COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF - 70/5
4 Marzo 1970

G. Sacerdoti :

# LA SUPERCONDUTTIVITA' NELL'ELETTROTECNICA. -

Servizio Documentazione
dei Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN
Casella Postale 70 - Frascati (Roma)

Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN
Servizio Documentazione

LNF-70/5

Nota Interna: n° 464
4 Marzo 1970

# G. Sacerdoti: LA SUPERCONDUTTIVITA' NELL'ELETTROTECNICA. - (Dalle lezioni tenute al Corso di superconduttività applicata di Erice, Aprile 1969).

## I. - PREPARAZIONE DI SUPERCONDUTTORI PER MAGNETI AD ALTO CAMPO. -

### I.1. - Generalità.

I superconduttori idonei alla costruzione di magneti per alti campi devono avere le seguenti caratteristiche:

1) - raggiungere alti campi magnetici senza perdere le caratteristiche superconduttrici cioè senza che venga ripristinata la resistenza elettrica.

2) - Sopportare un'alta densità di corrente: la densità deve essere alta nel superconduttore ed alta deve essere la densità media nel complesso superconduttore, conduttore di stabilizzazione, isolante, fluido di refrigerazione, rinforzo.

3) - Sopportare gli sforzi spesso elevati cui sono soggetti.

4) - Presentare un sufficiente grado di "stabilizzazione"(x).

5) - Essere economici: il costo del materiale base per ottenere questi tipi di conduttori è alto, e costosi sono i procedimenti per realizzarli: bisogna cercare di contenere i costi di fabbricazione per rendere questi materiali competitivi con i conduttori normali nelle costruzioni in cui possono trovare impiego.

6) - Essere facilmente maneggiabili ed utilizzabili (non devono essere fragili, devono sopportare piegature ecc.).

Le caratteristiche qui elencate condizionano la scelta dei materiali nonchè i processi di fabbricazione del cavo ed i criteri di progetto dei magneti che con essi si realizzano.

Come è noto ormai si conoscono migliaia di leghe e composti che diventano superconduttori a bassa o bassissima temperatura, ed ogni anno il numero di questi materiali aumenta: negli anni passati si arrivarono a trovare in un anno 300 nuovi materiali appartenenti alla famiglia dei metalli e dei semiconduttori che presentano questo fenomeno.

Solo pochi però mantengono le proprietà sopra elencate fino ad alti campi magnetici e tra questi ne vengono riportati alcuni in Tabella I sui quali è stato fatto molto lavoro al fine di individuarne le proprietà superconduttrici e il comportamento nelle diverse condizioni di lavoro.

La temperatura di transizione ha importanza: infatti sarebbe utile ottenere materiali con temperatura di transizione superiore a quella dell'idrogeno liquido. Infatti utilizzando l'idrogeno liquido che può essere portato con pompaggio a temperature di $14^{o}K$ si può risparmiare molto in spese sia di refrigerazione, sia di esercizio, sia di impianto.

I materiali che sembrano avere il campo critico più alto sono il $Nb_3Sn$, il $V_3Si$, il VaGa, il $Nb_3Al$ e il $Nb_3(Al_{0.8}Ge_{0.2})$. Però i materiali che sono stati oggetto di studio per produzione industriale sono principalmente il $Nb_3Sn$, il NbTi e il NbZr. Lo studio delle leghe ternarie è appena cominciato e molti laboratori sono impegnati in ricerche in questi materiali.

Per quel che riguarda la capacità di sopportare alta densità di corrente nella sezione superconduttrice del cavo, si ritiene normalmente valida la ipotesi di Gorter che questa possa essere migliorata aumentando le impurezze e le dislocazioni nel materiale: queste imperfezioni funzionano come centri di ancoraggio per le correnti mentre hanno poco effetto sul valore del campo magnetico critico che è maggiormente influenzato dalla struttura metallurgica. Di fatto questa ipotesi è con-

---

(x) - Vedremo nelle pagine che seguono il significato di questa definizione.

fermata dall'esperienza e dalle prove fatte.

TABELLA I

| Materiali | temperatura di transizione (°K) | Induzione magnetica-critica (tesla) |
|---|---|---|
| $Nb_3Sn$ (*) | 18,1 | 26 ÷ 22,5 |
| $V_3Si$ (*) | 16,8 | 22,5 |
| $V_3Ga$ (*) | 14 | 19,5 |
| Mb Zr (25%) | 11 | 7,7 |
| Nb Zr (35%) | 10,8 | 8,3 |
| Nb Ti (25%) | 8,4 | 12,2 |
| Nb Ti (50%) | 7 | 11,0 |
| $Nb_3Al$ | 17,1 | 24 ÷ 22 |
| Nb N | - | 15,3 |
| NbZr-Ti | - | - |
| $Nb_3$ (Al Gr) | 20,5 | - |

(*) - La superconduttività è legata a particolari strutture metallurgiche e precisamente alla struttura $\beta$ tungsteno.

Le densità di corrente possono raggiungere nel superconduttore vero e proprio valori molto elevati. Per esempio nel $Nb_3Sn$ si possono raggiungere valori da parecchie centinaia a parecchie migliaia di $Amp/mm^2$ a induzioni di 10 tesla. Se questo materiale viene drogato con piccole percentuali di Zr, questi valori raddoppiano o quasi. Per il Nb Ti si raggiungono 1000 $Amp/mm^2$ a 8 tesla. In generale vi è accordo nel ritenere che le impurezze provocano un aumento del valore della corrente che il superconduttore sopporta, ma le opionioni divergono quando si scende a dettagli tecnici; e cioè sul valore di questo aumento e sul modo di introdurre le impurezze nel materiale. Sono state fatte misure sulle qualità di spezzoni di Nb in cui dislocazioni sono state provocate mediante bombardamento con neutroni: anche queste misure sembrano confermare le teorie formulate su questi fenomeni.

Però la densità media scende a valori molto più bassi di quelli indicati per il solo superconduttore: per esempio quando si realizza $Nb_3Sn$ ottenuto per diffusione dello stagno depositato su una striscia di Nb, una parte del niobio non viene utilizzata perchè lo stagno si diffonde solo a pochi $\mu$ di profondità per cui per questa ragione la densità media discende. Ma non basta: il materiale va "stabilizzato" mettendo

il superconduttore a diretto contatto con conduttori normali ad alta conducibilità, come per esempio Cu OFHC che è caratterizzato da rapporti di conducibilità: $\gamma T = 4.2^{o}K / \gamma T = 273^{o}K$ dell'ordine di 200; o Al puro caratterizzato da rapporti di conduciblità $\gamma T = 4.2^{o}K / \gamma T = 300^{o}K$ dello ordine di 2000. Il conduttore normale agisce: a) come shunt quando per qualche causa il superconduttore perde le caratteristiche superconduttrici; b) come mezzo per assorbire esso stesso calore non appena il superconduttore si riscalda per qualche causa e per trasferire questo calore all'elio liquido. Per aumentare questa trasmissione si è pensato di ricorrere al rame poroso. Per aumentare l'efficacia del raffreddamento si presenta quindi la necessità di lasciare canali o intercapedini tra i conduttori; l'elio liquido può circolare e vaporizzare rendendo efficace il raffreddamento e favorendo il buon funzionamento del magnete. Per questa ragione si perde spazio e la densità media della corrente discende.

