

SPANNINGSREGELING VAN ELECTRISCHE
MACHINES DOOR ONTLADINGSBUIZEN

SPANNINGSREGELING VAN ELECTRISCHE MACHINES DOOR ONTLADINGSBUIZEN

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN
DOCTOR IN DE TECHNISCHE WETENSCHAP
AAN DE TECHNISCHE HOOGESCHOOL TE
DELFT, OP GEZAG VAN DEN RECTOR MAG-
NIFICUS, DR. ING. IR. H. S. HALLO, HOOG-
LEERAAR IN DE AFDEELING DER ELECTRO-
TECHNIEK, VOOR EEN COMMISSIE UIT DEN
SENAAT TE VERDEDIGEN OP DONDERDAG
11 DECEMBER 1930, DES NAMIDDAGS TE 3 UUR

DOOR

NICOLAAS ANTHONY JOHANNES VOORHOEVE,
ELECTROTECHNISCH INGENIEUR,
GEBOREN TE 'S-GRAVENHAGE.

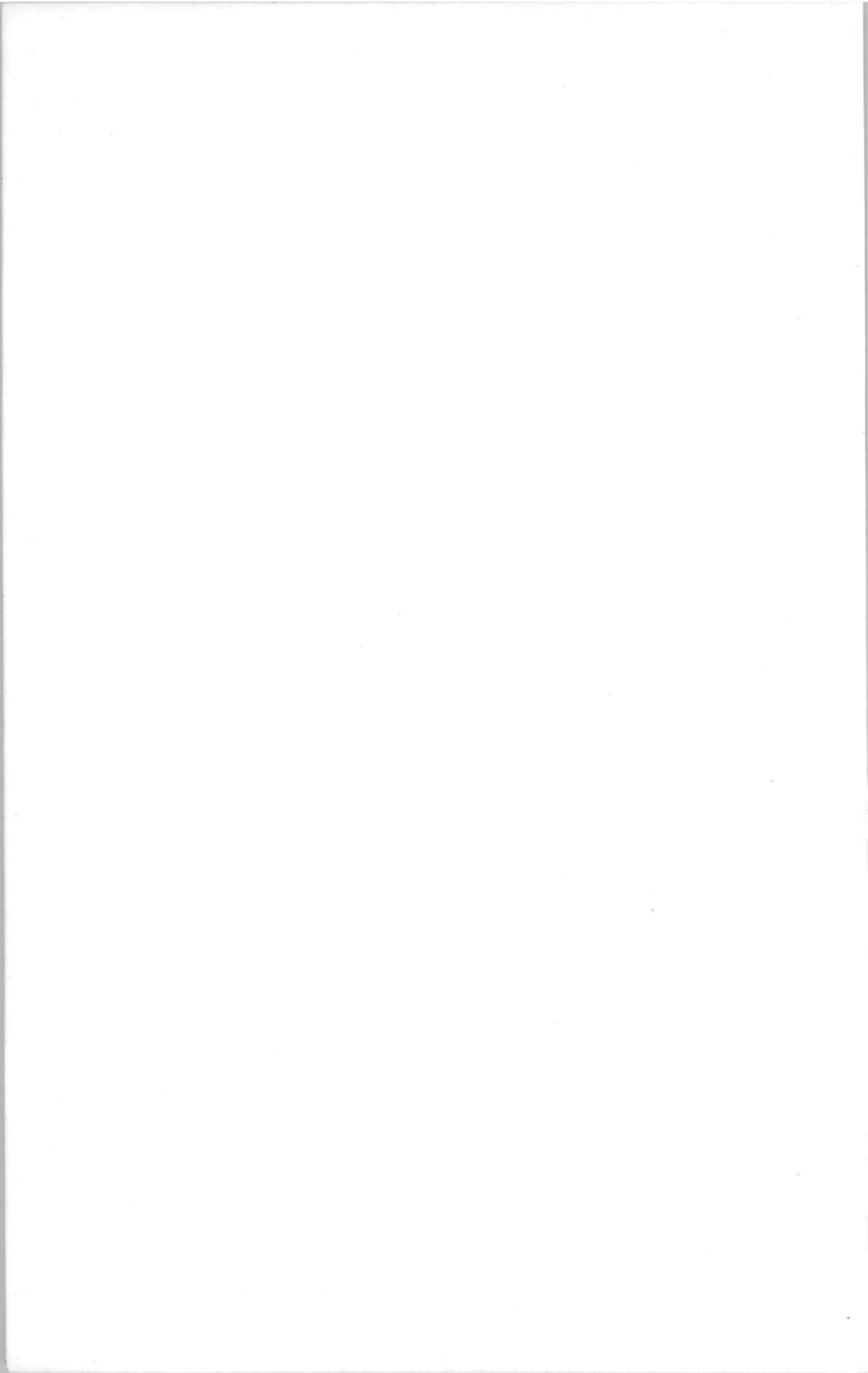


GEDRUKT BIJ DE N.V. TECHNISCHE BOEKHANDEL EN DRUKKERIJ J. WALTMAN JR.
DELFT

1021 D 32

AAN
MIJN MOEDER EN DE NAGEDACHTENIS
VAN MIJN VADER.

AAN MIJN VROUW.



Bij het voltooiën van dit proefschrift wil ik gaarne aan allen, die tot mijn academische vorming hebben bijgedragen, dank betuigen.

Hooggeleerde FELDMANN, Hooggeachte Promotor, Uw interessante colleges zullen mij steeds in herinnering blijven; Uw belangstelling in mijn werk gedurende en ook na mijn studie te Delft stel ik op hoogen prijs. In het bijzonder wil ik U thans danken voor Uwe medewerking bij het tot stand komen van dit proefschrift en voor de nuttige wenken, die Gij mij bij het samenstellen daarvan hebt willen geven.

Hooggeleerde ELIAS, Hooggeachte Promotor, wanneer aan het theoretische gedeelte van dit proefschrift thans eenige zorg is besteed, dan is dit voor een groot deel te danken aan de belangrijke wenken, welke Gij mij hebt willen geven. Veel heb ik van Uw wetenschappelijke voorlichting en Uw accuratesse mogen leeren en ik ben U zeer dankbaar voor de belangstelling en de welwillendheid, waarmede Gij steeds mijn werk hebt willen bezien.

Hooggeleerde HOLST, het initiatief om aan het onderwerp, in dit proefschrift behandeld, aandacht te besteden, is indertijd van U uitgegaan. Bij het samenstellen van dit proefschrift hebt Gij meer dan eens Uw tijd tot mijn beschikking willen stellen en mij zeer waardevolle raadgevingen verstrekt. Ik behoef U nauwelijks te zeggen, dat ik U daarvoor bijzonder dankbaar ben, terwijl ik gaarne van deze gelegenheid gebruik maak uit te spreken, dat de tijd van mijn werkzaamheid onder Uw leiding in het Philips Laboratorium te Eindhoven, voor mij in velerlei opzicht een zeer leerzame is geweest.

Ook U, Hooggeleerde ZWIKKER, wil ik dankzeggen voor de adviezen, die Gij mij indertijd als Collega in het Philips Laboratorium hebt willen geven.

Zeer erkentelijk ben ik de Directie der N.V. Philips Gloeilampenfabrieken voor de toestemming mijn onderzoekingen in dezen vorm te publiceeren.

Waarde Collega's in het Philips Laboratorium, aan den omgang met U gedurende mijn werkzaamheid in Uw midden heb ik steeds bijzondere waarde gehecht; deze is mij ook bij het samenstellen van dit proefschrift nuttig geweest. Het is mij een voorrecht ook in mijn tegenwoordige werkkring met velen Uwer in geregeld contact te zijn.

Aan U, Waarde DE HAAS en DE JONG mijn welgemeenden dank voor de mij verleende assistentie.

Het is mij een weemoedige gedachte, dat mijn onvergetelijke Vader, die in de voortgang en voltooiing van mijn studie steeds zoo veel belangstelling toonde, dit resultaat van mijn werk niet heeft mogen beleven. Geliefde Vader, Uw nauwgezette plichtsbetrachting, Uw wetenschappelijke zin, die bij U gepaard ging met een oprecht Christelijk geloof, de wijze, waarop Gij de Christelijke beginselen, die Gij waart togedaan, als medicus en als mensch in de praktijk van het leven in toepassing wist te brengen, waren mij tot een voorbeeld, dat voor mijn gansche levensloop van onschatbare waarde is geweest en ook bij de samenstelling van dit proefschrift zijn invloed heeft doen gelden.

INHOUD.

	Blz.
HOOFDSTUK I. Eenige algemeene opmerkingen over spanningsregeling aan gelijk- en wisselstroomgeneratoren	I
§ 1. Inleiding	I
§ 2. Over het verloop van ankerstroom en klemspanning bij belastingsvariatiës	2
§ 3. Over de relaxatie in de veldketen van practisch voorkomende generatoren.	7
§ 4. Definities	8
HOOFDSTUK II. Over de eigenschappen der electriche ontladingsbuizen in verband met het regelen in sterkstroomketens	11
§ 1. Verschillende typen van ontladingsbuizen	11
§ 2. Over de eigenschappen der hoogvacuumgelijkrichters of dioden	13
§ 3. Over de warmtetraagheid van den gloeidraad	20
§ 4. Over de eigenschappen van trioden	24
HOOFDSTUK III. Theoretische beschouwing van spanningsregeling aan generatoren door trioden	28
§ 1. Spanningsregeling door trioden in serie met de veldwikkeling aangebracht.	28
§ 2. Practisch voorbeeld van spanningsregeling aan een gelijkstroomdynamo door trioden, in serie met de veldwikkeling	39
§ 3. Spanningsregeling door trioden, parallel aan de veldwikkeling	42
HOOFDSTUK IV. Theoretische beschouwing van spanningsregeling aan generatoren door dioden	49
§ 1. Spanningsregeling aan een gelijkstroomdynamo door dioden in serie met de veldwikkeling	49

§ 2.	Beschouwing van spanningsregeling aan een gelijkstroomdynamo door dioden in serie met de veldwikkeling met verwaarloozing van den invloed van anker- en belastings-zelfinductie op het regelingsproces en van de veranderingen in den belastingsstroom als gevolg van de regeling	66
§ 3.	Spanningsregeling aan een gelijkstroomdynamo door dioden, parallel aan de veldwikkeling	75
§ 4.	Getallenvoorbeeld van spanningsregeling door dioden, parallel aan de veldwikkeling	83
HOOFDSTUK V. Over de technische toepassing van spanningsregeling aan generatoren door trioden		
§ 1.	Spanningsregeling aan gelijkstroomgeneratoren	88
§ 2.	Over het vooruit berekenen van triode-regelingsinstallaties	91
§ 3.	Over de toepassing van een z.g. „compoudeeringsweerstand”	95
§ 4.	Over het toepassen van versterkertrappen	98
§ 5.	Practische toepassing van spanningsregeling door trioden aan een gelijkstroomdynamo 40 kW 130 Volt met opwekdynamo	100
§ 6.	Spanningsregeling door trioden aan wisselstroomgeneratoren	102
HOOFDSTUK VI. Over de technische toepassing van spanningsregeling aan generatoren door dioden		
§ 1.	Spanningsregeling aan gelijkstroomgeneratoren	107
§ 2.	Nauwkeurigheid en energie-verlies bij regeling door dioden, parallel aan de veldwikkeling	110
§ 3.	Over het toepassen van een compoudeeringsweerstand	117
§ 4.	Middelen ter verhooging van de bedrijfszekerheid	124
HOOFDSTUK VII. Spanningsregeling aan generatoren met opwekdynamo		
§ 1.	Plaatstroom en energie-verlies bij regeling aan generatoren met opwekdynamo	130
§ 2.	Verloop der regeling	133

HOOFDSTUK VIII. Over eenige bijzondere gevallen	
van regeling aan generatoren en motoren . . .	136
§ 1. Over $\cos \varphi$ -regeling	136
§ 2. Regeling van den belastingsstroom van generatoren	137
§ 3. Toerenregeling van electro-motoren	138
§ 4. Snelheidsregeling van gelijkstroom-shuntmotoren in afhankelijkheid van een toerendynamo	141
STELLINGEN	149

NOMENCLATUUR.

Generator of opwekdynamo:

Spanning veldketen	e
Regelingsweerstand veldketen	r_{vm}
Veldstroom	i_m
Weerstand veldwikkeling	r_m
Zelfinductie veldwikkeling	L_m
Klemspanning	e_b
Belastingsstroom	i_b
Ankerweerstand	r_a
Ankerzelfinductie	L_a
Index voor den gloeidraad:	f
dus gloeistroom	$i_f \text{etc.}$
Index voor het rooster:	g
dus roosterspanning	$e_g \text{etc.}$
Index voor de verzadiging	s
dus verzadigingsstroom	i_s
Index voor de plaat of anode:	a
dus voor plaatstroom	$i_a \text{etc.}$
Versterkingsfactor	g
Inwendige weerstand	R_i
Stijlheid	S
Tijdconstante	ϑ
Temperatuur	T

dit is geen N.B.

HOOFDSTUK I.

EENIGE ALGEMEENE OPMERKINGEN OVER SPANNINGSREGELING AAN GELIJK- EN WISSELSTROOMGENERATOREN.

§ 1. *Inleiding.*

Spanningsregeling aan generatoren kan worden bewerkstelligd door variatie van een omschen weerstand, welke zich bevindt in de bekrachtigingsketen van den generator of wel in de bekrachtigingsketen van een eventueel aanwezige opwekdynamo. Practisch wordt spanningsregeling bijna steeds op deze wijze bewerkt.

De regeling van de spanning kan op verschillende wijze worden ingesteld. De meest belangrijke regeling is die, waarbij de spanning constant blijft, onafhankelijk van de bedrijfscondities van den generator; de regeling wordt ook wel zoo ingesteld, dat de spanning met toenemende belasting stijgt met het doel op een van den generator verwijderd punt een constante spanning te verkrijgen. Ten slotte kan de regeling zoo worden ingesteld, dat de spanning met toenemende belasting sterker afneemt dan zonder regeling het geval is; dit wordt b.v. toegepast om den kortsluitstroom van een generator te verminderen.

In het algemeen kan men onder regeling verstaan:

Een physische grootheid (spanning, toerental, stroom etc.) *onafhankelijk* van een andere grootheid *constant* of binnen zekere grenzen houden, of wel de eene grootheid in een bepaalde van te voren vastgestelde wijze *afhankelijk* maken van een andere.

Veranderingen in de klemspanning van een generator treden afgezien van abnormale verschijnselen en temperatuursinvloeden op:

- 1) door snelheidsvariatiën van de aandrijvende machine.
- 2) door belastingsvariatiën van den generator.

1. *Snelheidsvariatiën* kunnen bij constante belasting van den generator zoowel bij aandrijving door electriche als bij aandrijving

door andere machines optreden, b.v. bij elektrische motoren door variatie van de frequentie of grootte van de netspanning. Ook bij variaties van de belasting van den generator treden bij bijna alle aandrijvende machines snelheidsveranderingen op. Synchrone motoren maken hier een uitzondering. Asynchrone motoren veranderen hun slip; gelijkstroom-shuntmotoren ondergaan door de verandering van de ankerreactie en het ohmsche spanningsverlies der ankerwikkeling eveneens een snelheidsverandering. Bij stoommachines en andere niet elektrische aandrijvende machines worden de snelheidsvariatiëen veelal bijgeregeld door *regulateurs*. In het algemeen zijn bij moderne goed gebouwde en geregelde machines de snelheidsvariatiëen gering; toch kan het soms van belang zijn met deze veranderingen bij de spanningsregeling rekening te houden, b.v. wanneer men een zeer nauwkeurige regeling wenscht of om het optreden van periodieke schommelingen in de spanning (door terugwerking op elkaar van den snelheidsreguleur en den spanningsregelaar) te voorkomen.

2. *Belastingsveranderingen* kunnen *direct* en *indirect* klemspanningsvariatiëen teweegbrengen. Indirect door de reeds genoemde veranderingen in de snelheid der aandrijvende machines, direct door verandering van het spanningsverlies in den generator, dat veroorzaakt wordt door den ohmschen weerstand van de ankerwikkeling, door de „ankerreactie” ¹⁾ en bij wisselstroomgeneratoren bovendien door de magnetische spreiding der ankerwikkeling.

De directe klemspanningsveranderingen zijn verreweg de belangrijkste en wij zullen ons dan ook in hoofdzaak met deze bezighouden.

§ 2. *Over het verloop van ankerstroom en klemspanning bij belastingsvariatiëen.*

Belastingsveranderingen kunnen geleidelijk plaats vinden; als regel zullen zij echter sprongsgewijs optreden door bij- of afschakeling van onderdeelen van het net of van afzonderlijke bedrijfs-

1) Onder „ankerreactie” verstaan wij — zooals in de electrotechniek gebruikelijk is — den invloed, dien de belastingsstroom in de ankerwikkeling heeft op het hoofdveld der machine.

toestellen. De veranderingen in den belastingsstroom ondervinden in beide gevallen eenige vertraging en wel:

- 1) door de zelfinductie van het anker;
- 2) door de zelfinductie der gebruikstoestellen of van het leidingennet (bij het onderbreken van een stroom treedt bovendien vertraging op, doordat een boog of vonk getrokken wordt; dit verschijnsel zullen wij bij onze berekeningen buiten beschouwing moeten laten, daar het niet in cijfers kan worden uitgedrukt).

Bij het beschouwen der regelingsprocessen door dioden of trioden is het van belang de grootte-orde van deze relaxaties te kennen; wij willen hier nagaan welke ongeveer de grenzen dezer relaxaties kunnen zijn in het geval van gelijkstroomgeneratoren.

Wij veronderstellen, dat er een belastingsstoot optreedt, doordat de belastingsweerstand van den generator plotseling verandert van r_{b_1} naar r_{b_2} . De bekrachtiging blijve constant evenals het toerental van den generator. Verder nemen wij aan, dat de belastingsstroom geen invloed heeft op de grootte van het ankerhoofdveld (het z.g. tegenveld veroorzaakt door de ankerreactie = 0).

Deze aanname is exact, indien de borstels zich in de neutrale zône bevinden; zijn de borstels met het oog op een betere commutatie ten opzichte van de neutrale zône verschoven, dan heeft het tegenveld een zekere waarde, die echter als regel een gering percentage van het hoofdveld bedraagt, zoodat wij slechts een kleine fout maken door de bovengenoemde aanname algemeen door te voeren.

Bij de toestandsveranderingen, die tengevolge van den belastingsstoot optreden, blijft dus de in het anker opgewekte E.M.K. constant en voor de ankerketen geldt de volgende betrekking:

$$(L_a + L_b) \frac{di_b}{dt} + i_b (r_{b_2} + r_a) = \text{E.M.K. (zie fig. 1 p. 7).}$$

De oplossing van deze lineaire differentiaalvergelijking van de 1^e orde luidt als volgt:

$$i_b = i_{b_2} + (i_{b_1} - i_{b_2}) e^{-\frac{t}{s_a}} \dots \dots \dots \text{I)}$$

waarin

$$i_{b_1} = \frac{\text{E.M.K.}}{r_{b_1} + r_a}$$

$$i_{b_2} = \frac{\text{E.M.K.}}{r_{b_2} + r_a}$$

terwijl de tijdconstante van het verschijnsel $\mathfrak{S}_a = \frac{L_a + L_b}{r_{b_2} + r_a}$.

Voor de klemspanning van den generator geldt de betrekking:

$$e_b = \text{E.M.K.} - r_a i_b - L_a \frac{di_b}{dt}.$$

Voeren wij in deze vergelijking de uit 1) bekende betrekkingen voor i_b en i_b' in, dan volgt:

$$e_b = (\text{E.M.K.} - r_a i_{b_2}) + (i_{b_1} - i_{b_2}) \left\{ \frac{L_a}{L_a + L_b} (r_{b_2} + r_a) - r_a \right\} e^{-\frac{t}{\mathfrak{S}_a}} \quad 2)$$

Uit de vergelijking 1) blijkt, dat de belastingsstroom tengevolge van de zelfinductie van het anker en van de belasting asymptotisch tot de nieuwe eindwaarde nadert; de tijdconstante \mathfrak{S}_a is een maat voor de vertraging, die bij de verandering van i_b optreedt. Volgens de vergelijking 2) nadert ook de klemspanning asymptotisch tot de nieuwe eindwaarde (E.M.K. - $r_a i_b$), maar bovendien ondergaat de klemspanning bij het inschakelen der nieuwe belasting een *plotselinge* verandering. Ten tijde $t = 0$ is n.l.:

$$e_{b_0} = (\text{E.M.K.} - r_a i_{b_1}) + (i_{b_1} - i_{b_2}) \frac{L_a}{L_a + L_b} (r_{b_2} + r_a).$$

De uitgangswaarde van de klemspanning bedraagt:

$$e_{b_1} = \text{E.M.K.} - r_a i_{b_1}$$

zoodat de spanningsstoot, die ten tijde $t = 0$ optreedt de waarde heeft:

$$\Delta e_b = e_{b_0} - e_{b_1} = (i_{b_1} - i_{b_2}) \frac{L_a}{L_a + L_b} (r_{b_2} + r_a).$$

De spanningsstoot kan zeer belangrijk zijn, b.v. wanneer $i_{b_1} = 0$ is

$$\Delta e_b = -i_{b_2} (r_{b_2} + r_a) \frac{L_a}{L_a + L_b} = -\text{E.M.K.} \frac{L_a}{L_a + L_b}$$

dus als L_b ongeveer even groot is als L_a is

$$\Delta e_b \approx -\frac{1}{2} \text{E.M.K.}$$

terwijl bij $L_b = 0$, $e_b = \text{E.M.K.}$

Teneinde een indruk van de grootte van \mathfrak{S}_a bij practisch voorkomende machines te verkrijgen, hebben wij bij een vijftal generatoren L_a en r_a gemeten (voor L_a hebben wij steeds de gemiddelde waarde genomen):

- I. Gelijkstroomdynamo 460 Volt, 2,5 k.W.
 $L_a = 0,155$ Henry $r_a = 7,2$ ohm $r_{bv} = 84,5$ ohm.
- II. Gelijkstroomdynamo 130 Volt 0,45 k.W. (opwekker voor III)
 $L_a = 0,14$ Henry $r_a = 9,7$ ohm $r_{bv} = 37,7$ ohm.
- III. Gelijkstroomdynamo 130 Volt, 40 k.W. (compound-dynamo)
 $L_a = 0,0019$ Henry $r_a = 0,076$ ohm $r_b = 0,422$ ohm.
- IV. Gelijkstroomdynamo 75 Volt 1,7 k.W.
 $L_a = 0,0225$ Henry $r_a = 0,75$ ohm $r_{bv} = 3,3$ ohm.
- V. Eenfase wisselstroomgenerator 350 Volt 5 k.V.A.
 $L_a = 0,036$ Henry $r_a = 1,3$ ohm $r_{bv} = 24,5$ ohm.
 r_{bv} = belastingsweerstand bij vollast.

De belastingsweerstand r_b kan zich wijzigen tusschen de waarde bij nullast (r_b oneindig groot) en die bij vollast; de laatstgenoemde minimum waarde voor r_b is bij groote generatoren minstens 50 maal r_a , bij kleine generatoren van de orde van grootte van 10 maal r_a (de klemspanningsdaling bij vollast bedraagt bij groote generatoren minder dan 2⁰/₁₀, bij kleine generatoren ongeveer 10⁰/₁₀ van de klemspanning).

De zelfinductie L_b is bij zuivere ohmsche belasting = 0, bij belasting door motoren zal zij van dezelfde orde van grootte zijn als L_a ; bij gemengde belasting dus in het algemeen kleiner dan L_a . Slechts in uitzonderingsgevallen, b.v. wanneer de belasting uit electromagneten of dergelijke bestaat zal L_b aanmerkelijk grooter kunnen zijn dan L_a . De laatstgenoemde gevallen buiten beschouwing latende, mogen wij dus concluderen, dat de maximumwaarde voor \mathfrak{S}_a bij de bovengenoemde vijf generatoren zal bedragen: ($L_a = L_b$)

- I $\mathfrak{S}_a = 1/296$ sec.
 II $\mathfrak{S}_a = 1/170$ sec.
 III $\mathfrak{S}_a = 1/131$ sec.
 IV $\mathfrak{S}_a = 1/90$ sec.
 V $\mathfrak{S}_a = 1/358$ sec.

Bij groote generatoren zal \mathfrak{S}_a in het algemeen nog belangrijk lager zijn. In elk geval blijkt uit de gevonden waarden, dat de relaxatie in de ankerketen over het algemeen uiterst gering is,

terwijl de tijdconstante als regel *kleiner is dan 1/100 seconde*, wanneer de generator vol belast is. Bij lagere belastingen is τ nog kleiner.

Zoowel de belastingsstroom alsook de klemspanning hebben dus hunne nieuwe eindwaarde in een uiterst klein tijdsverloop bereikt. Vandaar, dat men bij regelingssystemen, die zelve een belangrijke traagheid invoeren, met deze verschijnselen geen rekening behoeft te houden. Bij spanningsregeling door ontladingsbuizen, die zelve of in het geheel geen of slechts een geringe traagheid invoeren, zullen wij deze verschijnselen echter wel in het oog moeten vatten.

Ten einde het gevonden resultaat aan de praktijk te toetsen hebben wij oscillogrammen van de klemspanning opgenomen aan de gelijkstroomdynamo genoemd op pag. 5 onder I.

De oscillogrammen zijn opgenomen met een Duddell oscillograaf van de „Cambridge Instruments Cie”, voorzien van twee lussen, zoodat gelijktijdig het verloop van twee electriche grootheden kan worden weergegeven. Hiervan is gebruik gemaakt door naast de klemspanning van de dynamo ook de spanning van een 50 ~ wisselstroomgenerator op te nemen, waardoor de tijdmeting zeer wordt vergemakkelijkt.

Oscillogram fig. 2a geeft het verloop van beide spanningen weer bij plotseling inschakelen van de volle belasting op de gelijkstroomdynamo, fig. 2b geeft het verloop weer bij uitschakeling dier belasting.

Uit fig. 2a ziet men, hoe op het moment van de inschakeling de klemspanning sterk vermindert om vervolgens in den tijd van ongeveer 1/100 seconde weer aan te stijgen tot de nieuwe eindwaarde. De klemspanning daalt daarna geleidelijk tot een lagere waarde, hetgeen moet worden toegeschreven aan een afname van het toerental van den aandrijvenden motor.

Bij het uitschakelen der belasting wordt een boog getrokken, zoodat de stroomonderbreking niet geheel plotseling is. In verband hiermede treedt ook de spanningsstoot in de klemspanning niet absoluut plotseling op, zooals in fig. 2b duidelijk te zien is. Toch ontstaat ook hier een scherpe spanningspiek in tegenovergestelde richting, die echter in den zeer korten tijd van ongeveer 1/200 seconde weer verdwijnt.

De geleidelijke spanningstoename, die na dit verschijnsel optreedt,

moet weer worden toegeschreven aan een vermeerdering van het toerental van de aandrijvende machine.

§ 3. *Over de relaxatie in de veldketen van practisch voorkomende generatoren.*

Bij spanningsregeling aan generatoren moet de stroom in de veldketen veranderingen ondergaan. Deze veranderingen worden vertraagd door de zelfinductie der veldwikkeling, en het is dan ook van belang de orde van grootte dezer vertraging te leeren kennen.

Bij vreemde bekrachtiging (vergelijk fig. 1) geldt voor de veldketen de betrekking:

$$e = i_m (r_{vm} + r_m) + L_m \frac{di_m}{dt}.$$

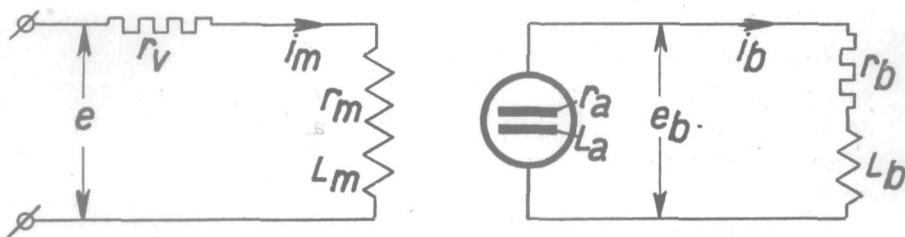


Fig. 1.

De algemeene oplossing dezer differentiaalvergelijking is de volgende:

$$i_m = A e^{-\frac{t}{\mathfrak{S}_m}} + B$$

$$\mathfrak{S}_m = \frac{L_m}{r_{vm} + r_m}.$$

De veldstroom nadert dus asymptotisch tot de nieuwe eindwaarde, terwijl de tijdconstante \mathfrak{S}_m een maat is voor den relaxatietijd.

De voorschakelweerstand r_{vm} is van dezelfde orde van grootte als r_m , wanneer wij dus de tijdconstante der veldwikkeling op zich zelf $\mathfrak{S}_m = L_m/r_m$ beschouwen, dan vinden wij hierin een goede maatstaf voor de vertragingen, die in veldketens als geheel kunnen optreden.

Bij de vijf op pag. 5 genoemde generatoren hebben wij de volgende waarden gevonden:

- I. $L_m = 82,5$ Henry $r_m = 1675$ ohm $\tau_m \cong 1/20$ sec.
 II. $L_m = 18,0$ Henry $r_m = 304$ ohm $\tau_m \cong 1/17$ sec.
 III. $L_m = 3,0$ Henry $r_m = 35$ ohm $\tau_m \cong 1/12$ sec.
 IV. $L_m = 2,43$ Henry $r_m = 20,3$ ohm $\tau_m \cong 1/8,3$ sec.
 V. $L_m = 8,47$ Henry $r_m = 51$ ohm $\tau_m \cong 1/6$ sec.

Bij generatoren met gelamelleerde polen, waarvan de bovengenoemde machines alle zijn voorzien, blijkt de tijdconstante der veldwikkeling dus van de orde van $1/10$ sec. te zijn. Bij machines met massieve polen, die practisch zelden meer voorkomen, moet men een veel grootere tijdconstante verwachten. In de literatuur wordt opgegeven, dat de tijdconstante der veldwikkeling bij deze machines tot enkele seconden kan bedragen.

§ 4. *Definities.*

Wij geven hier enkele definities van begrippen en grootheden, die in het algemeen bij regelingsproblemen naar voren komen.

Ongevoeligheid der regeling.

Bij vele regelingsystemen treedt de regeling eerst in werking, wanneer de te regelen grootheid een zekere afwijking ten opzichte van de normale waarde vertoont. De ongevoeligheid der regeling wordt door de grootte dezer afwijking bepaald.

Ongevoeligheidsgraad noemt men de verhouding tusschen de grootte van de afwijking en van de te regelen grootheid zelve; zij wordt in den regel uitgedrukt in procenten.

Nauwkeurigheid der regeling.

Bij regeling op constante spanning is het gebruikelijk onder de nauwkeurigheid der regeling te verstaan de verhouding tusschen de maximale afwijking van de gemiddelde waarde, die de regeling toelaat en deze gemiddelde waarde zelve; zij wordt als regel uitgedrukt in procent of promille.

In nauw verband met deze z.g. nauwkeurigheid der regeling staat de verhouding tusschen de afwijking, die zonder regeling bij een bepaalde variatie in den bedrijfstoestand optreedt, en de af-

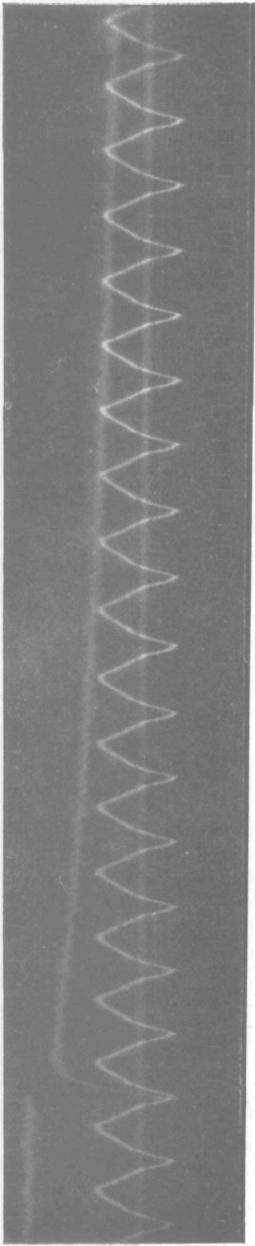


Fig. 2a

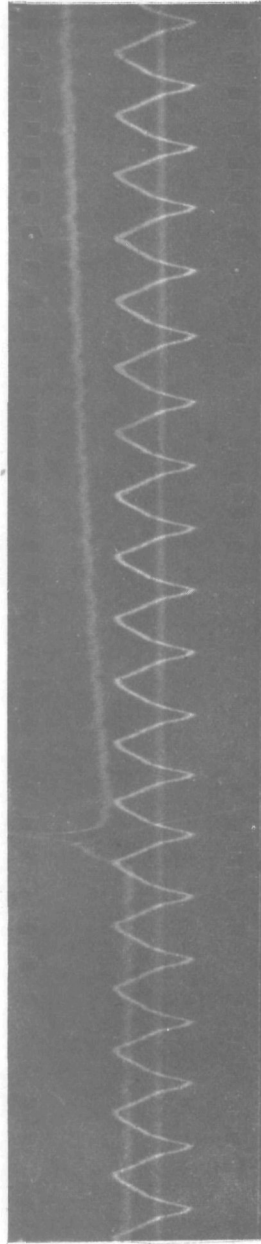
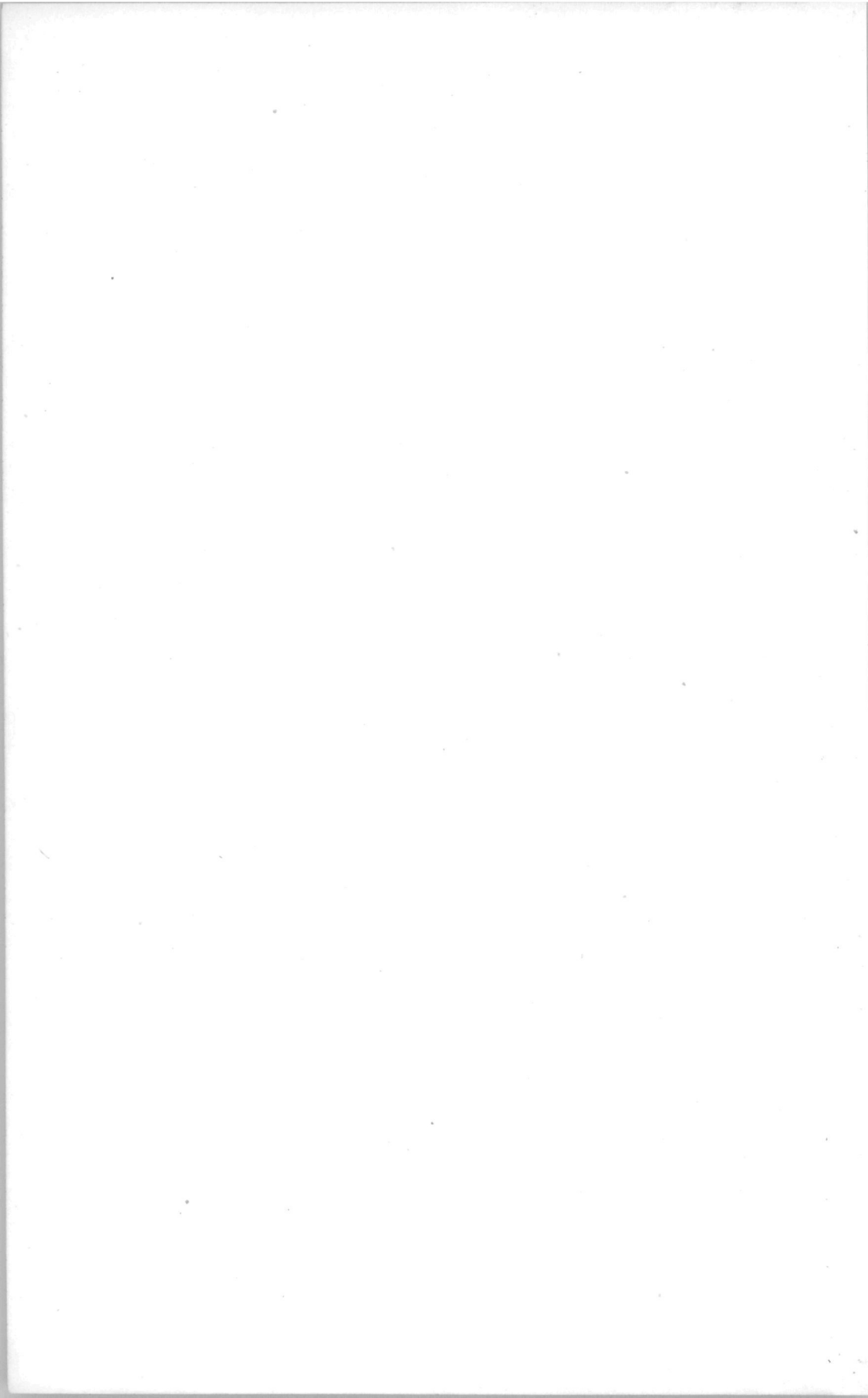


Fig. 2b.



wijking, die bij dezelfde bedrijfsvariatie ontstaat, indien er wèl een regeling plaats vindt. Ter onderscheiding van de „nauwkeurigheid” zullen wij de laatstgenoemde verhouding den „regelingsgraad” noemen. De regelingsgraad is dus steeds grooter dan de eenheid; hoe grooter regelingsgraad, des te beter is de regeling.

Astatische en statische regeling.

Bij de statische regeling is er een vast verband tusschen de afwijking van de te regelen grootheid en de verandering van de grootheid, die de regeling bewerkt, zoodanig dat bij toenemende afwijking ook de verandering der regelende grootheid toeneemt en omgekeerd.

Bij statische spanningsregeling is er derhalve een vast verband tusschen de afwijking van de klemspanning en de dientengevolge optredende verandering in den veldstroom.

Bij de astatische regeling is een zoodanig vast verband niet aan te wijzen; de regeling is integendeel zoodanig, dat bij een bepaalde waarde van de te regelen grootheid verschillende waarden van de regelende grootheid mogelijk zijn; welke dier verschillende waarden het regelingsstelsel kiest, hangt dan af van den bedrijfstoestand der te regelen machine.

Astatische regeling treedt b.v. op bij electro-mechanische regulateurs, die van een spanningsrelais met onverschillig evenwicht zijn voorzien.

Bij de astatische regeling wordt de nauwkeurigheid dus uitsluitend bepaald door de ongevoeligheid van het regelingsstelsel; nauwkeurigheid = ongevoeligheidsgraad. Ware de ongevoeligheidsgraad = 0, zoo zou de klemspanning absoluut constant zijn, de „regelingsgraad” oneindig groot.

Bij de statische regeling wordt de onnauwkeurigheid der regeling bepaald door het bovengenoemde vaste verband tusschen de klemspanning en den veldstroom; de regelingsgraad heeft een eindige waarde, die eveneens door het verband tusschen klemspanning en veldstroom is vastgelegd.

Regelingsnelheid.

De snelheid der regeling wordt bepaald door den tijd, die verloopt tusschen het optreden van een storing in de te regelen

grootheid en het bereiken van de nieuwe eindwaarde, die tengevolge van de regeling optreedt. Verschillende factoren oefenen op de regelingssnelheid een invloed uit. Bij spanningsregeling aan generatoren b.v. zijn van invloed de traagheid van het regelingsstelsel en de zelfinductie van de bekrachtigingsketen van den generator.

De instelling op de nieuwe eindwaarde kan een periodisch of aperiodisch verloop hebben; in beide gevallen kan de snelheid van regeling worden vastgesteld door na te gaan welken tijd er na het optreden eener storing noodig is om de te regelen grootheid blijvend binnen de voorgeschreven grenzen terug te voeren.

Het bereik der regeling.

Bij elke regeling wordt een bepaalde grootheid b.v. een weerstand onder invloed van het regelingsstelsel gevarieerd; uit den aard der zaak zijn de veranderingen van die grootheid aan bepaalde grenzen gebonden en hieruit blijkt, dat ook de regeling zelve zich slechts binnen zekere grenzen kan uitstrekken. Bij toepassing van elektrische ontladingsbuizen in regelingsstelsels representeren deze den bovengenoemden veranderlijken weerstand; het bereik der regeling wordt daarbij bepaald door de karakteristieke eigenschappen der ontladingsbuizen. Buiten een door de karakteristieken bepaald gebied is de regelwerking of verzwakt of geheel verdwenen.

HOOFDSTUK II.

OVER DE EIGENSCHAPPEN DER ELECTRISCHE ONTLADINGSBUIZEN IN VERBAND MET HET REGELEN IN STERKSTROOMKETENS.

§ 1. *Verskillende typen van ontladingsbuizen.*

Onder elektrische ontladingsbuizen verstaat men elektrische apparaten, die een van de lucht afgesloten medium bevatten, waarbinnen een elektrische ontlading tusschen electroden kan plaats vinden; deze ontlading kan het karakter hebben van een *zuivere electronen ontlading*, waarbij de stroomgeleiding alleen door electronen plaats vindt of van een *glim- of boogontlading*, waarbij de stroomgeleiding door electronen en gasionen geschiedt.

Een zuivere electronen-ontlading treedt practisch alleen op in ontladingsbuizen, welke tot een hoogen graad geëvacueerd zijn, en wel tusschen de electronenuitzendende „*gloeikathode*” en de positieve anode of „*plaat*”. De gloeikathode is op een zoodanige temperatuur dat zij „*zelfstandig*” (dus zonder uitwendige invloeden als elektrische velden, lichtstralen etc.) electronen uitzendt.

Glim- of boogontladings treden op in gasgevulde ontladingsbuizen, waarbij de gasvulling bestaat uit een of meerdere edelgassen zooals argon of neon, of uit andere ten opzichte van het materiaal der electroden inerte gassen, bijv. stikstof of kwikdamp, of wel uit een combinatie van die beide bijv. uit een vulling van argon en kwikdamp. De glimontlading vindt plaats tusschen koude electronen; bij de boogontlading is een der electroden een gloeikathode, waarvan de hooge temperatuur gehandhaafd blijft hetzij onder invloed van de ontlading zelve hetzij door JOULE'sche verhitting.

Tot de categorie der gasgevulde ontladingsbuizen behooren bijv. de kwikdampgelijkrichters en de gasgevulde gloeikathodegelijkrichters, gebruikt o.a. voor accu-lading, en de gelijkrichters met glimlicht.

Tot de ontladingsbuizen met zuivere electronenlading behooren de hoogvacuum zend- en ontvanglampen (audions), gebruikt voor het genereeren, ontvangen en versterken van draadlooze signalen.

Gebruikt worden ook nog — hoewel in geringe mate — ontladingsbuizen, die wel in hoofdzaak met electronenontlading werken, maar waarin toch een geringe ionisatie optreedt. De gasvulling bestaat dan uit een edelgas of uit stikstof van zeer lagen druk; de plaatspanning is lager dan bij hoogvacuumbuizen, de werking is echter minder constant. De z.g. „zachte” audions (bijv. Philips-ontvanglamp type D1) werken volgens dit principe.

In het algemeen vertoonen de gasge vulde ontladingsbuizen een minder constante werking dan de hoogvacuumbuizen, hetgeen aan een verandering der gasvulling moet worden toegeschreven. Hoewel het op het eerste gezicht lijkt alsof het gebruik van gasge vulde ontladingsbuizen, in het bijzonder van die met boogontlading voor het regelen in sterkstroomketens de voorkeur verdient boven het gebruik van hoogvacuumbuizen in verband met het feit, dat men bij de eerstgenoemde veel gemakkelijker een groote stroomsterkte bij lage spanning (bijv. van eenige Ampères bij 100 volt of lager) bereiken kan, is toch de toepassing van gasge vulde ontladingsbuizen niet raadzaam, zoolang de techniek niet zoover gevorderd is, dat op een practisch constante werking, welke voor een nauwkeurige regeling eerste vereischte is, gerekend kan worden.

Wij zullen ons dan ook alleen bezighouden met de toepassing van *hoog geëvacueerde ontladingsbuizen* met twee of meer electroden.

Zooals reeds werd opgemerkt behooren tot deze categorie de hoogvacuumgelijkrichters (dioden), voorzien van een gloeikathode en een anode of plaat en de ontladingsbuizen, die behalve deze beide electroden nog bevatten een of meer hulpelectroden of *roosters*. De buis met één rooster (drie electroden) heet *triode*, die met twee roosters *tetrode* etc.

De gloeikathode bestaat in zeer vele gevallen uit een wolframdraad; in de laatste jaren is men er in geslaagd gloeikathoden te ontwikkelen, die bij lagere temperatuur dan de wolframkathodes fungeeren (dull-emitters) en die bij gelijken levensduur voor het uitzenden van een bepaalde hoeveelheid electronen minder energie voor de verwarming vereischen. Tot deze soort behooren de „oxyd-

kathodes" meestal bestaande uit een kern van een metaal als wolfram of molybdeen bedekt met barium-oxyde, en de wolframdraden met thorium.

§ 2. *Over de eigenschappen der hoogvacuum-gelijkrichters of dioden.*

Bij een bepaald gloeikathode-materiaal wordt de grootte van den stroom (i_a), die van de plaat naar de gloeikathode vloeit, bepaald door de *temperatuur* der gloeikathode (T) en door de plaatspanning (e_a). Bij gegeven kathodetemperaturen T_1 en T_2 hebben de karakteristieken:

$$i_a = f(e_a)$$

de gedaante I en II weergegeven in fig. 3. (p. 14).

Bij toenemende plaatspanning neemt blijkbaar de plaatstroom niet toe boven een zekere waarde; dit is toe te schrijven aan het feit, dat bij een bepaalde temperatuur de kathode niet meer dan een bepaald aantal electronen per oppervlakte-eenheid kan emitteren; het totale aantal bepaalt de bovenbedoelde waarde van den plaatstroom, welke verzadigingsstroom (i_s) heet.

