

De elektrische voorziening van een 200 kV-deeltjesversneller

P. J. van Deenen*)

Inleiding

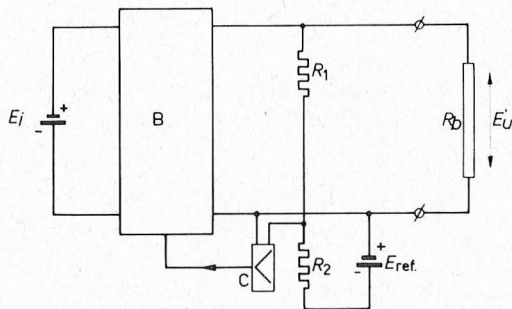
Zoals in een vorig artikel (1) aangegeven werd, wordt voor het katodeverstuivingsonderzoek, zoals dit gedaan wordt in het F.O.M.-laboratorium voor Massascheiding, gebruik gemaakt van een monoënergetische bundel, d.i. een bundel van deeltjes met dezelfde massa en snelheid. De bedoeling van dit onderzoek is inzicht te verschaffen in de nog vrij duistere verschijnselen die optreden, wanneer snelle deeltjes vaste oppervlakken treffen. Deze verschijnselen doen zich o.a. voor in kernreactoren — z.g. stralingsbeschadiging, waarbij de structuur van het materiaal van de reactor min of meer beschadigd wordt. Voor de experimenten gebruikt men een bundel van snelle deeltjes, die onder verschillende hoeken op het te beschieten object (target) wordt gericht. Het is van belang te weten, hoeveel materiaal er verstoven wordt bij een bepaalde bundelintensiteit en een bepaalde invalshoek.

Tot nu toe werd voor de opwekking van een dergelijke bundel uitsluitend gebruik gemaakt van de isotopenseparator (2). Omdat dit onderzoek zo belangrijk is, werd, een uitbreiding van het energiegebied noodzakelijk; het is gewenst om de maximale spanning van 50 kV op te voeren tot 200 kV, bij een stroom van 20mA.

Teneinde een voldoende constantheid van de afbuigingsstraal van de deeltjes te garanderen, is voor deze spanning een stabiliteit van 1 op 10^4 over een tijdsinterval van ongeveer 15 minuten vereist. Daar te voorzien was, dat de bouw van een dergelijke installatie een moeilijke en tijdrovende opgave zou worden, werd besloten een geheel zelfstandige machine, met eigen analysemagneet en ionenbron, te bouwen, om te vermijden, dat moeilijkheden het normale meetprogramma van de isotopenseparator zouden belemmeren.

Hierna volgt een beschrijving van het belangrijkste onderdeel van deze machine, n.l. de hoogspanningsvoorziening.

*) F.O.M. Lab. voor Massascheiding te Amsterdam



1. Principeschema van het stabilisatiemechanisme.

B is het regelement, C de versterker en E_{ref} de referentiespanning waartegen een deel van de uitgangsspanning — bepaald door R_1 en R_2 — gerefereerd wordt. E_i is de voedingsspanning, en R_B stelt de belasting voor.

1. Eisen voor het stabilisatiemechanisme

De versnellende spanning dient aan de volgende eisen te voldoen:

- De maximale spanning moet minstens 200 kV positief ten opzichte van aardpotentiaal zijn. Daarbij moet hij instelbaar zijn op iedere willekeurige waarde vanaf 50 kV. Dit alles bij belastingsstromen tussen 0 en 20 mA.
- De stabiliteit van de spanning moet beter zijn dan 1 op 10^4 gedurende minstens 15 minuten. Dit geldt zowel voor snelle (rimpel) als langzame („drift”) fluctuaties.
- De gehele installatie moet volledig kortsluitvast zijn.