Se il cavo serve per magneti ad alto campo le azioni elettrodinamiche sui conduttori (dovuti alla forza di Lorenz che, per unità di lunghezza, è pari a B x I) possono diventare considerevoli per cui è necessario rinforzare il cavo con materiale di buone caratteristiche meccaniche che non sia costoso come il Nb e che abbia però coefficiente di dilatazione termica analoga a quella del superconduttore.

Spesse la scelta cade su speciali tipi di acciai inossidabili. Per queste ragioni le densità medie di correnti scendono nei magneti di grosse dimensioni, ove il raffreddamento deve essere efficace e le sollecitazioni meccaniche aumentano, a qualche decina di $Amp/mm^2$ ed anche meno.

Per avere un'idea del rinforzo di acciaio necessario affinchè il cavo resista alle sollecitazioni meccaniche si ragiona come segue.

Fissato il raggio r, l'induzione magnetica B e la densità di corrente u del solenoide in cui si utilizza il cavo superconduttore si ricava la sollecitazione meccanica $\sigma$ a cui il cavo è sottoposto:

$$\sigma = u\,Br$$

La $\sigma$ deve per esempio mantenersi inferiore a 5000 $kg/cm^2$: per una bobina di 1 metro di raggio ed induzione di 5 tesla la limitazione su u diventa molto forte e cioè non superiore a 10 $Amp/mm^2$ medi.

Ma un altro fattore è da tenere in considerazione: è la sollecitazione che viene provocata nel $Nb_3Sn$ per raffreddamento da $300^{o}K$ a $4.2^{o}K$ per il fatto che il rame di stabilizzazione e l'acciaio di rinforzo

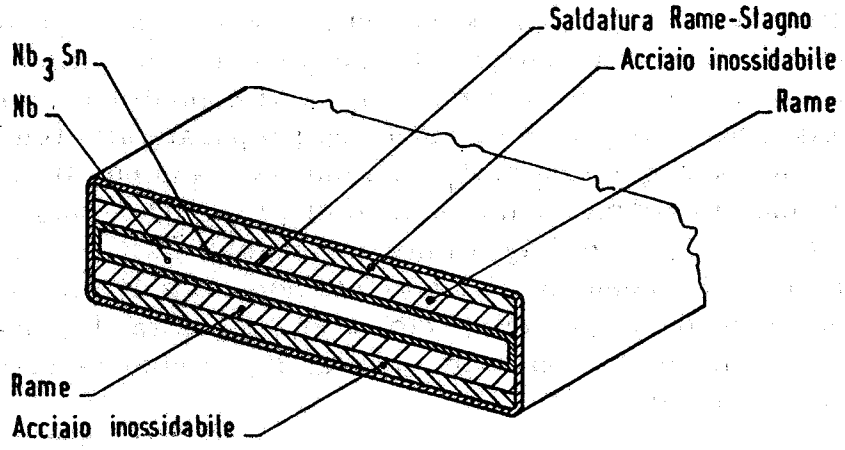



FIG. 1 - Sezione del conduttore di $Nb_3Sn$ stabilizzato con rame e rinforzato con acciaio inossidabile.

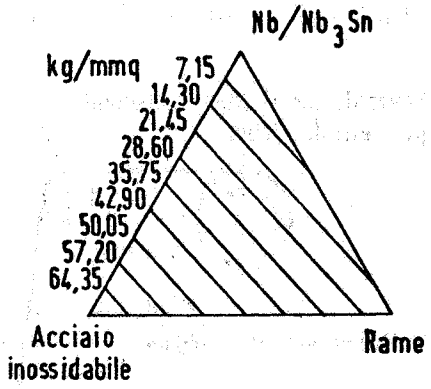



FIG. 2 - Diagramma degli sforzi in funzione delle percentuali di rame e di acciaio inossidabile.

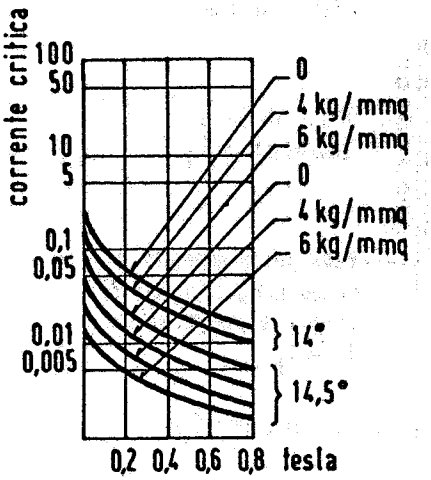



FIG. 3 - Andamento della corrente critica in funzione dell'induzione al variare della tensione meccanica.

hanno coefficiente di dilatazione termica diversa da quello del $Nb_3Sn$.

Benz della General Electric ha preparato un diagramma nel quale sono riportate in funzione della percentuale di rame e di acciaio inossidabile le tensioni cui bisogna "tirare" i conduttori a temperatura di 4.2°K affinchè il $Nb_3Sn$ del conduttore preparato alla temperatura ambiente non sia soggetto a sollecitazioni meccaniche. Il conduttore cui i calcoli hanno riferimento hala sezione di Fig. 1 ed il diagramma è riportato in Fig. 2. Questo diagramma può essere utilizzato nel progetto di magneti: infatti è bene che il materiale non sia sollecitato meccanicamente perchè perde in piccola parte la sua capacità di portare corrente: basta esaminare il diagramma di Fig. 3 che riporta risultati di misure che confermano ciò.

## I.2. - Preparazione del $Nb_3Sn$. -

Vengono ora riportate alcune informazioni sui processi di fabbricazione del niobio e stagno. Due sono i procedimenti utilizzati industrialmente: a) per diffusione (stagno nel niobio); b) per deposizione di vapori.

Per la produzione del niobio-stagno per diffusione si procede nella seguente maniera (v. Fig. 4).

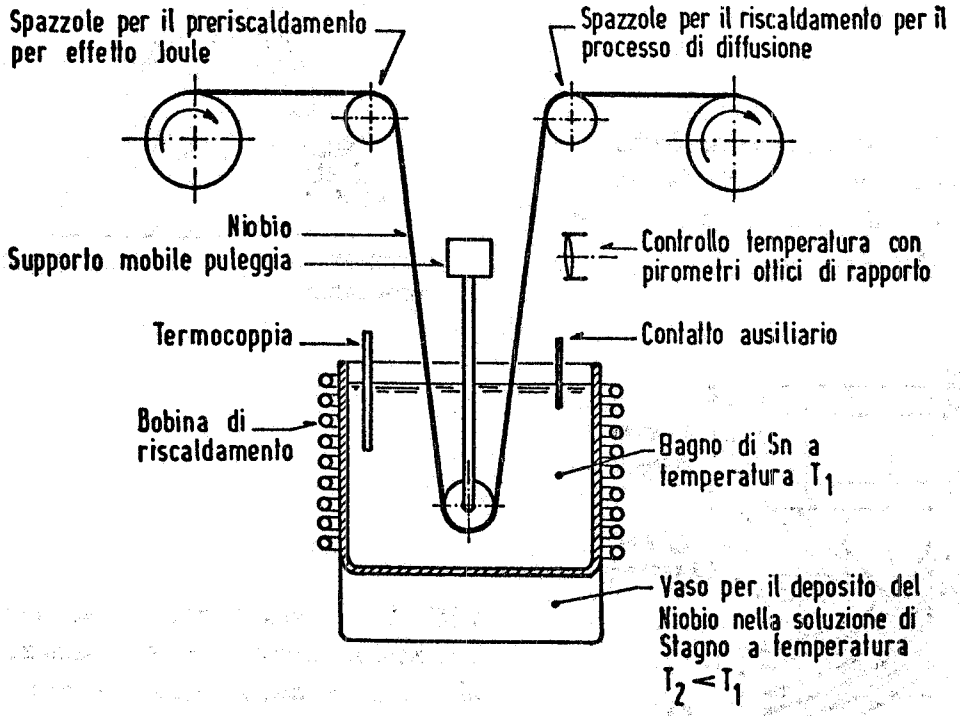



FIG. 4 - Disposizione schematica per la produzione di niobio-stagno.