Dat de plaatstroom niet reeds bij kleine plaatspanningen deze waarde aanneemt (en dus de karakteristiek I' fig. 3 volgt), doch eerst geleidelijk tot deze waarde stijgt, is het gevolg van het optreden der z.g. *ruimtelading*, een negatieve lading, die in de onmiddellijke omgeving van den gloeidraad gevormd wordt door de opeenhooping van electronen rond den draad. Bij toenemende plaatspanning vermindert de dichtheid der electronen nabij de kathode, d.w.z. de ruimtelading neemt af, de plaatstroom toe. Volgens LANGMUIR „Physical Review" 1913 II 450 „The effect of space charge and residual gases on thermionic currents in high vacuum" kan voor de grootte van den plaatstroom in het niet-verzadigde gebied de volgende wet worden afgeleid:

$$i_a = K e_a^{3/2}$$

waaruit blijkt dat in dit gebied de plaatstroom uitsluitend afhangt van de plaatspanning, terwijl de verhooging van de kathodetemperatuur er in het geheel geen invloed op heeft.

In het verzadingsgebied daarentegen hangt — behoudens een kleine correctie, waarop wij later ingaan — de plaatstroom niet af

van de plaatspanning, daarentegen wèl van de kathode-temperatuur. Tusschen het niet en wèl verzadigde gebied is een overgangs-

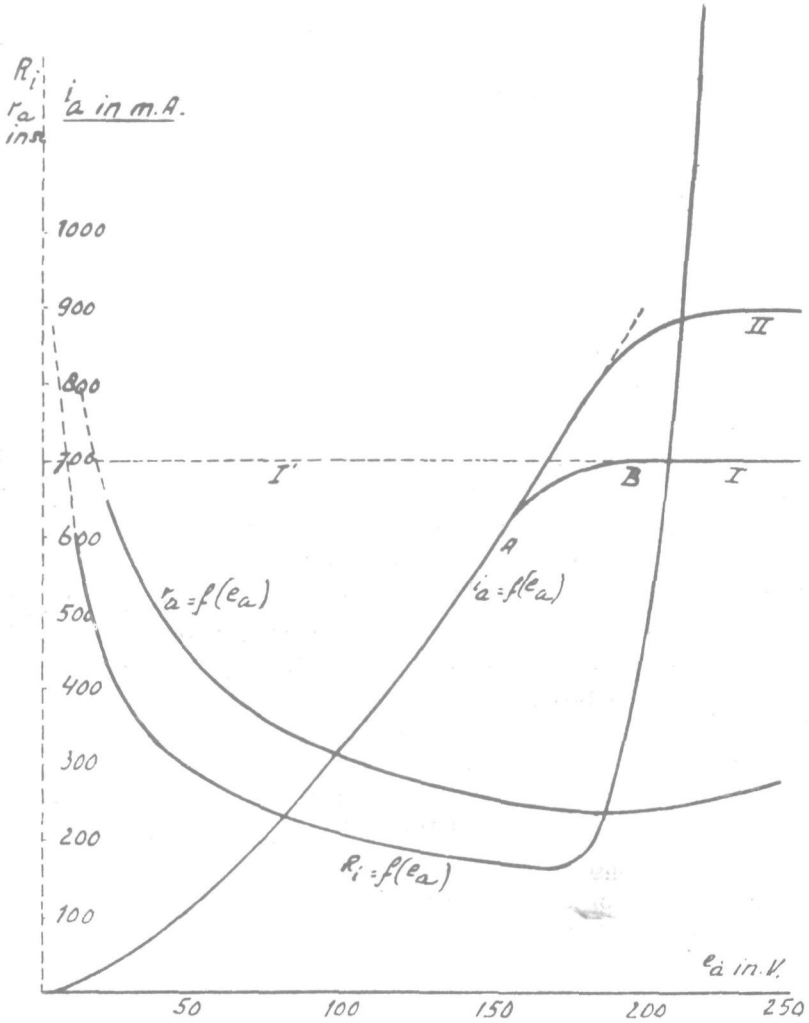


Fig. 3.

gebied, waar de plaatstroom nog wel van de plaatspanning afhankelijk is, doch niet volgens de bovengenoemde wet (b.v. het gedeelte $A-B$ van kromme I).

Wanneer van de diode wordt gebruik gemaakt als regelend orgaan is in de eerste plaats van belang de grootte

$$r_a = \frac{e_a}{i_a}$$

(deze grootte noemen wij den plaatweerstand), terwijl ook $R_i = \frac{de_a}{di_a}$ de z.g. *inwendige weerstand* in aanmerking komt.

Uit de $i_a = f(e_a)$ karakteristiek (fig. 3-II) kunnen wij nu bepalen op welke wijze r_a en R_i in afhankelijkheid van de plaatsspanning varieren bij een gegeven temperatuur van de kathode.

e_a (V)	0	25	50	75	100	125	150	175	200	250
i_a (mA)	0	40,2	113	208	321	447	586	750	860	900
r_a (Ω)	~	622	443	361	312	279	256	234	233	278
R_i (Ω)	~	416	295	241	208	186	170	158	405	~

Uit de karakteristiek $r_a = f(e_a)$ blijkt, dat de plaatweerstand r_a boven een zekere plaatsspanning (hier ca. 75 Volt) betrekkelijk weinig varieert; beneden deze waarde varieert r_a in veel sterkere mate en in dit gebied zou de diode wel als regelend orgaan kunnen worden toegepast, maar daarbij doet zich het nadeel gevoelen, dat juist in dit gebied de energie, die de diode opneemt gering is.

Een veel krachtiger regelwerking bij grotere energie wordt verkregen, wanneer de diode in het verzadigingsgebied wordt toegepast; een verzadigde diode kan bij constant gehouden kathode-temperatuur worden toegepast als een orgaan, dat bij varierende aangelegde spanning (plaatsspanning) den doorvloeienden stroom constant houdt. ($R_i = \sim$).

De inwendige weerstand is bij plaatsspanning 0 en in het verzadigingsgebied \sim groot. Daartusschen ligt een gebied (bij fig. 3 voor de karakteristiek II tusschen ca. 70 en 170 Volt) waarbinnen R_i weinig varieert; in dit gebied ligt het z.g. „lineaire gedeelte” van de karakteristiek. Men neemt gewoonlijk aan, dat in het lineaire gedeelte $R_i = \text{constant}$.

Verzadigingsstroom en kathode-temperatuur.

Voor den verzadigingsstroom (i_s) geldt in het algemeen de formule van RICHARDSON

$$i_s = A T^2 e^{-\frac{b}{T}} \dots \dots \dots 1)$$

T = temperatuur kathode in graden Kelvin.

A en b zijn constanten, die afhangen van het materiaal der gloei-kathode.

Volgens ZWIKKER „Verslagen K. A. v. W. A'dam" 35, 339, gaat men het zuiverste te werk door in het geval van een wolframkathode $A = 100$ en $b = 53400$ te stellen.

Wanneer het temperatuurgebied, waarover men de betrekking 1) wenscht toe te passen klein is, dan kan men haar door een lineaire betrekking vervangen, hetgeen uit de volgende beschouwing blijkt:

Volgens TAYLOR kan men voor een klein gebied van T de betrekking 1) vervangen door de reeks:

$$\Delta i_s = \frac{d i_s}{d T} \Delta T + \frac{1}{2} \frac{d^2 i_s}{d T^2} \cdot (\Delta T)^2 + \dots$$

Men berekent uit (1), dat

$$\frac{d i_s}{d T} = \frac{2 i_s}{T} + \frac{i_s b}{T^2} \quad \text{en} \quad \frac{d^2 i_s}{d T^2} = \frac{2 i_s}{T^2} + \frac{2 i_s b}{T^3} + \frac{b^2 i_s}{T^4}.$$

Wij stellen nu:

$$\frac{\Delta i_s}{i_s} = p \frac{\Delta T}{T} + q \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2$$

en verwaarloozen de hoogere machten in ΔT .

Het blijkt, dat

$$p = 2 + \frac{b}{T} \quad \text{en} \quad q = 1 + \frac{b}{T} + \frac{b^2}{2 T^2}$$

en hieruit berekenen wij de volgende tabel voor T , p en q :

T	p	q
2000	28,7	384
2100	27,4	350
2200	26,3	320
2300	25,2	294
2400	24,2	270
2500	23,4	250
2600	22,5	233
2700	21,8	217
2800	21,1	202
2900	20,4	188

Bij $2500^{\circ} K$ heeft een wolfram-gloeidraad een goede emissie bij een behoorlijk langen levensduur, zoodat deze temperatuur voor ons van practische beteekenis is.

Omtrent deze temperatuur mogen wij dus ook de betrekking toepassen;

$$\frac{\Delta i_s}{i_s} = 23,4 \frac{\Delta T}{T} + 250 \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2$$

Wij berekenen uit deze formule, dat voor $\frac{\Delta T}{T} = 0,2\%$ de kwadratische term slechts 2% is van de lineaire term. Voor $\frac{\Delta T}{T} = 0,5\%$ resp. 1% is de kwadratische term 5% resp. 10% van de lineaire, waaruit wij ten slotte concludeeren, dat de eenvoudige lineaire betrekking 2'):

$$\frac{\Delta i_s}{i_s} = p \frac{\Delta T}{T} \quad 2)$$

voor technische berekeningen gevoeglijk mag worden toegepast, indien de *temperatuurschommelingen* der kathode *niet meer* dan hoogstens $1,0\%$ bedragen (dus b.v. tusschen 2475 en $2525^{\circ} K$). De relatieve fout, die bij $\frac{\Delta T}{T} = 1\%$ in den totalen verzadigingsstroom gemaakt wordt, is n.l. nog kleiner en bedraagt slechts ca. $2,6\%$.

Verband tusschen verzadigingsstroom en gloeispanning.

Wanneer dioden worden toegepast voor regelingsdoeleinden, is in den regel gegeven de schommeling van de spanning, die aan de gloeidraadketen wordt aangelegd.

Het is dus van belang na te gaan, welk verband er bestaat tusschen gloeispanning eenerzijds en verzadigingsstroom anderzijds.

Volgens ZWIKKER „Physische Eigenschappen van wolfram bij hoge temperaturen” (diss. A'dam 1925) p. 79 geldt voor een kathode van wolfram in de buurt van $2500^{\circ} K$ de empirische betrekking:

$$i_f = C \cdot T^{1,75} d^{3/2} \quad d = \text{diameter van den gloeidraad.}$$

Op overeenkomstige wijze als is toegepast in verband met de functie $i_s = f(T)$ vinden wij hier:

$$\frac{\Delta i_f}{i_f} = v \frac{\Delta T}{T} + w \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2$$

met $v = 1,75$, $w = 0,66$.

Bij $\frac{\Delta T}{T} = 1\%$ bedraagt de fout, die in $\frac{\Delta i_f}{i_f}$ gemaakt wordt door de kwadratische term te verwaarloozen, slechts $0,38\%$, waaruit wij concluderen, dat bij temperatuurschommelingen beneden 1% de lineaire betrekking

$$\frac{\Delta i_f}{i_f} = 1,75 \frac{\Delta T}{T} \dots \dots \dots 3)$$

mag worden toegepast.

Voor den soortelijken weerstand van wolfram geldt volgens ZWIKKER „Phys. Eigenschaften van wolfram” etc. p. 80 de empirische betrekking:

$$r_f = C \cdot T^{1,20}$$

waarbij de exponent constant mag worden verondersteld tusschen 300° en $3000^\circ K$. Hieruit volgt, dat bij schommelingen in T van hoogstens 1% met nog grootere nauwkeurigheid als bij i_f de lineaire betrekking:

$$\frac{\Delta r_f}{r_f} = 1,20 \frac{\Delta T}{T} \dots \dots \dots 4)$$

mag worden toegepast.

Wanneer nu aan den gloeidraad een weerstand r_v is voorgeschakeld, bedraagt de spanning, welke aan $r_v + r_f$ wordt aangelegd:

$$e_f = (r_v + r_f) i_f.$$

Hieruit volgt, dat bij kleine variaties:

$$\frac{\Delta e_f}{e_f} = \frac{\Delta (r_v + r_f)}{r_v + r_f} + \frac{\Delta i_f}{i_f}.$$

In den regel kan worden aangenomen, dat r_v bij de verandering van i_f constant blijft, zoodat $\Delta r_v = 0$ en

$$\frac{\Delta e_f}{e_f} = \frac{\Delta r_f}{r_v + r_f} + \frac{\Delta i_f}{i_f}.$$

Uit de betrekkingen 3) en 4) volgt, dat $\frac{\Delta r_f}{r_f} = 0,68 \frac{\Delta i_f}{i_f}$, zoodat de voorgaande vergelijking kan worden gebracht in de gedaante:

$$\frac{\Delta i_f}{i_f} = \frac{\Delta e_f}{e_f} + \frac{r_v + r_f}{r_v + 1,68 r_f} \dots \dots \dots 5)$$

Voorts volgt uit de reeds gevonden betrekkingen dat $\frac{\Delta i_s}{i_s} = p \frac{\Delta T}{T}$

en $\frac{\Delta i_f}{i_f} = 1,75 \frac{\Delta T}{T}$, zoodat $\frac{\Delta i_s}{i_s} = \frac{p}{1,75} \cdot \frac{\Delta i_f}{i_f}$.

Wij noemen nu $\frac{p}{1,75} = h$.

Wij vinden ten slotte:

$$\frac{\Delta i_s}{i_s} = h \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + 1,68 r_f} \cdot \frac{\Delta e_f}{e_f} \dots \dots \dots 6)$$

Voert men voor de getallen 1,75 en 1,20 de constanten C_i en C_p in, die dan algemeen geldig zijn ook voor andere materialen dan wolfram, dan is

$$\frac{\Delta r_f}{r_f} = \frac{C_p}{C_i} \cdot \frac{\Delta i_f}{i_f}$$

en gaat de betrekking 5) over in de volgende:

$$\frac{\Delta i_f}{i_f} = \frac{\Delta e_f}{e_f} \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + \left(1 + \frac{C_p}{C_i}\right) r_f}$$

terwijl vergelijking 6) dan luidt:

$$\frac{\Delta i_s}{i_s} = h \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + \left(1 + \frac{C_p}{C_i}\right) r_f} \cdot \frac{\Delta e_f}{e_f}$$

De betrekking 6) zullen wij bij de berekening van regelingsinstallaties met dioden met goede benadering kunnen gebruiken, wanneer in het oog gehouden wordt, dat de spanningschommelingen moeten overeenkomen met temperatuurschommelingen van de gloeikathode van ten hoogste $1^0/0$.

Bij de aanname, dat $r_v = 0$ volgt uit de betrekkingen 4) en 5)

dat dan de *spanningsschommelingen* $1,75 \times 1,68 \times 1 = 3\%$ mogen bedragen. De eenvoudige lineaire betrekkingen kunnen bij de berekening van spanningsregeling door dioden dus als regel wél worden toegepast, aangezien in vele gevallen de spanningschommelingen, die in regelingsinstallaties optreden, deze waarde niet zullen overschrijden (bij regeling op een constante generatorspanning b.v. wordt veelal geëischt, dat de spanningsvariatie hoogstens 1% mag bedragen).

§ 3. Over de warmtetraagheid van den gloeidraad.

Het is van beteekenis na te gaan hoe groot bij practisch voorkomende dioden de warmtetraagheid van den gloeidraad is en wel voornamelijk met het oog op de snelheid van regeling, die bij toepassing van dioden bereikt kan worden.

Op ieder oogenblik moet de aan den gloeidraad toegevoerde energie gelijk zijn aan de som van de uitgestraalde warmte en de opgenomen warmte:

$$e_f^2 \cdot \frac{1}{r_f} = o \eta + m C \frac{dT}{dt} \dots \dots \dots 1)$$

o = oppervlak gloeidraad.

m = massa van den gloeidraad.

η = uitgestraalde Watts per cm^2 bij een bepaalde temperatuur.

C = soortelijke warmte (uitgedrukt in Joule per graad en per gram).

Het is bekend (zie ZWIKKER „Physische eigenschappen van wolfram bij hoge temperaturen” dissertatie Amsterdam 1925 p. 79, vergelijk ook hierboven p. 19) dat men bij een wolframgloeidraad en bij kleine temperatuurschommelingen van minder dan 1% mag stellen:

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = 4,7 \cdot \frac{\Delta T}{T} \quad \text{en} \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = 1,2 \frac{\Delta T}{T} \quad \rho = \text{soortelijke weerstand.}$$

De soortelijke warmte C mag bij kleine temperatuursvariaties constant worden aangenomen.

Wij veronderstellen, dat ten tijde $t = 0$ $e_f = e_{f0}$, $r_f = r_{f0}$ en dat e_f plotseling verandert van $e_{f0} \rightarrow e_{f0} + \Delta e_{f0}$.

Uit de betrekking 1) volgt nu:

$$e_{f_0}^2 \frac{1}{r_{f_0} \left(1 + 1,2 \frac{T - T_0}{T_0} \right)} = 0 \eta_0 \left(1 + 4,7 \frac{T - T_0}{T_0} \right) + m C \frac{dT}{dt}.$$

Stel nu: $\frac{T - T_0}{T_0} = x$, dan is $\frac{dT}{dt} = \frac{dx}{dt} \cdot T_0$.

Ook is: $\frac{1}{1 + 1,2 \frac{T - T_0}{T_0}} \cong 1 - 1,2 \frac{T - T_0}{T_0}$

en $e_{f_0}^2 \cong e_{f_0}^2 + 2 e_{f_0} \Delta e_{f_0}$, waaruit volgt:

$$\frac{e_{f_0}^2 + 2 e_{f_0} \Delta e_{f_0}}{r_{f_0}} (1 - 1,2 x) = 0 \eta_0 (1 + 4,7 x) + m C T_0 \cdot \frac{dx}{dt}. \quad 2)$$

Voert men voor de getallen 4,7 en 1,2 de algemeen geldige constanten C_η en C_β in, dan luidt 2) als volgt:

$$\frac{e_{f_0}^2 + 2 e_{f_0} \Delta e_{f_0}}{r_{f_0}} (1 - C_\beta x) = 0 \eta_0 (1 + C_\eta x) + m C T_0 \frac{dx}{dt}.$$

De vergelijking is van de gedaante:

$$\frac{dx}{dt} + P x = Q$$

waarin $P = \frac{C_\eta 0 \eta_0 + C_\beta (e_{f_0}^2 + 2 e_{f_0} \Delta e_{f_0})}{m C T_0} \frac{1}{r_{f_0}}$

De temperatuur verloopt in overeenstemming met deze betrekking als volgt:

$$T = T_0 \left\{ 1 + \frac{Q}{P} (1 - e^{-Pt}) \right\}.$$

Het blijkt dus, dat de temperatuur asymptotisch tot de nieuwe eindwaarde nadert; de tijdconstante van het verschijnsel $= \frac{1}{P} = \tau_f$.

Bij een temperatuur $T_0 = 2500^\circ K$ en wanneer de kathode uit wolfram bestaat is:

$$\eta_0 = 69,4 \text{ Watt/cm}^2$$

$$m = S \left(\pi \frac{d^2}{4} l \right) \text{ waarin het soortelijk gewicht } S = 19,35$$

$$r_{f_0} = \rho_0 \frac{4l}{\pi d^2}$$

$$\rho_0 = 74,0 \cdot 10^{-6} \text{ ohm/cm.}$$

$$C = 0,214 \text{ JOULE-graad.}$$

In speciale dioden, welke wij voor spanningsregeling hebben toegepast, is een gloeidraad gebruikt met

$$l = 18 \text{ cm}, d = 0,02 \text{ cm}, e_{f_0} = 20,4 \text{ Volt}, r_{f_0} = 4,64 \Omega.$$

Bij dezen gloeidraad is volgens berekening $\vartheta_f = 0,12 \text{ sec.}$ (bij $\Delta e_f = 1/100 e_{f_0}$).

In de Philips diode 373, die voor toepassing bij spanningsregeling geschikt is, heeft de gloeidraad een lengte van 16 cm en een diameter van 163 micron. De gloeidraad is met barium-oxyde bedekt en functionneert derhalve bij belangrijk lagere temperatuur dan een zuivere wolfram-kathode; de bedrijfstemperatuur is ongeveer $1200^\circ K$.

Bij deze temperatuur is

$$\begin{aligned} \eta_0 &= 1,7 \text{ Watt/cm}^2 \\ \rho_0 &= 30,9 \cdot 10^{-6} \text{ ohm/cm.} \\ C &= 0,143 \text{ Joule/graad.} \end{aligned}$$

Men berekent uit deze gegevens dat

$$P = 1,34 \text{ of } \vartheta_f = \frac{1}{P} = 0,75 \text{ sec.}$$

De warmtetraagheid van den gloeidraad in deze diode blijkt dus vrij groot te zijn. Daarom is het van belang een diode samen te stellen met gewijzigde gloeidraad-dimensies, zoodanig dat de warmtetraagheid geringer wordt. Men moet dan overgaan tot een langeren en dunneren gloeidraad, hetgeen men als volgt gemakkelijk inziet.

Men wil een gloeidraad samenstellen, die bij een bepaalden levensduur een bepaalde emissie kan leveren. Daar de levensduur zeer sterk afhangt van de temperatuur, is het toelaatbaar de draadtemperatuur vast te leggen en aangezien een bepaald materiaal bij een bepaalde temperatuur een bepaald aantal mA per oppervlakte-eenheid kan leveren, is hiermede tevens de grootte van het oppervlak gegeven.

In den stationnairen toestand is de uitgestraalde energie = de opgenomen energie of

$$0 \eta_0 = e_{f_0}^2 \cdot \frac{1}{r_{f_0}} = W_{f_0}$$

zoodat dus ook W_{f_0} gegeven is.

Bij een bepaalde temperatuur zijn ook de constanten η_0 , ρ_0 en C gegeven, zoodat de formule voor P als volgt luidt:

$$P = \frac{4,70 \eta_0 + 1,2 (e_{f_0}^2 + 2 e_{f_0} \Delta e_{f_0}) \frac{1}{r_{f_0}}}{m C T_0} \cong \frac{4,70 \eta_0 + 1,2 W_{f_0}}{m C T_0}.$$

Daar nu

$$m = \frac{\pi d^2}{4} S \cdot l \text{ en } l = \frac{O}{\pi d}$$

volgt hieruit tenslotte, dat de factor P onder de gegeven condities bij benadering omgekeerd evenredig is met den diameter, dus:

de warmtetraagheid is ongeveer evenredig met den diameter.

Als gloeidraad is gekozen een wolframdraad, bedekt met bariumoxyde, met een lengte van 8 cm en een diameter van 27 micron; een negental van deze draadjes worden in één diode parallel aan elkaar aangebracht. Voor dezen gloeidraad berekent men nu:

$$\mathcal{S}_f = 0,15 \text{ sec.}$$

Teneinde de theorie aan de praktijk te toetsen hebben wij de warmtetraagheid van enkele gloeidraden als volgt gemeten.

De gloeidraad wordt via een ohmschen weerstand op een batterij aangesloten; een deel van den weerstand kan worden kortgesloten.

Aan de plaat wordt een spanning aangelegd, zoodat in de plaatkring een stroom vloeit. In den plaatkring bevindt zich een lus van een Duddell-oscillograaf (van de Cambridge Instruments Co.) zoodat een oscillogram van de plaatstroomvariaties kan worden opgenomen.

Bij kortsluiting van den weerstand in de gloeistroomketen neemt de gloeistroom en daarmee de plaatstroom toe; men meet de tijdconstante van het verschijnsel uit het oscillogram op.

Bij opheffing van de kortsluiting neemt de gloeistroom en derhalve ook de plaatstroom af. Bij meting blijkt de tijdconstante nu vrij belangrijk grooter te zijn dan bij kortsluiting van den weerstand. Wij meenen dit te moeten toeschrijven aan het feit, dat de stroomvermindering niet geheel plotseling plaats heeft, doordat zich een boog vormt bij de stroomonderbreking door den schakelaar.

Hieronder volgen de resultaten der metingen.

Lamp type	Gloeidraad materiaal	Dimensies	Plaatstroom variatie in mA	Tijdconstante in sec.	
				gemeten	berekend
I Philips diode 373 normaal	Wolfram met BaO	$l = 16 \text{ cm}$ $d = 163 \mu$	66 → 100	0,8	0,75
II Idem	Idem	Idem	6 → 112	0,6	0,75
III Philips diode 373 speciaal	Idem	$l = 8 \text{ cm}$ $d = 27 \mu$	20 → 110	0,12	0,15
9 draden parallel					

De resultaten der metingen blijken goed overeen te komen met de berekende waarden; bij groote plaatstroomvariatiën, waarbij dus ook Δe_f vrij aanzienlijk is, blijkt de gemeten tijdconstante iets lager te zijn dan de berekende. Dit is verklaarbaar, daar bij aanmerkelijke Δe_f de kwadratische termen niet meer verwaarloosd mogen worden, hetgeen zooals gemakkelijk valt na te gaan, een vergrooting van den factor P dus een vermindering van de tijdconstante tengevolge heeft.

Door berekening en meting komen wij dus tot de conclusie, dat de warmtetraagheid van practisch voorkomende dioden van de orde van grootte is van 0,1 seconde of meer. Dit is dezelfde orde van grootte, die wij hebben aangetroffen voor de traagheid ingevoerd door veldwikkelingen van practisch voorkomende generatoren, zoodat het in elk geval noodig blijkt te zijn bij de theoretische beschouwing van spanningsregeling door dioden de warmtetraagheid van den gloeidraad in aanmerking te nemen.

§ 4. *Over de eigenschappen van Trioden.*

De werking van de triode is af te leiden uit krommen, z.g. karakteristieken, die het verband aangeven tusschen den plaatstroom

en de plaatspanning of de roosterspanning bij constante gloeidraad-temperatuur. Deze karakteristieken kunnen op tweeërlei wijze worden opgenomen en wel:

1. bij constante roosterspanning en veranderlijke plaatspanning $i_a = f(e_a) e_g = \text{constant}$,

2. bij constante plaatspanning en veranderlijke roosterspanning $i_a = f(e_g) e_a = \text{constant}$,

waarbij elke karakteristiek voor zich de gedaante heeft, welke in fig. 3 is weergegeven, indien er geen roosterstroom vloeit. Men onderscheidt nu de volgende grootheden:

1. de z.g. steilheid $S = \frac{di_a}{de_g} (e_a = \text{constant})$.

2. de z.g. inwendige weerstand $R_i = \frac{de_a}{di_a} (e_g = \text{constant})$.

Een gedeelte van de kromme in fig. 3 weergegeven is nagenoeg lineair; in dit lineaire gedeelte zijn S en R_i dus nagenoeg constant.

3. de z.g. versterkingsfactor $g = -\frac{de_a}{di_a} (i_a = \text{constant})$.

In overeenstemming met de gegeven definities kan men voor het lineaire gedeelte schrijven:

$$i_a = S \Delta e_g + 1/R_i \Delta e_a$$

$$\text{en } g = R_i S$$

waaruit volgt:

$$g \Delta e_g = R_i \Delta i_a - \Delta e_a.$$

Deze laatste betrekking kan men aldus interpreteren:

Een triode gedraagt zich ten opzichte van roosterspanningsvariatiën als een generator met een E.M.K. = $g \Delta e_g$ en een inwendigen weerstand = R_i .

Wordt een triode met gloeidraad en plaat aan een elektrische keten aangesloten, dan kunnen in deze keten toestandsvariatiën worden teweeggebracht door verandering van de roosterspanning. Daar deze toestandsvariatiën practisch zonder eenige traagheid ten opzichte van de roosterspanningsvariatiën verlopen, kan men de triode vergelijken met een electrisch relais, dat *massaloos* is en *traagheidsloos* fungeert. Wanneer men zich realiseert, dat de techniek

der electro-mechanische snelregulateurs tot op zekere hoogte aan banden is gelegd door de altijd aanwezige massa der daarin toegepaste relais, kan men reeds hieruit concludeeren, dat de triode principieel een ideaal orgaan is voor spanningsregeling. Daarbij komt nog, dat de triode reageert op de kleinste variatie van de roosterspanning, zoodat de z.g. ongevoeligheidsgraad, die bij goede electro-mechanische regulateurs op zijn minst 0.5 % bedraagt, bij de triode absoluut gelijk nul is.

Wij zullen zien (vergelijk p. 37 en p. 49), dat de trioden welke als regelingsorganen voor spanningsregeling worden toegepast bij voorkeur een lagen inwendigen weerstand en een grooten versterkingsfactor g moeten hebben.

Bij practisch voorkomende machines kan een nauwkeurige regeling van de spanning bij behoorlijk laag energie verbruik der regelende triode niet worden verkregen, door de spanningsschommelingen rechtstreeks over te brengen op het rooster van de triode. (Zie p. 93). Het is integendeel noodig de variatie der te regelen spanning te *versterken* in een of meer versterkertrappen en de versterkte spanningsschommelingen op het rooster der eindtriode te brengen.

Van de bekende methoden van versterking n.l. transformator-, smoorspoel- en weerstandsversterking komt hier de laatstgenoemde in aanmerking, omdat wij hier te doen hebben met blijvende veranderingen van de roosterspanningen; de roosterspanningen varieeren van de eene naar een andere stationnaire waarde. In verband hiermede moet ook het rooster van een volgende triode met de plaatkring eener voorgaande triode door een batterij verbonden worden (vergelijk schakelschema fig. 16).

In de versterkertrappen hebben wij te doen met z.g. *spanningsversterking*; men wenscht de verhouding

$$\frac{\text{roosterspanningsvariatie volgende triode}}{\text{roosterspanningsvariatie voorgaande triode}}$$

zoo groot mogelijk te zien.

Noemen wij den weerstand, welke in serie met de anode eener versterker-triode is geschakeld R_a , dan is de roosterspanningsvariatie van een volgende triode:

$$\Delta eg_2 = \Delta i_{a_1} \cdot R_a$$

Verder is
$$\Delta i_{a1} = g \Delta e_{g1} \cdot \frac{1}{R_i + R_a}$$

zoodat
$$\Delta e_{g2} = g \Delta e_{g1} \cdot \frac{1}{1 + R_i/R_a}.$$

De versterkertrioden moeten dus bij voorkeur hebben een grooten versterkingsfactor g , terwijl de uitwendige weerstand R_a belangrijk grooter moet zijn dan R_i .

Wij stellen $e_p = p e_b$.

De gloeidraad van de triode is verbonden met de + klem van de dynamo, terwijl e_p en E tegengesteld gericht zijn en e_p zooveel grooter is dan E , dat het rooster een negatieve potentiaal heeft ten opzichte van den gloeidraad.

De werking der schakeling is als volgt:

Een belastingsvariatie bijvoorbeeld een belastingstoename leidt de regeling in. Door de overeenkomstige daling van de klemspanning neemt e_p af, zoodat het rooster minder negatief wordt ten opzichte van den gloeidraad. Dientengevolge vermindert de weerstand, dien de triode in de veldketen representeert; de veldstroom neemt toe, de klemspanningsdaling wordt tegengewerkt: er wordt *geregeld op constante spanning*.

Bij de analytische beschouwing van het probleem nemen wij aan, dat ten tijde $t = 0$ de belastingsweerstand verandert van r_{b1} naar r_{b2} . De waarden, die de verschillende veranderlijken hebben in den rusttoestand, geven wij aan met den index 1, de eindwaarden der veranderlijken met den index 2.

Voor de ankerketen geldt de vergelijking:

$$(L_b + L_a) i_b' + (r_b + r_a) i_b = \text{EMK.}$$

De EMK is afhankelijk van den veldstroom; wij zullen veronderstellen, dat de veranderingen van den veldstroom gering zijn, zoodat een lineair verband tusschen de EMK en den veldstroom mag worden aangenomen. Wij stellen dan:

$$\text{EMK} = e_o + C_1 i_m \text{ (verg. fig. 5)}$$

De invloed van den ankerstroom op het hoofdveld van de dynamo wordt verwaarloosd. (verg. hiervoor p. 3).

Bij $t > 0$ geldt nu de betrekking:

$$(L_b + L_a) i_b' + (r_{b2} + r_a) i_b = e_o + C_1 i_m \quad . . . \quad 1)$$

Voor de veldketen geldt de vergelijking:

$$e = e_a + i_m r_m + L_m i_m' \quad . . . \quad 2)$$

De triode beschouwen wij naar p. 25 als een generator met inwendigen weerstand = R_i en een EMK = $g \Delta e_g$, waaruit volgt:

$$g (e_g - e_{g1}) = R_i (i_m - i_{m1}) - (e_a - e_{a1}) \quad . . \quad 3)$$

Voor de roosterspanning e_g vinden wij de betrekking:

$$e_g = -p (e_o + C_1 i_m - r_a i_b - L_a i_b') + E.$$

Wij zullen echter veronderstellen, dat in de roosterketen een versterkerinstallatie is aangebracht, welke een lineaire versterking $= m$ te weeg brengt, daar het toepassen van versterking in de

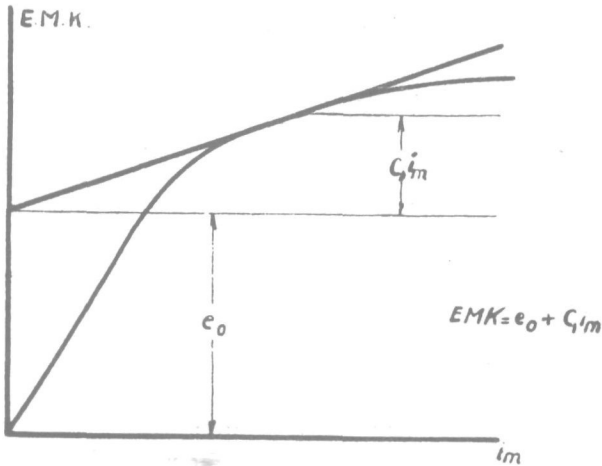


Fig. 5.

praktijk als regel noodzakelijk is. De roosterspanningsvariatie van de eindtriode bedraagt dan:

$$\Delta e_g = e_g - e_{g1} = -m p \left\{ C_1 (i_m - i_{m1}) - r_a (i_b - i_{b1}) - L_a i_b' \right\} \quad 4)$$

Wij hebben nu vier vergelijkingen verkregen, waarin als veranderlijken optreden de grootheden i_b , i_m , e_g en e_a , zoodat door eliminatie een vergelijking met één veranderlijke gevonden kan worden.

Uit 2), 3) en 4) volgt dat:

$$e = e_{a1} + R_i (i_m - i_{m1}) + g m p \left\{ C_1 (i_m - i_{m1}) - r_a (i_b - i_{b1}) - L_a i_b' \right\} + i_m r_m + L_m i_m' \dots \dots \dots 5)$$

Uit 1) blijkt, dat:

$$i_m = \frac{I}{C_1} \left\{ (L_b + L_a) i_b' + (r_{b2} + r_a) i_b - e_o \right\}$$

en
$$i_m' = \frac{I}{C_1} \left\{ (L_b + L_a) i_b'' + (r_{b2} + r_a) i_b' \right\}$$

Voeren wij deze betrekkingen voor i_m en i_m' in de betrekking 5) in, dan ontstaat een lineaire differentiaalvergelijking van de 2^{de} orde in i_b van de gedaante:

$$P i_b'' + Q i_b' + R i_b + S = 0 \dots \dots 6)$$

waarin $P = L_m (L_b + L_a)$

$$Q = (L_b + L_a) (R_i + r_m) + L_m (r_{b2} + r_a) + L p g m C_1$$

$$R = r_{b2} (R_i + r_m + p g m C_1) + r_a (R_i + r_m)$$

$$S = - p g m C_1 e_{b1} - (r_m + R_i) (e_o + C_1 i_{m1}).$$

Uit deze vergelijking kan i_b worden opgelost; door toepassing van de vergelijking 1) is hiermede ook het verloop van i_m gegeven, terwijl ten slotte het verloop der klemspanning volgt uit de betrekking:

$$e_b = e_o + C_1 i_m - r_a i_b - L_a i_b'.$$

Al naarmate de oplossing voor i_b uit vergelijking 6) periodisch of aperiodisch is, zal ook het verloop van den veldstroom en van de klemspanning periodisch of aperiodisch verlopen.

Wij zullen nu allereerst een onderzoek instellen naar de *periodiciteit* of *aperiodiciteit* van de oplossing der vergelijking 6).

De oplossing is periodisch als $Q^2 - 4 P R < 0$

en aperiodisch als $Q^2 - 4 P R > 0$.

Ten einde dit onderzoek te vergemakkelijken, zullen wij eerst enkele constanten in hun onderlinge grootteverhouding beschouwen.

Wij merken dan op, dat

1^o. L_m is in het algemeen veel grooter dan L_a .

Bij de vijf op p. 5 en 8 genoemde machines is

	L_m	L_a	L_a in % van L_m
I.	82,5	0,155	0,19 %
II.	18,0	0,14	0,78 %
III.	3,0	0,017	0,57 %
IV.	2,43	0,0225	0,92 %
V.	8,47	0,036	0,42 %

Bij al deze machines van verschillend fabriikaat en verschillende grootte is dus L_a minder dan 1 % van L_m .

2^o. R_i en r_m zijn als regel van dezelfde orde van grootte. Men vergelijkte het in hfd V § 5 gegeven practische voorbeeld.

3^o. Het product $pgm C_1$ zal vooral bij groote versterking veel grooter zijn dan $r_m + R_i$. Daar de klemspanning en de spanning aan de veldketen van dezelfde orde van grootte zijn, zal ook $C_1 i_m$ niet veel kleiner zijn dan $r_m i_m$, waaruit weer volgt, dat C_1 en r_m van dezelfde orde van grootte zijn. In het product $pgm C_1$ echter heeft de factor m bij groote versterking een hooge waarde, bijv. bij twee trappen weerstandsversterking met trioden $A 425$ bedraagt $m \cong 400$, terwijl g belangrijk grooter is dan 1 en p zelden kleiner zal zijn 0,2, zoodat inderdaad in dit geval $pgm C_1 \gg r_m + R_i$.

4^o. r_a is steeds belangrijk kleiner dan r_b .

De belastingweerstand varieert zelve van oneindig groot bij nul-last tot een minimum waarde, die bij volle belasting van den generator geldt. Bij vollast van groote machines is

$$r_a \cong 1 \text{ } 0/0 \text{ van } r_{bv}$$

bij kleine machines $r_a \cong 10 \text{ } 0/0 \text{ van } r_{bv}$.

5^o. Bij vollast is r_b steeds kleiner dan r_m .

De veldenergie bedraagt ongeveer 2 0/0 (bij groote machines) tot 10 0/0 (bij kleine machines) van het volle generator vermogen; zijn veldspanning en generatorspanning ongeveer gelijk dan is dus bij vollast

$$r_{bv} \cong 2 \div 10 \text{ } 0/0 \text{ van } r_m$$

6^o. L_b en L_a zullen in het algemeen van dezelfde orde van grootte zijn. Bij zuiver ohmsche belasting is $L_b = 0$, terwijl in bijzondere gevallen bijv. bij belasting door electromagneten $L_b \gg L_a$ kan zijn. Als uiterste gevallen mogen wij dus stellen:

I. $L_b = 0$ L_a in aanmerking nemen.

II $L_b \gg L_a$ (dus L_b van dezelfde grootte orde als L_m); L_a te verwaarloozen ten opzichte van L_b .

Kort samenvattend vinden wij dus, dat als regel:

$$L_m \gg L_a$$

$$R_i \cong r_m$$

$$p g m C_1 > \text{tot} \gg r_m + R_i$$

$$r_a < r_b \text{ en } r_a = 1 \div 10 \text{ }^0/0 r_{bv}$$

(het kleine percentage bij *grootte machines*)

$$r_{bv} = 2 \div 10 \text{ }^0/0 r_m \text{ (als boven)}$$

$$L_b \cong L_a.$$

Beschouwen wij nu eerst het product $Q_2 - 4 PR$ in de veronderstelling, dat $L_b = 0$.

In dat geval vinden wij:

$$Q^2 - 4 PR = L_m (r_{b2} + r_a) \left\{ L_m (r_{b2} + r_a) - 2 L_a (R_i + r_m) \right\} \\ + L_a \left\{ (R_i + r_m)^2 L_a - 4 L_m r_{b2} p g m C_1 \right\}.$$

De eerste term van deze betrekking zal bij kleine machines zeker positief zijn; bij grootte machines zal het kunnen voorkomen, dat $2 L_a (R_i + r_m)$ grooter wordt dan $L_m (r_{b2} + r_a)$, aangezien het daarbij mogelijk is, dat

$$\frac{2 (R_i + r_m)}{r_{b2} + r_a} > \frac{L_m}{L_a}.$$

De tweede term in de betrekking $Q^2 - 4 PR$ zal negatief kunnen worden, als de versterking groot wordt. Het blijkt dus, dat vooral bij *grootte machines* en bij *grootte versterking* er kans is op *periodiciteit*.

Het hangt nu van de grootte van den dempingsfactor $\frac{Q}{2P}$ af, of de slingeren in de generatorspanning al of niet hinderlijk zullen zijn (zie de vergelijking van i_b op p. 34).

Als $L_b = 0$ is

$$\frac{Q}{2P} = \frac{R_i + r_m}{L_m} + \frac{r_{b2} + r_a}{L_a}.$$

De verhouding $\frac{R_i + r_m}{L_m}$ is bij moderne machine met gelamelde polen belangrijk grooter dan de eenheid (vergelijk p. 8,

waar is afgeleid, dat $\delta_m = \frac{L_m}{r_m}$ van de orde van 0,1 sec. is). Nog groter is de verhouding $\frac{r_{b2} + r_a}{L_a}$ en wel is de orde van grootte daarvan volgens p. 5 100 of meer, zoodat de dempingsfactor $\frac{Q}{2P}$ steeds groot blijkt te zijn en van hinderlijke slingeren in de generatorspanning dus geen sprake is. De slingeren zijn in een gering onderdeel van een seconde weggedempt.

Gaan wij nu in de 2^e plaats na het geval, waarbij $L_b \gg L_a$, zoodat L_a verwaarloosd mag worden ten opzichte van L_b . Nu is:

$$Q^2 - 4PR = L_b^2 (R_i + r_m + p g m C_1)^2 + L_m^2 (r_{b2} + r_a)^2 \\ + 2 L_m L_b \left\{ p g m C_1 - (R_i + r_m) \right\} (r_{b2} + r_a) \\ - 4 L_m L_b r_{b2} p g m C_1$$

of anders geschreven:

$$Q^2 - 4PR = L_b^2 (R_i + r_m + p g m C_1)^2 + L_m^2 (r_{b2} + r_a)^2 \\ + 2 r_a L_m L_b \left\{ p g m C_1 - (R_i + r_m) \right\} \\ - 2 L_m L_b r_{b2} (R_i + r_m + p g m C_1).$$

In deze uitdrukking voor $Q^2 - 4PR$ is de 1^e term op zichzelf reeds groter dan de negatieve term, daar $L_b \cong L_m$ en $R_i + r_m + p g m C_1 > 2 r_{b2}$. Vooral bij groote versterking zal dit het geval zijn; bij geringe versterking en kleine belasting zal het misschien kunnen voorkomen, dat de negatieve term gaat overheerschen boven de 1^e term, maar dan is de 2^e positieve term weer groot, zoodat $Q^2 - 4PR$ ook in dit geval positief blijft.

In het algemeen zal dus $Q^2 - 4PR$ positief zijn; het verschijnsel zal des te minder kans op periodiciteit hebben, naarmate L_b toeneemt en ook naarmate de versterking groter wordt.

Algemeene oplossing van de vergelijking 6).

Indien $Q^2 - 4PR < 0$ en het verschijnsel dus een periodiek verloop heeft, luidt de algemeene oplossing der vergelijking:

$$i_b = - \frac{S}{R} \left\{ 1 - e^{-\frac{Q}{2P} t} (A \cos G t + B \sin G t) \right\}.$$

In deze vergelijking is

$$A = \frac{R}{S} i_{b1} + 1.$$

$$B = \frac{1}{G} \left\{ \frac{i_{b1} (r_{b1} - r_{b2})}{L_b + L_a} \cdot \frac{R}{S} + \frac{Q}{2P} \left(\frac{R}{S} i_{b1} + 1 \right) \right\}.$$

De uitdrukkingen voor A en B worden gevonden door te bedenken, dat bij $t = 0$ $i_b = i_{b1}$

en volgens verg. 1) p. 30 $i_{b1}^i = i_{b1} \frac{r_{b1} - r_{b2}}{L_b + L_a}$.

Het verschijnsel zou labiel worden, indien de factor $\frac{Q}{2P}$ negatief werd. Daar zoowel P als Q steeds positief zijn, is dit niet mogelijk en is dus *labiliteit uitgesloten*.

De *snelheid van regeling* wordt voornamelijk bepaald door de grootte van de tijdsconstante

$$\vartheta = \frac{2P}{Q} = \frac{2L_m}{(R_i + r_m) + \frac{L_m}{L_b + L_a} (r_{b2} + r_a) + \frac{L_b}{L_b + L_a} p g m C_1}$$

Voor de snelheid van regeling zijn dus gunstig:

Lage L_m , hooge R_i , r_m , r_{b2} , lage $L_b + L_a$ en ten slotte in de meeste gevallen ook *grote versterking*.

Bij zeer groote versterking wordt de laatste term in den noemer groot ten opzichte van de beide eerste termen, zoodat in dat geval

$$\vartheta \cong \frac{2L_m}{\frac{L_b}{L_b + L_a} p g m C_1}$$

of
$$\vartheta \cong \frac{4L_m}{p g m C_1}$$

wanneer men ook nog veronderstelt, dat $\frac{L_b}{L_b + L_a} \cong 1/2$ of $L_b \cong L_a$.