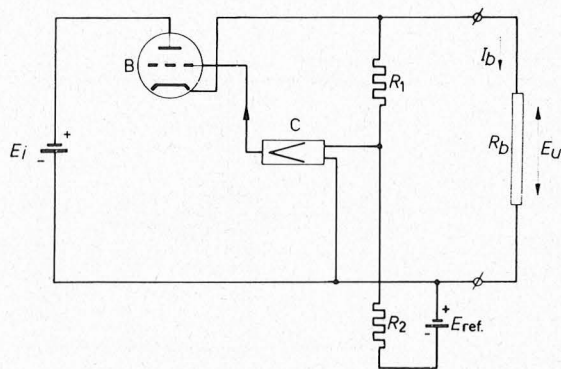
ad b: Onder een stabiliteit van 1 op 10^4 wordt verstaan, dat fluctuaties van de gemiddelde hoogspanning, door welke oorzaak dan ook, binnen 1 volt per 10^4 volt afgegeven spanning blijven. Er zijn verschillende oorzaken voor deze fluctuaties: het variëren van de netspanning ($\pm 5\%$), het variëren van de belastingsstroom en het variëren van de temperatuur door de inwendige dissipatie van de voeding en van de omgeving. Deze laatste oorzaak beperkt in de praktijk altijd de te bereiken stabiliteit door de temperatuurcoëfficiënt en het „ruisen” van de gebruikte componenten. Een bij deze hoge spanningen nog mogelijke oorzaak van zeer snelle fluctuaties is het optreden van corona-ontladingen (z.g. „sproeien”).

Voor het bereiken van een voldoende spanningsstabiliteit wordt gebruik gemaakt van een elektronische stabilisatiemechanisme. In principe komen de hier te bespreken stabilisatoren overeen met die van het schema volgens fig. 1.

Een reglement B wordt door een verschilversterker C zodanig bestuurd, dat het door deze versterker afgegeven verschilsignaal, dat afkomstig is van een verschil tussen een deel van de uitgangsspanning E_U en de constante referentiespanning E_{ref} , verkleind wordt.

Er zijn feitelijk twee soorten elektronische stabilisatoren te onderscheiden:

- Seriëstabilisatie (fig. 2).



2. Principeschema van een elektronische seriëstabilisator.

De letteraanduiding komt overeen met die van fig. 1.

Hierbij is het regelement, de hoogvacuümbuis B, opgenomen in serie met de belastingstroom. Het voordeel van deze methode is voornamelijk, dat over de regelbuis slechts een klein gedeelte van de uitgangsspanning hoeft te staan, slechts weinig meer dan nodig is om de normale spanningsfluctuaties te compenseren. Voor toepassing bij hoge spanningen zijn er echter twee nadelen. Bij kortsluiting van de belasting gaat de kortsluitstroom ook door de regelbuis, die begrensd is door de emissie. Hierdoor komt vrijwel de gehele spanning over de regelbuis te staan, wat vaak ernstige beschadigingen veroorzaakt. Verder bevindt het elektronische regelcircuit zich meestal op hoogspanningspotential, wat lastig is als men bij storingen de fouten wil opsporen.

b. Parallelstabilisatie (fig. 3).

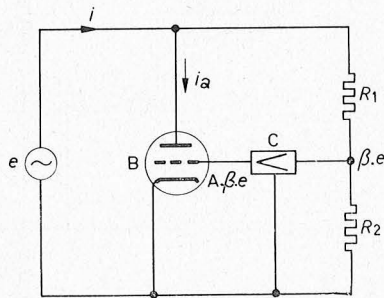
In dit geval staat de regelbuis parallel aan de belasting. Door de buis loopt een klein gedeelte I_a van de totale stroom I_{tot} . De noodzakelijke spanningsval tussen de voedende spanning E_i en de afgegeven spanning E_u treedt nu klaarblijkelijk op over de serie weerstand R_s . Bij hoge spanning heeft de voedende spanningsbron E_i gewoonlijk al een tamelijk hoge inwendige weerstand, die in de praktijk geheel of gedeeltelijk de rol van R_s vervult.