Si fa passare una piattina di niobio in un bagno di stagno liquido sotto vuoto e tenuto in un recipiente di materiale refrattario come steatite o grafite nucleare.

Lo stagno che si è depositato sulla piattina di niobio viene fatto diffondere mantenendo la piattina stessa a temperatura dell'ordine di 950°C.

Successivamente viene saldato a questo conduttore una o due striscie di rame o di argento in modo da garantirne uno stretto contatto. Per questa operazione si può procedere in diversi modi: per esempio stagnando di nuovo la piattina sulla cui superficie si è formato niobio-stagno e sullo stagno viene saldata una piattina di rame elettrolitico.

Si può invece depositare elettroliticamente un leggerissimo strato di rame sopra niobio-stagno e successivamente su questo saldare il rame od anche indiare la piattina (il buon contatto tra l'indio e la piattina viene ottenuto mediante ultrasuoni) e successivamente sopra l'indio si salda la striscia di rame. Questa operazione è delicata e deve garantire un buon contatto elettrico che molta influenza ha sulla stabilizzazione.

Il processo così indicato, per quanto in principio semplice, presenta alcune difficoltà dato il numero grande di parametri (temperature e tempi), che possono variare e che influenzano il processo stesso.

Un primo gruppo di variabili sono il tempo e la temperatura di preriscaldamento che il filo di niobio deve subire prima della immersione nel bagno di stagno.

Questo preriscaldamento rappresenta una specie di "lavaggio" e aiuta la pulizia superficiale del nastro.

Nelle prove che sono state fatte presso il Laboratorio di Frascati è stato visto che questi parametri influenzano sensibilmente la corrente portata dal niobio-stagno che dopo si forma.

Altri parametri sono il tempo e la temperatura di immersione nel bagno; è necessario controllare anche la purezza del bagno dell'immersione poichè lo stagno tende a "mangiare" rapidamente il niobio e quando la percentuale di niobio nell'immersione supera un certo valore (circa 10÷20% non disponendo di dati precisi) la qualità del filo prodotto peggiora poichè si formano anche altri composti di $Nb_2Sn$ e Nb Sn di ridotte proprietà superconduttrici.

Per ovviare in parte questo inconveniente si cerca di creare un gradiente di temperatura tra la vasca di stagno ove viene "bagnato" il nastro di niobio e una vasca di stagno collegata direttamente sottostante a questa e tenuta a temperatura inferiore (p. es. 500°C). Il Nb che

va in soluzione e i composti non desiderati di Nb-Sn dovrebbero essere qui richiamati depurando il bagno superiore.

Il forte gradiente termico può essere causa di rottura della vasca già indebolita per la presenza di scanalature ove sono sistemate le resistenze di riscaldamento.

Qualche problema rappresenta il controllo della temperatura nel bagno di stagno e del filo (preriscaldamento e diffusione): nel primo caso può convenire sistemare la termocoppia Pt - Ro 10%/Pt in guaina refrattaria immersa nel bagno, nel secondo caso conviene usare pirometri ottici a doppia riga.

Un pirometro ottico integrale può essere soggetto a maggiori errori per l'appannamento dell'oblò nella campana del vuoto, appannamento che avviene per l'evaporazione dello stagno.

Le misure di queste temperature servono alla stabilizzazione delle stesse entro qualche grado centigrado. Il riscaldamento del filo nella fase di preriscaldamento e di diffusione può ottenersi per effetto Joule facendo passare nel filo una corrente stabilizzata.

Viene riportato in Tabella II un quadro di dati caratteristici dei tempi e delle temperature in cui avvengono le varie operazioni al fine di potere valutare l'incidenza economica dei vari fattori nei processi di fabbricazione del $Nb_3Sn$.

TABELLA II

| fase | tempo | temperatura | osservazioni |
|---|---|---|---|
| preriscaldamento | 10 ÷ 20' | 850 ÷ 900° | si espellono gas e scorie volatili superficiali |
| immersione | 5 ÷ 10' | 900 ÷ 950° | si deposita stagno |
| diffusione | 10 ÷ 20' | 900 ÷ 950° | si diffonde lo stagno, quello che non diffonde gocciola ed evapora: si formano fasi di $Nb_3Sn$, $Nb_2Sn$, $Nb_3Sn_2$; le ultime due sono indesiderate |
| stagnatura successiva | 5 ÷ 10' | 300° | ulteriore stagno si deposita sulla superficie del $Nb_3Sn$ per saldare poi rame |

La velocità di produzione del nastro viene ad essere di 5 m/h con un impianto di laboratorio: ma può essere notevolmente aumentata con impianti industriali (anche 50 m/h).

Si procede poi alla stabilizzazione e rinforzo in altra sede, mediante saldatura di una piattina di rame su quella di $Nb_3Sn$ e successivamente di una o più di acciaio inossidabile.

Nelle Figg. 5 e 6 si può vedere l'apparato di laboratorio preparato a Frascati con contratto del CNR per ottimizzare i parametri di questo processo.

Si possono fare alcune considerazioni sul costo di un impianto per la produzione di piattina larga 6 mm in grado di portare a 10 tesla una corrente maggiore di 40 A con spessore di 3 x 2 $\mu$ di $Nb_3Sn$. Lo spessore di questo cavo può raggiungere vari valori a seconda degli sforzi cui viene sottoposto.

La densità media deve scendere a 10 Amp/mm$^2$ per le ragioni meccaniche già indicate e lo spessore minimo a cui si può scendere è di circa 0.5÷1 mm ed è quasi tutto di acciaio inossidabile. Si può pensare di avere i seguenti spessori nella sezione

6 $\mu$ $Nb_3Sn$
8 $\mu$ Nb
450 $\mu$ Acciaio
150 $\mu$ Rame elettrolitico (ricotto a 200°C dopo la saldatura per migliorare la conducibilità elettrica mediante eliminazioni di eventuali tensioni interne).

Se si ottiene il cavo di $Nb_3Sn$ da 6 mm da uno di 120 mm in 20 striscie si può pensare di spendere, in un impianto che consente uno spazio di preriscaldamento di 150 cm, un tempo di 0.005 h/m. Difficile è valutare i tempi morti; si possono valutare da un giorno ad una settimana per ogni carica e scarica del serbatoio di stagno e pulizia dell'impianto e due ore al giorno per le cariche di nastro di Nb (questo può essere possibile se il pozzo di stagno è progettato in modo da evitare l'avvelenamento del niobio disciolto tenuto conto dell'area e della velocità di movimento del nastro).