Daar de getallenwaarde van het product $p g m C_1$ bij groote versterking veel grooter is dan de getallenwaarde van L_m , volgt hieruit, dat de *snelheid van regeling groot* is en sterk afhankelijk van de versterking.

Bij zeer groote versterking en $L_b \gg L_a$ blijkt $\vartheta \cong \frac{2L_m}{p g m C_1}$;

ook in dit geval is dus de snelheid van regeling groot en neemt sterk toe met de versterking.

In het geval, dat L_b te verwaarloozen is ten opzichte van L_a , waarbij, zooals wij reeds zagen, het meeste kans is op periodiciteit (zie p. 33) is

$$\vartheta \cong \frac{2 L_m}{R_i + r_m + \frac{L_m}{L_a} (r_{b2} + r_a)}$$

en blijkt dus de versterking geen invloed meer te hebben op de snelheid van regeling, die echter ook in dit geval nog een hooge waarde heeft (vergelijk hetgeen op p. 34 gezegd is over den dempingsfactor).

Wanneer $Q^2 - 4PR > 0$ en het verschijnsel dus een aperiodisch verloop heeft, luidt de algemeene oplossing der vergelijking 6):

$$i_b = -\frac{S}{R} + e^{-\frac{Q}{2P}t} (Ae^{Gt} + Be^{-Gt}).$$

$$\text{Hierin is } G = \frac{\sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P}$$

$$\text{terwijl } 2A = i_{b1} + \frac{S}{R} + \frac{1}{G} \left\{ i_{b1} \frac{r_{b1} - r_{b2}}{L_b + L_a} + \left(i_{b1} + \frac{S}{R} \right) \frac{Q}{2P} \right\}$$

$$2B = i_{b1} + \frac{S}{R} - \frac{1}{G} \left\{ i_{b1} \frac{r_{b1} - r_{b2}}{L_b + L_a} + \left(i_{b1} + \frac{S}{R} \right) \frac{Q}{2P} \right\}.$$

De waarden voor A en B worden weer gevonden door te bedenken, dat ten tijde $t = 0$

$$i_b = i_{b1} \text{ en } i'_b = i'_{b1} = i_{b1} \frac{r_{b1} - r_{b2}}{L_b + L_a}.$$

De tijdconstante $\vartheta = \frac{2P}{Q}$ bepaalt ook nu in hoofdzaak de snelheid van regeling. Ook in dit geval is derhalve bij zeer groote versterking en bij een L_b , die gelegen is tusschen een waarde, die ongeveer overeenkomt met L_a tot een waarde die veel grooter is dan L_a , de snelheid van regeling zeer groot en toenemend met de versterking.

Is $L_b \gg L_a$ dan heeft daarentegen de versterking geen invloed meer op de snelheid van regeling en is deze laatste minder groot.

De *eindwaarde* van den belastingsstroom vinden wij door in de gevonden betrekking voor $i_b t = \sim$ te stellen

$$i_{b2} = -\frac{S}{R} = \frac{p g m C_1 e_{b1} + (r_m + R_i)(e_o + C_1 i_{m1})}{r_{b2}(R_i + r_m + p g m C_1) + r_a(r_m + R_i)}$$

of

$$i_{b2} = \frac{e_{b1} + \alpha r_a i_{b1}}{r_{b2} + \alpha r_a}$$

waarin

$$\alpha = \frac{r_m + R_i}{r_m + R_i + p g m C_1}.$$

De eindwaarde voor de klemspanning is:

$$e_{b2} = i_{b2} r_{b2} = \frac{r_{b2}}{r_{b2} + \alpha r_a} (e_{b1} + \alpha r_a i_{b1}). \quad \dots \quad 7)$$

Tengevolge van de regeling is dus:

$$\Delta e_b = e_{b2} - e_{b1} = i_{b1} \left\{ \frac{r_{b2}}{r_{b2} + \alpha r_a} (r_{b1} + \alpha r_a) - r_{b1} \right\}$$

of

$$\Delta e_b = i_{b1} (r_{b2} - r_{b1}) \frac{\alpha r_a}{r_{b2} + \alpha r_a}$$

terwijl zònder regeling

$$\Delta e_{bz} = i_{b1} (r_{b2} - r_{b1}) \frac{r_a}{r_{b2} + r_a}.$$

$$\text{De regelingsgraad } N = \frac{\Delta e_{bz}}{\Delta e_b} = \frac{r_{b2} + \alpha r_a}{r_{b2} + r_a} \cdot \frac{1}{\alpha}.$$

Wat de eigenschappen der regelende trioden betreft, volgt hieruit, dat voor een nauwkeurige regeling gewenscht is, dat de versterkingsfactor g groot, de inwendige weerstand R_i laag is.

Daar α in het algemeen een kleine waarde heeft, volgt hieruit verder, dat bij een trioderegeling een groote regelingsgraad dus ook een groote nauwkeurigheid der regeling verwacht kan worden. Bij groote versterking wordt α zeer klein, en $p g m C_1 \gg r_m + R_i$ zoodat

$$N \cong \frac{r_{b2}}{r_{b2} + r_a} \cdot \frac{p g m C_1}{r_m + R_i}$$

d.w.z. de regelingsgraad heeft dezelfde orde van grootte als de verhouding $\frac{p g m C_1}{r_m + R_i}$ en is derhalve zeer groot.

Onze beschouwingen brengen ons dus de volgende *eindconclusies*:

1^o. Labiliteit is bij regeling door trioden niet mogelijk.

2^o. Periodiciteit is praktisch alleen te verwachten in het geval, dat de uitwendige belasting vrijwel geen zelfinductie heeft ($L_a \gg L_b$) en wel het eerst bij groote generatoren. Echter zijn de slingeren in de generatorspanning in een zeer korten tijd weggedempt.

Opvoering der versterking, waardoor de regeling nauwkeuriger wordt, vermeerdert in dit geval de kans op periodiciteit, men kan eventueel optredende ongewenschte slingeren van de spanning opheffen door in de belastingsketen een smoorspoel aan te brengen, die een zelfinductie heeft overeenkomende met die van het anker en aangesloten achter de toevoerdraden naar den potentiometer P (fig. 4).

3^o. Wanneer $L_b >$ of $\cong L_a$ zal slinging van de klemspanning praktisch niet kunnen voorkomen. Door opvoering van de versterking wordt de snelheid van regeling vergroot; bij groote versterking wordt de regelingssnelheid zeer groot.

4^o. De *ongevoeligheidsgraad* is gelijk nul, zooals direct te zien is uit de betrekking 7); de regeling heeft een *statisch karakter*, terwijl de *onnauwkeurigheid der regeling* zeer klein kan zijn. De regelingsgraad, die tevens de onnauwkeurigheid der regeling bepaalt, (verg. p. 9) is bij groote versterking evenredig met het product $p g m C_1$, dus ook met de versterking. De regelingsgraad kan een zeer hooge waarde hebben.

5^o. Ten slotte nog een enkele opmerking over het *bereik der regeling*. Uit de betrekking 1 op p. 29 kan men de eindwaarde voor den veldstroom

$$i_{m2} = \frac{i_{b2} (r_{b2} + r_a) - e_o}{C_1}$$

berekenen. Men kan aldus bepalen de beide uiterste waarden voor i_m die kunnen optreden n.l. die bij nullast en die bij vollast van den generator; daar $i_m = i_a$ zijn hiermede ook de grootste variaties van den plaatstroom van de regelende triode bekend, terwijl ook de maximum plaatsspanningsvariaties te berekenen zijn. Beide uiterste waarden van den plaatstroom moeten nog in het lineaire gedeelte van de triodekarakteristieken zijn gelegen, buiten dat gebied gaan de door ons toegepaste lineaire betrekkingen niet meer op en is de regeling verzwakt.

§ 2. *Practisch voorbeeld van spanningsregeling aan een gelijkstroomdynamo door trioden, in serie met de veldwikkeling.*

Aan een gelijkstroomdynamo van 460 Volt, 2,5 kW. is gemeten, dat:

$$\begin{array}{lll} r_m = 1675 \Omega & L_m = 82,5 \text{ Henry} & C_1 = 1700 \Omega \\ r_a = 7,2 \Omega & L_a = 0,155 \text{ Henry} & \end{array}$$

De dynamo wordt belast met ohmsche weerstanden (kolomweerstand) zoodat de zelfinductie der belasting te verwaarloozen is ten opzichte van de anker-zelfinductie. Wij stellen dus $L_b = 0$.

De regelingsinstallatie bestaat uit 12 trioden B 406 in parallel-schakeling, zoodat $g = 6$ en $R_i = \frac{4,3 \cdot 10^3}{12} = 360 \Omega$. Een poten-

tio-meter over de klemspanning is niet aanwezig, dus $p = 1$. Er is een versterkingsinstallatie aangebracht met één trap weerstands-versterking; de versterkingsfactor van deze installatie is 6 ($m = 6$).

De geheele inrichting is nu zoodanig ingesteld, dat bij nullast van de dynamo de klemspanning $e_{b1} = 415$ Volt; vervolgens wordt de dynamo plotseling belast met een weerstand van 585Ω . Wij zullen nu het verloop van de klemspanning etc. nagaan.

Voor het verloop van den belastingsstroom geldt de op pag. 31 afgeleide lineaire differentiaal-vergelijking

$$P i_b'' + Q i_b' + R i_b + S = 0$$

$$P = L_m (L_b + L_a) = 82,5 \cdot 0,155 = 12,8$$

$$Q = (L_b + L_a) (R_i + r_m) + L_m (r_{b2} + r_a) + L_b \cdot p g m C_1 = 49115.$$

$$R = r_a (R_i + r_m) + r_{b2} (R_i + r_m + p g m C_1) = 36,99 \cdot 10^6$$

$$S = -p g m C_1 e_{b1} - (r_m + R_i) (e_o + C_1 i_m).$$

$$\text{Hier is } e_{b1} = e_o + C_1 i_{m1} = 415 \text{ Volt.}$$

$$S = -26,24 \cdot 10^6.$$

Het blijkt dus, dat:

$$Q^2 - 4PR = 49115^2 - 4 \cdot 12,8 \cdot 36,99 \cdot 10^6 = 530 \cdot 10^6.$$

Aangezien $Q^2 - 4PR$ positief is, blijkt het regelingsproces een *aperiodisch* verloop te hebben. De oplossing der vergelijking luidt in dit geval:

$$i_b = -\frac{S}{R} + e^{-\frac{Q}{2P}t} \left(A e^{Gt} + B e^{-Gt} \right)$$

$$G = \frac{\sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P}.$$

Hier wordt dit:

$$i_b = + 0,709 + e^{-1,92 \cdot 10^3 t} \left(A e^{+ 0,9 \cdot 10^3 t} + B e^{- 0,9 \cdot 10^3 t} \right)$$

$$2 A = - 0,709 + 1,467 = 0,758.$$

$$2 B = - 0,709 - 1,467 = - 2,176.$$

$$i_b = 0,709 + 0,38 e^{-1,02 \cdot 10^3 t} - 1,09 e^{-2,82 \cdot 10^3 t}$$

Hieruit blijkt nu verder, dat

$$C_1 \Delta i_m = 4,93 + 165 e^{-1,02 \cdot 10^3 t} - 169,9 e^{-2,82 \cdot 10^3 t}$$

en $\Delta e_b = - 0,17 + 222 e^{-1,02 \cdot 10^3 t} - 637 e^{-2,82 \cdot 10^3 t}$

De eindwaarde voor Δe_b ($t = \infty$) bedraagt

$$\Delta e_b = - 0,17 \text{ Volt.}$$

Zonder regeling zou $\Delta e_b = - r_a i_{b2} = - 5,1$ Volt hebben bedragen; de regelingsgraad N heeft dus in dit geval een waarde van

$$N = \frac{5,1}{0,17} = 30.$$

Uit de vergelijking voor Δe_b ziet men, dat de regeling uiterst snel verloopt.

In fig. 6a en b is het verloop van Δi_m en Δe_b weergegeven. Ten tijde $t = 0$ valt de klemspanning plotseling geheel weg om in een zeer korten tijd ($0,5 \cdot 10^{-3}$ sec.) weer tot de oorspronkelijke waarde terug te keeren, vervolgens te stijgen boven de uitgangs-

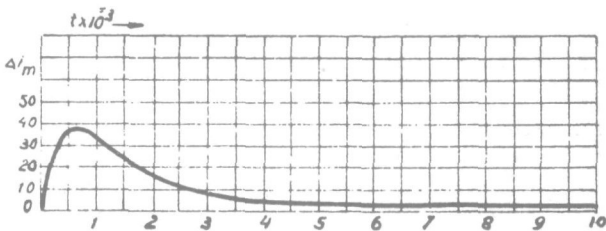


Fig. 6a.

waarde en daarna geleidelijk doch in zeer korten tijd naar de eindwaarde terug te loopen. Er heeft een vrij sterke overregeling plaats, zooals ook duidelijk te zien is uit het verloop van Δi_m ; het geheele proces is echter in den zeer korten tijd van ongeveer $1/100$ sec. afgeloopen.

Om de gevonden betrekkingen aan de praktijk te toetsen, is

nu bovendien een oscillogram (fig. 7) van de klemspanning van bovengenoemden generator genomen.

De belastingsstoot op den generator is hierbij grooter gekozen dan bij het hierboven uitgewerkte voorbeeld om een behoorlijken uitslag van de oscillograaf-lus te verkrijgen en wel is de generator plotseling belast van nullast tot vollast. Om de tijdmeting te vergemakkelijken is gelijktijdig de spanning van een 50 perioden wisselstroom generator opgenomen.

In overeenstemming met de berekening blijkt het verloop van de klemspanning een aperiodisch karakter te hebben, terwijl de nieuwe eindwaarde in zeer korten tijd bereikt is (ongeveer $1/25$ sec.).

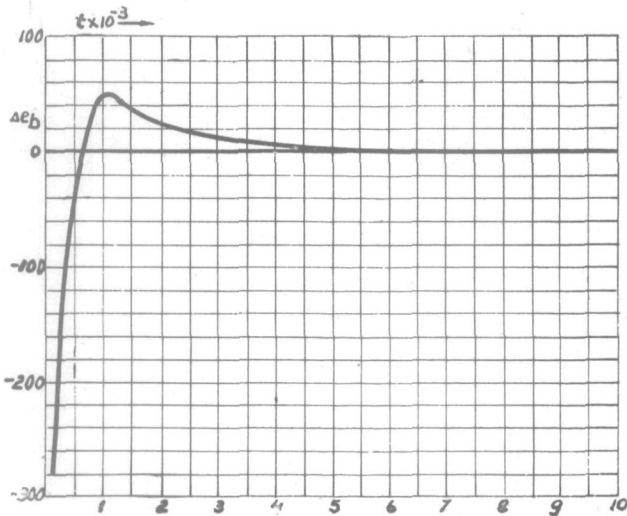


Fig. 6b.

Het verschijnsel verloopt dus iets trager dan volgens de berekening, terwijl overregeling niet optreedt. Dit schrijven wij toe aan de volgende oorzaken:

1. De belastingsstoot is grooter (r_{b2} dus kleiner);
2. dat de zelfinductie van den belastingsweerstand toch eenigen invloed heeft;
3. dat de triode door den zeer grooten spanningsstoot, die ten tijde $t = 0$ optreedt, in de allereerste oogenblikken niet meer gerekend mag worden in het lineaire gebied te fungeeren, zoodat de bij de berekening toegepaste betrekkingen niet geheel opgaan.

§ 3. *Spanningsregeling door trioden, parallel aan de veldwikkeling.*

Het principe-schema van deze methode van spanningsregeling is in fig. 8 weergegeven.

De werking der schakeling is als volgt:

Wanneer de klemspanning, tengevolge van een belastingsvariatie verandert, bijv. gaat dalen, dan daalt ook e_p en daar de batterijspanning E tegengesteld en grooter is dan e_p , wordt hierdoor het rooster meer negatief. De weerstand, die door de triode wordt

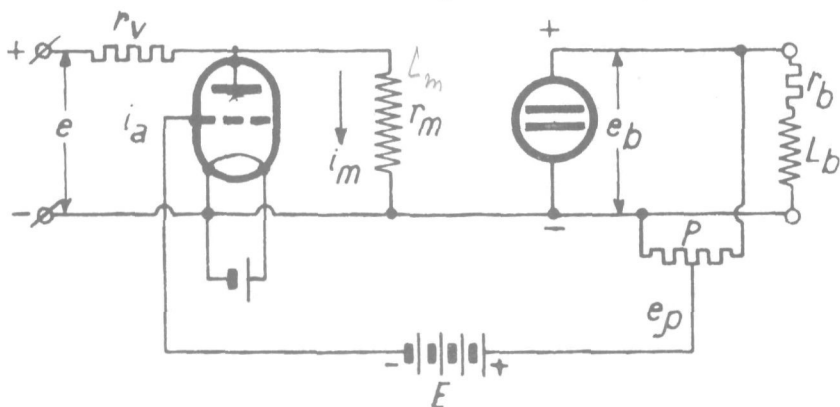


Fig. 8.

gerepresenteerd, neemt dientengevolge toe, en daar deze weerstand parallel geschakeld is aan de veldwikkeling en de weerstand r_v is voorgeschakeld, neemt hierdoor de veldstroom toe, zoodat de klemspanningsdaling wordt tegengewerkt. Er wordt dus geregeld op constante spanning.

Voeren wij dezelfde veronderstellingen in als in § 1 p. 29 en 30 bij de regeling door een triode in serie met het veld, dan kunnen wij de volgende betrekkingen opstellen.

Voor de ankerketen geldt de vergelijking:

$$(L_b + L_a) i_b' + (r_{i_2} + r_a) i_b = e_0 + C_1 i_m \quad \dots \quad 1)$$

en voor de veldketen:

$$e = r_v (i_a + i_m) + r_m i_m + L_m i_m' \quad \dots \quad 2)$$

Ook is

$$e_a = r_m i_m + L_m i_m' \quad \dots \quad 3)$$

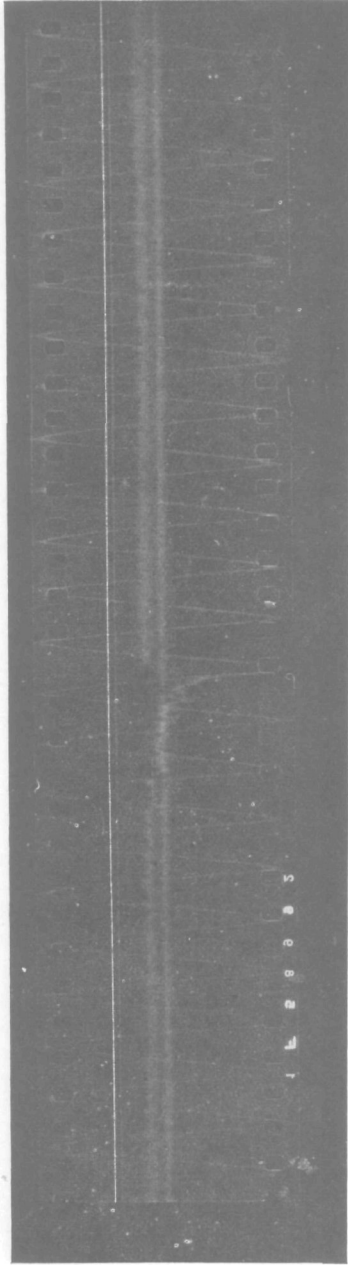
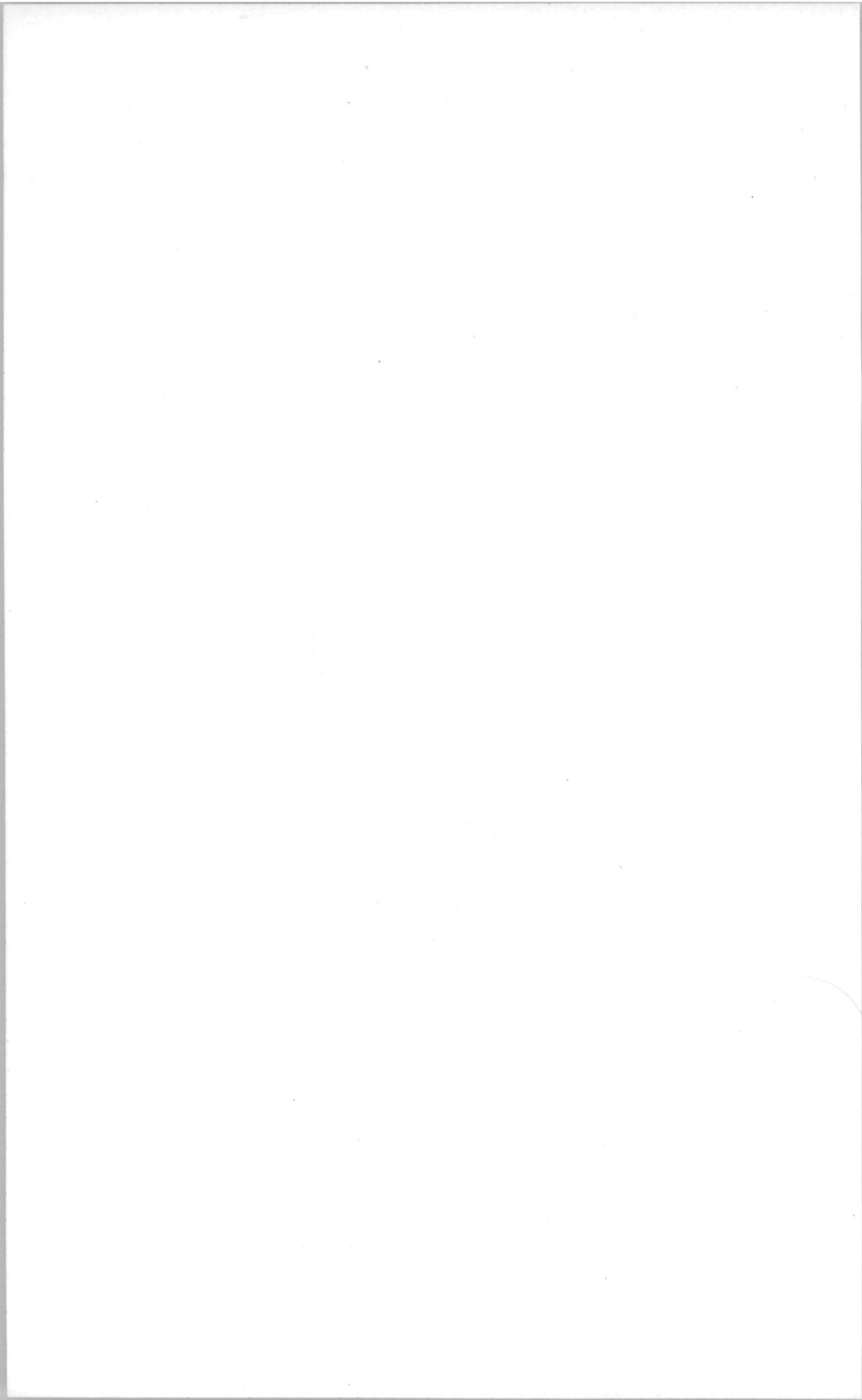


Fig. 7.



Voor de trioden kunnen wij schrijven:

$$g(e_g - e_{g1}) = R_i(i_a - i_{a1}) - (e_a - e_{a1}) \dots 4)$$

Nemen wij als in § 1 aan, dat de klemspanningsvariaties versterkt op het rooster worden overgebracht en dat de versterkingsgraad = m , dan geldt voor de roosterspanning de vergelijking:

$$e_g = e_{g1} + m p \left\{ C_1(i_m - i_{m1}) - r_a(i_b - i_{b1}) - L_a i_b \right\} \dots 5)$$

Wij hebben nu vijf vergelijkingen gevonden, waarin als veranderlijken optreden: i_b, i_m, i_a, e_a en e_g .

Elimineeren wij de vier laatstgenoemde grootheden dan ontstaat een lineaire differentiaalvergelijking van de 2^e orde in i_b :

$$P i_b'' + Q i_b' + R i_b + S = 0 \dots 6)$$

en wij berekenen, dat:

$$P = \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) L_m (L_b + L_a)$$

$$Q = \left\{ r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m + \frac{r_v}{R_i} p g m C_1 \right\} L_b +$$

$$+ \left\{ r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m \right\} L_a + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) (r_{b2} + r_a) L_m.$$

$$R = \left\{ r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m + \frac{r_v}{R_i} p g m C_1 \right\} r_{b2} +$$

$$+ \left\{ r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m \right\} r_a$$

$$S = -i_{b1} \left[\left\{ r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m + \frac{r_v}{R_i} p g m C_1 \right\} r_{b1} + \right.$$

$$\left. + \left\{ r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m \right\} r_a \right].$$

De betrekkingen voor i_b en i_b' , welke uit de vergelijking 6) kunnen worden afgeleid, kunnen wij nu invoeren in vergel. 1), waardoor het verloop van i_m bekend is. Het verloop van de klemspanning volgt dan uit de betrekking:

$$e_b = e_o + C_1 i_m - r_a i_b - L_a i_b'.$$

De oplossing der vergelijking 6) is aperiodisch of periodisch naarmate $Q^2 - 4PR >$ of < 0 is.

Evenals bij de regeling door trioden in serie met de veldwikkeling onderscheiden wij weer twee gevallen:

- I. $L_b \ll L_a$ zoodat L_b te verwaarloozen is (zuiver ohmsche belasting).
- II. $L_a \ll L_b$, zoodat L_a verwaarloosd mag worden (belasting door electromagneten en dergelijke). Tusschen beide uiterste gevallen ligt het praktisch meest voorkomende geval n.l. dat $L_b \cong L_a$.

Wat de grootte-verhouding van de verschillende constanten betreft, gelden dezelfde opmerkingen als op p. 31 en 32 in verband hiermede zijn gemaakt.

- I. L_b te verwaarloozen ten opzichte van L_a .

Noem $\frac{r_v}{R_i} = \alpha$. $\text{pgm } C_1 = \beta$

en $r_v + (1 + \alpha)r_m + \alpha\beta = \gamma$ $r_v + (1 + \alpha)r_m = \mathfrak{S}$

dan is in het algemeen:

$$\begin{aligned} P &= (1 + \alpha) L_m (L_b + L_a). \\ Q &= \gamma L_b + \mathfrak{S} L_a + (1 + \alpha) (r_{b2} + r_a) L_m. \\ R &= \gamma r_{b2} + \mathfrak{S} r_a. \end{aligned}$$

Dus is bij $L_b = 0$.

$$Q^2 - 4PR = \mathfrak{S}^2 L_a^2 + (1 + \alpha)^2 (r_{b2} + r_a)^2 L_m^2 - 2(1 + \alpha) L_m L_a \{ \mathfrak{S} (r_{b2} + r_a) + 2\gamma r_{b2} \}.$$

In deze betrekking zal de laatste term grooter kunnen worden dan de 2^e term; vooral zal dit het geval kunnen zijn bij groote versterking. De verhouding van 2^e en 3^e term is n.l. als wij bij eerste benadering $r_{b2} + r_a = r_{b2}$ stellen:

$$V = \frac{(1 + \alpha) L_m}{2 L_a \{ 3 r_v + 3(1 + \alpha) r_m + \alpha \beta \}}$$

Wel is $L_m > L_a$, doch daartegenover staat, dat $3r_v + 3(1 + \alpha)r_m + \alpha\beta$ ook vele malen grooter kan zijn dan $(1 + \alpha)$; wanneer de versterking grooter wordt, is het dus zeker mogelijk, dat $V < 1$ d.w.z. $Q^2 - 4PR < 0$.

Inderdaad kan dus bij zuiver ohmsche belasting van den generator ($L_b \ll L_a$) periodische slingingering van de klemspanning optreden.

De grootte van de demping van het verschijnsel wordt bepaald door den factor

$$\frac{Q}{2P} = \frac{\delta}{2(1 + \alpha)L_m} + \frac{r_{b2} + r_a}{L_a}.$$

De constante $\beta = p g m C_1$ komt in deze uitdrukking niet voor; bij groote versterking behoeft dus $\frac{Q}{2P}$ niet zeer groot te worden. Toch

zal $\frac{Q}{2P}$ in het algemeen > 1 , daar de factor $\frac{r_{b2} + r_a}{L_a} > 1$.

(Bij de op p. 39 als voorbeeld genoemde machine is bijv. bij vollast $\frac{r_{b2} + r_a}{L_a} = \frac{106 + 7,2}{0,155} = 730$.) Bij groote machines wordt $\frac{Q}{2P}$ minder groot; toch kunnen wij wel aannemen, dat de demping ook dan nog voldoende groot is, om het optreden van hinderlijke slingerings van de klemspanning te vermijden. (Labiliteit kan nooit optreden, aangezien de factor $\frac{Q}{2P}$ altijd positief is).

Beschouwen wij nu in de 2^{de} plaats het geval; dat $L_b \gg L_a$, zoodat L_a te verwaarloozen is ten opzichte van L_b .

II. $L_a = 0$.

Nu is:

$$Q^2 - 4PR = \gamma^2 L_b^2 + (1 + \gamma)^2 (r_{b2} + r_a)^2 L_m^2 + 2 L_m L_b (1 + \alpha) (r_{b2} + r_a) \gamma - 4(1 + \gamma) L_m L_b (\gamma r_{b2} + \delta r_a).$$

Bij 1^e benadering mag men δr_a verwaarloozen ten opzichte van γr_{b2} evenals r_a ten opzichte van r_{b2} , zoodat

$$Q^2 - 4PR \cong \gamma^2 L_b^2 + (1 + \gamma)^2 r_{b2}^2 L_m^2 - 2(1 + \gamma) L_m L_b r_{b2}^2 \gamma.$$

Wanneer $L_b \gg L_a$ is L_b van dezelfde orde van grootte als L_m (immers $L_m \gg L_a$), zoodat L_b^2 en $L_m L_b$ van dezelfde orde van grootte zijn.

Echter is $\gamma > r_{b2}$ en bij groote versterking is γ zelfs $\gg r_{b2}$. De oplossing der vergelijking is dus in het algemeen aperiodisch, daar in de uitdrukking van $Q^2 - 4PR$ de 1^e term reeds op

zichzelf grooter is dan de negatieve term en dientengevolge is $Q^2 - 4PR > 0$.

Zooals wij reeds op p. 35 opmerkten is in het aperiodische geval de snelheid van regeling bepaald door de tijdconstante $\delta = \frac{2P}{Q}$.

Deze bedraagt hier $\delta = \frac{2(1+\alpha)L_m L_b}{\gamma L_b(1+\alpha)(r_{b2} + r_a)L_m}$.

Bij toenemende versterking wordt δ steeds kleiner, d.w.z. neemt de regelingssnelheid toe.

Zooals wij reeds opmerkten zal in het algemeen L_b dezelfde orde van grootte hebben als L_a en vormen I en II grensgevallen, die slechts bij uitzondering voorkomen. Wij mogen verwachten, dat bij $L_b \cong L_a$ de kans op periodiciteit belangrijk minder groot is, dan wanneer $L_b \ll L_a$; ook kunnen wij aantonen, dat bij zeer groote versterking in elk geval geen periodiciteit zal optreden. Bij zeer groote versterking is n.l. $\beta = \rho g m C_1 \gg r_m, R_i, r_v$ zoodat $Q \cong \alpha \beta L_b$

$$R \cong \alpha \beta r_{b2}$$

en $Q^2 - 4PR \cong \alpha^2 \beta^2 L_b^2 - 4(1+\alpha)C_m(L_b + L_a)\alpha\beta r_{b2}$.

Volgens veronderstelling is $\beta \gg r_m$, zoodat in nog sterkere mate $\beta \gg r_{b2}$ (vergelijk p. 33) L_m is wel grooter dan L_b , doch niet in die mate als β grooter is dan r_m , zoodat wij wel mogen aannemen, dat in het algemeen de 1^e term grooter is dan de 2^e, d.w.z. $Q^2 - 4PR > 0$. De regeling verloopt dus ook in dit geval *aperiodisch*. De snelheid van regeling wordt voornamelijk bepaald door de tijdconstante

$$\delta = \frac{2P}{Q} = \frac{(1+\alpha)L_m(L_b + L_a)}{\alpha\beta L_b}$$

Bij zeer groote versterking wordt $\delta \ll 1$ seconde, en verloopt de regeling uiterst snel. *Hoe groter versterking hoe sneller regeling.*

De *algemeene* oplossingen voor i_b uit de verg. 5) hebbengeheel dezelfde gedaante als in § I is afgeleid in verband met de regeling door een triode in serie met de veldwikkling.

De *eindwaarde* voor i_b (voor $t = \infty$) is de volgende:

$$i_{b2} = -\frac{S}{R} = i_{q1} \frac{\gamma r_{b1} + \delta r_a}{\gamma r_{b2} + \delta r_a}$$

De eindwaarde voor de klemspanning is dus:

$$e_{b2} = i_{b2} r_{b2} = i_{b1} r_{b2} \frac{\gamma r_{b1} + \mathfrak{F} r_a}{\gamma r_{b2} + \mathfrak{F} r_a}$$

en de klemspanningsvariatie bij regeling is:

$$\Delta e_b = e_{b2} - e_{b1} = i_{b1} \left\{ r_{b2} \frac{\gamma r_{b1} + \mathfrak{F} r_a}{\gamma r_{b2} + \mathfrak{F} r_a} - r_{b1} \right\}$$

of
$$\Delta e_b = -i_{b1} (r_{b1} - r_{b2}) \frac{\mathfrak{F} r_a}{\gamma r_{b2} + \mathfrak{F} r_a}.$$

Zonder regeling zou de klemspanningsvariatie bedragen:

$$\Delta e_{bz} = -i_{b1} (r_{b1} - r_{b2}) \frac{r_a}{r_{b2} + r_a}.$$

De regelingsgraad $N = \frac{\Delta e_{bz}}{\Delta e_b}$ bedraagt dus hier:

$$N = \frac{\gamma r_{b2} + \mathfrak{F} r_a}{\mathfrak{F} (r_{b2} + r_a)}.$$

Bij groote versterking is $\gamma \gg \mathfrak{F}$ en $\gamma \cong \alpha \beta$ terwijl in het algemeen $r_{b2} \gg r_a$, zoodat in dat geval

$$N \cong \frac{\alpha \beta}{\mathfrak{F}} \cdot \frac{r_{b2}}{r_{b2} + r_a}.$$

De regelingsgraad kan dus door opvoering van de versterking een hooge waarde verkrijgen en daarmee wordt de *onnauwkeurigheid der regeling klein*.

De regelingsgraad is bij groote versterking blijkbaar evenredig met $\beta = \rho g m C_1$ (dus o.a. met de versterking) en met

$$\frac{\alpha}{\delta} = \frac{I}{R_i + \left(\frac{R_i}{r_v} + I \right) r_m}$$

Uit de laatstgenoemde evenredigheid is de invloed van de eigenschappen der regelende trioden zichtbaar. Voor een nauwkeurige regeling is het gunstig, dat r_v groot is en R_i klein; twee eischen die tegen elkaar ingaan (omdat een lage R_i wordt bereikt

bij een groote plaatstroom der regelende trioden, terwijl een groote plaatstroom met een lagen voorschakelweerstand gepaard gaat) wanneer de spanning aan de veldketen gegeven is.

De conclusies, waartoe de beschouwingen over regeling door trioden parallel aan de veldwikkeling ons voeren, kunnen overigens geheel hetzelfde karakter dragen als die, welke in verband met de regeling door trioden in serie met het veld werden gevonden; wij zullen hier volstaan met de verwijzing naar de slotopmerkingen van § 1 (p. 38).

HOOFDSTUK IV.

THEORETISCHE BESCHOUWING VAN SPANNINGS- REGELING AAN GENERATOREN DOOR DIODEN.

§ 1. *Spanningsregeling aan een gelijkstroomdynamo door dioden in serie met de veldwikkeling.*

De spanning van een gelijkstroomdynamo wordt constant gehouden in een schakeling volgens fig. 9.

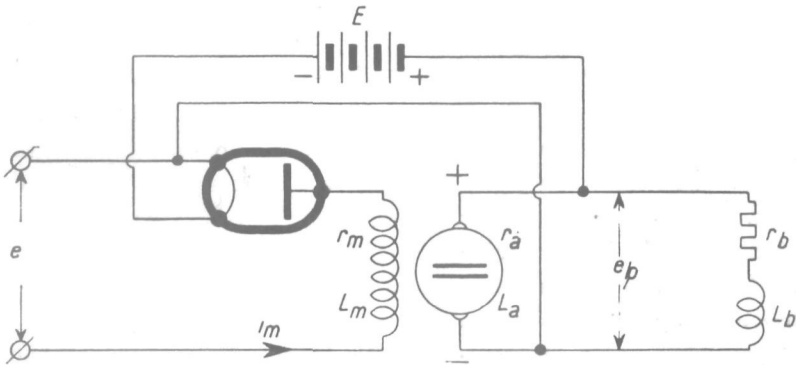


Fig. 9.

Evenals bij de regeling door trioden (Hoofdstuk III, p. 28) veronderstellen wij, dat de spanning e voor de veldketen en het toerental van de dynamo gedurende het regelingsproces constant blijven.

De gloeidraad van de regelende diode is over een batterij E aangesloten op de klemspanning; de batterijspanning is hoger dan de klemspanning, zoodat bij dalende klemspanning de gloeistroom van de diode stijgt en omgekeerd.

De plaatspanning en gloeispanning zijn zóó gekozen, dat de diode in het verzadigingsgebied fungeert.

De werking der regelingsinstallatie is nu duidelijk: Bij een belastingstoename, daalt de klemspanning; dientengevolge stijgt

de gloeistroom en de weerstand, dien de diode representeert, neemt af. Hierdoor stijgt de veldstroom, zoodat er dus geregeld wordt op constante spanning.

Bij de theoretische beschouwing van het regelingsproces nemen wij aan, dat ten tijde $t = 0$ de belastingsweerstand r_b varieert van de waarde rb_1 naar rb_2 .

Deze variatie wordt geacht klein te zijn, zoodat ook de verandering in den veldstroom, die noodig is om de klemspanning van den generator constant te houden klein is en voor de klemspanning als functie van den veldstroom de lineaire betrekking E.M.K. = $e_0 + C_1 i_m$ (verg. p. 29) mag worden toegepast.

Het regelingsproces wordt beheerscht door de volgende betrekkingen:

Voor de ankerketen geldt de vergelijking:

$$L_b i_b' + r_{b2} i_b = e_0 + C_1 i_m - r_a (i_b + i_f) - L_a (i_b + i_f)'$$

Daar voor een economische regeling de gloeistroom klein behoort te zijn ten opzichte van den belastingsstroom en aangezien r_a klein is ten opzichte van r_{b2} mag in deze vergelijking het product $r_a i_f$ verwaarloosd worden. Om voor de weerstandsverandering van den gloeidraad en voor de verandering in den plaatstroom der diode als functie van de temperatuur lineaire betrekkingen te doen gelden, moeten wij voorts aannemen, dat de verandering in den gloeistroom klein is ten opzichte van de uitgangswaarde van den gloeistroom, zoodat dus Δi_f en i_f' klein van de 2^e orde is ten opzichte van i_b . Dit in aanmerking nemende kunnen wij de vergelijking voor de ankerketen schrijven in de volgende meer eenvoudige gedaante:

$$(L_a + L_b) i_b' + (r_{b2} + r_a) i_b = e_0 + C_1 i_m. . . . 1)$$

Evenals bij de regeling door trioden veronderstellen wij ook hier, dat de invloed, dien de belastingsstroom op de grootte van het hoofveld van den generator heeft, verwaarloosd mag worden (het z.g. „tegenveld” is nul). Zooals wij reeds opmerkten is deze veronderstelling exact, indien de borstels in de neutrale zône staan (verg. p. 3).

Voor de veldketen geldt de vergelijking:

$$e = e_a + r_m i_m + L_m i_m' 2)$$

De diode werkt in het verzadigingsgebied; volgens de karakteristiek fig. 3, I, in het horizontale gedeelte van de kromme $i_a = f(e_a)$ voorbij het punt *B*. Volgens deze kromme is in dit gebied de plaatstroom in het geheel niet afhankelijk van de plaatspanning. Practisch is dit wèl het geval en neemt ook in het z.g. verzadigingsgebied de plaatstroom nog toe met de plaatspanning, zij het ook in veel mindere mate dan bij onverzadigde diode het geval is.

Dit verschijnsel is voor een deel toe te schrijven aan het z.g. SCHOTTKY-effect (Zie hiervoor SCHOTTKY *Physikalische Zeitschrift* 15, 1914, p. 872 en ZWIKKER „*Physische Eigenschaften van Wolfram bij hoge temperaturen*”. Diss. A'dam 1925 § 2 p. 91).

Men kan in het verzadigingsgebied, wanneer de variaties in de plaatspanning klein zijn, een lineair verband aannemen tusschen den plaatstroom en de plaatspanning en kan dus stellen:

$$i_m = i_a = i_s + C_2 (e_a - e_s) \dots \dots \dots 3)$$

i_s is de waarde van den verzadigingsstroom, die bij een bepaalde temperatuur van de gloeikathode behoort, terwijl e_s de z.g. „verzadigingsspanning” overeenkomt met die waarde van de plaatspanning, waarbij de plaatstroom begint verzadigd te worden (vergelijk fig. 10).

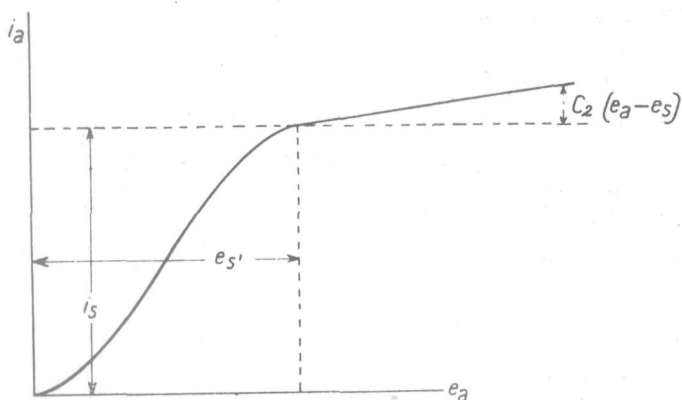


Fig. 10

Zoals op p. 17 is uiteengezet, mogen wij bij temperatuursvariatië beneden 1% een lineair verband aannemen tusschen den verzadigingsstroom en de temperatuur van de gloeikathode:

$$i_s = i_{s1} + C_3 (T - T_1) \dots \dots \dots 4)$$

Voor den gloeidraad geldt de wet, dat op ieder oogenblik de toegevoerde energie = de uitgestraalde energie + de in den draad opgenomen energie, zoodat wij gebruikmakende van de op p. 20 ingevoerde notaties mogen schrijven:

$$i_f^2 r_f = o \eta + m C \frac{dT}{dt}.$$

o = oppervlak gloeidraad.

η = uitgestraalde energie in Watts per cm^2 gloeidraadoppervlak.

m = massa gloeidraad.

C = soortelijke warmte.

De soortelijke warmte is onafhankelijk van de temperatuur;

r_f en η zijn temperatuursfuncties.

Bedenken wij nu, dat $i_f = \frac{E - e_b}{r_f}$ en stellen wij $\frac{T - T_1}{T_1} = x$,

terwijl wij volgens p. 20 lineaire betrekkingen aannemen tusschen den weerstand (r_f) resp. de uitgestraalde energie per eenheid van oppervlak (η) en de temperatuur, dan gaat de bovenstaande betrekking voor het temperatuurevenwicht over in de vergelijking:

$$\frac{(E - e_b)^2}{r_{f1}} (1 - C_p x) = O \eta_1 (1 + C_\eta x) + m C T_1 \frac{dx}{dt} \quad 5)$$

$$r_f = r_{f1} (1 + C_p \cdot x)$$

$$\eta = \eta_1 (1 + C_\eta \cdot x).$$

Voor het geval de gloeidraad uit wolfram bestaat, is $C_p = 1,2$ en $C_\eta = 4,7$ (zie p. 20).

Voor de klemspanning geldt de betrekking:

$$e_b = (e_0 + C_1 i_m) - r_a i_b - L_a i_b'.$$

Daar wij zijn uitgegaan van de veronderstelling, dat de verandering van r_b klein is, is ook de verandering van i_m klein. Het spanningsverlies in de ankerwikkeling $r_a i_b$ is in het algemeen klein ten opzichte van de in het anker opgewekte E.M.K. ($e_0 + C_1 i_m$), terwijl ten slotte ook de term $L_a i_b'$ klein zal zijn ten opzichte van de E.M.K.

Bij de berekening van e_b^2 mogen wij nu de kwadraten en producten der kleine grootheden verwaarloozen, zoodat voor e_b^2 geschreven mag worden:

$$e_b^2 = (e_0 + C_1 i_{m1})^2 + 2 (e_0 + C_1 i_{m1}) \{C_1 \Delta i_m - r_a i_b - L_a i_b'\}$$

en

$$(E - e_b)^2 = E^2 + e_b^2 - 2E \{ e_0 + {}_1 C_1 i_{m1} + C_1 \Delta i_m - r_a i_b - L_a i_b' \}$$

Uit betrekkingen de 2), 3) en 4) volgt, dat:

$$e = \frac{i_m - C_3 T_1 x - (i_{s1} - C_2 e_{s1})}{C_2} + i_m r_m + L_m i_m' . . . 6)$$

De verzadigingsspanning e_s varieert met de temperatuur. Echter is het product $C_2 e_s$ steeds klein ten opzichte van i_{s1} , zoodat wij bij kleine temperatuurschommelingen de verandering in $C_2 e_s$ mogen verwaarloozen en voor e_s mogen schrijven e_{s1} .

$i_{s1} - C_2 e_{s1}$ heeft dan een constante waarde.