De voordelen van deze schakeling bij hoge spanningen zijn, dat bij kortsluiting de buis B systematisch geblokkeerd wordt en dus ook niet beschadigd kan worden en voorts dat het gehele regelcircuit zich op aardpotential bevindt. Tot nu toe was eigenlijk altijd het enige bezwaar, dat er geen geschikte regelbuizen voor zeer hoge spanning verkrijgbaar waren. Nu triodes met toelaatbare anodespanning tot 200 kV verkrijgbaar zijn, werd besloten deze vorm van stabilisatie toe te passen.

2. Praktische uitvoering

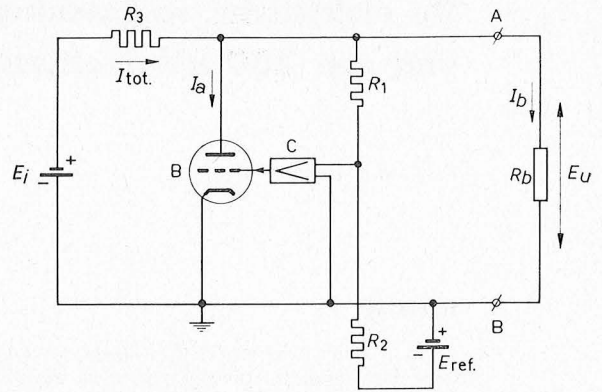
Voor het opwekken van de hoogspanning gebruikt men een 50 kV transformator, die een verviervoudiger in Cockcroft-Waltonschakeling voedt.

Teneinde de rimpelspanning op de ongestabiliseerde hoogspanning zonder gebruikmaking van grote condensatoren voldoende klein te maken, wordt de transformator gevoed uit een roterende omvormer, die de normale netspanning transformeert in 1 fase 220 volt-1000 Hz. Bij overigens gelijke voorwaarden is de nodige capaciteit omgekeerd evenredig met de frequentie. Kleine capaciteiten bij deze hoge spanningen zijn gunstig, zowel voor de energie-inhoud (het beperkt de schade aan de ionenbron in geval van doorslag) als voor de kosten en afmetingen. Een bijkomend voordeel is dat de transformator veel kleiner is. De grootte van de nodige versterking kan afgeleid worden uit fig. 3 en het elektrische vervangschema hiervan (fig. 4).



4. Elektrisch vervangschema voor de parallelstabilisator van fig. 3.

De letteraanduiding komt overeen met die van fig. 1.



3. Principeschema van een elektronische parallelstabilisator.

R_s = serie weerstand in de leiding naar de voedingspanning E_i
De overige aanduidingen komen overeen met die van fig. 1.

Zoals hierna (fig. 5) beschreven wordt, is de stabilisatie mogelijk door het verschil in gelijkstroomweerstand $R_{dc} = \frac{E_u}{I_{tot}}$ en de wisselstroomweerstand $R_{ac} = \frac{\Delta E_u}{\Delta I_b}$ in fig. 3. Hierdoor wordt bereikt, dat de uitgangsspanning is:

$$E_u = \frac{R_{dc}}{R_{dc} + R_s} \cdot E_i \quad (1)$$

en de fluctuaties hierop:

$$\Delta E_u = \frac{R_{ac}}{R_{ac} + R_s} \cdot \Delta E_i \quad (2)$$

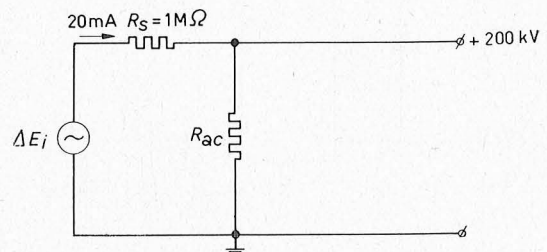
R_{ac} volgt uit het quotiënt van spanning en stroom, indien een willekeurig kleine wisselspanning e wordt aangesloten parallel aan de buis B. Omdat in de praktijk R_{ac} toch veel kleiner zal blijken te zijn dan R_s , R_b en $R_1 + R_2$, laten wij deze bij voorbaat weg.

