 \cdot (2(R I_{w1} - X I_{b1})) + I_1^2 Z^2 \quad (4)$$

Zo is uit de gemeten grootheden (U_1 , I_{w1} , I_{b1}) en de constanten (R en X) uit (4) de invertornullastspanning U_{10} af te leiden.

De invertorstroom I_{ω_1} die volgens het spannings- en vermogenscriterium geleverd kan worden hangt van deze waarde U_{10} af. Zo is een waarde van $I_{\omega_{k_1}}$, de 'kritische' invertorwattstroom die voor $\alpha = 180^\circ$ de aansluitspanning U_1 doet stijgen tot de maximale waarde $U_M = 1,05 U_0$, af te leiden op de volgende manier:

Als variant op (3) geldt:

$$(U_{10} + R I_{\omega_{k_1}})^2 + X^2 I_{\omega_{k_1}}^2 = U_M^2 \quad (5)$$

$$\Rightarrow (I_{\omega_{k_1}} \cdot Z)^2 + I_{\omega_{k_1}} (2 R U_{10}) + (U_{10}^2 - U_M^2) = 0 \quad (6)$$

Uit vergelijking (6) is dus $I_{\omega_{k_1}}$ op te lossen en daaruit vervolgens

$$P_{k_1}^- = 3 I_{\omega_{k_1}} U_M$$

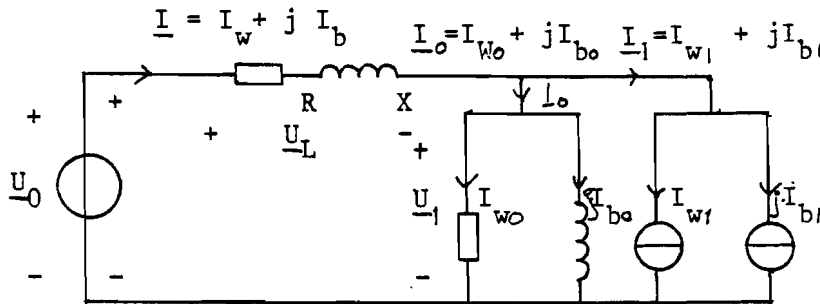
Deze waarde geeft een nieuwe grens aan tussen regelgebieden I en II, die nu dus van de invertornullastspanning afhangt.

Als $|I_{\omega_1}| > |I_{\omega_{k_1}}|$ moet als regelcriterium $U_1 = U_M$ aangenomen worden.

AFLEIDING I_0 uit U_{10} en φ_0

Uit het verschil tussen U_0 en U_{10} alsmede een schatting (of aanname) van de gemiddelde arbeidsfactor van de lokale belasting is een stroom I_0 af te leiden, die door de aldus aangenomen lokale belasting zou lopen. Deze belasting wordt vervolgens denkbeeldig op hetzelfde punt als de invertor op het net aangesloten.

Op deze wijze wordt een situatie geconstrueerd die gelijk is aan de voorstelling van figuur 34.



figuur 34: netaansluiting

Voor de berekening van \underline{I}_0 zijn de volgende uitdrukkingen van belang:

Stel:

$$I_{b0} = I_{w0} \tan \varphi_0$$

$$U_{d0} = R I_{w0} - X I_{b0} = I_{w0} (R + X \tan \varphi_0)$$

$$= k_1 I_{w0}$$

$$U_{q0} = X I_{w0} + R I_{b0} = I_{w0} (X + R \tan \varphi_0)$$

$$= k_2 I_{w0}$$

$$(U_{l0} + U_{d0})^2 + U_{q0}^2 = U_0^2$$

$$\Rightarrow (U_{l0} + k_1 I_{w0})^2 + k_2^2 I_{w0}^2 = U_0^2$$

$$\Rightarrow I_{w0}^2 (k_1^2 + k_2^2) + I_{w0} (2 k_1 U_{l0}) = (U_{l0} - U_0^2) = 0$$