Wij stellen $i_{s1} - C_2 e_{s1} = i_{s0}$ en vinden uit 6), dat

$$x = \frac{C_2}{C_3 T_1} \left\{ i_m \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right) + L_m i_m' - \frac{i_{s0}}{C_2} - e \right\}$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{C_2}{C_3 T_1} \left\{ i_m' \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right) + L_m i_m'' \right\} 6)$$

Voeren wij deze betrekkingen voor x en $\frac{dx}{dt}$ in de vergelijking 5) in, tevens gebruik makende van de voor $(E - e_b)^2$ gevonden uitdrukking, dan ontstaat de vergelijking 7):

$$\frac{1}{r_{f1}} \left[E^2 + (e_0 + C_1 i_{m1})^2 + 2(e_0 + C_1 i_m) \{ C_1 \Delta i_m - r_a i_b - L_a i_b' \} - \right. \\ \left. - 2E \{ e_0 + C_1 i_{m1} + C_1 \Delta i_m - r_a i_b - L_a i_b' \} \right] \times \\ \times \left\{ 1 - C_f \frac{C_2}{C_3 T_1} \left[i_m \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right) + L_m i_m' - \frac{i_{s0}}{C_2} - e \right] \right\} = \\ = 0 \eta_1 \left[1 + C_f \frac{C_2}{C_3 T_1} \left\{ i_m \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right) + L_m i_m' - \frac{i_{s0}}{C_2} - e \right\} \right] + \\ + m C \frac{C_2}{C_3} \left\{ i_m' \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right) + L_m i_m'' \right\} 7)$$

In deze vergelijking komen als veranderlijken nog voor i_m en i_b . Uit de betrekking 1) leiden wij nu af, dat:

$$i_m = \frac{(L_a + L_b) i_b' + (r_{b2} + r_a) i_b - e_0}{C_1}$$

en

$$i_m' = \frac{(L_a + L_b) i_b'' + (r_{b2} + r_a) i_b'}{C_1}$$

$$i_m'' = \frac{(L_a + L_b) i_b''' + (r_{b2} + r_a) i_b''}{C_1}$$

Voeren wij deze betrekkingen voor i_m , i_m' en i_m'' in de vergelijking 7) in, dan ontstaat ten slotte een vergelijking in i_b welke gebracht kan worden in den vorm van een lineaire differentiaal-vergelijking van de 3^{de} orde in Δi_b , die de gedaante heeft:

$$P(\Delta i_b)''' + Q(\Delta i_b)'' + R(\Delta i_b)' + S\Delta i_b + T = 0. \quad (8)$$

door rekening te houden met de veronderstelling, dat Δi_b klein is ten opzichte van i_b , zoodat de termen, waarin het kwadraat van Δi_b of het product van Δi_b met andere kleine grootheden (Δi_m , $r_a i_b$, $L_a i_b'$) voorkomen, verwaarloosd mogen worden.

Wij berekenen, dat in de vergelijking 8 de constanten de volgende waarden hebben, wanneer de geheele vergelijking wordt gedeeld door het product:

$$m C \frac{C_2}{C_3} \cdot \frac{L_m}{C_1} (r_{b2} + r_a).$$

$$P = \frac{L_a + L_b}{r_{b2} + r_a}$$

$$Q = 1 + \frac{L_a + L_b}{r_{b2} + r_a} \left\{ \frac{r_m + \frac{1}{C_2}}{L_m} + \frac{4,7 O \eta_1 + 1,2 W_{f_{1-2}}}{m C T_1} \right\}.$$

$$R = -\frac{r_m + \frac{1}{C_2}}{L_m} + \left(\frac{L_a + L_b}{r_{b2} + r_a} \cdot \frac{r_m + \frac{1}{C_2}}{L_m} + 1 \right) \cdot \frac{4,7 O \eta_1 + 1,2 W_{f_{1-2}}}{m C T_1} +$$

$$+ 2 L_b \frac{E - e_1}{r_{f1}} \left\{ \frac{1}{m C \frac{C_2}{C_3} \cdot \frac{L_m}{C_1} (r_{b2} + r_a)} - \right.$$

$$\left. - \frac{1,2}{m C T_1} \cdot \frac{r_m + \frac{1}{C_2}}{L_m} \cdot \frac{1}{r_{b2} + r_a} \{ i_{b1} (r_{b1} + r_a) - e_1 \} \right\}.$$

$$S = \frac{r_m + \frac{1}{C_2}}{L_m} \left(\frac{4,7 O \eta_1 + 1,2 W_{f_{1-2}}}{m C T_1} \right) +$$

$$+ 2 r_{b2} \frac{E - e_1}{r_{f1}} \left\{ \frac{1}{m C \frac{C_2}{C_3} \cdot \frac{L_m}{C_1} (r_{b2} + r_a)} - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{1,2}{m C T_1} \cdot \frac{r_m + \frac{I}{C_2}}{L_m} \cdot \frac{I}{r_{b_2} + r_a} \left\{ i_{b_1} (r_{b_2} + r_a) - e_1 \right\} \Bigg\} \\
 T = & \frac{I}{m C \frac{C_2}{C_3} \cdot \frac{L_m}{C_1} (r_{b_2} + r_a)} \times \\
 & \times \left[O_{\eta_1} \left\{ I + 4,7 \frac{C_2}{C_3 T_1} \cdot \frac{r_m + \frac{I}{C_2}}{C_1} [i_{b_1} (r_{b_2} + r_a) - e_1] \right\} - \right. \\
 & \left. - W_{f_{1-2}} \left\{ I - 1,2 \frac{C_2}{C_3 T_1} \cdot \frac{r_m + \frac{I}{C_2}}{C_1} [i_{b_1} (r_{b_2} + r_a) - e_1] \right\} \right].
 \end{aligned}$$

Bij de uitwerking der constanten is er mede rekening gehouden, dat $\frac{i_{s_0}}{C_2} + e = i_{m_1} \left(r_m + \frac{I}{C_2} \right)$ (dit is af te leiden uit de vergelijking 6) zoodat

$$i_m \left(r_m + \frac{I}{C_2} \right) + L_m i_m' - \frac{i_{s_0}}{C_2} - e = \Delta i_m \left(r_m + \frac{I}{C_2} \right) + L_m \Delta i_m'$$

In de betrekkingen voor P , Q etc. is voorts:

$$e_1 = e_0 + C_1 i_{m_1} = i_{b_1} (r_{b_1} + r_a)$$

$$\text{zoodat } i_{b_1} (r_{b_2} + r_a) - e_1 = i_{b_1} (r_{b_2} - r_{b_1})$$

$$\text{en } W_{f_{1-2}} = \frac{I}{r_{f_1}} (E - e_1)^2.$$

De laatste genoemde grootheid is ongeveer gelijk aan de energie, welke ten tijde $t = 0$ aan den gloeidraad toegevoerd wordt. (W_{f_1})

Wij berekenen, dat

$$W_{f_1} = (E^2 + e_1^2 - 2 E e_1 - 2 e_1 r_a i_{b_1}) \frac{I}{r_{f_1}}$$

zoodat het verschil tusschen $W_{f_{1-2}}$ en W_{f_1} gelijk is aan $\frac{2e_1 r_a i_{b_1}}{r_{f_1}}$

Daar wij van de veronderstelling zijn uitgegaan, dat r_a klein is ten opzichte van r_{b_1} en r_{b_2} , is derhalve $W_{f_{1-2}} \cong W_{f_1}$.

Op p. 24 hebben wij gevonden, dat de relaxatie, die door de warmtetraagheid van den gloeidraad wordt ingevoerd, bepaald wordt door de tijdconstante

$$\mathfrak{S}_f = \frac{m C T_1}{4,7 \circ \eta_1 + 1,2 W_f}.$$

In deze formule is $W_f = (e_{f1}^2 + 2 e_{f1} \Delta e_f) \frac{I}{r_f}$. Daar echter Δe_f klein is ten opzichte van e_{f1} is $W_f \cong W_{f1}$, zoodat bij eerste benadering voor $\frac{4,7 \circ \eta_1 + 1,2 W_{f1-2}}{m C T_1}$ geschreven kan worden $\frac{I}{\mathfrak{S}_f}$.

Noemen wij nu verder

$$\mathfrak{S}_a = \frac{L_a + L_b}{r_{b2} + r_a} \quad \text{en} \quad \mathfrak{S}_m = \frac{L_m}{r_m + \frac{I}{C_2}}$$

dan gaan de uitdrukkingen voor de constanten over in de volgende:

$$P = \mathfrak{S}_a$$

$$Q = 1 + \mathfrak{S}_a \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \right).$$

$$R = \frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_m} \right) + 2 L_b \frac{E - e_1}{r_{f1}} \times \\ \times \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{I}{m C T_1 (r_{b2} + r_a)} \left\{ \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{I}{C_2} \right)} + 1,2 i_{b1} (r_{b1} - r_{b2}) \right\}.$$

$$S = \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{I}{\mathfrak{S}_f} + 2 r_{b2} \frac{E - e_1}{r_{f1}} \times \\ \times \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{I}{m C T_1 (r_{b2} + r_a)} \left\{ \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{I}{C_2} \right)} + 1,2 i_{b1} (r_{b1} - r_{b2}) \right\}.$$

Wij zien dus in deze uitdrukkingen de relaxaties, die worden ingevoerd door de ankerketen (\mathfrak{S}_a), de veldketen (\mathfrak{S}_m) en den gloeidraad (\mathfrak{S}_f) herhaaldelijk optreden en het is reeds dadelijk van belang op te merken, dat naar wij in hoofdstuk I § 3 hebben afgeleid, de relaxaties van de veldketen en den gloeidraad in het algemeen dezelfde orde van grootte hebben, terwijl daarentegen de relaxatie door de ankerketen ingevoerd, veel kleiner is, dus:

$$\mathfrak{S}_m \cong \mathfrak{S}_f.$$

$$\mathfrak{S}_a \ll \mathfrak{S}_m \quad \text{en} \quad \mathfrak{S}_f.$$

De algemeene oplossing der differentiaalvergelijking 8) is:

$$i_b = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} + A_3 e^{\alpha_3 t} - \frac{T}{S}$$

waarin α_1 , α_2 en α_3 de wortels zijn van de 3^e machtsvergelijking:

$$P \alpha^3 + Q \alpha^2 + R \alpha + S = 0.$$

Voor de beantwoording van de vraag of het mogelijk is, dat het verschijnsel labiel wordt en of er bij stabiliteit al of niet periodieke schommelingen optreden, is het noodig de teekens van de constanten te bepalen.

Wij brengen de vergelijking daartoe in de gedaante:

$$\alpha^3 + P' \alpha^2 + Q' \alpha + R' = 0$$

zoodat nu:

$$P' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a} + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f}.$$

$$Q' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a} \left\{ \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_m} \right) + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left[1 + 2 \frac{L_b}{r_{b_2} + r_a} \cdot \frac{E - e_1}{r_{f_1}} \cdot \frac{1}{mCT_1} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)} + 1,2 i_{b_1} (r_{b_1} - r_{b_2}) \right) \right] \right\}$$

$$R' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a} \cdot \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left[\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + 2 \frac{r_{b_2}}{r_{b_2} + r_a} \cdot \frac{E - e_1}{r_{f_1}} \cdot \frac{1}{mCT_1} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)} + 1,2 i_{b_1} (r_{b_1} - r_{b_2}) \right\} \right]$$

Het blijkt nu, dat

P' steeds positief

is, aangezien \mathfrak{S}_a , \mathfrak{S}_m en \mathfrak{S}_f positieve grootheden zijn.

In de coëfficiënten Q' en R' komt de term $1,2 i_{b_1} (r_{b_1} - r_{b_2})$ voor, die negatief wordt, wanneer $r_{b_2} > r_{b_1}$, d.w.z. wanneer een belastingsvermindering de regeling inleidt.

Gaan wij dus allereerst na of

$$\frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)} + 1,2 i_{b_1} (r_{b_1} - r_{b_2}) \text{ negatief kan worden.}$$

Volgens veronderstelling is Δr_b klein ten opzichte van r_b , zoodat $i_{b_1}(r_{b_1} - r_{b_2})$ klein is ten opzichte van de klemspanning.

In de term

$$\frac{T_1 C_1 C_3}{\left(r_m + \frac{1}{C_2}\right) C_2}$$

is $\frac{1}{C_2}$ over het algemeen belangrijk grooter dan r_m

(vergelijk het getallenvoorbeeld in § 4).

$C_1 i_{m_1}$ is kleiner dan de klemspanning.

Stellen wij $C_1 i_{m_1} = \frac{e_{b_1}}{a}$, dan zal a afhangen van de verzadiging van het ijzer in den generator en zal bijv. kunnen variëren van $2 \div 5$.

In de vergelijking $i_s = i_{s_1} + C_3(T - T_1)$ is $i_{s_1} \cong i_{m_1}$, terwijl

$$C_3 = \frac{23,4}{T_1} i_{s_1}.$$

Volgens vergelijking 2 op p. 17 kunnen wij n.l. schrijven:

$$i_s = i_{s_1} \left(1 + 23,4 \frac{T - T_1}{T_1} \right)$$

wanneer de gloeidraad uit wolfram bestaat.

Het blijkt dus, dat

$$T_1 C_1 C_3 = \frac{23,4}{a} \cdot e_{b_1}.$$

Daar $\frac{1}{C_2}$ als regel belangrijk grooter is dan r_m is voorts $\frac{1}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2}\right)}$ altijd kleiner dan de eenheid, doch als regel niet belangrijk kleiner dan de eenheid.

Het quotient $\frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2}\right)}$ is derhalve van dezelfde orde van grootte als de klemspanning; als regel een paar maal grooter dan de klemspanning.

De term $i_{b_1}(r_{b_1} - r_{b_2})$ is derhalve klein ten opzichte van de term $\frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2}\right)}$ en de som van beide termen is onafhankelijk

van het feit of $r_{b1} >$ dan wel $< r_{b2}$ is, *steeds positief* en van de orde van grootte van de klemspanning.

Wij stellen $\frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)} + 1,2 i_{b1} (r_{b1} - r_{b2}) = b e_1$, waarin

dus b niet veel verschilt van de eenheid.

In de coëfficiënten Q' en R' wordt nu deze som vermenigvuldigd met het quotient $\frac{E - e_1}{r_{f1}}$.

Daar nu $E - e_1 \cong e_{f1}$ en dus $E - e_1$ *steeds positief*, is blijkt ten slotte, dat de coëfficiënten Q' en R' *steeds positief* zijn.

In de coëfficiënt R' wordt de bovengenoemde som = $b e_1$ vermenigvuldigd met $2 \cdot \frac{r_{b2}}{r_{b2} + r_a} \cdot \frac{E - e_1}{r_{f1}} \cdot \frac{1}{m C T_1}$.

Nu is $\frac{r_{b2}}{r_{b2} + r_a} \cong 1$ en $\frac{E - e_1}{r_{f1}} \cong i_{f1}$

zoodat het geheele product $\cong \frac{2 b i_{f1} e_1}{m C T_1}$

of wanneer wij stellen $e_1 = c e_{f1}$

is het geheele product $\cong \frac{2 b c W_{f1}}{m C T_1}$.

Wij hebben gevonden, dat b niet veel verschilt van de eenheid en als regel grooter is dan de eenheid; de factor c kan varieeren van een getal, dat kleiner is dan de eenheid tot eenige malen de eenheid. Als regel zal c grooter dan 1 zijn (de klemspanning hooger dan de gloeispanning).

Het meergenoemde product zal dus in het algemeen eenige malen grooter zijn dan het quotient $\frac{W_{f1}}{m C T_1}$.

Nu is $\frac{1}{\vartheta_f} = \frac{4,7 O \eta_1 + 1,2 W_{f1,2}}{m C T_1}$

waarin $W_{f1,2} = \frac{e_{f1}^2 + 2 e_{f1} \Delta e_f}{r_f} \cong W_{f1}$ en $4,7 O \eta_1$ en $1,2 W_{f1,2}$ dezelfde orde van grootte hebben (zie ook p. 22).

Hieruit volgt, dat ook het meergenoemde product dezelfde orde van grootte heeft als $\frac{1}{\vartheta_f}$.

Wij noemen het product

$$2 \frac{r_{b2}}{r_{b2} + r_a} \cdot \frac{E - e_1}{r_{f1}} \cdot \frac{1}{m C T_1} \left\{ \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)} + \right. \\ \left. + 1,2 i_{b1} (r_{b1} - r_{b2}) \right\} = \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}}$$

zoodat nu

$$R' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a \cdot \mathfrak{S}_m} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}} \right).$$

In Q' wordt $\frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}}$ vermenigvuldigd met $\frac{L_b}{r_{b2} + r_a}$ of met $\frac{L_b}{L_b + L_a} \cdot \mathfrak{S}_a$, zoodat

$$Q' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a} \left\{ \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_m} \right) + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_{f1}} \cdot \frac{L_b}{L_b + L_a} \right) \right\}.$$

Samenvattend vinden wij dus:

$$P^1 - Q^1 - R^1 \text{ steeds positief}$$

$$\text{en } \left\{ \begin{array}{l} P' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a} + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \\ Q' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a} \left\{ \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_m} \right) + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_{f1}} \cdot \frac{L_b}{L_b + L_a} \right) \right\} \\ R' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a \cdot \mathfrak{S}_m} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}} \right) \end{array} \right.$$

Daar P' , Q' en R' alle positief zijn, is er één bestaanbare negatieve wortel en twee toegevoegd complexe wortels, of er zijn drie negatieve bestaanbare wortels.

Labiliteit is in het laatste geval uitgesloten; het verschijnsel verloopt aperiodisch.

In het eerste geval verloopt het proces periodisch

De voorwaarden voor een *stabiel proces* kunnen wij als volgt vinden:

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= -P' \\ \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3 &= +Q' \\ \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 &= -R'. \end{aligned}$$

Nu is in het periodische geval:

$$\alpha_1 = -b$$

$$\alpha_2 = g + lj$$

$$\alpha_3 = g - lj$$

dus

$$-P' = 2g - b. \quad 1)$$

$$Q' = g^2 + l^2 - 2gb \quad 2)$$

$$R' = (g^2 + l^2)b \quad 3)$$

Vermenigvuldig 1) met 2) en voeg hierbij 3) dan volgt:

$$R' - P' Q' = 2g\{(g-b)^2 + l^2\}$$

g heeft hetzelfde teeken als $R' - P' Q'$, zoodat voor

$$R' < P' Q' \quad g \text{ negatief}$$

$$R' > P' Q' \quad g \text{ positief.}$$

Labiel wordt het verschijnsel als g positief is, dus wanneer $R' > P' Q'$.

In het tegenovergestelde geval is het proces *stabiel* en is de demping des te grooter, naarmate de absolute waarde van g grooter is.

Labiliteit treedt op, als:

$$R' > P' Q' \quad \text{of:}$$

$$\frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{1}{\mathfrak{S}_{fI}} \right) > \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_a} + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \right) \left\{ \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \left(1 + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \right) + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_f}{\mathfrak{S}_{fI}} \cdot \frac{L_b}{L_b + L_a} \right) \right\}$$

of anders geschreven:

$$\frac{1}{\mathfrak{S}_{fI}} \left(1 - \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{L_b}{L_b + L_a} \right) > \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_a} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \right) \left\{ \frac{\mathfrak{S}_m}{\mathfrak{S}_f} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_m} \right) + \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_{fI}} \cdot \frac{L_b}{L_b + L_a} \right) \right\} + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(1 + \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{S}_f} \right).$$

Bij een gegeven machine en een bepaalde belasting daarvan zijn de grootheden $\frac{1}{\mathfrak{S}_a}$ en $\frac{1}{\mathfrak{S}_m}$ gegeven; $\frac{1}{\mathfrak{S}_f}$ en $\frac{1}{\mathfrak{S}_{fI}}$ kunnen willekeurig gekozen worden.

Labiliteit zal nu blijkbaar eerder optreden, hoe kleiner $\frac{1}{\mathfrak{S}_f}$ is,

d.w.z. hoe grooter de warmtetraagheid van den gloeidraad der regelende diode is.

Volgens p. 61 is:

$$\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}} = 2 \cdot \frac{r_{b2}}{r_{b2} + r_a} \cdot \frac{E - e_1}{r_{f1}} \cdot \frac{I}{m C T_1} \left\{ \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{I}{C_2} \right)} + \right. \\ \left. + 1,2 i_{b1} (r_{b1} - r_{b2}) \right\}.$$

Op p. 60 hebben wij uiteengezet, dat de som

$$\frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{I}{C_2} \right)} + 1,2 i_{b1} (r_{b1} - r_{b2})$$

gelijk te stellen is aan $b e_1$, waarin dan b weinig verschilt van de eenheid.

Daar in deze som alle constanten door de machine (n.l. C_1 , r_m , i_{b1} , r_{b1} en r_{b2}) en door de keuze van een bepaald gloeidraad-materiaal (n.l. T_1 en C_3) gegeven zijn met uitzondering van de constante C_2 , die door de verzadiging van de diode bepaald wordt, kunnen wij in de eerste plaats opmerken dat labiliteit des te eerder zal optreden, naarmate de diode meer verzadigd, dus $\frac{I}{C_2}$ grooter is.

Daar nu voorts $\frac{E - e_1}{r_{f1}} \cong i_{f1}$ is:

$$\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}} = 2 \cdot \frac{r_{b2}}{r_{b2} + r_a} \cdot \frac{b \cdot i_{f1} e_1}{m C T_1} = 2 \cdot \frac{r_{b2}}{r_{b2} + r_a} \cdot \frac{b \cdot c \cdot W_{f1}}{m C T_1}.$$

Op p. 22 hebben wij laten zien, dat bij een bepaald gloeidraad-materiaal en een gegeven emissie, W_{f1} , C , T_1 vaststaan, terwijl de massa $m = S \cdot o \cdot \frac{d}{4}$ evenredig verandert met de draaddikte, daar o = het oppervlak van den gloeidraad al evenzeer gegeven is.

Het blijkt dus, dat

$$\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}} = K_1 \cdot \frac{c}{d}.$$

Wij moeten nu nog nagaan, hoe d verandert, wanneer c = de

verhouding tusschen klemspanning en gloeispanning gevarieerd wordt.

$$W_{f1} = e_{f1}^2 \cdot \frac{I}{r_{f1}} = \text{constant.}$$

$$e_{f1}^2 = \frac{e_1^2}{c^2}.$$

$$r_{f1} = \rho l / \frac{\pi d^2}{4} = \frac{0. \rho}{\pi^2 / 4 \cdot d^3} = \frac{0. \rho}{0,4 d^3} = \frac{K_2}{d^3}$$

$$\text{zoodat } \frac{e_1^2}{c^2} \cdot \frac{d^3}{K_2} = \text{constant,}$$

$$\text{of } d = K_3 \cdot c^{2/3}$$

$$\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}} = K_1 \cdot \frac{c}{K_3 \cdot c^{2/3}} = K_4 \cdot c^{1/3}.$$

Hieruit volgt tenslotte, dat $\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}}$ toeneemt met de 3^e machts-
wortel van $c = \frac{e_1}{e_{f1}}$.

Hoe lager de gloeispanning, hoe grooter $\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}}$.

Met de verlaging van de gloeispanning gaat tevens gepaard een vergrooting van den diameter van den gloeidraad ($d = K_3 \cdot c^{2/3}$) en dus ook van de warmtetraagheid van den gloeidraad, zoodat met een toename van $\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}}$ een vermindering van $\frac{I}{\mathfrak{S}_f}$ gepaard gaat.

De kans op labiliteit wordt dus vergroot door *verlaging van de gloeispanning*.

Practisch zal labiliteit door de genoemde oorzaken niet licht optreden.

Zooals wij hebben gezien op p. 5 is \mathfrak{S}_a in het algemeen veel kleiner dan \mathfrak{S}_m of \mathfrak{S}_f .

In dit geval is bij 1^e benadering:

$$Q' = \frac{I}{\mathfrak{S}_a} \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_f} + \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \right).$$

Zoodat de voorwaarde voor stabiliteit nu wordt:

$$\frac{I}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_f} + \frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}} \right) < \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_a} + \frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \right) \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_f} + \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \right).$$

Daar $\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}}$ van dezelfde orde van grootte is als $\frac{I}{\mathfrak{S}_f}$ of $\frac{I}{\mathfrak{S}_m}$ en $\frac{I}{\mathfrak{S}_a} \gg \frac{I}{\mathfrak{S}_f}$ of $\frac{I}{\mathfrak{S}_m}$ wordt aan deze voorwaarde als regel voldaan.

Wanneer dus inderdaad \mathfrak{S}_a belangrijk kleiner is dan \mathfrak{S}_f of \mathfrak{S}_m zal labiliteit niet kunnen optreden.

Nu zijn er gevallen mogelijk, waarbij \mathfrak{S}_a van dezelfde orde van grootte wordt als \mathfrak{S}_f of \mathfrak{S}_m en wel kan dit het geval zijn, als $L_b \gg L_a$.

Bij belasting door electro-magneten of dergelijke is er kans op labiliteit, bij belasting door omsche weerstanden, motoren of dergelijke, waarbij $L_b < L_a$ of $L_b \cong L_a$ zal de regeling steeds stabiel zijn.

Beschouwen wij nu de coëfficiënten nog eens nader voor het geval, dat

$$\mathfrak{S}_a \ll \mathfrak{S}_m \text{ of } \mathfrak{S}_f$$

$$(\text{bijv. } \mathfrak{S}_a \cong \frac{1}{100} \text{ sec., } \mathfrak{S}_m \cong \mathfrak{S}_f \cong 0,1 \text{ sec.}).$$

De 3^e machtsvergelijking $\alpha^3 + P'\alpha^2 + Q'\alpha + R' = 0$, die wij gevonden hebben, is dan bij benadering deelbaar door $\alpha + \frac{1}{\mathfrak{S}_a}$.

Immers is

$$\begin{aligned} & \left(\alpha + \frac{1}{\mathfrak{S}_a} \right) \left\{ \alpha^2 + \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \right) \alpha + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}} \right) \right\} = \\ & = \alpha^3 + \alpha^2 \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_a} + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \right) + \alpha \left\{ \frac{1}{\mathfrak{S}_a} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \right) + \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}} \right) \right\} + \frac{1}{\mathfrak{S}_a} \cdot \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}} \right). \end{aligned}$$

De coëfficiënten van deze vergelijking komen overeen met die van de gevonden vergelijking, met deze uitzondering, dat daar de coëfficiënt van α luidt:

$$Q' = \frac{1}{\mathfrak{S}_a} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \right).$$

Aangezien echter volgens veronderstelling $\frac{1}{\mathfrak{S}_a} \gg \frac{1}{\mathfrak{S}_m}$ en daar $\frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}}$ dezelfde orde van grootte heeft als $\frac{1}{\mathfrak{S}_m}$ mogen wij $\frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}} \right)$

bij 1^e benadering verwaarloozen ten opzichte van $\frac{I}{\mathfrak{S}_a} \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \right)$ zoodat de gevonden 3^e machtsvergelijking dus een wortel blijkt te hebben, die bij goede benadering = $-\frac{I}{\mathfrak{S}_a}$, terwijl de beide andere wortels gevonden worden uit een vierkantsvergelijking, waarin alleen \mathfrak{S}_m , \mathfrak{S}_f , \mathfrak{S}_{f1} en niet \mathfrak{S}_a voorkomen.

Deze laatst genoemde wortels zullen dus in het algemeen wat orde van grootte betreft overeenkomen met $\frac{I}{\mathfrak{S}_m}$, $\frac{I}{\mathfrak{S}_f}$ en $\frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}}$.

De algemeene oplossing van de differentiaalverg. 8 p. 53 luidt in dit geval:

$$\Delta i_b = A_1 e^{-\frac{t}{\mathfrak{S}_a}} + A_2 e^{\alpha_2 t} + A_3 e^{\alpha_3 t} + A_4$$

$$\alpha_3, \alpha_2 = -\frac{I}{2} \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \right) \pm \sqrt{\frac{I}{4} \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \right)^2 - \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}} \right)}$$

Wij zien, dat periodieke slingeren in het algemeen wel mogelijk zijn, daar α_2 en α_3 complex kunnen worden; *labiliteit* is echter *niet mogelijk*, daar $\frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f}$ steeds positief is.

De 1^e term van de uitdrukking voor Δi_b is zeer snel weggedempt (\mathfrak{S}_a is zeer groot); de stroomstoot $A_1 e^{-\frac{t}{\mathfrak{S}_a}}$ heeft geheel dezelfde gedaante als die optreedt, wanneer er geen regeling plaats vindt (verg. p. 4).

De 2^e en 3^e term geven de voorbijgaande veranderingen van Δi_b , die door de regeling veroorzaakt worden; op deze veranderingen heeft \mathfrak{S}_a geen invloed.

Wanneer bij regeling door dioden $\mathfrak{S}_a \ll \mathfrak{S}_m$ of \mathfrak{S}_f dan zullen ankeren belastingszelfinductie op het verloop van het regelingsproces *practisch geen invloed* hebben.

Bij de beschouwing van het regelingsproces zou men dus ook deze zelfinducties geheel kunnen verwaarloozen en aannemen, dat ten tijde $t = 0$ de belastingsstroom volkomen plotseling varieert van de oude naar de nieuwe waarde, terwijl de klemspanning een plotselinge verandering ondergaat, die gelijk is aan $\Delta i_b \cdot r_a$.

Als 2^e benadering mogen wij aannemen, dat de regeling geen invloed heeft op de grootte van den belastingsstroom.

Daar de klemspanningsdaling tusschen nullast en vollast als regel slechts enkele procenten bedraagt, welke spanningsdaling door de regeling dan tot bijv. 1% teruggebracht wordt, bedraagt de verandering, die de belastingsstroom tengevolge van de regeling ondergaat ook slechts enkele procenten.

Wij zullen nu de regeling door dioden in serie met de veldwikkeling nog eens beschouwen met gebruikmaking van de beide genoemde benaderingen.

§ 2. *Beschouwing van spanningsregeling aan een gelijkstroomdynamo door dioden in serie met de veldwikkeling, met verwaarloozing van den invloed van anker- en belastingszelfinductie op het regelingsproces en van de veranderingen in den belastingsstroom als gevolg van de regeling.*

In de vorige paragraaf hebben wij gezien, dat de bovengenoemde verwaarloozingen in eerste benadering toelaatbaar zijn, wanneer de relaxaties ingevoerd door de zelfinductie van de veldwikkeling en de warmtetraagheid van den gloeidraad belangrijk grooter zijn, dan de relaxatie, ingevoerd door de zelfinductie van het anker en van de belasting.

Ook wordt verondersteld, dat de klemspanningsdaling bij vollast slechts een klein gedeelte (enkele procenten) van de klemspanning bedraagt; voor een economische regeling is het voorts noodig, dat de gloeistroom veel kleiner is dan de belastingsstroom, zoodat de invloed van den gloeistroom op de klemspanning verwaarloosd mag worden.

De schakeling komt weer overeen met die van figuur 9. Verondersteld wordt, dat ten tijde $t = 0$ de belasting plotseling varieert van i_{b1} naar $i_{b1} + \Delta i_b$.

Voor de veldketen geldt weer dezelfde betrekking als is afgeleid op p. 52.

$$e = \frac{i_m - C_3 T_1 x - i_{s0}}{C_2} + i_m r_m + L_m i_m' \dots \quad (1)$$

$$x = \frac{T - T_1}{T_1}.$$

Het warmte-evenwicht van den gloeidraad stelt de voorwaarde:

$$\frac{e_{f2}}{r_{f1}} (1 - C_p x) = O_{\eta_1} (1 + C_y x) + m C T_1 \frac{dx}{dt} \quad \dots 2)$$

(verg, p. 52)

Voor den gloeidraad geldt de vergelijking:

$$e_f = E - e_b = E - (e_0 + C_1 i_m - r_a i_{b1} + V) = e_{f1} - V - C_1 \Delta i_m$$

$$e_{f1} = E - (e_0 + C_1 i_{m1} - r_a i_{b1}) \quad \dots \dots \dots 3)$$

V is de spanningsstoot die ten tijde $t = 0$ optreedt:

$$V = - \Delta i_b \cdot r_a.$$

Bij verwaarloozing van $(\Delta i_m)^2$ is nu:

$$e_f^2 = (E - e_b)^2 = (e_{f1} - V)^2 - 2 C_1 \Delta i_m (e_{f1} - V)$$

Uit de betrekking 1) kunnen wij x oplossen.

$$x = \frac{C_2}{C_3 T_1} \left\{ i_m \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right) + L_m i_m' - \frac{i_{s0}}{C_2} - e \right\} =$$

$$= \frac{C_2}{C_3 T_1} \left\{ \Delta i_m \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right) + L_m \cdot \Delta i_m' \right\}.$$

Voer dit in de verg. 2) in en verwaarloos de termen met $(\Delta i_m)^2$ en met $(\Delta i_m \cdot i_m')$; dan ontstaat de volgende lineaire differentiaal-vergelijking van de 2^e orde in Δi_m :

$$\Delta i_m'' + \Delta i_m' \left\{ \frac{1}{\mathfrak{F}_m} + \frac{1}{\mathfrak{F}_f} \right\} + \Delta i_m \left\{ \frac{1}{\mathfrak{F}_m} \cdot \frac{1}{\mathfrak{F}_f} + \right.$$

$$\left. + 2 \frac{C_1 C_3}{C_2 m C} \cdot \frac{1}{L_m} \cdot \frac{e_{f1} - V}{r_{f1}} \right\} + \frac{O_{\eta_1} - W_{f1-2}}{m C} \cdot \frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{1}{L_m} = 0 \quad \dots 4)$$

In deze vergelijking is:

$$\frac{1}{\mathfrak{F}_f} = \frac{4,7 O_{\eta_1} + 1,2 W_{f1-2}}{m C T_1}, \quad W_{f1-2} = \frac{(e_{f1} - V)^2}{r_{f1}},$$

$$\frac{1}{\mathfrak{F}_m} = \frac{r_m + \frac{1}{C_2}}{L_m}.$$

Op overeenkomstige wijze als op p. 57 en 58 is geschied, kunnen wij bewijzen, dat het product

$$2 \cdot \frac{e_{f1} - V}{e_{f1}} \cdot \frac{1}{m C T_1} \cdot \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)}$$

van dezelfde orde van grootte is als $\frac{1}{\mathfrak{F}_f}$.

Ook is $2 \frac{e_{f1} - V}{r_{f1}} \cdot \frac{I}{m C T_1} \cdot \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{I}{C_2} \right)} \approx \frac{I}{\mathfrak{F}_{f1}}$ wanneer

voor $\frac{I}{\mathfrak{F}_{f1}}$ dezelfde waarde wordt ingevoerd, die daaraan volgens p. 58 gegeven is.

De coëfficiënt van i_m wordt dus gelijk aan:

$$\frac{I}{\mathfrak{F}_m} \cdot \frac{I}{\mathfrak{F}_f} + \frac{I}{\mathfrak{F}_m} \cdot \frac{I}{\mathfrak{F}_{f1}}$$

en de betrekking 5) gaat over in:

$$\Delta i_m'' + \left(\frac{I}{\mathfrak{F}_m} + \frac{I}{\mathfrak{F}_f} \right) \Delta i_m' + \frac{I}{\mathfrak{F}_m} \left(\frac{I}{\mathfrak{F}_f} + \frac{I}{\mathfrak{F}_{f1}} \right) \Delta i_m + \text{bekende term} = 0 \quad \dots \quad 5)$$

De algemeene oplossing dezer differentiaalvergelijking is:

$$\Delta i_m = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} + A_3$$

waarin α_1 en α_2 de wortels zijn van de vergelijking:

$$\alpha^2 + \left(\frac{I}{\mathfrak{F}_m} + \frac{I}{\mathfrak{F}_f} \right) \alpha + \frac{I}{\mathfrak{F}_m} \left(\frac{I}{\mathfrak{F}_f} + \frac{I}{\mathfrak{F}_{f1}} \right) = 0 \quad \dots \quad 6)$$

Wij zien, dat de wortels dezer vergelijking geheel overeenkomen met de wortels α_2 en α_3 , die op p. 65 zijn afgeleid voor het geval, dat $\frac{I}{\mathfrak{F}_a} \gg \frac{I}{\mathfrak{F}_f}$ of $\frac{I}{\mathfrak{F}_m}$.

Wij zullen nu nagaan onder welke omstandigheden de regeling *periodisch* dan wel *aperiodisch* verloopt.

Schrijven wij de vergelijking 6) in den vorm:

$$\alpha^2 + P\alpha + Q = 0$$

dan verloopt het regelingsproces

aperiodisch als $P^2 - 4Q > 0$

periodisch als $P^2 - 4Q < 0$.

Labiliteit kan nooit optreden, aangezien $P = \frac{I}{\mathfrak{F}_m} + \frac{I}{\mathfrak{F}_f}$ steeds positief is.

Aperiodische regeling.

$$P^2 - 4Q > 0.$$

De voorwaarde is dus:

$$\left(\frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f}\right)^2 > 4 \cdot \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}}\right)$$

of:

$$\left(\frac{1}{\mathfrak{S}_m} - \frac{1}{\mathfrak{S}_f}\right)^2 > 4 \cdot \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}}.$$

Hieruit volgt, dat voor aperiodische regeling in elk geval $\frac{1}{\mathfrak{S}_m}$ en $\frac{1}{\mathfrak{S}_f}$ verschillend van grootte moeten zijn.

Periodisch is de regeling, wanneer $\left(\frac{1}{\mathfrak{S}_m} - \frac{1}{\mathfrak{S}_f}\right)^2 < 4 \cdot \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{1}{\mathfrak{S}_{f1}}$.

Hoe geringer het verschil tusschen $\frac{1}{\mathfrak{S}_m}$ en $\frac{1}{\mathfrak{S}_f}$ hoe meer kans is er op een periodisch verloop.

Wanneer $\frac{1}{\mathfrak{S}_m} = \frac{1}{\mathfrak{S}_f}$ is de regeling zeker periodisch.

Aperiodische regeling kan optreden zoowel bij $\frac{1}{\mathfrak{S}_f} > \frac{1}{\mathfrak{S}_m}$ als bij $\frac{1}{\mathfrak{S}_f} < \frac{1}{\mathfrak{S}_m}$.

Zoowel bij de periodische als bij de aperiodische regeling is het gunstig, dat de dempingsfactor $P = \frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f}$ groot is. Hoe grooter P , hoe sterker demping, hoe sneller is de regeling. Voor een snelle regeling is het dus gewenscht, dat

$$\frac{1}{\mathfrak{S}_m} = \frac{r_m + \frac{1}{C_2}}{L_m} \text{ en } \frac{1}{\mathfrak{S}_f} = \frac{4,7 O_{\eta 1} + 1,2 W_{f1-2}}{m C T_1}$$

beide groot zijn. Door de machine zijn r_m en L_m gegeven, $\frac{1}{C_2}$ is grooter, naarmate de diode meer verzadigd is, $\frac{1}{\mathfrak{S}_f}$ wordt grooter, naarmate de warmtetraagheid van den gloeidraad kleiner is. Een lange dunne gloeidraad is dus in dit opzicht voordeelig.

Voor een *snelle regeling* is dus in het algemeen gunstig, dat

1°. de diode sterk verzadigd is;

2°. de gloeidraad een geringe warmtetraagheid heeft.

Wil men bovendien den eisch stellen, dat de regeling aperiodisch verloopt, dan moet er voor gezorgd worden dat $\frac{I}{\mathfrak{S}_m}$ en $\frac{I}{\mathfrak{S}_f}$ van elkaar verschillen en wel zooveel, dat aan de voorwaarde van p. 69 voldaan wordt; de snelste regeling wordt bereikt door zorg te dragen, dat $\frac{I}{\mathfrak{S}_f} > \frac{I}{\mathfrak{S}_m}$.

Algemeene oplossing der differentiaalverg. 5) p. 68.

De vergelijking 5) p. 68 is te schrijven in de gedaante:

$$\Delta i_m'' + P \Delta i_m' + Q \Delta i_m + R = 0$$

waarin
$$P = \frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \cdot Q = \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_f} + \frac{I}{\mathfrak{S}_{f1}} \right).$$

$$R = \frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{O \eta_1 - W_{f1-2}}{m C} \cdot \frac{I}{L_m}.$$

In het *aperiodisch geval* is de algemeene oplossing dezer verg.:

$$\Delta i_m = e^{-\frac{P}{2}t} \left(A e^{Gt} + B e^{-Gt} \right) - \frac{R}{Q}$$

$$G = \sqrt{\frac{P^2}{4} - Q}.$$

De constanten A en B vinden wij door te bedenken, dat ten tijde $t = 0$. $\Delta i_m = 0 = A + B - \frac{R}{Q}$.

Ook is ten tijde $t = 0$ $x = \frac{T - T_1}{T_1} = 0$

zoodat de verg. 1 op p. 66 bij $t = 0$ als volgt luidt:

$$e = \frac{i_{m1} - i_{s0}}{C_2} + i_{m1} r_m + L_m i_m'.$$

Daar nu in den stationnairen toestand, voordat de regeling begint

$$e = i_{m1} \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right) - \frac{i_{s0}}{C_2}$$

volgt hieruit, dat

$$L_m i_m' = 0 \quad \text{dus ook } \Delta i_m' = 0.$$

$$(\Delta i_m') = 0 = -\frac{P}{2} (A + B) + AG - BG.$$

Wij vinden, dat

$$A = \frac{R}{2Q} \left(1 + \frac{P}{2G} \right) \quad B = \frac{R}{2Q} \left(1 - \frac{P}{2G} \right)$$

zoodat

$$\Delta i_m = e^{-\frac{P}{2}t} \left\{ \left(1 + \frac{P}{2G} \right) e^{Gt} + \left(1 - \frac{P}{2G} \right) e^{-Gt} \right\} \left\{ \frac{R}{2Q} - \frac{R}{Q} \right\}$$

Het verloop van de klemspanning volgt nu uit de vergelijking:

$$e_b = e_0 + C_1 i_m - r_a i_{b1} + V.$$

In het *periodische* geval vinden wij op overeenkomstige wijze, dat

$$\Delta i_m = -\frac{R}{Q} \left\{ 1 - e^{-\frac{P}{2}t} \left(\cos \sqrt{Q - \frac{P^2}{4}} t + \frac{P}{2G} \sin \sqrt{Q - \frac{P^2}{4}} t \right) \right\}$$

$$\text{waarin } G = \sqrt{Q - \frac{P^2}{4}}.$$

Zowel in het aperiodische als in het periodische geval wordt de eindwaarde voor Δi_m gevonden door $t = \infty$ te stellen.

$$t = \infty \quad \Delta i_m = -\frac{R}{Q}.$$

Voor de eindwaarde van de klemspanning vinden wij:

$$e_b = e_0 + C_1 i_{m1} - C_1 \frac{R}{Q} - r_a i_{b1} + V$$

zoodat

$$\Delta e_b = V - C_1 \frac{R}{Q}.$$

Zonder regeling is

$$\Delta e_{bz} = V.$$

De regelingsgraad N bedraagt dus hier:

$$N = \frac{\Delta e_{bz}}{\Delta e_b} = \frac{V}{V - C_1 \frac{R}{Q}}$$

Wij zullen nu deze uitdrukking nog nader beschouwen om den invloed van verschillende factoren op den regelingsgraad te kunnen vaststellen.

De spanningsverandering V wordt door de regeling vermindert met het bedrag

$$\Delta V = C_1 \frac{R}{Q} = C_1 \frac{C_3 \cdot \frac{1}{L_m} \cdot \frac{O\eta_1 - W_{f_{1-2}}}{m C}}{\frac{1}{S_m} \left(\frac{1}{S_f} + \frac{1}{S_{f1}} \right)}$$

In den stationnairen toestand wordt door het warmte-evenwicht van den gloeidraad de voorwaarde gesteld:

$$\text{toegevoerde energie} = \text{uitgestraalde energie.}$$

$$\text{dus} \quad W_{f1} = O\eta_1$$

$$W_{f_{1-2}} = \frac{(e_{f1} - V)^2}{r_{f1}} = W_{f1} - 2V \cdot i_{f1} \quad (V \text{ is klein})$$

$$\frac{1}{S_m} = \frac{r_m + \frac{1}{C_2}}{L_m}$$

$$\frac{1}{S_f} = \frac{4,7 O\eta_1 + 1,2 W_{f_{1-2}}}{m C T_1} = \frac{5,9 W_{f1} - 2,4 V \cdot i_{f1}}{m C T_1}$$

$$\frac{1}{S_{f1}} = 2 \cdot \frac{e_{f1} - V}{r_{f1}} \cdot \frac{1}{m C T_1} \cdot \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)}$$

zoodat

$$\Delta V = C_1 \frac{R}{Q} = 2V i_{f1} \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)} \cdot \frac{1}{5,9 W_{f1} - 2,4 V i_{f1} + 2 \cdot \frac{e_{f1} - V}{r_{f1}} \cdot \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)}}$$

Daar wij zijn uitgegaan van de veronderstelling, dat $V \ll e_{f1}$, is bij eerste benadering:

$$\Delta V = 2 V \cdot i_{f1} \frac{T_1 C_1 C_3}{\left(r_m + \frac{1}{C_2}\right) C_2} \cdot \frac{1}{5,9 W_{f1} + 2 i_{f1} \cdot \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2}\right)}}$$

Aan de hand van deze formule kan nu worden nagegaan door welke middelen de regelingsgraad kan worden vergroot.

Door de machine zijn gegeven de grootheden r_m en C_1 . Wanneer voor den gloeidraad een bepaald materiaal genomen wordt is C_3 (de constante, die de afhankelijkheid tusschen plaatstroom en gloeidraadtemperatuur bepaalt) gegeven en wanneer een bepaalde levensduur geëischt wordt, is ook de temperatuur van den gloeidraad T_1 bepaald.

Bij een bepaald gloeidraadmateriaal en een bepaalden levensduur is voorts gegeven de verhouding tusschen de grootte van den plaatstroom en de verwarmingsenergie van den gloeidraad en daar de plaatstroom = veldstroom gegeven is, is dus ook de verwarmingsenergie van den gloeidraad W_{f1} gegeven.