Se facciamo l'ipotesi che per il funzionamento dell'impianto si impieghi un uomo per 8 ore al giorno e che la potenza elettrica impiegata per le pompe a vuoto e per il riscaldamento sia di 10÷20 KW, i costi possono approssimativamente così calcolarsi:

- Costo dell'impianto 550 ML
- Costo di esercizio per un anno 90 ML
- Produzione annua di nastro da 6 mm di larghezza (con stabilizzazione e rinforzo) 800.000 metri.
- Costo per metro (ammortamenti e interessi impianto calcolati al 50%) 600 lire /metro(x).

Per la preparazione del $Nb_3Sn$ mediante deposizione per via gassosa di cloruri di niobio e di Sn e successiva riduzione mediante idrogeno si procede come segue(o):

Lo schema dell'impianto per la fabbricazione del $Nb_3Sn$ per riduzione con idrogeno dei cloruri di Sn e Nb depositati su opportuno supporto è riportato in Fig. 7.

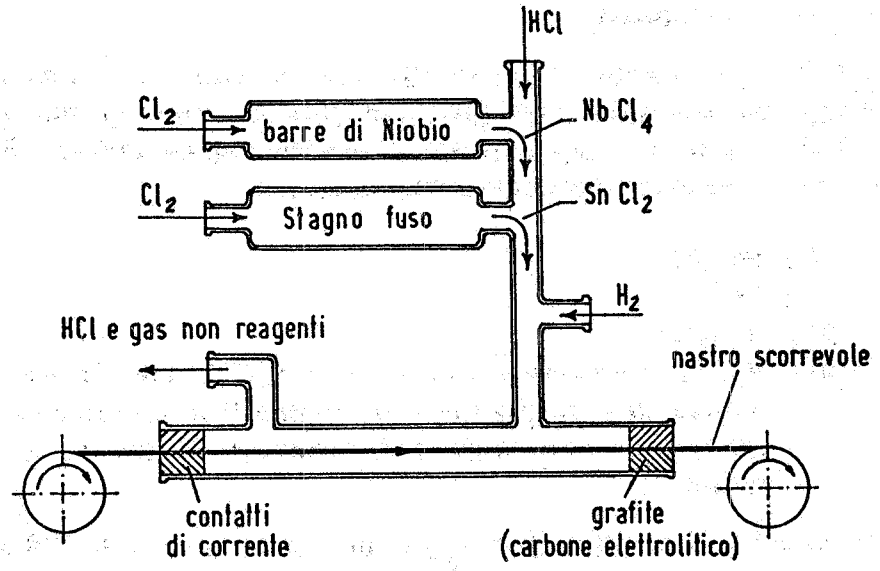



FIG. 7 - Schema dell'impianto per la fabbricazione del $Nb_3Sn$.

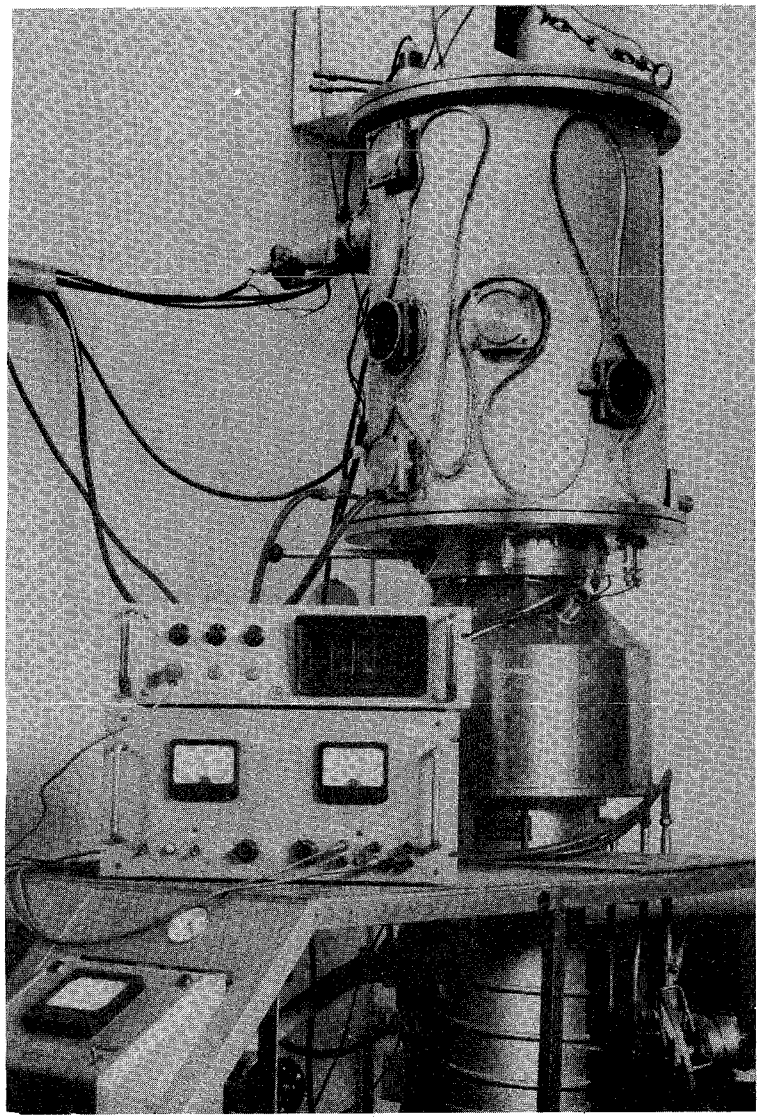
I cloruri gassosi di Nb e di Sn vengono a contatto sulla piattina di supporto e qui avviene la riduzione secondo la seguente reazione:

$$3\,NbCl_4 + SnCl_2 + 7\,H_2 \rightleftharpoons Nb_3Sn + 14\,HCl$$

---

(x) - Il costo per metro per la produzione sul mercato varia da 1250 a 6000 lire/metro.

(o) - Il procedimento è stato messo a punto dalll'RCA.



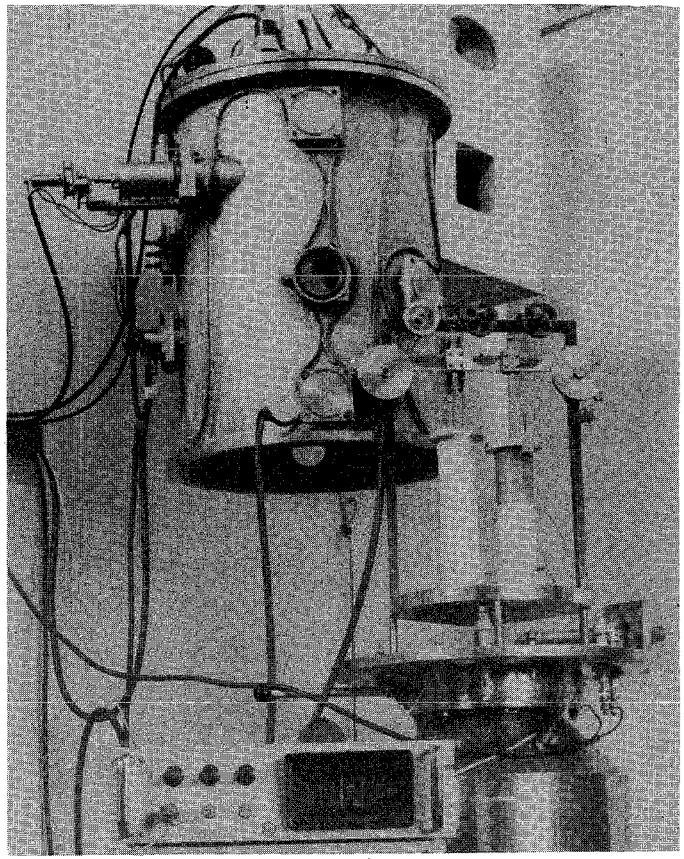


FIG. 5 e 6 - Impianto per la produzione di $Nb_3Sn$ per diffusione presso i Laboratori Nazionali di Frascati.

