

MASTER

Generatorbeveiliging

de Keuninck, J.A.

Award date:
1965

[Link to publication](#)

Disclaimer

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

General rights

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

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

Take down policy

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

4750

AFDELING DER ELEKTROTECHNIEK

Groep OPWEKKING EN DISTRIBUTIE



GENERATORBEVEILIGING

J.A. de Keuninck.

EO - 65 - A1.

Het ontwerpen van een beveiligingssysteem voor een 200 MW - 250 MVA generator, alsmede het nagaan van de gevolgen van een in de directe nabijheid gelegen driefasige kortsluiting in het net t.a.v. asynchronisme van de generator.

Afstudeeropdracht gegeven door Prof.ir. K.J.H. Stigter op 6 augustus 1964 en onder diens leiding uitgevoerd in de periode van augustus 1964 tot januari 1965.

1. Inleiding.

1.1. Uitgegaan wordt van een centrale, waarin drie eenheden staan opgesteld van 200 MW - 250 MVA (fig. 1.1).

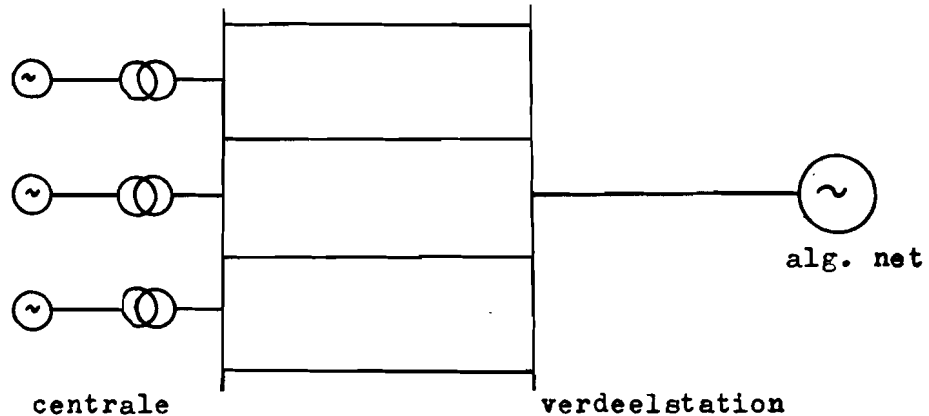


fig. 1.1.

De energie wordt direkt geleverd aan de 150 kV rails. Deze rails zijn door middel van 4 circuits verbonden met een groot 150 kV verdelstation. Het 150 kV net is geblust.

Reaktantie van de verbindinglijnen bedraagt j. $3,5\Omega$. De weerstand is $0,6\Omega$, deze wordt in de berekening verwaarloosd.

De machinetransformator heeft een geaard scherm tussen hoogspannings- en laagspanningswikkelingen (fig. 1.2). Het plafond van de bekrachtigingsspanning ligt 30% boven de vollastbekrachtigingsspanning.

Het kortsluitvermogen in het verdelstation bedraagt, inclusief het door de centrale geleverde kortsluitvermogen, 9000 MVA resp. 4500 MVA.

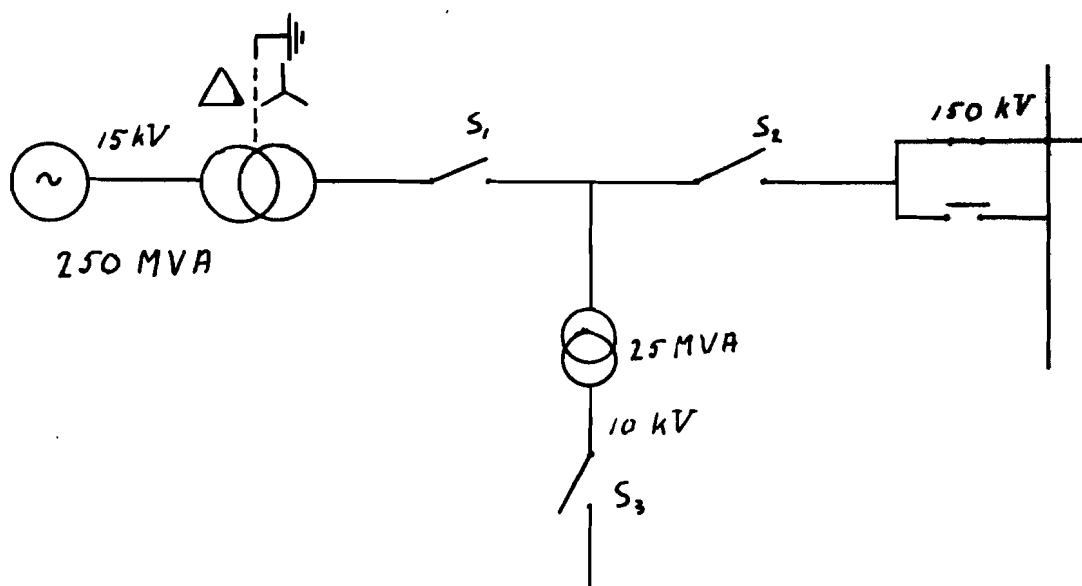


fig. 1.2.

Generatorgegevens:

250 MVA uitgangsvermogen

$\cos \varphi = 0,8$

$X''_d = 15\%$ basis 250 MVA

$X'_d = 20\%$

$X_d = 160\%$ onverzadigd

$= 120\%$ verzadigd.

Koperverliezen: 1,2%.

Roterende energie van generator en turbine: 700.000 kW sec.

De bekrachtigingsstroom wordt opgewekt door machines.

Gegevens van de machinetransformator:

250 MVA ingangsvermogen

$X = 14\%$, basis 250 MVA.

Koperverliezen 0,25%.

De spanning aan de machineklemmen bedraagt 15 kV en aan de centralerails bedraagt zij 150 kV, terwijl het eigenbedrijfsnet een spanning van 10 kV heeft.

De eigenbedrijfstransformator heeft een vermogen van 25 MVA, de voeding geschiedt vanaf de hoogspanningsklemmen van de machinetransformator.

In hoofdstuk 2 zal de beveiliging van de generator en de machinetransformator worden opgezet.

De hoek tussen de rotorvector van de generator en de netvector in het verdeelstation zal worden berekend, alsmede de hoek tussen de rotorvector en de spanningsvector van het algemene net, beide bij volle belasting (hoofdstuk 3).

In hoofdstuk 4 wordt globaal de maximale tijdsduur berekend, die voor een dichtbij gelegen driefasige sluiting mag worden toegelaten, zonder dat daarna asynchronisme optreedt.

1.2. De eenheid in vollastbedrijf.

Het nominale vermogen van de generator is 250 MVA
 $\cos \varphi_{\text{gen}} = 0,8$.

De spanning aan de generatorklemmen E_g bedraagt 15 kV.

De nominale stroom I_n bedraagt:

$$I_n = \frac{250}{15\sqrt{3}} = 9,62 \text{ kA}$$

Afgegeven blindvermogen: $250 \sin \varphi_{\text{gen}}$ MVar = 150 MVar.

Afgegeven werkzaam vermogen: $250 \cos \varphi_{\text{gen}}$ MW = 200 MWatt.

Blindstroom 5,77 kA

Wattstroom 7,70 kA.

Aan de laagspanningszijde van de machinetransformator wordt door de generator geleverd 200 MW, 150 MVar.

De lekveldenergie bedraagt 14% van 250 MVA = 35 MVar.

Wattverlies van de transformator is 0,25% van 250 MVA = 0,625 MW.

De transformator levert aan de hoogspanningszijde:

$$\begin{aligned} 200 - 0,625 \text{ MW} &= 199,4 \text{ MW} \\ 150 - 35 \text{ MVar} &= 115 \text{ MVar} \end{aligned}$$

d.w.z. 230 MVA.

De nominale spanning van de centralerail bedraagt 150 KV.

Hiermede is de nominale stroom aan de hoogspanningszijde van de machinetransformator bepaald.

$$I_{n \text{ trf}} = \frac{230}{150\sqrt{3}} = 0,886 \text{ kA.}$$

$$\cos \varphi_{\text{trf}} = 0,866.$$

De Wattcomponent van de stroom bedraagt 0,768 kA,
de blindcomponent 0,443 kA.

De overzetverhouding wordt gevonden uit het quotient van primaire en secundaire stroom:

$$\frac{I_{n \text{ gen}}}{I_{n \text{ trf}}} = \frac{9,62}{0,886} = 10,9$$

Uitgedrukt in spanning: 15,0/163 kV, 250 MVA.

Het door het eigenbedrijf opgenomen vermogen in de vollasttoestand wordt op 6% gesteld (basis 250 MVA).

De arbeidsfaktor aan de hoogspanningszijde van de e.b. transformator wordt gesteld op $\cos \varphi_{\text{eb}} = 0,8$.

Opgenomen 15 MVA, 12 MW, 9 MVar.

Per eenheid wordt het verschil van het uitgangsvermogen van de machinetransformator en het door het eigenbedrijf opgenomen vermogen aan de centralerail geleverd.

Dit vermogen bedraagt:

$$\begin{aligned} 199,4 - 12 \text{ MW} &= 187,4 \text{ MW} \\ \text{en } 115 - 9 \text{ MVar} &= 106 \text{ MVar} \end{aligned}$$

d.w.z. : 215 MVA.

De vollaststroom door één eenheid aan de centralerail geleverd

$I_{n \text{ rail}}$ bedraagt:

$$I_{n \text{ rail}} = \frac{215}{150\sqrt{3}} = 829 \text{ A.}$$

De Wattcomponent van deze stroom is: $I_{wn \text{ rail}} = 721 \text{ A}$

de blindcomponent bedraagt: $I_{bn \text{ rail}} = 408 \text{ A.}$

$$\cos\varphi_{\text{rail}} = 0,871.$$

Door het eigenbedrijf wordt 15 MVA opgenomen aan de 150 KV zijde.

De vollaststroom van het eigenbedrijf I_{veb} bedraagt:

$$\frac{15}{150\sqrt{3}} = 57,7 \text{ A.}$$

De lekveldenergie van de eigenbedrijfstransformator is 10%, op basis van het nominaal vermogen. De belasting in vollasttoestand bedraagt slechts 3/5 van de nominale belasting.

Opgenomen wordt $0,1 \cdot 3/5 \cdot 25 \text{ MVar} = 1,5 \text{ MVar.}$

Aan de laagspanningszijde wordt afgegeven 12 MW

$$\text{en } 9 - 1,5 \text{ MVar} = 7,5 \text{ MVar}$$

$$= 14,2 \text{ MVA}$$

$$\cos \varphi_{\text{eb.sec}} = 0,848$$

Aannemend dat de secundaire spanning van de eigenbedrijfstransformator onder vollastcondities 10 kV bedraagt, vindt men voor de stroom:

$$I_{\text{veb.sec}} = 836 \text{ A.}$$

$$\text{Overzetverhouding} = \frac{I_{\text{v.e.b.sec}}}{I_{\text{v.e.b.prim}}} = \frac{836}{57,7} = 14,5$$

spanningsoverzetverhouding: 150/10,4 kV.

De nominale stroom van de eigenbedrijfstransformator zal afwijken van de bedrijfsstroom bij vollast.

Aan de hoogspanningszijde bedraagt ze:

$$I_{\text{n.eb.prim}} = \frac{25}{150\sqrt{3}} = 96,3 \text{ A.}$$

en aan de laagspanningszijde:

$$I_{\text{n.eb.sec}} = \frac{25}{10,4\sqrt{3}} = 1,39 \text{ kA.}$$

2. Generatorbeveiliging.

2.1. Inleiding.

Onder generatorbeveiliging zal in dit verslag worden verstaan de beveiliging van de generator, machinetransformator en de eigenbedrijfstransformator bij elektrische storingen.

Er kan onderscheid worden gemaakt tussen interne en externe storingen. Storingen optredend in de eenheid of in de e.b. transformator worden interne storingen genoemd. Externe storingen treden buiten de eenheid op, dus aan de centralerail of in het net.

Een interne storing kan ernstige schade veroorzaken aan de generator of de beide transformatoren. De beveiliging zal erop gericht moeten zijn deze schade door onmiddellijk ingrijpen zo klein mogelijk te houden.

Een tweede aspect van de beveiliging is de bescherming van de eenheid tegen de gevolgen van een externe storing, zoals asymmetrische belasting of een kortsluiting in het net. De beveiliging dient in dit geval in te grijpen voordat schade aan de eenheid kan ontstaan.

Verder kan een beveiliging noodzakelijk zijn bij storingen die niet direkt schadelijk zijn voor de machine, maar die de stabiliteit van het net in gevaar brengen. Hiermede wordt het uitschakelen van ongestoorde produktie-elementen vermeden.

Het ingrijpen van de beveiliging zal in vele gevallen het afschakelen van de eenheid tengevolge hebben. Dit betekent verlies aan produktievermogen. In het algemeen wordt dit verlies door het koppelnet wel opgevangen. Toch zal onnodig aanspreken van de beveiliging, en daarmee het onnodig uitvallen van een machine tot het uiterste beperkt moeten blijven. De gevoeligheid van de beveiligingselementen mag dus niet zo groot zijn dat het risico ontstaat van aanspreken door bijkomende oorzaken.

De afzonderlijke elementen van de beveiliging dienen selectief te werken, zij mogen dus slechts bij één type storing aanspreken. Zij kunnen dan aan de situatie aangepaste uitschakelcommando's geven waardoor men bewerkstelligt dat alleen de gestoorde productie-eenheden uit bedrijf worden genomen, terwijl de ongestoorde componenten kunnen blijven deelnemen aan energieproductie of -transport.

Zo kan bij een storing in de eenheid het e.b. gevoed blijven vanuit het net resp. bij een storing in het net vanuit de machine.

Bij sommige storingen is pas na enige tijd beschadiging te verwachten; selectieve beveiligingselementen kunnen in dat geval een vertraagd uitschakelbevel geven.

Aan de bedrijfszekerheid van de beveiligingssystemen worden hoge eisen gesteld. Normaal bedrijf betekent stilstand voor de beveiligende relais. Treedt na een lange periode van ongestoord bedrijf een storing op dan moeten de relais snel en trefzeker kunnen reageren. Uit dien hoofde is een regelmatige controle op de juiste werking noodzakelijk. Bovendien worden - indien mogelijk - reserve beveiligingen geprojecteerd.

2.2. Storingsmogelijkheden.

De beveiliging zal moeten aanspreken bij de volgende storingen.

2.2.1. Statoraardsluiting in de generator.

Elektrisch contact tussen een punt van een fasewikkeling en aarde.

2.2.2. Wikkelingssluiting in de stator.

Elektrisch contact tussen de wikkelingen van verschillende fasen, zonder dat contact met de aarde tot stand wordt gebracht.

2.2.3. Windingsluiting in de stator.

Sluiting tussen de windingen van één fase, eveneens zonder optreden van aardsluiting.

2.2.4. Sluiting in de machinetransformator.

Aardsluiting, wikkelingssluiting en windingsluiting worden door dezelfde relais bewaakt.

2.2.5. Sluiting in de eigenbedrijfstransformator.

Ook hier worden alle drie typen sluiting door dezelfde relaiscombinaties bewaakt.

2.2.6. Terugwatt.

De generator neemt vermogen op vanuit het net.

2.2.7. Asymmetrische belasting.

2.2.8. Sluiting op de centralerails.

2.2.9. Wegvallen van de bekrachtiging.

2.2.10. Aardsluiting in het bekrachtigingscircuit.

2.2.11. Windingsluiting in het bekrachtigingscircuit.

2.3. Uitschakelprocedures.

2.3.1. Om een storing af te schakelen staan ons de vermogensschakelaars S_1 en S_2 ten dienste (fig. 1.2). Treedt een kortsluiting op in de eenheid dan verdwijnt deze nog niet door het afschakelen van de eenheid van het net, maar ook de machinespanning moet worden weggenomen. Dit geschiedt door ontmagnetisatie van het rotorcircuit. Om de energie van het rotorveld te vernietigen kan het rotorcircuit via een weerstand gesloten worden. Het veld bereikt langzamerhand de remanente waarde (fig. 2.3.1-3a).

Snellere methoden om de magnetische energie te vernietigen worden gevormd door:

- 1) Het toepassen van een spanningsafhankelijke weerstand.
- 2) Het geven van negatieve bekrachtiging aan de opwekmachine.
De rotorwikkeling wordt hierbij na een vastgestelde tijd kortgesloten en de bekrachtigingsmachines afgeschakeld.
- 3) Oscillerende ontlading van het magnetisch circuit. De hulpop-

wekker (eventueel de opwekker) bestaat uit een gelijkstroom-
machine met parallelbekrachtiging (fig. 2.3.1-1).

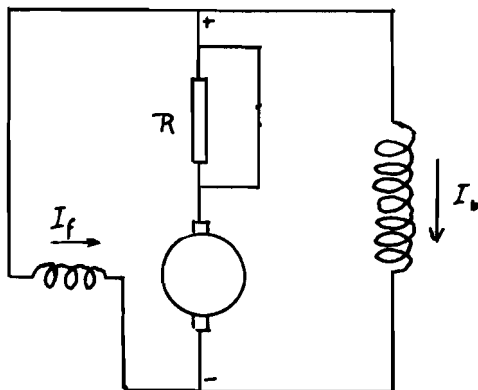


fig. 2.3.1-1.

Door het inschakelen van de weerstand R keert de veldstroom van
teken om (fig. 2.3.1-2), dus ook de spanning van de rotor zal
van polariteit veranderen.

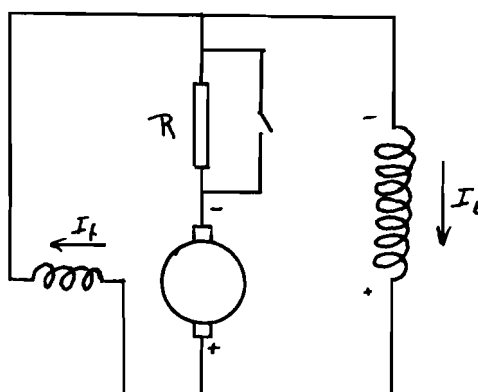


fig. 2.3.1-2.

Hierdoor wordt de stroom I_b door de rotorspanning tegengewerkt,
de stroom wordt zelfs negatief, zodat I_f wederom van teken omkeert.
Er resulteert een gedempte slingering rond de eindwaarde $I_b = 0$.
De eerste nuldoorgang kan vrij snel bereikt worden (fig. 2.3.1-3b).

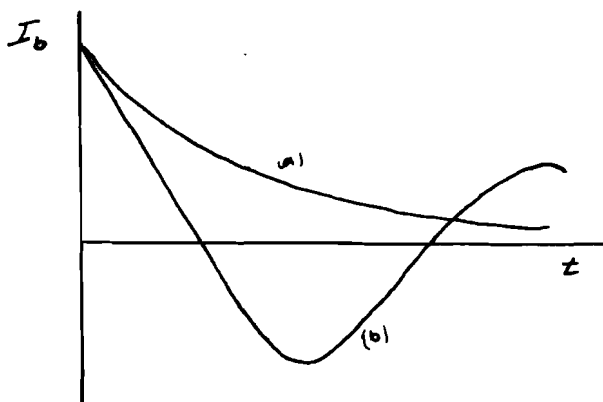


fig. 2.3.1-3.

Tegelijk met het inschakelen van de ontmagnetisatie-inrichting zal de automatische spanningsregeling uitgeschakeld moeten worden.

2.3.2. Een storing in de generator of de machinetransformator maakt het openen van schakelaar S_1 (fig. 2.3.2-1) noodzakelijk. De generator levert geen energie meer aan het net of het eigenbedrijf. De toegevoerde mechanische energie wordt geheel opgenomen in de vorm van roterende energie van de turbogenerator. Reeds na korte tijd zouden de rotoren van turbine en generator een ontoelaatbaar hoge snelheid aannemen.