Hierin geldt : $(k_1^2 + k_2^2) = Z^2 (1 + \tan^2 \varphi_0)$

Nu is $I_{w0} = I_{w0}(\tan \varphi_0, U_{l0})$ op te lossen en vervolgens

$$I_{b0} = I_{w0} \tan \varphi_0 \text{ waaruit volgt}$$

$$\underline{I}_0 = I_{w0} + j I_{b0}$$

BIJLAGE 8: Listing programma Ugs(P) - berekening

```

10  REM ALFA(P1) EN UGS(P1). UGS FILE
20  REM P1 EN PK < 0 !! (BIJLAGE 8.1)
30  PRINT "PRINT(1) OF PLOT(2)": INPUT T1
40  IF T1 = 1 GOTO 190
50  PRINT "RASTER(1), ASSEN(2), NIETS(3)": INPUT T2
60  IF T2 = 3 GOTO 190
70  HGR : HCOLOR= 7
80  REM TEKEN ASSEN EN/OF RASTER
90  HPLOT 0,159 TO 279,159: HPLLOT TO 279,0
100 HPLLOT TO 0,0: HPLLOT TO 0,159
110 FOR I = 0 TO 279 STEP 25
120 IF T2 = 1 THEN HPLLOT I,0 TO I,159
130 IF T2 = 2 THEN HPLLOT I,156 TO I,159
140 NEXT I
150 FOR I = 0 TO 159 STEP 25
160 IF T2 = 2 THEN HPLLOT 0,159 - I TO 3,159 - I
170 IF T2 = 1 THEN HPLLOT 0,159 - I TO 279,159 - I
180 NEXT I
190 PRINT "P1 (KW)", "ALFA (GRA) UGS (V)
200 U0 = 220
210 UM = 231
220 P0 = 20000:FI = 27
240 Q0 = TAN (FI * 3.14 / 180) * P0
250 W0 = P0 / (3 * U0):B0 = - Q0 / (3 * U0): REM BENADERING LLASTSTROOM
260 R = 0.32
270 X = 0.18
280 Z2 = R * R + X * X
290 FOR T = 1 TO 50 STEP 1
300 W1 = T * - 4
310 B1 = - B0
320 IW = W0 + W1
330 REM BEREKEN U1
340 UD = R * IW
350 UQ = X * IW
360 U1 = SQR (U0 * U0 - UQ * UQ) - UD
370 IF U1 < UM GOTO 450
380 U1 = UM
385 REM BEREKENING IB
390 A = Z2
400 B = - 2 * U1 * X
410 C = IW * IW * Z2 + 2 * U1 * R * IW + U1 * U1 - U0 * U0
420 W = B * B - 4 * A * C
430 IB = ( - 1 * B - SQR (W)) / (2 * A)
440 B1 = IB - B0
450 Q1 = 3 * B1 * U1:P1 = 3 * W1 * U1
460 ALFA = - ATN (B1 / W1) + 3.14
470 UGS = U1 * 3 * SQR (6) / 3.14 * COS (ALFA)
480 REM ALFA IN RADIALEN
490 PV = (IW * IW + IB * IB) * R * 3
500 PRINT 0.01 * INT (P1 / 10), INT (ALFA * 180 / 3.14), INT (UGS)
510 IF T1 = 1 GOTO 550
520 IF T > 1 GOTO 540
530 HPLLOT P1 / - 400,UGS / + 4 + 159
540 HPLLOT TO P1 / - 400,UGS / + 4 + 159
550 NEXT T: END
    
```