De stroom i_a , die nu ten gevolge van het aanleggen van e door de buis loopt, bedraagt:

$$i_a = i = \frac{e}{R_i} + \frac{e \cdot \beta \cdot A \cdot \mu}{R_i} = \frac{e(1 + \beta \cdot A \cdot \mu)}{R_i}$$

waaruit volgt:

$$R_{ac} = \frac{e}{i} = \frac{R_i}{1 + \beta \cdot A \cdot \mu} \quad (3)$$



5. Schematische voorstelling van de parallelstabilisatie bij een afgegeven spanning van 200 kV.

Voor de letteraanduiding wordt verwezen naar de tekst.

Hierin zijn R_i en μ respectievelijk de inwendige weerstand en de versterkingsfactor van de regelbuis B, β de verhouding van R_2 en R_1 en A de versterking van de verschilversterker C.

Gebaseerd op theoretische wenselijkheid, praktische mogelijkheid en kostprijs is de hoogspanningsvoeding opgebouwd met de volgende componenten:

- De voeding met opgebouwde serieweerstand. De totale weerstand R_s bedraagt ongeveer $10^6 \Omega$.
- De hoogspanningsweerstand R_1 van omstreeks $2.10^6 \Omega$.
- Een zeer stabiel referentiespanningsapparaat, regelbaar tussen 500 en 2000 volt. Hierdoor is tevens β vastgelegd op 10^{-2} .
- De regelbuis, type VGH 201, met een $R_i = 6.10^6 \Omega$ en een $\mu = 300$ bij een stroom van 2mA en een anodespanning van 200 kV.

Bekijken wij nu fig. 5.

Dit geeft schematisch het geval weer, waarin de voeding 20mA levert bij een uitgaande spanning van 200 kV. Bepaald moet worden, hoe groot R_{ac} maximaal mag zijn, opdat variaties van de voedende spanning voldoende verzwakt worden. Ten gevolge van het spanningsverlies over R_s moet de voedende spanning 220 kV zijn voor een uitgangsspanning van 200 kV. Nemen wij een spanningsverandering aan van 10% ($\pm 5\%$), dan is $\Delta e_i = 22.10^3$ volt. Zoals uit de eerder genoemde eisen volgt, bedraagt de secundaire fluctuatie:

$$\Delta e_u = \frac{2 \cdot 10^5}{10^4} = 20 \text{ volt}$$

Substitutie van deze waarden in (2) geeft:

$$20 = \frac{R_{ac}}{R_{ac} + 10^6} \cdot 22 \cdot 10^3,$$

waaruit volgt:

$$R_{ac} \approx 10^3 \Omega \quad (4)$$

Een variatie van de belastingsstroom van 0—20mA geeft over R_{ac} juist een variatie van 20 volt en voldoet dus ruimschoots aan de eis. Substitueren wij nu nog de gevonden waarde voor R_{ac} (4) in (3), dan geeft dit:

