

TNO-Defensieonderzoek

AD-A256 546



INU-rapport

PML 1992-21

juni 1992

Exemplaar no.: 11

TDCK RAPPORTENCENTRALE

Frederikkazerne, gebouw 140
v/d Burchlaan 31 MPC 16A
TEL. : 070-3166394/6395
FAX. : (31) 070-3166202
Postbus 90701
2509 LS Den Haag **TDCK**

S DTIC ELECTE D
A OCT 28 1992

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

This document has been approved
for public release and sale; its
distribution is unlimited.

Nederlandse organisatie voor
toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

TNO-Defensieonderzoek bestaat uit:
het Fysica en Elektronisch Laboratorium TNO,
het Prins Maurits Laboratorium TNO en het
Instituut voor Zintuigfysiologie TNO.

Prins Maurits Laboratorium TNO

Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

Fax 015 - 84 39 91
Telefoon 015 - 84 28 42



Elektrische scheepsvorststuwing en supergeleiding;
een literatuurstudie

Auteur(s):

Ir. P. van Gelder

Totaal aantal pagina's:

(excl. distr. lijst en RDP)

68

Aantal bijlagen:

-

Aantal figuren:

40

Aantal tabellen:

2

HDO-opdrachtnummer:

A88/KM/402

Oplage:

21

Rubriceringen

Rapport:

ONGERUBRICEERD

Titel:

ONGERUBRICEERD

Samenvatting:

ONGERUBRICEERD

Bijlage(n):

92-28258



8 2 1 0 2 0 0 4 8

Samenvatting

In dit rapport worden de voor- en nadelen van een elektrische- ten opzichte van een mechanische scheepsvoortstuwing besproken en wordt beschreven wat de toepassing van supergeleiders hieraan kan toevoegen. Uitgebreid aandacht wordt besteed aan de supergeleiders zelf en aan de diverse toepassingen hiervan, zoals supergeleidende motoren en generatoren, elektromagnetische voortstuwing en opslag van magnetische energie. Twee voorbeelden van schepen met een supergeleidende voortstuwing worden gegeven. Tenslotte worden de toekomstige ontwikkelingen besproken en worden aan de hand van de conclusies vier voorstellen gedaan voor vervolgonderzoek.

Summary

In this report the advantages and disadvantages of electric ship propulsion compared to mechanical propulsion are discussed and the question is raised what will be the influence of the application of superconductors. Detailed description is given of the superconductors themselves and the various applications as superconducting motors and generators, electromagnetic propulsion and magnetic energy storage. Two examples of ships with a superconducting propulsion system are described. Finally, future developments are discussed, conclusions are drawn and four proposals for future studies are formulated.

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| Accession For | |
| NTIS CRA&I | <input checked="" type="checkbox"/> |
| DTIC TAB | <input type="checkbox"/> |
| Unannounced | <input type="checkbox"/> |
| Justification | |
| By | |
| Distribution / | |
| Availability Codes | |
| Dist | Avail and/or Special |
| A-1 | |

DTIC ACCESSION NUMBER 03

INHOUDSOPGAVE

| | | |
|----------|---|-----------|
| | SAMENVATTING/SUMMARY | 2 |
| | INHOUDSOPGAVE | 3 |
| 1 | INLEIDING | 5 |
| 2 | CONVENTIONELE ELEKTRISCHE SCHEEPSVOORTSTUWING | 8 |
| 2.1 | Elektrische voortstuwingssystemen | 8 |
| 2.2 | DC voortstuwing | 10 |
| 2.3 | AC voortstuwing | 10 |
| 3 | EIGENSCHAPPEN VAN HOGE- EN LAGE-TEMPERATUUR SUPERGELEIDERS | 11 |
| 3.1 | Lage-temperatuur supergeleiders | 15 |
| 3.2 | Hoge-temperatuur supergeleiders | 15 |
| 4 | MOGELIJKE MARINE TOEPASSINGEN VAN SUPERGELEIDERS | 17 |
| 4.1 | Supergeleidende motoren en generatoren | 17 |
| 4.2 | Elektromagnetische scheepsvoortstuwing | 30 |
| 4.3 | Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) | 43 |
| 4.4 | Magnetische afscherming | 52 |
| 4.5 | Supergeleidende schakelaars | 53 |
| 4.6 | Elektronische componenten en sensoren | 54 |
| 5 | VOORBEELDEN VAN SCHEPEN MET EEN SUPERGELEIDENDE VOORTSTUWING | 55 |
| 5.1 | Elektrische voortstuwing met een supergeleidende generator en motor | 55 |
| 5.2 | EM-voortstuwing | 57 |
| 6 | TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN | 60 |

| | | |
|----|-------------------------------------|----|
| 7 | CONCLUSIES | 61 |
| 8 | AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK | 64 |
| 9 | ONDERTEKENING | 66 |
| 10 | LITERATUURLIJST | 67 |

1 INLEIDING

Deze literatuurstudie werd verricht in het kader van opdracht A88/KM/402: "Onderzoek: Energietechniek/Toepassing supergeleiding". Doel van het onderzoek is het vergaren van kennis op het gebied van de supergeleidende elektrische scheepsvorstuwing, het verkennen van de mogelijkheden van internationale samenwerking en het opbouwen van kennis op, in eerste instantie voor de K M, relevante gebieden van de elektrische energietechniek ten einde haalbaarheidsstudies en systeemstudies te kunnen uitvoeren. De eerste fase, waarvan dit rapport het verslag is, betreft het inventariseren van de mogelijkheden die supergeleiding en elektromagnetische principes, waaronder MHD, bieden op het gebied van de scheepsvorstuwing en evaluatie van de verkregen informatie.

Oorspronkelijk werd elektrische scheepsvorstuwing alleen toegepast als de voordelen ten aanzien van een flexibele aansturing en een groot koppel opwogen tegen het grotere gewicht en massa ten opzichte van een volledig mechanische aandrijving. Verbeteringen van motoren door vloeistofkoeling van de rotor en de stator en het beschikbaar komen van betrouwbare, statische frequentie omvormers hebben hierin verandering gebracht. Algemeen kunnen de volgende voordelen van een elektrische schroefaandrijving worden genoemd [1, 2]:

- Bij een elektrische voortstuwing is het niet langer noodzakelijk dat de primaire energiebron (gasturbine, stoomturbine of diesel) dichtbij de aandrijfmotoren van de schroef wordt geplaatst. Hierdoor heeft de scheepsontwerper meer graden van vrijheid en kan het schip optimaler worden ingericht. Bij een voldoende kleine motor kan zelfs worden gedacht aan een zogenaamde "podded" constructie waarbij de motor in een druppelvormige omhulling onder het schip wordt gehangen waarmee zowel de stroomlijn van het schip wordt verbeterd als het schroefrendement wordt verhoogd.
- Naast de flexibele plaatsing van de "prime movers" is ook het aantal vrij te kiezen. Zo is het mogelijk om drie "prime movers" op twee schroefassen te plaatsen hetgeen bij een volledige mechanische aandrijving niet mogelijk is.
- Bij het gebruik van gasturbines in plaats van stoomturbines is er geen stoom meer beschikbaar voor allerlei andere functies zoals verwarming. Hierdoor is de belasting van het servicenet aanmerkelijk toegenomen. Bij het gebruik van een elektrische voortstuwing kan een gedeelte van de energie voor het servicenet gebruikt worden of kan de generator voor de voortstuwing gebruikt worden als een extra energievoorziening in geval van zware schade. Combinatie van voortstuwing en servicenet leidt dus tot een gewicht- en volumebesparing.

- Een elektrische voortstuwing maakt het gebruik van een vaste schroef mogelijk (FPP) Deze schroeven hebben een 5 - 15 % hoger rendement dan een schroef met bladverstelling (Controllable Pitch Propellor) waardoor het totale rendement ondanks de hogere transmissieverliezen (3 - 6 % hoger dan een mechanische transmissie) toe neemt.
- Door het toepassen van een statische omvormer is het mogelijk om de "prime mover" met een constant toerental te laten draaien waardoor bij laag vermogen een hoger rendement wordt verkregen. Dit speelt een grotere rol naarmate een schip vaker maar een deel van het vermogen gebruikt.
- Een volledig elektrische voortstuwing heeft minder onderhoud nodig waardoor er op operationele kosten bespaard kan worden.
- Bij lagere toerentallen is een elektrische aandrijving stiller wat uiteraard bijzonder belangrijk is bij schepen voor de bestrijding van onderzeeboten.
- Een elektrische voortstuwing is gemakkelijker te automatiseren mede waardoor de responstijden afnemen.
- Bij bijzondere schepen zoals ijsbrekers is het belangrijk om een "zachte" koppeling met de prime mover te hebben.
- De betrouwbaarheid wordt verhoogd door de grotere flexibiliteit en redundantie mogelijkheden.

Als nadelen kunnen worden genoemd:

- De aanschafkosten van een elektrische voortstuwing zijn vooralsnog hoger dan die van een mechanische aandrijving. Als gebruik kan worden gemaakt van componenten die niet alleen bedoeld zijn voor de militaire markt, zal de aanschafprijs vergelijkbaar zijn.
- Een elektrisch systeem is gevoeliger voor EMP.
- Een elektrische aandrijving gaat gepaard met meer EMC problemen. Pulsmodulatietechnieken ter bestrijding van hogere harmonische componenten in spanning en stroom worden echter steeds vaker toegepast.

Wat kan supergeleiding nu toevoegen aan de voor en nadelen die hierboven zijn genoemd?

- Door het toepassen van supergeleiding komen DC motoren beschikbaar van voldoende hoge vermogens. DC motoren zijn zeer goed regelbaar en hebben een groot koppel bij een laag toerental.
- Door toepassing van supergeleiding zal het rendement van de voortstuwing toenemen.
- Supergeleiding vergroot de mogelijkheid tot het toepassen van een "podded" voortstuwing.

- Zonder supergeleiding is elektromagnetische scheepsvortstuwning niet uitvoerbaar. Deze schroefloze manier van voortstuwning heeft als voordelen dat er nauwelijks geluid wordt geproduceerd en dat de kwetsbaarheid van het schip door het ontbreken van de schroef afneemt. Nadelen zijn het slechte rendement bij hoge snelheden en gasvorming. In hoofdstuk 4.2 zal nader op de elektromagnetische voortstuwning worden ingegaan.

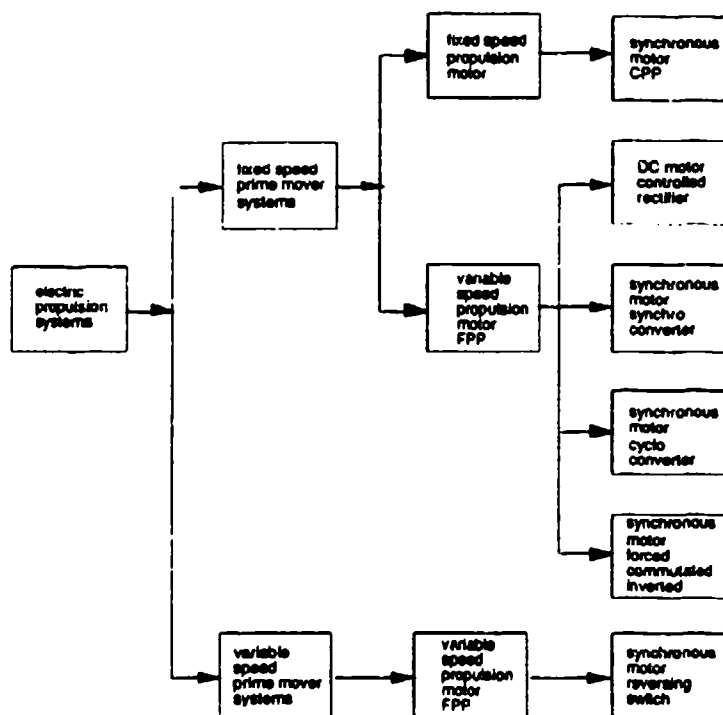
In hoofdstuk 2 wordt een korte opsomming gegeven van de verschillende soorten conventionele elektrische schroefaandrijvingen. Voor en nadelen zullen kort worden genoemd. Om enig inzicht te krijgen in de toepassing van supergeleiders wordt in hoofdstuk 3 eerst een korte opsomming van de belangrijkste eigenschappen van supergeleidende materialen gegeven. Supergeleidende componenten genoemd in hoofdstuk 4 kunnen grotere of kleinere delen van een conventionele elektrische aandrijving vervangen. Hoe zo'n voortstuwning er dan komt uit te zien wordt behandeld in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 wordt gekeken naar wat er in de toekomst verwacht mag worden op het gebied van supergeleidende scheepstoepassingen, hoofdstuk 7 bevat de conclusies waarna in hoofdstuk 8 aanbevelingen worden gedaan voor vervolgonderzoek.

2 CONVENTIONELE ELEKTRISCHE SCHEEPSVOORTSTUWING

Onder een conventionele elektrische scheepsvoortstuwing wordt een niet-supergeleidende scheepsvoortstuwing verstaan. In dit hoofdstuk wordt een opsomming van de verschillende systemen gegeven zonder een uitspraak te doen over wat het beste systeem is, daar dit sterk afhankelijk is van het type schip. Wel worden in het kort de belangrijkste eigenschappen genoemd.

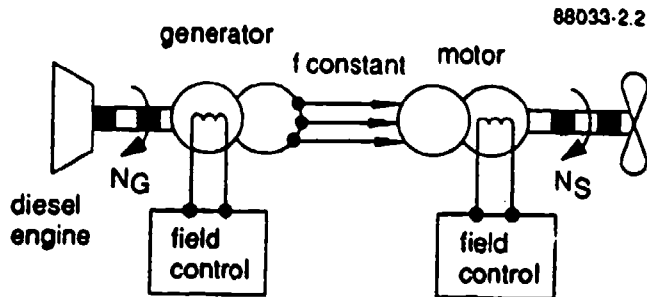
2.1 Elektrische voortstuwingssystemen

Elektrische voortstuwingssystemen kunnen worden onderverdeeld in systemen waarbij de "prime mover" met een konstant toerental draait en die waarbij het toerental variabel is [3] (figuur 2.1).



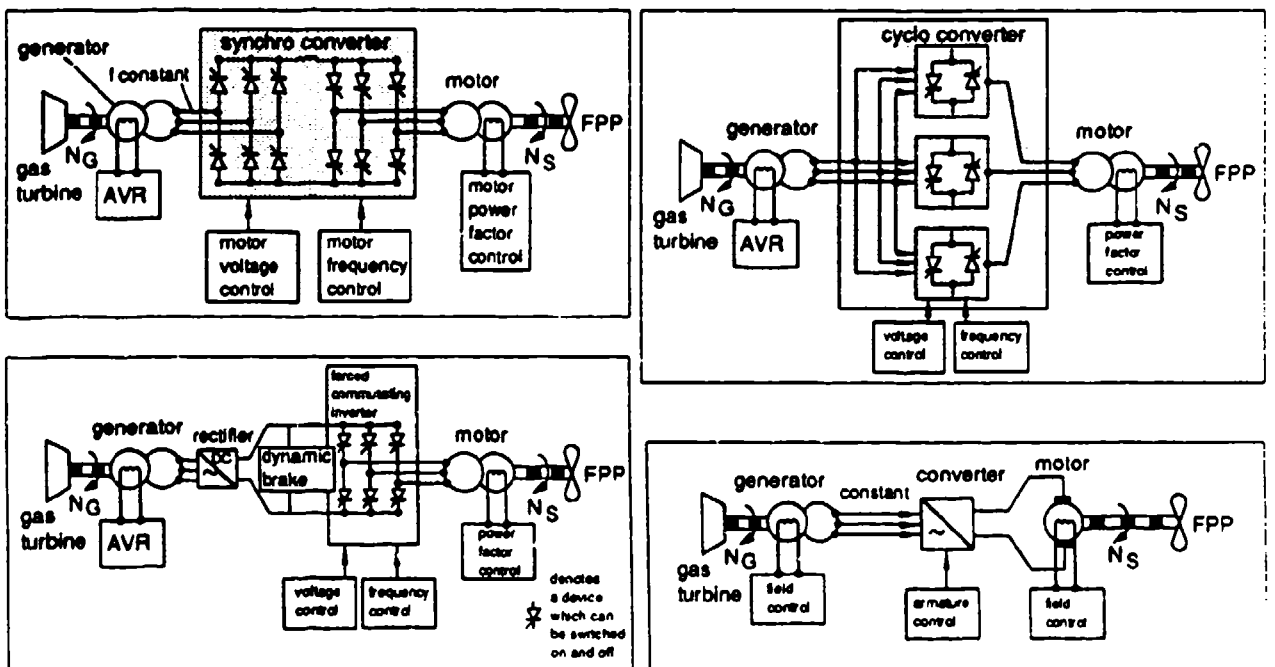
Figuur 2.1 Onderverdeling van elektrische voortstuwingssystemen

Bij een systeem met een constant toerental van de generator kan de voortstuwing worden geregeld door het toepassen van een schroef waarbij voortstuwing en richting is in te stellen (Controllable Pitch Propeller, figuur 2.2) of door het toepassen van statische omvormers die de motoren aandrijven .



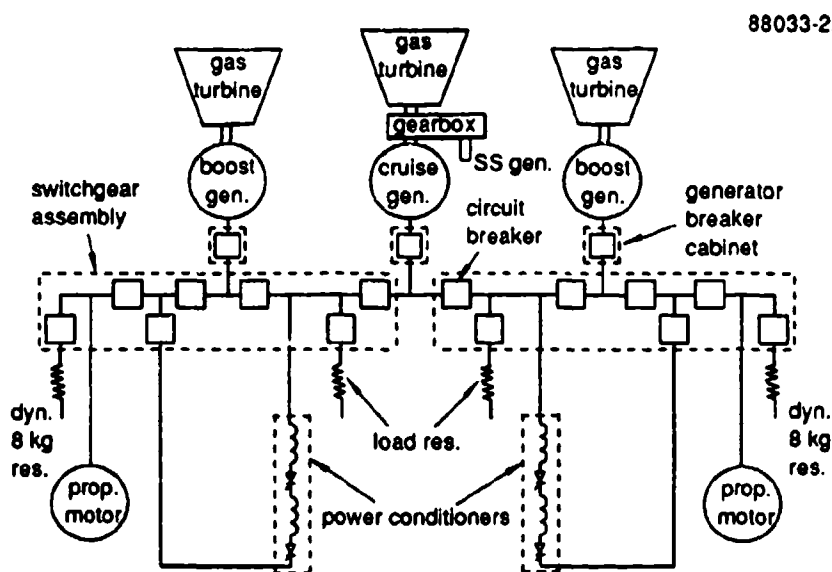
Figuur 2.2 System met een motor met constant toerental en CPP schroef

Deze statische omvormers zijn te onderverdelen in een gestuurde gelijkrichter voor DC motoren en synchro-converters, cyclo-converters en converters met geforceerde commutatie voor AC motoren (figuur 2.3).



Figuur 2.3 Systemen met statische omvormers en een vaste schroef

Ook combinaties van verschillende typen aandrijving kan men aantreffen. Zo kan alleen voor kruisvaart een systeem gekozen worden met een statische omvormer en voor hoogvaart een directe aandrijving met een variabel toerental van de "prime mover". Hiermee wordt bereikt dat de gasturbine wordt gebruikt bij een toerental waarbij het rendement goed is en hoeft de statische omvormer voor een veel lager vermogen te worden uitgelegd (figuur 2.4).



Figuur 2.4 Systeem met een gecombineerde elektrische voortstuwing

2.2 DC voortstuwing

DC propulsie heeft het voordeel van een zeer goede regelbaarheid, een hoog aanvangskoppel en een laag geluidsniveau [4] als gevolg van minder hoge harmonische componenten in de spanning en stroom. DC motoren en generatoren zijn echter in hun vermogen beperkt door problemen gerelateerd aan het gebruik van een commutator (bijvoorbeeld de maximale spanning is laag) en door een thermische bovengrens. Het toepassen van supergeleiding en nieuwe methoden en materialen voor de borstels kan het maximaal mogelijke vermogen aanzienlijk verhogen. In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op supergeleidende DC motoren en generatoren.