Om dit te vermijden wordt tegelijk met het uitschakelcommando aan de schakelaar S_1 een commando aan het snelsluitventiel van de turbine gegeven (fig. 2.3.2-1).

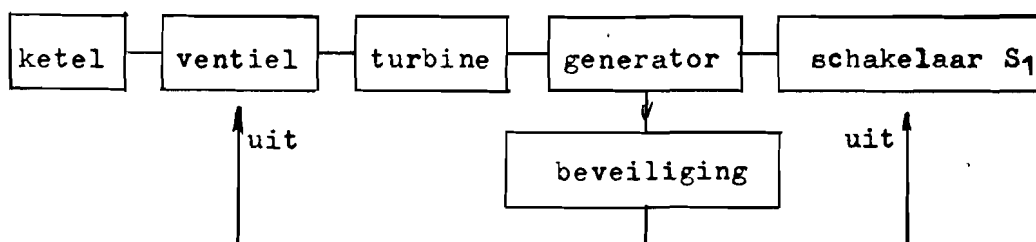


fig. 2.3.2-1.

Nadat het snelsluitventiel gesloten is expandeert de stoom in de turbine nog tot in de condensor. Dit veroorzaakt, ook na het sluiten van het snelsluitventiel nog enige toerenverhoging.

Indien de aard van de storing een kleine tijdsvertraging tussen het ontstaan en het uitschakelen toelaat is het veiliger de schakelaar S_1 te openen op een commando van het snelsluitventiel (fig. 2.3.2-2). Bij deze wijze van uitschakelen wordt het risico vermeden dat de schakelaar opent terwijl het snelsluitventiel weigert.

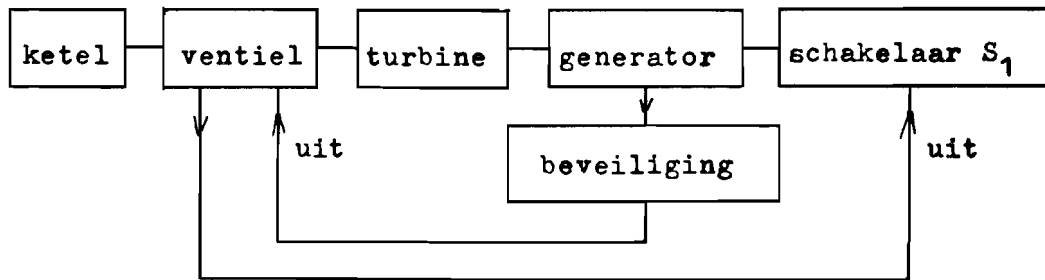


fig. 2.3.2-2.

De veiligste, hoewel ook de traagste uitschakelmethode is te wachten tot alle stroom door de turbine is geëxpandeerd. De turbine levert dan geen aandrijvend vermogen meer, de generator onttrekt energie aan het net, ter compensatie van o.a. wrijvingsverliezen. Een terugwattrelais signaleert de aandrijvende werking van de generator en geeft een uitschakelbevel aan de schakelaar door (fig. 2.3.2-3).

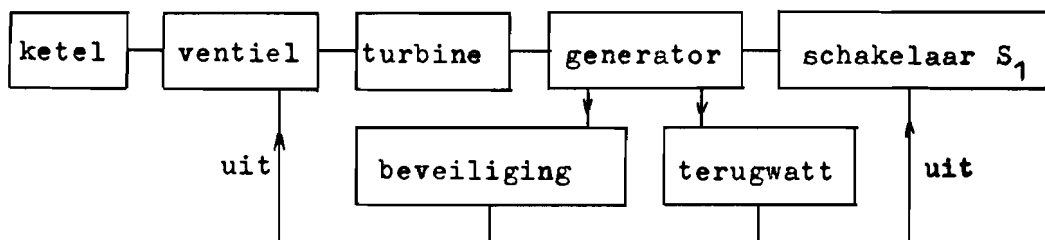


fig. 2.3.2-3.

Bij deze wijze van uitschakelen wordt het gevaar van overtoeren geheel bezworen.

2.3.3. Onder alle omstandigheden dient vermogen voor het eigenbedrijf beschikbaar te zijn. Bij een storing in de eenheid wordt schakelaar S_1 (fig. 1.2) geopend, zodat het net het eigenbedrijf blijft voeden. Bij een storing in het net schakelt S_2 uit, de eenheid voedt dan het eigenbedrijf.

Treedt een sluiting in de eigenbedrijfstransformator op dan schakelen S_1 en S_2 beide uit waardoor de eigenbedrijfsvoeding wordt onderbroken. Bovendien krijgt dan ook schakelaar S_3 een "uit" bevel. De eigenbedrijfsvoeding dient in dat geval zo snel mogelijk te worden overgeschakeld op een reservevoeding (pingpongen).

2.3.4. De toepassing van twee vermogensschakelaars opent de mogelijkheid de ene schakelaar te gebruiken als reserve voor de andere.

Volgt na het aanspreken van een beveiligingselement een uitschakelcommando, hetzij aan schakelaar S_1 , hetzij aan S_2 , dan wordt dit commando ook naar een vertraagd hulprelais geleid. Verdwijnt na het uitschakelcommando de storing dan valt het relais af, blijft na het commando de storing aanwezig dan kan dit wijzen op een fout in de betreffende schakelaar.

Nadat het relais zijn vertragingstijd heeft doorlopen wordt een uitschakelbevel gegeven aan de beide vermogensschakelaars, de eigenbedrijfsschakelaar S_3 , het snelsluitventiel en de ontmagnetisatie. Sommige storingen worden niet opgeheven voordat de rotor geheel ontmagnetiseerd is, zodat de vertragingstijd groter zal moeten zijn dan de tijd, nodig om de bekrachtiging tot nul terug te brengen. Bovendien moet de uitschakelprocedure via snelsluitventiel-terugwattrelais binnen deze vertragingstijd doorlopen kunnen worden.

De minimale vertragingstijd wordt om deze redenen op 4 seconden gesteld.

2.4. Karakteristieken van verschillende storingen. Beveiliging bij deze storingen.

2.4.1. Statoraardsluiting.

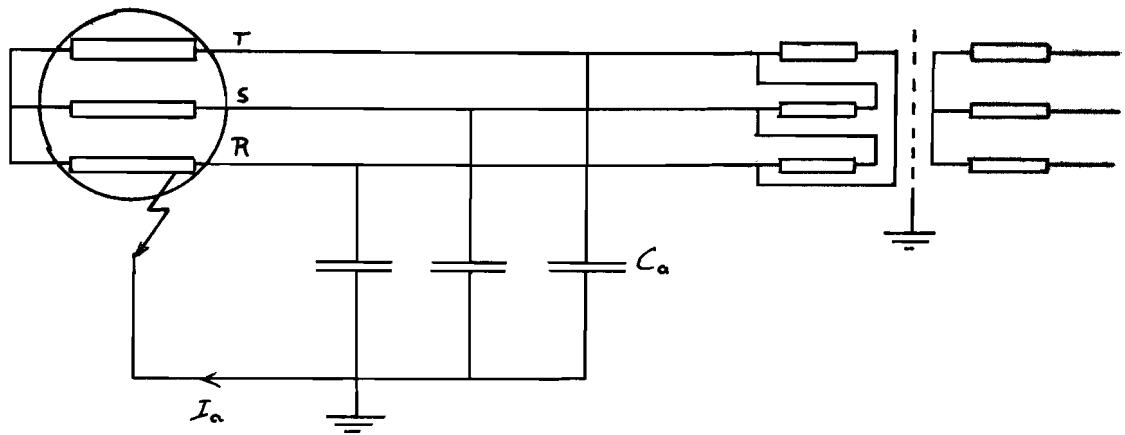


fig. 2.4.1-1.

Statorstoringen zijn meestal statoraardsluitingen. De wikkelingen liggen immers voor een groot gedeelte ingebed in het geaarde statorijzer. Bij het ontstaan van statoraardsluiting behoeft slechts éénmaal de wikkelingsisolatie te worden doorbroken, terwijl bij wikkelings- en windingsluiting een dubbele isolatiebarrière moet worden overwonnen. Bovendien zal niet gemakkelijk een wikkelings- of windingsluiting ontstaan zonder dat daarbij tevens contact met het statorijzer optreedt. De aardsluitingsbeveiliging vormt dus een zekere reserve voor deze storingen.

De machine is niet geaard en galvanisch gescheiden van het net. Bij een sluiting naar aarde zal het kortsluitpunt de nulpotentialiaal krijgen. Het sterpunt neemt de oorspronkelijke potentialiaal van het kortsluitpunt aan, echter met omgekeerd teken (fig. 2.4.1-2).

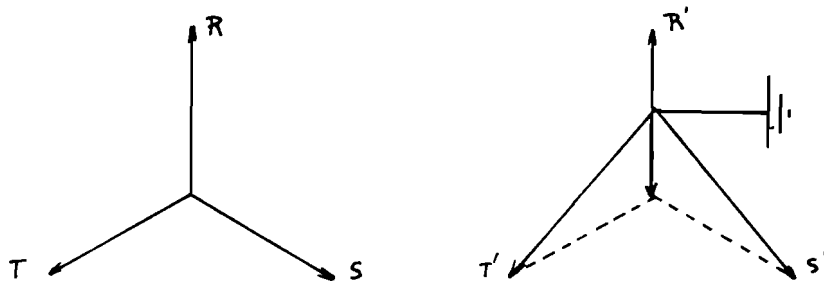


fig. 2.4.1-2.

De sluiting treedt bijvoorbeeld op op een punt met relatieve afstand q tot het sterpunt ($0 < q < 1$) in de R fase. Het sterpunt krijgt de spanning $-q U_R$, waarbij U_R de fasespanning van de machine voorstelt. De aardcapaciteit per fase is C_a , voor de totale aardstroom I_a wordt gevonden

$$I_a = -q U_R \cdot j\omega C_a$$

De totale capaciteit van één fase naar aarde ligt in de orde van grootte van $1 \mu\text{F}$. De maximale aardstroom, die ontstaat bij een sluiting aan de generatorklemmen bedraagt 8,2 A, terwijl de stroom lineair verloopt met de afstand tot het sterpunt.

De aardsluitstroom kan een te grote verwarming van het statorijzer veroorzaken zodat gevaar voor ijzerbrand ontstaat. Beschadiging van het statorijzer moet in elk geval vermeden worden omdat dit omvangrijke reparaties vergt.

De in de literatuur opgegeven waarden van de maximaal toelaatbare aardsluitstroom variëren van 5 - 20 A. Stijgt de aardsluitstroom boven deze waarde dan dient de generatorspanning zo snel mogelijk naar nul gebracht te worden d.w.z. de generator wordt van het net afgeschakeld en de ontmagnetisatie treedt in werking.

Blijft de aardsluitstroom beneden de genoemde waarde, dan wordt soms volstaan met een signalering van de storing. In dit geval wordt de machine dan naar nullast geregeld en daarna uit bedrijf genomen.

Teneinde verzekerd te zijn van een ruime veiligheidsmarge is in dit ontwerp de grenswaarde van de aardsluitstroom op ca. 1A gesteld. Dit betekent dat 90% van de wikkeling, gemeten vanuit de generatorklemmen beveiligd is met een element dat een directe uitschakeling en ontmagnetisering commandeert.

Treedt een aardsluiting op in de laatste 15% van de wikkeling, dan kan met een signalering worden volstaan. De kans op het

ontstaan van een aardsluiting in dit gebied is niet zo groot, omdat de wikkelingen over de gehele lengte een gelijk isolatieniveau bezitten, terwijl de geleiders slechts een fractie van de fasespanning voeren.

Aardsluiting in de eerste 90% van de wikkeling kan worden gedetecteerd met behulp van de homopolaire component die het spanningsstelsel in dit geval t.o.v. aarde heeft. De detectie vindt plaats hetzij met behulp van een spanningsmeting in het sterpunt, hetzij met een meting van de som van de fasespanningen aan de generatorklemmen. Het beveiligende relais dient aan te spreken op een spanning $\geq 0,1 U_f$.

Door het homopolaire karakter van de derde harmonische in de spanning zal ook in normaal bedrijf de machine een sterpuntverschuiwing vertonen met een frequentie van 150 Hz. Omdat de beveiliging bij deze spanning niet zal aanspreken wordt een ferrarisrelais toegepast, waarbij één spoel wordt aangesloten op de sterpuntsspanning, de andere op een gekoppelde spanning. De gekoppelde spanning is het verschil tussen twee fasespanningen, homopolaire spanningscomponenten t.o.v. aarde zullen hierin niet aanwezig zijn.

Het ferrarisrelais krijgt alleen een resulterend koppel indien de frequenties in de beide spoelen gelijk zijn, zodat het uitsluitend sterpuntverschuiwingen met een frequentie van 50 Hz zal detecteren. Homopolaire sterpuntverschuiwing met een frequentie van 50 Hz kan, bij toepassing van een machinetransformator zonder geaard scherm, vanuit het net worden geïnduceerd door de tussenwikkelingscapaciteit C_{tr} (fig. 2.4.1-3). De spanningsdeling $C_{tr} - C_a$ veroorzaakt een 50 Hz spanning op het sterpunt bij een eenfasige sluiting in het net, waarop de generatoraardsluitbeveiliging niet mag aanspreken. Bij toepassing van een machinetransformator met een geaard scherm vervalt C_{tr} , zodat geen moeilijkheden te verwachten zijn.

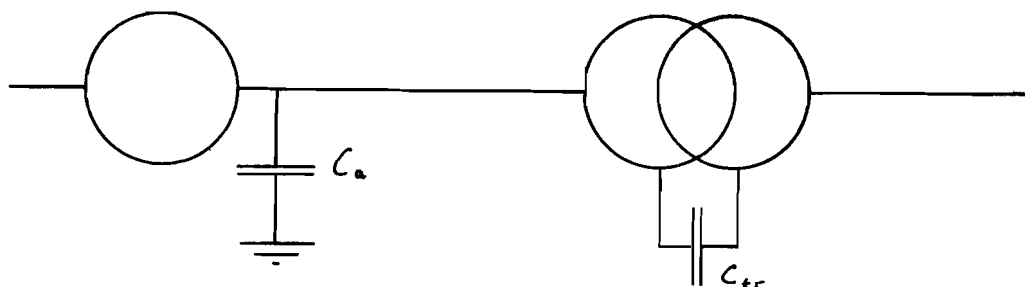
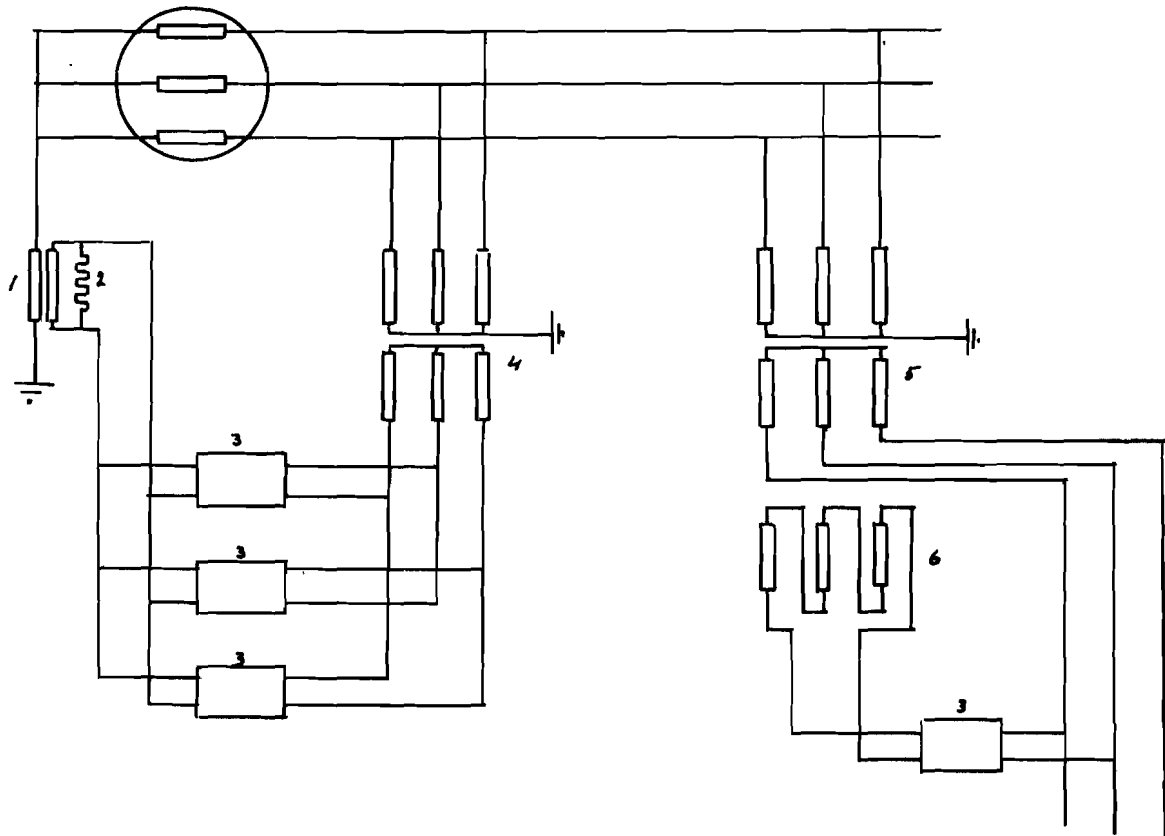


fig. 2.4.1-3.

Om de nodige reserve in de beveiliging te waarborgen worden drie wattmetrische relais opgesteld. Eén spanningspoel van elk relais wordt aangesloten op de secundaire klemmen van een spanningstransformator in het sterpunt. De tweede spanningspoel wordt aangesloten op de gekoppelde spanning (fig. 2.4.1-4).

Dit systeem is nog wel afhankelijk van het goed functioneren van één enkele transformator in het sterpunt. Als extra reserve wordt nog een vierde ferrarisrelais op een aparte spanningstransformator aangesloten (fig. 2.4.1-4). Dit kan zonder veel kosten geschieden, daar een dergelijke transformator toch nodig zal blijken te zijn voor de aardsluitbeveiliging van de laatste 15% van de wikkeling.



1. spanningstransformator 8,66 kV / 100 V klasse 1.
2. weerstand, nominale belasting voor 1.
3. wattmetrisch relais $U_{n1} = U_{n2} = 100 \text{ V}$ spreekt aan bij $P \geq 10\% P_n$.
4. spanningstransformator 15 kV / 100 V yyo kl. 1.
5. spanningstransformator 15 kV / 100 V yyo kl. 1.
6. spanningstransformator 15 kV / 57,7 V , open driehoek klasse 1.

fig. 2.4.1-4.

De gevoeligheid van de hierboven beschreven detectiemethode is groot, doch kan niet willekeurig worden opgevoerd. Een sluiting in het sterpunt wordt in elk geval niet gesignaleerd.