$$10^3 = \frac{6 \cdot 10^6}{1 + 10^{-2} \cdot A \cdot 300}$$

$$\therefore A \approx 2.10^3 \quad (5)$$

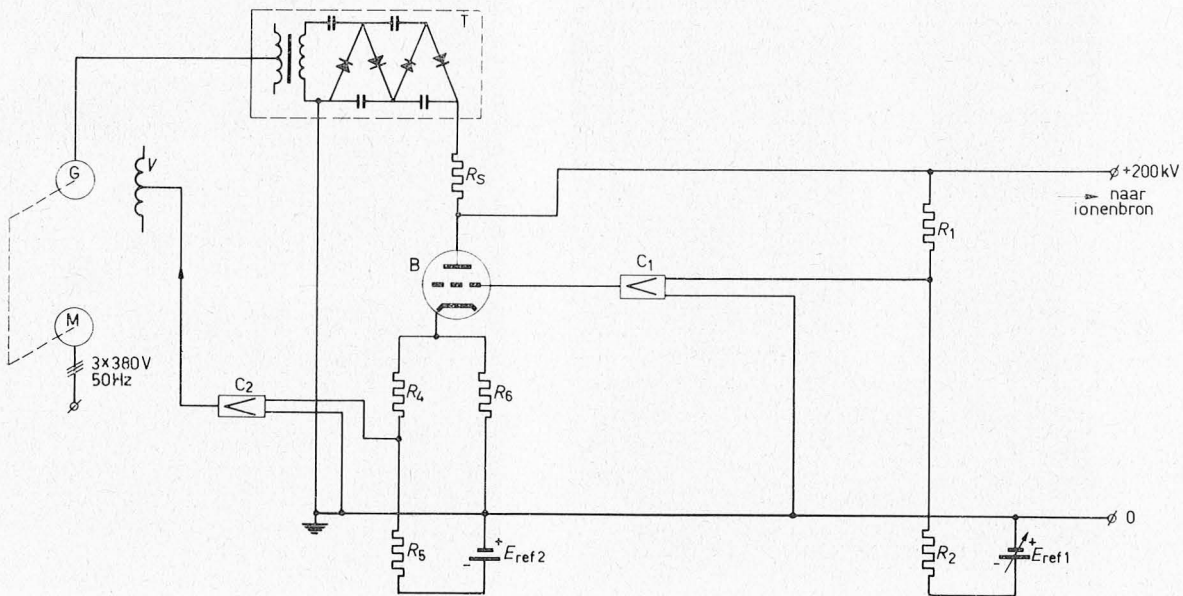
De grootte van de uitgangsspanning wordt ingesteld doordat men de referentiespanning verandert. Dit houdt echter in, dat de voeding bij 50 kV en 20mA uitwendige belastingsstroom een stroom zou moeten leveren van

$$\frac{22 \times 10^4 - 5 \times 10^4}{10^6} = 170 \cdot 10^{-3} \text{ A};$$

de regelbuis zou daarvan 150mA moeten opnemen, wat neerkomt op een anodedissipatie van $0,15 \times 5 \cdot 10^4 = 7,5 \text{ kW}$! Dit is vanzelfsprekend een buitengewoon oneconomische en weinig elegante oplossing. Om deze moeilijkheid te vermijden is er een tweede regelketen in het systeem opgenomen, die er voor zorgt, dat de gemiddelde stroom door de regelbuis, gemiddeld over een tijdsduur van de orde van grootte van de thermische tijdconstante van de regelbuis, constant gehouden wordt. Door deze regelketen wordt bereikt, dat de toelaatbare anodetemperatuur van de buis niet overschreden wordt.

Fig. 6 geeft nu in blokschema het gehele systeem weer. De motor M wordt gevoed uit het $3 \times 380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ net. Deze drijft de 1000 Hz-generator G aan, die een eenfasige secundaire wisselspanning afgeeft, waarvan de grootte afhankelijk is van de mate van de veldbekrachtiging, die door de tweede verschilversterker C_2 gevoed wordt.

De generatorspanning voedt de primaire wikkeling van de hoogspanningstransformator, die samen met de verviervoudiger ondergebracht is in de met olie gevulde tank T. (fig. 7). Direct op de tank is de serieweerstand R_3 gemonteerd. Over R_3 ontstaat een spanning, die evenredig is met de stroom door de regelbuis B. Deze spanning wordt in een