governata dalla costante di equilibrio $K_p$ della reazione di deposizione

$$K_p = \frac{(PHCl)^{14}}{(PNbCl_4)^3 (PSnCl_2)(PH2)^7}$$

la costante di equilibrio aumenta con la temperatura e perciò, per evitare il deposito di $Nb_3Sn$ sulle pareti del forno, bisogna tenere la piattina a temperatura più alta ($1000 \div 1200^o$) di quella delle pareti ($700^o$).

Inoltre un eccesso di acido cloridico evita la precipitazione di $NbCl_3$ che si forma attraverso la reazione:

$$H_2 + 2\,NbCl_4 \rightleftharpoons 2\,NbCl_3 + 2\,HCl$$

Inoltre tenendo il nastro a temperatura più alta di $700^o$ si evita in parte la formazione di $Nb_2Sn$ e $NbCl_3$ sul deposito.

Qualche problema pone la scelta del substrato: infatti bisogna evitare che il Nb si depositi e si fissi prima di fare in tempo a dar luogo a formazione di $Nb_3Sn$; inoltre bisogna evitare che si formino cloruri del materiale del supporto: la scelta del supporto influisce sulla struttura metallurgica del deposito che, come è noto, influenza le proprietà del superconduttore.

Un altro problema che nasce nella messa a punto dell'impianto è lo stabilire e realizzare il rapporto di $NbCl_4$ e $SnCl_2$ gassosi necessario alla produzione di un buon materiale: infatti questo rapporto influenza fortemente la composizione dei depositi come si può vedere in Fig. 8.

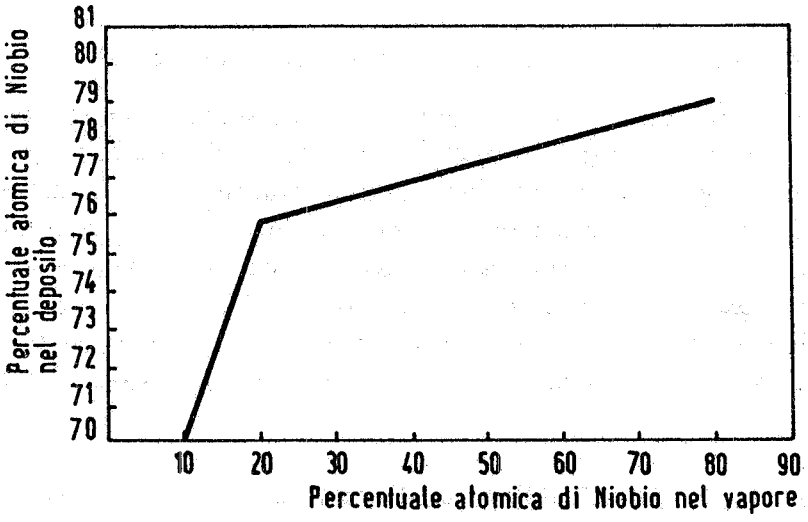



FIG. 8 - Composizione dei depositi nella fabbricazione del $Nb_3Sn$.

Una percentuale diversa dal teorico di Nb nel deposito reale rende più disordinato il reticolo con conseguente abbassamento della temperatura critica del superconduttore. La produzione di nastro di Nb-Sn con l'impianto dell'RCA può arricare 50÷ 100 m/h.

## I.3. Preparazione leghe di NbTi, Nb Zr e di altre.-

Per quel che riguarda la preparazione di leghe di Nb, Ti, Zr Va in generale si ricorre a leghe preparate in forni ad arco. Una volta trafilato il filo dal lingotto sono necessari trattamenti termici opportuni per aumentare il numero e il tipo di dislocazioni atte ad ancorare le correnti superconduttrici; la capacità di portare corrente è legata intimamente alla struttura del materiale: p. esempio nel Ti-Va 20% è stata messa in luce la formazione di fase $\omega$ ed $\alpha$ ottenute mediante tempera rapida dalla fase $\beta$ ottenuta a sua volta portando il materiale a 400÷ 600°C per diverse ore. I centri di ancoraggio nella fase $\omega$ hanno dimensioni dell'ordine di 200 Å e sono in diretta relazione con la capacità di portare corrente del conduttore.

Per i conduttori in leghe il problema più impegnativo è quello di ottenere un buon contatto elettrico e termico con il rame entro cui vengono bloccati in ogni punto della loro lunghezza: onde ottenere una buona stabilizzazione bisogna pulire i singoli conduttori con acidi prima di bloccarli nel rame.

## I.4.- Preparazione di $Va_3Ga$.-

Riportiamo ancora in Fig. 9 uno schema di impianto preparato in Giappone da K. Iachikawa per la produzione di $Va_3Ga$ in piattine di 3 mm x 80 $\mu$ formato a 675° per diffusione del Ga nel Va per 40 ore. Le caratteristiche del materiale sono riportate in Fig. 10.

## I.5.- Il processo di stabilizzazione del materiale.-

Dopo la scoperta dei materiali in grado di presentare resistenza elettrica nulla anche in alto campo mangetico si tentò di realizzare, com'è nella logica delle cose, bobine per alti campi magnetici. In queste prime utilizzazioni dei cavi nacquero impreviste difficoltà per l'anomalo comportamento dei conduttori. Vengono ora elencati i fatti e i fenomeni che caratterizzano il comportamento degli spezzoni di cavo e dei magneti che raffreddarono gli entusiasmi sulle applicazioni della superconduttività per ottenere alti campi magnetici e quindi per tutte le applicazioni nell'elettrotecnica.

1) Fenomeno del "quenching".- Una bobina se alimentata con corrente crescente ad un certo punto transisce e ritorna allo stato normale.

Il fenomeno di transizione comincia in un punto del magnete spesso dove l'induzione magnetica non è massima; al contrario di quanto ci si potreb be aspettare in una logica semplificata. La transizione fase superconduttrice-fase normale si propaga lungo il filo per il calore prodotto a causa del ripristino della resistenza elettrica e si producono sovratensioni e sovrariscaldamenti che possono rovinare o diminuire in modo permanente le proprietà superconduttrici delle bobine a causa di scariche elettriche o di un trattamento termico non desiderato che subiscono i conduttori. Una deposizione di rame elettrolitico sul filo riduce la probabilità di bruciare il filo stesso, mentre un buon isolamento in poliestere o in araldite permette di limitare il danneggiamento per scariche.