BIJLAGE 9: Listing programma Pg(Ugs(P),I ,n) - berekening

```

10 REM NIEUWE P(N)-KROMME, PN PLOT FILE
20 REM LEES DATA IN
30 READ AL,RG,LC,LD,LQ, DN,DE,C,NE,BA
40 IV = 1: REM VELDSTROOM
50 PRINT "PRINT(1) OF PLOT(2)": INPUT T1
60 IF T1 = 1 GOTO 210
70 PRINT "RASTER(1), ASSEN(2), NIETS(3)": INPUT T2
80 HGR : HCOLOR= 7
90 IF T2 = 3 GOTO 210
100 REM TEKEN ASSEN EN/OF RASTER
110 HPLOT 0,159 TO 220,159
120 HPLOT 0,0 TO 0,159
130 FOR I = 0 TO 220 STEP 10
140 IF T2 = 1 THEN HPLOT I,0 TO I,159
150 IF T2 = 2 THEN HPLOT I,156 TO I,159
160 NEXT I
170 FOR I = 0 TO 159 STEP 20
180 IF T2 = 2 THEN HPLOT 0,159 - I TO 3,159 - I
190 IF T2 = 1 THEN HPLOT 0,159 - I TO 220,159 - I
200 NEXT I
210 Q = 0
220 PI = 4 * ATN (1)
230 UO = 220
240 UM = 231
250 PO = 20000
260 FI = 27
270 QO = TAN (FI * 3.14 / 180) * PO
280 R = 0.32
290 XX = 0.18
300 REM BEREKEN PKAR.; D1=IW KAR.
310 Z2 = R * R + XX * XX
320 A1 = Z2
330 B1 = 2 * UM * R
340 C1 = UM * UM - UO * UO
350 W = B1 * B1 - 4 * A1 * C1
360 D1 = ( - B1 + SQR (W)) / (2 * A1)
370 PK = 3 * UM * D1
380 FOR T4 = 2 TO 6 STEP 1
390 IV = T4 * 0.3
400 PRINT "": PRINT " IVELD = "; IV; " ( A )"
410 PRINT ""
420 FOR T3 = 1 TO 10 STEP 1
430 P1 = T3 * - 3000
440 IW = (PO + P1) / (3 * UO)
450 IB = 0
460 REM BEREKEN U1
470 UD = R * IW
480 UQ = XX * IW
490 U1 = SQR (UO * UO - UQ * UQ) - UD
500 IF P1 + PO * 1.05 > PK GOTO 570
    
```

BIJLAGE 9 (vervolg)

```

510 U1 = UM
520 A = Z2
530 B = - 2 * U1 * XX
540 CC = IW * IW * Z2 + 2 * U1 * R * IW + U1 * U1 - UO * UO
550 W = B * B - 4 * A * CC
560 IB = ( - 1 * B - SQR (W)) / (2 * A)
570 Q1 = 3 * IB * U1
580 AFFA = - ATN ((QO + Q1) / P1) + 3.14
590 UB = - U1 * 3 * SQR (6) / PI * COS (AFFA)
600 PRINT INT (P1), INT (UB), INT (AFFA * 170 / 3.14)
610 REM AFFA IN RADIALEN
620 PV = (IW * IW + IB * IB) * R * 3
630 REM EINDE NET-, BEGIN GENERATORBEREKENING
640 E = PI * UB / 3 / SQR (3) / COS (AL)
650 EE = E
660 N1 = 100
670 XN = 50
680 OM = N1 * PI / 15
690 S = 1 / (1 + BA * (E / SQR (2) / OM) ^ 6)
700 IB = C * 0.054 * N1 * (IV + 0.1) / (0.00224 * N1 + 0.77)
710 N2 = 15 * E / PI / LD / S / IB
720 IF ABS (N2 - N1) < 5 GOTO 790
730 IF (N2 - N1) < 0 THEN GOTO 760
740 N1 = N1 + XN
750 GOTO 680
760 N1 = N1 - XN
770 XN = XN / 3
780 GOTO 680
790 REM STARTWAARDE N2
800 SW = N2
810 N2 = DN * (INT (N2 / DN) + 1)
820 IF T3 > 1 AND N2 < NE THEN N2 = NE
830 DP = - P1 / 50
840 XN = 100
850 IF XN < EW / 6 THEN XN = EW / 6
860 TT = 0:TA = 0
870 OM = N2 * PI / 15
880 IB = C * 0.054 * N2 * (IV + 0.1) / (0.00224 * N2 + 0.77)
890 DE = 10
900 E = E + DE
910 S = 1 / (1 + BA * (E / SQR (2) / OM) ^ 6)
920 IG = (3 * SQR (3) / PI * COS (AL) * E - UB) / (3 / PI * OM * LC + RG)