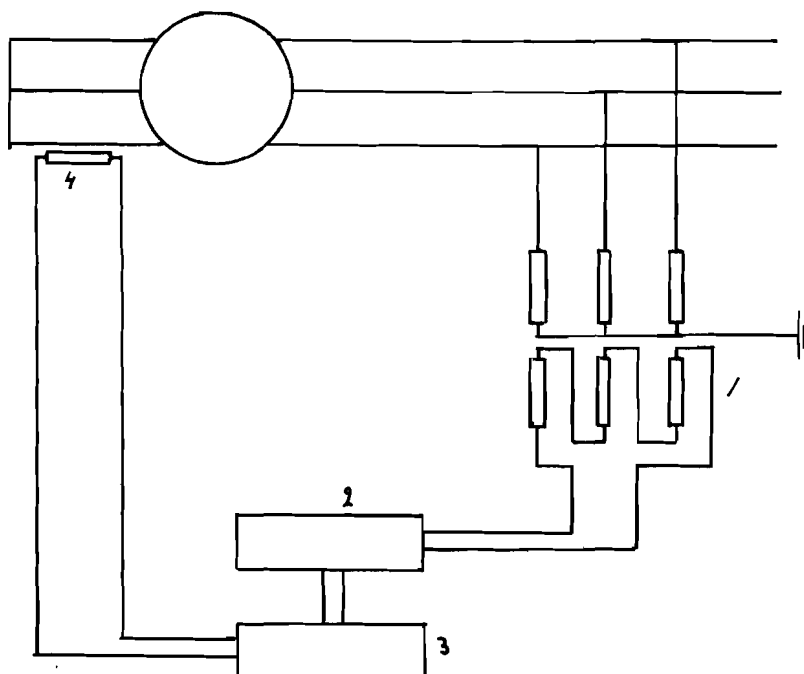
De meting van een kortsluiting in de omgeving van het sterpunt berust op de verandering in de spanningsverdeling van de homopolaire derde harmonische component van de spanning tijdens een aardsluiting. In ongestoord bedrijf stelt de derde harmonische spanning zich zodanig in dat de som van de aardstroom nul wordt. Afhankelijk van de verhouding van de aardcapaciteiten van generator wikkeling, machinerail en primaire wikkeling van de machinetransformator stelt zich op een bepaald punt van het circuit een nulpotential in.

Bij het ontstaan van een aardsluiting verschuift dit nulpunt naar het kortsluitpunt. Dit levert een spanningsverandering in het gehele circuit op, die des te groter is naarmate het kortsluitpunt verder van het oorspronkelijke nulpunt verwijderd ligt. De verandering is maximaal bij een sluiting in het sterpunt.

Meting van de homopolaire component van de 150 Hz spanning aan de generatorklemmen levert dus een indicatie bij het ontstaan van een aardsluiting in de buurt van het sterpunt.

Bij het overschrijden van een bepaald spanningsniveau spreekt een maximaalspanningsrelais aan.

De amplitude van de derde harmonische neemt in ongestoord bedrijf toe met de belastingsstroom. Om onnodig aanspreken te vermijden zal het noodzakelijk zijn dat de stroom de drempelwaarde van het maximaalspanningsrelais beïnvloedt.



1. spanningstransformator 15 kV / 57,7 V open driehoek, klasse 1.
2. banddoorlaatfilter 150 Hz.
3. maximaalspanningsrelais met stroomgestuurd houdcircuit
 $U_n = 5 \text{ V}$ $I_n = 5 \text{ A}$.
4. stroomtransformator 5000/5 A klasse 2, 9 kV isolatie.

fig. 2.4.1-5.

2.4.2. Wikkellingssluiting in de stator.

Tijdens het optreden van deze storing wordt niet meer voldaan aan de voorwaarde dat het verschil van de in- en uitgaande stroom van elke wikkeling nul is. De storing kan gedetecteerd worden met behulp van een differentiaalbeveiliging. Deze beveiliging spreekt aan indien het verschil van in- en uitgaande stroom groter is dan 20% van het gemiddelde.

$$I_1 - I_2 \geq 0,20 \frac{1}{2} (I_1 + I_2) \quad (\text{fig. 2.4.2-1})$$

Teneinde een zekere veiligheid in acht te nemen worden de transformatoren zodanig gedimensioneerd dat bij de maximaal optredende kortsluitstroom de onnauwkeurigheid ten hoogste 10% bedraagt.

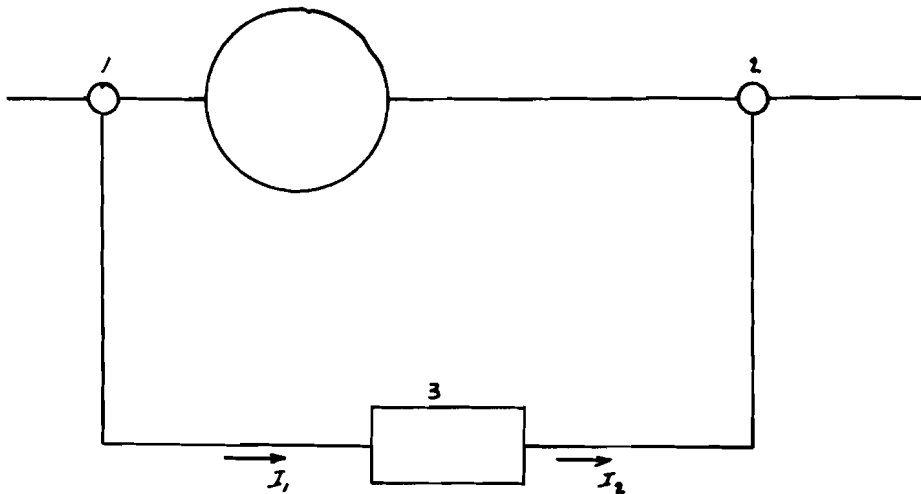
In 2.6.1 wordt voor de driefasige stootkortsluitstroom een waarde van $7,3 I_n$ gevonden. Dit is de maximale stroomsterkte door de generator. Indien de transformatoren een overstroomgetal $n = 15$ hebben zal bij deze stroomsterkte de fout per transformator kleiner dan 5% blijven.

Opmerking. Een overstroomgetal n betekent dat de afwijking van de stroomtransformator bij n -voudige overstroom kleiner dan 10% zal zijn. In deze, en volgende berekeningen is een lineair verloop aangenomen van de procentuele fout als functie van de stroomsterkte. In feite neemt de fout sneller dan lineair toe, zodat, voor stroomsterkten lager dan die gegeven door het overstroomgetal de fout kleiner zal zijn dan hier aangegeven. In het algemeen zal men dus met stroomtransformatoren met een lager overstroomgetal ook aan de gestelde eisen kunnen voldoen (zie fig. 2.4.3-2).

De generator is uitgevoerd met twee wikkelingen per fase. Zij voeren elk de helft van de nominale stroom d.i. 4,81 kA. De nominale stroomsterkte van het relais bedraagt 5 A. De overzetverhouding van de stroomtransformatoren zal dus 5000/5 A moeten bedragen.

De reserve op deze beveiliging (langsdifferentiaal beveiliging generator) wordt gevormd door de aardsluitbeveiliging (2.4.1) en de dwarsdifferentiaalbeveiliging (zie 2.4.3).

Aanspreken leidt tot directe uitschakelcommando's aan de schakelaar S_1 (fig. 1.2), de ontmagnetisatie en het snelsluitventiel.



1. stroomtransformator 5000/5 A. kl.2. $n = 15$ 9 kV isolatie.
2. stroomtransformator 5000/5 A. kl.2. $n = 15$ 15 kV isolatie.
3. differentiaalrelais, instelling 20%, $I_n = 5$ A.

$I_1 = I_2 = 4,81$ A bij nominale belasting van de generator.

fig. 2.4.2-1.

2.4.3. Windingssluiting in de stator van de machine.

In het geval van windingssluiting vormt zich in de statorwinding een kortgesloten keten die de opbouw van een veld in de richting loodrecht op het vlak van de kortgesloten windingen verhindert.

Door de magnetische koppeling zal een windingssluiting ook terugwerken op de spanningen van de beide gezonde fasen (fig. 2.4.3-1).

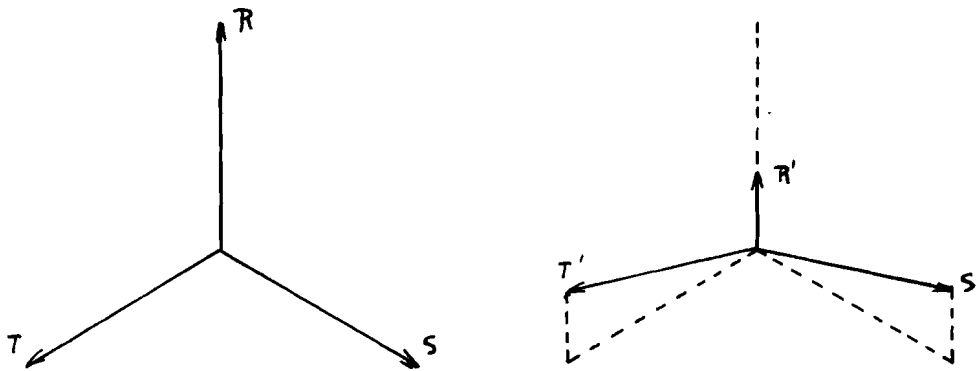


fig. 2.4.3-1.

De beide parallelle wikkelingen van de gestoorde fase krijgen een verschillende spanning geïnduceerd. Het verschil wordt gevormd door de sluiting in de ene wikkeling. Het verschil tussen de twee stromen dat hierdoor ontstaat kan een differentiaalbeveiliging (dwarsdifferentiaalbeveiliging) doen aanspreken. Dit verschil zal klein zijn indien slechts een klein aantal windingen in de sluiting is betrokken. De windingssluiting is dus een moeilijk te detecteren storing.

De dwarsdifferentiaalbeveiliging dient nauwkeurig ingesteld te zijn teneinde kortsluiting tussen een zo klein mogelijk aantal windingen nog te kunnen detecteren. De aanspreekcurve van de differentiaalbeveiliging zal zo nauwkeurig mogelijk in overeenstemming moeten worden met het verloop van de onnauwkeurigheid van de stroomtransformatoren, met inachtneming van de veiligheidsfactor.

De gevoeligheid in de buurt van de nominaalstroom kan grootgekozen worden b.v. 5%.

$$I_1 - I_2 = 0,005 \cdot \frac{1}{2} (I_1 + I_2)$$

Dit vraagt stroomtransformatoren met een fout van ten hoogste 1,25% bij nominale stroom.

Voor stromen tot $3,5 I_n$ kan de aanspreekgevoeligheid verlaagd worden tot 10%.

$$I_1 - I_2 = 0,10 \frac{1}{2} (I_1 + I_2)$$

De gezamenlijke fout van de beide stroomtransformatoren mag in dit gebied de 5% niet overschijden, per transformator kan een onnauwkeurigheid worden toegelaten van 2,5%. De fout bij een overstroomgetal $n = 15$ bedraagt bij een stroom $I = 3,5 I_n$ ten hoogste $\frac{3,5}{15} \cdot 10\% = 2,4\%$; dit voldoet aan de eisen. De maximaal doorgaande kortsluitstroom bedraagt $7,3 I_n$ bij een sluiting op de klemmen van de machinetransformator.

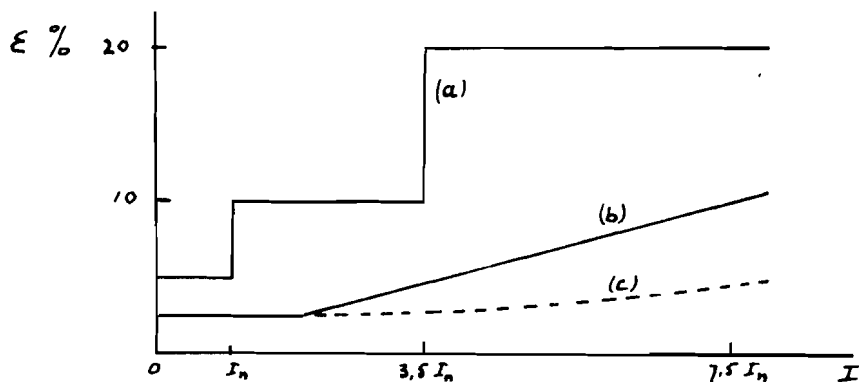
In het gebied van $3,5 I_n$ tot $7,3 I_n$ kan de aanspreekverhouding op 20% worden ingesteld. Dit betekent een maximale onnauwkeurigheid van 5% per stroomtransformator.

Wanneer $n = 15$ wordt bij $I = 7,3 I_n$ de fout maximaal

$$\frac{7,3}{15} \cdot 10\% = 4,9\%$$

zodat ook hier een overstroomgetal van 15 voldoende blijkt te zijn.

De werkelijke situatie ligt nog aanmerkelijk gunstiger, zie de opmerking op blz. 21 en fig. 2.4.3-2.

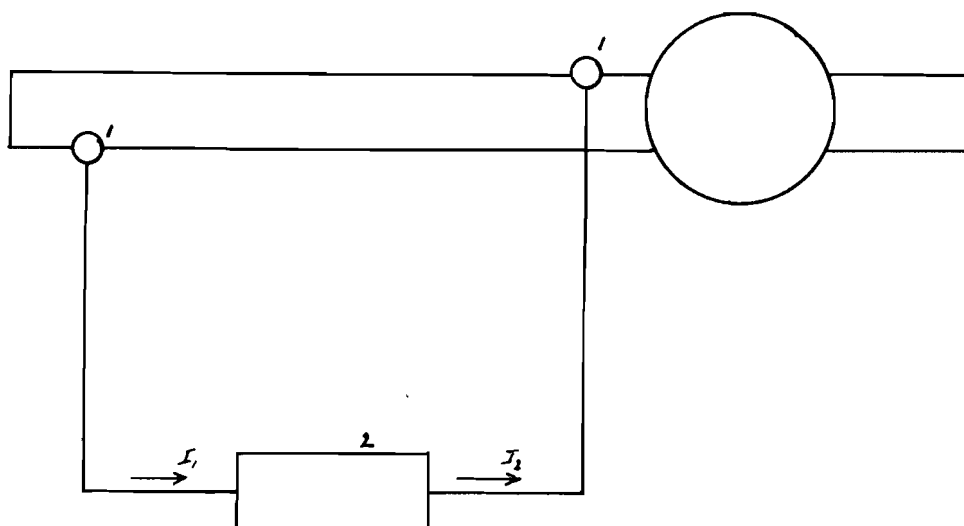


- (a) aanspreekcurve differentiaalrelais.
- (b) aangenomen foutcurve stroomtransformatoren.
- (c) werkelijke foutcurve stroomtransformatoren.

fig. 2.4.3-2.

Een reservebeveiliging is niet geprojecteerd. Bij weigering van de windingsluitingsbeveiliging zal de storing zich moeten uitbreiden totdat een aardsluiting of een wikkelingsluiting ontstaat en één der desbetreffende beveiligingen aanspreekt.

De dwarsdifferentiaalbeveiliging geeft parallelle commando's aan de schakelaar S_1 (fig. 1.2), de ontmagnetisatie en het snelsluitventiel.



1. stroomtransformator 5000/5 A klasse 1 n = 15 9 KV isolatie.
2. differentiaalrelais $I_n = 5A$, instelling 10% en 20%, drempelwaarde 5%.

$$I_1 = I_2 = 4,81 \text{ A.}$$

2.4.4. Sluiting in de machinetransformator.

Sluiting in de eigenbedrijfstransformator.

De snelste en gevoeligste beveiliging vormt het Buchholzrelais. Dit relais reageert op de oliebewegingen en op de gasbellen die bij een storing in de transformator ontstaan. Kleine hoeveelheden gas leiden tot een signalering, heftige oliebewegingen en de langs het relais passerende grote gasbellen, die bij een kortsluiting ontstaan, leiden tot afschakelen van de betreffende transformator.

Het Buchholzrelais beveiligt alleen de wikkelingen van de transformator en niet een overslag aan één der doorvoeringen.

Als reserve wordt een differentiaalbeveiliging geprojecteerd, die bovendien aanspreekt bij overslag op de transformator-klemmen. De gevoeligheid wordt meestal ingesteld tussen 6 en 10%. Bij gevoeliger instellingen ontstaat het gevaar dat de beveiliging aanspreekt op de magnetisatiestroom, indien de netspanning door omstandigheden abnormaal hoog zou zijn.

De maximaal doorgaande kortsluitstroom bedraagt voor de machinetransformator globaal 5,3 maal de nominale stroom (zie 2.6.2.), voor de eigenbedrijfstransformator bedraagt ze tienmaal de nominale stroom (zie 2.6.4).

Bij een aanspreekwaarde van 10% wordt 5% fout in de stroomtransformatoren toegelaten.

De stroomtransformatoren 5000/20 A hebben een overstroomgetal $n = 30$ zodat bij 5,3 voudige overstroom een maximale fout van 1,8% optreedt. De tussenstroomtransformator 2x20/5A heeft de nauwkeurigheidsklasse 0,5. Het overstroomgetal is groot, zodat de fout ongeveer 0,5% blijft.

Aan de hoogspanningszijde zijn stroomtransformatoren 1000/5 A geprojecteerd, alsmede een tussentransformator 5/5,43 A. De hoofdstroomtransformatoren hebben een overstroomgetal $n = 30$.

De tussentransformator heeft de nauwkeurigheidsklasse 0,5, het overstroomgetal is groot.

De totale fout in het secundaire en tertiaire circuit blijft kleiner dan ongeveer 4,6% (fig. 2.4.4-1).

De differentiaalbeveiliging van de eigenbedrijfstransformator vraagt drie stroomtransformatoren; aan de hoogspanningszijde een transformator 100/5 A $n = 50$. Deze veroorzaakt een fout van maximaal 2% bij 10-voudige overstroom. Aan de laagspanningszijde is een transformator 1500/5 A geprojecteerd, het overstroomgetal $n = 40$. De fout bij 10-voudige overstroom bedraagt 2,5%. De tussenstroomtransformator is 5/4,55 A, klasse 0,5; het overstroomgetal is groot zodat bij maximaal doorgaande kortsluitstroom de fout ongeveer 0,5% blijft.

De totale fout in het meetcircuit blijft dus beneden de 5% (fig. 2.4.4-2).

De beveiliging van de eigenbedrijfstransformator is gedimensioneerd op de nominale stroom, de bedrijfsstroom is lager (zie hoofdstuk 1.2).

De beveiliging van de eigenbedrijfstransformator geeft parallelle commando's aan de schakelaars S_1 , S_2 (fig. 1.2), het snelstuitventiel en de eigenbedrijfsschakelaar S_3 . In de commando's wordt een vertragingstijd van 0,1 seconde toegepast, om foutschakelingen door eventuele inschakelstromen te vermijden.

De beveiliging van de machinetransformator geeft parallelle commando's aan de schakelaar S_1 , de ontmagnetisatie en het snelstuitventiel.

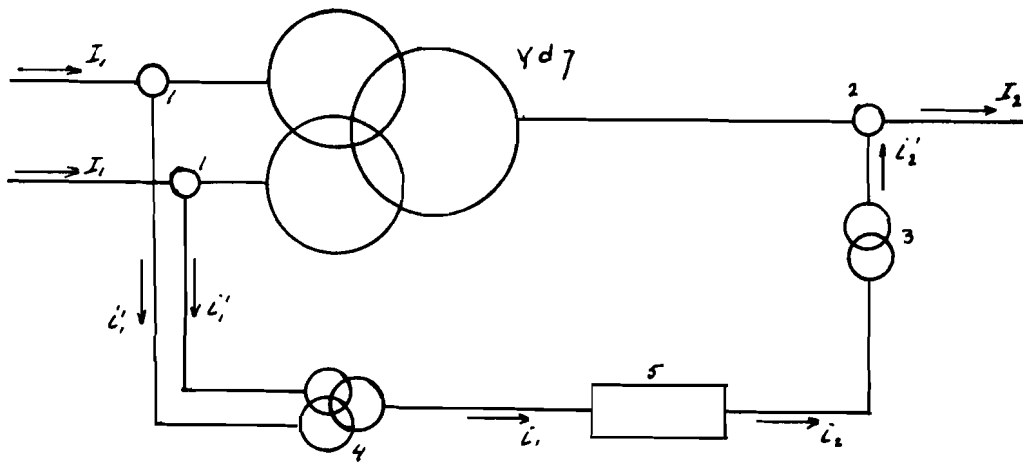


fig. 2.4.4-1.