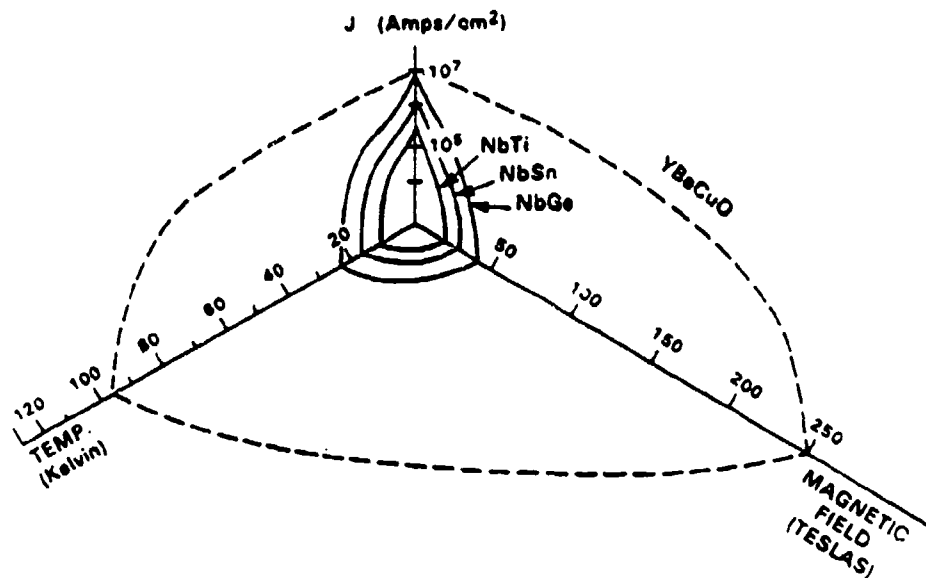
2.3 AC voortstuwing

Bij AC voortstuwing wordt bijna altijd gebruik gemaakt van synchrone motoren. Een kleine luchtspleet en de maximaal inductie zijn beperkende factoren voor het toepassen van asynchrone

motoren voor hoge vermogens. Van de statische omvormers is de synchro-converter bestaande uit een gestuurde gelijkrichter, spoel en inverter, de eenvoudigste omvormer. Het systeem kan energie terug leveren aan het boordnet en de draairichting kan omgedraaid worden door het veranderen van de pulsvolgorde van de thyristoren van de inverter. In figuur 2.3 is alleen één thyristor per tak getekend, in werkelijkheid is dit een combinatie van meerdere thyristoren in serie en parallel. De uitgangsspanning van een synchro-converter heeft een grote vijfde en zevende harmonische component hetgeen leidt tot trillingen die de herkenbaarheid vergroten en aanleiding geeft tot een onregelmatig toerental bij lage snelheden. Door het vergroten van de complexiteit van de statische omvormer en door speciale aanpassingen van de wikkeling van de machine kan dit probleem verkleind worden. De cyclo-converter geeft een spanning met minder hoge harmonische componenten af maar heeft een beperkte maximale frequentie (maximaal 50 % van de frequentie van de generator, die direct afhangt van het pooltal). Per motorfase zijn twaalf thyristoren nodig zodat de totale converter minimaal 36 thyristoren telt. Voor grotere vermogens is er nauwelijks verschil in aantal thyristoren voor een synchro-converter en een cyclo-converter daar bij de eerste meer halfgeleiders parallel moeten worden geschakeld. Door de opkomst van halfgeleiders die via hun aansturing kunnen worden uitgeschakeld (in plaats van uitschakelen doordat de spanning over de halfgeleider van polariteit omdraait) wordt de geforceerd gecommuteerde converter steeds vaker toegepast. Door het toepassen van pulsbreedte modulatietechnieken is het mogelijk om stroomvormen te genereren met een zeer lage harmonische inhoud. Het vermogen van deze omvormers is echter nog beperkt tot ongeveer 10 MW.

3 EIGENSCHAPPEN VAN HOGE- EN LAGE-TEMPERATUUR SUPERGELEIDERS

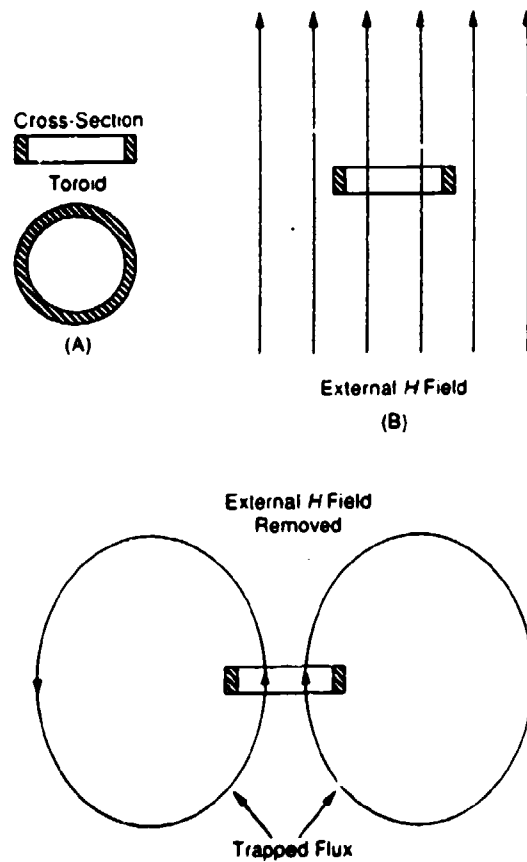
Alle supergeleiders kenmerken zich door een weerstandswaarde gelijk aan 0 en door sterke diamagnetische eigenschappen beneden een bepaalde kritische temperatuur. De abrupte overgang van normale geleiding naar supergeleiding vindt plaats tijdens een thermodynamische faseovergang die niet alleen bepaald wordt door de temperatuur maar ook door de magnetische veldsterkte aan het oppervlak van het materiaal. Bij het overschrijden van een maximale waarde voor de stroomdichtheid zal het materiaal zijn supergeleidende eigenschappen verliezen. In figuur 3.1 is het gebied getekend waarbinnen het materiaal supergeleidend is als functie van de temperatuur (T), de stroomdichtheid (J) en de magnetische veldsterkte (H)



Figuur 3.1 De kritische waarden voor J, H, T

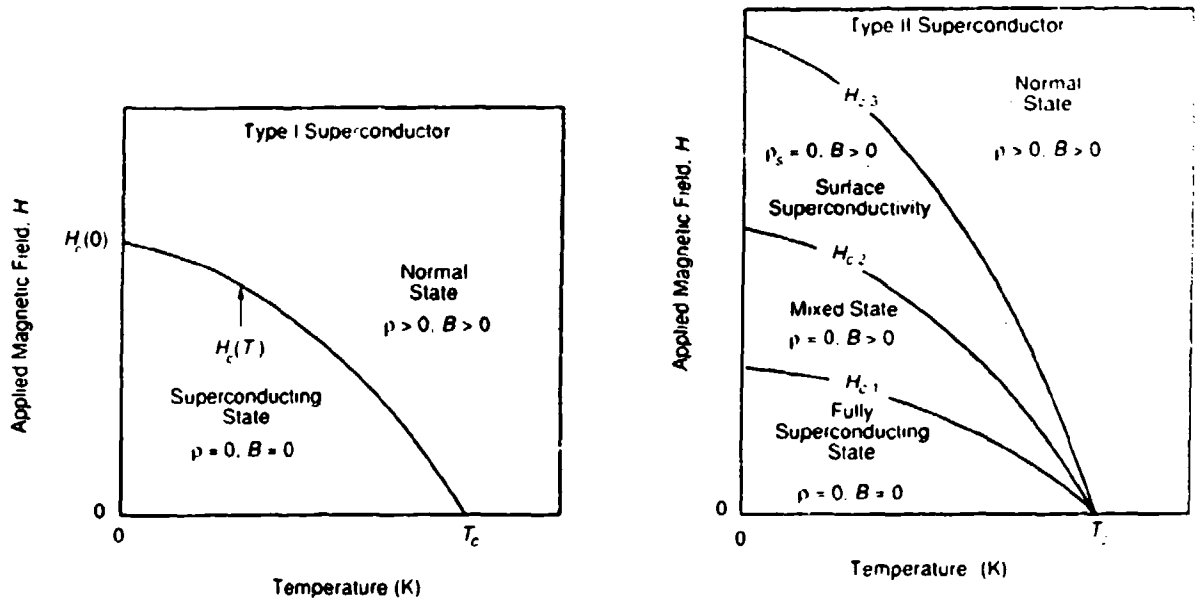
Als een supergeleidend materiaal geplaatst in een magnetische veld wordt afgekoeld tot onder de kritische temperatuur dan zal het magnetische veld uit de supergeleider worden "weggedrukt". Dit verschijnsel wordt het Meissner effect genoemd. Het Meissner effect (Magnetische veldstrekke H is 0) en het ontbreken van weerstand (elektrische veldstrekke E is 0) zijn bepalend voor de vraag of een materiaal valt te kenmerken als een supergeleider.

Het meten van de weerstand van een supergeleider is niet goed mogelijk. Meestal wordt deze bepaald door het opwekken van een persistente stroom door een supergeleidende ring (figuur 3.2). De tijd dat deze stroom blijft vloeien is een maat voor de weerstand (dit kan jaren duren).



Figuur 3.2 Het opwekken van een persistente stroom

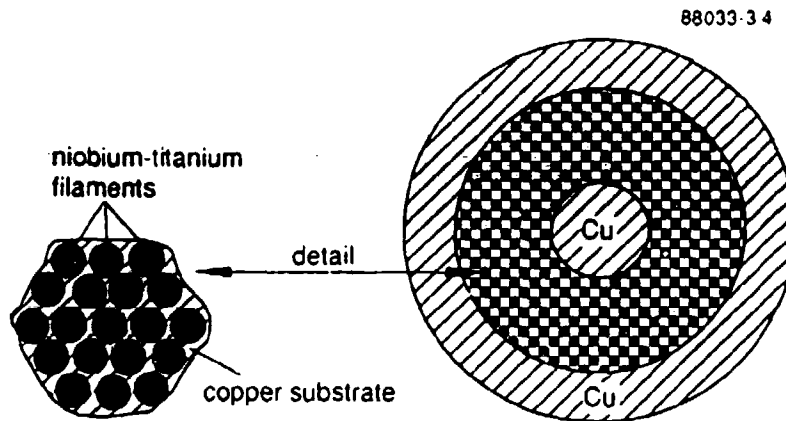
Supergeleiders kunnen worden onderverdeeld in twee groepen die aangeduid worden als Type I en Type II materialen. Tot de eerste groep behoren over het algemeen elementen als lood, tin etc. en tot de tweede groep behoren over het algemeen de legeringen als Nb_3Sn , $NbTi$ en de hoge-temperatuur (HT) supergeleidende materialen, bijvoorbeeld $YBaCuO$. Kenmerkend voor Type I materiaal is dat bij de overgang van geleiding naar supergeleiding het magnetisch veld volledig weggedrukt wordt terwijl bij Type II materiaal dit via enkele tussenstadia gebeurt (figuur 3.3), waarbij eerst het oppervlak supergeleidend wordt en gelijdelijk aan een groter gedeelte supergeleidend wordt totdat de volledige supergeleidende toestand is bereikt.



Figuur 3.3 Type I en Type II supergeleidende materialen

De kritische veldstrekke en de kritische stroomdichtheid ligt voor type II materiaal hoger dan voor type I materiaal. Voor magneetspoelen wordt dan ook altijd type II materiaal gebruikt.

Supergeleidend materiaal heeft een slechte thermische geleiding. Zo is dit voor het bekende Nb_3Sn 0.4 mW/cm.K , terwijl dit voor koper 7000 mW/cm.K is. Dit heeft tot gevolg dat het materiaal zeer moeilijk te koelen is. Dit wordt sterk verbeterd door de supergeleidende kabel op te bouwen uit meerdere dunne draadjes ingebed in koper of aluminium (figuur 3.4).



Figuur 3.4 Opbouw van een supergeleidende kabel

Zo'n koper of aluminium matrix structuur heeft bovendien als voordeel dat de stroom door het koper kan worden overgenomen als de supergeleider plotseling normaal geleidend wordt. Het koper of aluminium vergroot dus de stabiliteit van de kabel. Als de supergeleider in een wisselend veld geplaatst wordt dan zullen er verliezen optreden in het materiaal als gevolg van wervelstromen en de energie die nodig is om een veld in het draadje op te bouwen (in de "mixed state", zie figuur 3.3) Deze verliezen worden geminimaliseerd door de supergeleidende draadjes zo dun mogelijk te maken en door de draden te twisten. De wervelstromen in de matrix kunnen worden geminimaliseerd door een afscherming van een materiaal met een hoge weerstand op te nemen.

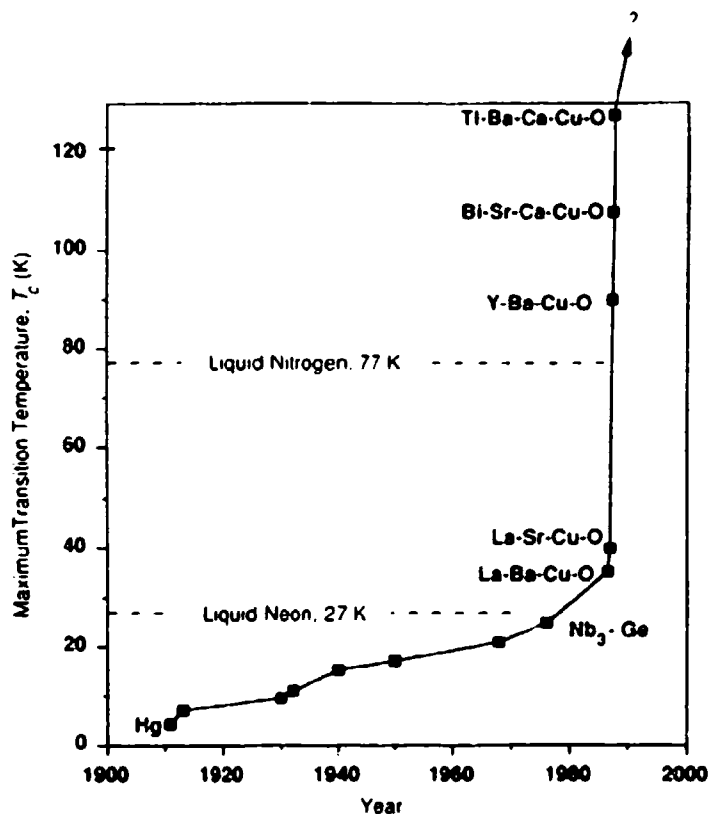
3.1 Lage-temperatuur supergeleiders

De bekendste lage-temperatuur (LT) supergeleiders zijn Nb_3Sn en $NbTi$. Beide materialen worden met vloeibaar Helium gekoeld (4,2 K). Niobium-tin draden kunnen worden gebruikt bij velden tot 12 à 16 T maar zijn zeer breekbaar. Niobium-titaan wordt het meest gebruikt voor magneetspoelen tot ongeveer 8 T bij een stroomsterkte van $1000 A/mm^2$. De maximale stroomsterkte van een kabel met een aluminium of koper matrix is echter veel kleiner ($100 A/mm^2$).

3.2 Hoge-temperatuur supergeleiders

Onder hoge-temperatuur (HT) supergeleiders wordt de groep supergeleiders verstaan, die een kritische temperatuur groter dan ongeveer 25 K hebben [5]. Sinds de eerste melding hiervan door

Bednorz en Müller in 1986 is er een enorme inspanning ontstaan op dit terrein en zijn er vele nieuwe materialen ontdekt (figuur 3.4)



Figuur 3.4 Ontwikkeling van de hoge-temperatuur supergeleiders

Eén van de voordelen van HT supergeleiders kan zijn dat gekoeld kan worden met vloeibare stikstof (77 K). De directe toepassingen van hoge-temperatuur supergeleiders beperken zich vooral tot elektronische componenten. Voor vermogenstoepassingen is de bereikte stroomdichtheid in amorf materiaal nog veel te klein (30 A/mm^2 bij $H = 0$) en is men bovendien nog niet in staat om goede draden of staven te vervaardigen.

4 MOGELIJKE MARINE TOEPASSINGEN VAN SUPERGELEIDERS

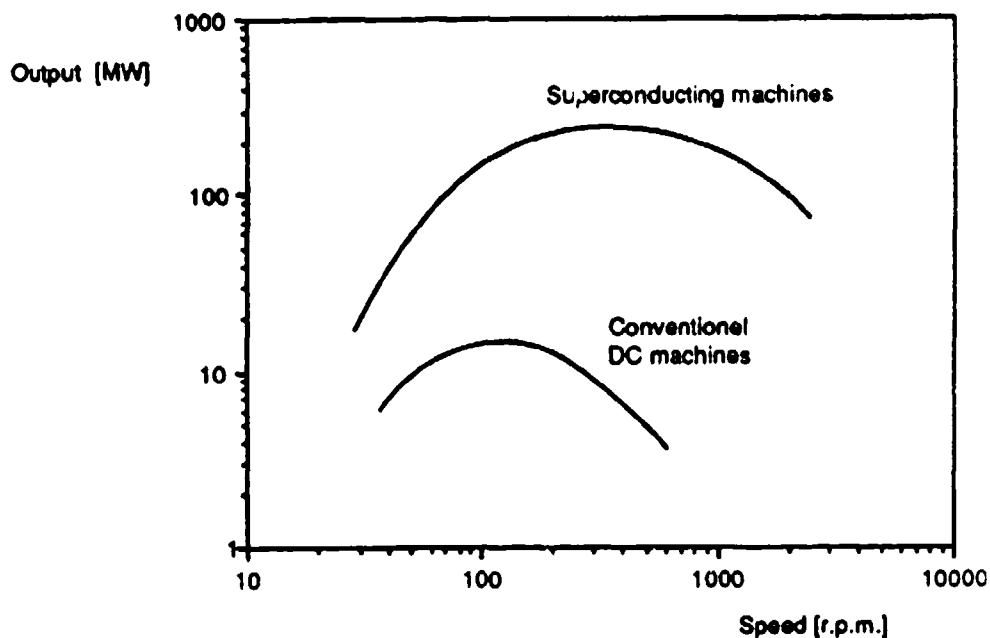
In dit hoofdstuk wordt gekeken naar mogelijke toepassingen van zowel LT als HT supergeleiders aan boord van schepen. De nadruk zal hierbij liggen op de behandeling van motoren, generatoren en elektromagnetische voortstuwing, terwijl elektronische componenten waarbij gebruik gemaakt wordt van HT supergeleiders slechts kort vermeld zullen worden. Achtereenvolgens worden de volgende onderwerpen behandeld:

- Elektrische motoren en generatoren;
- Elektromagnetische voortstuwing;
- Energieopslag;
- Afscherming;
- Elektronische componenten;
- Schakelaars.

In hoofdstuk 5 wordt gekeken wat de invloed van het gebruik van deze componenten op het scheepsonwerp kan zijn en worden enige voorbeelden gegeven.

4.1 Supergeleidende motoren en generatoren

Het grote voordeel van het gebruik van supergeleiders voor motoren en generatoren is dat de maximaal mogelijke inductie niet meer beperkt wordt door het gebruik van een ijzerpakket (verzadigingswaarde 2T) maar bepaald wordt door de hoge stroomdichtheid en maximale inductie van de supergeleider. Het ontbreken van ijzer heeft bovendien als voordeel dat er geen geluid is als gevolg van magnetostrictie en dat er meer ruimte beschikbaar is voor de stroombelegging. Dit laatste heeft tot gevolg dat de machines kleiner en lichter kunnen worden en in veel gevallen het maximaal mogelijke vermogen kan toenemen. Figuur 4.1 laat de toename van het maximale vermogen voor DC machines zien.



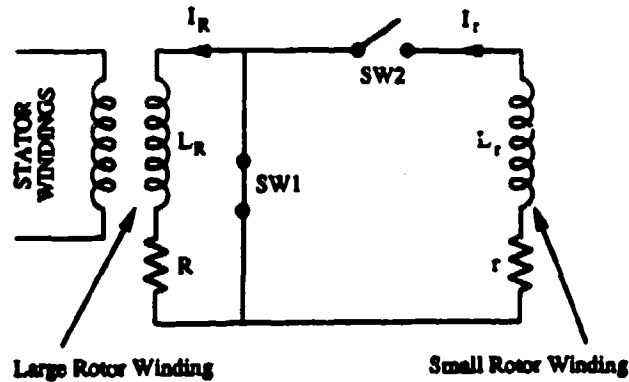
Figuur 4.1 Maximaal vermogen DC machines

Omdat de eerste supergeleiders uitsluitend gebruikt konden worden in een DC magnetisch veld werd de toepassing voor machines beperkt tot de bekrachtigingswikkelingen van DC - en synchrone machines. Door het toepassen van zeer dunne supergeleidende draden werd het gebruik in een AC magnetisch veld mogelijk en kan bijvoorbeeld ook het anker van de synchrone machine supergeleidend worden uitgevoerd.

4.1.1 Motoren met een "trapped flux" veldwikkeling

Een kortgesloten supergeleidende wikkeling zal elke verandering van de flux die met deze wikkeling gekoppeld is, tegen gaan. Van deze eigenschap wordt gebruik gemaakt voor de veldwikkeling van synchrone motoren [6] en borstelloze DC motoren [7].