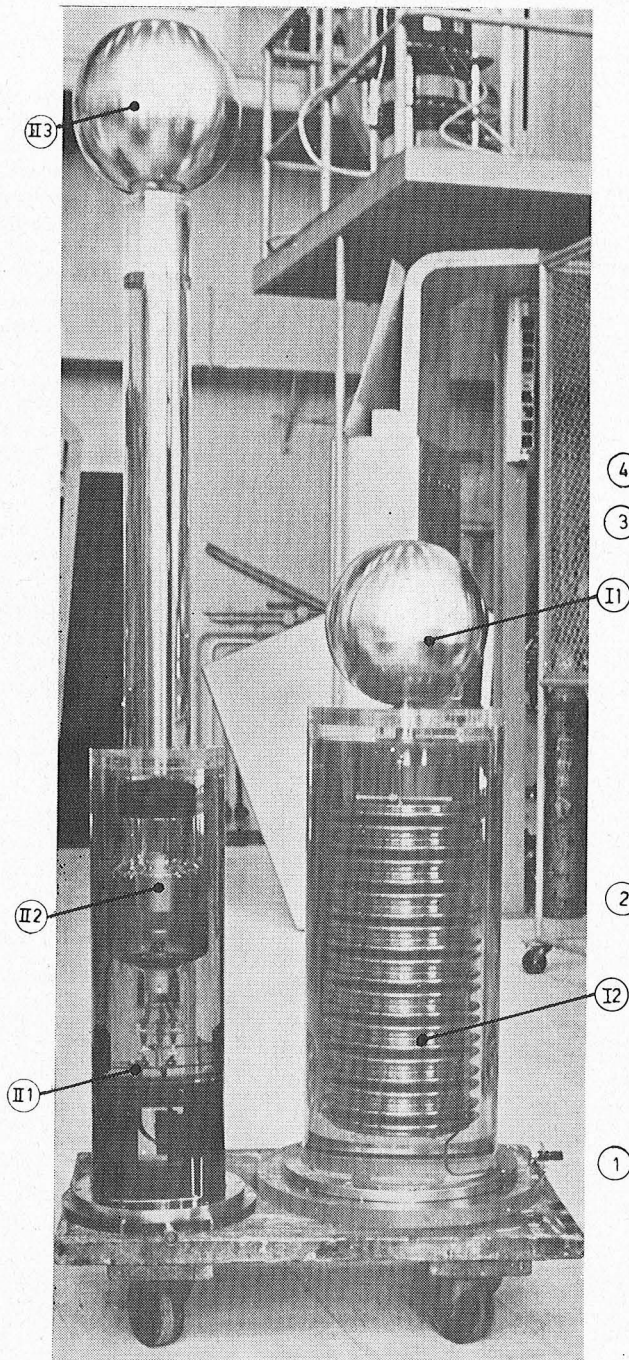
6. Principeschema van de uitvoering van de 200 kV-installatie.

M en G vormen samen een roterende omvormer van $3 \times 380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ naar $220 \text{ V} - 1000 \text{ Hz}$. T is de met olie gevulde hoogspanningstank, die de transformator en de selenium verviervoudiger bevat.

R_s is de serieweerstand, R, is de hoogspanningsmeetweerstand, die samen met R_2 en de referentiespanning E_{ref} , de grootte van de uitgangsspanning bepaalt. C, is de verschilversterker en B de regelbuis. R_4 is de stroomreferentiweerstand; de spanning, die hierover ontstaat, wordt vergeleken met de referentiespanning E_{ref} , en het verschil tussen deze wordt versterkt door versterker C en toegevoerd aan de veldwikkeling V van de generator G.