```

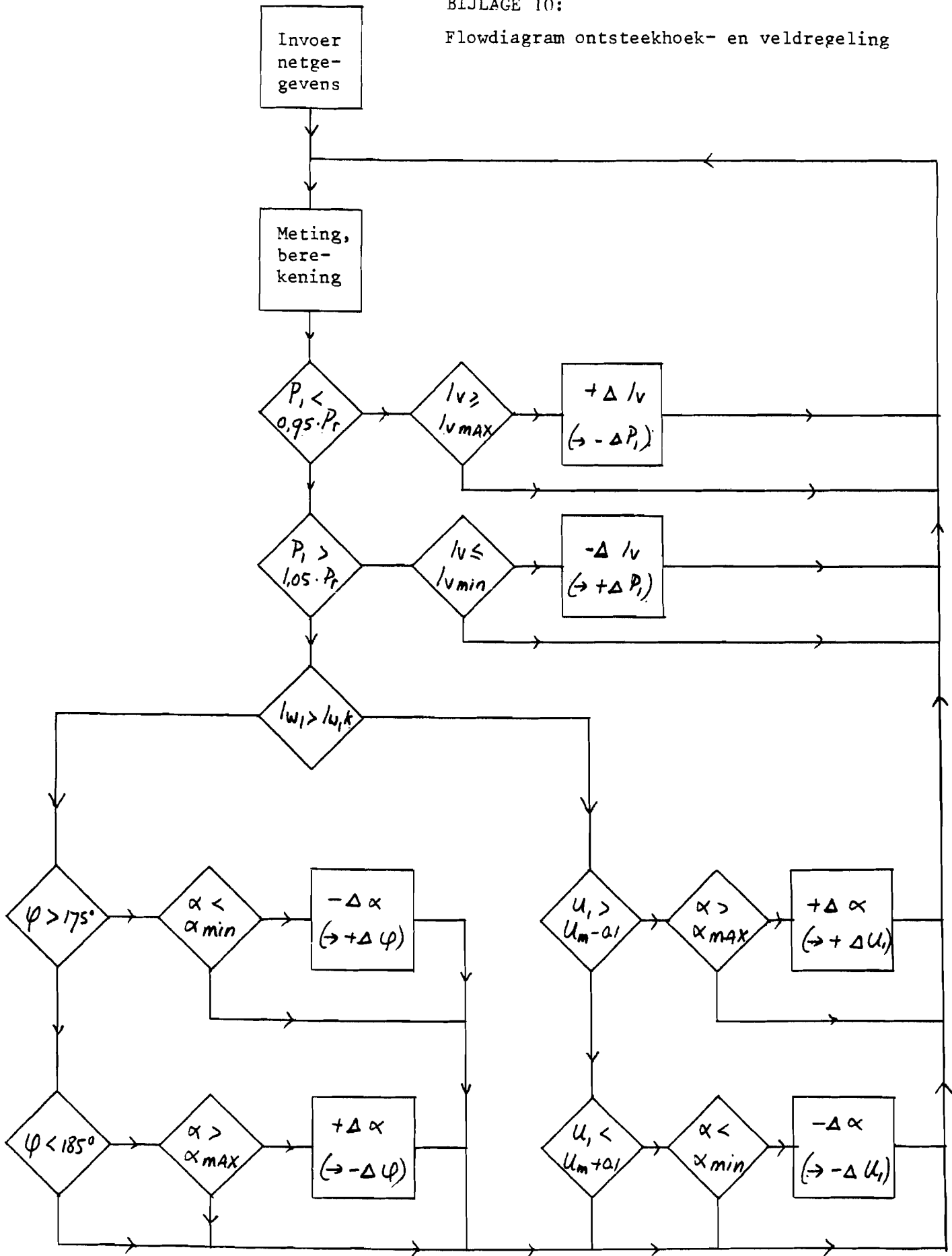
BIJLAGE 9 (vervolg)

```

930 UG = UB + IG * RG
940 P = UG * IG
950 X = COS (AL) - 2 * OM * LC * IG / E / SQR (3)
960 MU = - ATN (X / SQR (1 - X * X)) + PI / 2 - AL
970 PH = AL + 0.67 * MU
980 I = 2 * P / 3 / E / COS (PH)
990 X = OM * LQ * S * I
1000 EP = ATN (X * COS (PH) / (E + X * SIN (PH)))
1010 IH = E * COS (EP) / OM / S / LD + I * SIN (EP + PH)
1020 IF IH < IB THEN GOTO 900
1030 IF DE < 0.3 GOTO 1070: REM EINDE ITERATIE
1040 E = E - DE
1050 DE = DE / 3
1060 GOTO 900
1070 PE = P - RG * IG ^ 2
1080 PRINT INT (PE), INT (UB), INT (N2)
1090 E = EE: REM STARTWAARDE EE
1100 Q = Q + 1
1110 IF PE > 35000 OR N2 > 2500 GOTO 1260
1120 IF ABS (PE + P1) < DP GOTO 1180
1130 IF SGN (PE + P1) = 1 AND TA = 1 THEN TT = 1
1140 IF SGN (PE + P1) = SGN (XN) THEN XN = - XN
1150 IF T1 = 1 AND TA = 1 THEN XN = XN / 2
1160 N2 = N2 + XN: TA = 1
1170 GOTO 870
1180 EW = INT (N2)
1190 IF T1 = 2 GOTO 1220
1200 PRINT INT (PE), INT (UB), INT (N2)
1210 GOTO 1250
1220 IF T3 > 1 GOTO 1240
1230 H PLOT 2 * N2 / 20,159 - 4 * PE / 1000
1240 H PLOT TO 2 * N2 / 20,159 - 4 * PE / 1000
1250 RE = N2: NEXT T3
1260 NEXT T4
1270 PRINT Q
1280 DATA 0,0.45,0.0025,0.0205,0.0105
1290 DATA 50,0.1,3.8,2000,2
    
```