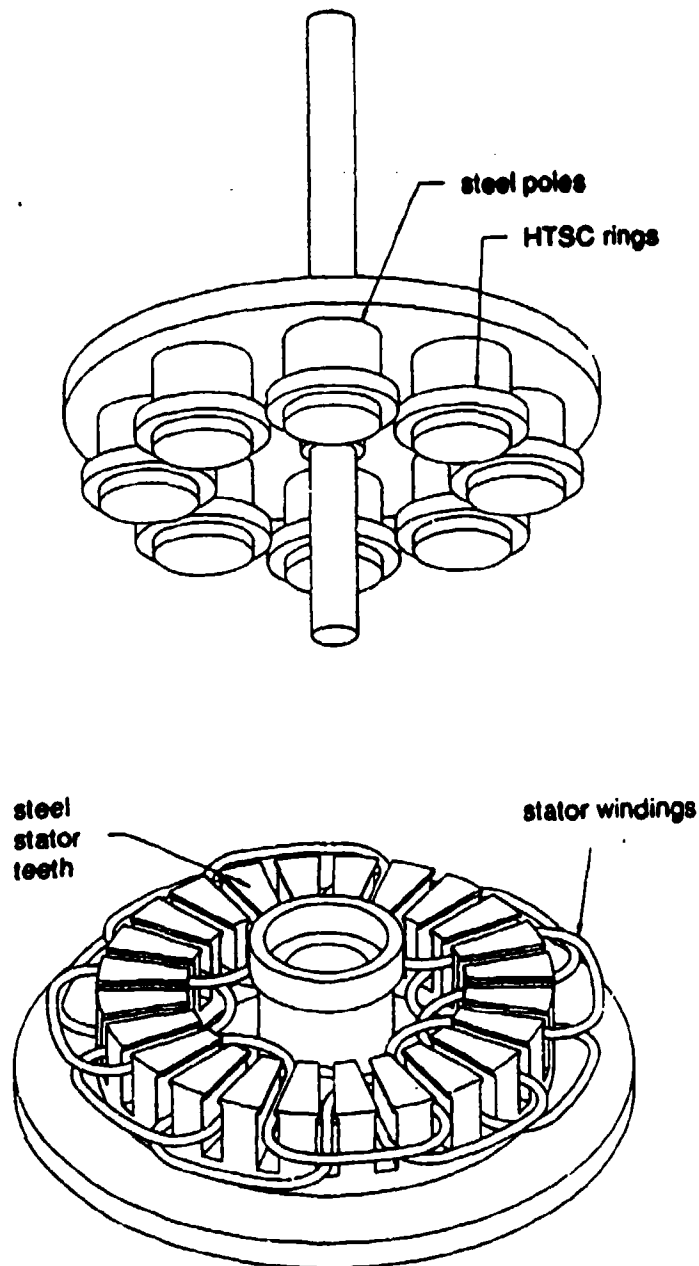
De "Self Energized Air Core Superconducting (SEAC) Motor" is zo'n synchrone motor waarbij de stroom in de veldwikkeling wordt opgewekt door middel van een kleine "trapped flux" wikkeling. In figuur 4.2 wordt de motor schematisch weergegeven.



Figuur 4.2 Schematische voorstelling van de SEAC motor

De rotor heeft een grote en een kleine wikkeling waarvan de assen loodrecht op elkaar staan. Op het moment dat de flux in de kleine wikkeling maximaal is wordt schakelaar SW2 gesloten. Als de flux afneemt zal er een stroom gaan lopen in de kleine wikkeling. Deze stroom probeert de afname van de flux tegen te gaan. Hierna wordt SW1 geopend. Hierdoor zal de stroom in de kleine wikkeling afnemen en in de grote wikkeling toenemen (Flux pumping). Op deze manier wordt de grote wikkeling opgeladen en zal de rotor synchronoon gaan draaien.

Emerson werkt ook aan een borstelloze DC trapped Flux motor (figuur 4.3, statoraansluitingen waarschijnlijk aan de onderkant). Hier wordt eerst de stator afgekoeld waarna deze met een DC stroom wordt bekrachtigd. Daarna wordt de rotor afgekoeld en wordt de DC stroom weggenomen. De stroom in de supergeleidende ringen zal de flux blijven vasthouden waardoor een supergeleidende magneet is ontstaan.

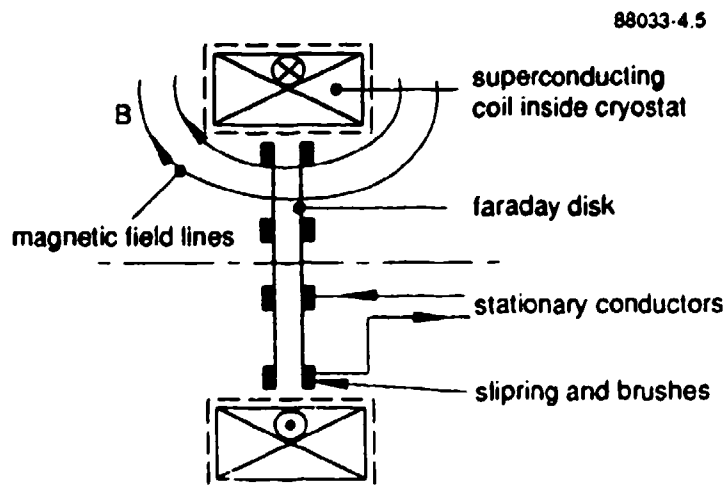


Figuur 4.3 Brushless DC "trapped flux" motor

4.1.2. Homopolaire machines

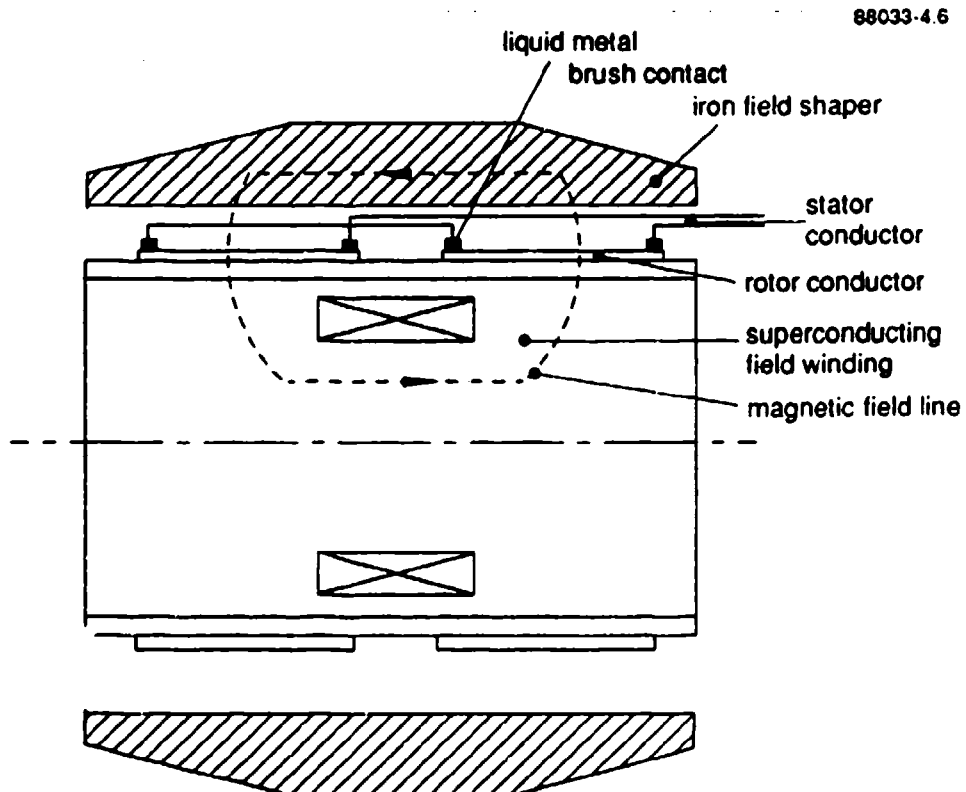
In de jaren zestig waren de supergeleiders zeer gevoelig voor AC magnetische velden en mechanische belastingen. Vandaar dat voor toepassing in elektrische machines werd gezocht naar een type machine waarbij de armatuurreactie (invloed van het veld van het armatuur op de bekrachtigingswikkeling) en het reactiekoppel op de bekrachtigingswikkeling zeer klein is. De homopolaire machine voldoet hieraan. De bekrachtigingswikkeling kan door een coaxiale type constructie worden afgeschermd. Alhoewel de supergeleiders tegenwoordig aanzienlijke krachten kunnen opnemen en het AC verlies in de draden is verkleind door de draden zeer dun te maken is de homopolaire machine nog steeds populair vanwege het ontbreken van een commutator, zijn enorme robuustheid, eenvoudige constructie en het hoge maximaal haalbare vermogen. Daar staat tegenover dat de spanning van een homopolaire machine over het algemeen laag is hetgeen zware eisen stelt aan de sleepcontacten. Zo zal bij voorbeeld een 20 MW motor met een laag toerental een maximale spanning hebben van ongeveer 1000V, hetgeen inhoudt dat de stroom door de sleepcontacten 20 kA zal zijn.

De eenvoudigste homopolaire machine is de machine met een schijfvormige rotor, de machine die door Faraday in 1831 werd ontwikkeld (figuur 4.5)



Figuur 4.5 Homopolaire machine met schijfrotor

Een nadeel van de schijfrotor is de hoge stroomdichtheid voor de sleepcontacten bij de as. Dit probleem doet zich niet voor bij de drumrotor (figuur 4.6). In figuur 4.6 is de bekrachtigingswikkeling binnen de rotor geplaatst en bestaat uit een quadropool magneet.



Figuur 4.6 Homopolaire generator met een drumrotor

Het voordeel van een wikkeling binnen de rotor ten opzichte van één er buiten is een betere koppeling en een kleine cryostaat. Het nadeel is vaak dat de wikkeling klein is waardoor de flux en daarmee de spanning lager is dan bij een wikkeling die aan de buitenkant van de rotor is geplaatst. Ook is in figuur 4.6 te zien dat de spanning verhoogd is door meerdere cilinders in serie te schakelen met behulp van borstels (kan ook bij het schijf type). Het uitwendige veld wordt sterk verkleind door het toepassen van een ferromagnetische "field shaper" (dit gaat wel ten koste van een extra gewicht van ongeveer 50 %).

4.1.2 De ontwikkeling van homopolaire machines

De eerste homopolaire machine met een supergeleidende wikkeling werd door International Research and Development Co. Ltd (IRD) in 1966 gebouwd voor de Royal Navy [8]. Het was een homopolaire motor die een vermogen ontwikkelde van 37,3 kW bij 2000 omw/min. De rotor bestond uit twee schijven, in serie geschakeld, waarover een spanning van 10,7V stond. De met een Niobium-Zirconium supergeleider uitgeruste veldwikkeling genereerde een maximale magnetische inductie van 2,5T. Voor de borstels werd koper-grafiet gebruikt (Morganite CMIS).

In 1967 begon IRD met het ontwerp van een 2,425 MW motor die later bekend is geworden als de Fawley-machine, genoemd naar de Fawley centrale waar deze motor de waterpomp voor een turbo-generator aandreef. Ook hiervoor zijn borstels gebruikt van koper-grafiet. De rotor bestaat uit twee schijven die ieder zijn verdeeld in segmenten die door middel van gesegmenteerde slepringen in serie zijn geschakeld. Op deze manier werd een spanning bereikt van 440V. De bedoeling van dit project was te bewijzen dat een supergeleidende motor betrouwbaar kan functioneren in een industriële omgeving. De Fawley machine zelf funktioneerde goed alleen de heliumcompressor van het koelsysteem vertoonde problemen.

In de zeventiger jaren is door IRD een complete motor/generator set van 1 MW ontwikkeld in opdracht van het Ministry of Defence. De generator werd aangedreven door een Deltic diesel bij een toerental van 1500 omw/min. Voor de borstels werden gemetalliseerde koolstof vezels gebruikt. De omgeving is door middel van een extra supergeleidende wikkeling afgeschermd.

Deze wikkeling is in de cryostaat van de veldwikkeling geplaatst. Deze manier van afschermen heeft het voordeel van een laag gewicht maar als nadelen een verkleining van het veld en een geringe afscherming vlakbij de machine.

Als vervolg op dit project werd in 1979 de veldwikkeling van een 25 MW, 200 omw/min, motor ontwikkeld en werd uitgebreid onderzoek gedaan aan metaal-grafiet borstels. Blijkbaar werden de metaal-grafiet borstels weer overwogen omdat de gemetalliseerde koolstofvezels erg duur waren en uitsluitend te gebruiken in één draairichting. Een ander belangrijk aspect was dat men afstapte van de schijfvormige rotor en over is gegaan op een drumrotor met inwendig geplaatste veldspoelen. Dit onderzoek werd in 1983 afgerond waarna zover bekend nog uitsluitend enige studies (ijsbreker met 45 MW homopolaire motor) zijn uitgevoerd.

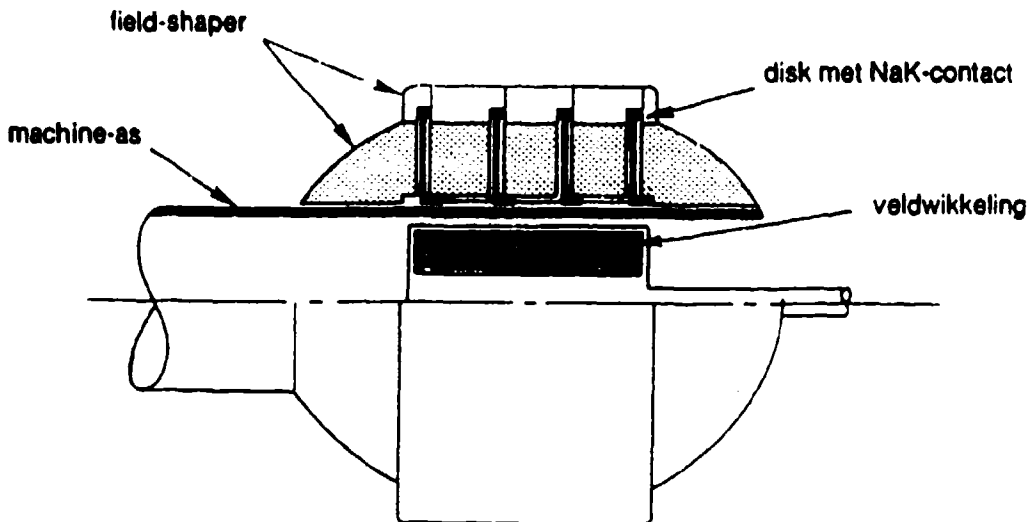
In 1969 werd in de USA bij het David W. Taylor Naval Ship Research & Development Center (NSRDC) te Annapolis een programma gestart met als doel de ontwikkeling van supergeleidende homopolaire machines voor de elektrische voortstuwing van (marine) schepen. Als eerste werd een 300 kW supergeleidende modelmotor ontwikkeld. De rotor hiervan bestaat uit twee groepen van vier concentrische drums, resulterend in acht spanningstrappen. Andere belangrijke verschillen met de machines van IRD zijn het gebruik van vloeibaar metaal (NaK) voor de borstels en een ijzeren juk voor de afscherming naar de omgeving. De motor is 1 meter lang, heeft een diameter van 0,5 meter en weegt 1000 kg. In 1980 is deze motor samen met een supergeleidende generator geplaatst in een 20 meter lang schip, de Jupiter II waarmee proeven worden gedaan in de Chesapeake Bay.

Met de 300 kW modelmotor als uitgangspunt is in 1973 aan General Electric en Garrett de opdracht gegeven 2,25 MW motoren en bijbehorende generatoren te ontwikkelen. Het toerental van de motoren (1200 omw/min) is dusdanig gekozen dat de sleepingsnelheid overeen komt met die van een full-size voortstuwingsmotor (bijvoorbeeld 30 MW bij 150 omw/min). In tabel 4.1 staan de belangrijkste gegevens van de door General Electric en Garrett geleverde machines.

Tabel 1 2,25 MW homopolaire machines van Garrett en General Electric

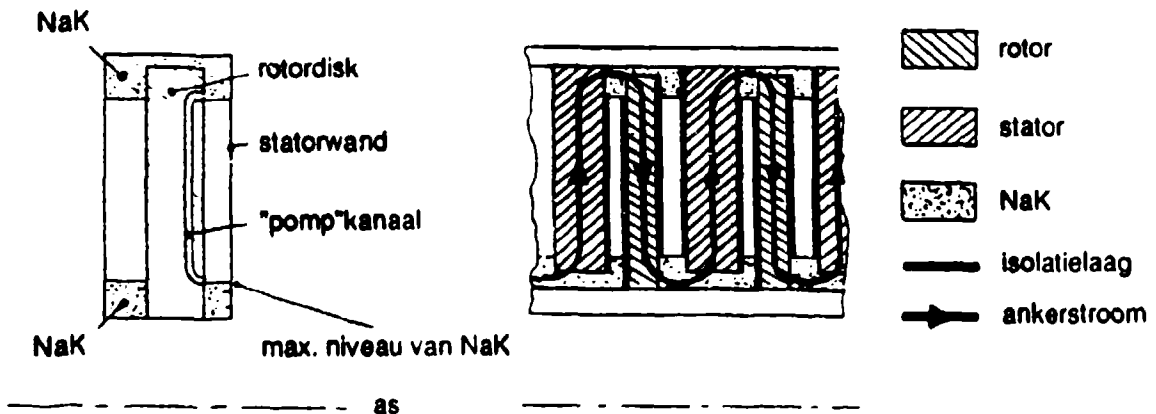
| | General Electric | General Electric | General Electric | Garrett |
|-------------------------|--|--|------------------|-------------------------------------|
| | motor | motor | generator | motor |
| Nominaal vermogen [MW] | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 |
| Nominale spanning [V] | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Nominale stroom [kA] | 22 | 22 | 22 | 24 |
| Toerental [rpm] | 1200 | 1200 | 3600 | 1200 |
| Magneet | quadrupool | quadrupool | quadrupool | dipool |
| Interne/externe magneet | intern | intern | intern | intern |
| Type rotor | schijven | 4 drums + 1 laag vloeistof gekoelde staven | schijven | 2 x 7 drums vloeistof gekoeld |
| Borstels | NaK | NaK | NaK | NaK |
| Afscherming | Shaped field | Shaped field | Shaped field | Shaped field |
| Test resultaat | Problemen met afdichting NaK ruimten | Kortsluiting, ontwerp goed | - | Lek in het koelsysteem |

De schijvenmotor van General Electric (figuur 4.6) heeft een verdeeld ijzeren juk met luchtspleten waardoor het noodzakelijk is extra afschermingsmaatregelen te nemen.



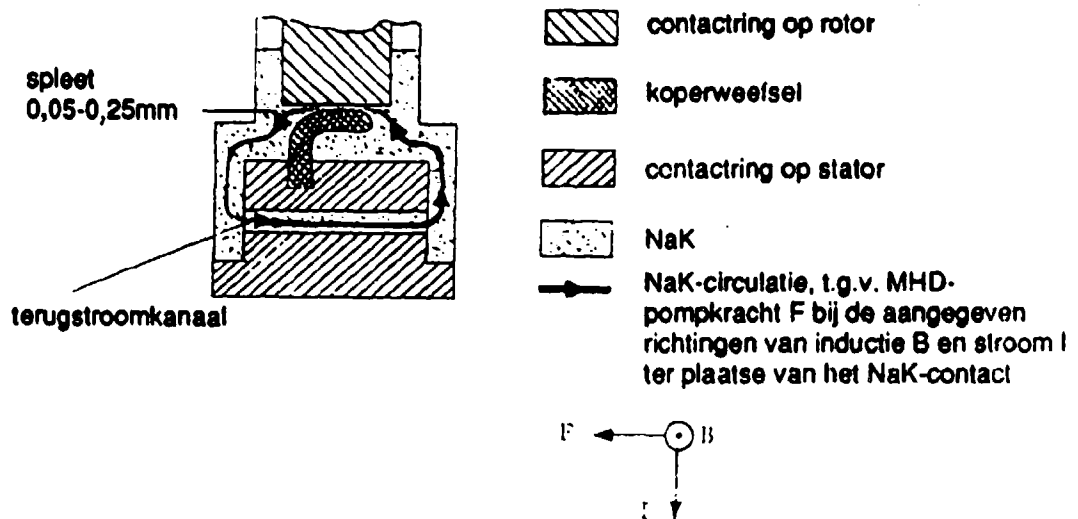
Figuur 4.6 2,25 MW schijven motor van General Electric

De schijven worden in serie geschakeld door een laag NaK die door de centrifugale kracht ontstaat (voor de laag bij de as wordt het NaK door MHD pompwerking teruggevoerd) zie figuur 4.7. Het afdichten van de NaK ruimten vormt het grote probleem bij deze uitvoering.