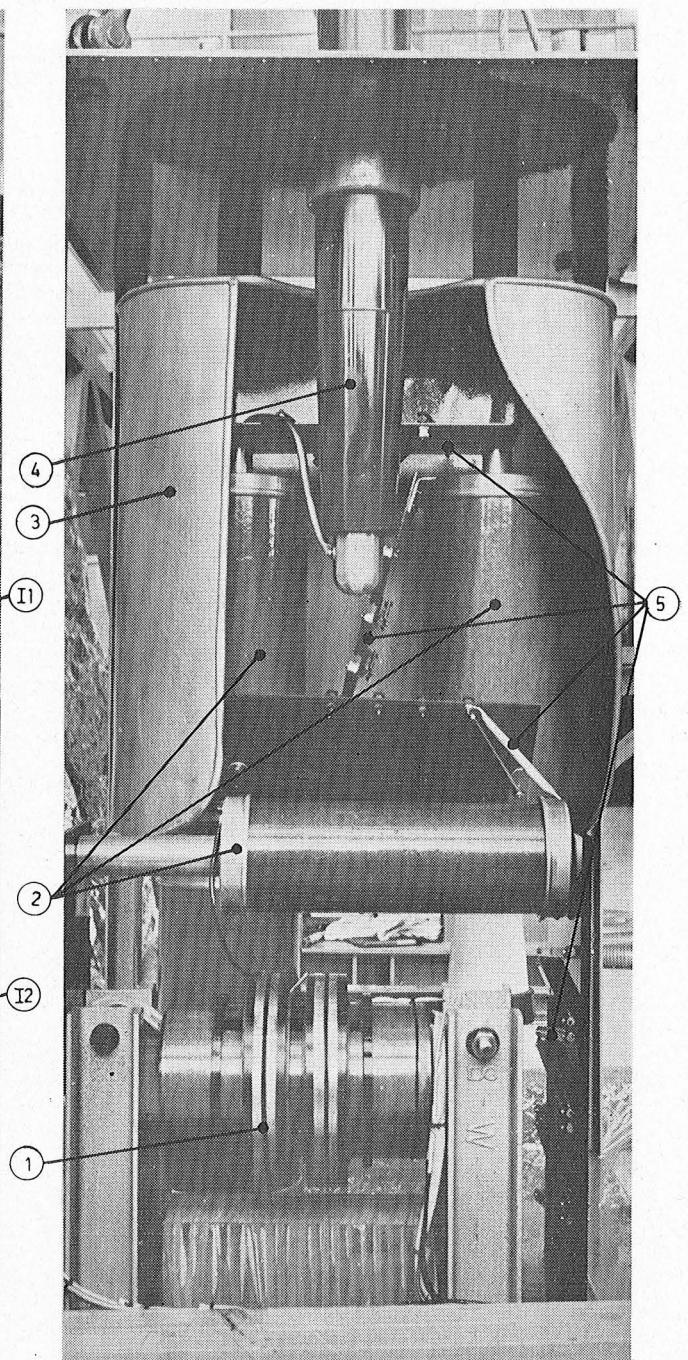
vergelijkingsschakeling, overeenkomend met die van de hoofdregelketen, vergeleken met de stroomreferentiespanning E_{ref_2} van ongeveer 6 volt. Dit verschil wordt door C_2 versterkt en in dusdanige fase aan de veldwikkeling van G toegevoerd, dat een toename van de stroom in de regelbuis wordt tegengewerkt door een afname van de voedingsspanning van de hoogspanningstransformator. C_2 is voorzien van een integrerend netwerk met een

tijdconstante van de orde van grootte van de thermische tijdconstante van de regelbuis (5 seconden). Hierdoor wordt de tweede regelketen zeer traag; dit is noodzakelijk om wederzijdse beïnvloeding en daarmee onvoldoende stabiliteit van beide regelsystemen te vermijden. Juist daarom is ook de versterking in de tweede regelketen laag gehouden; bezwaren zijn hier niet aan verbonden: deze regeling behoeft slechts globaal te zijn.



7. Meetweerstand (I) en parallelstabilisator (II).

- I 1 = aansluiting voor de hoogspanning.
- I 2 = metalen schotels ter vergroting van de parallelcapaciteit.
- II 1 = regelbuis.
- II 2 = capaciteitsarme gloeistroomtransformator.
- II 3 = hoogspannings aansluiting.