BIJLAGE 10:

Flowdiagram ontsteekhoek- en veldregeling



Toelichting bij Flow-diagram, B.10

- 1 Invoer netgegevens, de waarden van X , R , U_0 , U_M en I_{MAX} .
- 2 Meting van U_1 , I en φ .
 Berekening van $I_\omega = I \cos \varphi$, $I_b = I \sin \varphi$ en $I_{\omega k}$: de
 maximale wattstroom, volgens het spanningscriterium,
 waarbij $I_b = 0$.
- 3, 4 Vergelijking P_i met P_{ref} . N.B.: P_i en P_{ref} zijn negatief.
- 5, 6 Begrenzing van de generator veldstroom I_v .
- 7, 8 Toename resp. afname van I_v waardoor $|P_i|$ toeneemt resp.
 afneemt.
- 9 Vaststelling of het systeem zich in regelgebied I (voor
 $\cos \varphi$ - regeling) of regelgebied II (spanningsregeling)
 bevindt. ($I_\omega < 0$)
- 10, 11 Vaststellen of de arbeidsfactor te sterk van -1 afwijkt.
- 12, 13, 14, 15 Begrenzing van α .
- 16, 17 Toename of afname van α waardoor φ afneemt resp.
 toeneemt, en dus $|I_b|$ afneemt.
- 18 Vaststellen of U_1 de maximale waarde overschrijdt.
- 19 Vaststellen of als gevolg van spanningscompensatie U_1 meer
 dan noodzakelijk beperkt wordt.
- 20, 21 Vergroten resp. verkleinen van de spanningscompensatie.