1. stroomtransformator 5000/20 A. klasse 1 n = 30 15 kV isolatie.
2. stroomtransformator 1000/5 A. klasse 1 n = 30 150 kV isolatie.
3. tussentransformator 5/5,43 A. yd7 klasse 0,5.
4. tussentransformator 2x20/5 A. klasse 0,5 dd0.
5. differentiaalrelais, instelwaarde 10%, drempelwaarde 10% $I_n = 5 \text{ A}$.

$$I_1 = 4,81 \text{ kA.}$$

$$I_2 = 0,886 \text{ kA.}$$

$$i_1' = 19,2 \text{ A.}$$

$$i_2' = 4,43 \text{ A.}$$

$$i_1 = i_2 = 4,81 \text{ A. nominale stroomsterkten.}$$

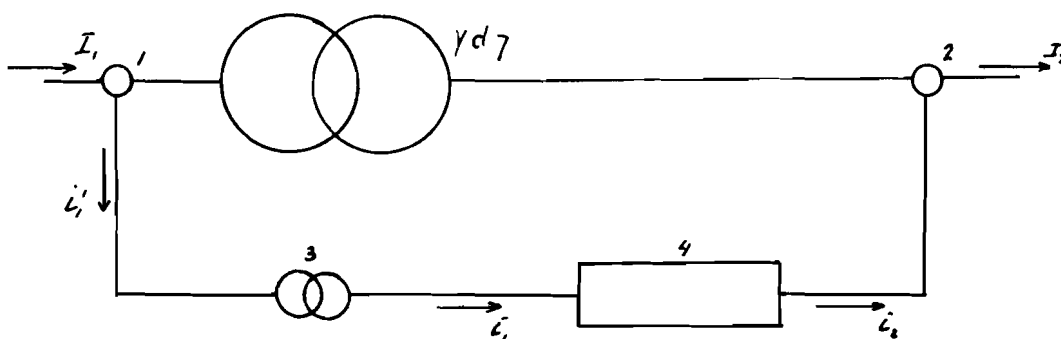


fig. 2.4.4-2.

1. stroomtransformator 100/5 A. klasse 1 $n = 50$ 150 kV isolatie.
2. stroomtransformator 1500/5A. klasse 2 $n = 40$ 10 kV isolatie.
3. tussentransformator 5/4,55A. yd 7 klasse 0,5.
4. differentiaalrelais, instelwaarde 10%, drempelwaarde 10%,
 $I_n = 5A$, vertragingstijd 0,1".

$$I_1 = 57,7 \text{ A.}$$

$$I_2 = 788 \text{ A.}$$

$$I_1' = 2,89 \text{ A.}$$

$$i_1 = i_2 = 2,63 \text{ A. bedrijfsstromen.}$$

Met betrekking tot de dimensionering van de stroomtransformatoren geldt ook hier de opmerking van blz. 21.

Van een reservedifferentiaalbeveiliging in de vorm van een driepunts-beveiliging van de generator, machinetransformator en eigenbedrijfstransformator wordt afgezien. Ook wanneer de primaire differentiaalbeveiliging juist funktioneert blijft een verschilstroom aanwezig zolang de machinespanning niet tot nul is teruggebracht. De noodzakelijke vertragingstijd van een reservebeveiliging wordt daardoor zo groot dat een differentiaalbeveiliging geen zin meer heeft.

2.4.5. Terugwatt.

Een beveiliging bij motorbedrijf van de machine is noodzakelijk ter vermindering van beschadiging van de turbine. Terugwatt kan wijzen op een afgesloten stoomtoevoer. In normaal bedrijf worden de lagedruk schoepen door de stoom gekoeld. Wordt de stoomtoevoer afgesneden terwijl de machine op nominaal toerental blijft draaien, dan bestaat gevaar voor beschadiging van de schoepen.

Om onnodige uitschakeling bij synchroniseren of tengevolge van energieslingeringen te voorkomen wordt een vertragingstijd van 10 seconden aangehouden. Deze vertragingstijd is niet toelaatbaar voor het geval dat een turbinebeveiliging aangesproken heeft, of indien reeds bekend is dat het snelsluitventiel gesloten is b.v. bij de uitschakelprocedure via het snelsluitventiel-terugwattrelais, zie 2.3.2.

In deze gevallen wordt geen vertragingstijd toegepast. Om in de genoemde gevallen een onvertraagd uitschakelcommando te verkrijgen, is het relais van een tweede uitschakelcontact voorzien.

Het instelpunt ligt beneden de totale verliezen van generator en turbine bij nominaal toerental. Deze verliezen liggen in de orde van 1%, zodat we het terugwattrelais op $0,75\% P_n$ kunnen instellen. Een meetfout van 10% wordt toegelaten. Indien de spanningstransformator 1% fout meet kan men in de meting van de stroomtransformator 9% onnauwkeurigheid toelaten bij $0,0075 I_n$.

Het terugwattrelais meet volgens het ferrarisprincipe

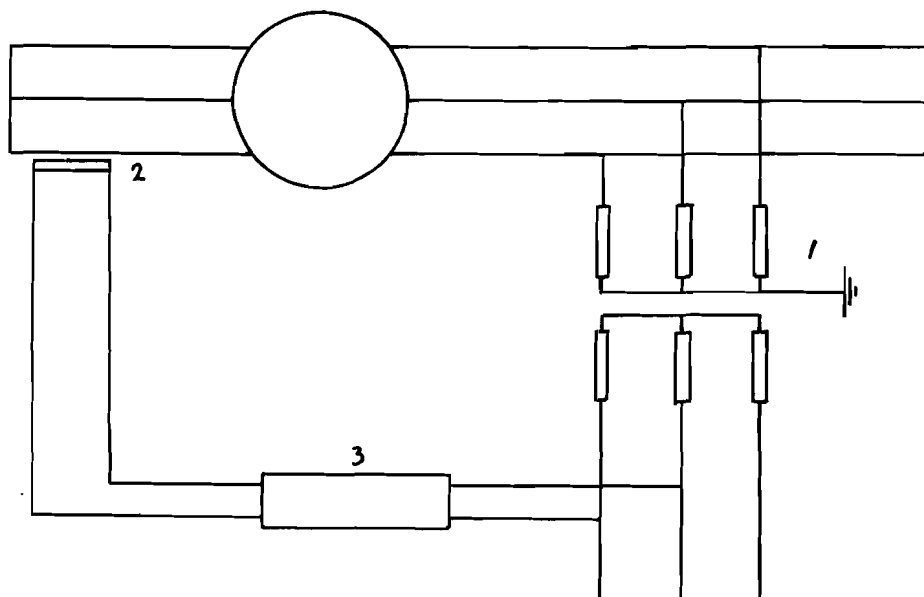


fig. 2.4.5-1.

1. spanningstransformator 15kV/100 V klasse 1 yyo
2. stroomtransformator 5000/5 A klasse 2 $n = 5$ 9 kV isolatie.
3. terugwattrelais $F < - 0,75\% P_n$
 $U_n = 100 V$ $I_n = 5A.$

2.4.6. Asymmetrische belasting.

De oorzaak van de asymmetrische belasting moet bijna altijd buiten de eenheid worden gezocht. Storingen binnen de eenheid die asymmetrische stromen veroorzaken worden door andere beveiligingselementen afgeschakeld.

De belasting zelf, bijvoorbeeld grote eenfasige ovens, kan enerzijds de oorzaak zijn van de asymmetrie, anderzijds kan de storing veroorzaakt worden door een asymmetrische sluiting in het net.

Asymmetrische belasting veroorzaakt een inverse stroomcomponent, waardoor in de generator een invers draaiveld ontstaat. Dit inverse veld induceert wisselstromen met de dubbele netfrequentie in de rotorhuid, de demperkooi en de bekrachtigingswikkeling. Deze stromen veroorzaken na enige tijd een ongewenste verhitting van de rotor.

In het algemeen kan een turbogenerator een inverse stroomcomponent van 5 à 9% van de nominale stroom continu voeren. Volgens de ASA voorschriften dient een generator een inverse component van 15% ruim 2 uur te kunnen verdragen zonder dat een overmatige verhitting van de rotor optreedt. Bij een inverse component van 100% is de toelaatbare temperatuurverhoging bereikt na 30 seconden.

De beveiliging bij asymmetrische belasting zal bij 0-6% inverse stroom niet behoeven aan te spreken. Tussen 6 en 15% inverse stroom kan worden volstaan met een signaal, boven 15% zal een uitschakelbevel worden gegeven. De vertragingstijd van dit uitschakelbevel bedraagt 6 seconden. De machine wordt bij blijvende grote asymmetrie dan nog tijdig van het net afgeschakeld, terwijl bij een asymmetrie die het gevolg is van een storing in het net, de netbeveiliging voldoende gelegenheid krijgt om in te grijpen, zodat de machine dan in bedrijf zal blijven.

De uitschakeling vindt plaats via het snelsluitventiel-terugwattrelais

Voor het schema zie fig. 2.5-1.

2.4.7. Sluiting op de centralerail.

Hoewel de kortsluiting op de centralerail niet meer behoort tot de storingen in de eenheid, zijn de gevolgen voor de eenheid zo belangrijk, dat een beveiliging zal moeten worden aangebracht.

Allereerst zal de generator beschermd moeten worden tegen de grote stroomsterkte die tijden zo'n storing optreedt. Verder, kan bij plotseling verdwijnen van de storing asynchronisme optreden tussen het net en de generator. In hoofdstuk 4 wordt hierop nader ingegaan.

Als beveiliging wordt een distantierelais toegepast (fig. 2.4.7-1). Deze vormt de laatste schakel in de netbeveiliging, doch is slechts zeer ten dele bruikbaar als reserve op de distantierelais aan de lijnzijde.

Het relais spreekt aan op een gemeten impedantie kleiner dan 80% van de impedantie van de 4 lijnen parallel. Dit betekent dat bij kortsluiting op de rail van het verderop gelegen verdeelstation het relais niet aanspreekt. Bij een kortsluiting op een van de lijnen zal alleen aanspreken volgen wanneer de storing dicht bij de centralerail ligt. De impedantie per lijn is immers 14Ω , bovendien wordt nog via andere wegen kortsluitvermogen naar het kortsluitpunt geleverd. De distantiebeveiliging aan de generatorzijde is dus beperkt tot de centralerail en een klein gedeelte van de lijnen in de nabijheid. Teneinde een storing op de lijnen selectief te doen afschakelen door de beveiliging aan de lijnzijde is het noodzakelijk om het relais aan de generatorzijde een vertragingstijd van 0,6 seconden te geven.

Een reserve op de netbeveiliging door een impedantiemeting na de eerste vertragingstijd kan niet effectief tot stand worden gebracht.

Als meettransformatoren worden gebruikt een spanningstransformator 150kV/173V klasse 1 en een stroomtransformator 1000/5A. Tijdens een sluiting op de centralerail wordt een meetfout van 10% in de impedantie toegelaten d.w.z. de onnauwkeurigheid van de stroomtransformator mag bij de maximaal doorgaande kortsluit-

stroom $I \leq 4000A$ 8% bedragen. Dit leidt tot een overstroom-
getal van 5.

De primair te meten impedantie bedraagt $0,8 \cdot 3,5 \Omega = 2,8 \Omega$,
de secundaire impedantie bedraagt:

$$\frac{U_{\text{sec}}}{I_{\text{sec}}} = \frac{173}{150.000} \cdot \frac{1000}{5} \frac{U_{\text{prim}}}{I_{\text{prim}}} =$$
$$= 0,231 \cdot 2,8 \Omega = 0,647 \Omega.$$

De distantiebeveiliging aan de generatorzijde geeft een uit-
schakelcommando aan de schakelaar S_2 .

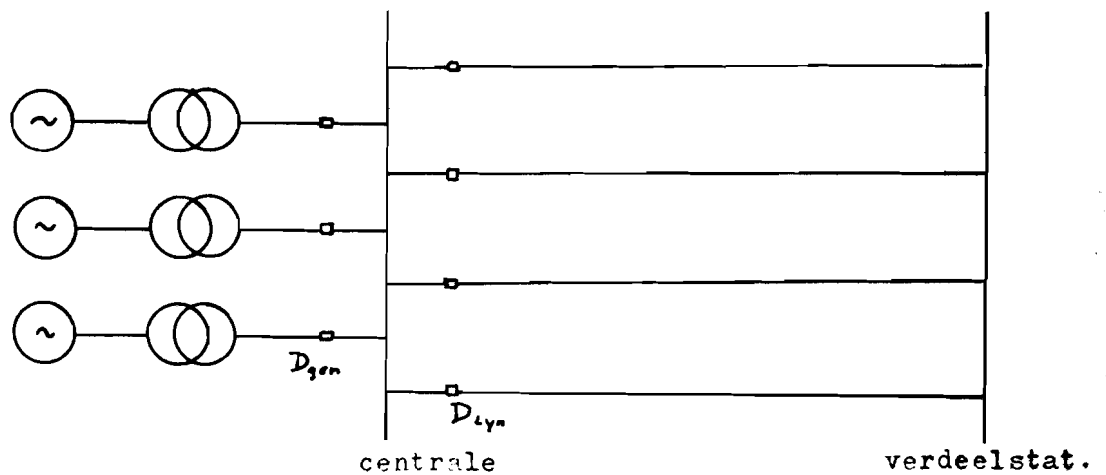


fig. 2.4.7-1.

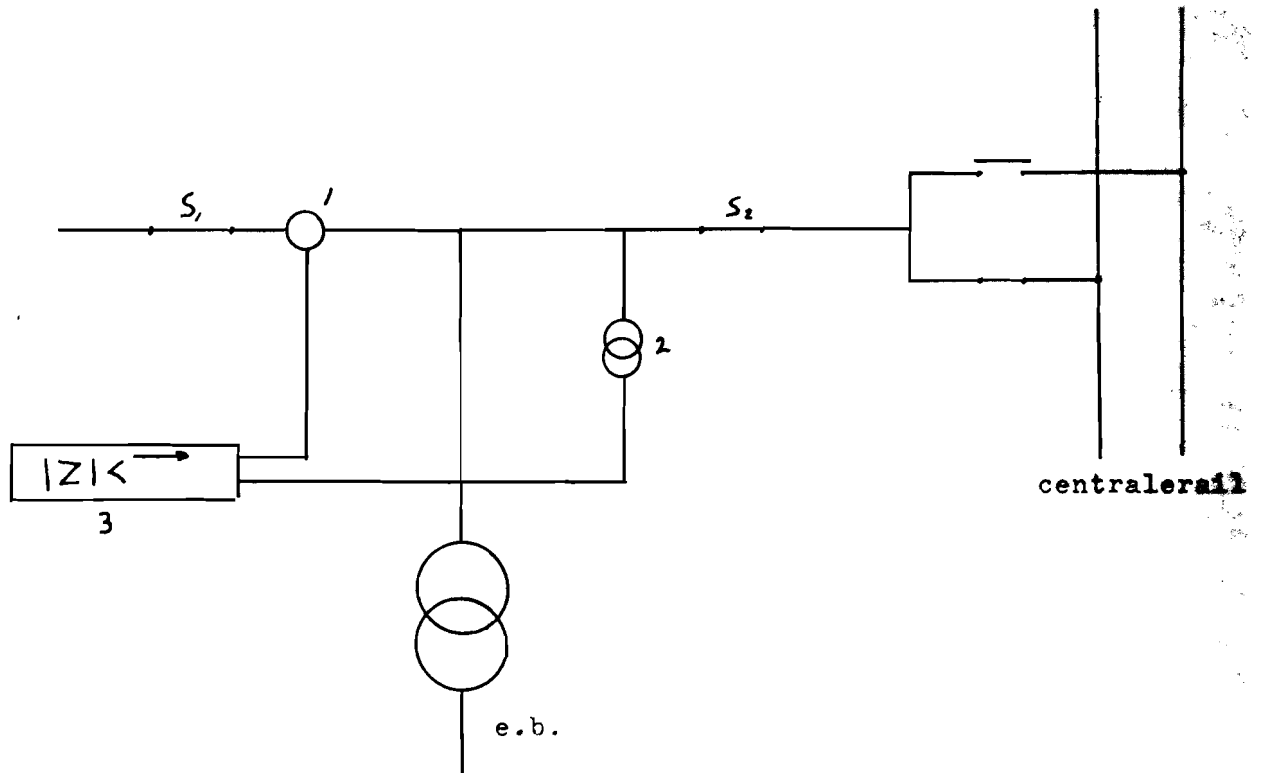


fig. 2.4.7-2.

1. stroomtransformator 1000/5A klasse 2 n = 5 150 kV isolatie.
2. spanningstransformator 150kV/173V yyo klasse 1.
3. distantierelais $Z < 0,647$ t = 0,6"

2.4.8. Maximaalbeveiliging.

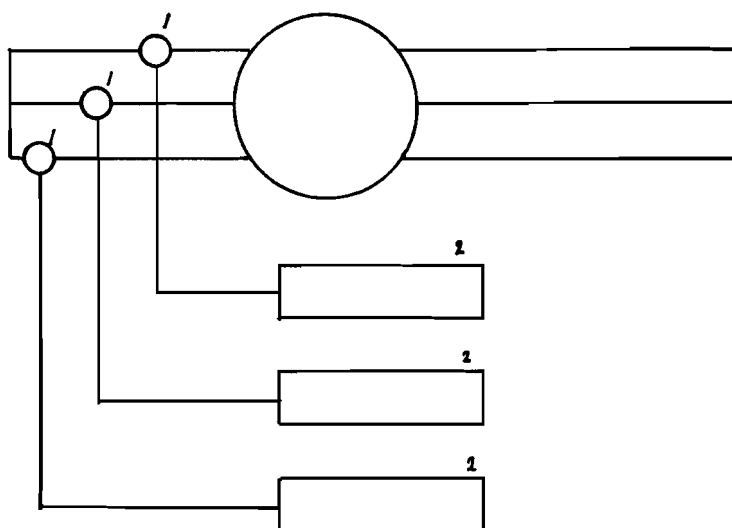
Als laatste reservebeveiliging wordt de maximaalbeveiliging toegepast. Deze geeft een uitschakelcommando indien de generatorstroom de drempelwaarde $1,5 I_n$ overschrijdt.

De beveiliging is niet selectief zodat ze pas in werking zal mogen treden wanneer kan worden aangenomen dat alle selectief werkende beveiligingselementen hebben gefaald. De vertragingstijd wordt mede bepaald door de beveiliging van het verdeelstation. De maximaalrelais zullen ook aanspreken op een achter het verdeelstation gelegen storing (zie 2.6.5), zodat ze pas kunnen ingrijpen nadat de maximale vertragingstijd van de beveiliging van het verdeelstation en de lijnbeveiliging van de van de centrale afgaande lijnen is doorlopen.

Deze tijd wordt op 5 sek. gesteld, de vertragingstijd van de maximaalrelais is 5,5 sek.

Uit 2.6.6. blijkt dat de stroomsterkte bij plafondbekrachtiging en 150 kV railspanning $1,5 I_n$ bedraagt. Deze toestand wordt nog juist aanvaardbaar geacht, boven deze stroomsterkte dient het maximaalrelais aan te spreken. Voor een relais met nominale stroomsterkte van 5 A betekent dit een instelpunt van $1,44 I_n$, aangezien in nominaal bedrijf de secundaire stroom 4,81 A bedraagt.

De beveiliging geeft primair een uitschakelcommando aan het snelsluitventiel. Zodra het snelsluitventiel gesloten is worden commando's gegeven aan de beide schakelaars, de ontmagnetisatie en de eigenbedrijfsschakelaar.



1. stroomtransformator 5000/5A klasse 2 n = 5 9 kV isolatie.
2. maximaalstroomrelais $I > 1,44 I_n$ t = 5,5 sek.

2.4.9. Wegvallen van de bekrachtiging.

Wanneer de bekrachtiging van de machine wegvalt zal deze als asynchrone generator gaan werken. Zij zal grote blindvermogens opnemen; de toerenverhoging zal bij deze machine ongeveer 1,5 à 2% bedragen.