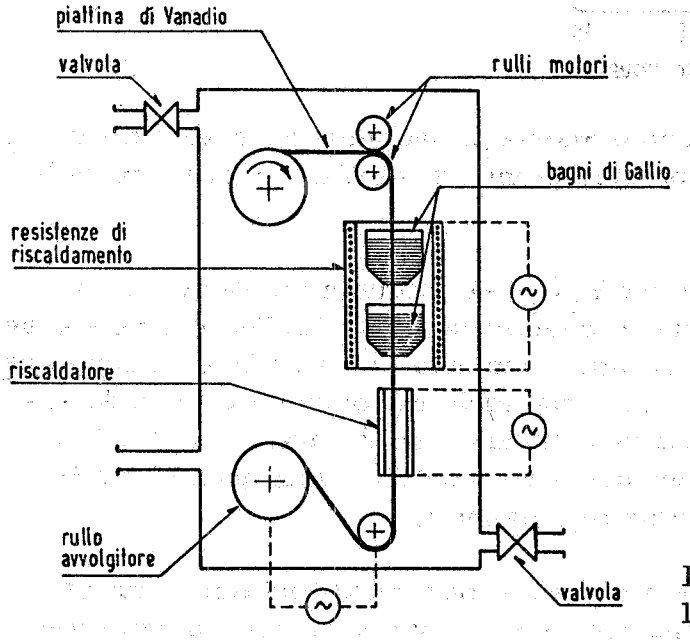



FIG. 9 - Schema di impianto per la produzione di $Va_3Ga$.

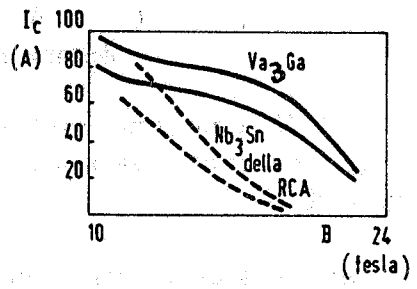



FIG. 10 - Curve caratteristiche del $Va_3Ga$.

2) Fenomeno di degradazione .- Avvolgendo il filo in bobina si ha una diminuzione del valore delle correnti critiche che può sopportare ad un certo campo magnetico: la degradazione del filo è più sentita ad induzioni basse (1 ÷ 2 tesla). Il fenomeno fu attribuito, per convinzione generale, alla presenza di macchie cattive di filo: la presenza di deposito superficiale di rame elettrolitico diminuisce comunque la entità del fenomeno. Anche l'inserzione di fogli di rame e alluminio isola dal superconduttore con plastica o mediante anodizzazione riduce questo fenomeno. Esso viene ridotto sia nelle bobine a basso coefficiente di riempimento sia in quelle impregnate con araldite specie se caricata con polvere di $Al_2O_3$ che ne aumenta il coefficiente di trasmissione termica.

3) Fenomeno del training. - Talvolta se si porta alla transizione più volte di seguito un magnete ed uno spezzone di filo la corrente critica aumenta.

Si.ottengono andamenti del tipo indicati in Fig. 11.

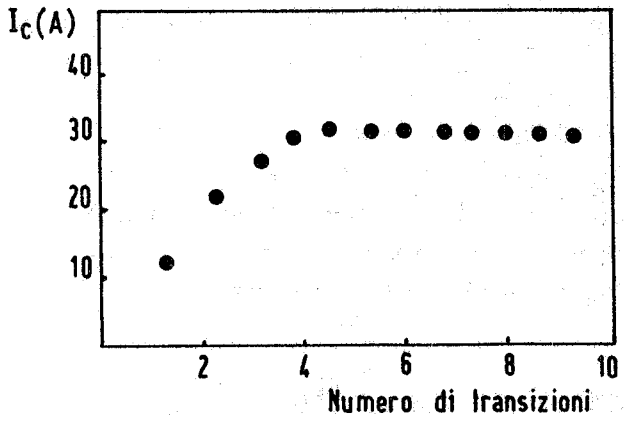



FIG. 11 - Andamento della corrente critica in funzione del numero delle transizioni.

Il fenomeno è più o meno evidente a seconda dei materiali utilizzati per costruire la bobina: è particolarmente sentito nei fili o piccole bobine di Nb Zr.

4) Fenomeno della differente curva $H_c(I_c)$ se ottenuta con H = cost od I = cost. - Un altro fatto singolare è questo: la curva $I_c(Hc)$ è diversa se ottenuta fissando vari valori di campo e facendo transire lo spezzone crescendo la corrente o viceversa, cioè fissando la corrente e facendo salire il campo. Le differenze possono essere anche forti, del 20÷30% sul valore della corrente. Differenze sono riscontrabili quando I e H variano contemporaneamente come nei magneti.

5) "Flux Jump". - Nell'eccitare magneti superconduttori con correnti lentamente crescenti, si possono mettere in evidenza sperimentalmente brusche variazioni del campo magnetico sia rilevando la tensione ai capi di una bobina di peak up messa nel campo sia mediante il rilievo della tensione ai capi di settori dell'avvolgimento principale. Gli stessi salti di flusso si possono vedere se si immerge la bobina percorsa da corrente costante in un campo magnetico esterno crescente nel tempo. Si ottengono diagrammi del tipo di Figg. 12 e 13.

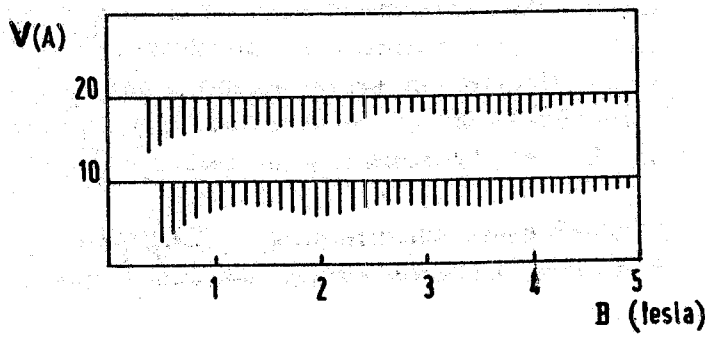



FIG. 12 - "Salti" di tensione per diversi valori della corrente nella bobina.

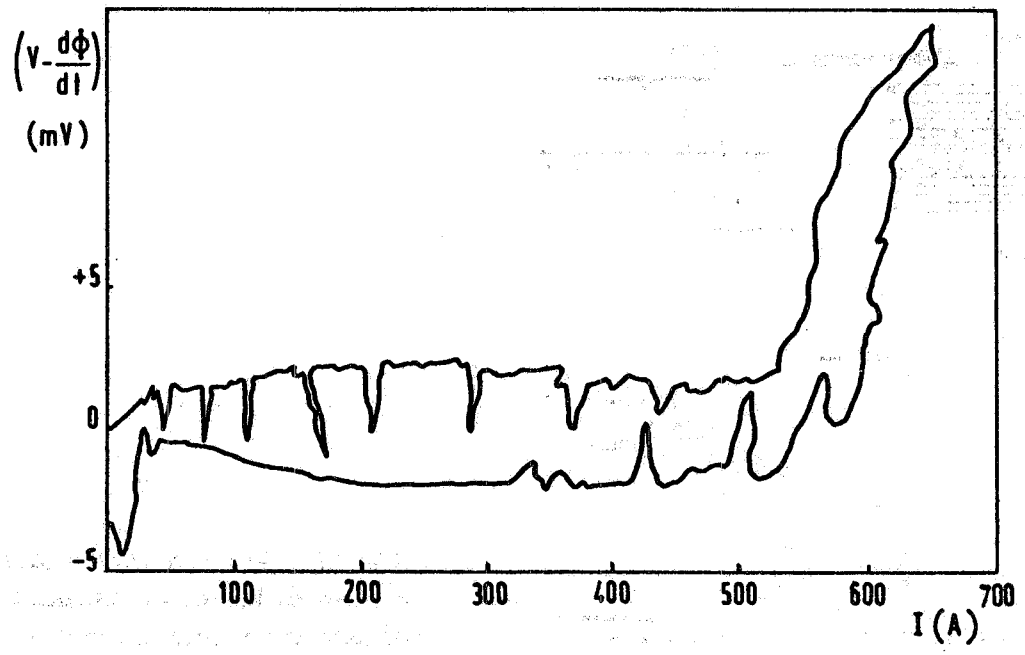



FIG. 13 Tensione ai capi della bobina di peak up in funzione della corrente crescente con la velocità di 2 A/sec.