Wat de factor $\frac{1}{C_2}$ betreft: hoe vlakker de karakteristiek $i_a = f(e_a)$ in het regelingsgebied verloopt, hoe grooter wordt $\frac{1}{C_2}$.

$$\text{Als } \frac{1}{C_2} \gg r_m, \text{ is } C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2}\right) = 1.$$

$$\text{Als } \frac{1}{C_2} \cong r_m, \text{ is } C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2}\right) \cong 2.$$

Voor de nauwkeurigheid van de regeling blijkt het dus gunstig te zijn, dat de diode zooveel mogelijk verzadigd is.

In de formule ΔV blijkt ten slotte alleen de gloeistroom i_{f1} nog vrij gekozen te kunnen worden. Hoe grooter i_{f1} , dus hoe lager gloeispanning ($W_{f1} = i_{f1} \cdot e_{f1}$ is gegeven!) hoe grooter is ΔV , dus hoe nauwkeuriger de regeling.

De gunstige invloed van een lage gloeispanning blijkt ook, door na te gaan, wat er geschiedt als

$$5,9 W_{f1} \ll 2 i_{f1} \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2}\right)}.$$

Verwaarloost men in dit geval $5,9 W_{f_1}$ ten opzichte van

$$2 i_{f_1} \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)}$$

dan blijkt, dat

$$\Delta V = V \text{ of } N = \frac{V}{V - \Delta V} = \infty.$$

De regeling zou dus oneindig goed zijn, de klemspanningsdaling wordt geheel weggewerkt.

Vroeger (zie p. 58) hebben wij gevonden, dat het quotient

$$\frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)}$$

van dezelfde grootte-orde is als de klemspanning, zoodat de voorwaarde

$$5,9 W_{f_1} \ll 2 i_{f_1} \cdot \frac{T_1 C_1 C_3}{C_2 \left(r_m + \frac{1}{C_2} \right)}$$

alleen vervuld wordt, als $e_{f_1} \ll e_{h_1}$.

Conclusies uit de beschouwingen der §§ 1 en 2.

Bij regeling door dioden in serie met de veldwikkeling kan *labiliteit* alleen optreden, indien de relaxatie in de ankerketen van dezelfde orde van grootte is als de relaxatie in de veldketen en de relaxatie, die wordt ingevoerd door de warmtetraagheid van den gloeidraad.

De kans op labiliteit wordt vergroot door vermeerdering van de warmtetraagheid van den gloeidraad en door toename van het quotient klemspanning : gloeispanning.

Wanneer de relaxatie in de ankerketen veel kleiner is dan de beide andere genoemde relaxaties, hetgeen practisch veel voorkomt (zie p. 6) dan kan bij de beschouwing van het regelingsproces de invloed van de zelfinducties in de ankerketen met zeer goede benadering verwaarloosd worden.

Het regelingsproces kan in dit geval periodisch of aperiodisch verlopen.

Voorwaarde voor aperiodische regeling is:

$$\left(\frac{1}{S_m} - \frac{1}{S_f}\right)^2 > 4 \frac{1}{S_m} \cdot \frac{1}{S_{fl}} \quad (\text{zie p. 69}).$$

Voor een *snelle* regeling is gunstig:

- a. geringe zelfinductie van de veldwikkeling,
- b. geringe warmtetraagheid van den gloeidraad,
- c. de plaatspanning van de diode grooter dan de verzadigingspanning.

Voor een *nauwkeurige* regeling is gunstig:

- a. een lage gloeispanning,
- b. de plaatspanning van de diode grooter dan de verzadigingspanning.

Bij een lage gloeispanning is de warmtetraagheid van den gloeidraad groot, hetgeen ongunstig is voor de snelheid van de regeling.

Een lage gloeispanning bij geringe warmtetraagheid kan echter ook verkregen worden door een *aantal gloeidraden parallel te schakelen* (meerdere parallelle draden in één ballon of meerdere dioden parallel) welke laatste maatregel dus gunstig blijkt te zijn zoowel voor de snelheid als voor de nauwkeurigheid der regeling.

§ 3. *Spanningsregeling aan een gelijkstroomdynamo door dioden, parallel aan de veldschakeling.*

Het in fig. 11 geteekende principe-schema geeft een installatie weer, die voor het constant houden van de spanning van een gelijkstroomdynamo dienen kan.

De batterijspanning E is lager dan de klemspanning, zoodat bij dalende klemspanning de gloeistroom afneemt. Hierdoor daalt ook de plaatstroom i_a van de diode en daar aan veldwikkeling en diode een weerstand r_v is voorgeschakeld, stijgt dientengevolge de veldstroom: de spanningsdaling wordt verminderd, er wordt geregeld op constante spanning.

Wij voeren dezelfde veronderstelling in, als bij de spanningsregeling door dioden in serie met de veldwikkeling (zie p. 66) terwijl wij ook aannemen, dat

$$\frac{1}{S_a} \gg \frac{1}{S_m} \text{ en } \frac{1}{S_f}$$

zoodat de verwaarloozingen, welke in § 2 zijn toegepast, ook hier in aanmerking mogen komen.

De volgende lineaire betrekkingen zijn nu geldig:

De klemspanning

$$e_b = e_0 + C_1 i_m - r_a i_{b1} + V \dots \dots \dots 1)$$

V is de spanningsstoot, die ten tijde $t = 0$ optreedt:

$$V = - \Delta i_b \cdot r_a.$$

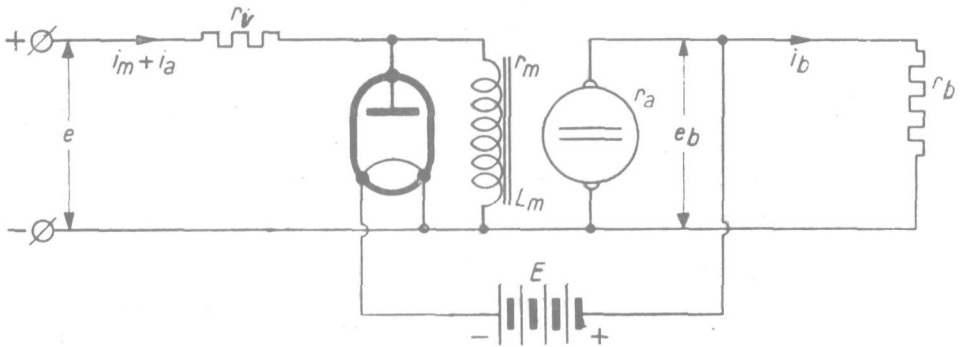


Fig. 11.

Voor de veldketen geldt de vergelijking:

$$e = (i_m + i_a) r_v + r_m i_m + L_m i_m' \dots \dots \dots 2)$$

Voor de diode gelden de betrekkingen:

$$e_a = r_m i_m + L_m i_m'.$$

$$i_a = i_s + C_2 (e_a - e_s) = i_{s1} + C_3 (T - T_1) + C_2 e_a - C_2 e_s.$$

Nemen wij aan, dat e_s constant is bij de geringe temperatuursvariaties van den gloeidraad, die bij de regeling optreden, dan is $i_{s1} - C_2 e_s = i_{s0}$ constant (vergelijk p. 52).

Stel voorts
$$\frac{T - T_1}{T_1} = x,$$

dan volgt:
$$i_a = i_{s0} + C_3 T_1 x + C_2 (r_m i_m + L_m i_m') \dots \dots \dots 3)$$

Het warmte-evenwicht van den gloeidraad stelt de voorwaarde:

$$\frac{e_f^2}{r_f} = O\eta + mC \frac{dT}{dt} \quad r_f = r_{f1} \left(1 + C_p \frac{T - T_1}{T_1} \right)$$

$$\eta = \eta_1 \left(1 + C_n \frac{T - T_1}{T_1} \right) \dots \dots \dots 4)$$

zoodat bij benadering:

$$e_f^2 \frac{1}{r_{f1}} (1 + C_p x) = O\eta_1 (1 + C_x) + m C T_1 \frac{dx}{dt} \dots 4'$$

Tenslotte geldt voor de gloeispanning de betrekking:

$$e_f = e_b - E \dots 5)$$

Uit de vergelijkingen 2) en 3) volgt nu, dat

$$x = \frac{1}{r_v C_3 T_1} \left\{ e - i_m (r_m + r_v + C_2 r_v r_m) - L_m i_m' (1 + C_2 r_v) - i_{s0} r_v \right\}$$

Vóór het optreden van den spanningsstoot is $i_m' = 0$, $i_m = i_{m1}$, etc., zoodat uit de vergelijkingen 2) en 3) volgt:

$$e = i_{m1} (r_v + r_m + C_2 r_v r_m) + i_{s0} r_v.$$

$$x = \frac{1}{r_v C_3 T_1} \left\{ -\Delta i_m (r_m + r_v + C_2 r_v r_m) - L_m (1 + C_2 r_v) \Delta i_m' \right\}$$

en

$$x' = \frac{1}{r_v C_3 T_1} \left\{ -\Delta i_m' (r_m + r_v + C_2 r_v r_m) - L_m (1 + C_2 r_v) \Delta i_m'' \right\}$$

Daar volgens veronderstelling V klein is, mag in vergelijking 4' voor e_f^2 geschreven worden:

$$e_f^2 = (e_{b1} - E + V)^2 + 2 C_1 \Delta i_m (e_{b1} - E + V).$$

Voeren wij nu in de vergelijking 4) de voor x en x' gevonden waarden in, schrijven voor $i_m = i_{m1} + \Delta i_m$ en verwaarloozen $(\Delta i_m)^2$ en $\Delta i_m (\Delta i_m)'$, dan ontstaat een lineaire differentiaal vergelijking van de gedaante:

$$\Delta i_m'' + P \Delta i_m' + Q \Delta i_m + R = 0$$

waarin

$$P = \frac{r_v + r_m (1 + C_2 r_v)}{L_m (1 + C_2 r_v)} + \frac{4,7 O\eta_1 + 1,2 W_{f1-2}}{m C T_1}$$

$$Q = \frac{r_v + r_m (1 + C_2 r_v)}{L_m (1 + C_2 r_v)} \cdot \frac{4,7 O\eta_1 + 1,2 W_{f1-2}}{m C T_1} + \frac{2 C_1 i_{f0}}{L_m (1 + C_2 r_v)} \cdot \frac{r_v C_3}{m C}$$

$$R = \frac{r_v C_3}{m C} \cdot \frac{W_{f1-2} - O\eta_1}{L_m (1 + C_2 r_v)}$$

In deze uitdrukkingen is

$$W_{f1-2} = \frac{(e_{b1} - E + V)^2}{r_{f1}} \text{ en } e_{b1} = e_0 + C_1 i_{m1} - r_a i_{b1}.$$

$W_{f_{1-2}}$ is dus de energie, die ten tijde $t = 0$ (direct na het optreden van den spanningsstoot) aan den gloeidraad wordt toegevoerd.

$$i_{f_{1-2}} = \frac{e_{\delta 1} - E + V}{r_{f_1}}$$

$i_{f_{1-2}}$ is de stroom, die ten tijde $t = 0$ door den gloeidraad vloeit.

In overeenstemming met de vorige paragrafen (vergelijk p. 56) noemen wij

$$\frac{r_v + r_m (1 + C_2 r_v)}{L_m (1 + C_2 r_v)} = \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \quad \text{en} \quad \frac{4,7 O \eta_1 + 1,2 W_{f_{1-2}}}{m C T_1} = \frac{1}{\mathfrak{S}_f}.$$

\mathfrak{S}_m en \mathfrak{S}_f zijn de relaxatie tijden, die optreden in de veldketen en in de gloeidraadketen tengevolge van de zelfinductie der veldwikkeling en de warmtetraagheid van den gloeidraad.

Verder kunnen wij opmerken, dat vóór het begin van het regelingsproces de aan den gloeidraad toegevoerde energie = de uitgestraalde energie, zoodat:

$$W_{f_1} = \frac{(e_{\delta 1} - E)^2}{r_{f_1}} = O \eta_1.$$

Hieruit volgt, dat

$$W_{f_{1-2}} = O \eta_1 = \frac{2 V (e_{f_1} - E)}{r_{f_1}} = 2 V i_{f_1}.$$

De constanten P , Q en R kunnen dus ook in de volgende gedaante worden neergeschreven:

$$P = \frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f}$$

$$Q = \frac{1}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{1}{\mathfrak{S}_f} + \frac{2 C_1 i_{f_0}}{L_m (1 + C_2 r_v)} \cdot \frac{r_v C_3}{m C}$$

$$R = \frac{r_v C_3}{m C} \cdot \frac{2 V i_{f_1}}{L_m (1 + C_2 r_v)}.$$

De algemeene oplossing van de gevonden differentiaal-vergelijking heeft geheel dezelfde gedaante, als op p. 71 is afgeleid in verband met de spanningsregeling door een diode in serie met de veldwikkeling (ook hier blijkt ten tijde $t = 0 \Delta i_m' = 0$ te zijn).

De oplossing heeft een aperiodisch of periodisch karakter, naarmate $P^2 - 4Q >$ of < 0 is.

In het aperiodisch geval is

$$\Delta i_m = e^{-\frac{P}{2}t} \left\{ \left(1 + \frac{P}{2G} \right) e^{Gt} + \left(1 - \frac{P}{2G} \right) e^{-Gt} \right\} \left\{ \frac{R}{2Q} - \frac{R}{Q} \right\}$$

In het periodisch geval is

$$\Delta i_m' = -\frac{R}{Q} \left\{ 1 - e^{-\frac{P}{2}t} \left(\cos Gt + \frac{P}{2G} \sin Gt \right) \right\}$$

$$G = \sqrt{Q - \frac{P^2}{4}}$$

Labiliteit kan nimmer optreden, aangezien P en Q beide positief zijn. Zooals reeds werd opgemerkt, verloopt de regeling aperiodisch, wanneer

$$P^2 - 4Q > 0$$

of

$$\left(\frac{1}{\mathfrak{S}_m} - \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \right)^2 > \frac{2 C_1 i_{f0}}{L_m (1 + C_2 r_v)} \cdot \frac{r_v C_3}{m C} \dots \dots 1)$$

Wil men een aperiodische regeling hebben, dan moeten dus in elk geval de relaxatietijden van veldketen en gloeidraadketen van elkaar verschillen; zoowel bij $\frac{1}{\mathfrak{S}_f} > \frac{1}{\mathfrak{S}_m}$ als bij $\frac{1}{\mathfrak{S}_f} < \frac{1}{\mathfrak{S}_m}$ is aperiodische regeling mogelijk mits aan de betrekking 1) voldaan zij. Het snelst zal de regeling echter verlopen, indien $\frac{1}{\mathfrak{S}_f} > \frac{1}{\mathfrak{S}_m}$, dus bij geringe warmtetraagheid van den gloeidraad.

De *dempingsfactor* $\frac{P}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mathfrak{S}_m} + \frac{1}{\mathfrak{S}_f} \right)$ bestaat uit de som van de reciproken der relaxatietijden van veldketen en gloeidraadketen; voor snelle regeling kieze men dus beide relaxatietijden zoo klein mogelijk.

De relaxatietijd van den gloeidraad wordt klein door òf een lange dunne gloeidraad te gebruiken (vergelijk p. 23) of meerdere parallelgeschakelde gloeidraden.

De relaxatietijd van de veldketen is behalve van r_m en L_m , die

door de machine gegeven zijn ook afhankelijk van r_v en C_2 , die afhankelijk zijn van de regelingsinstallatie.

$$\mathfrak{S}_m = \frac{L_m}{r_m + r_v \cdot \frac{1}{1 + C_2 r_v}}$$

C_2 is des te kleiner, naarmate de karakteristiek van de diode in het regelingsgebied vlakker verloopt; bij goed verzadigde diode is C_2 als regel belangrijk kleiner dan $\frac{1}{r_v}$ dus $C_2 r_v \ll 1$, zoodat de invloed van C_2 op de grootte van \mathfrak{S}_m over het algemeen gering is. (Dit in tegenstelling met de regeling door een diode in serie met het veld, vergelijk p. 69).

Verder volgt hieruit, dat hoe grooter r_v is hoe kleiner is \mathfrak{S}_m dus des te sneller de regeling.

r_v is grooter naarmate de spanning e hooger is en naarmate de plaatstroom i_a kleiner is.

De *nauwkeurigheid van de regeling* wordt bepaald door de eindwaarde van Δi_m .

Ten tijde $t = \sim$ is

$$\Delta i_m = -\frac{R}{Q} = \frac{-2 V i_{f1}}{\left\{ r_v + r_m (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{4,7 O \eta_1 + 1,2 W_{f1-2}}{r_v C_3 T_1} + 2 C_1 i_{f1-2}}$$

Nu is $4,7 O \eta_1 + 1,2 W_{f1-2} = 5,9 W_{f1} + 2,4 V i_{f1}$ (zie p. 72)

en
$$i_{f1-2} = i_{f1} + \frac{V}{r_{f1}}$$

terwijl $C_3 T_1 = 23,4 i_{s1}$, wanneer de gloeidraad uit wolfram bestaat (vergelijk hiervoor p. 58) zoodat:

$$\Delta i_m = \frac{-2 V}{\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{5,9 e_{f1} + 2,4 V}{23,4 \cdot i_{s1}} + 2 C_1 \left(1 + \frac{V}{e_{f1}} \right)}$$

Wij zijn van de veronderstelling uitgegaan, dat $V \ll e_{f1}$ zoodat bij eerste benadering:

$$\Delta i_m = \frac{-2 V}{\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{5,9 e_{f1}}{i_{s1} \cdot 23,4} + 2 C_1}$$

De klemspanningsverandering, die tengevolge van de regeling optreedt bedraagt:

$$\Delta e = C_1 \Delta i_m$$

zoodat de *regelingsgraad* in dit geval is:

$$N = \frac{V}{V + \Delta e} \approx \frac{\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{5.9 e_{f1}}{23.4 \cdot i_{s1}} + 2 C_1}{\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{5.9 e_{f1}}{23.4 \cdot i_{s1}}}$$

Hoe grooter N hoe nauwkeuriger is de regeling; het is dus gunstig, dat C_1 groot en de vorm in den noemer klein is.

De grootheden r_m en C_1 zijn door de machine gegeven; voor de regeling is het gunstig, dat het ijzer van de magneten weinig verzadigd is (C_1 groot).

De grootheden r_v , C_2 , e_{f1} en i_{s1} kunnen bij het samenstellen der regelingsinstallatie nog vrij gekozen worden; tusschen r_v en i_{s1} bestaan de betrekkingen:

$$e = r_v (i_{a1} + i_{m1}) + r_m \cdot i_{m1}$$

en
$$i_{a1} = i_{s1} + C_2 (r_m i_{m1} - e_{s1}) \quad (\text{vergelijk p. 51})$$

Wij zullen nu nagaan welken invloed de verschillende grootheden op den regelingsgraad uitoefenen.

1°. Wij veronderstellen, dat e , e_{f1} en i_{s1} gegeven zijn (daarmede is ook r_v bepaald) en alleen C_2 veranderlijk is.

Bij toenemende C_2 zal de regelingsgraad iets toenemen; voor de nauwkeurigheid der regeling zal het dus gunstig zijn, wanneer de diode goed verzadigd is. Echter is de invloed van C_2 niet groot, daar in het algemeen $C_2 \gg \frac{1}{r_v}$, zoodat $1 + C_2 r_v$ het karakter heeft van een correctie-term.

2°. C_2 , e_{f1} en i_{s1} zijn gegeven, e is variabel.

Bij toenemende e wordt ook r_v grooter; dit is gunstig voor de nauwkeurigheid der regeling.

3°. e , e_{f1} en C_2 zijn gegeven, i_{s1} is variabel.

Dit geval zal zich practisch veel voordoen. De spanning e is als regel gegeven, terwijl e_{f1} bepaald is, wanneer een bepaald type diode ter beschikking staat, ook C_2 is daardoor bij benadering

vastgesteld; i_{s1} kan men dan nog naar willekeur kiezen door een willekeurig aantal dioden parallel te schakelen.

De regelingsgraad is nu afhankelijk van de grootte van het quotient:

$$\frac{1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v)}{i_{s1}}$$

hetgeen bij benadering gelijk te stellen is aan:

$$A = \frac{r_v + r_m}{r_v i_{a1}} = \frac{r_v + r_m}{e - i_{m1} (r_v + r_m)}$$

$$A = \frac{\frac{e}{i_{a1}} + r_m}{e - i_{m1} r_m}.$$

Het blijkt dus, dat bij toenemende i_{a1} , het quotient A kleiner wordt; zoodra $r_m \gg \frac{e}{i_{a1}}$ heeft echter het toenemen van i_{a1} weinig invloed meer op den regelingsgraad.

Globaal kan dus geconcludeerd worden, dat het toenemen van i_{a1} een gunstigen invloed heeft op de nauwkeurigheid der regeling, zoolang $\frac{e}{i_{a1}}$ van dezelfde orde van grootte is als r_m .

4^c. e , C_2 , en i_{s1} zijn gegeven, e_{f1} is variabel.

Het afnemen van de gloeispanning heeft een gunstigen invloed op de nauwkeurigheid der regeling.

Wanneer $\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{5,9 e_{f1}}{i_{s1} \cdot 23,4}$ klein is ten opzichte van $2 C_1$ blijkt de regelingsgraad omgekeerd evenredig te zijn met e_{f1} . De grootte van de gloeispanning heeft meer invloed op de nauwkeurigheid, dan de andere factoren (plaatstroom etc.).

Onze beschouwingen voeren ons tot de volgende *slotconclusies*:

Bij spanningsregeling door dioden parallel aan de veldwikkeling kan labiliteit niet optreden, wanneer $\frac{I}{\mathfrak{S}_a} \gg \frac{I}{\mathfrak{S}_m}$ of $\frac{I}{\mathfrak{S}_f}$.

De regeling verloopt aperiodisch of periodisch naarmate

$$\left(\frac{I}{\mathfrak{S}_m} - \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \right)^2 > \text{ of } < \frac{2 C_1 i_{f0}}{L_m (1 + C_2 r_v)} \cdot \frac{r_v C_3}{m C}.$$

Voor een aperiodische regeling moeten dus $\frac{I}{\mathfrak{S}_m}$ of $\frac{I}{\mathfrak{S}_f}$ in elk geval van elkander verschillend zijn.

$$\text{De dempingsfactor } \frac{P}{2} = \frac{I}{2} \left(\frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \right).$$

De grootte van den factor C_2 is noch op de snelheid van regeling noch op de nauwkeurigheid der regeling van veel invloed.

Hooge spanning (e) voor de veldketen is zoowel voor de snelheid als voor de nauwkeurigheid der regeling gunstig.

Van veel invloed op de nauwkeurigheid der regeling is voorts de *grootte van de gloeispanning*; hoe lager de gloeispanning hoe nauwkeuriger de regeling.

Bereikt men het lager worden van de gloeispanning door een aantal gloeidraden met lagere spanning parallel te schakelen, dan is dit tevens gunstig voor de snelheid van regeling.

Maakt men daarentegen de gloeidraad dikker (het oppervlak moet hetzelfde blijven als i_a gegeven is, (vergelijk p. 22) dan wordt de regeling trager en kunnen er ongewenschte slingeringen optreden.

De *grootte van den plaatstroom* heeft een minder sterken invloed op de regelingsnauwkeurigheid; boven een zekere grens wordt deze invloed miniem. Bij toenemende plaatstroom neemt de nauwkeurigheid toe, terwijl de dempingsfactor er geen invloed van ondervindt, indien de grootere plaatstroom wordt verkregen door het parallel schakelen van een grooter aantal ontladingsbuizen.

§ 4. *Getallen-voorbeeld van spanningsregeling door dioden, parallel aan de veldwikkeling.*

De regelingsinstallatie komt in principe geheel overeen met de schakeling volgens fig. 11.

De vergelijking van het regelingsproces is dus:

$$\Delta i_m'' + P \Delta i_m' + Q \Delta i_m + R = 0$$

waarin

$$P = \frac{I}{\mathfrak{S}_m} + \frac{I}{\mathfrak{S}_f} \quad Q = \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{I}{\mathfrak{S}_f} + 2 C_1 \cdot i_{f0} \cdot \frac{r_v C_3}{m C} \cdot \frac{I}{L_m (1 + C_2 r_v)}$$

$$R = \frac{r_v C_3}{m C} \cdot 2 V i_{f1} \cdot \frac{I}{L_m (1 + C_2 r_v)}.$$

De gegevens van de gelijkstroomdynamo luiden als volgt:

$$\begin{aligned} r_m &= 1675 \Omega & L_m &= 55,5 \text{ Henry} & C_1 &= 400 \Omega \\ r_a &= 7,2 \Omega & L_a &= 0,155 \text{ Henry.} \end{aligned}$$

De dynamo, die met constante snelheid wordt aangedreven, is eerst alleen belast met den gloeistroom der dioden; daarna wordt de belasting plotseling vermeerderd met een zoodanig bedrag, dat de spanningsdaling zonder regeling 5 Volt zou bedragen.

$$V = -5 \text{ Volt.}$$

De machine is zoodanig bekrachtigd, dat bij de belasting door den gloeistroom de klemspanning $e_{b1} = 410$ Volt. Daarbij is de bekrachtigingsstroom $i_{m1} = 0,2$ Ampère.

De regeling geschiedt door twee parallel geschakelde dioden, waarvan de gloeidraden in serie geschakeld zijn. De totale plaatstroom $i_{a1} = 0,2$ A., terwijl de gloeistroom $i_{f1} = 4,4$ A. en de spanning per gloeidraad $e_{f1} = 20,4$ V.

Voor de bekrachtigingsketen staat een spanning van 500 Volt ter beschikking

$$e = 500 \text{ Volt.}$$

Uit deze gegevens berekent men, dat

$$r_v = \frac{e - i_{m1} r_m}{i_{a1} + i_{m1}} = 413 \Omega.$$

De factor C_2 , die afhangt van de verzadiging der dioden, is in dit geval:

$$C_2 = 20^{-4} \text{ A/V,}$$

zoodat de correctie-factor $1 + C_2 r_v = 1,04$ bedraagt.

De gloeidraden der dioden bestaan uit Wolframdraad; de dimensies zijn als volgt:

$$l = 18 \text{ c.m.} \quad d = 0,02 \text{ c.m.}$$

De temperatuur is ongeveer 2500° K .

Bij deze temperatuur is de warmte-capaciteit

$$C = 0,214 \text{ Joule per gram en per graad.}$$

De soortelijke warmtestraling

$$\eta_1 = 69,4 \text{ Watt/cm}^2.$$

Bij het berekenen van den term $\frac{1}{\mathfrak{F}_f}$ mogen wij de gegevens voor

één gloeidraad gebruiken, daar de warmtetraagheid van twee in serie geschakelde gloeidraden, gelijk is aan die van een enkelen gloeidraad.

$$\frac{I}{\mathfrak{S}_f} = \frac{5,9 W_{f1} + 2,4 V i_{f1}}{m C T_1}$$

Volgens de gegevens is de massa $m = 0,109$ gram, zoodat

$$m C = 234 \cdot 10^{-4} \text{ Joule/graad.}$$

$$W_{f1} = 89,5 \text{ Watt}$$

$$V \text{ voor één gloeidraad} = -2,5 \text{ Volt}$$

$$\frac{I}{\mathfrak{S}_f} = \frac{5,9 \cdot 89,5 - 2,4 \cdot 2,5 \cdot 4,4}{234 \cdot 10^{-4} \cdot 2500} = 8,6.$$

Verder is

$$\frac{I}{\mathfrak{S}_m} = \frac{r_v + r_m (1 + C_2 r_v)}{L_m (1 + C_2 r_v)} = \frac{413 + 1675 \cdot 1,04}{55,5 \cdot 1,04} = 37,2$$

$$P = \frac{I}{\mathfrak{S}_f} + \frac{I}{\mathfrak{S}_m} = 45,8$$

$$Q = \frac{I}{\mathfrak{S}_m} \cdot \frac{I}{\mathfrak{S}_f} + 2 C_1 \cdot i_{f0} \cdot \frac{r_v C_3}{m C} \cdot \frac{I}{L_m (1 + C_2 r_v)}$$

In deze betrekking is

$$i_{f0} = \frac{e_{f1} - V}{i_{f1}} = \frac{20,4 - 2,5}{4,64} = 3,86 \text{ A.}$$

$$C_3 = 23,4 \cdot \frac{i_{v0}}{T_1} = 23,4 \cdot \frac{i_{a1} - C_2 r_m i_{m1}}{T_1} = 23,4 \cdot \frac{0,2 - 0,033}{2500} = 1,56 \text{ mA/graad}$$

$$\text{zoodat } \frac{r_v C_3}{m C} = \frac{413 \cdot 1,56 \cdot 10^{-3}}{234 \cdot 10^{-4}} = 27,6$$

$$Q = 37,2 \cdot 8,6 + 2 \cdot 400 \cdot 3,86 \cdot 27,6 \cdot \frac{I}{55,5 \cdot 1,04} = 320 + 1470 = 1790.$$

Ten slotte is

$$R = -27,6 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 4,4 \cdot \frac{I}{55,5 \cdot 1,04} = -21,0.$$

Het verloop der regeling wordt dus bepaald door de vergelijking:

$$\Delta i_m'' + 45,8 \Delta i_m' + 1790 \Delta i_m - 21,0 = 0.$$

Hieruit volgt in de eerste plaats, dat voor $t = \sim$

$$\Delta i_m = \frac{21,0}{1790} = 12,7 \text{ mA}$$

en

$$\Delta e = 400 \cdot 11,7 \cdot 10^{-3} = 4,7 \text{ Volt.}$$

Tengevolge van de regeling wordt de spanningsdaling dus verminderd op $5 - 4,7 = 0,3 \text{ Volt}$ en de regelingsgraad bedraagt in dit geval:

$$N = \frac{5}{0,3} = 16,7.$$

De regeling heeft blijkbaar een periodiek verloop aangezien

$$P^2 - 4 Q < 0$$

immers

$$45,8^2 - 4 \cdot 1790 = -5060$$

$$\frac{P}{2} = 11,9 \quad G = \frac{1}{2} \sqrt{5060} = 35,5 \quad \frac{P}{2G} = \frac{45,8}{2 \cdot 35,5} = 0,64.$$

De oplossing der differentiaalvergelijking is de volgende:

$$\Delta i_m = 11,7 \left\{ 2 - e^{-22,9 t} (\cos 35,5 t + 0,64 \sin 35,5 t) \right\}.$$

De klemspanning heeft dus het volgende verloop:

$$e_b = 410 - 5 + C_1 \Delta i_m = 405 + 4,7 \left\{ 1 - e^{-22,9 t} (\cos 35,5 t + 0,64 \sin 35,5 t) \right\}.$$

De klemspanning voert dus een sterk gedempte harmonische trilling uit, waarvan de frequentie $\frac{35,5}{2\pi} = 5,65$ bedraagt, terwijl de

amplitude der trilling reeds na $\frac{1}{22,9}$ seconde op $\frac{1}{e}$ verminderd is.

Daar de dempingsfactor belangrijk grooter is dan de frequentie, wijkt het verloop niet veel af van een aperiodische kromme met denzelfden dempingsfactor.

Na één periode is de nieuwe eindwaarde practisch bereikt; de waarde van de klemspanning is dan n.l.:

$$e_b = 405 + 4,7 \left(1 - e^{-22,9 \frac{1}{5,65}} \right) = 405 + 4,7 \left(1 - \frac{1}{56,9} \right).$$

Na een halve periode is

$$e_b = 405 + 4,7 \left(1 + e^{-\frac{22,9}{2 \cdot 5,65}} \right) = 405 + 4,7 \left(1 + \frac{1}{7,5} \right).$$

Er blijkt dus een geringe overregeling plaats te vinden; de veldstroom variatie heeft natuurlijk een overeenkomstig verloop.

Aan dezelfde machine zijn onder overeenkomstige omstandigheden een tweetal oscillogrammen opgenomen, teneinde het gevonden resultaat aan de werkelijkheid te toetsen.

Alle gegevens zijn daarbij gekozen als in het getallen voorbeeld; slechts de belastingsstoot is grooter genomen (n.l. 2 Ampère, zoodat $V = 14,4$ Volt) om een behoorlijk grooten uitslag van de oscillograafsnaar te verkrijgen.

In fig. 12 en 13 zijn twee oscillogrammen weergegeven respectievelijk van den veldstroom en de emissie, terwijl naast deze oscillogrammen de spanning van een 50-perioden generator is opgenomen om de tijdmeting te vergemakkelijken. De opnamen zijn uitgevoerd met een Duddell-oscillograaf met twee lussen (van de Cambridge Instruments Cy).

Bij nauwkeurige nameting ziet men, dat inderdaad in het verloop van den veldstroom een geringe overregeling aanwezig is; het $\frac{1}{e}$ gedeelte van de eindwaarde is bereikt na ongeveer $\frac{1}{10}$ seconde.

De regeling verloopt dus een weinig trager dan uit de theorie zou volgen. Dit is verklaarbaar uit het feit, dat de variaties in de gloeispanning en in den veldstroom, die bij de regeling optreden, hier te groot zijn om de benaderingen, die wij hebben ingevoerd teneinde tot lineaire vergelijkingen te geraken, toelaatbaar te doen zijn.

HOOFDSTUK V.

OVER DE TECHNISCHE TOEPASSING VAN SPANNINGSREGELING AAN GENERATOREN DOOR TRIODEN.

§ 1. *Spanningsregeling aan gelijkstroomgeneratoren.*

Bij spanningsregeling door trioden *in serie* met de veldwikkeling geldt voor den *regelingsgraad* (d.i. de verhouding tusschen de spanningsverandering zonder regeling en met regeling, zie definitie p. 9) de op p. 37 afgeleide betrekking:

$$N = \frac{r_{b_2} + \alpha r_a}{r_{b_2} + r_a} \cdot \frac{1}{\alpha}, \text{ waarin } \alpha = \frac{r_m + R_i}{r_m + R_i + p g m C_1}.$$

Wanneer er geen versterking in de roosterkring aanwezig is, zoodat $m = 1$ en daar r_m , R_i en C_1 dezelfde orde van grootte hebben (zie bijv. het getallenvoorbeeld p. 39), terwijl de versterkingsgraad g bij eindtrioden niet groot is en p op zijn gunstigst gelijk is aan de eenheid, kan in dit geval de factor α nooit zeer klein zijn.

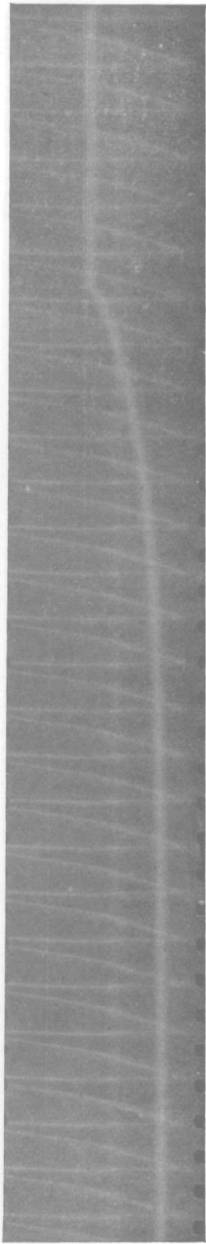
Daar nu voorts $\frac{r_{b_2} + \alpha r_a}{r_{b_2} + r_a} \cong 1$ volgt hieruit, dat bij afwezigheid van versterking de regelingsgraad N nimmer een hooge waarde kan verkrijgen.

Bij het getallenvoorbeeld van p. 39 e.v. is bijvoorbeeld:

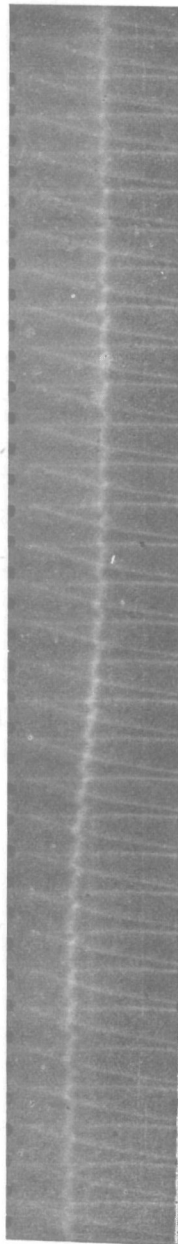
$$\alpha = \frac{1675 + 360}{1675 + 360 + 1 \cdot 6 \cdot 1700} = 0,166, \text{ zoodat } N \cong 6.$$

Zonder regeling kan de spanningsdaling tusschen nullast en vollast $5 \div 10\%$ of zelfs meer bedragen; de spanningsregeling wordt dus niet nauwkeurig.

De regelingsgraad wordt belangrijk grooter, wanneer wèl versterking wordt toegepast. Reeds bij toepassing van één versterkertrap (bijv. met een versterkertriode $A 425$) met een versterking van $m \cong 20$, bereikt de regelingsgraad een behoorlijk hooge waarde,



← i i_a bij inschakeling.



← i i_m bij inschakeling.

Fig. 12 en 13.

doordat in den noemer van de uitdrukking voor α het product $\rho gm C_1 \gg r_m + R_i$ wordt.

Wanneer dit laatste het geval is mag bij 1^e benadering $r_m + R_i$ verwaarloosd worden ten opzichte van $\rho gm C_1$, waaruit volgt, dat $N \cong \frac{\rho gm C_1}{r_m + R_i}$ dus N evenredig met de versterking m .

Bij het getallenvoorbeeld p. 39 e.v. is bij $m = 20$

$$\alpha = \frac{1675 + 360}{1675 + 360 + 1 \cdot 6 \cdot 20 \cdot 1700} \cong \frac{1}{100}$$

zoodat $N \cong 100$.

Bij een spanningsdaling van 10% tusschen nullast en vollast en zonder regeling, zou dus bij toepassing van trioderegeling met één versterkertrap, de spanningsdaling op $\sim 1\%$ verminderd zijn.

In het algemeen kan geconcludeerd worden, dat bij spanningsregeling door trioden in serie met de veldwikkeling de nauwkeurigheid der regeling zonder toepassing van versterking niet groot is en hoogstens 1% bedraagt, terwijl bij toepassing van één versterkertrap de regelingsnauwkeurigheid van de orde van grootte van 1% kan worden.

Toepassing van meerdere versterkertrappen is als regel niet noodig.

Bij spanningsregeling door trioden *parallel* aan de veldwikkeling is de versterkingsgraad volgens p. 47

$$N = \frac{\gamma r_{b_2} + \delta r_a}{\delta (r_{b_2} + r_a)}$$

Volgens p. 44 is:

$$\delta = \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m + r_v$$

$$\gamma = r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m + \frac{r_v}{R_i} \cdot \rho gm C_1$$

De belastingsweerstand r_{b_2} is minimum bij vollast, maar is ook dan nog belangrijk grooter dan r_a , zoodat bij benadering

$$N = 1 + \frac{r_v / R_i \cdot \rho gm C_1}{r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i} \right) r_m}$$

De regelingsgraad blijkt behalve van de machineconstanten r_m en C_1 , de potentiometer constante p en van de versterkingsfactoren g en m ook af te hangen van de grootte van den plaatstroom der trioden. Immers hoe grooter i_a , hoe kleiner zijn R_i en r_v .

Theoretisch kan men aan den plaatstroom elke gewenschte grootte geven, practisch echter is de grootte van den plaatstroom begrensd door het triode-verbruik en het energie-verlies tengevolge van de regeling. In het algemeen zal de plaatstroom dezelfde orde van grootte moeten hebben als de veldstroom, bij voorkeur zelfs lager moeten zijn.

Nemen wij eens aan, dat $i_a = i_m$, dan is

$$r_v = \frac{e - i_m r_m}{2 i_m} \quad (\text{zie fig. 8, p 42}).$$

Stelt men $e = q \cdot i_m r_m$, dan volgt $r_v = \frac{(q-1) r_m}{2}$

$$\begin{aligned} \text{zoodat } N &\cong 1 + \frac{\frac{(q-1) r_m}{2 R_i} \cdot p g m C_1}{\frac{q-1}{2} \cdot r_m + \left(1 + \frac{(q-1) r_m}{2 R_i}\right) r_m} = \\ &= 1 + \frac{p g m C_1}{R_i + \left(\frac{2 R_i}{(q-1) r_m} + 1\right) r_m} \end{aligned}$$

De factor q is als regel niet veel grooter dan de eenheid bijv. $q = 2$, voorts zijn C_1 , r_m en R_i van dezelfde orde van grootte, terwijl p hoogstens gelijk is aan de eenheid en de versterkingsfactor der eindtrioden niet groot is (bijv. $g = 6$ bij trioden B 406).

Is er geen versterkertrap in de roosterkring dan is $m = 1$, zoodat de regelingsgraad N geen hooge waarde heeft.

Nemen wij aan, dat $q = 2$

$$\text{dan is } N = 1 + \frac{p g C_1}{R_i + \left(\frac{2 R_i}{r_m} + 1\right) r_m}.$$

Bij regeling door trioden in serie met het veld hebben wij voor het overeenkomstige geval gevonden, dat

$$N = 1 + \frac{p g C_1}{R_i + r_m}.$$

Daar $\frac{2R_i}{r_m} + 1 > 1$ blijkt de regelingsgraad bij de laatstgenoemde regeling grooter te zijn dan bij regeling door trioden parallel aan de veldwikkeling.

Wij concludeeren, dat ook bij regeling door trioden, parallel aan de veldwikkeling voor het bereiken van een behoorlijk hooge regelingsgraad minstens één versterkertrap aanwezig behoort te zijn.

Wanneer $\rho g m C_1 \gg r_m$ en R_i is de versterkingsgraad ongeveer evenredig met de versterking m der versterkertrappen. Toename van m heeft dus ook bij deze regeling een zeer gunstigen invloed op de nauwkeurigheid der regeling. Eén versterkertrap is als regel voldoende.

Bij $i_a = i_m$ en $e = 2 i_m r_m$
 is
$$N = 1 + \frac{\rho g m C_1}{R_i + \left(\frac{2R_i}{r_m} + 1\right) r_m}$$

Bij één versterkertrap is bijv. $m = 20$ en $\frac{\rho g C_1}{R + \left(\frac{2R_i}{r_m} + 1\right) r_m} > 1$
 dus $N > 20$.

§ 2. Over het vooruit berekenen van triode-regelingsinstallaties.

Bij het ontwerpen eener regelingsinstallatie wordt als regel de eisch gesteld, dat de klemspanningsvariatiën binnen zekere grenzen blijven, bijv. dat tusschen nullast en vollast de klemspanning niet meer dan $x\%$ daalt.

Tusschen deze z.g. regelingsnauwkeurigheid x en de regelingsgraad N bestaat een eenvoudig verband.

$$N = \frac{\text{klemspanningsvariatie zonder regeling}}{\text{klemspanningsvariatie met regeling}} = \frac{\Delta e_{bz}}{\Delta e_b}$$

terwijl $x = 100 \frac{\text{klemspanningsvariatie met regeling}}{\text{klemspanning}} = 100 \frac{\Delta e_b}{e_b}$.

In de beide gevallen hebben de klemspanningsvariatiën betrekking op belastingsvariatie van nullast tot vollast.

Het blijkt dus, dat $x = 100 \cdot \frac{\Delta e_{bz}}{N \cdot e_{b_0}} \cdot 100 \dots \dots \dots 1)$

e_{b_0} = klemspanning bij nullast.

Bij regeling door trioden in serie met de veldwikkeling heeft N de waarde:

$$N = \frac{r_{b_2} + \alpha r_a}{r_{b_2} + r_a} \cdot \frac{I}{\alpha}, \text{ waarin } \alpha = \frac{r_m + R_i}{r_m + R + \beta g m C_1}.$$

De vollastwaarde van den ankerstroom i_v komt overeen met een waarde van belastingsweerstand $r_{b_2} = \frac{e_{b_0}}{i_v}$.

Deze waarde r_{b_2} blijft constant gedurende het regelingsproces, zoodat $\Delta e_{b_2} = \frac{e_{b_0}}{r_{b_2} + r_a} \cdot r_a$

$$\Delta e_{b_2} = r_a \cdot \frac{r_{b_2}}{r_{b_2} + r_a} \cdot i_v.$$

Laat men den veldstroom toenemen tot een bedrag i_{m_v} , zoodat de klemspanning bij volle belasting weer nauwkeurig = e_{b_0} is, dan is

$$r_a \cdot i_v = C_1 (i_{m_v} - i_{m_0})$$

zoodat ten slotte:

$$\Delta e_{b_2} = \frac{r_{b_2}}{r_{b_2} + r_a} C_1 (i_{m_v} - i_{m_0}).$$

Voeren wij nu de gevonden betrekkingen in vergelijking 1) in dan volgt:

$$x = 100 \cdot \frac{C_1 (i_{m_v} - i_{m_0})}{e_{b_0} \left(1 + \alpha \frac{r_a}{r_{b_2}} \right)} \cdot \alpha \text{ } 0/0.$$

Daar ook bij vollast r_{b_2} nog belangrijk grooter is dan r_a en bovendien $\alpha > 1$ en bij groote versterking α zelfs veel grooter is dan de eenheid, is $\alpha \frac{r_a}{r_{b_2}} \ll 1$, zoodat bij goede benadering:

$$\underline{\underline{x \cong 100 \cdot \frac{C_1 (i_{m_v} - i_{m_0})}{e_{b_0}} \cdot \frac{r_m + R_i}{r_m + R_i + \beta g m C_1} \text{ } 0/0 \text{ } . \text{ } . \text{ } 2)}$$

Deze vergelijking is practisch zeer goed bruikbaar, daar alle constanten hetzij bekend zijn (bijv. $g - m - R_i$) zoodra men het triode-systeem heeft vastgesteld, hetzij aan de machine gemeten kunnen worden.