In de rotor treden hoge stromen op die het koper, voornamelijk van de demperkooi ontoelaatbaar kunnen verwarmen. De statorstroom kan 1,4 - 2,3 maal de nominale waarde aannemen zodat ook de stator een temperatuurverhoging zal ondergaan.

Hoewel vooral de rotor snel verwarmt is bij dit type storing de beveiliging in de eerste plaats gericht op de bescherming van het net. Doordat blindvermogen wordt opgenomen door de machine kan de netspanning gaan dalen, zodat de netbeveiliging onnodig aanspreekt, terwijl de storing alleen op de juiste wijze opgeheven kan worden door de generator van het net te schakelen.

Detectie geschiedt aan de wisselstroomzijde van de generator. Het meetprincipe berust op het feit dat bij het geheel of voor een groot gedeelte wegvallen van de bekrachtiging een baan doorlopen wordt in het R-X vlak (fig. 2.4.9-1) die binnen het gearceerde gebied komt, nog voordat de machine één pool geslipt is

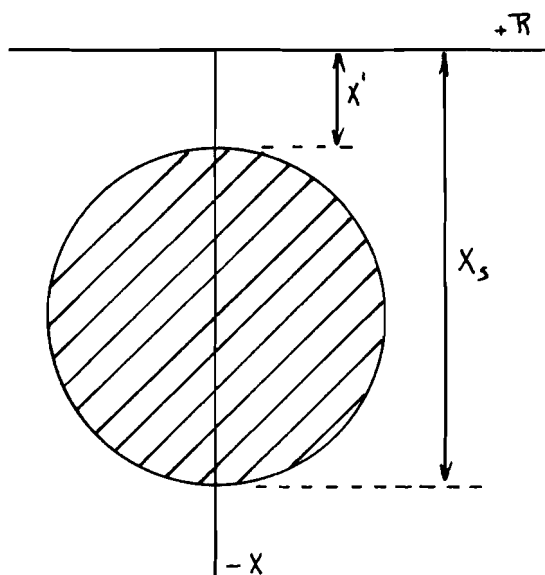


fig. 2.4.9-1

Zou de machine synchroon blijven draaien na het wegvallen van de bekrachtiging, wat bij lage voorbelasting van de turbine kan voorkomen, dan is de synchrone reaktantie een maat voor het opgenomen blindvermogen. Gaat de rotor slippen, dan kan de reaktantie ten opzichte van het net gaan naderen tot de transiënte.

De beveiliging bestaat uit een impedantierelais, dat voor impedantiewaarden gelegen binnen de cirkel van fig. 2.4.9-1 een uitschakelcommando geeft.

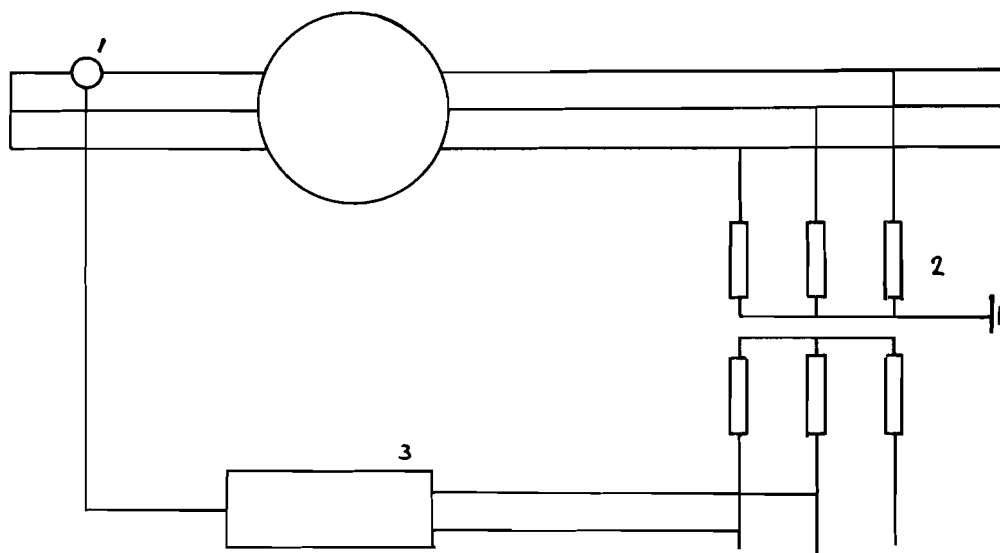
In het schema (fig. 2.4.9-2) is als referentiespanning de fase-spanning U_{TS} gekozen, terwijl als meetstroom I_R wordt gebruikt. De impedantiekring wordt daardoor 90° verschoven, de middellijn ligt op de +R-as. De extremen van de impedantie worden $X' \sqrt{3}$ en $X_S \sqrt{3}$.

Aan de primaire zijde is $X' = 0,18 \Omega$
 $X_S = 1,44 \Omega$.

De spanningstransformator heeft de overzetverhouding 15kV/100V., de stroomtransformator 5000/5A.

$$X_{\text{sec}} = \frac{100}{15000} \cdot \frac{5000}{5} X_{\text{prim}} = 0,67 X_{\text{prim}}$$

Het relais wordt secundair dus ingesteld in het cirkelvormige gebied met middellijn op de +R-as, terwijl $0,18 \sqrt{3} \cdot 0,67 < |Z| < 1,44 \sqrt{3} \cdot 0,67 \Omega$
of $2,08 < |Z| < 16,6 \Omega$.



1. stroomtransformator 5000/5A klasse 2 n = 5 9 kV isolatie.
2. spanningstransformator 15kV/100V yyo klasse 1.
3. impedantierelais $2,08 < |Z| < 16,6 \Omega$.

2.4.10. Aardsluiting in het bekrachtigingscircuit.

Deze storing zal geen schade veroorzaken, indien geen enkel punt van het bekrachtigingscircuit is geaard. Wanneer men geattendeerd is op het bestaan van een aardsluiting is er geen bezwaar om de machine nog enige tijd in bedrijf te houden.

Mocht naast de eerste storing nog een tweede aardsluiting optreden, dan ontstaat een toestand, te vergelijken met een windingssluiting in de rotor (zie 2.4.11) welke wél gevaaren voor de machine oplevert.

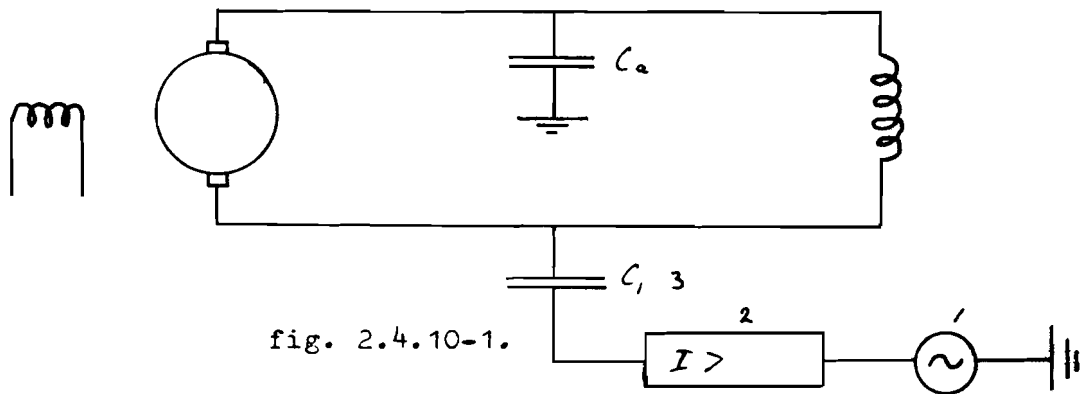


fig. 2.4.10-1.

1. spanningstransformator $U_{\text{sec}} = 100 \text{ V}$.
2. maximaalstroomrelais.
3. condensator $C_1 \gg C_a$.

De detectiemethode berust op het overbruggen van de aardcapaciteit door een aardsluiting (fig. 2.4.10-1). Een wisselspanning wordt via de condensator C_1 toegevoerd aan het rotorcircuit. Bij het inzetten van de storing neemt de stroom toe, een maximaalrelais verzorgt de signalering.

2.4.11. Windingssluiting in het bekrachtigingscircuit.

Tijdens een windingssluiting kan de vorm van het rotorveld plaatselijk gewijzigd worden. Dit veroorzaakt ongebalanceerde krachten op de rotor, die aanleiding kunnen zijn tot trillingen.

Verder kan door de boog, ontstaan op het kortsluitpunt, de rotor plaatselijk sterk verhit worden. De hiermee gepaard gaande grotere excentriciteit verhoogt eveneens de trillingsamplitude der machine.

Detectie van de storing kan plaats vinden met behulp van de trillingsopnemers aan de machine. Overschrijdt de trillingsamplitude een vooraf ingestelde waarde, dan zal de machine zo snel mogelijk tot stilstand moeten worden gebracht, de ontmagnetisatie zal in werking moeten treden.

Voorzichtigheidshalve kan de ingestelde maximum trillingsamplitude door het aanspreken van de aardsluitbeveiliging worden verlaagd.

Een goede detectie van de windingssluiting langs elektrische weg is niet bekend.

2.5. Samenvatting.

In fig. 2.5-1 en 2.5-2 en in de tabellen 2.5-1 en 2.5-2 worden de beveiligingssystemen aan de wisselstroomzijde van de machine nogmaals schematisch naar voren gebracht.

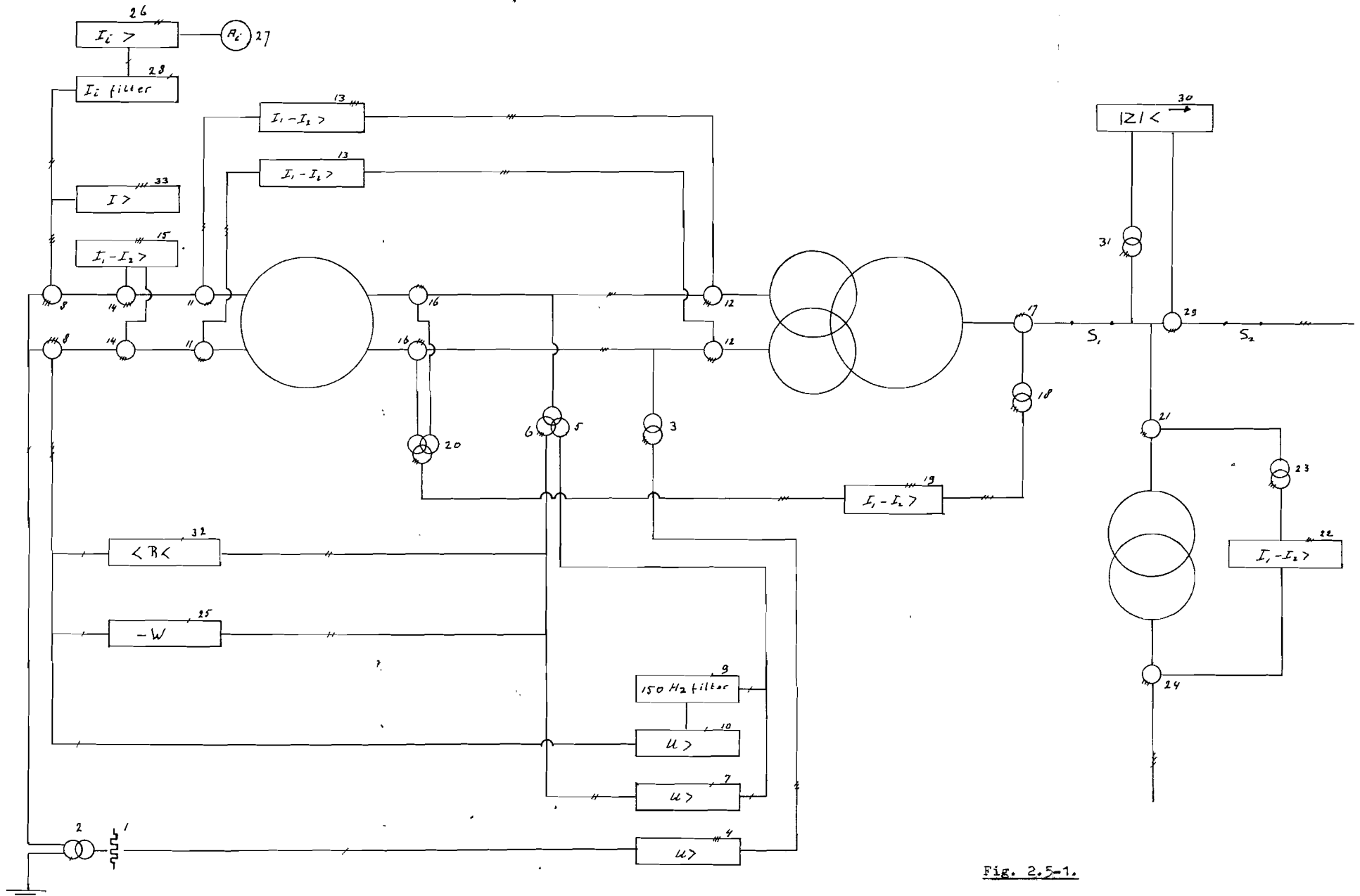


Fig. 2.5-1.

Schema beveiliging

Tabel 2.5-1. Stuklijst.

<u>nr.</u>	<u>aantal</u>	<u>omschrijving</u>
<u>statoraardsluitingsbeveiliging:</u>		
1	1	weerstand, nominale belasting voor transformator 2.
2	1	spanningstransformator 8,66kV/100V enkelfasig klasse 1.
3	1	spanningstransformator 15kV/100V yyo klasse 1.
4	3	wattmetrisch relais $P > 10\% P_n$ $U_{n1} = U_{n2} = 100V$.
5	1	spanningstransformator 15kV/57,7V open driehoek klasse 1.
6	1	spanningstransformator 15kV/100V yyo klasse 1.
7	1	wattmetrisch relais spreekt aan op $P > 10\% P_n$ $U_{n1} = U_{n2} = 100V$.
8	1	stroomtransformator 5000/5A klasse 2 n = 5 9 kV isolatieniveau.
9	1	banddoorlaatfilter 150 Hz.
10	1	maximaalspanningsrelais met stroomgestuurd houdcircuit.

langsdifferentiaalbeveiliging generator:

11	6	stroomtransformator 5000/5A klasse 2 n = 15 9 kV isolatieniveau.
12	6	stroomtransformator 5000/5A klasse 2 n = 15 15 kV isolatieniveau.
13	6	differentiaalrelais, instelwaarde 20% $I_n = 5A$.

dwarsdifferentiaalbeveiliging generator:

14	6	stroomtransformator 5000/5A klasse 1 n = 15 9 kV isolatieniveau.
15	3	differentiaalrelais, instelwaarde 10% en 20%, drempelwaarde 5% $I_n = 5A$.

Tabel 2.5-1. Stuklijst.

<u>nr.</u>	<u>aantal</u>	<u>omschrijving</u>
<u>differentiaalbeveiliging machinetransformator:</u>		
16	6	stroomtransformator 5000/20A klasse 1 n = 30 15 kV isolatieniveau.
17	3	stroomtransformator 1000/5A klasse 1 n = 30 150 kV isolatieniveau.
18	1	tussentransformator 5/5,43A yd7 klasse 0,5.
19	3	differentiaalrelais, instelwaarde 10%, drempel- waarde 20% $I_n = 5A$.
20	1	tussentransformator 2×20 /5A ddo klasse 0,5
<u>differentiaalbeveiliging eigenbedrijfstransformator:</u>		
21	3	stroomtransformator 100/5A klasse 1 n = 50 150 kV isolatieniveau.
22	3	differentiaalrelais, instelwaarde 10%, drempel- waarde 10% $I_n = 5A$.
23	1	tussentransformator 5/4,55A yd7 klasse 0,5.
24	3	stroomtransformator 1500/5A klasse 2 n = 40 10 kV isolatieniveau.
<u>terugwattbeveiliging:</u>		
6	1	spanningstransformator 15kV/100V yyo klasse 1.
8	1	stroomtransformator 5000/5A klasse 2 n = 5 9 kV isolatieniveau.
25	1	terugwattrelais, instelwaarde $P < - 0,75\% P_n$ $U_n = 100V$ $I_n = 5A$.

Tabel 2.5-1. Stuklijst.

<u>nr.</u>	<u>aantal</u>	<u>omschrijving</u>
<u>asymmetrische belasting:</u>		
8	2	stroomtransformatoren 5000/5A klasse 2 n = 5 9 kV isolatieniveau.
26	2	asymmetrierelais (maximaalspanningsrelais) a) $I_2 > 15\% I_n$ b) $I_2 > 6\% I_n$
27	1	voltmeter, geijkt op $I_2 = 0 - 15\% I_n$ 50 Hz.
28	1	asymmetriefilter $I_n = 5A$.

distantiebeveiliging:

29	3	stroomtransformator 1000/5A klasse 2 n = 5 150 kV isolatieniveau.
30	1	distantierelais, driefasig, instelwaarde $X < 0,647 \Omega$ $U_n = 100V$ $I_n = 5A$.
31	1	spanningstransformator 150kV/173V yyo klasse 1.

maximaalbeveiliging:

8	3	stroomtransformator 5000/5A klasse 2 n = 5 9 kV isolatieniveau.
33	3	maximaalstroomrelais, instelwaarde $I = 1,44 I_n$ $I_n = 5A$.

wegvallen bekrachtiging:

8	1	stroomtransformator 5000/5A klasse 2 n = 5 9 kV isolatieniveau.
6	1	spanningstransformator 15kV/100V yyo klasse 1.
32	1	impedantierelais $2,08 < R < 1,66 \Omega$ $I_n = 5A$ $U_n = 100V$.

Tabel 2.5-1. Stuklijst.