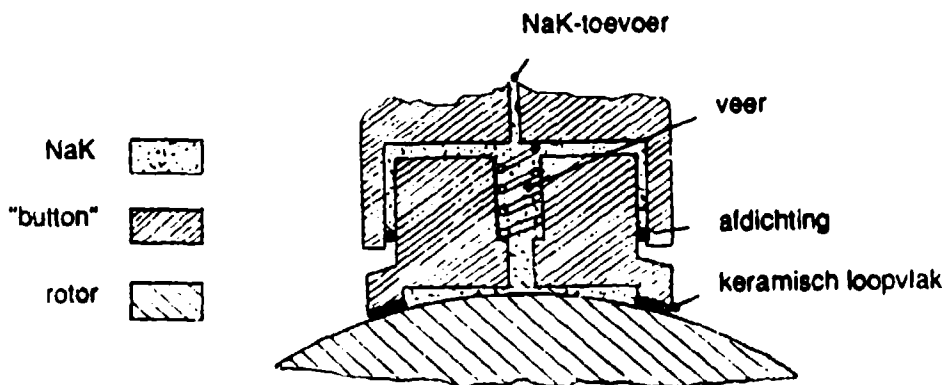
Figuur 4.7 Serieschakeling van de schijven met NaK

De drummotor van General Electric maakt ook gebruik van NaK borstels. Als gevolg van het magnetisch veld ter plaatse van deze borstels werd het NaK weggedrukt. Dit heeft men kunnen oplossen door de spleet waarin het NaK zich bevindt drastisch te verkleinen met behulp van een flexibele geleider bestaande uit Litze draad (figuur 4.8) en door het aanpassen van het veld. Bij het NSRDC is men er niet zeker van of deze oplossing voldoende schokbestendig is [9].



Figuur 4.8 Verkleining van de afstand tussen de rotor en de stator door middel van litze draad

Garrett maakt voor de collector gebruik van "buttons", dat wil zeggen kleine elementen met een schotelvormige voet die verend aan de stator zijn bevestigd en met de holle kant van de schotel op de sleefring rusten (figuur 4.9). Dit systeem heeft echter nooit met voldoende betrouwbaarheid gewerkt.



Figuur 4.9 NaK borstels van Garrett

Uit het bovenstaande blijkt dat stroomcollectoren veel problemen veroorzaken. Bij het NSRDC heeft men gekozen voor homopolaire machines met een hogere stroom dan bijvoorbeeld de machines van IRD. Dit bracht met zich mee dat borstels waarbij gebruik gemaakt werd van een vlocibaar metaal, in dit geval NaK met 1000 A/cm^2 , noodzakelijk waren terwijl IRD kon volstaan met metaal-grafiet borstels met een stroomdichtheid van 100 A/cm^2 . De borstelproblematiek is ongetwijfeld één van de belangrijkste redenen waarom vanaf het begin van tachtiger jaren de aandacht verschoven is naar watergekoelde AC machines en de ontwikkeling van homopolaire machines bij het NSRDC en IRD nagenoeg gestopt is. Ook fabrikanten als Garrett en General Electric voorzien geen grote commerciële toepassingen.

Naast de ontwikkelingen in de USA en UK wordt er op kleine schaal aan homopolaire machines gewerkt in Frankrijk, Japan en de landen van het GOS.

4.1.3 Synchrone generatoren

Het vermogen van synchrone generatoren ten behoeve van energiecentrales is toegenomen van 60 MW in de veertiger jaren tot boven de 1000 MW in de tachtiger jaren. De reden hiervoor is dat grote eenheden goedkoper zijn in exploitatie en onderhoud. Met behulp van supergeleidende wikkelingen kan het rendement verbeterd worden met 0,5 % tot 1 % en zowel het gewicht als het volume kunnen worden gereduceerd met zo'n 50 %. Daar staat tegenover een grotere complexiteit en daarmee samengaannde kosten van een generator. Globaal kan gesteld worden dat voor generatoren boven de 500 MW de geringere kosten in verband met gewicht- en volumebesparing opwegen tegen de kosten ten gevolge van de grotere complexiteit (de energiebesparing is hier buiten beschouwing gelaten). Voor generatoren waarbij gebruik gemaakt wordt van HT supergeleiders zal dit "break even point" onder de 100 MW komen te liggen. Dit samen met de besparing van brandstof maakt de supergeleidende synchrone generator misschien interessant voor schepen.

4.1.3.1 Enkele voorbeelden van ontwikkelde AC generatoren

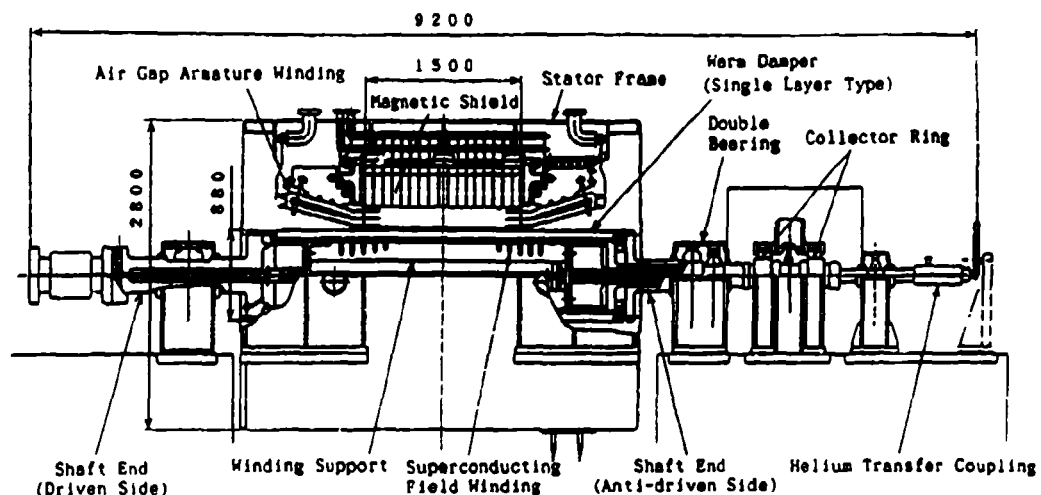
De eerste supergeleidende generator werd ontwikkeld bij het MIT in 1969. Deze generator had een vermogen van 45 kVA. Gedurende de laatste 20 jaar zijn er in verschillende landen supergeleidende generatoren gebouwd, tabel 4.2 geeft hiervan een overzicht.

Tabel 2 Ontwikkeling AC generatoren in de verschillende landen

| Manufacturer | Country | Rating | Test |
|------------------|---------|----------|------|
| MIT | USA | 45 kVA | 1969 |
| All Unions Inst. | USSR | 65 kVA | 1970 |
| MIT | USA | 3000 kVA | 1972 |
| Westinghouse | USA | 5000 kVA | 1972 |
| All Unions Inst. | USSR | 1500 kVA | 1973 |
| Peri, Shanghai | China | 400 kVA | 1974 |
| Karkov | USSR | 200 kVA | 1975 |
| Electrosila | USSR | 2000 kVA | 1975 |
| Fuji, Mitsubishi | Japan | 6250 kVA | 1977 |
| CRTBT, Grenoble | France | 500 kVA | 1980 |
| TU, Munich | Germany | 300 kVA | 1980 |
| General Electric | USA | 20 MVA | 1981 |
| Electrosila | USSR | 20 MVA | 1981 |
| Fuji | Japan | 20 kVA | 1982 |
| Hitachi | Japan | 50 MVA | 1984 |
| Skoda | CSSR | 5000 kVA | 1984 |
| Mitsubishi | Japan | 30 MVA | 1984 |
| Toshiba | Japan | 3000 kVA | 1984 |
| Elin-Union | Austria | 2000 kVA | 1986 |
| CRTBT | France | 20 kVA | 1988 |
| Toshiba | Japan | 100 kVA | 1989 |
| Electrosila | USSR | 300 MVA | 1989 |
| Siemens-KWU | Germany | 850 MVA | 1996 |
| Super GM | Japan | 200 MVA | 1997 |
| Electrosila | GOS | 1000 MVA | 1998 |

Zoals uit tabel 4.2 blijkt wordt in de USA en de UK de laatste jaren relatief weinig aandacht besteed aan supergeleidende generatoren. Het werk wordt met name in Duitsland, Japan en de landen van het GOS en in mindere mate in Frankrijk voortgezet.

In de tweede helft van de zeventiger jaren is in Japan een generator van 6,25 MVA beproefd (Mitsubishi en Fuji) waarna in 1982 en 1983 generatoren van 30 MVA (Mitsubishi en Fuji), 50 MVA (Hitachi) en 3 MVA (Toshiba) volgden. Hierna is door het "Agency of Industrial Science and Technology" (AIST) van het "Ministry of International Trade and Industry" (MITI) een haalbaarheidsstudie voor supergeleidende generatoren uitgevoerd. Op basis van deze studie is de Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and Materials (Super-GM) opgericht. Vanaf 1988 is Super-GM bezig met de ontwikkeling van een 70 MW generator die dient als proefmodel voor een 200 MW generator. Deze laatste generator moet in 1997 operationeel zijn. Dit 8 jaar durend project is een onderdeel van het Moonlight project van het AIST en wordt uitgevoerd in opdracht van de New Energy and Industrial Technology Development Organisation (NEDO). Figuur 4.10 laat de doorsnede zien van de 70 MW generator [10].

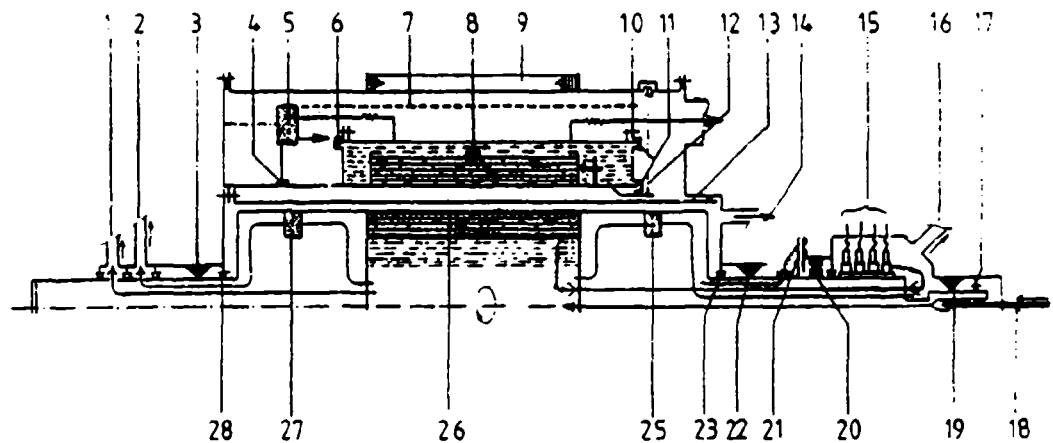


Figuur 4.10 70 MW generator van Super-GM

Alleen de rotor van de generator zal worden uitgevoerd met een geleider bestaande uit een NbTi draad met een Cu/CuNi matrix en met Al als stabilisator. Er zullen drie typen rotoren worden beproefd. Deze rotoren verschillen in demperwikkeling (een enkele laag, een kooi constructie en drie lagen), responsiesnelheid en toegepaste supergeleider (respectievelijk zeer stabiel, een hoge stroomdichtheid en een laag AC verlies). De statorwikkeling zal worden gekoeld met water.

In Frankrijk heeft het CRTBT in samenwerking met GEC ALSTOM in 1988 een 20 kVA synchrone generator ontwikkeld, die nu uitvoerig wordt getest. Door gebruik te maken van zeer

dunne supergeleidende draden kon het AC verlies sterk gereduceerd worden. Dit draad (CCN 1400LL) is gebruikt voor zowel de stator als de rotor wikkeling waardoor een volledig supergeleidende generator is verkregen [11] (figuur 4.11).



| | | | | | | | |
|---------|---------------------------|------|----------------------------|----|-----------------------|----------|-------------------------|
| 1 | : direct He gas recovery | 6,11 | : elastomer seal | 12 | : steel rod | 17,23,28 | : mechanical face seal |
| 2 | : heat exchanger exit | 7 | : thermal shield | 13 | : inner vacuum vessel | 18 | : rotating bayonet unit |
| 3,19,22 | : shaft | 8 | : three phase S.C. winding | 14 | : airgap pumping | 20 | : electronic supply |
| 4 | : cold point | 9 | : magnetic shield | 15 | : rings and brushes | 21 | : capacitive telemetry |
| 5,25,27 | : sintered heat exchanger | 10 | : dismountable flange | 16 | : helium recovery | 26 | : twin S.C. windings |

Figuur 4.11 20 kVA volledig supergeleidende generator van CRTBT

Daar zowel de rotor als de stator supergeleidend zijn is er geen thermische afscherming nodig om de rotor. Ook de elektromagnetische afscherming rond de rotor is vervallen omdat het AC verlies van de supergeleidende draad gering is. Om het verlies door turbulentie van het helium tegen te gaan is gekozen voor een constructie waarbij de rotor zich in een meedraaiend heliumvat bevindt. Dit vat wordt gescheiden van het statorvat door een luchtspleet met helium onder lage druk. Zowel in normaal bedrijf als onder kortsluitomstandigheden bleek deze generator goed te voldoen.

4.2 Elektromagnetische scheepsvorststuwing

Wanneer elektrische lading zich door een magneetveld beweegt dan wordt hierop de zogenaamd Lorentzkracht uitgeoefend. Van deze kracht wordt zowel in elektrische machines gebruik gemaakt, waarbij de stroom door koperen geleiders wordt gevoerd, als bij elektromagnetische voortstuwing waarbij er stroom door zeewater vloeit en de kracht wordt uitgeoefend op geleidende ionen die zich in het zeewater bevinden. Inherent aan dit principe kunnen voor de elektromagnetische voortstuwing enkele voor- en nadelen worden genoemd. De voordelen zijn:

- Voor een EM voortstuwing is geen schroef nodig. Een schroef veroorzaakt cavitatie, hetgeen samengaat met het genereren van geluid, dat door een passieve sonar kan worden opgevangen. Het toepassen van schroeven met een geringe cavitatie kan hiervoor een oplossing zijn maar gaat echter wel samen met een slechter rendement. Ook via de aandrijfas van een schroef kan geluid worden overgebracht. Voor de herkenbaarheid van een schip is het ontbreken van een schroef dus een groot voordeel.
- Door gebruik te maken van een EM voortstuwing aan beide zijden van het schip kan het roer komen te vervallen. Vaak is het roer een kwetsbaar onderdeel van het schip.
- EM voortstuwing heeft een hoog rendement in zijn achteruit, hetgeen eenvoudig gerealiseerd kan worden door de stroom door het zeewater van richting om te keren.
- Bij het toepassen van EM voortstuwing in een ijsbreker kunnen bovendien de volgende voordelen worden genoemd:
 - Door de Joule verliezen wordt het zeewater opgewarmd. Dit voorkomt het vastvriezen van het schip.
 - Gasvorming aan de elektrodes doet de wrijving ijs-scheepswand afnemen.

De nadelen van EM voortstuwing zijn:

- Bij de kathode ontstaat chloorgas dat onmiddellijk oplost maar de scheepswand kan aantasten. Er wordt gewerkt aan elektrodes van andere materialen waarmee in plaats van chloorgas, zuurstof wordt verkregen. Bij de anode ontstaat waterstofgas. Hoewel geen gegevens voor handen zijn zou het ontwijkende gas kunnen leiden tot herkenning van het schip (bellenbaan?).
- Elektromagnetische voortstuwing werkt alleen maar goed in zout water. Dit kan dus problemen opleveren als het schip een rivier moet opvaren.
- Het rendement van een EM voortstuwing is alleen maar hoog bij lage snelheden en zeer hoge magnetische inducties (zie hoofdstuk 4.3.3).
- Voor EM voortstuwing zijn zeer hoge magneetvelden noodzakelijk. Om een schip moeilijk herkenbaar te maken moet dit veld naar buiten toe worden afgeschermd. Men probeert dit te doen door gebruik te maken van supergeleidende folies.

Het belangrijkste nadeel van de EM- voortstuwing is ongetwijfeld het slechte rendement bij een redelijke snelheid. Waarschijnlijk zal daarom de toepassing hiervan zich beperken tot schepen waarbij de specifieke voordelen goed tot hun recht komen. Hierbij kan gedacht worden aan onderzeeboten (bijvoorbeeld alleen tijdens sluipvaart), ijsbrekers, schepen voor diepzee onderzoek, waarbij het

ontbreken van een doorvoer voor de schroefas een groot voordeel is en een lage snelheid geen bezwaar is, SWATH schepen, waarbij de straalbuis zeer goed in de drijvers kan worden ingebouwd en oppervlakteschepen die zich bezig houden met onderzeebootbestrijding.

4.2.1 Historie

Het principe van de EM-voortstuwing dateert uit de jaren zestig. In die tijd werd er met name in de USA aan gewerkt. Zo werd het eerste octrooi verleend aan W. A. Rice in 1961. In 1962 komt O.M. Philips met de eerste publicatie over een EM-voortstuwing met een AC veld en in 1963 komt L.R.A. Doragh met het idee om gebruik te maken van een straalbuis. In 1966 wordt Steward Way van Westinghouse Research Laboratory voor een jaar docent aan de University of California in Santa Barbara. Hier bouwt hij samen met studenten het eerste schip met EM voortstuwing de EMS-1. Het bootje was ongeveer 3 meter lang, 50 cm in doorsnede en haalde een snelheid van 2 knopen. Alle onderzoekers in die tijd kwamen tot de conclusie dat EM voortstuwing alleen maar levensvatbaar zou kunnen worden als zij in staat waren de magnetische inductie op te voeren. Het wachten was dus op geschikte supergeleiders.

In Japan is men begonnen in de jaren zeventig. In 1976 werd door Yoshire Saji van de Kobe University of Mercantile Marine een model met supergeleidende magneten gebouwd: De SEMD1. Het model was 60 cm lang, gebruikte NbTi supergeleidend draad en ontwikkelde een voortstuwing van 0,15N bij 0,985 T en 10 A. In 1979 ontwikkelde Saji en E. Tada van de Osaka University de ST500 die door Kawasaki Heavy Industries werd gebouwd. Dit was een bootje van 3,6 meter lang met elektroden bevestigd aan de onderkant van het schip en een waterverplaatsing van 700 kg. De voortstuwingskracht was 15N bij 65A en een magnetisch veld van 2T. Met dit bootje werd een snelheid gehaald van 0,6m/s. Hierna werd in samenwerking met Hitachi de ST-400B ontworpen, een ijsbreker met een voortstuwingskracht van 4MN en een magnetische inductie van 4 T. Deze ijsbreker is echter nooit gebouwd. In 1985 werd door de Japan Foundation for Shipbuilding Advancement (JAFSA) een committee opgericht voor het ontwikkelen van EM-voortstuwing. Het budget bedroeg 40 miljoen dollar en de Japan Shipbuilding Industry Foundation was één van de subsidiegevers. Het eerste project werd de ontwikkeling van de Yamato 1, een schip van 185 ton, 30 meter lang en 10 meter breed [12]. De voortstuwing wordt verzorgd door 2 units, ieder bestaand uit 6 straalbuizen die gezamenlijk een voortstuwingskracht ontwikkelen van 8000N. De geplande maximale snelheid is 8 knopen. De eerste tests worden in de eerste helft van 1992 uitgevoerd.

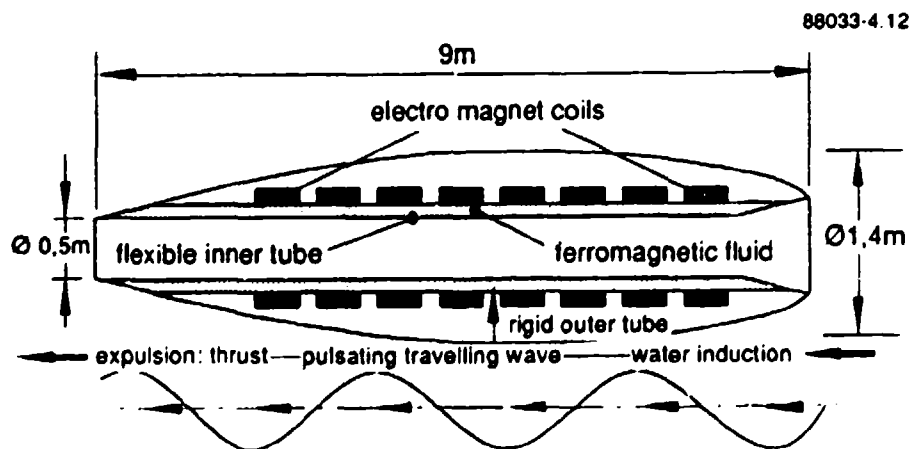
Wat er op het gebied van EM-voortstuwung in de landen van het GOS gebeurt is onduidelijk. Het vermoeden bestaat dat de onderzeeër van de Victor 3 klasse een hulpvoortstuwung hebben in de vorm van een straalbuis die op een staartvin is geplaatst [13].

4.2.2 De verschillende soorten EM voortstuwung

Globaal kunnen de verschillende systemen onderverdeeld worden in twee groepen, namelijk de groep die gebruik maakt van een AC magnetisch veld en een groep die gebruik maakt van een DC magnetisch veld.