Den factor C_1 bepaalt men door bij de waarden i_{m_0} en i_{m_v} van den bekrachtigingsstroom de klemspanning te meten bij onbelasten toestand van den generator.

$$C_1 = \frac{e'_b - e_{b_0}}{i_{m_v} - i_{m_0}}.$$

Het is van belang op te merken, dat de veronderstelling, dat er een lineair verband bestaat tusschen de klemspanning en den veldstroom (constante C_1) als regel niet opgaat, wanneer de veldstroom zooveel varieert als noodig is om tusschen nullast en vollast de klemspanning constant te houden. Op den vorm der vergelijking 2) heeft de inconstantheid van den factor C_1 echter geen invloed; de waarde voor C_1 , die in vergelijking 2) moet worden ingevoerd, volgt uit de bovenstaande betrekking en is gelegen tusschen die beide waarden voor C_1 , die bij nullast en bij vollast zouden volgen uit de betrekking $e = e_0 + C_1 i_m$.

Bij regeling door trioden *parallel* aan de veldwikkeling is

$$N = \frac{\gamma r_{b_2} + \delta r_a}{\delta (r_{b_2} + r_a)} \text{ zoodat } x = 100 \cdot \frac{C_1 (i_{m_v} - i_{m_0})}{e_{b_0}} \cdot \frac{\delta r_{b_2}}{\gamma r_{b_2} + \delta r_a} \%_0$$

Volgens p. 44 is:

$$\delta = \left(1 + \frac{r_v}{R_i}\right) r_m + r_v \text{ en } \gamma = r_v + \left(1 + \frac{r_v}{R_i}\right) r_m + \frac{r_v}{R_i} p g m C_1.$$

Nu is weer $r_a < r_{b_2}$ en $\delta < \gamma$, bij groote versterking is zelfs $\delta \ll \gamma$, zoodat bij goede benadering:

$$x = 100 \cdot \frac{C_1 (i_{m_v} - i_{m_0})}{e_{b_0}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{r_v}{R_i}\right) r_m + r_v}{\left(1 + \frac{r_v}{R_i}\right) r_m + r_v + \frac{r_v}{R_i} \cdot p g m C_1} \%_0 \quad 3)$$

In verg. 3) hangt de grootte van x blijkbaar ook af van de verhouding r_v tot r_m en R_i . De grootte van r_v wordt bepaald door den plaatstroom i_a . Als regel kiest men een bepaald type voor de eindtrioden, waarvan men een willekeurig aantal parallel schakelt. Noem den plaatstroom per triode = i_{a_1} en den inwendigen weerstand van één triode = R_{i_1}

dan is

$$R_i = \frac{R_{i_1}}{n} \text{ en } r_v = \frac{e - r_m i_{m_0}}{n i_{a_1} + i_{m_0}}$$

$$e = q r_m i_{m_0} \text{ dus } r_v = \frac{(q - 1) r_m}{\frac{n i_{a_1}}{i_{m_0}} + 1}$$

Als $\frac{n i_{a_1}}{i_{m_0}} = \varepsilon$ is ten slotte $r_v = \frac{(q - 1) r_m}{1 + \varepsilon}$.

Wanneer $\frac{r_v}{R_i} p g m C_1 \gg \left(1 + \frac{r_v}{R_i}\right) r_m + r_v$, hetgeen bij toepassing van één of meer versterkertrappen als regel het geval is, dan is

$$x \cong 100 \cdot \frac{(i_{m_v} - i_{m_0})}{e_{b_0}} \cdot \frac{r_m \left\{ 1 + \left(1 + \frac{r_m}{R_i} \right) \frac{q - 1}{1 + \varepsilon} \right\}}{\frac{r_v}{R_i} \cdot p g m} \Big|_{0/0}$$

Door toename van het aantal parallel geschakelde trioden wordt dus x wel kleiner; veel invloed heeft n echter niet.

Een veel sterkeren invloed oefent ook bij deze regeling de grootte van de factoren p , q en m uit. Ook verhooging van q is voor de regeling gunstig.

Bezien wij nog het volgende *getallen voorbeeld*:

Bij een dynamo van 460 Volt, 2,5 k.W. is

$$i_{m_0} = 100 \text{ mA.}, \quad i_{m_v} = 225 \text{ mA.}, \quad r_m = 1675 \Omega.$$

$$e = 500 \text{ Volt}, \quad p = 1, \quad C_1 = 400.$$

Voeren wij de regeling uit met 12 trioden $B 406$ onderling parallel geschakeld en in serie met het veld aangebracht, dan is

$$R_i = \frac{4,3 \cdot 10^3}{12} = 360 \Omega \quad g = 6.$$

Volgens verg. 3 p. 93 is nu:

$$x = 100 \cdot \frac{400 \cdot 0,125}{460} \cdot \frac{1675 + 360}{1675 + 360 + 1 \cdot m \cdot 400}$$

Zonder versterking, dus bij $m = 1$ is

$$x \cong 5 \text{ } \Big|_{0/0}$$

Bij toepassing van één versterkertrap met een triode $A 425$ is $m \cong 20$; dan is:

$$x = 0,44 \text{ } \Big|_{0/0}$$

In de tweede plaats kan de regeling worden uitgevoerd met 12 trioden *B 406 parallel* aan het veld.

Den plaatstroom nemen wij evenals bij de schakeling in serie met het veld gelijk 8,3 m.A.

Nu is dus

$$i_{a_1} = 8,3 \text{ m.A.} \quad n = 12.$$

$$R_{i_1} = 4,3 \cdot 10^3 \Omega \cdot R_i = \frac{4,3 \cdot 10^3}{12} = 360 \Omega.$$

$$q = \frac{e}{r_m i_{m_0}} = \frac{500}{167,5} \cong 3.$$

$$\varepsilon = 1 \quad r_v = \frac{2 \cdot 1675}{1 + 1} = 1675$$

zoodat

$$x = 100 \cdot \frac{400 \cdot 0,125}{460} \cdot \frac{1675 \left\{ 1 + \frac{2}{1+1} \right\}}{1675 \left\{ 1 + \frac{2}{1+1} \right\} + 1 \cdot 6 \cdot m \cdot 400 \cdot \frac{1675}{360}} \text{ } \%$$

Voor $m = 1$ is $x \cong 5,4 \%$.

Voor $m = 20$ is $x \cong 0,51 \%$.

Deze resultaten komen overeen met de in § 1 vastgestelde algemeen geldige regels betreffende de grootte der regelings-nauwkeurigheid.

Bij een evengroot aantal trioden blijkt de nauwkeurigheid bij de schakeling der trioden in serie met het veld in dit geval iets grooter te zijn dan bij de parallelschakeling.

§ 3. Over de toepassing van een z.g. „*compoudeeringsweerstand*”.

De in vorige paragrafen besproken methoden van spannings-regeling door trioden bewerken een statische regeling van de klemspanning. Er wordt niet op absoluut constante spanning geregeld en het is bij deze methoden ook niet te verkrijgen, dat bij toenemende belasting de klemspanning een weinig toeneemt, zooals vereischt wordt om op een van den generator verwijderd punt een constante spanning ter beschikking te hebben.

We zullen in deze paragraaf een eenvoudig middel bespreken, dat geschikt is om zonder vermeerdering van de plaatenergie der

eindtriodes de nauwkeurigheid der regeling op te voeren en dat tevens kan dienen om de bovengenoemde overcompounding van de klemspanning te bewerkstelligen.

Het principe-schema eener installatie, waarin dit is toegepast, is in fig. 14 weergegeven.

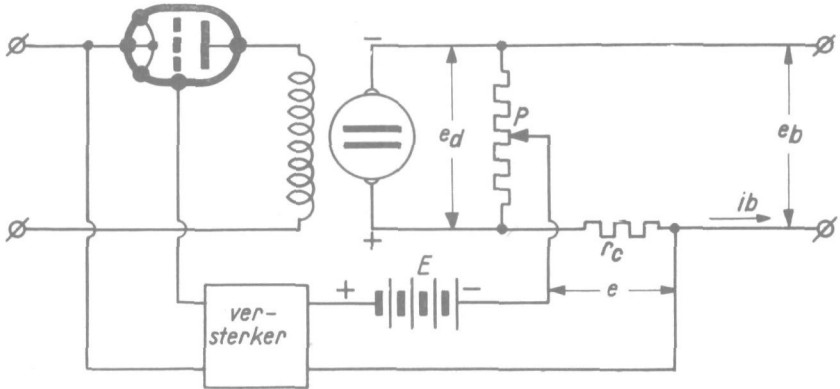


Fig. 14.

Wij merken op, dat het verschil tusschen deze installaties en de in fig. 4 weergegevene alleen bestaat in de aanwezigheid van een weerstand r_c in de ankerketen van den generator; dezen weerstand noemen wij den „compoundingweerstand”.

Wij zullen nu aantonen, dat de regeling de reeds genoemde bijzondere karaktertrekken vertoont, hoewel de klemspanningsdaling *à priori* door den compoundingweerstand wordt vergroot.

Wanneer er geen compoundingweerstand aanwezig is, is de spanningsvariatie op het rooster van de eerste triode:

$$\Delta e_{g_1} = -p \Delta e_{b_1}. \quad (p \text{ is kleiner dan de eenheid!})$$

Is er wèl een compoundingweerstand dan is:

$$\Delta e_{g_2} = -p \Delta e_d + r_c \Delta i_b = -p \Delta e_{b_2} + (1 - p) r_c \Delta i_b.$$

Bij positieve Δi_b is Δe_b negatief, waaruit volgt, dat bij gelijke klemspanningsvariatie ($\Delta e_{b_1} = \Delta e_{b_2}$) $\Delta e_{g_2} > \Delta e_{g_1}$, dus sterkere regeling, wanneer er wèl een compoundingweerstand is aangebracht. Ook kunnen wij nog opmerken, dat de 2^e term in de uitdrukking voor Δe_{g_2} onafhankelijk van de regeling steeds dezelfde waarde behoudt; dus zelfs al zou $\Delta e_b = 0$ worden dan nog heeft Δe_{g_2} een zekere waarde, die dan uitsluitend bepaald wordt door $r_c \Delta i_b$.

Uit de formule voor Δe_{g_2} volgt tevens, dat overcompounding van de klemspanning mogelijk is; dit is n.l. het geval, wanneer $(1 - p) r_c \Delta i_b$ numeriek grooter is dan $p \Delta e_{b_2}$. Bij overcompounding is Δe_{b_2} positief, zoodat de 1^e en 2^e term in de uitdrukking voor Δe_g elkaar tegenwerken. Wanneer de 2^e term overheerscht, blijft Δe_{g_2} positief, hoewel $-p \Delta e_{b_2}$ negatief wordt en is dus regeling in de juiste richting mogelijk.

Stel eens $\Delta e_b = + 1\%$ van e_b , $p = \frac{1}{5}$ en $r_c \Delta i_b = 1\%$ van e_b , dan volgt:

$$\Delta e_{g_2} = - \frac{1}{500} \cdot e_b + \frac{4}{500} \cdot e_b = + \frac{3}{500} \cdot e_b.$$

Het volgende getallenvoorbeeld moge een en ander verder duidelijk maken.

Bij een gelijkstroomgenerator 2,5 kW 460 Volt ($r_m = 1675 \Omega$, $i_{m_0} = 0,08 \text{ mA}$, $i_{m_v} = 0,16 \text{ mA}$) is een triode-reguleur volgens fig. 14 aangebracht. Er is daarbij één trap weerstandsversterking toegepast met een triode A 425; voor de eindtrioden zijn 12 parallel geschakelde trioden B 406 toegepast. De potentiometerfactor p bedraagt 0,25. De klemspanningsdaling tusschen nullast en vollast, die zonder regeling abnormaal groot is (ca 10%) bedraagt nog 1,25%.

Door gebruikmaking van een compoundingweerstand wordt nu bij overigens geheel dezelfde omstandigheden het volgende klemspanningsverloop bij belasting verkregen.

Belasting in Amp.	Klemspanning (Volt)	Klemspanningsvariatie	
		mét compoundingweerstand	zónder compoundingweerstand
0	413,5	0%	0%
1	414,2	+ 0,17%	
2	414,6	+ 0,27%	
3	414,8	+ 0,32%	
4	414,5	+ 0,24%	
5	413,5	0%	- 1,25%

Er heeft een geringe overcompounding van de klemspanning plaats, doch over het geheel is er een aanmerkelijke verbetering in de nauwkeurigheid der regeling te constateeren; klemspanningsvariaties tengevolge van toerenvariaties worden in beide gevallen even goed bij geregeld.

Wij willen nog opmerken, dat de nauwkeurigheid der regeling ook verhoogd kan worden door den potentiometer voor de rooster-spanning geheel weg te laten, zoodat $p = 1$. In ons geval, zou daardoor de klemspanningsdaling tusschen nullast en vollast zijn teruggebracht op ca 0.3 $\%$. Men heeft dan echter een roosterbatterij van 460 Volt noodig; in het boven beschreven geval van slechts 115 Volt.

Het aanbrengen van den compoudeeringsweerstand blijkt dus een eenvoudiger middel te zijn om het gestelde doel: de verbetering van de nauwkeurigheid der regeling, te bereiken.

§ 4. Over het toepassen van versterkertrappen.

Op p. 26 en 27 hebben wij uiteengezet, dat de methode van versterking, die bij spanningsregeling door trioden in aanmerking komt, de z.g. weerstandsversterking is, waarbij tusschen plaatkring voorgaande triode en rooster volgende triode een roosterbatterij is aangebracht. Ook hebben wij aangetoond, dat de versterkingstrioden bij voorkeur moeten hebben een grooten versterkingsfactor g , terwijl er voor gezorgd moet worden, dat de uitwendige weerstand (R_a) belangrijk grooter is dan de inwendige weerstand der trioden.

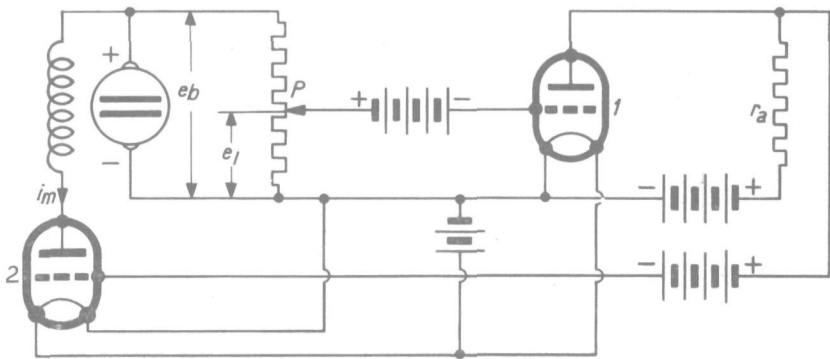


Fig. 15 geeft een principe-schema weer van een installatie met één trap weerstandsversterking, toegepast bij een zelfbekerchtigde dynamo.

De werking der regeling is in het kort als volgt:

Wanneer door een of andere oorzaak de klemspanning e_b wil dalen, dan wordt de roosterspanning van de versterkertriode 1 meer negatief, zoodat minder stroom gaat vloeien in de plaatkring van deze triode en de spanning aan den weerstand r_a afneemt. Dientengevolge wordt het rooster van de eindtriode 2 minder negatief, zoodat de stroom in de veldketen van den generator stijgt en de oorspronkelijk ingezette klemspanningsdaling wordt tegengewerkt.

In plaats van één trap kan men ook drie trappen versterking aanbrengen; een twee-trapsversterker daarentegen kan niet worden toegepast, omdat dan bij dalende klemspanning het rooster der eindtriode juist meer negatief zou worden (bij elke volgende versterkertrap keert het teeken in de roosterspanningsvariatie om).

In het algemeen kan men bij regeling van zelfbekrachtigde dynamo's met de eindtrioden in serie met de veldwikkelling alleen een oneven aantal versterkertrappen toepassen; bij regeling met de eindtrioden parallel met de veldwikkelling alleen een even aantal. Bij afzonderlijk bekrachtigde dynamo's kan men een willekeurig aantal versterkertrappen toepassen.

Opgemerkt dient hierbij te worden, dat de instelling van een weerstandsversterker veel moeilijker wordt, naarmate het aantal versterkertrappen toeneemt.

De instelling bijv. van een weerstandsversterker met drie trappen vereischt vrij veel routine, terwijl de instelling gemakkelijk ontregeld wordt door kleine variaties van de spanningen der roosterbatterijen. Voor praktische toepassing komen versterkers met meer dan twee trappen o.i. niet in aanmerking, ook nog om de volgende reden:

Dank zij den hoogen versterkingsgraad heeft een zeer kleine variatie van de roosterspanning van de eerste versterkertriode een voldoende groote variatie van de roosterspanning der eindtrioden tengevolge om de vereischte veldstroom-verandering te doen optreden.

Bij een plotselinge belastingsstoot echter varieert de klemspanning en daarmee de roosterspanning van de 1^e versterkertriode in het eerste moment in belangrijk heviger mate, omdat de roosterspanningsvariatie, die wèl zonder traagheid wordt doorgegeven aan

de roosters der volgende trioden, *niet* zonder traagheid een veldstroomverandering veroorzaakt, zoodat de klemspanning niet onmiddellijk wordt bijgesteld.

Deze abnormaal groote roosterspanningsvariatiëes hebben het gevolg, dat roosterstroomen optreden, waardoor de instelling der versterkerinstallatie in de war komt en geen nauwkeurige regeling meer mogelijk is.

Dit verschijnsel, waarop wellicht ook van invloed is het optreden van de op p. 4 besproken overspanningen, is door ons practisch geconstateerd bij de regeling van de op pag. 94 reeds genoemde dynamo met behulp van een drietraps weerstandsversterker, waarin drie trioden A 425 waren opgenomen en die van tevoren zoodanig werd ingesteld, dat de totale versterking ca. 9000 bedroeg. Wanneer zij naar behooren functioneerde, zou een dergelijke installatie een uiterst groote nauwkeurigheid van regeling doen verwachten; dat de te verwachten nauwkeurigheid lang niet bereikt wordt, schrijven wij gedeeltelijk toe aan de bovenomschreven eigenaardigheid. Ook de aanwezigheid van een collector-rimpel op de klemspanning kan hier hinderlijk werken.

§ 5. *Practische toepassing van spanningsregeling door trioden aan een gelijkstroomdynamo 40 k.W. 130 Volt met opwekdynamo.*

De eisch werd gesteld om de spanning van bovengenoemde gelijkstroommachine, opgesteld in de machine-kamer van het Natuurkundig Laboratorium der N.V. Philips Gloeilampen Fabrieken te Eindhoven, met het oog op verschillende physische metingen zeer nauwkeurig en zeer snel te regelen. Een triode-regulateur was dus hier de aangewezen oplossing.

Het schakelschema van fig. 16 geeft de installatie in haar geheel weer. Zooals daaruit te zien is, zijn de eindtrioden aangebracht in serie met de veldwikkeling van de opwekdynamo, terwijl een één-traps weerstandsversterker is toegepast. De schakelaar *S* dient voor het omschakelen van handregeling op automatische regeling of omgekeerd.

De geheele installatie is ingebouwd in een verrijdbare kast, die geplaatst kan worden in de onmiddellijke nabijheid van de metingen, die een nauwkeurig constante spanning vereischen. Hierdoor wordt

voorkomen, dat in de leidingen van de regelapparatuur naar de meetapparatuur merkbare spanningsdalingen optreden.

Over de technische uitvoering van den reguleur nog enkele opmerkingen.

Het is natuurlijk gewenscht het gebruik van batterijen in spanningsreguleurs zooveel mogelijk te beperken, daar deze geregeld moeten worden opgeladen en geregeld technisch toezicht vereischen. Voor de roosterbatterijen geldt dit bezwaar in mindere mate, aangezien deze geen stroom behoeven te leveren en hiervoor dus bijv. droge batterijen van goede kwaliteit gebruikt kunnen worden.

Het gebruik van een batterij in de plaatketen van de versterkertriode is vermeden door de plaatkring van deze lamp aan te sluiten op de klemspanning van de te regelen machine; hiermede zijn goede resultaten verkregen.

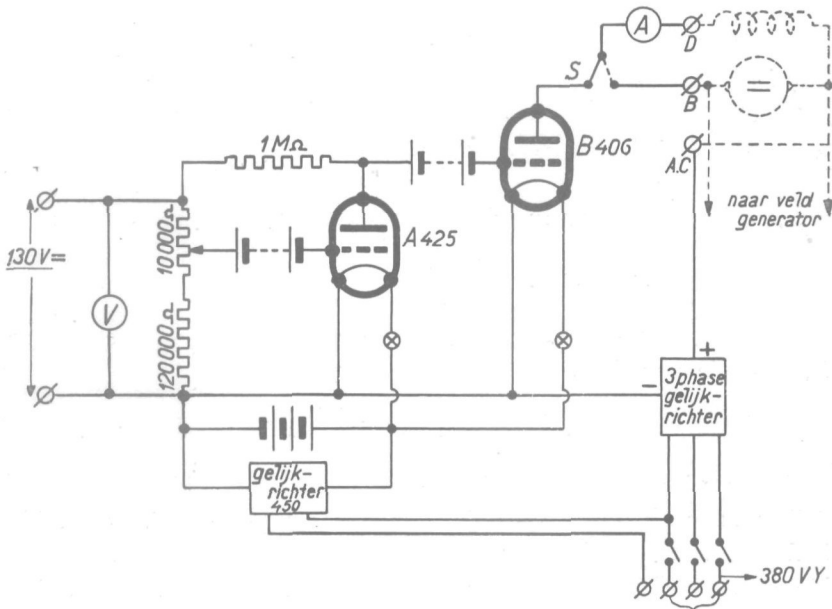


Fig. 16.

De gloeistroombatterij is als bufferbatterij geschakeld; de eigenlijke stroomlevering geschiedt door een gelijkrichter, welke primair op het aanwezige wisselstroomnet wordt aangesloten.

Men kan de gloeidraden ook met wisselstroom verwarmen, wanneer men de daarvoor geschikte trioden toepast; de gloeistroom-batterij vervalt dan geheel en de gloeidraden worden via een gloeistroomtransformator aangesloten op een aanwezig wisselstroom-net, dat niet constant van spanning behoeft te zijn, daar de plaatstroom der trioden voor kleine variaties van de gloeidraadtemperatuur niet gevoelig is.

De gelijkspanning van ongeveer 220 Volt voor de veldketen van de opwekdynamo wordt geleverd door een draaistroomgelijkrichter.

Eenvoudiger ware het geweest zelfbekrachtiging van de opwekdynamo toe te passen; dit is gebleken hier niet mogelijk te zijn, aangezien bij vollast van den hoofdgenerator de spanning aan de veldwikkeling van den opwekker maar weinig meer verschilt van de klemspanning.

De elektrische gegevens der installatie zijn de volgende:

$$\text{Opwekker: } r_m = 304 \text{ ohm.}$$

$$i_{m_0} = 0,189 \text{ A.}$$

$$i_{m_v} = 0,243 \text{ A.}$$

De versterkingsfactor $m \cong 20$, terwijl de potentiometerfactor $p \cong 1$, $g = 6$, $R_i = \frac{4,3 \cdot 10^3}{12} = 360 \Omega$.

De spanningsdaling tusschen nullast en vollast bedraagt nu:

$$x = 100 \cdot \frac{R_i + r_m}{m \cdot p \cdot g} (i_{m_v} - i_{m_0}) \text{ ‰}.$$

Den factor $(1 - kx)$ stellen wij hier $= 1$; hetgeen toelaatbaar is, daar de nauwkeurigheid der regeling groot is.

$$x = 100 \cdot \frac{360 + 304}{20 \cdot 1 \cdot 6} (0,243 - 0,189) = 0,23 \text{ ‰}.$$

Bij practisch gebruik is inderdaad gebleken, dat de klemspanningsdaling tusschen nullast — vollast ongeveer $1/4$ Volt d.i. 2 pro mille bedraagt. De regeling is dus zeer nauwkeurig en zoo snel, dat zelfs bij groote belastingsstooten van bijv. 200 Amp. de klemspanning niet merkbaar schommelt.

§ 6. Spanningsregeling door trioden aan wisselstroomgeneratoren.

De spanning van wisselstroomgeneratoren, die van een opwekdynamo zijn voorzien, kan worden geregeld met behulp van trioden,

die in de veldketen van de opwekdynamo hetzij parallel hetzij in serie met de veldwikkeling zijn aangebracht en welke rooster- spanningen worden gevarieerd in afhankelijkheid van de klem- spanning van den generator. Het is duidelijk, dat deze wissel- spanning niet zonder meer op de roosters gebracht kan worden, doch eerst dient te worden gelijkgericht.

Voor het overige kunnen de regelingsinstallaties geheel overeen- komen met de installaties, die wij voor gelijkstroomgeneratoren hebben beschreven.

Afgezien van de toepassing van mechanische toestellen, kan de gelijkrichting van de klemspanning worden bewerkstelligd:

- a. door detectie in de plaatketen of op het rooster van trioden;
- b. door middel van dioden.

Detectie in de plaatketen van trioden is naar men weet weinig effectief. Betere resultaten geeft in dit opzicht de roosterdetectie, maar ook hierbij blijft de detectie beneden de topwaarde van de wisselspanning, die aan de roosterkring wordt opgedrukt. (Vergelijk Tijdschrift van het Ned. Radio-Genootschap Deel III, p. 67—89, GROENEVELD — VAN DER POL — POSTHUMUS) en aangezien deze wisselspanning als regel van de orde van een paar Volt moet zijn en een klein deel vormt van de klemspanning, volgt hieruit dat de roosterspanningsvariaties, die bij klemspanningsveranderingen optreden slechts een klein deel van de laatstgenoemde kunnen uitmaken.

De gelijkrichting door dioden is in dit opzicht veel beter, daar de variaties in de gelijkgerichte spanning van dezelfde orde van grootte zijn als die van de gelijkgerichte wisselspanning.

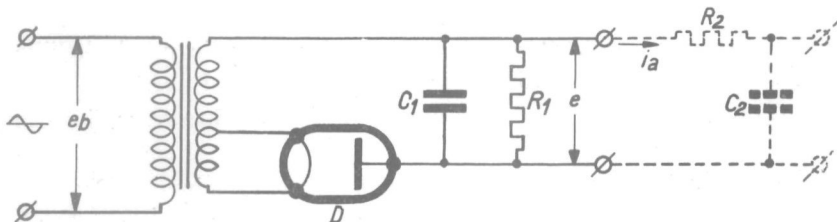


Fig. 17.

Fig. 17 geeft een schakeling weer, die practisch kan worden toegepast.

De generatorspanning e_b wordt enkelphazig gelijkgericht door een diode D , die een condensator C_1 oplaadt. De weerstand R_1 is noodzakelijk, omdat bij afwezigheid daarvan de condensator C_1 zich niet ontladen kan, wanneer de klemspanning daalt en dus geen goede regeling mogelijk is. De gelijkspanning e wordt via een roosterbatterij op het rooster van de eerste versterkertriode of bij afwezigheid van een versterkerinstallatie direct op de roosters der eindtrioden gebracht.

Bij deze methode van spanningsregeling ontstaat nu de volgende moeilijkheid:

Hoe kleiner men den weerstand R_1 kiest, des te sneller kan C_1 zich ontladen, des te sneller kan ook de regeling verlopen. In den stationnairen toestand vloeit echter ook een stroom door R_1 , die grooter is naarmate R_1 kleiner wordt. De wisselspanning, die hierdoor ontstaat aan de klemmen van den condensator C_1 de z.g. rimpelspanning neemt toe met afnemende R_1 en hierdoor wordt vooral wanneer een hooge versterkingsgraad aanwezig is, de gevoeligheid der versterkingsinstallatie belangrijk verminderd (roosterstroomen!) en daarmee neemt ook de nauwkeurigheid der regeling af.

Verhoogt men R_1 dan wordt de regeling gevoeliger, maar de ontlading van den condensator C_1 wordt trager en dit kan zelfs ongewenschte slingeringen van de klemspanning veroorzaken. De tijdconstante van de ontlading van een condensator over een weerstand is gelijk aan het product van weerstand en capaciteit.

$$\delta = r C \text{ sec.}$$

Is dus bijv. $C = 1 \mu \text{ F.}$ en $r = 0,1 \text{ megohm,}$

dan is $\delta = 10^5 \cdot 10^{-6} = 10^{-1} \text{ sec.}$

Hieruit blijkt wel, dat de traagheid, die door de noodzakelijke ontlading van den condensator wordt ingevoerd, vrij groot is, waardoor het verklaarbaar is dat hiervan ongewenschte verschijnselen het gevolg zijn.

Om de rimpelspanning van den condensator te verminderen alvorens ze op het rooster der regelende triode te brengen, kan men gebruik maken van een z.g. afvlakketen zooals in fig. 17 gestippeld is aangegeven.

De functie van de afvlakketen moet zijn:

- 1° de rimpelspanning te verminderen;
 2° de gelijkspanning dezelfde waarde te doen houden.

Aan de laatste voorwaarde is voldaan, want noch C_2 noch het rooster laten gelijkstroom door en in R_2 ontstaat dus geen daling van de gelijkspanning.

De rimpelspanning (e_r) kunnen wij bij benadering beschouwen als een sinusvormige wisselspanning, die bij de schakeling volgens fig. 17 dezelfde frequentie heeft als de generatorspanning e_b .

Bij dubbelphazige gelijkrichting zou de frequentie van de rimpelspanning gelijk $2 \times$ die van e_b zijn.

Voor de afvlakking geldt de vergelijking:

$$e_r = i_2 \sqrt{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C_2^2}}.$$

De spanning van den condensator C_2 is derhalve:

$$e_c = i_2 \cdot \frac{1}{\omega C_2}$$

zoodat de afvlakking $\frac{e_c}{e_r} = \frac{1}{\sqrt{1 + R_2^2 \omega^2 C_2^2}}$.

Als regel is $R \omega C \gg 1$ dus $\frac{e_c}{e_r} \cong \frac{1}{R_2 \omega C_2}$.

Bedraagt de frequentie van de generatorspanning 50 perioden, dan is dus $\frac{e_c}{e_r} = \frac{1}{314 R_2 C_2}$.

$$\text{Is } \frac{e_c}{e_r} = 0,1 \text{ dan is } R_2 C_2 = \frac{1}{31,4}.$$

Dit product is tevens gelijk aan de tijdconstante van de ontlasting van den condensator C_2 over den weerstand R_2 , waaruit al direct volgt: hoe beter afvlakking, hoe trager ontlasting.

Wanneer nu e_b plotseling daalt, dan moeten beide condensatoren C_1 en C_2 zich ontladen, C_1 over R_1 , C_2 over $R_1 + R_2$; de ontlasting van C_2 verloopt dus nog trager dan die van C_1 en hierdoor is het te verklaren, dat men per slot van rekening met het toepassen van een afvlakkring in dit bijzondere geval niet veel verder komt.

Wel wordt de rimpelspanning verkleind en dus de gevoeligheid verhoogd, maar daartegenover staat, dat de traagheid in het dalen van de spanning e , die op het rooster wordt gebracht, toeneemt en hierdoor vermeerdert de kans op periodiciteit van het regelingsproces.

Het blijkt dus dat verschillende factoren tegen elkaar inwerken; natuurlijk is er in een speciaal geval een meest gunstige verhouding van R_1 en C_1 etc. te vinden. Dit kan men het eenvoudigst praktisch aan den te regelen generator na gaan.

Triode regeling volgens de beschreven methode is door ons toegepast aan een draaistroomgenerator 380 Volt, 50 \sim , 65 kVA, voorzien van een opwekdynamo 75 Volt, 1,7 k.W.

De gelijkrichting is uitgevoerd volgens schema fig. 17, de versterkerinstallatie is een twee-traps weerstandsversterker met roosterbatterijen en gelijkrichters voor het leveren der plaatsspanningen. De gloeidraden worden met wisselstroom gevoed. De eindtriodes (12 triodes B 406) staan parallel aan de veldwikkeling van den opwekker. De klemspanningsfluctuaties blijven beneden 0,5 %; de snelheid van regeling is iets minder dan men aantreft bij triode-regeling aan gelijkstroomgeneratoren, maar toch nog zeer groot.

HOOFDSTUK VI.

OVER DE TECHNISCHE TOEPASSING VAN SPANNINGSREGELING AAN GENERA- TOREN DOOR DIODEN.

§ 1. *Spanningsregeling aan gelijkstroomgeneratoren.*

Bij spanningsregeling door dioden *in serie* met de veldwikkeling, moet bij dalende klemspanning de gloeistroom der dioden toenemen, zooals op p. 49 is uiteengezet.

In de gloeidraadketen moet dan ook een constante tegenspanning aanwezig zijn, volgens het schema van fig. 9 p. 49, die hooger is dan de klemspanning. Deze tegenspanning kan geleverd worden door een batterij, die door den gloeistroom ontladen wordt en dus geregeld dient te worden opgeladen.

De batterij kan ook worden gebruikt als bufferbatterij, terwijl de eigenlijke stroomlevering dan geschiedt door een gelijkrichter volgens het schema van fig. 18.

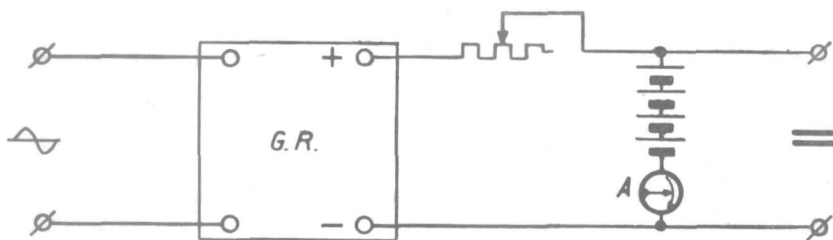


Fig. 18.

Wanneer de klemspanningsdaling (V), die zonder regeling zou optreden, belangrijk kleiner is dan de gloeispanning geldt voor den regelingsgraad volgens p. 73 de betrekking:

$$N = \frac{I}{1 - 2 i_{f_1} \frac{T_1 C_1 C_3}{\left(r_m + \frac{I}{C_2}\right) C_2} \cdot \frac{I}{5,9 W_{f_1} + 2 i_{f_1} \frac{T_1 C_1 C_3}{\left(r_m + \frac{I}{C_2}\right) C_2}}$$

Zooals wij op p. 58 hebben afgeleid is de term $\frac{T_1 C_1 C_3}{\left(r_m + \frac{1}{C_2}\right) C_2}$ van dezelfde grootte-orde als de klemspanning.

Wij stellen $\frac{T_1 C_1 C_3}{\left(r_m + \frac{1}{C_2}\right) C_2} = a \cdot e_{b_1}$, terwijl a in den regel eenige malen grooter is dan de eenheid.

$$\text{Dan is } N = \frac{1}{1 - \frac{2 e_{b_1}}{5,9 e_{f_1} + 2 a e_{b_1}}} = \frac{5,9 e_{f_1} + 2 a e_{b_1}}{5,9 e_{f_1}}.$$

Daar nu de klemspanning veelal belangrijk hooger is dan de gloeispanning volgt hieruit, dat bij deze methode van regeling een hooge regelingsgraad bereikt kan worden. Wanneer nu tevens voor een snelle regeling wordt zorg gedragen door bijv. meerdere gloeidraden parallel te schakelen, zoodat de warmtetraagheid der gloeidraden gering is, dan kan ook de snelheid van regeling groot zijn, zoodat deze wijze van spanningsregeling principieel groote voordeelen biedt. Voor technische toepassing is zij desniettemin minder geschikt, omdat de batterij in de gloeidraadketen een vrij hooge spanning moet hebben (hooger dan de klemspanning) en het energieverlies in de gloeistroomketen groot wordt, wanneer de verhouding tusschen klemspanning en gloeispanning een groote waarde heeft.

Een enkel voorbeeld moge de laatste stelling toelichten.

De generatorspanning zij 110 Volt bij een vermogen van W Watt; de aan de veldketen toegevoerde energie bedraagt $2\%_0$ van het generatorvermogen.

De veldstroom, die gelijk is aan de plaatstroom der dioden, bedraagt dan $\frac{1/50 W}{110} \cdot 1000$ m.A.

Wanneer de gloeidraad een z.g. „dull-emitter” is, kan men rekenen op een plaatstroom van 25 m.A. per Watt gloeidraadenergie, zoodat de laatste bedraagt:

$$W_f = \frac{W}{50 \cdot 110} \cdot \frac{1000}{25} = \frac{W}{137,5}.$$

De gloeispanning bedrage nu 4 Volt, zoodat dus de spanning

aan de batterij in de gloeidraadketen $110 + 4 = 114$ Volt behoort te zijn. De energie, door de batterij geleverd, bedraagt dus:

$$W' = \frac{114}{4} \cdot \frac{W}{137,5} \cong \frac{1}{4} W.$$

Een vierde gedeelte van het generatorvermogen wordt dus in dit geval verbruikt in de gloeidraadketen, hetgeen natuurlijk praktisch ontoelaatbaar is.

Bij de regeling door dioden *parallel* aan de veldwikkeling moet bij dalende klemspanning, de gloeistroom afnemen, zoodat een batterij in de gloeidraadketen niet noodzakelijk is. Wel is het gewenscht een batterij aan te brengen om een behoorlijk hooge regelingsgraad te verkrijgen.

Volgens p. 81 is in het geval, dat de spanningsdaling (V) zonder regeling belangrijk kleiner is dan de gloeispanning:

$$N = \frac{\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{5,9 e_{f_1}}{23,4} + 2 C_1 i_{s_1}}{\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{5,9 e_{f_1}}{23,4}}$$

$(1 + C_2 r_v)$ is een correctie-factor en is $\cong 1$.

Het product $C_1 i_{s_1}$ is van dezelfde orde van grootte als de klemspanning, zoodat in het geval dat $e_b \gg e_f$ de regelingsgraad een hooge waarde kan verkrijgen.

Door meer dioden parallel te schakelen aan de veldwikkeling neemt i_{s_1} toe en daar $\left(1 + \frac{r_m}{r_v} \right)$ minder dan evenredig met i_{s_1} toeneemt, wordt door deze maatregel de regelingsgraad hooger.

Een bezwaar bij de technische toepassing van deze regelingsmethode is het, dat de batterij wordt opgeladen, dus met geregelde tusschenpoozen dient te worden ontladen, hetgeen vooral bij een continu bedrijf verwerpelijk is.

Zonder toepassing van een batterij in de gloeidraadketen is de schakeling wel zeer eenvoudig, echter is dan ook de bereikbare regelingsgraad gering.

$$e_{f_1} = e_{b_1} \quad C_1 i_{s_1} = a \cdot e_{b_1}$$

dus

$$N \cong 1 + \frac{2 \cdot \frac{23,4}{5,9} \cdot a}{1 + \frac{r_m}{r_v}}$$

Stel eens $i_{s_1} = i_m$, dan is $C_1 i_{s_1} = C_1 i_m$ in elk geval kleiner dan e_{b_1} dus bijv. $a = \frac{1}{2}$

$i_{s_1} = i_a$, dus $1 + \frac{r_m}{r_v} = 3$, wanneer de spanning voor de veldketen $e = 2 i_m r_m$.

Nu is $N \cong 7/3$, dus inderdaad laag.

§ 2. *Nauwkeurigheid en energie-verlies bij regeling door dioden parallel aan de veldwikkeling.*

Wanneer men bij wisselstroomgeneratoren wil regelen door dioden in serie met de veldwikkeling, moet evenals bij gelijkstroomgeneratoren bij dalende klemspanning de gloeistroom toenemen. Er zou dus in de gloeistroomketen een tegenspanning moeten zijn, die grooter is dan de klemspanning. Dit is bij wisselstroom praktisch moeilijk uitvoerbaar en wil men ook geen gebruik maken van een extra veldwikkeling voor de regeling, dan is men derhalve bij wisselstroomgeneratoren aangewezen op regeling door dioden parallel aan de veldwikkeling. Bij voorkeur zal men gebruik maken van een gloeistroomtransformator, zoodat het schema er in principe uitziet als in fig. 19 is weergegeven.

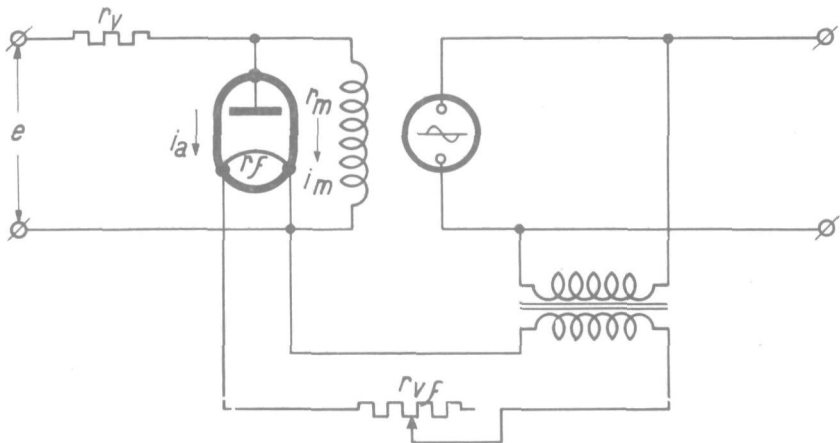


Fig. 19.

Voor den regelingsgraad geldt (wanneer $r_v = 0$) geheel dezelfde betrekking als reeds is afgeleid voor gelijkstroomgeneratoren; de regelingsgraad kan geen hooge waarde verkrijgen (verg. § 1 p. 109).

Beschouwen wij thans nog eens nader de regelingsnauwkeurigheid, die bij gelijk- en wisselstroomgeneratoren kan optreden, wanneer men de dioden parallel schakelt aan de veldwikkeling.

Voor de regelingsnauwkeurigheid geldt dezelfde betrekking als is afgeleid op p. 91

$$x = 100 \cdot \frac{\Delta e_{b_z}}{N \cdot e_{b_0}} \%.$$

Δe_{b_z} is de klemspanningsdaling, die zonder regeling bij volle belasting zou optreden (bij de afleiding van de betrekking voor N in hoofdstuk IV, p. 70 e.v. is deze spanningsdaling V genoemd).

Wanneer Δe_{b_z} klein is ten opzichte van de gloeispanning der dioden geldt voor den regelingsgraad N de betrekking: (zie p. 80, 81)

$$N = \frac{\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{(C_n + C_p) e_{f_1}}{p} + 2 C_1 i_{s_1}}{\left\{ 1 + \frac{r_m}{r_v} (1 + C_2 r_v) \right\} \frac{(C_n + C_p) e_{f_1}}{p}}.$$

De factor $(1 + C_2 r_v)$ is een correctie-term en kan in eerste instantie = 1 gesteld worden (vergelijk p. 80).

De betrekking voor N kan ook geschreven worden in de gedaante

$$N = \frac{e_{f_1} (r_m + r_v) + r_v C_1 i_{s_1} \frac{2p}{C_n + C_p}}{(r_m + r_v) e_{f_1}}$$

zoodat

$$x = 100 \cdot \frac{V}{e_{b_0}} \cdot \frac{(r_v + r_m)}{(r_v + r_m) + r_v \frac{C_1 i_{s_1}}{e_{f_1}} \cdot \frac{2p}{C_n + C_p}}.$$

Daar wij $1 + C_2 r_v = 1$ gesteld hebben, mogen wij ook $i_{s_1} = i_a$ nemen; ook is de gloeispanning $e_{f_1} = e_b$.

$$x = 100 \cdot \frac{V}{e_{b_0}} \cdot \frac{(r_v + r_m)}{(r_v + r_m) + r_v \frac{C_1 i_a}{e_{b_0}} \cdot \frac{2p}{C_n + C_p}} \quad \dots 1)$$

Bij 2500°C en wanneer de gloeidraad uit wolfram bestaat is: $C_n = 4,7$, $C_p = 1,2$, $p = 23,4$ (vergelijk p. 80 met p. 17, 18, 19).

Er is dus een verband gevonden tusschen de regelingsnauwkeurigheid en i_a . De formule kan practisch gemakkelijk worden toegepast, daar alle daarin voorkomende grootheden aan de te regelen machine meetbaar zijn.

De uitdrukking voor de regelingsnauwkeurigheid, die hier is afgeleid uit de in hoofdstuk IV voor den regelingsgraad gevonden waarde, kan langs meer eenvoudigen weg ook als volgt worden vastgesteld.