I salti più grossi di campo (di tensione ai capi della bobina) sono ai campi bassi e non ai campi massimi ove si rarefanno e diminuiscono di valore.

I "Flux Jumps" sono rilevabili in geometrie più semplici come in "tori" di NbSn o in cilindri ove il campo B nel punto centrale, in funzione di un campo H esterno, ha andamento analogo a quello indicato in Fig. 14 a) e b).

Salti di flusso dello stesso tipo possono in particolare condizione essere provocati con riscaldamenti locali del conduttore di tipo impulsivo (v. Fig. 15 a) e b)).

6) Diversi tipi di comportamento dei magneti sotto il profilo della stabilità. - In base al comporamento alla transizione si trovano tre tipi di magneti: stabili, parzialmente stabili e instabili. In Fig. 16 sono illustrati i tre comportamenti.

L'esperienza mette in evidenza che il differente comportamento dipende da molti fattori come il tipo di curva campo-corrente critica, la dimensione del magnete e l'efficificienza del raffreddamento. Quello che si cerca ora di fare, almeno nelle costruzioni di grossi magneti, è di realizzare un comportamento stabile.

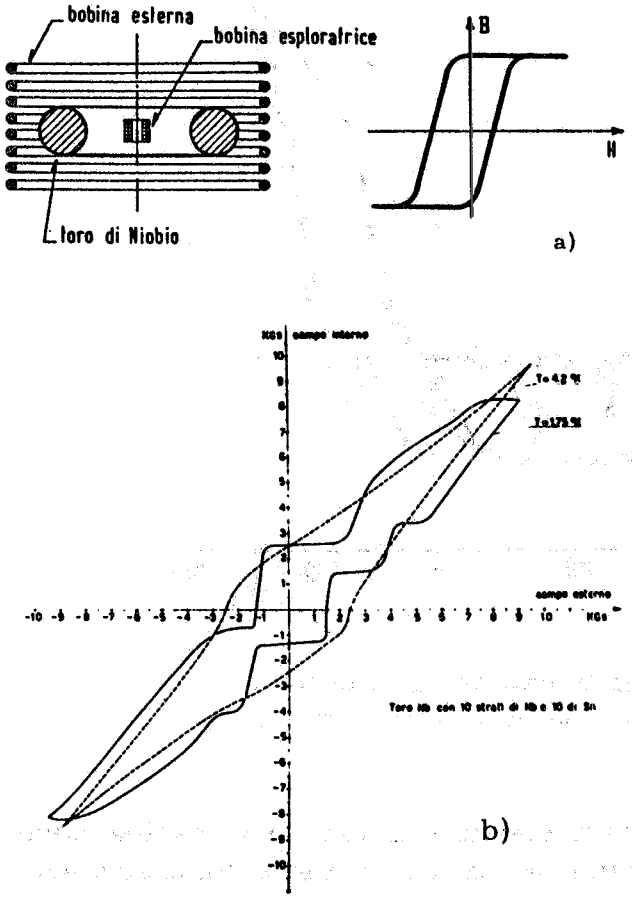



FIG. 14 - Ciclo d'isteresi per un toro di NbSn; a) superconduttore di prima specie: comportamento regolare, b) dopo stagnatura si è formata una pellicola di superconduttore "hard" e compaiono i "flux--jump".

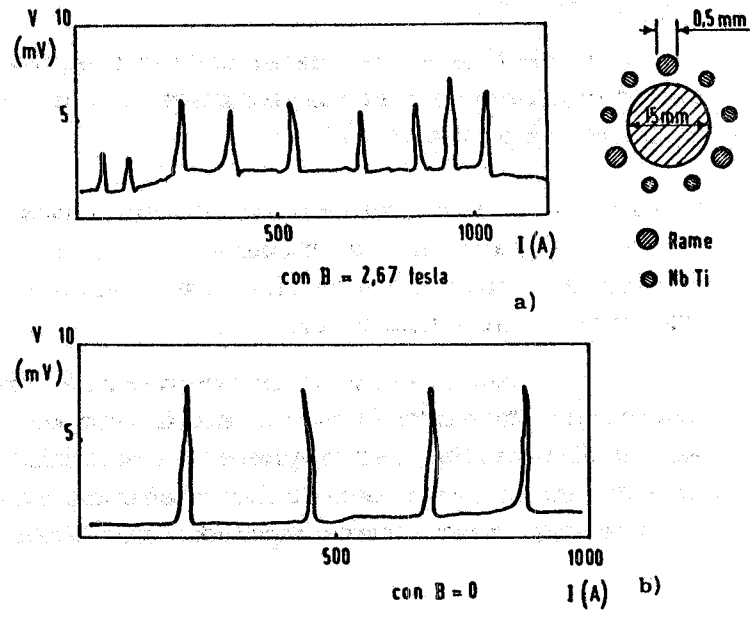



FIG. 15 - Salti di flusso provocati con riscaldamento locale del conduttore di tipo impulsivo; a) con campo magnetico esterno, b) senza campo magnetico esterno.

Ricordiamo che anche magneti criogenici che utilizzano conduttore normale possono presentare comportamenti analoghi, cioè essere stabili, instabili, semistabili.

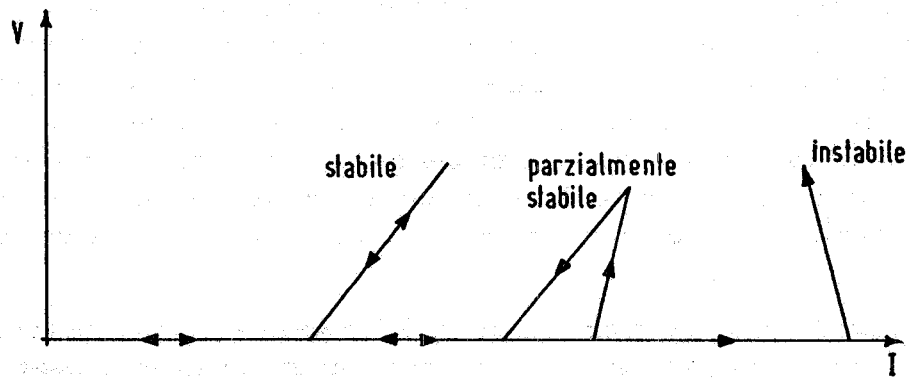



FIG. 16 - Diversi tipi di comportamento alla transizione dei magneti.