EM-voortstuwung met behulp van een AC magnetisch veld

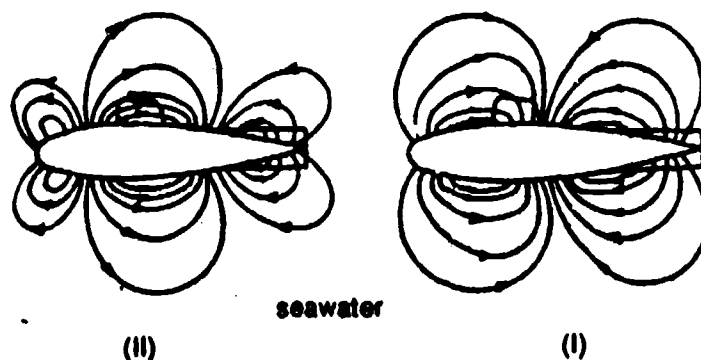
Kenmerkend voor deze groep is dat de stroom wordt opgewekt door magnetische inductie. De stroom kan binnen een straalbuis worden opgewekt of aan de buitenkant van het schip. Een voorbeeld van de eerste groep is de "ripple motor" waarvan men vermoedt dat deze wordt toegepast in de Russische Victor 3 klasse (figuur 4.12).



Figuur 4.12 De "Ripple motor"

Tussen een vaste laag en een flexibele laag bevindt zich een ferromagnetische vloeistof. Door sequentiële bekrachtiging van onderdelen van de spoel kan een peristaltische beweging worden opgewekt waardoor het zeewater wordt weggedrukt. Het grote nadeel van dit systeem is de grote complexiteit.

Een andere methode maakt gebruik van een geïnduceerde stroom buiten het schip (figuur 4.13). Het voordeel van deze methode is de grote eenvoud als direct gevolg van het ontbreken van de elektroden en de nadelen zijn het slechte rendement en de grote herkenbaarheid van het schip.

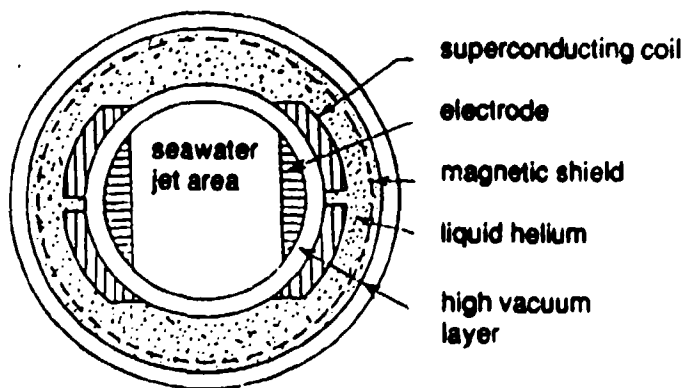


Figuur 4.13 EM-voortstuwung met een uitwendig, AC magnetisch veld.
(II) komt een vierde periode na (I)

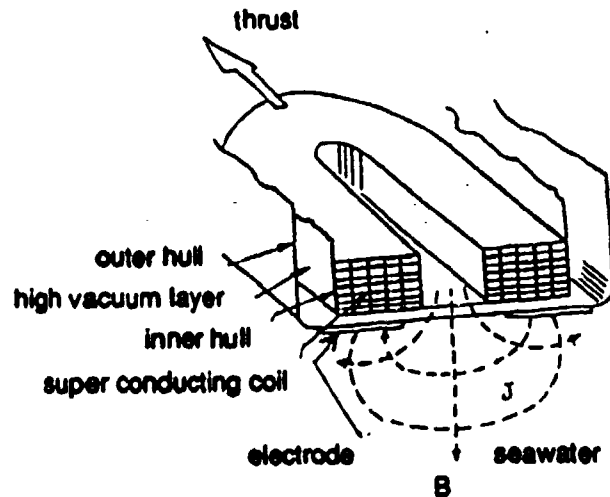
EM-voortstuwung met een D.C. magnetisch veld

Bij het gebruik van een DC magnetisch veld kan de voor de Lorentz-kracht benodigde stroom op drie manieren worden opgewekt:

- Door middel van elektroden in het zee water. Deze elektroden kunnen in een straalbuis geplaatst worden of aan de buitenkant van het schip (figuur 4.14 en figuur 4.15). Elektroden aan de buitenkant hebben het nadeel van een groot uitwendig veld dat de scheepsherkenning vergemakkelijkt en metalen voorwerpen aantrekt. Het rendement is echter over het algemeen groter dan bij elektroden die inwendig zijn geplaatst.

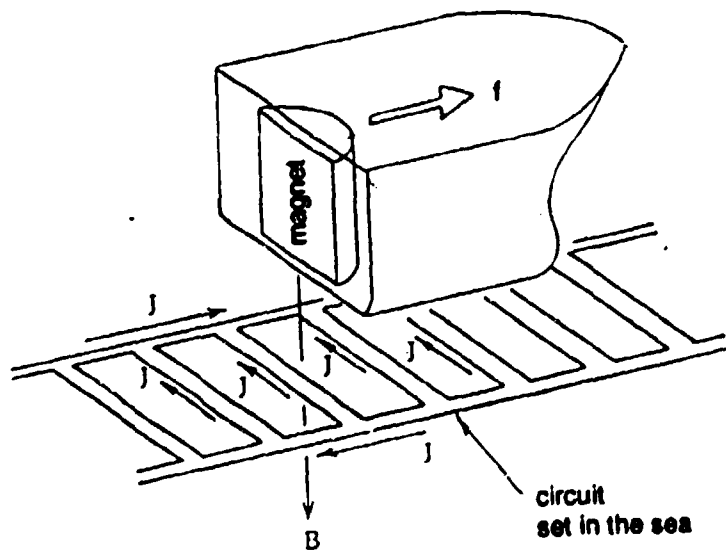


Figuur 4.14 EM-voortstuwung met een DC magnetisch veld waarbij de elektroden zich in een straalbuis bevinden.



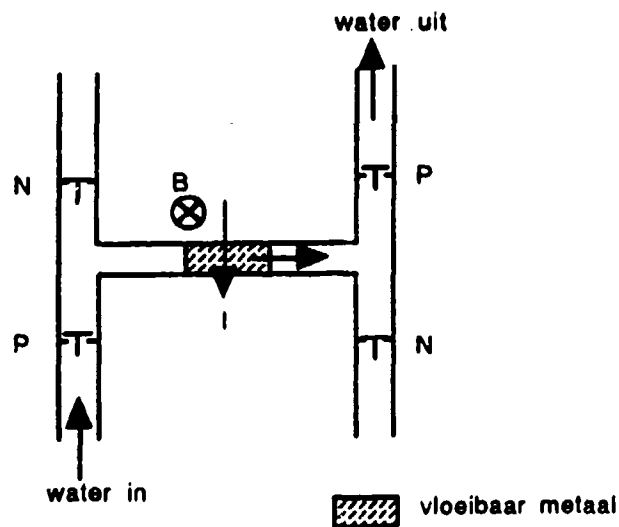
Figuur 4.15 EM-voortstuwning met een DC magnetisch veld waarbij de elektroden zich aan de buitenkant van het schip bevinden

- Voor speciale toepassingen, bijvoorbeeld voor het vervoer in een haven, kan een geleidende rail in het water worden aangelegd. In de rail wordt de benodigde stroom opgewekt. Dit is in feite de maritieme variant van de magnetische levitatietrein (figuur 4.16).



Figuur 4.16 EM-voortstuwning met een rails in het water

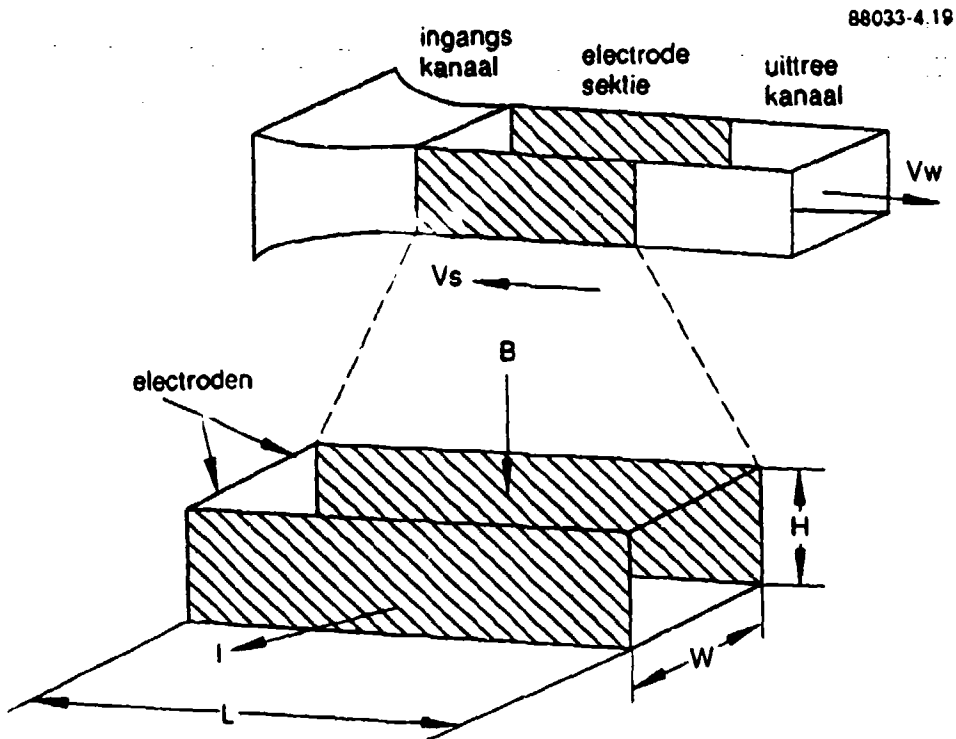
- Door gebruik te maken van vloeibaar metaal waardoor een AC stroom gevoerd wordt kan een pompwerking worden verkregen (figuur 4.18). Gedurende de positieve periode staan de kleppen P open en gedurende de negatieve periode de kleppen N. Nadeel van deze methode is dat het water vervuild wordt door het vloeibare metaal en de grotere complexiteit van dit systeem.



Figuur 4.18 EM-voortstuwing door middel van een DC magnetisch veld en een AC stroom door een vloeibaar metaal

4.2.3 EM-voortstuwing met elektroden geplaatst in een straalbuis

Omdat EM-voortstuwing van het DC type met elektroden geplaatst in een straalbuis gezien wordt als de meest veelbelovende methode zal dit systeem nader worden bekeken. In figuur 4.19 is de straalbuis schematisch weergegeven.



Figuur 4.19 Schematische weergave van een straalbuis

- met: B : magnetische inductie [T]
 W : breedte van de straalbuis [m]
 H : hoogte van de straalbuis [m]
 I : elektrodestroom [A]
 V_s : snelheid van het schip [m/s]
 V_w : snelheid waarmee het water uit de straalbuis komt [m/s]
 L : effectieve lengte van de straalbuis [m]

Op de elektroden wordt een spanningsbron U aangesloten. Als gevolg hiervan gaat er een stroom lopen door het water en wordt er onder invloed van het magnetisch veld een spanning geïnduceerd waarvoor geldt:

$$U = IR + (V_s + V_w) B W$$

$$\text{met: } R = \frac{L}{\sigma W H}$$

Hierin is σ het soortelijk geleidingsvermogen van zeewater. Voor het elektrisch toegevoerd vermogen geldt:

$$\begin{aligned} P_e &= UI \\ &= I^2 R + (V_s + V_w) B W I \\ &= P_{\text{joule}} + P_{\text{voortstuw}} \end{aligned}$$

Een gedeelte van het elektrisch vermogen wordt in het zeewater gedissipeerd (P_{joule}) en een gedeelte wordt gebruikt voor zowel de voortstuw van het schip als het water ($P_{\text{voortstuw}}$). De Lorentzkracht die op de ionen van het zeewater wordt uitgeoefend is gelijk aan de kracht die op het schip wordt uitgeoefend. Voor de wrijvingskracht uitgeoefend op een schip geldt:

$$\begin{aligned} F_{\text{schip}} &= R_s V_s^2 \\ \text{met: } R_s &= \frac{1}{2} \rho C_f S \end{aligned}$$

ρ is de soortelijke massa, C_f de wrijvingscoëfficiënt voor het schip en S het natte oppervlak. Als het schip zich eenparig voortbeweegt dan is de Lorentzkracht gelijk aan de wrijvingskracht en geldt:

$$\begin{aligned} F_{\text{lorentz}} &= F_{\text{schip}} \\ B W I &= R_s V_s^2 \\ I &= \frac{V_s^2 R_s}{B W} \end{aligned} \tag{1}$$

Beschouwen we de straalbuis als een waterpomp dan kan voor V_w geschreven worden:

$$\begin{aligned}
 V_w &= \sqrt{\frac{F_{\text{Florentz}}}{\rho W H}} \\
 &= V_s \sqrt{\frac{R_s}{\rho W H}} \\
 &= V_s \beta
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Voor het totale rendement van de voortstuwing geldt:

$$\begin{aligned}
 \eta_t &= \frac{P_{\text{schip}}}{P_{\text{elektrisch}}} \\
 &= \frac{F_{\text{schip}} V_s}{I^2 R + (V_s + V_w) B W I}
 \end{aligned}$$

en met behulp van formules (1) en (2) kan voor het rendement geschreven worden:

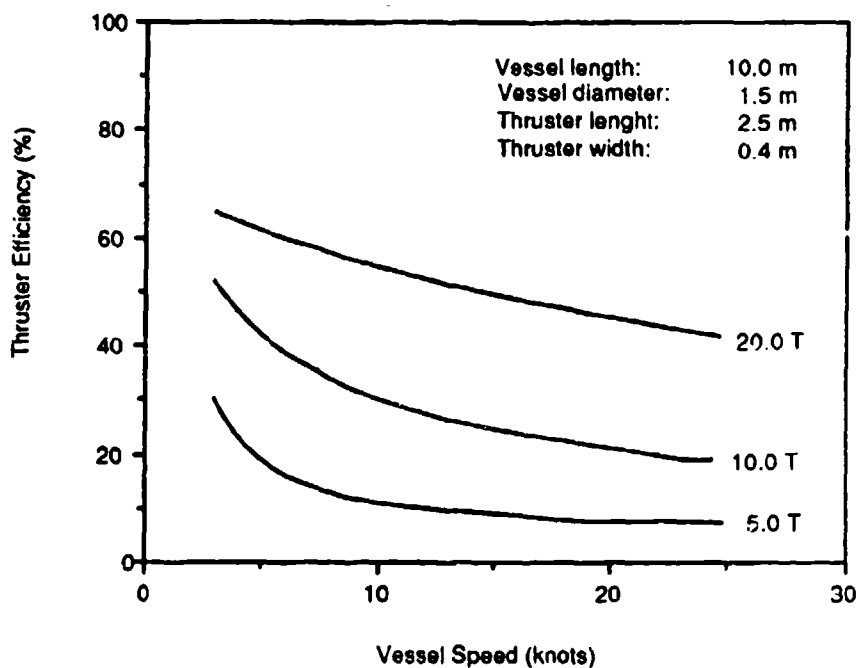
$$\eta_t = \frac{1}{1 + \beta + \frac{\rho V_s}{\sigma L B^2} \beta^2}$$

Uit deze formule blijkt dat een hoog voortstuwingsrendement verkregen kan worden door het toepassen van:

- een hoge magnetische inductie;
- een grote doorsnede van de straalbuis;
- een grote lengte van de straalbuis;
- een hoge soortelijke geleiding van het zeewater.

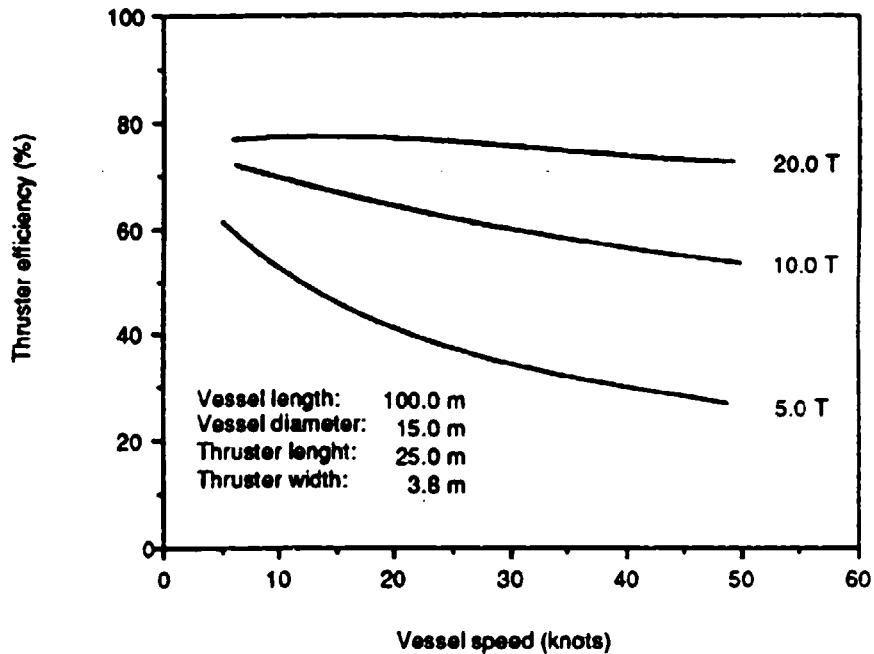
De soortelijke geleiding van water probeert men te beïnvloeden door het instromend water te ioniseren. Hoe het rendement afhangt van de snelheid van het schip, de afmetingen van het kanaal en de magnetische inductie zal worden geïllustreerd aan de hand van enige voorbeelden [14].

Figuur 4.20 laat het voortstuwingsrendement als functie van de snelheid zien voor een kleine onderzeeër. Duidelijk is dat het rendement pas interessant wordt bij een hoge magnetische inductie. Voor een voortstuwung met een schroef kan een rendement (voortstuwingsvermogen/schroefasvermogen) van 50 - 70 % gehaald worden, zodat hier alleen bij zeer lage snelheden het rendement van EM-voortstuwung vergelijkbaar is met het rendement van een voortstuwung door middel van een schroef.



Figuur 4.20 Voortstuwingsrendement als functie van de snelheid voor een klein schip

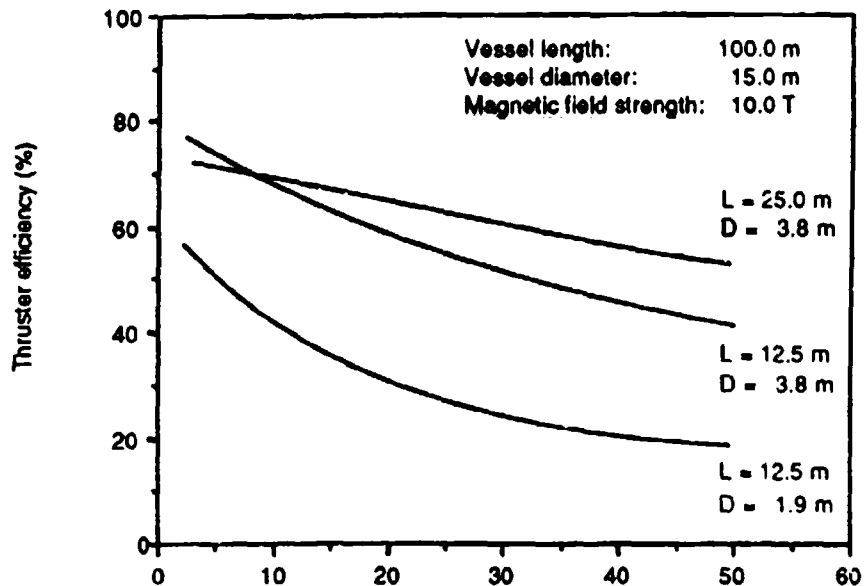
Om een idee te krijgen wat het rendement doet bij vergroting van de afmetingen is dezelfde berekening gedaan voor een onderzeeër van 100 m waarbij de afmetingen van de straalbuis evenredig vergroot zijn (figuur 4.21).



Figuur 4.21 Het voortstuwingsrendement als functie van de snelheid voor een schip van 100 m

Duidelijk is te zien dat voor grotere afmetingen en hoge inducties het voortstuwingsrendement praktisch konstant blijft. Of een magnetische inductie van 20 T voor dit volume technisch ooit haalbaar zal zijn is echter nog maar zeer de vraag.

In figuur 4.22 is te zien wat de invloed is van de afmetingen van de straalbuis op het voortstuwingsrendement voor een onderzeeër van 100 meter bij een magnetische inductie van 10T. Duidelijk is te zien dat grote afmetingen van de straalbuis noodzakelijk zijn voor een hoog rendement.