BIJLAGE 11: Listing programma ontsteekhoek- en veldregeling

```

5  REM  VELD EN ONTSTEEKHOEKREGELING, FILE VELD
10 UM = 226
20 IM = 200
30 R = 0.11
40 X = 0.185
50 VELD = 0.65
60 VH = 0.8:VL = 0.5
70  REM  RESP. MAX. EN MIN. VELDSTROOM
80 ALFA = 180
90 H1 = 150
100 H2 = 210
110  REM  RESP. ALFA-MIN , ALFA-MAX
120 GOSUB 1140: REM  OUTPUT ALFA
130 DEELAY = 0
140 A = - 16384 + (256 * 4)
150  REM  INPUT SLOT 4
160 PI = ATN (1) * 4
170 T = 0
180 GOSUB 980: REM  READ FI
190 GOSUB 1030: REM  READ U1
200 GOSUB 1080: REM  READ I
210 ID = I * COS (FI * 3.1416 / 180)
220 IQ = I * SIN (FI * 3.1416 / 180)
230 UD = R * ID - X * IQ
240 UQ = R * IQ + X * ID
250 UO = SQR ((UD + U1) * (UD + U1) + UQ * UQ)
260 R2 = R * R:X2 = X * X
270  REM  BEREKENING ID1=D1, GRENS I EN II
280 A1 = R2 + X2
290 B1 = 2 * UM * R
300 C1 = UM * UM - UO * UO
310 W = B1 * B1 - 4 * A1 * C1
320 D1 = ( - B1 + SQR (W)) / (2 * A1)
330 PKR = 3 * UM * D1
340 HOME
350 VTAB 3: PRINT " UO =           ( V )
360 VTAB 5: PRINT " U1 =           ( V )
370 VTAB 7: PRINT " I =            ( A )
380 VTAB 9: PRINT " FI =           ( GRADEN )
390 VTAB 11: PRINT " P1 =          ( KW )
400 VTAB 13: PRINT "PREF=          ( KW )
410 VTAB 15: PRINT "P.KR=         ( KW )
420 VTAB 17: PRINT " UD =          ( V )
430 VTAB 19: PRINT "VELD=         ( A )
440 VTAB 21: PRINT "ALFA=         ( GRADEN)
450 T = T + 1
460 IF T > 25 GOTO 170
470  REM  READ PREF, KANAAL 4.
480 POKE A + 1,4
490 PREF = PEEK (A) * - 200
500 GOSUB 1250: REM  READ , PRINT DATA

```

BIJLAGE 11 (vervolg)