8. Interieur van de 200 kV hoogspanningstank.

- 1 = hoogspanningstransformator 60 kV.
- 2 = condensatoren, die samen met de seleniumstaafgelijkrichters (5) de Cochroft-Walton-schakeling vormen.
- 3 = equipotentialscherm op 100 kV.
- 4 = aansluiting voor 200 kV geïsoleerd met Araldite + leemel.
- 5 = seleniumstaafgelijkrichters.

3. Constructiebijzonderheden

Van meet af aan moest bij het ontwerpen de constructie en voorts bij de keuze van materialen en componenten in het oog gehouden worden, dat een stabiliteit van $1:10^4$ slechts te bereiken is door een strenge selectie van componenten en door weldoordachte constructievormen. In eerste instantie wordt de te bereiken stabiliteit bepaald door de meetweerstand R_1 en R_2 (fig. 6), de referentiespanning E_{ref1} en de verschilversterker C_1 . Voor de referentiespanning wordt gebruik gemaakt van een commercieel apparaat met een gemeten stabiliteit van $5:10^5$ over een tijd van een uur bij normale kamertemperatuurvariaties. De meetweerstand is opgebouwd uit zeer stabiele weerstanden, z.g. metaalfilmweerstand, met een temperatuurcoëfficiënt van 15×10^{-6} . Deze metaalfilmweerstand combineren de voordelen van koolfilmweerstand — hoge specifieke weerstand — met die van de draadgewonden weerstand — hoge stabiliteit. Hierdoor wordt met een relatief klein aantal (± 300 stuks) weerstanden een zeer stabiele hoogspanningsweerstand van $250M\Omega$ verkregen. De verschilversterker is geconstrueerd naar een eigen ontwerp met een equivalente drift aan de ingang van minder dan 10^{-4} volt uur.

Het is bij elektronische stabilisatoren gebruikelijk de uitgang capacitief te belasten, teneinde daardoor snelle spanningsfluctuaties te vermijden; dit is nodig, omdat de regelketen gewoonlijk te traag is om deze snelle verschijnselen actief te onderdrukken. Om de reeds genoemde reden moet in dit geval de capaciteit tot een minimum — de parasitaire capaciteit — beperkt blijven. Dit impliceert dan echter, dat de regelketen een grote bandbreedte

moet hebben. Daartoe is de meetweerstand R_1 capacitief gecompenseerd, om over een brede frequentieband een frequentieonafhankelijke spanningsdeling te verkrijgen. Dit is bereikt door een aantal parallelle, metalen schotels, die kunstmatig de parasitaire parallelcapaciteit van de weerstanden vergroten (fig. 8, I). Hierdoor wordt bereikt, dat de effectieve capaciteit aan de ingang van C_1 gecompenseerd wordt. Het geheel is ondergebracht in een met siliconolie gevuld perspex vat, waarvan de doorzichtigheid een groot voordeel is bij een periodieke, visuele inspectie.

Met het oog op spanningsoverslag en corona in de lucht werd overal een minimumafstand aangehouden tussen 200 kV en aarde van 1 meter. In de hele installatie werden voor de onderdelen grote afrondingsstralen toegepast om corona te onderdrukken.

Ook de regelbuis werd tezamen met een gloeistroomtransformator in een met siliconolie gevuld perspex vat ondergebracht. Hoewel de buis zelf slechts 33 cm lang is, is hier toch ook een afstand buitenom van minstens 1 meter noodzakelijk (fig. 8, II).

De metingen, die met deze opstelling zijn verricht, hebben bewezen, dat de gekozen constructie voor dit doel ruim aan de eisen voldoet.

Referenties

1. het inleidende artikel van deze serie. (in Alg. ged.).
2. „de elektromagnetische scheiding van stabiele isotopen”. Dr. J. Kistemaker, Jr. C. J. Zilverschoon en J. Schutten. Elektrotechniek 1953, nr. 23 en 1954 nr. 9.