Figuur 4.22 Het voortstuwingsrendement als functie van de snelheid voor verschillende straalbuisafmetingen

Om duidelijk de invloed van de verschillende parameters te laten zien, is bij de grafieken van de figuren 4.20 t/m 4.22 uitgegaan van een voortstuwing met één straalbuis. Door het toepassen van meerdere straalbuizen kan een ontwerp gemaakt worden van een technisch beter realiseerbare voortstuwing. Zo bestaat de EM-voortstuwing van de door de Japanners gebouwde Yamato I uit twee units die ieder zijn opgebouwd uit zes straalbuizen.

4.2.4 De toekomst van elektromagnetische voortstuwing

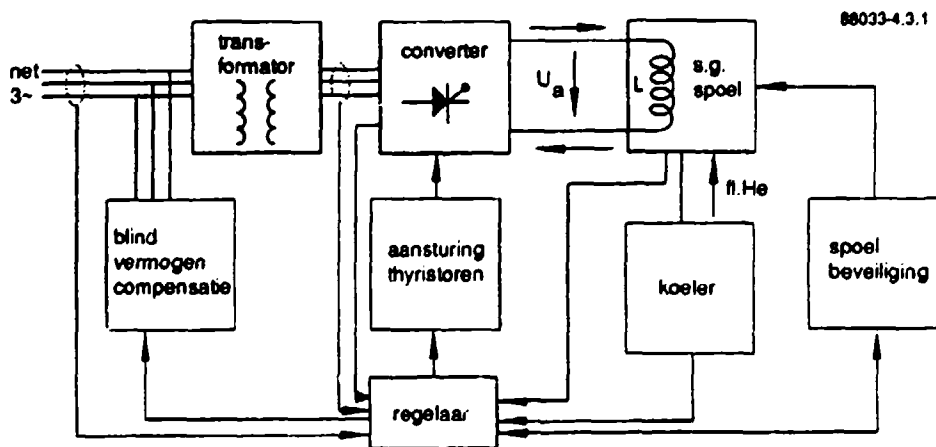
Noodzakelijk voor een brede toepassing van elektromagnetische voortstuwing is dat het voortstuwingsrendement vergelijkbaar wordt met dat van een voortstuwing met behulp van een schroef. Twee grote problemen doen zich hierbij voor: de soortelijke geleiding van zeewater is te laag en de noodzakelijk magnetische inducties (10-20T) kunnen niet gehaald worden. Zo lang deze problemen niet zijn opgelost zal de toepassing van EM-voortstuwing zich inogelijkterwijs beperken tot schepen met een bijzondere functie zoals ijsbrekers, schepen voor diepzeonderzoek en mogelijk SSC's (semi submerged catamaran). Op dit moment wordt alleen in Japan gewerkt aan EM-voortstuwing in de vorm van de Yamato I, een schip van 30 meter lang waarvan de maximale snelheid slechts

8 knopen is (bij een lage snelheid is het rendement nog acceptabel). Wat de verdere plannen zijn is niet bekend.

4.3 Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

Inductieve opslag van energie in supergeleidende spoelen is een alternatief voor het opslaan van energie voor langere periodes met als inherent voordeel dat deze energie onmiddellijk beschikbaar is als elektrische energie vanuit een bron met een zeer lage impedantie. In vergelijking met spoelen die gebruik maken van normale geleiders is het ohms verlies zeer gering maar niet verwaarloosbaar. Het verlies wordt bepaald door het wervelstroomverlies in de supergeleider en het stabilisatie materiaal, het hystereseverlies in de supergeleider en het verlies in de stroomgeleidende doorvoeren. Het vermogen van de koelinstallatie wordt bepaald door deze verliezen en door de mate van isolatie van de behuizing.

Figuur 4.3.1 laat zien hoe een SMES systeem kan zijn opgebouwd. De belangrijkste componenten hiervan zullen in de volgende hoofdstukken nader worden besproken.



Figuur 4.3.1 Een systeem voor supergeleidende inductieve energie opslag

4.3.1 De supergeleidende spoel en zijn koeling

Het ontwerp van de supergeleidende spoel van het SMES systeem hangt van vele factoren af. Om hier enig inzicht in te krijgen zal hieronder een mogelijk ontwerpalgorithm [15] worden besproken. Toepassing van deze formules levert niet direct een optimaal ontwerp maar laat duidelijk zien hoe de verschillende grootheden van elkaar afhankelijk zijn. Ter illustratie zal met deze formules een systeem worden doorgerekend.

De maximaal haalbare energiedichtheid wordt bepaald door de eigenschappen van de supergeleidende draad (maximale stroomdichtheid bij een bepaalde inductie en temperatuur) en de krachten die op de spoel worden uitgeoefend. Voor een ideale supergeleider zal uiteindelijk de op de draad uitgeoefende Lorentz-kracht de beperkende factor zijn. Voor een solenoïde is deze kracht radiaal naar buiten gericht en axiaal naar binnen. Daar de trekkracht van supergeleidend materiaal klein is zullen deze krachten moeten worden opgevangen door meegewikkelde fibers of door een omhullende constructie die deze krachten opvangt. Voor de maximale energiedichtheid kan in dit geval worden afgeleid:

$$\frac{E}{m} = \frac{\sigma}{2 d_{avg}} \quad (4.3.1)$$

met E = Opgeslagen energie [J]

m = massa van de spoel [kg]

σ = maximale treksterkte [N/m²]

d_{avg} = gemiddelde dichtheid [kg/m³]

Gaan we uit van een aluminium constructie en een supergeleidende draad met een aluminium stabilisatie dan is de maximale treksterkte 290 N/mm² en de gemiddelde dichtheid 3000 kg/m³ waarmee de maximale energiedichtheid 48 kJ/kg wordt. Rond het jaar 2000 hoopt men een maximale energiedichtheid te hebben bereikt van 80 kJ/kg (voor HTSC).

Voor een meer realistische afschatting (gezien de nu verkrijgbare supergeleiders) kan de volgende formule worden gehanteerd:

$$\frac{E}{m} = \frac{B^2}{d_{avg} k} \quad [\text{MJ/kg}] \quad (4.3.2)$$

met k = konstante die bepaald wordt door de diameter en de lengte van de spoel.

Voor spoelen < 0.3 MJ is $k=5$ en voor spoelen > 3 MJ is $k=1$.

B = magnetische inductie [T]

Voor een grote spoel (> 3 MJ), die voornamelijk opgebouwd is uit aluminium, is de dichtheid bij een magnetische inductie van 5 T, 8,3 kJ/kg.

De volumedichtheid wordt bepaald door de magnetische inductie:

$$\frac{E}{V} = \frac{B^2}{2 \mu_0 \mu_r} \quad (4.3.3)$$

met V = volume van de spoel [m³]

μ_0 = $4 \pi 10^{-7}$ [H/m]

μ_r = relatieve permeabiliteit, is 1 voor spoelen zonder magnetisch materiaal.

Als de verhouding lengte/diameter kleiner is dan ongeveer 3 dan bevindt zich een te groot gedeelte van de in het veld opgeslagen energie buiten de spoel en moet E hiervoor gecorrigeerd worden. Gegeven het volume en een keuze voor de lengte/diameter verhouding k_d kunnen de binnendiameter d_i en de lengte l_{sp} van de spoel berekend worden met:

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{8 E \mu_0 \mu_r}{\pi B^2 k_d}} \quad (4.3.4)$$

$$l_{sp} = k_d d_i \quad (4.3.5)$$

Voor een lange solenoïde kan nu het aantal windingen berekend worden met :

$$N = \frac{B l_{sp}}{\mu_0 I} \quad (4.3.6)$$

De doorsnede van de kabel kan berekend worden met:

$$A_e = \frac{I}{J_{\text{kabel}}} \quad (4.3.7)$$

met I = stroom door de spoel [A]

J_{kabel} = stroomdichtheid voor de supergeleidende kabel [A/m²]

Voor een praktische supergeleidende kabel is 100 A/mm² een realistische waarde.

Voor de dikte d_w van de wikkeling geldt nu:

$$d_w = \frac{N A_e}{l_{sp}} \quad (4.3.8)$$

Waarmee de buitendiameter d_u wordt:

$$d_u = d_j + 2 d_w \quad (4.3.9)$$

en het volume van de kabel (supergeleidend draad + stabilisator):

$$V_{\text{kabel}} = \frac{\pi (d_u + d_j) d_w l_{sp}}{2} \quad (4.3.10)$$

Rond de spoel bevindt zich een vat met cryogene vloeistof van de volgende afmetingen:

$$d_{\text{vat}} = d_u + 0,1 \quad (4.3.10)$$

$$L_{\text{vat}} = l_{sp} + 0,30 \quad (4.3.11)$$

Als gevolg van het veranderlijk magnetisch veld tijdens het laden en het ontladen van de spoel zal er hystereseverlies en wervelstroomverlies optreden in de supergeleidende draad.

Het volume aan supergeleidend draad, V_{draad} , kan berekend worden met:

$$V_{\text{draad}} = \frac{V_{\text{kabel}} J_{\text{kabel}}}{J_{\text{draad}}}$$

met J_{draad} = stroomdichtheid van de dunne supergeleidende draadjes

Voor het hystereseverlies per keer laden of ontladen (dus per halve periode) geldt:

$$Q_{\text{hyst}} = \frac{\Delta B J_c d_{\text{draad}} V_{\text{draad}}}{4} \quad [\text{J}] \quad (4.3.12)$$

met J_c = kritische stroomdichtheid van de supergeleider

d_{draad} = diameter van supergeleidende draden (1 tot 25 μm)

$$P_{\text{hyst}} = 2 Q_{\text{hyst}} f_{\text{laad}} \quad (4.3.13)$$

met f_{laad} = herhalingsfrequentie van het laad/ontlaadproces

Het wervelstroomverlies per laad/ontlaad cyclus is :

$$Q_{\text{werv}} = \frac{3 \pi d_{\text{kabel}}^2 \Delta B \frac{dB}{dt} V_{\text{draad}}}{\rho_r D} \quad (4.3.14)$$

met d_{kabel} = diameter van de kabel

ρ_r = soortelijke weerstand van de afscherming van de stabilisator (ongeveer $10^{-7} \Omega\text{m}$)

D = Geometrie bepaalde factor (0,148 max.)

$$P_{\text{werv}} = Q_{\text{werv}} f_{\text{laad}} \quad (4.3.15)$$

Naast deze verliezen is de warmtestroom van buiten af bepalend voor het noodzakelijke koelproces. Om de warmtestroom door de wand tot een minimum te beperken wordt het vat in vacuum geplaatst en wordt de warmtestraling zo laag mogelijk gehouden door het aanbrengen van stralingsschermen van bijvoorbeeld mylar met een aluminium coating. De hoeveelheid warmte die door straling naar binnen komt kan voor lage temperaturen (tot 100K) worden afgeschat met:

$$P_s = \frac{18,9 S_{vat}}{N} \quad (4.3.16)$$

met N = aantal lagen isolatie

S_{vat} = Buitenoppervlak van het vat

Ook vindt er warmtetransport plaats van de stroomdoorvoeren die veroorzaakt wordt door de Ohmse verliezen in de aansluitingen en door de warmtegeleiding van buiten naar binnen via deze doorvoeren. Daar de doorvoeren sterk afhankelijk zijn van de manier van het laden en ontladen van de spoel wordt hier niet nader op ingegaan.

Voor het totale verlies geldt:

$$P_{verlies} = P_{hys} + P_{werv} + P_s \quad (4.3.17)$$

Het vermogen van de koelinstallatie wordt bepaald door dit verlies en door de temperatuur van het cryogene middel :

$$P_{koel} = \frac{P_{verlies} (T_a - T_o)}{T_o \eta_r} \quad (4.3.18)$$

met η_r = thermisch en mechanisch rendement van de compressor

T_a = omgevingstemperatuur

T_o = temperatuur van het cryogene middel

Voor het volume en het gewicht geldt bij benadering:

$$m_{\text{koel}} = 60 (P_{\text{verlies}})^{0,7} \quad (4.3.20)$$

$$V_{\text{koel}} = 0,055 (P_{\text{verlies}})^{0,85} \quad (4.3.21)$$

Met behulp van bovenstaande formules zal een supergeleidende spoel worden uitgerekend. Het betreft hier een spoel die een onderdeel vormt van een gepulste energiebron. De spoel wordt 10 keer per minuut voor 10% (10 MJ) ontladen, waarbij de ontladtijd 3 ms is.

| | | |
|---|--------------------|------------------------|
| Opgeslagen energie | E | 100 MJ |
| Ontlaad energie per puls | E_{puls} | 10 MJ |
| Stroom | I | 1MA |
| Induktantie | L | 200 μH |
| Induktie | B | 5 T |
| Bedrijfstemperatuur | T_0 | 13 K |
| Omgevingstemperatuur | T_a | 300 K |
| Verhouding lengte/diameter | k_d | 3 |
| Diameter van het supergeleidend draad | d_{draad} | 5 μm |
| Diameter kabel | d_{kabel} | 0,5 mm |
| Kritische stroomdichtheid van het SC draad | J_c | 1200 A/mm ² |
| Toegepaste stroomdichtheid van het SC draad | J_{draad} | 1000 A/mm ² |
| Stroomdichtheid van de kabel | J_{kabel} | 100 A/mm ² |
| Mech. en thermisch rend. compressor | η_r | 0,13 |
| | | |
| Massa van de geleider en versteviging | m | 12.000 kg |
| Volume van de spoel | V | 10 m ³ |
| Binnendiameter | d_i | 1,62 m |
| Lengte van de spoel | l_{sp} | 4,87 m |
| Aantal windingen | N | 19 |
| Doorsnede van de geleider | A_e | 10.000 mm ² |
| Dikte van de wikkeling | d_w | 40 mm |
| Buiten diameter | d_u | 1,7 m |
| Volume aan supergeleidende kabel | V_{kabel} | 1 m ³ |
| Diameter van het vat | d_{vat} | 1,8 m |
| Lengte van het vat | l_{vat} | 5,17 m |

| | | | |
|--|----------------------|------|--------------|
| Buitenoppervlak vat | S_{vat} | 34 | m^2 |
| Volume aan supergeleidend draad | V_{draad} | 0,1 | m^3 |
| Afname inductie in 1 puls | ΔB | 0,26 | T |
| Hystereseverlies per keer laden of ontladen | Q_{hyst} | 39 | J |
| Hystereseverlies bij 10 x laden/ontladen in 60 sec | P_{hyst} | 13 | W |
| Wervelstroomverlies bij een ontladitijd van 3 ms | Q_{werv} | 359 | J |
| Wervelstroomverlies bij 10 ontladingen in 60 sec | P_{werv} | 60 | W |
| Verlies door warmtestroom door isolatie (N=30) | P_s | 31 | W |
| Totaal verlies | P_{verlies} | 104 | W |
| Benodigd koelvermogen | P_{koel} | 17,6 | kW |
| Massa van de koelmachine | m_{koel} | 1545 | kg |
| Volume van de koelmachine | V_{koel} | 2,8 | m^3 |

Voor de berekening van het gewicht is uitgegaan van een energiedichtheid van 8,3 kJ/kg. Als uitgegaan wordt van 80 kJ/kg (energiedichtheid rond het jaar 2000) dan wordt het gewicht van de 100 MJ spoel 1250 kg.

Voor toepassingen waarbij de spoel in enkele ms geheel of gedeeltelijk wordt ontladen is het wervelstroomverlies bepalend voor het benodigde koelvermogen. Dit wervelstroomverlies is direct afhankelijk van de dB/dt en ΔB (formule 4.3.14) en dus van de hoeveelheid energie die per puls wordt onttrokken in relatie tot de totale opgeslagen energie. Uit bovenstaande formules kan worden afgeleid dat het voordelig is om meer energie op te slaan dan voor één puls noodzakelijk is, de spoel is dan groter en zwaarder maar het koelvermogen en daarmee het koelvolume en het koelgewicht zal beduidend kleiner zijn. Wat het optimale ontwerp is hangt sterk af van de toepassing.

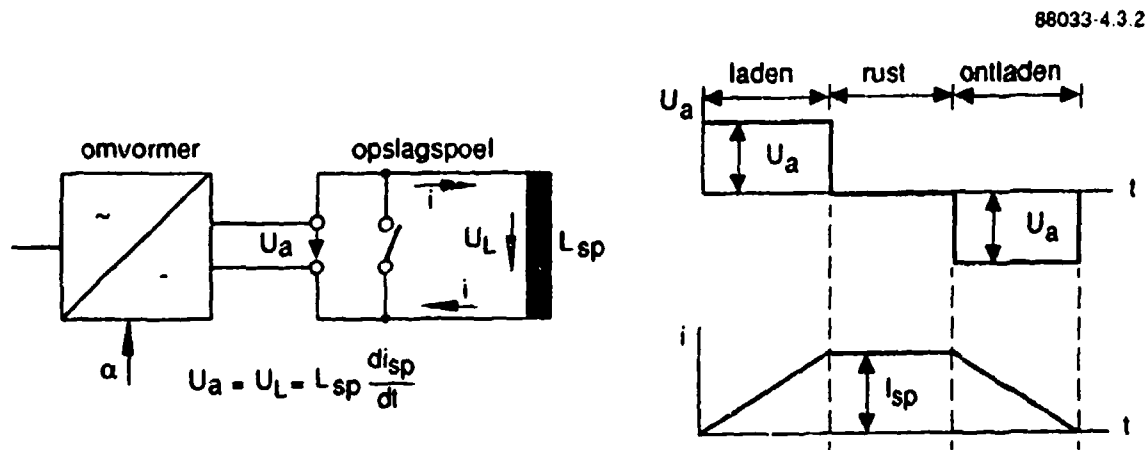
Over de wervelstroom en hystereseverliezen van hoge-temperatuur supergeleiders is nog weinig bekend. Uit formule 4.3.18 blijkt wel dat bij het gebruik van vloeibaar stikstof als cryogene middel ($T_0 = 77\text{K}$) het benodigd koelvermogen (dus ook het volume en gewicht van de koelinstallatie) aanmerkelijk lager zal zijn.

De verwachte maximale energiedichtheid voor een supergeleidende spoel is 80 kJ/kg. Vergelijken we dit met andere vormen van energieopslag, dan scoort alleen de bipolaire batterij hoger (150 kJ/kg). Daar staat tegenover dat de vermogensdichtheid, noodzakelijk voor korte stroompulsen, van een spoel beter is dan die van de bipolaire batterij. Om de vraag te beantwoorden wanneer welke vorm(en) van energieopslag moet worden gebruikt aan boord van schepen en op welke manier de

interface naar het boordnet moet worden gerealiseerd, is een nadere studie van de toepassing noodzakelijk.

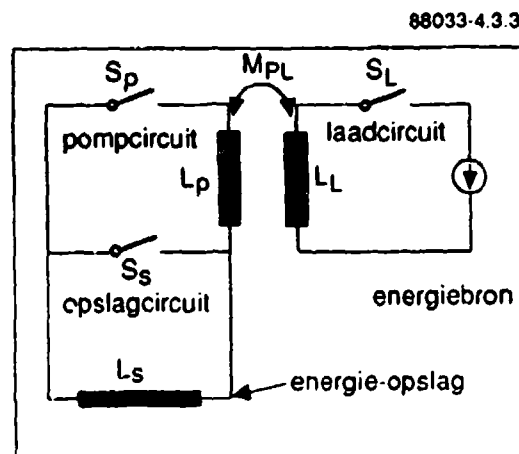
4.3.2 Laden/ontladen

Het laden en het ontladen van de opslagspoel kan gedaan worden door deze direkt aan te sluiten op een spanningsbron waarbij de voeding in staat moet zijn de volledige laadstroom te voeren (figuur 4.3.2)



Figuur 4.3.2 Het laden en ontladen van een opslagspoel door een direkte aansluiting van een spanningsbron

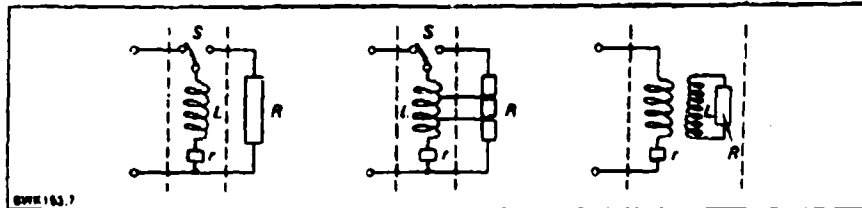
Een andere methode maakt gebruik van de fluxpomp waarbij eerst een inductor wordt opgeladen door een bepaalde stroom, om daarna deze energie af te geven aan de supergeleidende opslagspoel. (figuur 4.3.3).



Figuur 4.3.3 Het laden en ontladen door middel van een fluxpomp

4.3.3 Beveiliging

Als van een supergeleidende spoel het draad plotseling normaal geleidend wordt dan zal de energie moeten worden afgevoerd. Dit kan worden gedaan door het aanbrengen van een weerstand buiten het supergeleidende vat, parallel over de spoel of door het opnemen van een parallelle wikkeling die wordt afgesloten door een weerstand waarin de energie wordt gedissipeerd (figuur 4.3.3).