Bij nullast geldt voor de veldketen der te regelen machine de betrekking:

$$e = r_v (i_a + i_{m_0}) + r_m \cdot i_{m_0} \dots \dots \dots 2)$$

Bij volle belasting is

$$e = r_v (i_a' + i_{m_v}) + r_m \cdot i_{m_v} \dots \dots \dots 3)$$

Volgens p. 19 is bij kleine veranderingen in den gloeistroom:

$$\frac{\Delta i_a}{i_a} = \frac{p}{C_i} \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + \left(1 + \frac{C_p}{C_i}\right) r_f} \cdot \frac{\Delta e_f}{e_f}.$$

Hier is $\frac{\Delta e_f}{e_f} = \frac{\Delta e_b}{e_{b_0}} = -\frac{x}{100}$, zoodat

$$i_a' = i_a \left(1 - \frac{p}{C_i} \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + \left(1 + \frac{C_p}{C_i}\right) r_f} \cdot \frac{x}{100}\right)$$

i_{m_v} is de waarde van den veldstroom bij volle belasting en regeling. Noemen wij i_{m_v}' de waarde van den veldstroom, die noodig zou zijn om de spanningsdaling V geheel weg te werken, dan is

$$i_{m_v} = i_{m_v}' \left(1 - b \cdot \frac{x}{100}\right)$$

waarin

$$b = \frac{e_{b_0}}{C_1 i_{m_v}'}$$

Uit 2) en 3) volgt nu, dat:

$$\begin{aligned} r_v \cdot i_a \cdot \frac{p}{C_i} \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + \left(1 + \frac{C_p}{C_i}\right) r_f} \cdot \frac{x}{100} &= \\ &= (r_v + r_m) \left\{ i_{m_v}' \cdot \left(1 - b \frac{x}{100}\right) - i_{m_0} \right\} \end{aligned}$$

Nu is $i_{mv}' - i_{m0} = \frac{V}{C_1}$, zoodat:

$$x = 100 \cdot \frac{V}{C_1} \cdot \frac{r_v + r_m}{(r_v + r_m) \cdot \frac{e_{b_0}}{C_1} + r_v i_a \cdot \frac{\rho}{C_i} \cdot \frac{r_{vf} + r_f}{r_{vf} + \left(1 + \frac{C_\rho}{C_i}\right) r_f}}$$

of anders geschreven:

$$x = 100 \cdot \frac{V}{e_{b_0}} \cdot \frac{r_v + r_m}{(r_v + r_m) + r_v \cdot i_a \cdot \frac{\rho}{C_i} \cdot \frac{r_{vf} + r_f}{r_{vf} + \left(1 + \frac{C_\rho}{C_i}\right) r_f} \cdot \frac{C_1}{e_{b_0}}} \quad \dots 4)$$

Wanneer $r_{vf} = 0$, gaat deze uitdrukking over in de volgende:

$$x = 100 \cdot \frac{V}{e_{b_0}} \cdot \frac{r_v + r_m}{(r_v + r_m) + r_v \cdot i_a \cdot \frac{\rho}{C_i + C_\rho} \cdot \frac{C_1}{e_{b_0}}}$$

Men ziet dat deze betrekking identiek is met de betrekking 1) van p. 111, indien:

$$\frac{2}{C_\eta + C_\rho} = \frac{1}{C_i + C_\rho} \text{ of } 2(C_i + C_\rho) = C_\eta + C_\rho.$$

Dat deze laatste gelijkheid bestaat, volgt uit de voorwaarde van het warmte-evenwicht in den gloeidraad. In den stationnairen toestand is n.l. de toegevoerde energie = de uitgestraalde energie,

$$\text{dus } \frac{e_f^2}{r_f} = O\eta.$$

In overeenstemming met p. 21 mogen wij deze vergelijking ook als volgt schrijven:

$$\frac{e_{f_0}^2 + 2 e_{f_0} \Delta e_{f_0}}{r_{f_0} \left(1 + C_\rho \frac{\Delta T}{T}\right)} = O\eta_0 \left(1 + C_\eta \frac{\Delta T}{T}\right)$$

$$\text{of ook: } 2 \frac{\Delta e_{f_0}}{e_{f_0}} = (C_\rho + C_\eta) \frac{\Delta T}{T}.$$

Aangezien nu volgens p. 18, voor het geval dat $r_v = 0$:

$$\frac{\Delta e_f}{e_f} = \left(1 + \frac{C_\rho}{C_i}\right) \frac{\Delta i_f}{i_f} = \left(1 + \frac{C_\rho}{C_i}\right) C_i \cdot \frac{\Delta T}{T} = (C_i + C_\rho) \frac{\Delta T}{T}$$

is dus: $2(C_i + C_\rho) = C_\rho + C_\eta$, hetgeen te bewijzen was.

In het geval de gloeidraad uit wolfram bestaat is $C_v = 4,7$, $C_p = 1,2$, $C_i = 1,75$ zoodat de betrekking 4) dan als volgt luidt:

$$x = 100 \cdot \frac{V}{e_{b_0}} \cdot \frac{(r_v + r_m)}{(r_v + r_m) + r_v \cdot i_a \cdot \frac{p}{1,75} \cdot \frac{r_{vf} + r_f}{r_{vf} + 1,68 r_f} \cdot \frac{C}{e_{b_0}}}$$

Wij kunnen uit de vergelijking 4) ook een betrekking afleiden tusschen i_a en i_{m_0} , welke kan worden toegepast om de grootte van i_a direct te berekenen, wanneer de regelingsnauwkeurigheid x van te voren gegeven is.

Stellen wij daartoe $\frac{r_{vf} + r_f}{r_{vf} + 1,68 r_f} = \alpha$ en $\frac{p}{1,75} = h$, en bedenken wij dat $V = C_1(i_{m_v}' - i_{m_0})$, $i_{m_v}' = C i_{m_0}$ en $b = \frac{e_{b_0}}{C_1 i_{m_v}'}$, verg. p. 112) terwijl ten slotte r_v berekend wordt door aan te nemen, dat $e = q r_m i_{m_0}$, dan volgt uit 4):

$$i_a = i_{m_0} \cdot \frac{q \left\{ C \left(1 - b \frac{x}{100} \right) - 1 \right\}}{(q - 1) \alpha h \frac{x}{100} - \left\{ C \left(1 - b \frac{x}{100} \right) - 1 \right\}} \quad 5)$$

Deze verhouding tusschen i_a en i_{m_0} is voor de praktijk natuurlijk van groot belang, daar zij direct aangeeft hoeveel dioden van een bepaald type men aan de veldwikkeling moet parallel schakelen.

Een andere voor de praktische toepassing gewichtige verhouding is die tusschen het energieverlies, dat normaal in de veldwikkeling optreedt en het energieverlies, dat er door de regeling bijkomt.

Het extra-energie-verlies bedraagt:

$$W = e (i_a + i_m) - r_m i_m^2 + \frac{r_v + r_f}{r_v} \cdot W_j.$$

W_f = de energie benoodigd voor de verwarming van den gloeidraad.

Bij een bepaalde temperatuur (levensduur) van de gloeikathode is er een vast verband tusschen den verzadigingsstroom en de verwarmingsenergie.

Als regel wordt opgegeven hoeveel m.A. plaatstroom per Watt

gloeidraadenergie toelaatbaar is en noemt men dit getal H , zoodat:

$$W_f = \frac{1000 i_a}{H} \text{ Watt.}$$

Het extra energie-verlies der regeling hangt af van den belastingstoestand. Het is echter voldoende de bovenvermelde verhouding te bepalen bij een bepaalden belastingstoestand der machine bijv. bij nullast. Daarbij is:

$$\underline{\underline{W_0 = e (i_a + i_{m_0}) - r_m i_{m_0}^2 + \frac{r_v + r_f}{r_v} \cdot \frac{1000 i_a}{H} \quad 6)}$$

Bij een bepaalde machine en een bepaald type van dioden zijn in vergelijking 5) de grootheden $c - b - \alpha$ en h gegeven. Wordt nu een bepaalde regelingsnauwkeurigheid x geëischt, dan kan men zich afvragen op welke wijze de verhoudingen $\varepsilon = \frac{i_a}{i_{m_0}}$ en $\eta = \frac{W_0}{i_{m_0}^2 \cdot r_m}$ van de grootte van $q = \frac{e}{r_m i_{m_0}}$ afhangen.

Men ziet dan, dat bij toenemende q de verhouding $\varepsilon = \frac{i_a}{i_{m_0}}$ steeds kleiner wordt. Anders is het met de verhouding $\eta = \frac{W_0}{i_{m_0}^2 r_m}$, die bij een bepaalde q een minimum waarde bereikt.

Om deze minimum waarde te vinden moeten wij $\frac{dW_0}{dq} = 0$ stellen en vinden dan een vierkantsvergelijking in q .

Wij zullen nu nagaan hoe groot de verhoudingen ε en η worden, wanneer q zóó groot gekozen is, dat het extra-energie-verlies minimum is en dat bij verschillende machine-constanten $C = \frac{i_{m_v}'}{i_{m_0}}$.

Daartoe nemen wij aan:

$$r_v = \frac{1}{5} r_f, \quad b = 2,5, \quad h = 12, \quad i_{m_0} r_m = 150 \text{ Volt}, \quad x = 1 \text{ } \%.$$

$$H = 3,35 \text{ (gloeidraad, van Wolfram).}$$

C	q	η	ε
1,1	4,08	14,8	0,37
1,3	9,44	150	1,8
1,8	37,0	578	2,6

en in de tweede plaats bij dezelfde r_v en b doch bij $x = 2\%$ $h = 13$:

C	q	η	ε
1,1	2,23	3,8	0,54
1,3	5,09	23,2	2,6
1,8	11,05	120	8,2

De benodigde plaatstroom maar vooral het energie-verlies blijkt dus zeer sterk toe te nemen met den factor C .

Reeds bij $C = 1,8$ (in de praktijk komen nog belangrijk hogere waarden voor!) blijkt het energie-verlies reeds zóó hoog te zijn, dat er van praktische toepassing geen sprake kan zijn; zelfs niet bij de niet groote nauwkeurigheid van 2% .

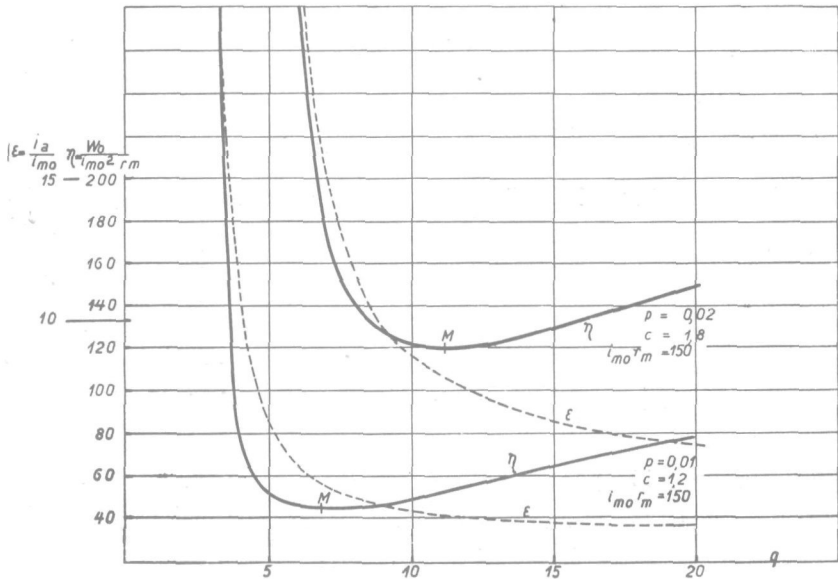


Fig. 20.

In fig. 20 vindt men voor twee bijzondere gevallen de krommen $\varepsilon = f(q)$ en $\eta = f(q)$ uitgezet.

Deze krommen toonen aan, dat bij waarden van q kleiner dan de waarde, waarbij W_0 minimum is, het energie-verlies al spoedig zeer snel stijgt, terwijl ook de diode-stroom dan snel toeneemt, zoodat de verhouding q dus in elk geval slechts weinig lager mag zijn dan die, waarbij het extra-energie-verlies minimum is.

Wanneer men gloeidraden gebruikt, die bij lagere temperatuur dan wolfram emitteeren, bijv. de z.g. oxyddraden, dan mag voor het getal H een hoogere waarde gekozen worden dan boven is aangenomen bijv. $H = 25$. Het energie-verlies der regeling wordt dan ook geringer bijv. bij $x = 1\%$, $C = 1,3$, $b = 2,5$, $r_v = \frac{1}{5} r_f$ en $h = 12$ is het energie-verlies minimum bij $q = 8,7$, terwijl dan $\eta = 103$. Bij gloeidraden van wolfram is in overigens gelijke omstandigheden

$$q = 9,44 \text{ en } \eta = 150.$$

De vermindering, die het energie-verlies ondergaat, is dus inderdaad belangrijk, doch lang niet voldoende om dit verlies terug te brengen tot een voor de praktijk toelaatbare waarde.

Wil men de beschreven spanningsregeling door dioden practisch toepassen, dan zal men dus wel degelijk bij de constructie der machine daarmede rekening moeten houden en moeten streven naar een lage C (weinig verzadigd magneetijzer) en een bepaalde verhouding tusschen e en $i_{m_0} r_m$.

Het blijft echter van belang uit te zien naar middelen ter verlaging van het energie-verlies der regeling vooral ook met het oog op de toepassing bij reeds bestaande machines.

§ 3. Over het toepassen van een „*compoundeeringsweerstand*”.

Evenals bij trioderegeling (zie p. 95 e.v.) kan men ook bij spanningsregeling door dioden gebruik maken van een z.g. *compoundeeringsweerstand*; door het spanningsverval in dezen weerstand, die in de ankerketen van den generator is opgenomen, wordt invloed uitgeoefend op de regeling.

Een schakeling, die bij gelijkstroomgeneratoren kan worden toegepast is in fig. 21 weergegeven.

Bij deze schakeling is de diode in serie met de veldwikkeling aangebracht, zoodat voor regeling op constante spanning de gloeistroom bij toeneming voor de belasting eveneens moet stijgen.

Voor de gloeistroomketen geldt de betrekking:

$$E \pm i_b r_b = i_f (r_{f_0} + r_v + r_b) \dots \dots \dots 1)$$

Het teeken vóór $i_b r_b$ hangt af van de wijze van aansluiting van de gloeistroomketen aan den weerstand r_b .

Bij nullast is:

$$E = i_{f_0} (r_{f_0} + r_v + r_b).$$

Bij vollast is:

$$E \pm i_{b_v} r_b = i_{f_v} (r_{f_v} + r_v + r_b).$$

Bij kleine variaties in den gloeistroom is nu volgens p. 19:

$$\frac{\Delta r_f}{r_f} = 0,68 \frac{\Delta i_f}{i_f}$$

zoodat de betrekking voor vollast ook als volgt geschreven kan worden, wanneer men het product $\Delta i_f \cdot \Delta r_f$ verwaarloost:

$$E \pm i_{b_v} r_b = i_{f_0} (r_{f_0} + r_v + r_b) + \Delta i_f (1,68 r_{f_0} + r_v + r_b).$$

Hieruit volgt:
$$\Delta i_f = \pm \frac{r_b}{1,68 r_{f_0} + r_v + r_b} \cdot i_{b_v} \dots \dots \dots 2)$$

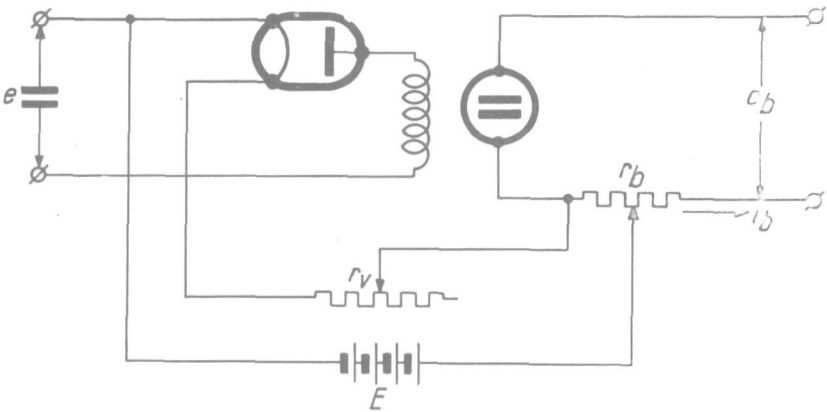


Fig. 21.

Bij de schakeling volgens fig. 21 moet nu Δi_f positief zijn, dus moet de gloeistroomketen zoodanig aan r_b worden aangesloten, dat $i_b r_b$ en E gelijkgericht zijn.

De grootte van Δi_f kan men blijkbaar door verandering van r_b naar wensch instellen. Door vergrooing van $i_b r_b$ wordt weliswaar de klemspanningsdaling verhoogd, en moet dus voor het constant houden daarvan de bekrachtiging sterker toenemen, maar aangezien als regel $e_b \gg e_f$ (bijv. $e_b = 220$ Volt, $e_f = 4$ Volt) is deze extra-verhoging van de bekrachtiging zeer gering en mag zij in eerste instantie verwaarloosd worden.

Men kan dus bijv. aan Δi_f een zoodanige waarde geven, dat de dynamo spanning bij nullast en vollast volkomen dezelfde waarde heeft.

Men kan ook door r_b grooter te nemen dan in het laatstgenoemde geval de dynamospanning bij vollast hooger doen zijn dan bij nullast, hetgeen bijv. gewenscht kan zijn om op een van den generator verwijderd punt een constante netspanning te verkrijgen.

Is de regelende diode niet in serie, zooals in fig. 21, doch parallel aan de veldwikkeling aangebracht, dan moet voor regeling op constante spanning de anodestroom dus ook de gloeistroom bij afnemende belasting kleiner worden.

De gloeistroomketen moet dus zoodanig aan r_b worden aangesloten, dat $i_b r_b$ tegengesteld gericht is aan E , zoodat in de betrekking 2) het minus teeken geldt.

Ook bij deze schakeling heeft men het blijkbaar door instelling van den weerstand r_b in de hand aan Δi_f een willekeurige waarde te geven. Men kan dus de dynamospanning bij nullast en vollast volkomen dezelfde waarde geven of wel men kan de dynamospanning bij toenemende belasting doen stijgen.

Bij toenemen van de belasting boven vollast, zooals bijv. bij kortsluiting van den generator het geval is, neemt de absolute waarde van Δi_f verder toe en daar Δi_f negatief is, kan dit zoover voortschrijden, dat de gloeistroom door nul gaat en van teeken omkeert, zoodat de emissie eerst afneemt tot nul en vervolgens weer opnieuw optreedt.

Men kan de schakeling dus zoodanig inrichten, dat tusschen nullast en vollast de generatorspanning door toename van de bekrachtiging constant blijft, maar bij sterke overbelasting bijv. bij kortsluiting de bekrachtiging afneemt. Door deze wijze van regeling wordt dan de *kortsluitenergie verminderd*.

Over het algemeen hebben spanningsregelaars de eigenschap van het nog hooger opvoeren der bekrachtiging, wanneer er overbelasting optreedt, zoodat door den regelaar de korsluitenergie wordt verhoogd. In verband hiermede heeft men speciale kortsluitregelaars in den handel gebracht, welke bij het optreden van kortsluiting de bekrachtiging omlaag brengen.

Bij het beschreven regelingssysteem door dioden echter wordt het verminderen van de kortsluitenergie langs eenvoudigen weg bereikt.

Een ander voordeel van het, in deze paragraaf beschreven regelingssysteem is, dat de verhouding tusschen i_a en i_{m_0} en daarmede ook het extra-energie-verlies der regeling belangrijk lager kan zijn dan het geval is bij de in § 2 beschreven methode.

Op p. 114 hebben wij van de verhouding $\varepsilon = \frac{i_a}{i_{m_0}}$ de volgende betrekking afgeleid:

$$\varepsilon = \frac{q \left\{ C \left(1 - b \frac{x}{100} \right) - 1 \right\}}{(q - 1) \alpha h \frac{x}{100} - \left\{ C \left(1 - b \frac{x}{100} \right) - 1 \right\}}.$$

De beteekenis der verschillende constanten vindt men op p. 114. Wordt op overeenkomstige wijze als in § 2 p. 112—114 de betrekking voor ε afgeleid voor het geval, dat er een compoudeeringsweerstand is, dan vindt men:

$$\varepsilon = \frac{q \left\{ C \left(1 - b \frac{x}{100} \right) - 1 \right\}}{-(q - 1) h \frac{\Delta i_f}{i_{f_0}} - \left\{ C \left(1 - b \frac{x}{100} \right) - 1 \right\}}$$

terwijl volgens betrekking 2):

$$\frac{\Delta i_f}{i_{f_0}} = - \frac{i_{b_v} r_b}{i_{f_0} (1,68 r_{f_0} + r_v + r_b)}.$$

In plaats van $\alpha h \frac{x}{100} = \frac{\Delta i_a}{i_a}$ staat dus nu in den noemer — $h \frac{\Delta i_f}{i_{f_0}} = \frac{\Delta i_a}{i_a}$, doch overigens komen de beide betrekkingen, wanneer ook de regelingsnauwkeurigheid x gelijk genomen wordt, geheel met elkaar overeen. Aangezien nu bij aanwezigheid van een compoudeeringsweerstand de verhouding $\frac{\Delta i_f}{i_{f_0}}$ desgewenscht grooter gekozen kan worden dan $\alpha \frac{x}{i_{f_0}}$, volgt hieruit, dat bij de regelingsmethode volgens deze paragraaf de verhouding ε lager kan zijn dan bij de methode volgens § 2.

De hoogste waarde, welke practisch aan Δi_f gegeven kan worden is die, waarbij de anode stroom varieert van een zekere toelaat-

bare waarde bij nullast tot nul bij vollast. Bij die maximale waarde van Δi_f is de verhouding $\varepsilon = \frac{\Delta i_a}{i_{m_0}}$ minimum en is dientengevolge ook het extra-energie-verlies der regeling op het kleinst (zie de vergelijking op p. 115).

Stelt men de regeling in dit geval zoodanig in dat $x = 0$ (generatorspanning bij vollast = generatorspanning bij nullast) dan gaat de betrekking voor ε over in de volgende:

$$\varepsilon = \frac{q(c-1)}{q-c}, \text{ immers } \Delta i_a = -i_a$$

dus:

$$h \frac{\Delta i_f}{i_{f_0}} = \frac{\Delta i_a}{i_a} = -1.$$

Het extra-energieverlies der regeling bedraagt bij nullast:

$$W_0 = e(i_a + i_{m_0}) - r_m i_{m_0}^2 + \frac{r_v + r_f + r_b}{r_f} \frac{1000 i_a}{H}$$

r_b mag als regel verwaarloosd worden ten opzichte van $r_v + r_f$, daar $i_b \gg i_f$, terwijl $i_b r_b$ als regel kleiner is dan $e_f = i_f r_f$.

Bij $q = 3$, $C = 1,8$, $r_v = 1/5 r_f$, $H = 3,35$, $i_{m_0} r_m = 150$ V. is derhalve

$$i_a = 2 i_{m_0}$$

en

$$W_0 = 12,8 i_{m_0}^2 r_m \text{ of } 3,2 i_{m_0}^2 r_m.$$

Vergelijkt men deze waarden met de waarden gevonden op p. 116 voor $\varepsilon = \frac{i_a}{i_{m_0}}$ en $\eta = \frac{W_0}{i_{m_0}^2 r_m}$, wanneer de gloeistroom alleen onder invloed staat van de klemspanning, doch waarbij overigens de omstandigheden dezelfde zijn, dan blijkt daaruit ten duidelijkste de belangrijke vermindering in energie-verlies, die optreedt wanneer men gebruikt maakt van een compoudeeringsweerstand.

Zoals uit het voorgaande reeds is gebleken, kan men aan $i_b r_b$ een zoodanige richting ten opzichte van E geven, dat bij toenemende belasting de bekrachtiging afneemt, dus de klemspanningsdaling grooter wordt dan zonder regeling het geval is. Dit principe kan men toepassen voor *regeling op constanten stroom*.

Naast de voordeelen, die wij opsomden, heeft de thans beschreven regelingsmethode het nadeel, dat zij minder nauwkeurig is, dan die, waarbij de gloeistroom door de klemspanning zelve geregeld wordt.

Wanneer men de regeling door een compoudeeringsweerstand, zoodanig instelt, dat de klemspanning bij nullast en vollast geheel dezelfde waarde heeft, zal deze bij tusschenliggende belastingen in den regel iets boven de normale waarde liggen. Dit is te verwachten, aangezien noch de emissie noch de veldstroom lineair met de belasting veranderen.

Een tweede aanleiding tot een geringere nauwkeurigheid der regeling is gelegen in het feit, dat de klemspanningsvariates, die niet door belastingsveranderingen maar door andere oorzaken bijv. door toerenvariates van den generator optreden, niet of slechts gedeeltelijk worden bijgeregeld.

Dit ziet men als volgt in:

De klemspanning blijft constant tusschen nullast en vollast, doordat het spanningsverval in den compoudeeringsweerstand verandert van 0 tot de waarde $i_{bv} r_v$. Wanneer nu bij een bepaalden belastingstoestand het toerental varieert bijv. met 2% , dan zal de klemspanning hierdoor à priori eveneens 2% variereen en daarmede ook de belastingsstroom.

De variatie in $i_b r_b$ bedraagt dus ook slecht 2% en de verandering, die hierdoor te voorschijn wordt geroepen in den veldstroom is dus in elk geval klein ten opzichte van de verandering in den veldstroom, die noodig is om de klemspanningsdaling tusschen nullast en vollast weg te werken, d.w.z. de klemspanningsverandering, die is opgetreden door de toerenvariatie, wordt slechts voor een deel bijgeregeld.

Bij spanningsregeling aan *wisselstroomgeneratoren* kan men eveneens van een compoudeeringsweerstand gebruik maken. De schakeling volgens fig. 22 kan hiervoor worden toegepast. Wanneer er geen fase-verschuiving optreedt tusschen klemspanning en belastingsstroom, zooals bijv. het geval is, wanneer de generator uitsluitend voor verlichtingsdoeleinden wordt gebezigd, dan komt het regelingsstelsel in hoofdzaak overeen met het overeenkomstige stelsel bij gelijkstroomgeneratoren. Er is alleen dit principieele verschil, dat de constante spanningsbron E in de gloeistroomkring vervangen is door de veranderlijke secundaire spanning van een gloeistroomtransformator, welke primair op den generator is aangesloten.

Bij den wisselstroomgenerator heeft men een gemengde regeling, doordat de gloeistroom zoowel door de klemspanning (via den

gloeistroomtransformator) als rechtreeks door den belastingsstroom (via r_b) geregeld wordt.

Wil men echter een laag energie-verlies bereiken, dan moet men het verschil tusschen den plaatstroom bij nullast en vollast groot maken, d.w.z. men moet de regeling in hoofdzaak doen plaats vinden door den compoundingweerstand en dan komt het systeem principieel overeen met dat bij gelijkstroomgeneratoren.

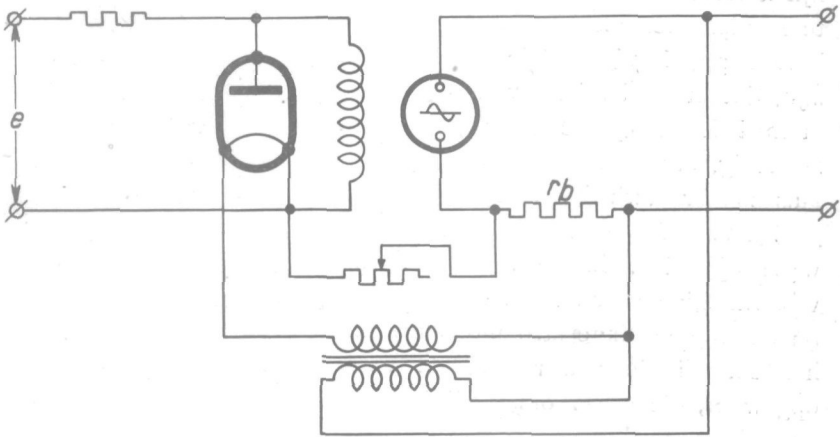


Fig. 22.

De opmerkingen, welke bij gelijkstroomgeneratoren gemaakt zijn, gelden in dit geval ook hier.

De waarde van den bekrachtigingsstroom, die noodig is om de klemspanning van een wisselstroomgenerator constant te houden hangt af van de fase-verschuiving der belasting. Bij een belasting met $\cos \varphi = 0,8$ naijend is bijv. de vereischte bekrachtigingsstroom belangrijk hooger dan bij een belasting met $\cos \varphi = 1$. Daarom kan de schakeling volgens fig. 22 in het algemeen niet worden toegepast bij veranderlijke $\cos \varphi$ der belasting, wanneer men de regeling in hoofdzaak doet plaats vinden door r_b . De toepassing is wel mogelijk wanneer de regeling slechts voor een klein deel door de verandering van $i_b r_b$ wordt bewerkstelligd, doch ook in dat geval blijft de fase-verschuiving eenigen invloed uitoefenen op de grootte van de klemspanning.

Wanneer de verlangde regelingsnauwkeurigheid niet hoog is, bijv. een paar $\%$, zoals bij technische toepassing dikwijls

kan voorkomen, dan kan men met de beschreven regelingsmethode door middel van een compoundeeringsweerstand goede resultaten bereiken. Desgewenscht kan men den compoundeeringsweerstand door een stroomtransformator vervangen.

§ 4. *Middelen ter verhooging van de bedrijfszekerheid.*

Hoewel een goed geconstrueerde ontladingsbuis een zeer behoorlijken levensduur kan hebben, is het niettemin raadzaam rekening te houden met het feit, dat deze levensduur niet oneindig groot is.

Een regelingsinstallatie met ontladingsbuizen dient dus zóó te zijn, dat het uitvallen van een ontladingsbuis geen nadeeligen invloed heeft op de te regelen machine en bij voorkeur tevens zóódanig, dat de regeling ook bij het uitvallen van een ontladingsbuis zonder merkbare vertraging onveranderd voortgaat.

Een nadeeligen invloed op de te regelen machine kan op tweeërlei wijze optreden. Is de regelende ontladingsbuis in serie met de veldwikkeling geschakeld, dan zou het plotseling weigeren van de buis een plotselinge stroomonderbreking in de veldketen tengevolge hebben. Hierdoor wordt in de veldwikkeling een overspanning opgewekt, die onder omstandigheden kan leiden tot doorslag van de isolatie. Is de regelende ontladingsbuis parallel geschakeld met de veldwikkeling en zou deze uitvallen, dan zou plotseling de bekrachtiging omhoog loopen en de generatorspanning hooger worden, waardoor niet alleen de generator zelf, maar ook de door deze gevoede verbruiksapparaten in gevaar kunnen komen.

Een zeer eenvoudig middel ter verhooging der bedrijfszekerheid bestaat nu daarin, dat men een aantal ontladingsbuizen parallel schakelt, waardoor het bijkomstige voordeel ontstaat, dat men groote stroomen bij lage spanningen gemakkelijker met een aantal parallel geschakelde kleine lampen dan met één groote lamp kan leveren.

Het plotseling uitvallen van één der parallel geschakelde ontladingsbuizen zal als regel op de regeling een nauwelijks merkbaren invloed hebben: de overblijvende buizen worden automatisch iets zwaarder belast.

Wanneer bijv. de spanning van een generator constant gehouden wordt door een aantal dioden, die parallel geschakeld zijn aan de veldwikkeling, terwijl een gemeenschappelijke weerstand met het veld en de dioden in serie is aangebracht, dan zal bij het weigeren

van één diode de bekrachtiging in eerste instantie toenemen en daarmee ook de generatorspanning stijgen. Dientengevolge wordt echter ook de gloeistroom der overblijvende dioden hoger, zoodat deze meer gaan emitteeren, de bekrachtiging weer daalt en de klemspanning weer nagenoeg tot de uitgangswaarde wordt teruggebracht.

Is het aantal parallel geschakelde ontladingsbuizen groot genoeg (bijv. zes) dan zal ook het uitvallen van een tweede lamp geen hinderlijken invloed hebben op de regeling. De overblijvende lampen worden echter weer zwaarder belast en zou door het uitvallen van nog één lamp deze belasting verder toenemen, dan kan de levensduur der overblijvende lampen zooveel korter worden, dat de geheele regelingsinstallatie in gevaar komt.

Het is dan ook van belang, dat het uitvallen van een ontladingsbuis zoo spoedig mogelijk ontdekt wordt, zoodat de defecte lamp door een nieuwe kan worden vervangen. Dit nu is gemakkelijk te bereiken, door in serie met elke ontladingsbuis een indicatie-lampje aan te brengen. Het zichtbaar oplichten van een lampje moet dan een bewijs zijn voor het intact zijn der overeenkomstige ontladingsbuis. Bij voorkeur wordt het indicatielampje aangebracht in de plaatketen niet in de gloeidraadketen, daar het bij gloeidraden met oxyd-kathode regel is, dat de ontladingsbuis haar emissie verliest alvorens de gloeidraad doorbrandt.

Een dergelijk lampje kan tevens dienen als veiligheid.

Men kan ook ter verhooging van de bedrijfszekerheid aan elke bedrijfs-lamp een reserve-lamp parallel schakelen op de wijze als is aangegeven in fig. 23. De werking dezer schakeling is er op gebaseerd, dat de ontladingsbuis aan haar einde komt, doordat de gloeidraad doorbrandt; bij ontladingsbuizen met een gloeidraad van wolfram is dit inderdaad het normale geval.

De grootte van de weerstanden r_1 , r_2 en van het indicatie-lampje S wordt zóó gekozen, dat bij het functionneeren van de bedrijfs-diode 1 de reserve diode 2 niet of nagenoeg niet emitteert. Als reserve-lamp is de levensduur van de diode 2 zeer groot, zoodat het totale verbruik aan dioden door deze schakeling practisch niet grooter wordt. Valt de diode 1 uit door het doorbranden van een gloeidraad, dan neemt automatisch de stroom door den gloeidraad 2 toe en bij oordeelkundige keuze van de grootte der weerstanden

zal dit juist zooveel zijn, dat de reserve-diode de emissie van de bedrijfsdiode overneemt.

Door het niet meer oplichten van het lampje S wordt men het uitvallen van de bedrijfsdiode I gewaar en de defecte lamp wordt zoo spoedig mogelijk door een nieuwe vervangen.

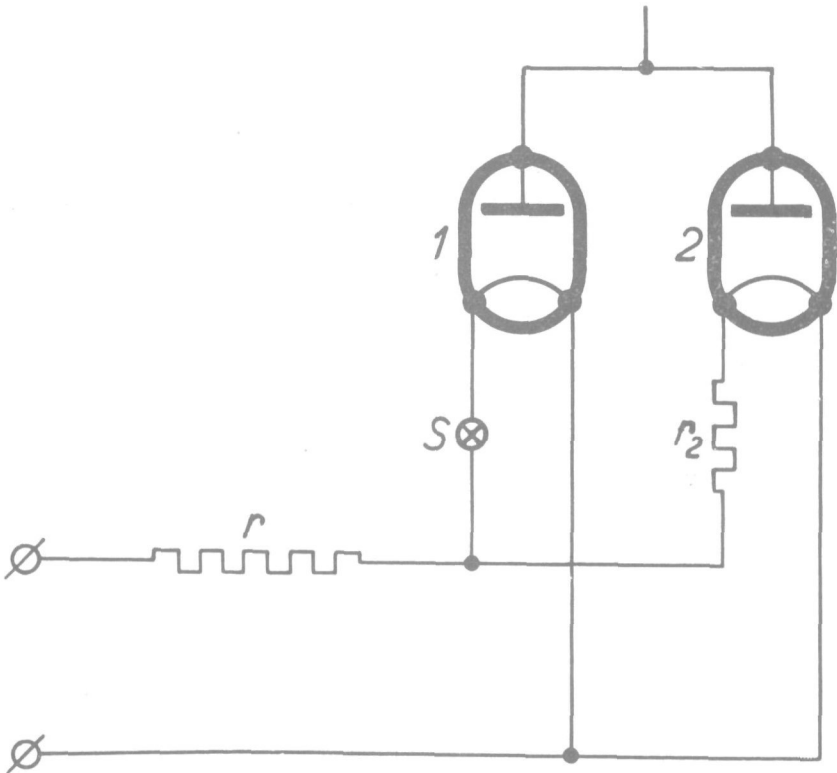


Fig. 23.

De middelen ter verhooging van de bedrijfszekerheid in deze paragraaf beschreven kunnen zoowel bij regeling door dioden als bij regeling door trioden worden toegepast.

§ 5. *Practisch voorbeeld van spanningsregeling door dioden.*

In fig. 24 is het schakelschema weergegeven van een regelingsinstallatie met dioden bestemd voor het regelen van de spanning van een eenfaze wisselstroom generator van 380 V, 100 kVA

50 \sim , welke via een transformator T met een secundaire spanning van 130 Volt stroom levert aan een elektrische boogoven voor het smelten van ijzer.

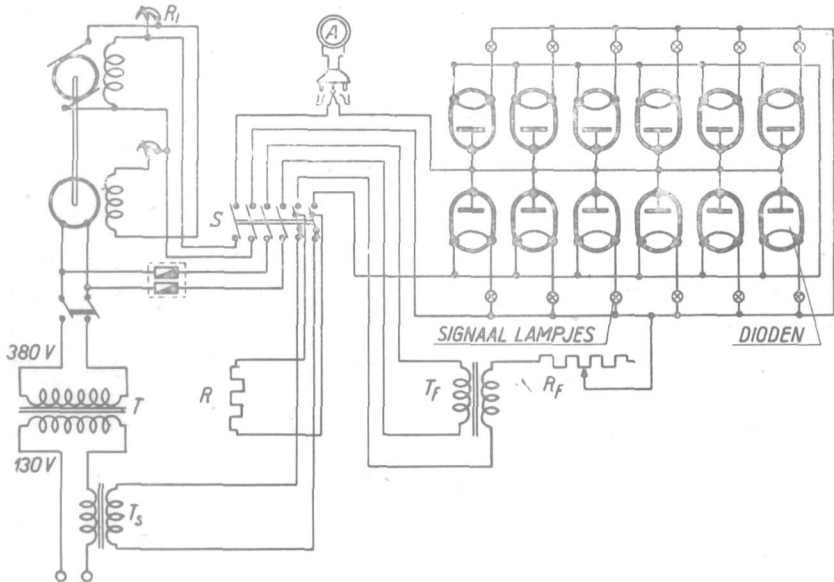


Fig. 24.

De bekrachtiging van den generator wordt geleverd door een opwekdynamo, die in den geteekenden stand van den zespoligen schakelaar S zich zelf bekrachtigt over den regelbaren shuntweerstand R .

In dezen stand van S is de weerstand R op de secundaire wikkeling van den stroomtransformator T_s aangesloten om te voorkomen, dat bij open secundaire kring de spanning van dezen transformator te hoog zou oploopen.

In den anderen stand van S is de diode-spanningsregelaar ingeschakeld. De onderling parallel geschakelde dioden staan dan parallel op de veldwikkeling van de opwekdynamo; de gloeidraden worden gevoed door een gloeistroomtransformator T_f , die primair op de generatorspanning is aangesloten. In de secundaire kring van dezen transformator bevinden zich behalve de onderling parallel geschakelde gloeidraden, met de bijbehorende signaal-

lampjes een gloeistroomregelweerstand R_f en de secundaire wikkeling van den stroomtransformator T_s . Deze transformator is zoodanig geschakeld en gedimensioneerd, dat bij toenemende belasting van den generator de gloeistroom eerst afneemt en vervolgens weer toeneemt. De regeling draagt dus het karakter beschreven in hoofdstuk VI § 3 (zie vooral p. 117, 119 en 121).

Fig. 25 is een foto van twee dergelijke installaties, in een kast gecombineerd en opgesteld in een ijzersmelterij der N.V. Philips Radio te Eindhoven.

Het doel der regeling is in de eerste plaats begrenzing van de kortsluitenergie, in de tweede plaats is het van belang de klemspanningsdaling tot aan de normale volle belasting te verminderen.

Bij het bedrijven van elektrische boogovens komen hevige kortsluitingen vooral bij het begin van het smeltproces menigvuldig voor, zoodat het begrenzen van de kortsluitenergie hier van het grootste belang is.

In fig. 26 zijn twee karakteristieken, die met en zonder diode-regeling verkregen kunnen worden, weergegeven. Men ziet, dat bij

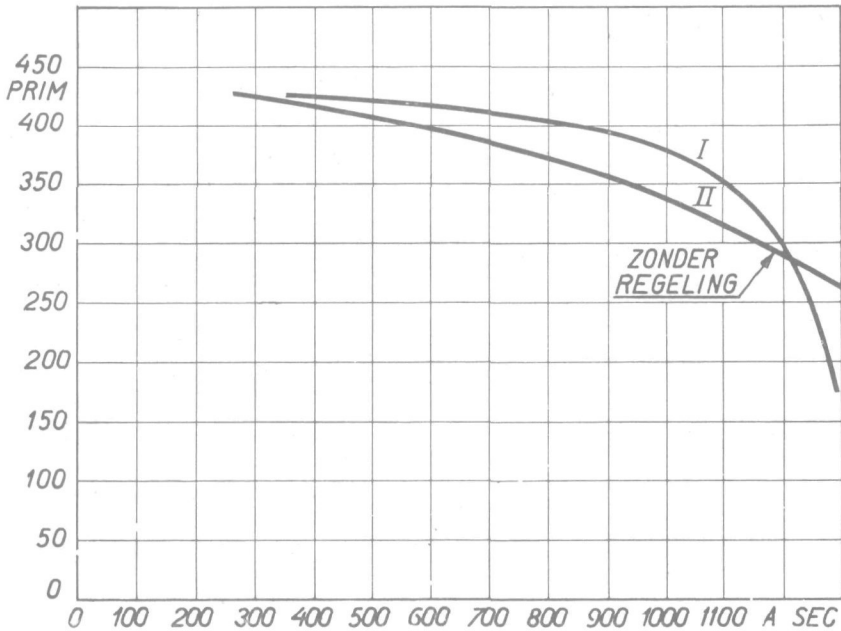


Fig. 26.

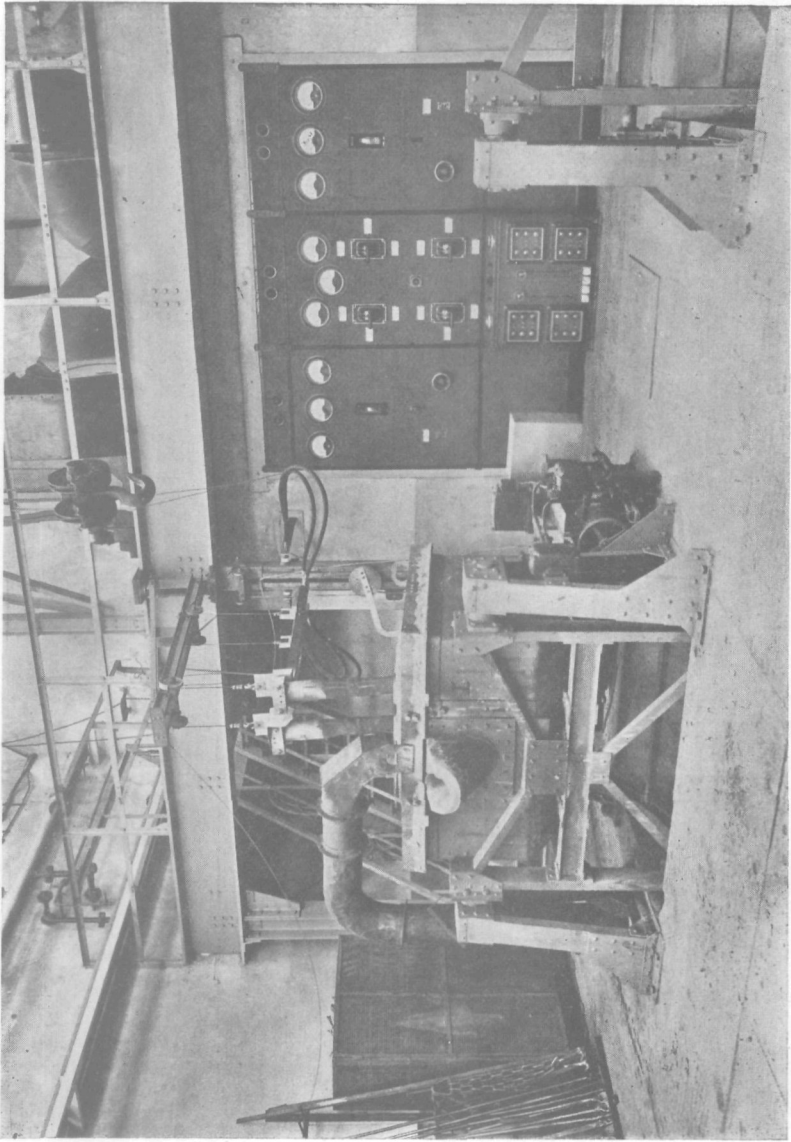
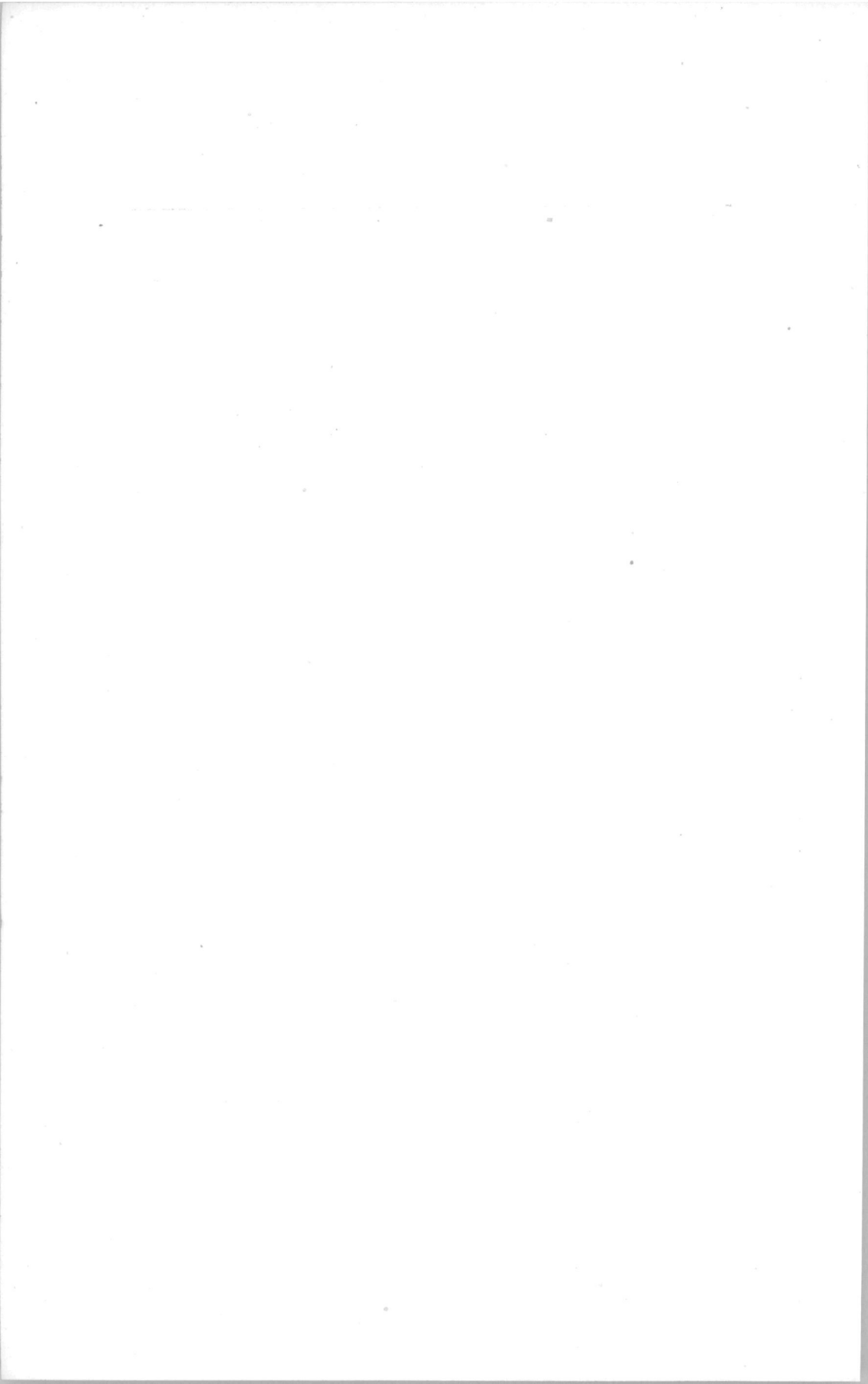


Foto Fig. 25.



kromme I (met regeling) de daling boven de normale volle belasting veel grooter is dan normaal, terwijl de kromme bovendien het voordeel heeft, dat tot ca 1000 A. de spanningsdaling minder dan normaal is (terwijl bij 1000 A. de spanning aan de generatorzijde nog bijna 50 V. hooger is dan normaal, is zij bij 1200 Amp. al beneden de normale waarde gedaald). Men heeft dus ten eerste het voordeel van een lagere kortsluitenergie en ten tweede is de nullastspanning met regeling belangrijk lager dan zonder regeling.