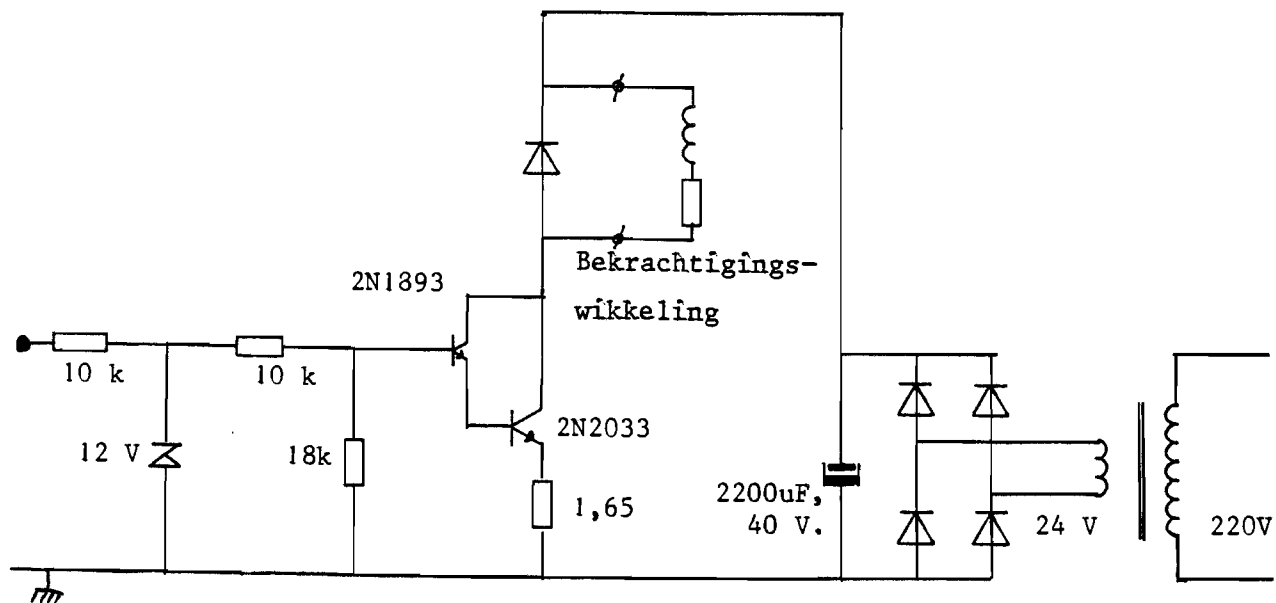
```
510 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "  
520 IF P1 < 0.95 * PREF GOTO 580  
530 IF VELD > = VH GOTO 450  
540 VELD = VELD + 0.005  
550 VTAB 1: HTAB 7: PRINT " HOGER VELD"  
560 GOSUB 1200  
570 GOTO 450  
580 IF P1 > 1.05 * PREF GOTO 640  
590 IF VELD < = VL GOTO 450  
600 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "LAGER VELD "  
  
610 VELD = VELD - 0.005  
620 GOSUB 1200  
630 GOTO 450  
640 IF ID > D1 GOTO 780  
650 REM ZO JA: WEINIG TERUGLEVERING.  
660 IF U1 > UM - 0.5 GOTO 720  
670 IF ALFA > = H2 GOTO 450  
680 ALFA = ALFA + 1  
690 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "TOENAME U1"  
700 GOSUB 1140: REM OUTPUT ALFA  
710 GOTO 450  
720 IF U1 < UM + 0.5 GOTO 450  
730 IF ALFA < = H1 GOTO 450  
740 ALFA = ALFA - 1  
750 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "AF NAME U1"  
760 GOSUB 1140: REM OUTPUT ALFA  
770 GOTO 450  
780 IF FI > 175 GOTO 840  
790 IF ALFA < = H1 GOTO 450  
800 ALFA = ALFA - 1  
810 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "TOENAME FI "  
820 GOSUB 1140: REM OUTPUT ALFA  
830 GOTO 450  
840 IF FI < 185 GOTO 450  
850 IF ALFA > = H2 GOTO 450  
860 ALFA = ALFA + 1  
870 VTAB 1: HTAB 7: PRINT "AF NAME FI "  
880 GOSUB 1140: REM OUTPUT ALFA  
890 GOTO 450  
900 REM SUBROUTINE DELAY  
910 TM = DEELAY * 115  
920 TELLER = 0  
930 TELLER = TELLER + 1  
940 VTAB 1: PRINT TELLER  
950 IF TELLER < = TM GOTO 930  
960 RETURN  
970 REM SUBROUTINE READ FI, KANAAL 1.  
980 POKE A + 1,1  
990 F = PEEK (A)  
1000 FI = (F + 140) * 0.579
```