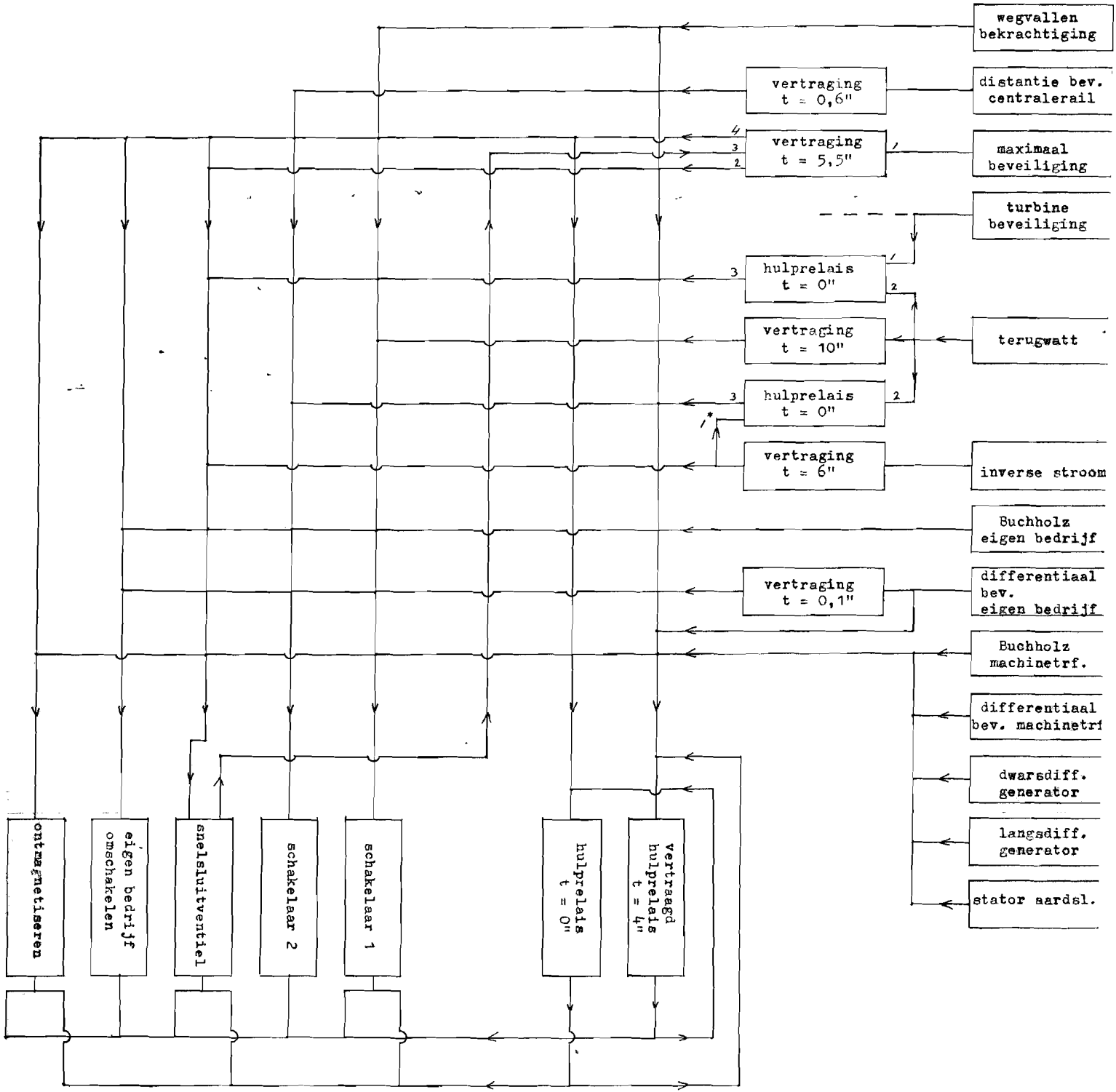
<u>nr.</u>	<u>aantal</u>	<u>omschrijving</u>
<u>aardsluiting rotorcircuit:</u>		
1		spanningstransformator, enkelfasig, secundaire spanning = 100V.
1		condensator: 10 μ F, wisselspanning: 100V.
1		maximaalstroomrelais, instelwaarde 100 mA.

windingssluiting rotorcircuit:

trillingsopnemers.

bewakingsrelais trillingsamplitude.

8. 2. 5-2.
 cijfers geven de
 lgorie der commando's
 in.
 Enkel 1 dient door
 t hulprelais ca.
 sekonden vastgehouden
 worden.



Tabel 2.5-2.

c = direkt commando o = indirekt commando, al dan niet ver- traagd, lopend via het met x aangegeven beveiligingsele- ment.		hulprelais t=0"	vertraagd hulp- relais t=4"	hulprelais t=0"	hulprelais t=0"	vertrags- relais t=10"	vertrags- relais t=6"	vertrags- relais t=5,5"	vertrags- relais t=0,1"	schakelaar 1	schakelaar 2	snelsluitklep	e.b. omscha- kelen	ontmagnetiseren	signaal
statorardsluiting 0-90% van de wikkeling	1	x	o							o		o	o	o	o
	2	o	x							o	o	o	o	o	o
	3									x					o
	4											x			o
	5													x	o
	6														x
statorardsluiting 95-100% van de wikkeling	1														x
Langsdifferentiaal generator dwarsdifferentiaal generator Langsdifferentiaal machinetransforma- tor Buchholz machinetransformator	1	x	o							o		o		o	o
	2	o	x							o	o	o	o	o	o
	3									x					o
	4											x			o
	5													x	o
	6														x
differentiaal e.b. transformator	1	o	x							o	o	o	o	o	o
	2		o					x	o	o	o	o	o	o	x
	3														
Buchholz e.b.	1	o	x							o	o	o	o	o	o
	2									x					o
	3										x				o
	4											x			o
	5												x		o
	6														x
terugwatt	1		o			x				o					x
	2														
terugwatt + ver- tragsrelais "inverse stroom"	1		o		x						o				x
	2														
terugwatt + turbinebeveiliging	1		o	x						o		o			x
	2														

Tabel 2.5-2.

		hulprelais t=0"	vertraagd hulprelais t=4"	hulprelais t=0"	hulprelais t=0"	vertragsrelais t=10"	vertragsrelais t=6"	vertragsrelais t=5,5"	vertragsrelais t=0,1"	schakelaar 1	schakelaar 2	snelsluitklep	e.b. omschakelen	ontmagnetiseren	signaal
hulprelais t=0"	1	o	x							o	o	o	o	o	o
	2									x					o
	3											x			o
	4													x	o
vertraagd hulprelais t=4"	1	x	o							o		o		o	o
	2									x					o
	3										x				o
	4											x			o
	5												x		o
	6													x	o
hulprelais t=0" (terugwatt + turbinebeveiliging)	1	o	x							o	o	o	o	o	o
	2									x					o
	3											x			o
hulprelais t=0" (terugwatt + inverse stroom)	1	o	x							o	o	o	o	o	o
	2										x				o
vertragsrelais t=10" (terugwatt)	1	o	x							o	o	o	o	o	o
	2									x					o
vertragsrelais t=6" (inverse stroom)	1		o		x						o				o
vertragsrelais t=5,5" (maximaalbeveiliging)	1	o	x							o	o	o	o	o	o
	2											x			o
vertragsrelais t=5,5" (maximaalbeveiliging + signaal "snelsluitklep licht")	1	x	o							o		o		o	o
	2									x					o
	3										x				o
	4											x			o
	5												x		o
	6													x	o

2.6. Stroomsterkten, optredend tijdens enkele storingen.

In het voorgaande is reeds gebruik gemaakt van de volgende gegevens:

1. Kortsluiting op de rail tussen generator en machinetransformator, kortsluitstroom door de generator.
2. Kortsluiting op de rail tussen generator en machinetransformator, kortsluitstroom door de machinetransformator.
3. Kortsluiting op de centralerail, kortsluitstroom in de eenheid.
4. Kortsluiting achter de eigenbedrijfstransformator, kortsluitstroom door de eigenbedrijfstransformator.
5. Kortsluiting op de rail van het verdeelstation, stroom door de generator.
6. 150 kV op de centralerail en plafondbekrachtiging, stroom door de generator.

Deze waarden zullen in het volgende worden afgeleid.

2.6.1. Kortsluiting op de rail tussen generator en machinetransformator, kortsluitstroom door de generator.

Het blijkt dat de maximale amplitude van de doorgaande kortsluitstroom optreedt bij een driefasige kortsluiting (stootkortsluitstroom).

Als uitgangstoestand geldt de vollasttoestand van de machine.

250 MVA

$$E_{gek} = 15 \text{ kV}, \quad E_{fase} = 8,66 \text{ kV}$$

$$I_n = 9,62 \text{ kA}$$

$$I_w = 7,70 \text{ kA}$$

$$I_b = 5,77 \text{ kA}$$

$$E_{fase}'' = \sqrt{(I_w X'')^2 + (E_{fase} + I_b X'')^2}$$

$$X'' = 15\% \quad \text{op basis van 250 MVA}$$

$$X'' = 0,135 \, \Omega \quad \text{op basis van de machinespanning}$$

$$E''_{\text{fase}} = \sqrt{(7,70 \cdot 0,135)^2 + (8,66 + 5,77 \cdot 0,135)^2} = 9,50 \, \text{kV}$$

$$E'' = 1,10 E''_{\text{fase}}$$

De stootkortsluitstroom I'' bedraagt:

$$I''_{\text{kIII}} = \frac{E''}{X} = \frac{9,50}{0,135} = 70,4 \, \text{kA}$$

$$I''_{\text{kIII}} = 7,3 I_n$$

2.6.2. Kortsluiting op de rail tussen generator en machinetransformator, kortsluitstroom door de machinetransformator.

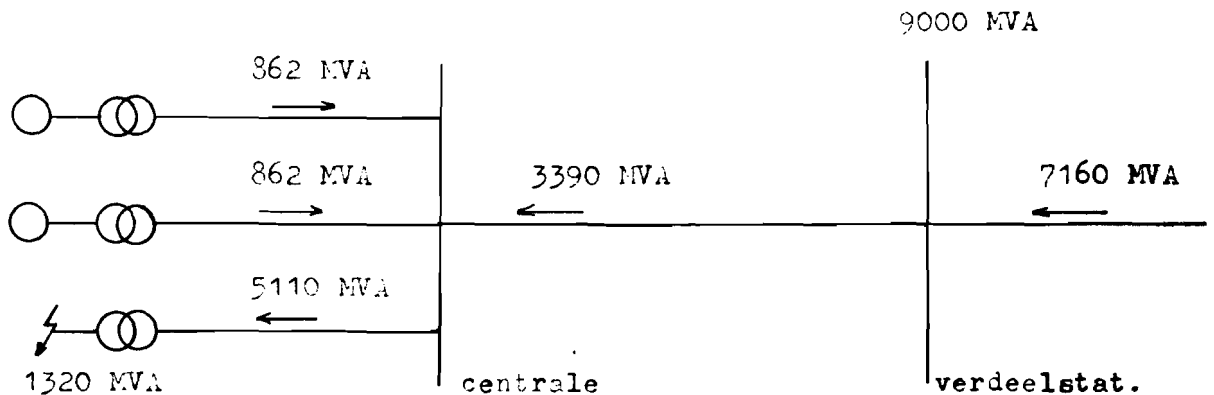


fig. 2.6.2-1.

Het kortsluitvermogen op de rail van het verdelstation bedraagt, inclusief het door de centrale geleverde kortsluitvermogen 9000 MVA.

Het vermogen van één in de centrale opgestelde eenheid bedraagt 250 MVA, de subtransiënte reaktantie is $14 + 15\% = 29\%$.

Kortsluitvermogen van één eenheid:

$$\frac{250}{0,29} = 862 \text{ MVA.}$$

Kortsluitvermogen van de centrale:

$$3 \cdot 862 \text{ MVA} = 2590 \text{ MVA.}$$

Eigen kortsluitvermogen van de 4 verbindinglijnen parallel:

$$\frac{E^2}{X} = \frac{(150)^2}{3,5} = 6430 \text{ MVA.}$$

Kortsluitvermogen op de rail van het verdeelstation vanuit de centrale:

$$\frac{2590 \cdot 6430}{2590 + 6430} \text{ MVA} = 1840 \text{ MVA.}$$

Als kortsluitvermogen uit het net resteert op de rail van het verdeelstation:

$$9000 - 1840 \text{ MVA} = 7160 \text{ MVA.}$$

Kortsluitvermogen op de centralerail tengevolge van het algemene net:

$$\frac{6430 \cdot 7160}{6430 + 7160} \text{ MVA} = 3390 \text{ MVA.}$$

Kortsluitvermogen van de beide ongestoorde generatoren bedraagt 1720 MVA.

Totaal kortsluitvermogen op de centralerail:

$$3390 + 1720 \text{ MVA} = 5110 \text{ MVA.}$$

Het eigen kortsluitvermogen van de machinetransformator van de gestoorde eenheid bedraagt:

$$\frac{250}{0,14} \text{ MVA} = 1790 \text{ MVA.}$$

Totaal kortsluitvermogen aan de laagspanningzijde van de machinetransformator:

$$\frac{1790 \cdot 5110}{1790 + 5110} \text{ MVA} = 1320 \text{ MVA}$$

$$= E I_{kIII} \sqrt{3}$$

waarin I_{kIII} de driefasige kortsluitstroom voorstelt.

$$I_{kIII} = \frac{1320}{15\sqrt{3}} = 50,9 \text{ kA.}$$

$$I_{kIII} = 5,03 I_n.$$

2.6.3. Kortsluiting op de centralerail, kortsluitstroom in de eenheid.

Verondersteld wordt dat de kortsluiting intreedt terwijl de machine zich in volbelaste toestand bevindt.

De spanning achter de subtransiënte reaktantie E'' bedraagt:

$$E'' = \sqrt{(X'' I_w)^2 + (E_f + I_b X'')^2}$$

I_w = wattcomponent van de nominale stroom = 7,70 kA.

I_b = blindcomponent van de nominale stroom = 5,77 kA.

E_f = fasespanning, met als basis de machinespanning = 8,66 kV.

X'' bestaat uit twee componenten, de subtransiënte reaktantie van de machine en de reaktantie van de machinetransformator, samen 29% op basis van 250 MVA.

$X'' = 0,261$ op basis van de machinespanning.

$$E'' = 10,4 \text{ kV.}$$

De driefasige kortsluitstroom I''_{kIII} bedraagt:

$$I''_{kIII} = \frac{E''}{X} = 39,8 \text{ kA.}$$

$$I''_{kIII} = 4,2 I_n.$$

2.6.4. Kortsluiting achter de eigenbedrijfstransformator,
kortsluitstroom door de eigenbedrijfstransformator.

In 2.6.2. is afgeleid dat het kortsluitvermogen van het net op
de centralerail 3390 MVA bedraagt.

Het kortsluitvermogen van de drie eenheden is 2590 MVA.

Het totale kortsluitvermogen op de centralerail is de som van
deze kortsluitvermogens = 5980 MVA.

De eigenbedrijfstransformator heeft een vermogen van 25 MVA,
de reaktantie bedraagt 10%.

Eigen kortsluitvermogen van de eigenbedrijfstransformator:

$$\frac{25}{0,1} = 250 \text{ MVA.}$$

Het totale kortsluitvermogen achter de eigenbedrijfstransfor-
mator bedraagt:

$$\frac{250 \cdot 5980}{250 + 5980} \text{ MVA} = 240 \text{ MVA.}$$

Gebaseerd op de secundaire spanning van 10 kV aan de secundaire
zijde van de eigenbedrijfstransformator betekent dit een drie-
fasige kortsluitstroom I_{kIII} van:

$$I_{kIII} = \frac{240}{10 \sqrt{3}} = 13,8 \text{ kA.}$$

$$I_{kIII} = 10 I_n.$$

2.6.5. Kortsluiting op de rail van het verdeelstation, stroom door de generator.

Berekend wordt de symmetrische stootkortsluitstroom.

De reaktantie van de lijnen bedraagt $3,5 \Omega$ op basis van de netspanning. De overzetverhouding van de transformator is 10,9.

De reaktantie van de lijnen op basis van de machinespanning wordt:

$$\frac{3,5}{(10,9)^2} \Omega = 0,0297 \Omega$$

De stroom wordt berekend per generator. In de centrale staan drie generatoren parallel, de netreaktantie dient met een faktor 3 verhoogd te worden.

$$X_{\text{net}} = 0,0890 \Omega$$

$$X_{\text{machine}}'' = 15\% = 0,135 \Omega$$

$$X_{\text{transf.}} = 14\% = 0,126 \Omega$$

$$\text{Totale reaktantie: } X_{\text{tot}}'' = X_{\text{mach.}}'' + X_{\text{trf.}} + X_{\text{net}} = 0,350 \Omega$$

$$E_f'' \text{ verdeelstat} = \sqrt{(I_w X_{\text{tot}}'')^2 + (I_B X_{\text{tot}}'' + E_f)'^2} = 11,0 \text{ kV}$$

waarbij als uitgangstoestand de vollasttoestand van de machine geldt.

De driefasige kortsluitstroom I_{kIII} bedraagt:

$$I_{kIII} = \frac{E'' \text{verdeelstat}}{X''_{tot}} = \frac{11,02}{0,350} = 31,5 \text{ kA}$$

$$I_{kIII} = 3,3 I_n.$$

2.6.6. 150 kV op de centralerail en plafondbekrachtiging, stroom door de eenheid.

De bekrachtigingsspanning bij vollastbedrijf van de machine bedraagt:

$$E = \sqrt{(I_w X_s)^2 + (E_n + I_b X_s)^2}$$

met: E = bekrachtigingsspanning.

I_w = wattcomponent van de vollaststroom $I_w = 7,70 \text{ kA}$.

I_b = blindcomponent van de vollaststroom $I_b = 5,77 \text{ kA}$.

X_s = synchrone reaktantie, onverzadigd $X_s = 160\% = 1,44 \Omega$

$E = 20,3 \text{ kV}$, fasespanning.

De plafondbekrachtiging is 30% hoger dan de vollastbekrachtiging zodat:

$E_{\text{plafond}} = 1,3 E = 26,3 \text{ kV}$, fasespanning.

De overzetverhouding van de machinetransformator is 10,9, dus omgerekend op de 150 kV zijde bedraagt de plafondbekrachtigingspanning:

$10,9 \cdot 26,3 \text{ kV} = 286 \text{ kV}$, fasespanning.

De maximale wattbelasting aan de centralerail is 200 MW.

$$X = X_{s_{gen}} + X_{trf} = 160 + 14 = 174\%$$

$$X = 1,74 \cdot \frac{(150 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} = 157 \Omega$$

$$I_w = \frac{200 \text{ MW}}{150 \text{ kV} \sqrt{3}} = 0,770 \text{ kA.}$$

$$I_w X = 121 \text{ kV} , \text{ fasespanning.}$$

$$E_{\text{plafond}} = \sqrt{(X I_w)^2 + (E_f + X I_b \text{ plafond})^2}$$

waarin:

$$\begin{aligned} E_{\text{plafond}} &= 286 \text{ kV} \\ I_w &= 0,770 \text{ kA} \\ E_f &= 86,6 \text{ kV} \\ X &= 157 \Omega \end{aligned}$$

$$I_b \text{ plafond} = 1,09 \text{ kA}$$

$$I = \sqrt{I_w^2 + I_b^2} = 1,34 \text{ kA.}$$

$$I = 1,5 I_n.$$

3. Het hoekverschil tussen de spanningen van de machine, de centrale-rail, de rail van het verdeelstation en het algemene net.

3.1. Rotorhoek van de machine ten opzichte van de spanningsvector aan de centralerail

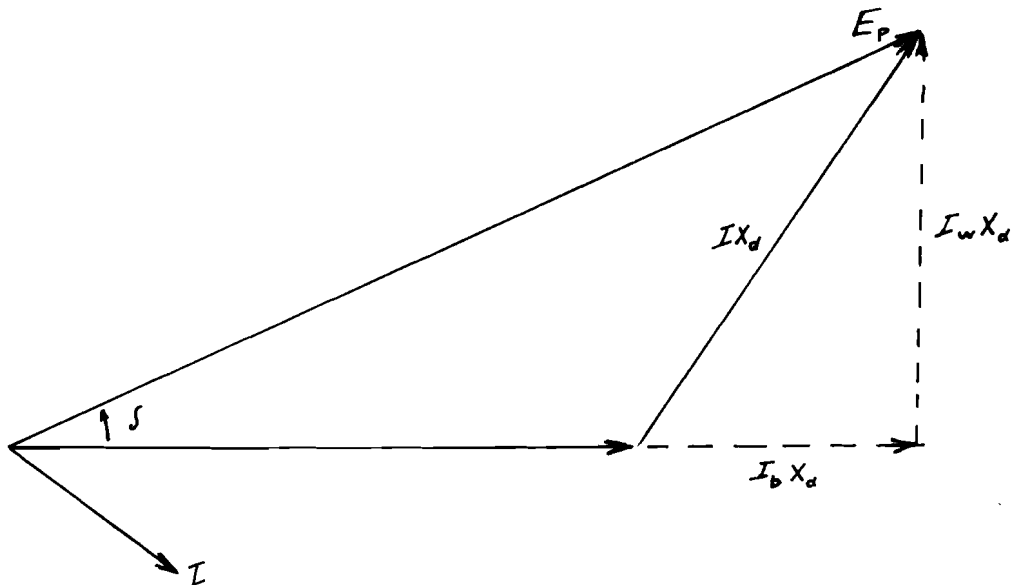


fig. 3.1-1.

- E_p = polenspanning van de machine.
- E_k = klemspanning van de machine.
- X_d = synchrone reaktantie, verzadigde waarde.