Het aantal parallel geschakelde dioden, van het type beschreven op p 22, bedraagt hier 12. De totale plaatstroom bij vollast bedraagt ongeveer 0,5 Amp. bij 50 V, zoodat de dioden weinig belast zijn en een langen levensduur hebben. Bij hevige kortsluitingen loopt de plaatstroom op tot ongeveer 2 Amp.; de dioden zijn dan zwaar belast; daar de periode van kortsluiting altijd gering is, heeft dit geen belangrijke verkorting van den levensduur tengevolge.

HOOFDSTUK VII.

SPANNINGSREGELING AAN GENERATOREN MET OPWEKDYNAMO.

§ 1. *Plaatstroom en energie-verlies bij regeling aan generatoren met opwekdynamo.*

Het vermogen van een opwekdynamo is een klein gedeelte van het vermogen van den generator. Bij wijze van voorbeeld willen wij noemen, dat bij een modern geconstrueerd aggregaat van 100 K.W. het vermogen van de opwekdynamo 1 — 2% van het vermogen van den generator bedraagt. De energie, die noodig is voor de bekrachtiging van den opwekker is een klein gedeelte van het vermogen van den opwekker, en wanneer er dus geregeld kan worden in de veldketen van een opwekker, zal de vereischte plaatstroom en het energie-verlies der regeling alleen reeds om deze reden belangrijk lager zijn dan wanneer geregeld wordt direct in de veldketen van den generator.

De regeling wordt nu verder vergemakkelijkt, doordat de klemspanning van de opwekdynamo evenredig toeneemt met de stroomlevering aan de bekrachtigingswikkeling van den hoofdgenerator. De verandering van den weerstand in de veldketen van den opwekker, die voor de regeling noodig is, is n.l. veel minder groot dan wanneer bij vreemde bekrachtiging de spanning aan de veldketen constant is.

Wij kunnen dit als volgt gemakkelijk inzien:

Noemen wij den totalen weerstand in de veldketen van den opwekker r , de spanning aan den opwekker e en den veldstroom i_m , dan is bij nullast:

$$e_0 = r \cdot i_{m_0} \quad (\text{zie voor de notaties p. 131})$$

Bij vreemde bekrachtiging van den opwekker blijft e_0 constant en is dus bij nullast:

$$e_0 = r' \cdot i_{m_0}$$

De verandering van den weerstand in de veldketen bedraagt dus:

$$\Delta r' = \frac{e_0}{i_{m_0}} - \frac{e_0}{i_{m_v}}$$

Bij zelfbekrachtiging van den opwekker is bij vollast:

$$e_v = r'' \cdot i_{m_v}$$

dus

$$\Delta r'' = \frac{e_0}{i_{m_0}} - \frac{e_v}{i_{m_v}}$$

Aangezien nu $e_v > e_0$ is dus $\Delta r'' < \Delta r'$ d.w.z. de verandering van den weerstand in de veldketen is kleiner bij eigen-bekrachtiging dan bij vreemde bekrachtiging van de opwekdynamo.

Wanneer de spanning aan den opwekker evenredig veranderde met den veldstroom zou zelfs $\Delta r'' = 0$ zijn; practisch komt dit niet voor en neemt altijd de klemspanning in mindere mate toe dan de veldstroom en wel eendeels tengevolge van het remanent magnetisme, anderdeels door de verzadiging van het magneetijzer van den opwekker.

De grootte der weerstandsverandering in de veldketen zal mede afhangen van de verzadiging van het ijzer van den opwekker, zoodat dus de verzadiging van invloed is op de regeling.

Wij zullen dit nader beschouwen en veronderstellen daartoe, dat de dioden zijn parallel geschakeld aan de veldwikkeling van den opwekker, zooals in fig. 27 is weergegeven en voeren de volgende notaties in:

Spanning	opwekdynamo	bij nullast	= e_0
"	"	"	vollast = e_v
Veldstroom	"	"	nullast = i_{m_0}
"	"	"	vollast = i_{m_v}
Plaatstroom	dioden	"	nullast = i_{a_0}
"	"	"	vollast = i_{a_v}
Weerstand	veldwikkeling	opwekker	= r_m
Weerstand,	voorgeschakeld	aan de	
parallel	geschakelde	veldwikkeling	en
dioden			= r_v

Wij veronderstellen, dat $e_v = c e_0$

$$i_{m_v} = a c i_{m_0}$$

($a > 1$ en afhankelijk van de verzadiging van de opwekdynamo),

en zullen nu nagaan aan welke voorwaarden de factor a moet voldoen, om een praktisch bruikbare regeling te verkrijgen.

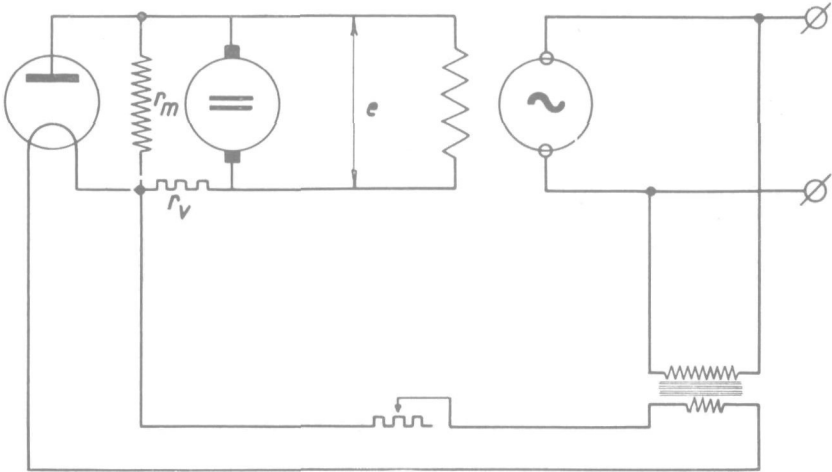


Fig. 27.

Voor de veldketen van de opwekdynamo gelden de volgende betrekkingen:

1. Nullast: $e_0 = r_v (i_{m_0} + i_{a_0}) + i_{m_0} r_m$.
 2. Vollast: $e_v = r_v (i_{m_v} + i_{a_v}) + i_{m_v} r_m$.
- of:
- $$c e_0 = r_v (a c i_{m_0} + i_{a_v}) + i_{m_v} r_m$$

Stel $e_0 = q i_{m_0} r_m$ en neem aan, dat onder invloed van de klemspanningsverandering van den hoofdgenerator i_a zoodanig varieert dat $i_{a_v} = b c i_{a_0}$, dan volgt uit 1) en 2) de volgende betrekking tusschen den plaatstroom en den veldstroom bij nullast van den hoofdgenerator:

$$\frac{i_{a_0}}{i_{m_0}} = \frac{q(a-1)}{(q-a) - b(q-1)} \dots \dots \dots 3)$$

Voor een praktisch bruikbare regeling mag de verhouding $\Sigma = \frac{i_{a_0}}{i_{m_0}}$ niet veel grooter zijn dan 1, aangezien anders het diodeverbruik en het energie-verlies der regeling te groot wordt.

Uit de uitdrukking, die wij voor Σ hebben afgeleid blijkt, dat bij afnemende a ook de verhouding Σ afneemt, zoodat het dus gunstig is, dat a dicht bij de eenheid ligt, d.w.z. dat de opwekdynamo weinig verzadigd is.

Om te verkrijgen, dat $\Sigma = 1$ moet $a = \frac{2q - b(q - 1)}{q + 1}$.

Wanneer de gloeistroom der dioden onder invloed staat van de klemspanning vanden hoofdgenerator, zooals in fig. 27 is weergegeven, en de dioden in het verzadigingsgebied fungeeren, is $i_{a_v} \cong i_{a_0}$ en

derhalve $bc \cong 1$, zoodat dan voor $\Sigma = 1$ volgt: $a \cong \frac{2q - \frac{q-1}{c}}{q + 1}$.

Aan deze voorwaarden nu kan practisch worden voldaan.

Bijvoorbeeld bij $q = 2, c = 2$ is $a = 1,17$

$q = 2, c = 3$ is $a = 1,22$

Wanneer men er in slaagt $\Sigma \leq 1$ aan te houden, dan is de benoedigde diode-energie inderdaad zeer gering. Het vermogen van een opwek-dynamo varieert van 1 tot 5 % van het generatorvermogen (het kleinere percentage geldt voor de groote machines) terwijl de veldenergie van den opwekker bij nullast eveneens hoogstens 1 tot 5 % van het vermogen van den opwekker bedraagt. (Het kleinere percentage geldt voor de grootere machines). De diode-energie bedraagt dus:

bij kleine machines minder dan 1/400 van het generatorvermogen;

bij groote machines minder dan 1/10000 van het generatorvermogen.

Bij een omvormer van 100 kVA behoeft de diode-energie dus slechts ca 10 W. te bedragen. Practisch hebben wij b.v. gevonden bij regeling van twee omvormers van resp. 100 en 300 kVA van het electriche bedrijf der N.V. Philips Gloeilampenfabrieken dat de diode-energie slechts 20 resp. 40 W. bedraagt voor spanningsregeling op 1/4 % nauwkeurig.

§ 2. Verloop der regeling.

Wat het verloop der regeling bij aanwezigheid van een opwekdynamo betreft, kunnen wij wijzen op eenige *principieele verschillen* ten opzichte van de regeling direct in de veldketen van den generator en bij vreemde bekrachtiging van den laatste.

In de eerste plaats is er bij regeling in de veldketen van een opwekker een grootere relaxatie tusschen de verandering in de generatorspanning en het veranderen van den stroom in de veld-

keten, in hoofdzaak tengevolge van de traagheid van de veldwikkeling van de opwekdynamo.

In de 2^e plaats onderscheidt de regeling in de veldketen van een opwekdynamo zich door een groote gevoeligheid, wanneer het magneetijzer van den opwekker vrijwel onverzadigd is en derhalve de spanning van den opwekker vrijwel lineair verandert met den stroom in de veldwikkeling.

In hoofdstuk III en IV hebben wij gezien, dat zoowel bij triode- als bij diode-regeling vergrooting der gevoeligheid en vergrooting van de traagheid in de veldketen de kans op labiliteit of periodiciteit verhoogt. Er is in dit geval dus meer kans op labiliteit of op periodiciteit dan wanneer er geen opwekdynamo is; labiliteit der regeling zal men naar analogie van hetgeen gevonden is bij regeling zonder opwekdynamo eerder verwachten *bij diode dan bij triode-regeling*.

Wij zullen dit verschijnsel hier niet verder theoretisch nagaan, doch geven een practisch voorbeeld van de juistheid onzer gevolgtrekkingen.

Een eenfaze-wisselstroomgenerator 220 V 3 kVA . 50 \sim wordt bekrachtigd door een op dezelfde as geplaatste opwekdynamo. Wanneer de weerstand tusschen de opwekdynamo en het veld van den generator is kortgesloten, zijn de gegevens van den opwekker als volgt:

Bij nullast:	$i_{m_0} = 57 \text{ mA.}$
	$e_0 = 78 \text{ V.}$
Bij vollast:	$i_{m_v} = 74 \text{ mA.}$
	$e_v = 98 \text{ V.}$
zoodat	$e_v = 1,25 e_0.$
	$i_{m_v} = 1,30 i_{m_0}.$
en	$a = \frac{1,30}{1,25} = 1,04.$

De factor a verschilt dus zeer weinig van 1. Inderdaad blijkt bij nameting de nullastkarakteristiek in dit gebied lineair te zijn; het ijzer is onverzadigd; $a > 1$ door het remanent magnetisme.

De spanning van dezen generator wordt nu geregeld door 6 dioden van het type, beschreven op p. 22, die parallel aan de veldwikkeling van den opwekker zijn aangebracht en waarvan de gloeidraden

worden gevoed door een gloeistroomtransformator, die primair op de generatorspanning is aangesloten. De nauwkeurigheid der regeling blijkt nu $\pm 0,5\%$ te zijn, terwijl de generatorspanning langdurig om de nieuwe eindwaarde slingert. Maakt men de regeling gevoeliger door b.v. meer dioden parallel te schakelen, dan wordt het slingeren van de generatorspanning sterker; boven een zekere grens gaat de generatorspanning zelfs heftige continue slingeringen vertoonen, (labiliteit).

In de tweede plaats is de spanningsregeling door ons uitgevoerd met trioden. Daartoe worden 6 trioden *B* 403 parallel aan de veldwikkeling aangebracht; de generatorspanning wordt gelijkgericht en de spanningsvariaties, versterkt door één trap weerstandsversterking, op de roosters der eindtrioden overgebracht. Terwijl thans de nauwkeurigheid der regeling 1% blijkt te zijn, dus de regeling gevoeliger is dan met de dioden en weer geregeld wordt met practisch onverzadigd magneetijzer ($\alpha \cong 1,04$), wordt desniettemin de eindwaarde van de generatorspanning sneller bereikt. De slingeren in de generatorspanning zijn veel minder hevig en sneller weggedempt dan het geval is bij de minder nauwkeurige regeling door dioden.

HOOFDSTUK VIII.

OVER EENIGE BIJZONDERE GEVALLEN VAN REGLING AAN GENERATOREN EN MOTOREN.

§ I. *Over cos φ -regeling.*

Zooals bekend is, kan men bij synchrone motoren de faseverschuiving tusschen de netspanning en den motorstroom regelen door de sterkte van den bekrachtigingsstroom te wijzigen.

Een dergelijke regeling kan b.v. worden toegepast bij synchrone motoren, die aan het einde van een lange luchtleiding zijn opgesteld, met het doel om ter plaatse de netspanning constant te houden. Vergrooting van de voorrijling van den motorstroom heeft stijging van de netspanning tengevolge (en omgekeerd), wanneer dus de bekrachtiging in afhankelijkheid van de netspanning wordt geregeld, heeft men hiermede een regeling van de netspanning in de hand.

Synchrone motoren zijn in den regel voorzien van eigen opwekdynamo's, zoodat geregeld kan worden in de veldketen van de laatste; de te regelen energie kan ook bij groote motoren gering zijn, zoodat aan de toepassing van ontladingsbuizen gedacht kan worden.

Zoowel bij toepassing van dioden als van trioden zijn de schakelingen in principe gelijk aan die, welke b.v. in de hoofdstukken III en IV beschreven zijn. Bij dioden laat men den gloei-stroom afhangen van de netspanning, bij trioden zal men een of meer versterkertrappen toepassen en de roosterspanning van de eerste triode afhankelijk maken van de netspanning; de aldus door de netspanning geregelde ontladingsbuizen kunnen hetzij parallel of in serie met de veldwikkeling worden aangebracht en den bekrachtigingsstroom van de opwekdynamo regelen.

Cos φ -regeling wordt ook wel toegepast om synchrone motoren te beschermen tegen overbelasting en tevens tot verbetering van den arbeidsfactor te gebruiken.

De bekrachtiging van den motor wordt zoodanig ingesteld, dat bij de gemiddelde belasting de motorstroom een zekere voorijling vertoont; voorts wordt de bekrachtiging zóó geregeld, dat bij toename van de belasting de voorijling afneemt en omgekeerd. Wanneer de belastingsschommelingen niet te groot zijn, kan men de regeling zóódanig instellen, dat de motor electricch steeds ongeveer volbelast is; bij dalende mechanische belasting van den motor werkt de motor in stijgende mate mee tot verbetering van den arbeidsfactor.

Regeling door middel van dioden is hier op haar plaats: de gloeistroom der dioden kan gemakkelijk afhankelijk gemaakt worden van den motorstroom.

§ 2. *Regeling van den belastingsstroom van generatoren.*

Van practisch belang kan het zijn, de kortsluitwaarde van den generator-stroom te verminderen door de bekrachtiging bij kortsluiting te doen afnemen. Wij hebben in hoofdstuk VI § 3 reeds aangetoond, dat een dergelijke regeling bij toepassing van dioden zeer goed mogelijk is, en wel zoodanig, dat de generatorspanning tusschen nullast en vollast constant gehouden wordt, doch bij overbelasting b.v. bij kortsluiting wordt verlaagd.

Wanneer men alleen als eisch stelt, dat bij kortsluiting of overbelasting de bekrachtiging verminderd wordt, kan men een schakeling toepassen, welke nog eenvoudiger is, dan de in hoofdstuk VI beschrevene. Voor een wisselstroomgenerator kan deze schakeling principieel worden uitgevoerd als in fig. 28 is weergegeven.

Met behulp van den weerstand R wordt de gloeistroom zoodanig ingesteld, dat bij volle belasting de diode nog juist niet emitteert. Bij overbelasting resp. kortsluiting neemt de gloeistroom toe en zal de diode stroom gaan doorlaten, waardoor de bekrachtiging wordt verminderd. Met voordeel kan men voor de diode in dit speciale geval een met gas gevulde ontladingsbuis toepassen. De constructie van een zoodanige buis kan n.l. zóó worden gekozen, dat tot een zekere grens in de verwarming van den gloeidraad er nog geen glimontlading optreedt. Boven die grens treedt een glimontlading op, welke bij voortschrijdende geringe vermeerdering van den gloeistroom in een boogontlading overgaat. Zoodra dit

laatste het geval is, is de weerstand, dien de ontladingsbuis representeert, zeer gering en wordt derhalve de bekrachtiging van den generator in zeer sterke mate omlaag gebracht.

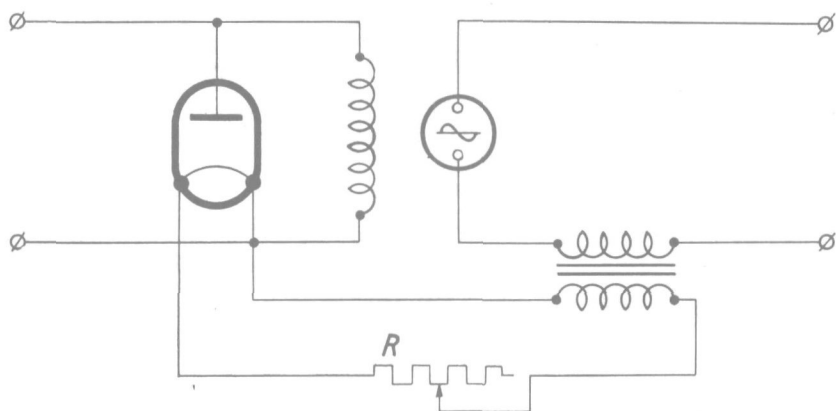


Fig. 28.

Een enkele maal kan het ook voorkomen, dat een regeling op *constanten stroom* wenschelijk is. Bij toepassing van dioden kan een dergelijke regeling zoowel bij gelijk- als wisselstroomgeneratoren worden verkregen door den gloeistroom afhankelijk te maken van den belastingsstroom. Wij hebben (zie Hoofdstuk VI § 3) aangetoond, dat het bij deze schakeling mogelijk is, een stroomspanningskarakteristiek te verkrijgen, waarvan een gedeelte een sterke spanningsdaling bij toename van den belastingsstroom vertoont; omgekeerd kan men zeggen, dat in dit gebied de stroom bij veranderlijke belasting van den generator nagenoeg constant blijft.

§ 3. Toerenregeling van electro-motoren.

Wij zullen alleen in beschouwing nemen de toerenregeling aan gelijkstroom-shuntmotoren.

Toerenvariatië treden bij deze motoren op door veranderingen van de netspanning of van de belasting. Uit de betrekking

$n = \text{constante} \cdot \frac{E. M. K.}{\Phi}$ volgt zonder meer, dat de regeling van

het toerental mogelijk is door invloed uit te oefenen op de E.M.K. of op het veld. De eerstgenoemde regeling kan bewerkt worden.

door aan het anker een veranderlijken weerstand voor te schakelen; laatstgenoemde regeling wordt verkregen door verandering van den weerstand in de veldketen. Wij zullen beide regelingsmethoden beschouwen.

Regeling in de ankerketen van den motor.

Deze regeling kan worden verkregen door een of meer ontladingsbuizen in serie te schakelen met het anker en door invloed uit te oefenen op den weerstand dier ontladingsbuizen, hetgeen kan geschieden door verandering van den gloeistroom, door verandering van de spanning, welke aan een rooster is aangelegd of door een veranderlijk magnetisch veld invloed te doen uitoefenen op den plaatstroom.

Dergelijke regelingsmethoden zijn voorgesteld door MEIJER en door hem beschreven o.a. in E.T.Z. 1921 p. 689 en 725 en Amerikaansche octrooischriften 1.353.815, 1.410.702, 1.420.858, 1.422.120. Tegen deze wijze van regeling geldt het bezwaar, dat de volle ankerstroom door de ontladingsbuizen moet vloeien; alleen bij zeer kleine motoren kan practisch met hoog-vacuum-buizen gewerkt worden, bij grootere ontladingsbuizen zou men zijn toevlucht moeten nemen tot met gas gevulde ontladingsbuizen met boogontlading, zooals MEIJER dan ook voorstelt. Gesteld dat hiermede goede resultaten te verkrijgen zouden zijn, dan nog moet deze wijze van regeling als minderwaardig aangezien worden, omdat het extra-energie-verlies, dat door de regeling veroorzaakt wordt, *belangrijk grooter is* dan bij regeling in de veldketen van den motor. Bij regeling in de ankerketen is n.l. de energie, die de ontladingsbuizen opnemen een belangrijk deel van de motor-energie, omdat de plaatspanning der ontladingsbuizen als regel een belangrijk deel vormt van de motorspanning; bij regeling in de veldketen is het energie-verlies door de ontladingsbuizen veroorzaakt van dezelfde grootte-orde als het energie-verlies in de veldwikkeling, welk verlies een klein percentage van de motor-energie vormt. Wij gaan dan ook over tot de beschouwing van deze laatstgenoemde wijze van regeling.

Regeling in de veldketen van den motor.

In de veldketen van den motor kunnen schakelingen worden aangewend geheel overeenkomstig aan die, welke door ons beschreven

zijn voor spanningsregeling aan generatoren. Voor de regeling kunnen dioden of trioden worden toegepast, die òf in serie met/òf parallel aan de veldwikkeling worden aangebracht, terwijl bij gebruik van trioden al of niet een of meerdere versterkertrappen in toepassing kunnen worden gebracht.

Verschillende grootheden komen nu in aanmerking om de regeling te bewerkstelligen d.w.z. om hetzij op de temperatuur van de gloeidraden (bij dioden) of op de grootte van de roosterspanningen (bij trioden) invloed uit te oefenen. Wij zullen deze achtereenvolgens beschouwen.

1°. *De netspanning.*

Wanneer de belasting van een motor constant is en toeren-variatiën dus alleen veroorzaakt kunnen worden door veranderingen in de netspanning, kan men deze veranderingen zelve benutten om den weerstand der ontladingsbuizen dusdanig te varieeren, dat het toerental constant gehouden wordt.

2°. *De spanning van een generator*, die door den motor wordt aangedreven. (Zie ook 4°).

Het kan voorkomen, dat de te regelen motor een generator aandrijft, waarvan de klemspanning alleen afhangt van het toerental; in dat geval kunnen de variatiën van de klemspanning van dezen generator dienen om invloed uit te oefenen op den weerstand der regelende dioden of trioden.

3°. *De frequentie van een wisselstroomgenerator*, die door den motor wordt aangedreven.

Deze methode komt in aanmerking bij hoogfrequentie-machines, zooals deze b.v. worden toegepast in radio-zendstations. Een dergelijke schakeling is o.a. voorgesteld door VON ARCO (Amerikaansch octrooischrift 1.532.781); vergelijk ook RIEGGER: Wiss. Veröffentl. a.d. Siemens-Konzern Bd. 1).

4°. *De spanning van een afzonderlijke kleine dynamo (toerendynamo).*

Deze methode wordt practisch toegepast bij snelheidsregeling van motoren door electro-mechanische regulateurs. Bij toepassing

van ontladingsbuizen kan volgens deze wijze van regeling een zeer hooge graad van nauwkeurigheid worden bereikt.

Afgezien van de methode 3^o, welke speciaal voor hoogfrequentie-machines van belang kan zijn, heeft de methode 4^o voor de practijk de meeste waarde en wij zullen er toe overgaan deze meer in bijzonderheden na te gaan.

§ 4. *Snelheidsregeling van gelijkstroom-shuntmotoren in afhankelijkheid van een toeren-dynamo.*

Bij deze wijze van regeling wordt de spanning van een met den generator mechanisch gekoppelde toerendynamo gebruikt om invloed uit te oefenen op de regelende organen (dioden of trioden) die in de veldketen van den motor zijn aangebracht.

Om een nauwkeurige regeling te verkrijgen is het noodig, dat de spanning van de toerendynamo T (zie fig. 29) alleen afhankelijk is van de rotatiesnelheid van den motor, terwijl het voorts wenschelijk is, dat deze spanning evenredig verandert met het toerental van den motor. Ten einde aan eerstgenoemden eisch te voldoen is het in de eerste plaats noodzakelijk, dat temperatuursvariatiëen geen invloed hebben op de spanning van de toerendynamo, terwijl er verder aan gedacht moet worden, dat eventueele belastingsvariatiëen slechts een te verwaarloozen kleinen invloed op deze spanning mogen hebben. Indien als regelende organen trioden gebruikt worden, behoeft er van belastingsvariatiëen van de toerendynamo echter in het geheel geen sprake te zijn, aangezien de toerendynamo in de roosterkring van de eerste triode wordt aangebracht en de rooster spanning zoodanig wordt ingesteld, dat er geen roosterstroom vloeit. Bij regeling door dioden moet de toerendynamo stroom leveren aan de gloeidraden, zoodat met de spanning van de toerendynamo ook de belasting varieert; uit den aard der zaak zijn de belastingsvariatiëen echter zeer gering, zoodat het gemakkelijk valt de toerendynamo zoodanig te construeeren, dat van deze variatiëen geen hinderlijken invloed op de nauwkeurigheid der regeling kan uitgaan.

Bij toepassing van dioden onstaat een schakeling, die schematisch in fig. 29 is weergegeven.

De weerstanden R_1 en R_2 worden bij het aanloopen van den motor M gebruikt. Is de motor op toeren en levert dientengevolge

de toerendynamo de vereischte spanning, dan wordt door R_1 de gloeistroom ingesteld, zoodat de diode een anodestroom kan doorlaten. R_2 wordt vervolgens geleidelijk vergroot en R_1 verminderd, zoodat de diode de bekrachtiging van den motor overneemt. R_2 kan dan worden uitgeschakeld.

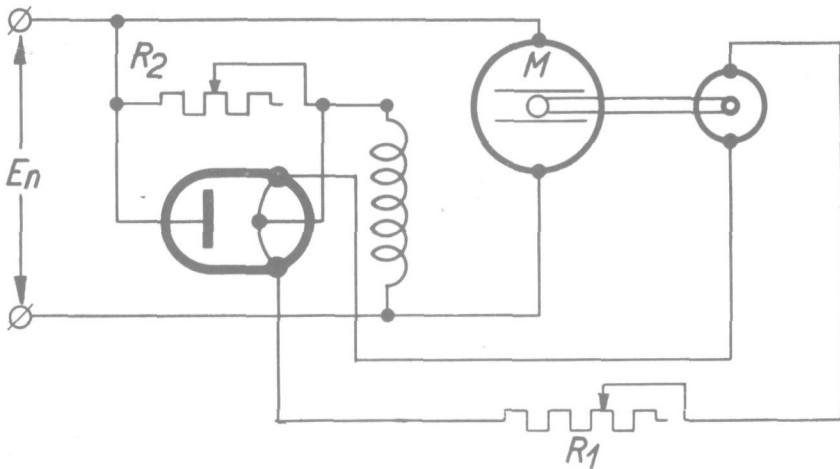


Fig. 29.

De regeling heeft nu als volgt plaats: Bij afname van het toerental van den motor daalt de spanning van de toerendynamo en diengevolge stijgt de weerstand van de diode, waardoor de veldstroom verminderd wordt. Hierdoor stijgt het toerental weer, totdat een evenwichtstoestand is bereikt.

In het algemeen zijn zoowel de netspanning als de belasting variabel. Zonder regeling zal de motor het snelst draaien in onbelasten toestand en bij hoge netspanning, het langzaamst wanneer bij volle belasting de netspanning juist laag is.

Om het toerental op een nagenoeg constante waarde te houden, is dus de grootste veldstroom nodig bij onbelasten toestand en bij hoge netspanning (deze waarde noemen wij i_{m_0}), de kleinste veldstroom (i_{m_v}) is nodig bij volle belasting en lage netspanning.

De verhouding $C = \frac{i_{m_0}}{i_{m_v}}$ beslist hoe groot bij de beschreven schakeling de nauwkeurigheid der regeling kan zijn.

Wij veronderstellen, dat de diode steeds in het verzadigings-

gebied werkt, zoodat de invloed van de plaatspanning op den plaatstroom verwaarloosd mag worden.

In hoofdstuk III p. 19 hebben wij voor de verandering van den plaatstroom eener verzadigde diode de betrekking afgeleid:

$$\frac{\Delta i_a}{i_a} = h \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + \alpha r_f} \cdot \frac{\Delta e_f}{e_f}.$$

Noemen wij $\frac{\Delta e_f}{e_f} = p$, en bedenken wij dat $\frac{\Delta i_a}{i_a} = \frac{\Delta i_m}{i_m}$ dan blijkt hieruit, dat de toename van den veldstroom tengevolge van de regeling:

$$\Delta i_m = i_{m_v} \cdot h p \frac{r_v + r_f}{r_v + \alpha r_f}$$

zoodat $i_{m_0} = C i_{m_v} = i_{m_v} + \Delta i_m = i_{m_v} \left(1 + h p \frac{r_v + r_f}{r_v + \alpha r_f} \right)$

$\alpha = 1,68$ in het geval van een wolframgloeidraad, terwijl bij kleine p $h = 12$ kan gesteld worden.

Hieruit blijkt dus, dat $p = \frac{C-1}{h\beta}$ waarin $\beta = \frac{r_v + r_f}{r_v + 1,68 r_f}$

Voor $r_v = 0,2 r_f$ is $\beta = 0,64$.

Uit deze betrekking volgt, dat een zeer nauwkeurige regeling van b.v. 1% bij deze schakeling practisch in het geheel niet te verkrijgen is, terwijl alleen bij waarden van C , die weinig van 1 verschillen, een matig goede regeling te verwachten is,

b.v. bij $C = 1,1$, is $p \cong 0,01$.

Daar hoogere waarden van C bij practisch voorkomende motoren en netten zeer zeker te verwachten zijn, zal deze schakeling in vele gevallen wegens te geringe nauwkeurigheid van regeling niet te gebruiken zijn.

Een hoogere graad van nauwkeurigheid is te bereiken, wanneer men de regelende diode parallel aan het veld aanbrengt en aan beide organen een weerstand voorschakelt. Wil men niet zijn toelucht nemen tot een speciale hulpwikkeling op den motor, dan moet in dit geval in de gloeidraadketen een bron van constante spanning b.v. een batterij worden opgenomen, welke tegengesteld geschakeld is aan de toerendynamo en een grootere spanning heeft dan deze laatste. Bij dalend toerental stijgt dan de gloei-stroom, dus neemt de buisweerstand af en dientengevolge ook de

veldstroom, zoodat een regeling in de goede richting wordt verkregen.

Het is nu evenals bij spanningsregeling aan generatoren ook hier van belang na te gaan hoe groot de verhouding tusschen den plaatstroom en den veldstroom bij een bepaalde regelingsnauwkeurigheid is.

Nemen wij daartoe aan, dat de netspanning varieert tusschen de grenzen $(1 + a)e$ en $(1 - a)e$, terwijl de veldstroom varieert tusschen i_{m_0} en i_{m_v} (vergelijk p. 142), dan gelden de volgende betrekkingen:

$$(1 - a)e = r_v (i_a + i_{m_v}) + r_m i_{m_v} \dots \dots \dots 1)$$

$$(1 + a)e = r_v (i_a' + i_{m_0}) + r_m i_{m_0} \dots \dots \dots 2)$$

i_a' is de waarde, die de plaatstroom tengevolge van de regeling bij hooge netspanning verkrijgt.

Bij een verzadigde diode is bij goede benadering $i_a = i_s$ (verg. p. 50). Volgens de betrekking 6 op p. 19 is:

$$\frac{\Delta i_a}{i_a} = h \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + 1,68 r_f} \cdot \frac{\Delta e_f}{e_f}$$

$$i_{m_0} = C \cdot i_{m_v}$$

$$C < 1.$$

Noemen wij nu $\frac{\Delta e_f}{e_f} = -p$, dan is dus

$$(1 + a)e = r_v \left\{ \left(1 - hp \frac{r_v + r_f}{r_v + 1,68 r_f} \right) i_a + C i_{m_v} \right\} + r_m C i_{m_v}.$$

Hieruit volgt, dat de verhouding tusschen den plaatstroom en den veldstroom bij nullast

$$\varepsilon = \frac{i_a}{i_{m_v}} = \frac{e \{ C(1 - a) + (1 + a) \}}{e \{ 2a + (1 - a) 7,67 p \} - r_m i_{m_v} \{ c - (1 - 7,67 p) \}}$$

wanneer men aanneemt, dat $h = 12$ en $r_v = 0,2 r_f$, zoodat

$$h \cdot \frac{r_v + r_f}{r_v + 1,68 r_f} = 7,67.$$

Nemen wij nu eens aan, dat $a = 0,05$ (5% netspanningsvariatie!), $C = 1,2$ en $p = 0,01$, $e = 220$ Volt, $r_m i_{m_v} = 100$ Volt, dan is:

$$\varepsilon = \frac{i_a}{i_{m_v}} = 4.$$

Hoewel dus hier de waarde voor C niet ongunstig is gekozen — een variatie van 20%, tusschen de maximum en minimum waarde van den veldstroom zal in de praktijk dikwijls overscheden worden — blijkt de verhouding reeds bij $p = 0,01$ vrij groot te zijn. De anode-dissipatie en het totale energieverlies is derhalve ook reeds vrij groot.

Hieruit concludeeren wij, dat deze methode slechts in die gevallen, waarbij *geen* zeer nauwkeurige regeling vereischt wordt, en waarbij de factor c niet veel kleiner is dan 1,2 practisch kan worden toegepast, terwijl het bezwaar van de noodzakelijkheid om een batterij in de gloeistroomketen aan te brengen, niet overwonnen kan worden.

Gaan wij nu over tot de beschouwing van de toerenregeling door *trioden*.

Wij hadden reeds gelegenheid op te merken, dat bij triode-regeling de spanning van de tacho-meter-dynamo gebruikt wordt om spanningsvariatië te brengen op het rooster van een triode; deze spanningsvariatië kunnen zoo noodig een of meerdere malen worden versterkt door middel van weerstandsversterking met roosterbatterijen en aldus worden overgebracht op een of meerdere parallel geschakelde eindtrioden, welke hetzij in serie, hetzij parallel aan de veldwikkeling van den motor zijn aangebracht, op geheel overeenkomstige wijze als wij in hoofdstuk III hebben beschreven in verband met spanningsregeling aan generatoren.

In de „Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern“ Band VI, 2 Heft, 1928 beschrijft REIMAN een dergelijke schakeling, waarbij de eindtrioden in serie met de veldwikkeling zijn aangebracht, terwijl hij langs analytischen weg de verschillende eischen, waaraan de schakeling heeft te voldoen, alsmede het verloop van het regelingsproces, nagaat.

REIMAN komt daarbij tot eenige voor de practijk belangrijke resultaten, welke wij hier in het kort willen memoreeren.

Aan de bereikbare nauwkeurigheid der regeling is een grens gesteld, doordat met toenemende nauwkeurigheid de kans op labiliteit vergroot wordt; evenwel ligt deze grens laag: bij normaal voorkomende motoren is *een nauwkeurigheid van 1%* wel bereikbaar, zoodat deze regelingsmethode wat de nauwkeurigheid der regeling betreft toch tot de meest preciese behoort.

Volgens REIMAN is het doelmatig de gevoeligheid der regeling

zóó te kiezen, dat het regelingsproces een gedempt periodisch karakter draagt.

De maximale afwijking van het normale toerental, die gedurende het regelingsproces optreedt, bedraagt volgens REIMAN ongeveer de vijfvoudige waarde van de eind-afwijking, terwijl de *tijdsduur* van het *regelings-proces* bij motoren tot ca. 100 kW. $0,5 \div 1,5$ seconde bedraagt.

Een vraag, die voor de praktijk zeker van belang is, maar door REIMAN niet behandeld wordt, is de volgende: Welke versterkingsgraad is er noodig om de vereischte graad van nauwkeurigheid te bereiken? Wij kunnen deze vraag als volgt beantwoorden:

Als wij dezelfde notaties invoeren als op pag. 142 gelden de volgende betrekkingen:

$$1^\circ. \text{ bij nullast: } (1 + a) e = e_a + r_m i_{m_0}$$

$$2^\circ. \text{ bij vollast: } (1 - a) e = e_{a_1} + r_m i_{m_v}$$

Volgens pag. 25 is:

$$g (e_{g1} - e_g) = R_i (i_{m_v} - i_{m_0}) + (e_{a1} - e_a)'$$

Bij een lineaire versterking m en wanneer de spanning van de toerendynamo $= e_t$ is, volgt:

$$g m \Delta e_t = R_i (i_{m_v} - i_{m_0}) + (e_{a1} - e_a)'$$

Uit deze drie betrekkingen leiden wij af, dat:

$$m = \frac{(R_i + r_m) \cdot (i_{m_0} - i_{m_v}) - 2 a e_n}{-g \Delta e_t}$$

$\Delta e_t = x e_t$, waarin x de regelingsnauwkeurigheid aangeeft, dus $x = 1^0/0, 1^0/00$ etc. De versterkingsgraad m varieert omgekeerd evenredig met de grootte van e_t , evenredig met de regelingsnauwkeurigheid, terwijl ten slotte de versterkingsgraad groter moet zijn naarmate het verschil tusschen i_{m_0} en i_{m_v} groter is.

Stellen wij bij wijze van voorbeeld als op pag. 144

$$i_{m_0} = C i_{m_v}, \quad e_n = 220 \text{ Volt}, \quad a = 0,1, \quad r_m i_{m_v} = 100 \text{ Volt.}$$

Nemen wij voorts aan, dat de versterkingsfactor der eindtrioden $g = 6$; de spanning e_t van de toerendynamo gedraagt 100 Volt en de regelingsnauwkeurigheid $1^0/00$, terwijl wij ten slotte veronderstellen, dat $R_i = r_m$, dan volgt:

$$m = \frac{2 \cdot 100 \cdot (c - 1) - 0,2 \cdot 220}{6 \cdot \frac{100}{1000}}$$

Bij $C = 1,4$ is derhalve $m = 60$.

Toerenregeling op 1⁰/₀₀ nauwkeurig is in dit geval mogelijk met één versterkertrap, die zoodanig geschakeld is, dat de rooster-spanning der eindtrioden in denzelfden zin als de spanning varieert.

Bij ongunstiger omstandigheden, bijvoorbeeld bij hogere waarden voor c , zou men zijn toevlucht moeten nemen tot meerdere versterkertrappen.

De schakeling met de eindtrioden in serie met de veldwikkeling heeft met het oog op de bedrijfszekerheid der installatie het bezwaar, dat bij eventueel onklaar worden der ontladingsbuizen de veldketen plotseling onderbroken wordt en de motor op hol wil gaan. Bij parallelschakeling heeft men dit bezwaar niet; het uitvallen van een of meer eindtrioden kan hier hoogstens tengevolge hebben, dat het toerental van den motor daalt, hetgeen in het algemeen minder hinderlijk is. Daar het regelings-mechanisme hierbij in principe hetzelfde is — het blijft op zich zelf traagheidsloos — draagt het verloop der regeling een karakter, dat overeenkomt met dat van de serie-schakeling. Wel zijn bij dezelfde graad van versterking de voor een bepaalde regelingsnauwkeurigheid benodigde triode-energie en ook het extra-verlies der regeling grooter.

STELLINGEN.

I.

Bij het bestudeeren van regeling door elektrische ontladingsbuizen is het wenschelijk meer aandacht te schenken aan de economie der regeling, dan in de literatuur gebruikelijk is, vooral ook met het oog op den eindigen levensduur der ontladingsbuizen.

MEYER, E.T.Z. 42, 689 en 725, 1921.

TAEGER, E.T.Z. 45, 97 en 1407, 1924.

REIMAN, Wiss. Veröff. aus dem Siemens Konzern VI Heft 2, 1 tot 22, 1928.

II.

Door toepassing van spanningsregeling met trioden is het mogelijk het gebruik van accu's, ook voor zeer nauwkeurige metingen, te vermijden.

III.

De warmtetraagheid der gloeidraden van practisch voorkomende dioden is van dezelfde orde van grootte als de electro-magnetische traagheid der veldwikkelingen van practisch voorkomende machines.

IV.

Labiliteit der spanningsregeling door dioden kan bij gelijkstroom-generatoren optreden, indien de zelfinductie der belasting grooter is dan de zelfinductie van het anker.

V.

Bij spanningsregeling door dioden aan gelijkstroom-generatoren, waarbij de electro-magnetische traagheid in de ankerketen klein is ten

opzichte van de warmtetrraagheid van de gloeidraden en de electro-magnetische traagheid in de veldketen, is er gevaar voor periodieke slingering in de generatorspanning, wanneer de beide laatstgenoemde traagheden ongeveer gelijk zijn.

VI.

Ten onrechte concludeert REIMAN in zake toerenregeling aan gelijkstroommotoren door ontladingsbuizen, dat de regeling bij voorkeur een gedempt periodiek verloop moet hebben; goede regeling is ook mogelijk, wanneer de regeling aperiodisch verloopt.

REIMAN, Wiss. Veröff. aus dem Siemens Konzern VI Heft 2, 1 tot 22, 1928.

VII.

De resonantie van electro-dynamische luidsprekers kan steeds lager liggen dan de resonantie van electro-magnetische luidsprekers.

VIII.

Ten onrechte concludeert HUSELEY uit zijn metingen betreffende de doorslagspanning tusschen concentrische cylindere in neon en helium, dat de doorslagtheorie van HOLST en OOSTERHUIS onjuist is.

HUSELEY, Phil. Mag. 8, 128, 1929 en 10, 185, 1930.

PENNING, Phil. Mag. 7, 632, 1929.

PENNING en VEENEMANS, Z. F. Phys. 62, 746, 1930.

IX.

De metingen betreffende de energie-uitwisseling bij botsingen tusschen positieve ionen en neutrale atomen (moleculen) maken het begrijpelijk dat, bij hooge doorslagspanningen, vooral bij gasmengsels en meer-atomige gassen de theorie van TOWNSEND kan worden toegepast.

KAHLMANN en ROSER, Zs. f. Phys. 61, 61, 1930 en 64, 806, 1930.

PENNING en VEENEMANS, Zs. f. Phys. 62, 746, 1930.

X.

Het gebruik van synchrone motoren in sprekende film-installaties is niet wenschelijk.

XI.

Het is zeer wenschelijk op het gebied der octrooiverleening tot meerdere internationale samenwerking te geraken. Internationale samenwerking bij het materieel vooronderzoek der octrooiaanvragen kan zonder wijziging der bestaande octrooiwetten worden ingevoerd en zou tot belangrijke besparing van arbeidskrachten leiden.

XII.

In overeenstemming met de rechtsbeginselen neergelegd in Art. 51 van de Nederlandsche octrooiwet, zal in een geval van dubbel octrooieering onder de Noodwet (1916, gewijzigd in 1920) de houder van het octrooi met de jongste prioriteit het recht tot toepassing der uitvinding behouden, ook al zou zijn octrooi om een of andere reden komen te vervallen vóór het octrooi met de oudste prioriteit.

XIII.

De snelle aanwas der bevolking in Nederland eischt een krachtige bescherming der nationale industrie; in verband hiermede is verlenging van den wettelijken octrooiduur wenschelijk.

XIV.

Aan de Technische Hoogeschool worde naast de opleiding tot ingenieurs, die in speciale onderdeelen der techniek geschoold zijn, ook gelegenheid gegeven tot de vorming van een categorie „bedrijfsingenieurs”.