BIJLAGE 11 (vervolg)

```

1010 RETURN
1020 REM SUBROUTINE READ U1, KANAAL 2.
1030 POKE A + 1,2
1040 U = PEEK (A)
1050 U1 = U * 0.152 + 212
1060 RETURN
1070 REM SUBROUTINE READ I, KANAAL 0
1080 POKE A + 1,0
1090 II = PEEK (A)
1100 I = II * 50 / 255
1110 RETURN
1120 REM SUBROUTINE OUTPUT ALFA
1130 REM SLOT 1, KANAAL 1
1140 OUT = (ALFA - 108) * 255 / 108
1150 POKE - 16256 + 1 * 16 + 1,OUT
1160 GOSUB 900: REM SUBROUTINE DELAY
1170 RETURN
1180 REM SUBROUTINE OUTPUT VELD.
1190 REM SLOT 1, KANAAL 0.
1200 DO = INT ((VELD + 0.20) * 70 / 0.4)
1210 POKE - 16256 + 1 * 16 + 0,DO
1220 GOSUB 900: REM DELAY
1230 RETURN
1240 REM SUBROUTINE MEET, PRINT DATA
1250 GOSUB 1080: REM READ I
1260 GOSUB 980: REM READ FI
1270 GOSUB 1030: REM READ U1
1280 AF = COS (FI * 3.1416 / 180)
1290 ID = I * AF
1300 IQ = I * SIN (FI * 3.14 / 180)
1310 P1 = U1 * ID * 3
1320 PL = R * I * I * 3
1330 P0 = P1 - PL
1340 VTAB 7: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * I)
1350 VTAB 3: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * U0)
1360 VTAB 5: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * U1)
1370 VTAB 9: HTAB 7: PRINT INT (FI)
1380 VTAB 11: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (0.1 * P1)
1390 VTAB 13: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (0.1 * PREF)
1400 VTAB 15: HTAB 7: PRINT 0.001 * INT (PKR)
1410 VTAB 17: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * UD)
1420 VTAB 19: HTAB 7: PRINT 0.001 * INT (VELD * 1000)
1430 VTAB 21: HTAB 7: PRINT ALFA
1440 RETURN
    
```

BIJLAGE 12: Regelbare veldvoeding



BIJLAGE 13: Listing meetprogramma

```

10 REM MEETPROGRAMMA, FILE: TEST
20 HOME
30 U0 = 220:UM = 1.05 * U0
40 IM = 200
50 U1START = 225
60 R = 0.11
70 X = 0.19
80 A = - 16384 + (256 * 4):T = 0
90 REM SLOT 6
100 VTAB 5: PRINT " U1 =          ( V )
110 VTAB 7: PRINT " I =          ( A )
120 VTAB 9: PRINT " FI =          ( GRADEN )
130 VTAB 11: PRINT " P1 =          ( KW )
140 VTAB 13: PRINT " U0 =          ( V )
150 VTAB 15: PRINT " UD =          ( V )
160 VTAB 17: PRINT " ID =          ( A )
170 VTAB 19: PRINT " IQ =          ( A )
180 VTAB 21: PRINT "ALFA=          ( GRADEN)
190 VTAB 5: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (U1 * 100)
200 VTAB 7: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * I)
210 VTAB 9: HTAB 7: PRINT 0.1 * INT (FI * 573)
220 VTAB 11: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (0.1 * P1)
230 VTAB 13: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * U3)
240 VTAB 15: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * UD)
250 VTAB 15: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (100 * UD)
260 VTAB 17: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (ID * 100)
270 VTAB 19: HTAB 7: PRINT 0.01 * INT (IQ * 100)
280 VTAB 21: HTAB 7: PRINT 0.1 * INT (ALFA * 10)
290 OUTPUT = - 1 * (P1 * 255 / 50000)
300 T = T + 1
310 REM READ I
320 POKE A + 1,0: REM KANAAL 0
330 I1 = PEEK (A)
340 I2 = I1 * 50 / 255 - 0.5
350 I = 0.5 * I + 0.5 * I2
360 REM READ ALFA, KANAAL 3
370 POKE A + 1,3
380 ALFA = PEEK (A)
390 ALFA = ALFA * 180 / 255 + 120
400 GOSUB 560: REM READ FI
410 AF = COS (FI)
420 ID = I * AF
430 IQ = I * SIN (FI)
440 P1 = U1 * ID * 3
450 P0 = P1 - PL
460 PL = R * I * I * 3
470 UD = R * ID - X * IQ
480 REM READ U1, KANAAL 2
490 POKE A + 1,2
500 U = PEEK (A)
510 U2 = U * 0.152 + 212
520 U1 = 0.8 * U1 + 0.2 * U2
530 U3 = U1 + UD
540 IF T > 50 GOTO 620
550 GOTO 190
560 REM SUBROUTINE READ FI
570 POKE A + 1,1: REM KANAAL 1
580 F = PEEK (A)
590 F2 = (F + 140) * 0.0101
600 FI = 0.6 * FI + 0.4 * F2
610 RETURN
620 T = 0: HOME
630 GOTO 100
    
```