Figuur 4.3.4 Beveiliging van een supergeleidende spoel

4.4 Magnetische afscherming

Met behulp van supergeleidende materialen is het mogelijk om een afscherming te realiseren die licht is en weinig volume inneemt. Twee belangrijke eigenschappen van supergeleiders namelijk de zeer grote soortelijke geleiding en het feit dat een magnetisch veld niet in een supergeleider kan doordringen (Meissner effect), zijn verantwoordelijke voor de goede afschermende werking van supergeleiders. Aan de hand van de wet van Ohm en de tweede wet van Maxwell is dit snel in te zien:

$$J = \sigma E$$

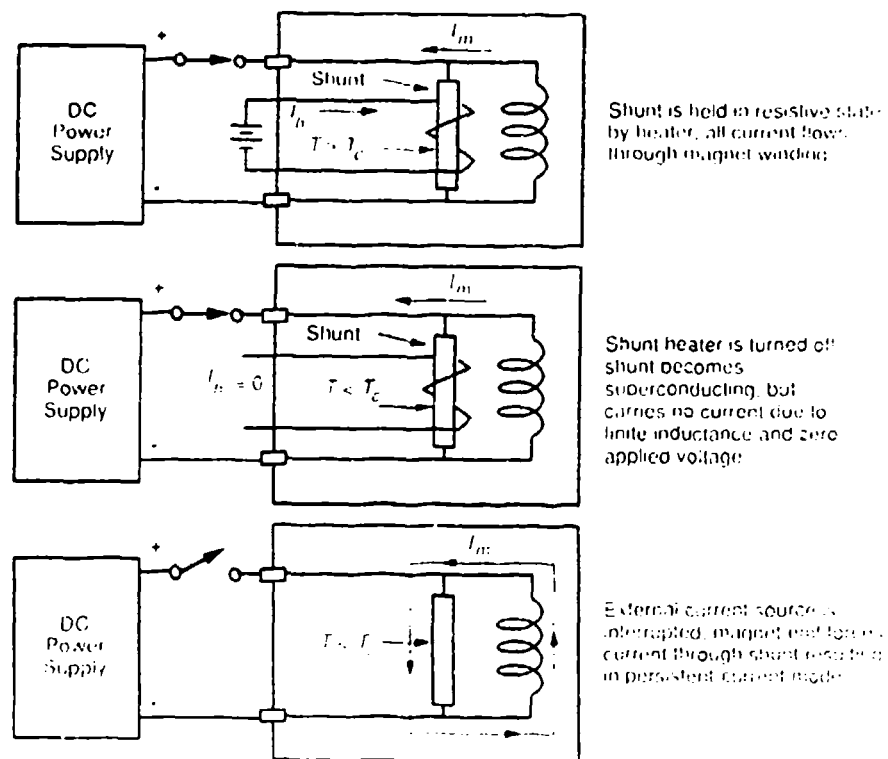
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Daar de soortelijke geleiding zeer groot is moet E zeer klein zijn en zal de verandering in de tijd van het magnetisch veld zeer klein zijn. Wordt een supergeleider in een veranderend magnetisch veld geplaatst dan zullen er aan het oppervlak van de supergeleider stromen ontstaan die een tegengesteld veld creëren waardoor het veld niet in de supergeleider kan doordringen. Beperkingen van een supergeleidende afscherming worden gevormd door de kritische veldstreekte H_c en de verliezen in een supergeleider bij hogere frequenties (afname soortelijke geleiding). Supergeleidende afscherming wordt dan ook vooral gebruikt bij laag frequente en DC velden bijvoorbeeld bij spoelen ten behoeve

van NMR waarbij de supergeleider een dikke omhulling van ijzer overbodig maakt. Ook bij motoren en generatoren kan supergeleidende afscherming zorgen voor gewicht en volume besparing.

4.5 Supergeleidende schakelaars

Een supergeleidende schakelaar kan op drie verschillende manieren worden gerealiseerd namelijk door het plaatselijk verhitten van de draad, door het aanbrengen van een magnetisch veld dat groter is dan de kritische veldsterkte of door plaatselijk de maximale stroomsterkte te overschrijden. In alle drie de gevallen zal de weerstand van het stukje draad met een paar ordes toenemen. Daar de schakelaar weer voldoende moet zijn afgekoeld om opnieuw supergeleidend te worden, is de supergeleidende schakelaar niet snel (hersteltijd is ongeveer 150 ms [16]). Figuur 4.5.1 laat een voorbeeld zien waarbij een supergeleidende schakelaar wordt gebruikt ten behoeve van het opslaan van magnetische energie. Bij deze toepassing is de weerstand van de schakelaar bepalend voor de periode waarover de energie kan worden opgeslagen en heeft een supergeleidende schakelaar dus grote voordelen.

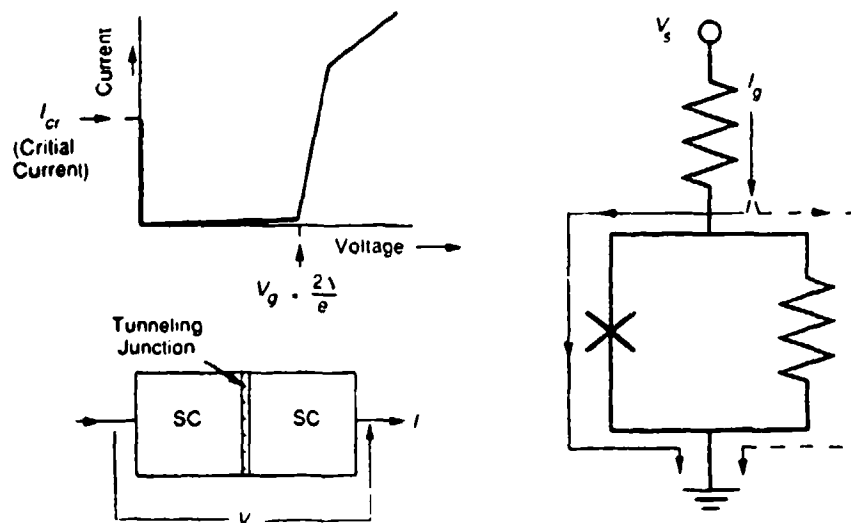


Figuur 4.5.1 Toepassing van een thermisch gestuurde supergeleidende schakelaar

4.6 Elektronische componenten en sensoren

In militaire en ruimtevaart toepassingen worden aan elektronische componenten zeer zware eisen gesteld met betrekking tot betrouwbaarheid en prestatie. In dit marktsegment waar techniek een grote rol speelt, kunnen supergeleidende componenten een belangrijke rol spelen op het gebied van sensoren, signaalverwerking en dataprocesing. De grote invloed van supergeleiders op de elektronica is gebaseerd op enkele unieke eigenschappen die het volgende mogelijk maken:

- Transmissie-lijnen en filters met een zeer laag verlies/dispersie.
- Zeer snelle componenten met een laag ruisniveau en een lage dissipatie gebaseerd op de zogenaamd Josephson junctie. Een Josephson junctie kan bestaan uit twee lagen supergeleidend materiaal gescheiden door een zeer dun laagje isolatie materiaal (figuur 4.6.1).



Figuur 4.6.1 Een Josephson junctie

Als de stroom door deze junctie groter wordt dan de kritische waarde J_c dan zal de spanning snel toenemen. Als gevolg hiervan gaat er stroom lopen door een weerstand parallel aan de Josephson junctie. Door combinatie van deze elementen en het optellen van stromen kunnen logische schakelingen worden gebouwd die schakelen in enkele picoseconden. Dit wordt bovendien

gecombineerd met een zeer lage dissipatie (dit is voor de huidige computers een beperkende factor).

- Van de bovengenoemde Josephson junctie wordt gebruik gemaakt in Superconducting quantum interference devices (SQUID's). Hierbij wordt door een magnetisch veld in de junctie een stroom opgewekt waardoor de spanning stijgt. Deze wordt gedetecteerd, verwerkt en er wordt een compensatie stroom door de junctie gestuurd. Op deze manier kunnen magnetische velden tot 10^{-14} T worden gemeten.
- Monolitische geïntegreerde circuits voor zowel analoge als digitale componenten. Hierdoor kunnen bijvoorbeeld de gevoeligheid en dissipatie van IR, microgolf en millimetergolf sensoren sterk worden verbeterd.

5 VOORBEELDEN VAN SCHEPEN MET EEN SUPERGELEIDENDE VOORTSTUWING

Bijna alle ontwikkelingen van schepen met een supergeleidende voortstuwing komen niet verder dan het ontwerpstadium. Voor zover bekend zijn slechts enkele kleinere schepen gebouwd of worden gebouwd om een supergeleidende voortstuwing uit te testen, zoals de Jupiter II van het NSDRC en de Yamato I van het japanse JAFS. Supergeleiding kan op twee manieren worden toegepast in een elektrische voortstuwing namelijk door gebruik te maken van supergeleidende motoren en generatoren of in de vorm van een EM-voortstuwing. In hoofdstuk 5.1 zal de ombouw van een DD963 Spruance Class Destroyer met een conventionele voortstuwing naar een elektrische supergeleidende voortstuwing als voorbeeld van de eerste manier worden besproken [17] en in hoofdstuk 5.2 zal de Yamato I als voorbeeld van de tweede manier worden behandeld.

5.1 Elektrische voortstuwing met een supergeleidende generator en motor

De eerste DD963 Spruance Class Destroyer werd in 1970 door de US Navy in gebruik genomen. In het totaal zijn er 31 van deze schepen gebouwd. Het schip is 170 meter lang en heeft een waterverplaatsing van 7900 ton. De taak van deze schepen is het volgen en bestrijden van onderzeeboten. De mechanische voortstuwing bestaat uit twee CRP schroeven die beiden direkt door twee LM2500 gasturbines worden aangedreven. De vier LM2500's kunnen samen maximaal 60 MW leveren. Voor het servicenet zijn bovendien nog drie 2 MW gasturbines aanwezig.

Het ontwerp van de elektrische voortstuwing gaat uit van drie LM2500's van ieder 20 MW en twee 2 MW gasturbines voor het servicenet (een deel van het benodigde vermogen wordt door de voortstuwingsgeneratoren geleverd). Voor de voortstuwing wordt uitgegaan van supergeleidende AC generatoren en supergeleidende DC motoren. Alle generatoren kunnen voor de voortstuwing en het servicenet gelijktijdig of apart gebruikt worden. Gekozen is voor een vaste schroef.

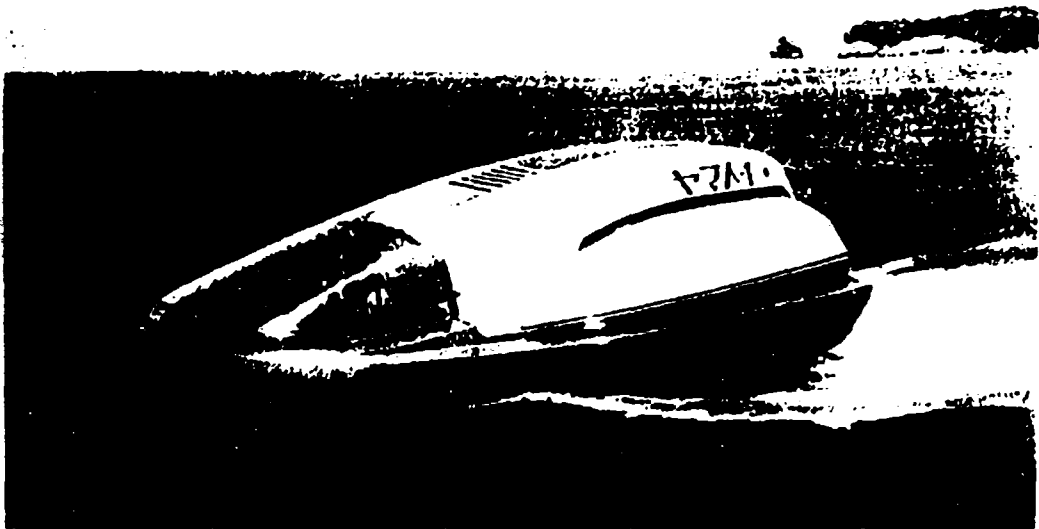
Vergelijking van de mechanische aandrijving en de supergeleidende elektrische aandrijving levert het volgende op:

- De totale kosten van de ombouw zijn \$118 miljoen. Daar staat tegenover een besparing van \$11,9 miljoen (over 20 jaar) aan brandstofkosten dankzij een 3% hoger rendement.
- Door het wegvallen van één LM2500 en een gasturbine voor het servicenet is er 446 m² dekruimte vrijgekomen die bijvoorbeeld gebruikt kan worden voor elektrische wapens, extra brandstof etc.
- Tijdens kruisvaart is er 55 MW beschikbaar voor andere doeleinden, bijvoorbeeld elektrische wapens, uitgebreide sonar.
- Als de turbines in deellast gebruikt worden neemt het rendement al snel af. Bij een elektrische voortstuwing kan optimaler gebruik gemaakt worden van deze turbines. Zo zal bij een snelheid van 20 knopen het brandstofgebruik 22 % lager zijn waardoor de actieradius aanmerkelijk wordt vergroot. Deze besparing is uiteraard belangrijker naarmate er meer met lagere snelheden wordt gevaren.
- De elektrische voortstuwing zal beduidend stiller zijn.
- De maximale snelheid zal dankzij de kleinere waterverplaatsing (-2,5%) en de efficiëntere schroef (+ 2,5%) iets hoger zijn.

De meeste van deze voordelen zijn niet inherent aan een supergeleidende voortstuwing maar aan een elektrische voortstuwing in het algemeen. De voordelen van een supergeleidende voortstuwing komen pas goed naar voren als een "podded constructie" wordt overwogen. Hiervoor is de kleine doorsnede en het lage gewicht van essentieel belang. Geschatte brandstofbesparingen van 11% worden voor deze uitvoering gerapporteerd [18].

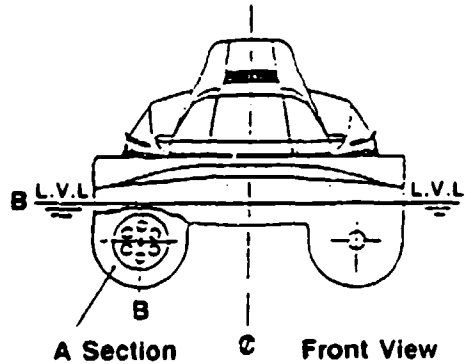
5.2 EM-voortstuwing

Op het gebied van EM-voortstuwing vindt de voornaamste ontwikkeling plaats in Japan. Hier heeft de Japan Foundation For Shipbuilding Advancement een werkgroep ingesteld die als taak heeft een schip te ontwikkelen en te bouwen met EM-voortstuwing. Dit schip, de Yamato I, wordt gebouwd door Mitsubishi Heavy Industries Co. Ltd. en zal 30 meter lang en 10 meter breed zijn en een diepgang van 2,5 meter (figuur 5.1) hebben [12].

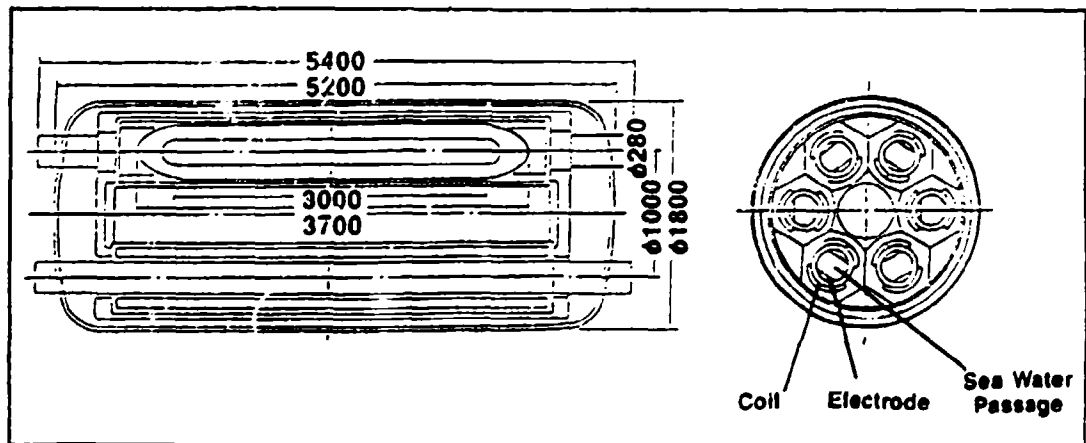


Figuur 5.1 De Yamato I, een schip met EM-voortstuwing

Voor de EM-voortstuwing is gekozen voor het systeem met een straalbuis (zie hoofdstuk 4.2.3). Om een acceptabel rendement te halen moet de doorsnede van de straalbuis groot zijn en de magnetische inductie hoog (bijvoorbeeld hoger dan 10 T). Deze grote doorsnede kan ook verwezenlijkt worden door het toepassen van meerdere straalbuizen, waarvoor bij de Yamato I is gekozen. Hier bestaat de voortstuwing uit twee units die ieder samengesteld zijn uit zes straalbuizen (figuur 5.2 en 5.3)

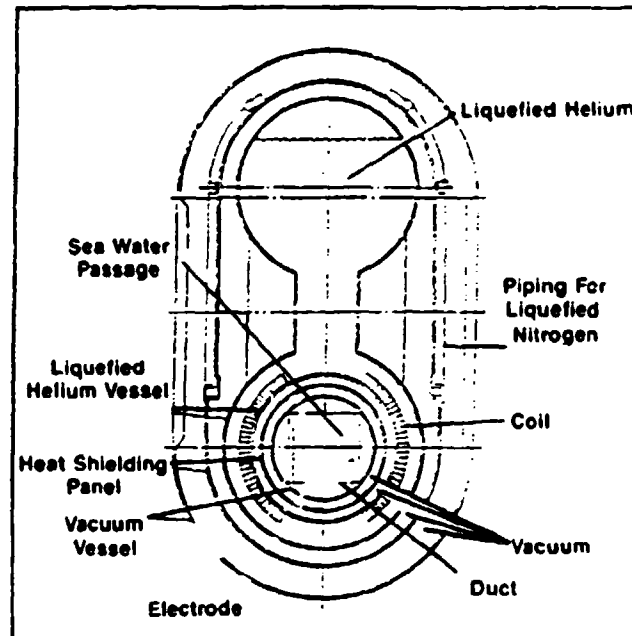


Figuur 5.2 Doorsnede van de Yamato I waarin beide voortstuwingsunits te zien zijn



Figuur 5.3 Afmetingen van een voortstuwingsunit

De magneten worden met vloeibaar helium van 4K gekoeld. Het heliumvat wordt geïsoleerd door een hitteschild, vacuum en door een tussenlaag die met stikstof wordt gekoeld (figuur 5.4)



Figuur 5.4 Het koelsysteem dat voor de supergeleidende magneten van de Yamato I wordt gebruikt

De elektrodestroom van een straalbuis is 2000 A bij 150 V, waarmee het totale vermogen voor het voeren van stroom door zeewater 3,6 MW is. Dit vermogen wordt geleverd door twee MTU Model 16V 396 TB54 diesel generatoren van ieder 2030 kW. Duidelijk blijkt hieruit dat slechts een klein deel van het totale vermogen voor de supergeleidende magneten wordt gebruikt en dat de geleidbaarheid van zeewater een beperkende factor is voor de technologie in deze vorm.

De nagestreefde maximale snelheid van de Yamato I is acht knopen. Waarschijnlijk was de keuze voor deze toch wel lage snelheid noodzakelijk in verband met het slechte rendement bij hoge snelheden (zie hoofdstuk 4).

De eerste tests worden begin 1992 uitgevoerd. De eerste resultaten zullen binnenkort worden gepubliceerd.

6 TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN

De komst van de hoge-temperatuur supergeleiders heeft de ontwikkeling van lage-temperatuur supergeleiders opnieuw in de belangstelling geplaatst. Aan de lage-temperatuur supergeleider zelf wordt weinig onderzoek meer gedaan; de inspanning richt zich voornamelijk op het verbeteren van de kabel zodat een zo laag mogelijk AC verlies wordt verkregen bij een zo'n groot mogelijke stabiliteit (mogelijkheid om te herstellen nadat de supergeleider plaatselijk normaal geleidend is geworden).

Naast de ontwikkeling van toepassingen op het gebied van de elektronica wordt naarstig gezocht naar een methode om de hoge-temperatuur supergeleiders geschikt te maken voor vermogenstoepassingen ($J > 1000 \text{ A/mm}^2$ bij een magnetische inductie $> 6 \text{ T}$). Het anisotrope karakter voor stroom in verschillende richtingen door het materiaal, de slechte mechanische eigenschappen en de snelle degradatie als gevolg van de inwerking van vocht, zuurstof en kooldioxide zijn de niet geringe problemen die overwonnen moeten worden.