Voor bepaling van de synchrone reaktantie van de eenheid dient de verzadigde synchrone reaktantie opgeteld te worden bij de reaktantie van de machinetransformator, zodat $X_d = 120 + 14\% = 134\%$.

De verzadigde waarde van $I X_d$ bedraagt $1,34 E_n$, E_n is de nominale spanning van de machine. Aan de hoogspanningszijde van de transformator is $E_n = 163$ kV (zie 1.2), zodat $I X_d$ verzadigd $1,34 \cdot 163$ kV = 218 kV bedraagt, dit is de gekoppelde spanning.

In 1.2 is afgeleid dat de arbeidsfaktor aan de hoogspanningsklemmen van de machinetransformator $\cos \varphi_{trf} = 0,886$ bedraagt, zodat $\sin \varphi_{trf} = 0,500$.

$$I_w X_{d\text{ verz}} = 218 \cos \varphi_{\text{trf}} = 189 \text{ kV, gekoppelde spanning}$$

$$I_b X_{d\text{ verz}} = 218 \sin \varphi_{\text{trf}} = 109 \text{ kV, gekoppelde spanning.}$$

De klemspanning E_k bedraagt 150 kV.

$$E_k + I_b X_d = 150 + 109 \text{ kV} = 259 \text{ kV.}$$

$$\tan \delta = \frac{I_w X_d}{E_k + I_b X_d} = 0,730$$

$$\delta = 36,1^\circ$$

dit is de rotorhoek ten opzichte van de spanning van de centrale-rail tijdens vollasttoestand van de machine.

In 2.6.6. is afgeleid dat de onverzadigde waarde van de polen-spanning bij vollast $E_p \text{ onverz} = 20,3 \text{ kV}$, dit is de fasespanning aan de 15 kV zijde.

Toeslag voor verzadiging: $(k-1)E'' = 0,333 \cdot 9,50 \text{ kV} = 3,17 \text{ kV.}$

$$E_p, \text{vollast, verzadigd} = 20,3 + 3,17 \text{ kV} = 23,4 \text{ kV.}$$

Omgerekend naar de 150 kV zijde bedraagt deze:

$$E_p, \text{vollast, verzadigd} = 10,9 \cdot 23,4 \text{ kV} = 255 \text{ kV, fasespanning.}$$

3.2. Het faseverschil van de spanningen van het verdeelstation en het algemene net ten opzichte van de spanning op de centralerail.

3.2.1. Berekening van de reaktantie tussen het verdeelstation en het algemene net.

Voor het kortsluitvermogen op de rail van het verdeelstation zijn de waarden 9000 en 4500 MVA gegeven. Uit 2.6.2 is reeds bekend dat de bijdrage van de centrale aan dit kortsluitvermogen 1840 MVA bedraagt. Als kortsluitvermogen uit het algemene net resteert 7160 respectievelijk 2660 MVA.

Het net wordt beschouwd als een voedingsbron met konstante spanning, via een reaktantie verbonden met de rail van het verdeelstation. De waarde van deze reaktantie volgt uit

$$X_{vn} = \frac{E^2}{MVA} \quad \text{waarin}$$

E = de gekoppelde nominale spanning = 150 kV.

MVA = het kortsluitvermogen, geleverd vanuit het net.

Dit betekent in het geval dat het kortsluitvermogen 9000 MVA bedraagt een reaktantie $X_{vn} = 3,14 \Omega$ en in het geval dat het kortsluitvermogen 4500 MVA bedraagt een reaktantie $X_{vn} = 8,47 \Omega$.

3.2.2. Berekening van het faseverschil van de spanningen van het verdeelstation en het algemene net ten opzichte van de spanning op de centralerail.

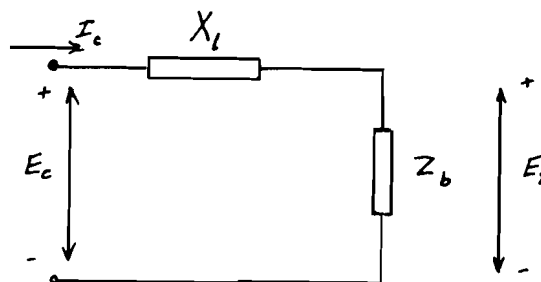


fig. 3.2.2-1.

In deze berekening wordt ervan uitgegaan dat de centralerail zijn volle vermogen via het verdeelstation aan het algemene net levert. De spanning E_c van de centralerail wordt op 150 kV aangenomen. De per eenheid aan de centralerail geleverde stroom bedraagt 0,829 kA. $\cos \varphi_c = 0,871$ (zie 1.2). De totaal door de centrale aan het net geleverde stroom bedraagt 2,49 kA met:

$$I_w = 2,16 \text{ kA}$$

$$I_b = 1,22 \text{ kA}$$

$$E_c = j I_c X_1 + E_2$$

of $E_2 = E_c - j I_c X_1$ waarin

E_2 = de spanning op de rail van het verdeelstation, of de spanning van het algemene net.

X_1 = de reaktantie tussen de centrale en het verdeelstation resp. de reaktantie tussen de centrale en het algemene net.

I_c = de door de centrale geleverde stroom

$$I_c = I_w - j I_b = (2,16 - j 1,22) \text{ kA.}$$

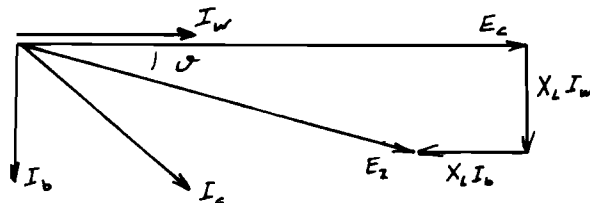


fig. 3.2.2-2.

Uit fig. 3.2.2-2 blijkt dat:

$$E_2 = \sqrt{(E_c - X_1 I_b)^2 + (X_1 I_w)^2}$$

en

$$\tan \varphi = \frac{X_1 I_w}{E_c - X_1 I_b}$$

Aangenomen is dat van de vier circuits tussen de centrale en het verdeelstation één circuit als reserve dienst doet. De transmissie kan dus zowel via drie als via vier circuits plaats vinden.

De reaktantie van één circuit is 14Ω .

Men kan de volgende bedrijfstoestanden in het net onderscheiden.

1. 4 circuits tussen centrale en verdeelstation in bedrijf, kortsluitvermogen op de rail van het verdeelstation: 9000 MVA.

2. 4 circuits tussen centrale en verdeelstation in bedrijf, kortsluitvermogen op de rail van het verdeelstation: 4500 MVA.
3. 3 circuits tussen centrale en verdeelstation in bedrijf, kortsluitvermogen op de rail van het verdeelstation: 9000 MVA.
4. 3 circuits tussen centrale en verdeelstation in bedrijf, kortsluitvermogen op de rail van het verdeelstation: 4500 MVA.

In deze bedrijfstoestanden werden bij vollast van de centrale de volgende faseverschuivingen en waarden van de spanning gevonden:

bedrijfs- toestand	X_v	ϑ_v graden	E_v kV	X_n	ϑ_n graden	E_n kV
1	3,5	5,3	143	6,64	11,7	137
2	3,5	5,3	143	12,0	13,8	132
3	4,67	7,1	141	7,81	12,4	137
4	4,67	7,1	141	13,1	22,0	131

waarin:

X_v = de reaktantie tussen de centrale en het verdeelstation.

ϑ_v = faseverschuiving van de spanning van het verdeelstation t.o.v. de centralespanning.

E_v = spanning op de rail van het verdeelstation.

De index n geldt voor het algemene net.

4. Instabiliteit van de centrale tijdens een storing tussen de centrale en het net.

4.1. Algemeen.

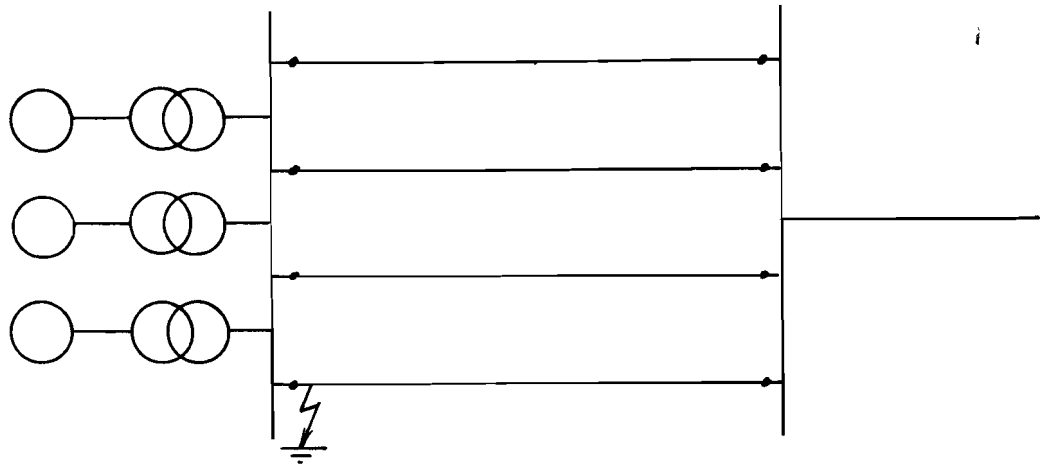


fig. 4.1-1.

Aangenomen wordt dat een driefasige sluiting ontstaat op een lijn tussen de centrale en het verdelstation, juist achter de energieschakelaar aan de centralerail (fig. 4.1-1). De spanning van de centralerail wordt nul, de centrale verliest elk synchroniserend vermogen met het net. De generatoren kunnen geen vermogen leveren aan het net. Het vermogen dat na de kortsluiting nog door de ketel geleverd wordt, wordt grotendeels omgezet in roterende energie. Indien de snelheidsreguleur van de turbine een differentiërend lid bezit dan blijkt na afschakeling van een in vollast lopende generator dat het hoogste toerental 9% boven de nominale waarde ligt. Dit toerental wordt bereikt na ca. 1,5 seconde. Uit oscillografische opnamen van het verloop van de toerenverhoging blijkt dat gedurende de eerste tienden seconden het aandrijvend vermogen van de turbine slechts weinig afneemt.

De toerenverhoging van de rotor leidt tot een in de tijd aangroeiende hoekverschuiving tussen de netspanning en de polen-

spanning van de generatoren. Nadat de storing is opgeheven door het afschakelen van de gestoorde lijn kan de hoekverdraaiing zo groot geworden zijn dat de eenheden die in de centrale zijn opgesteld uit de pas vallen.

In het algemeen wordt aangenomen dat de voorijling van de rotorvector de 110° niet overschreden mag hebben op het moment dat de netspanning terugkomt. Nagegaan zal worden of deze eis ook in dit voorbeeld een voldoende garantie inhoudt tegen het uit de pas vallen van de generator.

4.2. Methode.

De energie, in het beschouwde tijdsinterval door de turbine geleverd, wordt konstant verondersteld. Tijdens de kortsluiting treden grote stroomsterkten op, hetgeen leidt tot extra koperverliezen in de generator en de machinetransformator, deze verliezen worden in rekening gebracht. De totale verandering in de ijzerverliezen, opwekkerverliezen en wrijvingsverliezen wordt nul gesteld.

Het verschil tussen het door de turbine geleverde vermogen en de extra koperverliezen wordt als roterend vermogen aan de turbo-generator toegevoerd. Met behulp hiervan kan de snelheidsverhoging en de hoekverdraaiing ten opzichte van de spanningsvector van het algemene net worden bepaald. Als uitgangspositie wordt de hoek tussen de rotorvector van de machine en de spanningsvector van de centralerail genomen. De hoekverschillen in het net worden dus verwaarloosd.

Men kan op deze wijze de tijd berekenen nodig om de rotorvector van de uitgangstoestand in de toestand 110° voorijlend te brengen.

Een volgende stap is het bepalen van de totale energie, die gedurende het beschouwde tijdsinterval als roterende energie is opgenomen (O_1 in fig. 4.2-1). Het aandrijvende koppel wordt evenredig met het aandrijvende vermogen aangenomen.

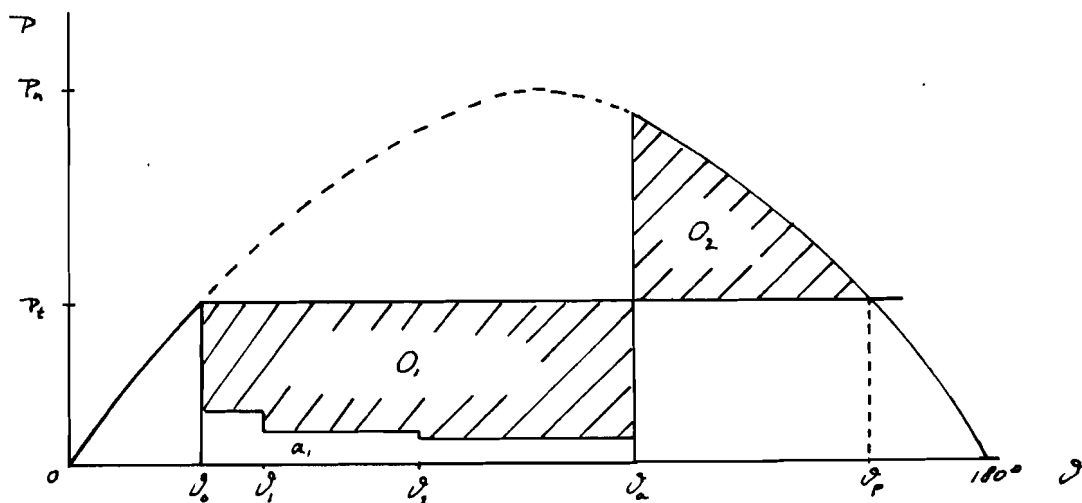


fig. 4.2-1.

- O_1 = totaal door de rotor opgenomen roterende energie.
- O_2 = totale remmende energie van het net.
- P_t = koppel door de turbine geleverd.
- P_n = maximaal transiënte koppel (remmend koppel).
- θ_0 = uitgangshoek van de rotorvector.
- θ_1 = rotorhoek bereikt na 0,1 seconde.
- θ_2 = rotorhoek bereikt na 0,2 seconde.
- θ_a = rotorhoek bereikt op het moment dat de kortsluiting wordt opgeheven.
- θ_p = rotorhoek waarbij het remmend koppel kleiner wordt dan het aandrijvend koppel.
- a_1 = totale koper verliezen.

Nadat de storing is afgeschakeld bij een voorrijlende rotorhoek θ_a hebben de generator en het net weer contact met elkaar. De machine

bevindt zich op dat ogenblik in een overgangsverschijnsel; zij reageert op de terugkerende netspanning met een reaktantie, die in dit voorbeeld op 1,2 maal de transiënte reaktantie is gesteld.

De machine gaat weer energie aan het net leveren, zodat het net een remmend koppel uitoefent op de rotor. De totale remmende energie is maximaal gelijk aan O_2 . Wordt de hoek ϑ_p gepasseerd dan wordt het aandrijvend koppel van de turbine groter dan het remmend koppel van het net en de snelheid neemt dan weer toe. In dit geval gaat de machine slippen.

Is O_2 groter dan O_1 dan is alle extra roterende energie die de machine tijdens de kortsluiting heeft opgenomen reeds aan het net overgebracht voordat het punt ϑ_p is bereikt. De toerenverhoging is dan teniet gedaan en de machine blijft in de pas.

Om een stabiel bedrijf te waarborgen dient dus de storing afgeschakeld te zijn voordat de rotor de hoek ϑ_a heeft bereikt. ϑ_a is zodanig gekozen dat $O_1 = O_2$ (fig. 4.2-1).

Aangenomen wordt dat de omhullende van de kortsluitstroom het in fig. 4.2-2 geschetste verloop heeft.

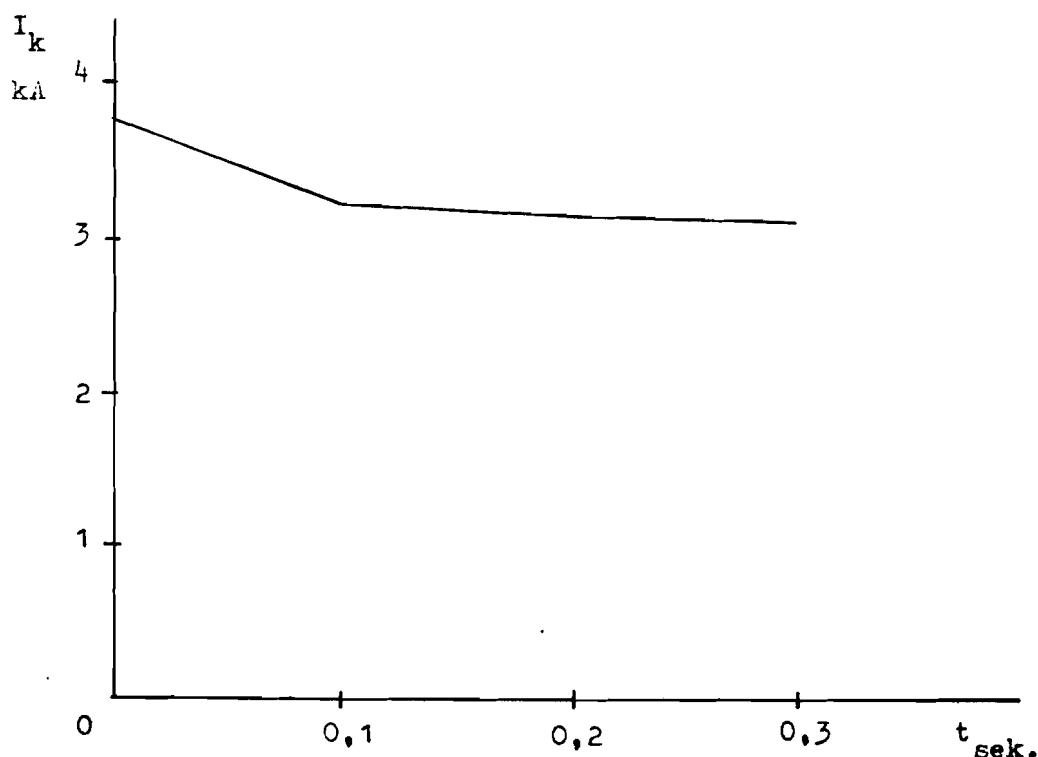


fig. 4,2-2.

Reaktantiebasis op het tijdstip	t = 0	bedraagt	15%.
" " " "	t = 0,1	"	21%.
" " " "	t = 0,2	"	21,8%.
" " " "	t = 0,3	"	22,5%.

Het stroomverloop tussen de aangegeven punten wordt lineair verondersteld.

De roterende energie bedraagt 700.000 k Joule bij nominaal toerental.

4.3. Berekening van de toename van de roterende energie tijdens de sluiting.

De koperverliezen van generator en machinetransformator bedragen bij nominale stroomsterkte 1,45% op basis van 250 MVA = 3,63 MW. De koperverliezen nemen kwadratisch met de stroomsterkte toe, bij een momentane stroom I bedragen zij:

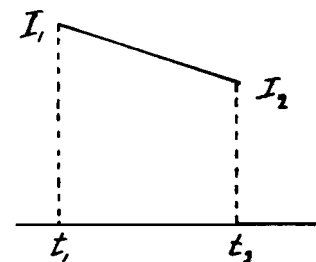
$$3,63 \left(\frac{I}{I_n} \right)^2$$

De extra verliezen tijdens de kortsluiting bedragen dus:

$$3,63 \left[\left(\frac{I}{I_n} \right)^2 - 1 \right]$$

Indien de kortsluitstroom ten tijde t_1 de waarde I_1 heeft en ten tijde t_2 de waarde I_2 , dan kan een gemiddelde waarde I_g van de kortsluitstroom gedurende het tijdsinterval $t_2 - t_1$ gevonden worden, zodanig dat:

$$I_g^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} I^2 dt.$$



Bij een lineair verloop van de kortsluitstroom tussen I_1 en I_2 wordt:

$$I_G^2 = \frac{1}{3} (I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2)$$

De energie, die in een interval van 0,1 seconde vrijkomt voor het verhogen van de roterende energie, is het verschil tussen de totaal beschikbare energie in dat tijdsinterval (= 20 Mj) en de extra verliezen

t sek.	reaktantie van generator + transformator Ω	E kV	I_k kA	I_G kA	extra verliezen $3,63 \left[\left(\frac{I_k}{I_n} \right)^2 - 1 \right]$ MW	versnellende energie. Mj.
0	26,1	98,7	3,78			
0,1	31,5	102	3,24	3,52	44,7	15,5
0,2	32,2	103	3,18	3,21	36,6	16,3
0,3	32,9	103	3,14	3,16	35,4	16,5

De berekeningen zijn samengevat in bovenstaande tabel.

4.4. Bepaling van de hoekverschuiving van de rotor op verschillende tijdstippen.

De uitgangshoek op het tijdstip $t = 0$ is de rotorhoek van de machine ten opzichte van de spanning van de centralerail. In 3.1 is afgeleid dat deze $36,1^\circ$ bedraagt.

De roterende energie op $t = 0$ bedraagt 700 M Joule. Op $t = 0,1$ sek. is dit bedrag verhoogd met de versnellende energie van 15,5 MJ die in de eerste 0,1 sek. aan de rotor is toegevoerd.

De snelheid V is evenredig met de wortel uit de verhouding van de roterende energie in begin- en eindtoestand, zodat:

$$V_{t=0,1} = \sqrt{\frac{715,5}{700,0}} \cdot 50 \text{ omw/sek} = 50,55 \text{ omw/sek.}$$

De versnelling a wordt gevonden uit:

$$V_{t=0,1} = V_{t=0} + at$$

$$\text{of } a = 5,50 \text{ omw/sek.}^2$$

De uitzwaai na $t = 0,1$ sek. bedraagt $\frac{1}{2} at^2 = 0,0225 \text{ omw} = 8,1^\circ$ ten opzichte van de hoek op $t = 0$ sek.

De totale hoekverschuiving van de rotorvector ten opzicht van de netspanning bedraagt $36,1^\circ + 8,1^\circ = 44,2^\circ$.

t in sek.	versnellende energie in het tijdsinterval 0 - t sek. in M Joule	Gemiddelde versnelling a in het tijdsinterval 0 - t sek. ² in omw/sek. ²	uitzwaai in het beschouwde tijdsinterval van 0,1" graden	totale uitzwaai t.o.v. de netspanning na t sek. graden.
0		0		36,1
0,1	15,5	5,50	8,1	44,2
0,2	31,9	5,62	32,3	76,5
0,3	48,3	5,65	51,1	127,7

De berekeningen op de tijdstippen $t = 0,2$ sek en $t = 0,3$ sek verlopen analoog. De uitkomsten zijn in bovenstaande tabel samengevat.

Algemeen wordt aangenomen dat de maximum uitzwaaihoek 110° mag bedragen. Het tijdstip waarop deze hoek wordt bereikt ligt tussen 0,2 en 0,3 seconden. Om het juiste tijdstip te bepalen wordt een interpolatie toegepast.

Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de versnelling in het tijdsinterval van 0,2 - 0,3 seconden slechts weinig verandert. Zij wordt over dit tijdsinterval konstant gedacht, de waarde is gelijk aan de gemiddelde waarde van de versnelling ten tijde $t = 0,2$ sek en ten tijde $t = 0,3$ sek.

$$a = \frac{1}{2} (5,62 + 5,65) \text{ omw/sek}^2 = 5,63 \text{ omw/sek}^2.$$

De beginsnelheid bij $t = 0,2$ sek ten opzichte van de nominale snelheid bedraagt:

$$a_{t=0,2} \cdot t = 1,12 \text{ omw/sek.}$$

De afgelegde weg mag, nadat het tijdstip $t = 0,2$ sekonden is bereikt, nog $110^\circ - 76,6^\circ = 33,4^\circ$ bedragen.

$$V_{0,2} \cdot t + \frac{1}{2} a t^2 = 33,4^\circ = 0,0928 \text{ omw.}$$

$$t = 0,07 \text{ sek.}$$

De totale duur van de uitzwaai uit de vollasttoestand tot een voorrijlende hoek van 110° is bereikt, bedraagt dus $0,27$ sek.

In het volgende zal blijken dat de machine uit de pas valt wanneer de storing wordt opgeheven bij een uitzwaaihoek van 110° . Daarom zal als norm een maximale uitzwaaihoek van 100° worden aangehouden. Berekening leert dat deze hoek zal zijn bereikt na een tijdsverloop van $0,25$ sek.

4.5. Het gedrag van de generator na het opheffen van de storing.

Nadat de netspanning op de centralerail na het opheffen van de storing op 150 kV is teruggekomen reageert de machine met de slingerreaktantie $X_{sl} = 1,2 X' = 24\%$.

Uitgegaan wordt van een op de centralerail kortgesloten machine. De machine levert uitsluitend blindstroom. De waarde van de stroom is:

$$\frac{I_{0,2 \text{ sek}} + I_{0,3 \text{ sek}}}{2} = 3,16 \text{ kA}$$

De spanning achter de slingerreaktantie bedraagt dus

$$E'_{sl} = E_k + I(X_{sl} + X_{trf})$$

waarbij E_k is de klemspanning op het ogenblik vòòr het overgangsverschijnsel: $E_k = 0$.

$X_{sl} + X_{trf} = 24\% + 14\% = 38\%$ op basis van 150 kV, 250 MVA.

$$(X_{sl} + X_{trf}) = 34,2 \Omega.$$

$$E'_{sl} = 3,16 \cdot 34,2 \text{ kV} = 108 \text{ kV, fasespanning.}$$

Het met het net uitgewisselde vermogen bedraagt:

$$P = 3 \frac{E_{sl} E_c}{X_{sl} + X_{trf} + 3 X_n} \sin \vartheta$$

met E_c = fasespanning van de centralerail = 86,6 kV. en

X_n = reaktantie van de lijnen tussen de centralerail en het algemene net.

Omdat de drie generatoren die in de centrale opgesteld staan zich gelijk gedragen, wordt de spanningsval over de lijnen met een faktor 3 verhoogd. Wanneer het gedrag van één generator wordt beschouwd kan dit in rekening worden gebracht door de netreaktantie met een faktor 3 te verhogen.

Aangenomen is dat het uitgewisselde vermogen evenredig is met de sinus van de rotorhoek. De verschillen in reaktantie van de langs- en de dwarsas van de machine worden verwaarloosd.

De netreaktantie bedraagt bij een kortsluitvermogen van 9000 MVA aan het verdeelstation en drie lijnen in bedrijf tussen de centrale en het verdeelstation, $7,81 \Omega$. (zie 3.2.2).

Het met het net uitgewisseld vermogen bedraagt:

$$P = 611 \cdot \sin \vartheta \text{ MW.}$$

De vermogens-rotorhoekkromme is in fig. 4.5-1 en fig. 4.5-2 getekend. De hoek ϑ_p , waarbij het versnellend koppel groter wordt dan het remmende koppel bedraagt $160,5^\circ$.

Uit fig. 4.5-1 blijkt dat $O_1 > O_2$, zodat de machine uit de pas zal vallen indien de storing is opgeheven nadat de rotor 110° voorrijling heeft bereikt.

Wordt de storing afgeschakeld bij een rotorhoek ϑ_a van 100° (fig. 4.5-2), dan blijkt $O_1 < O_2$ te zijn, zodat de stabiliteit gehandhaafd blijft.

Voert men een hoek ϑ_r in, zodanig dat $O_1 = O_2$ dan volgt voor ϑ_r :

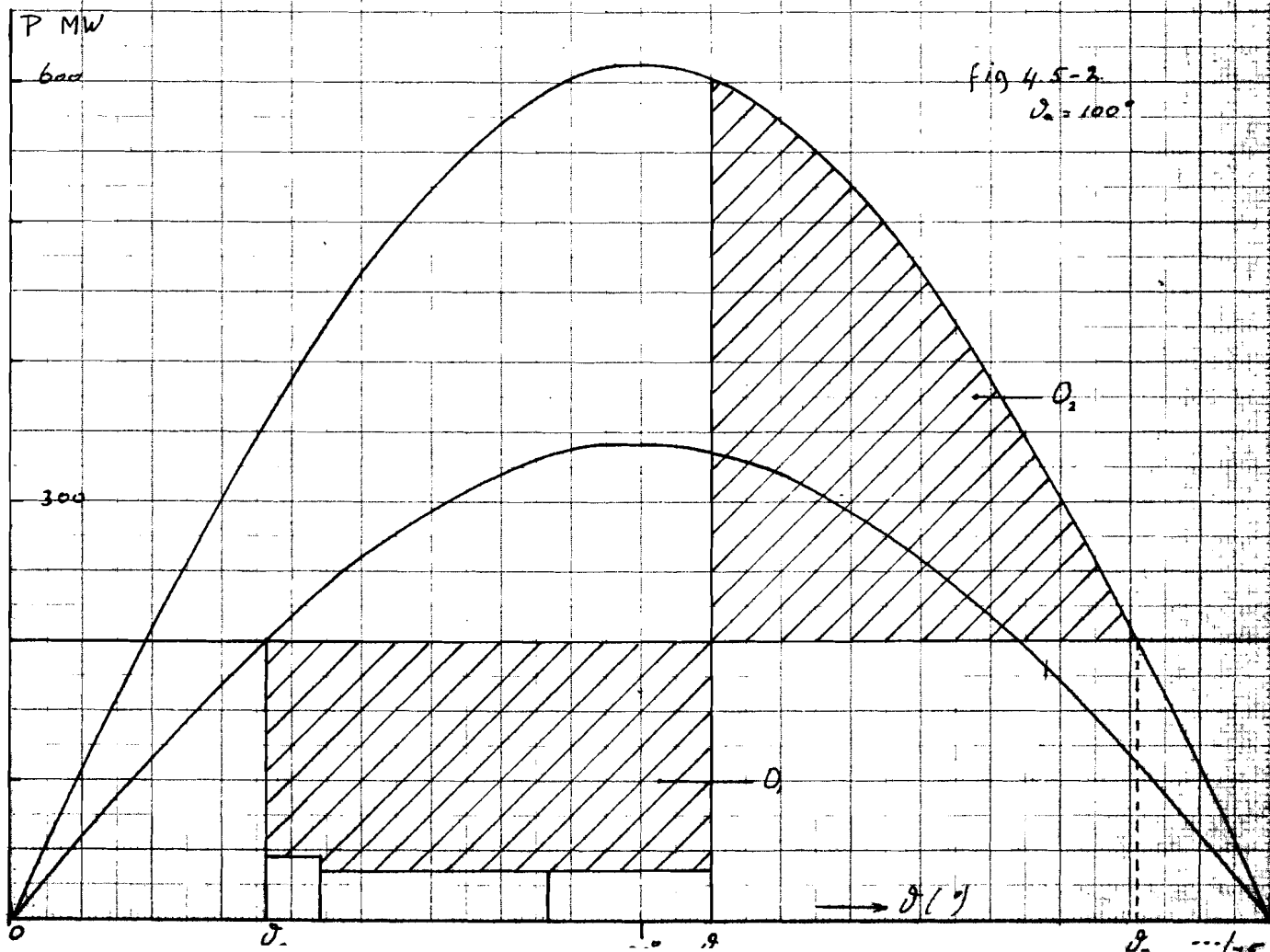
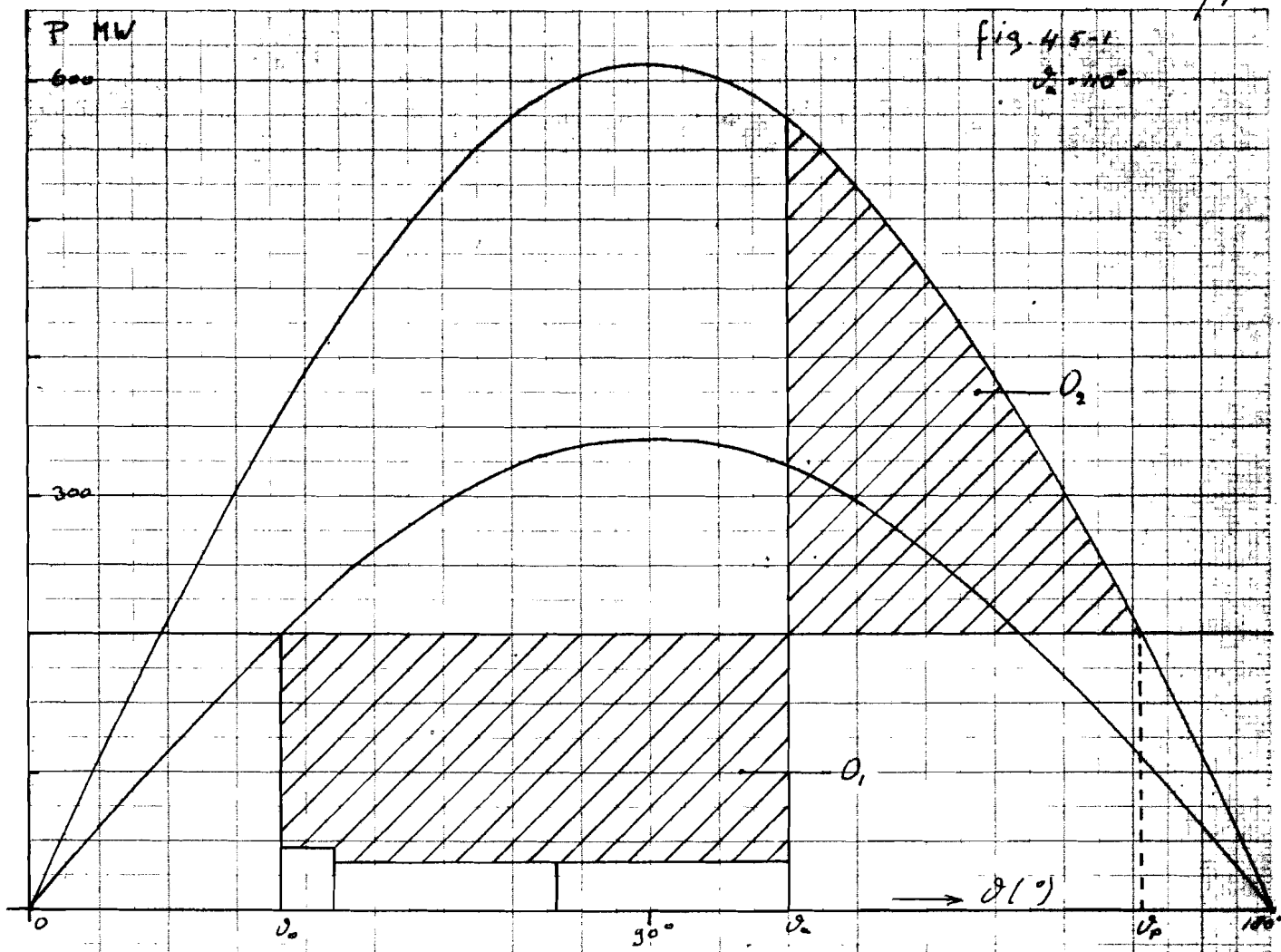
$$O_1 = \left[\int_{\vartheta_a}^{\vartheta_r} \sin \vartheta \, d\vartheta \right] \cdot 611 - [\vartheta_a - \vartheta_r] \cdot 200$$

waarbij $\vartheta_r = 128^\circ$.

De rotor is na een hoek $\vartheta_r = 128^\circ$ zover afgeremd dat het nominale toerental weer bereikt is.

De hoekmarge bedraagt $\vartheta_p - \vartheta_r = 32^\circ$.

De marge in de energie bedraagt 48% van de totale versnellende energie gegeven door het oppervlak O_1 .



4.6. Slotbeschouwing.

Het blijkt dat een storing, die asynchronisme van de machines tengevolge heeft, in betrekkelijk korte tijd moet zijn opgeheven. In het voorgaande is uitgegaan van een driefasen storing op de lijn, bij een storing op de centralerail vertonen de machines hetzelfde gedrag.

De beveiliging reageert in laatstgenoemd geval echter door het afschakelen van de eenheden van het net, zodat het gevaar van uit de pas vallen niet aanwezig is.

Indien de sluiting tot staan komt in het tijdsinterval tussen $t = 0,25$ sek. en $t = 0,6$ sek., dan bestaat het gevaar voor het uit de pas vallen wel.

In dit voorbeeld is ervan uitgegaan dat het kortsluitvermogen op de centralerail zo groot is, dat het vanzelf uitdoven van de kortsluiting niet mogelijk is.

Bestaat de mogelijkheid dat de storing zal verdwijnen, anders dan door ingrijpen van de railbeveiliging, dan zal men toepassing van een sneller railbeveiligingssysteem moeten overwegen.

5. Literatuur.

1. Relaisbuch, herausgegeben von der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke, Francklische Verlagshandlung, Stuttgart 1959.
2. H. Neugebauer: Selektivschutz,
Springer-Verlag 1955.
3. C.P. Mason: The art and science of protective relaying.
Wiley and Sons / Chapman and Hall 1956.
4. A. v. Ganswijk: Beveiliging van turbogeneratoren.
Elektrotechniek, 20 maart 1958 pp. 137-162.
5. S.B. Crary: Power system stability.
Wiley and Sons / Chapman and Hall 1955.
6. M.Y. Enault: Protections électriques des tranches ¹¹⁵/125
mégawatts des centrales thermiques d'Electricité
de France.
Revue générale de l'électricité, april 1962,
pp. 181-196.

6. Inhoud.

	<u>pag.</u>
1. Inleiding:	
1.1. Algemeen.	1.
1.2. De eenheid in vollastbedrijf.	3.
2. Generatorbeveiliging:	
2.1. Inleiding.	7.
2.2. Storingmogelijkheden.	8.
2.3. Uitschakelprocedures.	9.
2.4. Karakteristieken van verschillende storingen. Beveiliging bij deze storingen.	
2.4.1. Statoraardsluiting.	13.
2.4.2. Wickelingsluiting.	20.
2.4.3. Windingssluiting.	22.
2.4.4. Sluiting in de machinetransformator. Sluiting in de e.b. transformator.	26.
2.4.5. Verugwatt.	29.
2.4.6. Asymmetrische belasting.	31.
2.4.7. Sluiting op de centralerail.	32.
2.4.8. Maximaalbeveiliging.	34.
2.4.9. Wegvallen van de bekrachtiging.	35.
2.4.10. Aardsluiting in het bekrachtigingscircuit.	38.
2.4.11. Windingssluiting in het bekrachtigingscircuit.	39.
2.5. Samenvatting.	39.
2.6. Stroomsterkten, optredend tijdens enkele storingen.	50.
3. Het hoekverschil tussen de spanningen van de machine, de centralerail, de rail van het verdeelstation en het algemene net.	
3.1. Rotorhoek van de machine ten opzichte van de spanningsvector aan de centralerail.	58.
3.2. Het faseverschil van de spanningen van het verdeel- station en het algemene net ten opzichte van de spanning op de centralerail.	59.

	<u>pag.</u>
4. Instabiliteit van de centrale tijdens een storing tussen de centrale en het net.	
4.1. Algemeen.	63.
4.2. Methode.	64.
4.3. Berekening van de toename van de roterende energie tijdens de sluiting.	67.
4.4. Bepaling van de boekverschuiving van de rotor op verschillende tijdstippen.	68.
4.5. Het gedrag van de generator na het opheffen van de storing.	71.
4.6. Slotheschouwing.	75.
5. Literatuur.	76.
6. Inhoud.	77.