Op het gebied van de supergeleidende elektrische machines zal vooral gewerkt worden aan volledig supergeleidende AC generatoren. Hier gaat men in eerste instantie uit van lage-temperatuur supergeleiders met een gering AC verlies en wordt geen rekening gehouden met hoge-temperatuur supergeleiders. De ontwikkeling van homopolaire machines is bijna gestopt door enerzijds het geringe voordeel ten opzichte van watergekoelde machines en anderzijds door borstelproblemen waarvoor ondanks grote inspanningen geen betrouwbare en betaalbare oplossingen gevonden zijn.

De toekomstige ontwikkelingen op het gebied van elektromagnetische voortstuwing zullen voornamelijk in Japan plaatsvinden. Afhankelijk van de resultaten met de Yamato I zullen nieuwe plannen worden gemaakt.

De ontwikkeling van supergeleidende magnetische opslag vindt vooral plaats ten behoeve van de energie voorziening voor het kernfusieonderzoek en voor een deel als opslag voor energienetten om hieruit piekbelastingen te kunnen voeden. In Japan worden plannen gemaakt voor een opslag eenheid van $1,8 \cdot 10^7 \text{ MJ}$ voor het jaar 2000.

7 CONCLUSIES

Supergeleidende machines

Door het toepassen van supergeleiders is het mogelijk machines te ontwerpen waarbij de maximale waarde van de magnetische inductie niet meer beperkt wordt door het ijzerpakket (2T). Bovendien is er door het ontbreken van het ijzerpakket meer ruimte over voor de stroombelegging. Het resultaat hiervan is dat supergeleidende machines kleiner en lichter zijn en dat het rendement hoger is.

Op het gebied van de generatoren richt men zich vooral op AC generatoren voor het landelijk elektriciteitsnet. Het hogere rendement (0,5-1%) is hier de doorslaggevende factor. De meeste ontwikkelingen beperken zich tot de veldwikkeling (gering AC verlies). Als zowel de stator als de rotor supergeleidend worden uitgevoerd kan de constructie aanmerkelijk worden vereenvoudigd. Voor generatoren onder de 100 MW wegen de kosten, verbonden aan de grotere complexiteit vooralsnog niet op tegen de besparingen als gevolg van het hogere rendement en de reductie van volume en gewicht (50%). De komst van hoge-temperatuur supergeleiders kan hierin verandering brengen.

De ontwikkeling van homopolaire machines is nagenoeg gestopt. Voor een belangrijk deel is dit veroorzaakt door de problemen met de borstels (zeer hoge stromen). Ten opzichte van bijvoorbeeld watergekoelde machines wegen de voordelen (rendement, volume, geluid, eenvoudige regeling) onvoldoende op tegen de nadelen (prijs, complexiteit borstels) om de supergeleidende homopolaire machine commercieel interessant te doen zijn. In dit verband zou onderzocht moeten worden hoe groot de voordelen zijn van het plaatsen van de motor in een druppelvormige constructie onder het schip waarbij het volume van de motor van doorslaggevend belang kan zijn.

Een DC motor voor voortstuwing heeft als voordeel dat het aanvangskoppel hoog is, de toerenregeling eenvoudig is en dat de er weinig geluid via de schroefas wordt geproduceerd. Naast homopolaire machines zijn daarom borstelloze DC machines van belang. De veldwikkeling kan met permanent magneten worden uitgevoerd of als een supergeleidende "trapped flux" wikkeling.

Elektromagnetische voortstuwing

Voor de meeste vormen van elektromagnetische voortstuwing is de slechte geleiding van zeewater de oorzaak van een laag rendement. Het rendement van deze systemen kan verbeterd worden door het toepassen van een hoge magnetische inductie of door het voor-ioniseren van het zeewater. Een hoge magnetische inductie kan alleen met supergeleidende magneten worden opgewekt, maar het vereiste volume van de straalbuizen om een hoge snelheid te kunnen realiseren is technisch (nog) niet haalbaar. Voor lage snelheden is het rendement aanmerkelijk beter zodat speciale toepassingen zoals sluipvaart bij onderzeeboten en schepen voor onderzeebootbestrijding, ijsbrekers en schepen voor diepzeedonderzoek (geen kwetsbare doorvoer voor schroefas) voor de hand liggen. Bij deze schepen komen de voordelen van elektromagnetische voortstuwing zoals een geringe herkenbaarheid en het ontbreken van een kwetsbare schroef en roer duidelijk tot z'n recht.

Algemeen wordt gesteld dat de herkenbaarheid van een schip als gevolg van het ontbreken van cavitatie gering zal zijn. Hierbij moet wel worden aangetekend dat dan wel speciale maatregelen moeten worden genomen om het strooiveld van de magnetische spoelen zo klein mogelijk te doen zijn en om de herkenbaarheid van het schip door de ontwikkeling van gas aan de elektroden te voorkomen.

Niet onderzocht is of gepulst bedrijf van de spoelen een hoger rendement oplevert dan continu bedrijf. Het voordeel hiervan zou kunnen zijn dat gedurende korte tijd een zeer hoge magnetische inductie wordt opgewekt waarbij het rendement hoog is.

Vanwege de grote complexiteit is nog weinig onderzoek gedaan aan systemen die gebruik maken van een peristaltische voortstuwing aan de binnenkant van een straalbuis, opgewekt door gepulste magneten. Hoewel hier weinig over bekend is mag men verwachten dat het rendement van deze methode hoger zal zijn dan van systemen waarbij een stroom door zeewater wordt geleid en zal door het ontbreken van elektroden gasvorming niet optreden.

SMES

Magnetische opslag van energie in supergeleidende spoelen is een schone opslag in een vorm die in veel gevallen direkt bruikbaar is. De verwachte maximale toekomstige (2000) energiedichtheid voor hoge-temperatuur supergeleiders is 80 kJ/kg. Vergelijken we dit met andere vormen van energieopslag (condensatoren, kinetische opslag etc.) dan is alleen de energiedichtheid van batterijen

hoger (150-450 kJ/kg). Daar staat tegenover dat de vermogensdichtheid van een supergeleidende spoel vele malen groter is dan die van een batterij, hetgeen belangrijk is bij onder andere gepulste energiebronnen en elektrische tractie waarbij gedurende het optrekken en afremmen hoge stromen noodzakelijk zijn. SMES zal waarschijnlijk daar ingezet gaan worden waar vermogensdichtheid en levensduur van het opslagmedium de belangrijkste factoren zijn.

Supergeleidende schakelaars

Een voorwaarde voor het langdurig opslaan van magnetische energie is een schakelaar met bijzonder weinig verlies, die in staat is grote DC stromen te onderbreken. Hiervoor lijkt de supergeleidende schakelaar de meest aangewezen oplossing. Veel studie zal nog moeten worden verricht naar de manier van aansturen (Thermisch, magnetisch of met een plaatselijk hoge stroom) en naar het verbeteren van de schakeltijden. Mogelijk zullen in de toekomst supergeleidende schakelaars de huidige DC schakelaars kunnen vervangen met als inherent voordeel een zeer laag doorlaatverlies en het volledig statisch zijn hetgeen de betrouwbaarheid van het schakelsysteem kan vergroten.

Magnetische afscherming

Supergeleidende magnetische afscherming zal vooral gebruikt gaan worden bij laagfrequente en DC velden. De afschermende werking berust op het Meissnereffect, dat wil zeggen het volledig ontbreken van een magnetisch veld in een supergeleider. Supergeleidende magnetische afscherming kan in veel gevallen de dikke ijzeren platen, die nu gebruikt worden, vervangen.

Supergeleidende elektrische scheepsvoortstuwing

Dankzij het feit dat enerzijds de civiele markt steeds strengere eisen stelt ten aanzien van bijvoorbeeld netvervuiling, kan steeds vaker worden gebruik gemaakt van standaard componenten waardoor de elektrische scheepsvoortstuwing voor marineschepen in prijs zakt. Hoe groot het voordeel van een elektrische scheepsvoortstuwing is wordt in sterke mate bepaald door de missie van het schip. Zo zal de brandstofbesparing sterk afhankelijk zijn van de snelheid waarmee gevaren wordt (wanneer altijd met hoge snelheid wordt gevaren is de besparing gering). Een deel van de besparing wordt verkregen door integratie van het servicenet en de voortstuwing. Nog weinig is bekend over de integratie van een gepulste energievoorziening voor toekomstige wapensystemen als railversnellers, laserwapens etc. met het boordnet. Eisen aangaande beschikbaarheid, plaatsing, netvervuiling etc. mede in relatie met de voortstuwing (volledige beschikbaarheid bij volle snelheid?) moeten worden geformuleerd.

Het gebruik van supergeleidende elektrische machines voor elektrische scheepsvoortstuwing lijkt alleen zinvol als gedacht wordt aan een scheepsvorm waarbij het kleiner worden van de elektrische

machine tot zijn recht komt. Elektromagnetische voortstuwing kan voor lage snelheden een interessante optie zijn. Mogelijk zullen de toekomstige hoge-temperatuur supergeleiders bovengeschetst beeld drastisch veranderen.

8 AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

Gezien de bovenstaande conclusies en de door de Koninklijke Marine geuite wens om expertise op het gebied van energietechniek te ontwikkelen bij PML-Pulsfysica, kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan [19]:

- In de toekomst zullen gepulste energiebronnen voor elektrische energie wapens, sonar, radar etc. een steeds belangrijker rol gaan spelen aan boord van schepen. Opslag van energie in supergeleidende magneten kan een belangrijk onderdeel vormen van zo'n gepulste energiebron. Het onderzoek kan uit de volgende activiteiten bestaan:
 - Inventarisatie van de eisen die aan gepulste energiebronnen aan boord van marineschepen moeten worden gesteld.
 - Het onderzoeken op welke manier supergeleidende magneten hierin een rol kunnen spelen, dit ook in vergelijking met andere vormen van opslag.
 - Het uitwerken van een SMES systeem voor gepulste energievoorziening, waarbij ook de relatie met het boordnet wordt bekeken.

In een volgende fase kan aan de hand van dit onderzoek een SMES systeem gebouwd worden teneinde ook de noodzakelijke praktische kennis op te bouwen.

Het onderzoek aan een SMES systeem zal leiden tot vergroting van de kennis op het gebied van het toepassen van supergeleiders. Veel van de hier voorkomende problemen komen immers ook voor bij elektrische machines en MHD spoelen.

Mogelijk zou internationaal samengewerkt kunnen worden met bijvoorbeeld Magnet-Motor GmbH en GEC Alsthom, bedrijven die beiden op dit gebied werkzaam zijn.

- Brede toepassing van magnetische opslag in bijvoorbeeld elektrische auto's, aan boord van schepen en voor elektrische netten wordt belemmerd door het nog niet aanwezig zijn van goede schakelsystemen voor het toevoeren en afvoeren van de energie. Zo'n schakelsysteem dat een repeterende open-functie zal moeten hebben en grote gelijkstromen moet kunnen schakelen komt ook voor in vele andere toepassingen (onder andere aan boord van marineschepen en in de gepulste energiebron van railversnellers) en kenmerkt zich vaak door zijn grote onderhoudsgevoeligheid. Voorgesteld onderzoek behelst het inventariseren van problemen van DC schakelaars, het vastleggen van de eisen die men aan DC schakelsysteem moet stellen, het

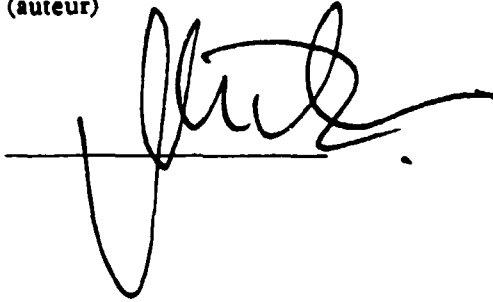
inventariseren van de in aanmerking komende schakelsystemen en het verder uitwerken van het beste systeem. In een vervolgonderzoek hierop zou de juiste werking kunnen worden aangetoond met metingen aan een te bouwen schakelsysteem. Dit onderzoek zou kunnen worden verricht in nauwe samenwerking met de TU-Delft, afdeling vermogenselektronica en elektrische machines, en in samenwerking met de TU-Twente, afdeling lage-temperaturen, waar reeds ervaring is opgedaan met supergeleidende schakelaars.

- Zoals uit hoofdstuk 4.2 is gebleken is elektromagnetische voortstuwing met name rendabel bij lage snelheden. De grote beperking voor deze technologie is de lage soortelijke geleiding van zeewater. De "ripple motor" is één van de weinige vormen waarbij de voortstuwing niet afhankelijk is van het zeewater. Onderzocht zou kunnen worden of dit systeem verbeterd kan worden en of nog andere soortgelijke systemen mogelijk zijn. Uit de grafieken van hoofdstuk 4.2 blijkt dat het rendement toeneemt bij hoge magnetische inducties. Met behulp van gepulste energiebronnen kunnen zeer hoge magnetische inducties worden opgewekt en kan mogelijk een hoog rendement voor de elektromagnetische voortstuwing worden bereikt. Berekeningen ondersteunt door metingen aan een model zou dit aan moeten tonen.
- De ontwikkeling op het gebied van de hoge-temperatuur supergeleiders is dusdanig dat niet verwacht mag worden dat zij voor het jaar 2000 voor vermogenstoepassingen kunnen worden gebruikt. Toch spreekt het voor zich dat de mogelijke voordelen van een praktische HTSC, zoals een eenvoudige en goedkope koeling en een hoge kritische magnetische veldsterkte, dusdanig zijn dat het belangrijk is de ontwikkelingen op dit gebied te blijven volgen [20]. Ook meerdere toepassingen op het gebied van de elektronische componenten rechtvaardigen deze inspanning. Naast de ontwikkelingen op het gebied van hoge-temperatuur supergeleiders is het van belang de toepassingen van lage-temperatuur supergeleiders te volgen. De komende jaren zal het met name belangrijk zijn welke resultaten door de Japanse onderzoekers worden geboekt op het gebied van de AC generatoren en met hun schip, de Yamato I. Mogelijk zal hierdoor de Europese inspanning worden vergroot.

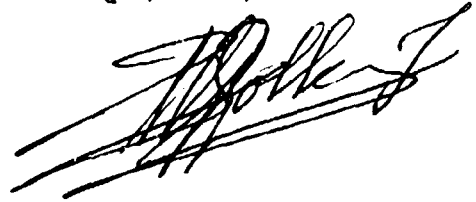
9

ONDERTEKENING

Ir. P. van Gelder
(auteur)

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'V' followed by a cursive 'P' and 'G', with a long horizontal stroke extending to the right.

Dr. W.J. Kolkert
(projectleider)

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'W.J. Kolkert' written in a cursive style, with several horizontal lines drawn through the signature.

10 LITERATUURLIJST

- 1 McFadden, R.H., Trewman, H.C.R., 'Advanced integrated electrical marine propulsion systems', MER, April 1985, 5-8.
- 2 'A current favourite: electric propulsion', The Motor Ship, May 1987, 52-59.
- 3 Sherlock, J., Borman, J.B., 'Warship Electrical Propulsion: The Way Ahead', TransIMarE(C), vol. 97, Conf. 3, Paper 3, 23-30.
- 4 Kolkert, Dr.W.J., Tuinman, Ir. E., 'Verslag van het bezoek aan het David Taylor Ship Research Center (DTRC), Annapolis en het Naval Research Laboratory, Washington DC, afgelegd door van der Ploeg, Ir. B., Kolkert, Dr. W.J. en Tuinman, Ir. E., op 31-10-1989 en 01-11-1989', PML 1989-RV8, 6, (Confidentieel)
- 5 Doss, James D., 'Engineer's guide to high-temperature superconductivity', 1ste editie, 1989, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-51307-5, 100.
- 6 Hilal, M.A., Lloyd, J.D., Crapo, A.D. and Huang, X., 'Self energized air core superconducting (SEAC) motor', IEEE Trans Magn, volume 2 (1991), blz.2240-2243.
- 7 Crapo, A.D. and Lloyd, J.D., 'Homopolar DC motor and trapped flux brushless DC motor using high temperature superconducting materials', IEEE Trans Magn, volume 2 (1991), 2244-2247.
- 8 Appleton, A.D., 'Developments of engineering applications of superconductivity at IRD', Cryogenics, September 1982, 435-438.
- 9 P.A.M. Bracké (Holec), Goemans, P.A.F.M. (TU Eindhoven), van der Ploeg, B., (Koninklijke Marine), 'Elektrische transmissie bij voortstuwing van schepen', verslag van een studiereis in 1982.
- 10 Ohara, T. et. al., 'Development of 70 MW class superconducting generators', IEEE Trans Magn, volume 2 (1991), 2232-2239.

- 11 Sabrie, J.L., 'Electrical tests on a fully superconducting synchronous machine', IEEE Trans Magn, volume 2 (1991), 2256-2259.
- 12 'Superconducting Electromagnetic Propulsion for Ships', Diesel & Gas turbine Worldwide, 1989, 42-44.
- 13 Corlett, R., 'The Victor-class: operational test beds for new generations of submarines', Maritime Defence, April 1985, 154-157.
- 14 Krazinski, J.L., Holtz, R.E. and Jaross, R.A., 'Impact of high-critical-temperature superconductors on electromagnetic pump applications', Argonne National Laboratory (DE 90 014809), May 1990.
- 15 Challita, A., Barber, J.P., McCormick, T.J., 'Advanced Energy Storage Systems', IAP Research (AD-A152 244), January 1985.
- 16 Mulder, G.B.J., ten Kate, H.H.J., Krooshoop, G., van de Klunderr, L.J.M., 'Development of a thermally switched superconducting rectifier for 100 kA, IEEE Trans Magn, volume 2 (1991), 2333-2336.
- 17 Keamy, E.F., 'Superconducting technology for electric propulsion, "Master thesis Naval Postgraduate School, Monterey CA, (AD-A200 507), June 1988.
- 18 Rains, D.A., Vanlandingham, D.J., Doyle, T.J., 'Podded destroyer propulsion', Naval Engineers Journal, April 1979, 120-130
- 19 Kolkert, W.J., 'Voorlopige conclusies betreffende elektrische scheepsaandrijvingen', april 1990, PML-Pulsfysica, (Confidentieel)
- 20 'Commentaar op het rapport van de Defense Science Board Task Force over Military System Applications of Superconductors (Ocr. 1988) ', juli 1989, PML-Pulsfysica ref. nr. 89TR988 WJK/EK.

REPORT DOCUMENTATION PAGE

(MOD NL)

| | | |
|--|---|---|
| 1. DEFENSE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD92-1510 | 2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER (Empty) | 3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER PML 1992-21 |
| 4. PROJECT/TASK/WORKUNIT NO. 282488033 | 5. CONTRACT NUMBER A68/KM/402 | 6. REPORT DATE June 1992 |
| 7. NUMBER OF PAGES 68 | 8. NUMBER OF REFERENCES 20 | 9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final |
| 10. TITLE AND SUBTITLE Elektrische scheepsvoortstuwng en supergeleiding; een literatuurstudie (Electric ship propulsion and superconductivity; a desk study) | | |
| 11. AUTHOR(S) P. van Gelder | | |
| 12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO PML - Pulse Physics Laboratory P.O. Box 45, 2280AA Rijswijk, visiting address: Schoemakerstraat 97, 2628 VK Delft, The Netherlands | | |
| 13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Royal Netherlands Navy, v.d. Burchlaan 31 P.O. Box 20702, 2500 ES The Hague, The Netherlands | | |
| 14. SUPPLEMENTARY NOTES (Empty) | | |
| 15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) In this report the advantages and disadvantages of electric ship propulsion compared to mechanical propulsion are discussed and the question is raised what will be the influence of the application of superconductors. Detailed description is given of the superconductors themselves and the various applications as superconducting motors and generators, electromagnetic propulsion and magnetic energy storage. Two examples of ships with a superconducting propulsion system are described. Finally, future developments are discussed, conclusions are drawn and four proposals for future studies are formulated. | | |
| 16. DESCRIPTORS Superconductivity Ship Propulsion | IDENTIFIERS (Empty) | |
| 17A. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) UNCLASSIFIED | 17B. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) UNCLASSIFIED | 17C. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) UNCLASSIFIED |
| 18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited distribution | | 17D. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) UNCLASSIFIED |

DISTRIBUTIELIJST

- 1 DWOO
- 2 HWO-KL
- 3 HWO-KLu
- 4 HWO-KM
- 5 PHWO-KM
- 6-8. DMKM/PFS, Ir. B. v.d. Ploeg
- 9 DMKM/WCS/COSPON, Drs. W. Pelt
- 10-12 TDCK
- 13 Hoofddirecteur TNO Defensieonderzoek
- 14 TNO PML, Directeur
- 15 TNO PML, DTR
- 16 TNO PML, documentatie
- 17 TNO PML, archief
- 18/21 TNO-PML-Pulsfysica

**END
FILMED**

DATE: 11-92

DTIC