7) Anomalie nella funzione $I_c(H_c)$. - Talvolta il filo superconduttore presenta degli andamenti di $I_c(H_c)$ di tipo anomalo indicato in Fig. 17 ove la corrente critica è maggiore ad induzioni critiche più alte.

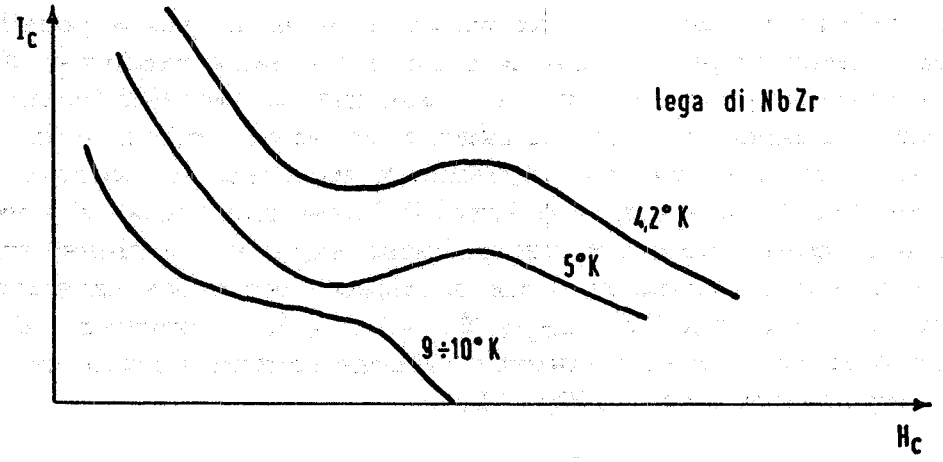



FIG. 17 - Andamenti anomali nel filo superconduttore di $I_c(H_c)$.

8) Campi magnetici residui. - Un altro fenomeno riscontrato nei magneti superconduttori è che quando si riporta a zero la corrente del magnete dopo averla portata a valori di temperatura elevati vicino a quelli critici (maggiori o minori) rimane un campo magnetico residuo di qualche centinaia e anche di qualche migliaia di gauss (il valore e la distribuzione spaziale del campo venendo a dipendere dal materiale superconduttore usato, dalla

forma del magnete e dall'andamento nel tempo dell'eccitazione). Questo campo residuo tende a diminuire con tempi di rilassamento di parecchie ore e giorni (questo rilassamento l'abbiamo visto anche nell'esercizio di magneti superconduttori che si usano presso i Laboratori di Frascati).

A questo punto si diffuse un certo scoraggiamento tra i costruttori di magneti che, progettati e costruiti, risultavano di caratteristiche nettamente inferiori a quelle previste. Si cominciò a studiare il perchè di tutti i fenomeni che caratterizzavano il comportamento dei magneti e degli spezzoni di cavo e si cercò di migliorare la qualità del materiale in modo da rendere più attendibili le previsioni di progetto. Si cercò la diagnosi e la terapia: la cura si ottiene con quello che si chiama la stabilizzazione del materiale.

La stabilizzazione eleva il costo del magnete specie quando si tratta di realizzare magneti piccoli, ma non rappresenta un troppo grande onere per magneti di grandi dimensioni ove vi è già, per ragioni di resistenza meccanica, un limite massimo nel valore della densità di corrente.

Esaminiamo ora i modelli del meccanismo di trasporto delle correnti nei superconduttori che permettono di interpretare almeno qualitativamente i fenomeni ora elencati.

Il comportamento dei superconduttori di seconda specie è stato oggetto di studi teorici e sperimentali dopo l'ultima guerra mondiale e soprattutto nell'ultimo decennio, da quando si è instaurata la possibilità di realizzare magneti per alti campi proprio con superconduttori di questo tipo. Il risultato di questi studi si riassume nel modello fenomenologico seguente. Quando un lungo cilindro di un superconduttore di seconda specie si trova in un campo magnetico H parallelo al suo asse ed inferiore ad $Hc_1$ (primo campo critico) il flusso non entra nel superconduttore; quando questo valore di campo viene superato, il flusso entra sotto forma di vortici quantizzati che si possono schematizzare come nuclei di materiali normali di raggio $\xi_0 (< \lambda)$ ($\xi_0$ la lunghezza di coerenza degli elettroni superconduttori), intorno ai quali ruotano correnti nel mezzo superconduttore (v. Fig. 18).

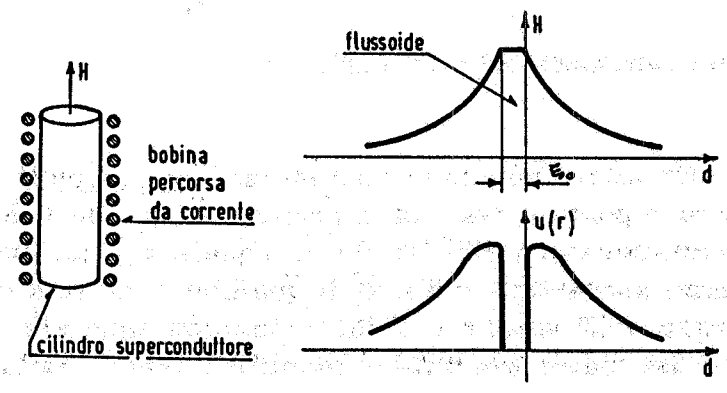



FIG. 18 - Andamento del campo magnetico H e della densità di corrente u(r) in un "flussoide".

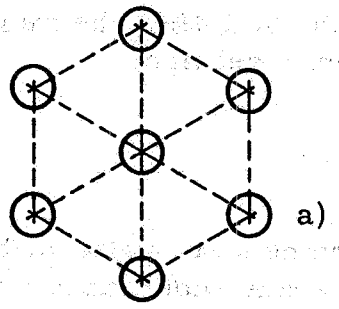
Ogni vortice porta un quanto di flusso pari a $2.1 \times 10^{-15}$ Wb.

Questo modello è stato proposto e studiato da Abrikosov e successivamente studiato con maggior dettaglio da Goodman.

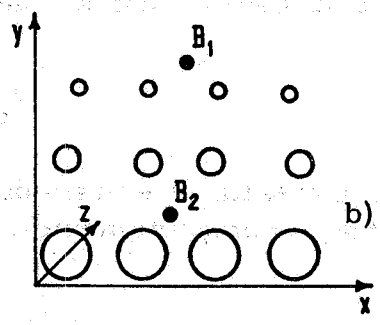
Affinchè un superconduttore di seconda specie porti corrente media non nulla è necessario che vi sia un gradiente dei vortici (v. Figura 19).

Questa disposizione è energicamente non favorevole e quindi instabile se un "qualche cosa" non ancora questi flussoidi. Anderson e Gorter suggerirono e dimostrarono che inomogenità, impurezze e dislocazioni possono comportarsi come barriere energetiche al libero moto delle linee vorticali permettendo così una corrente diversa da zero.

Se però la forza di Lorentz o la forza che nasce dall'iterazione tra i flussoidi supera le forze di ancoraggio, si ha uno spostamento a salti di vortici e quindi decadimenti di correnti o quanto meno una ridistribuzione della corrente nel superconduttore.




In Un superconduttore di 2ª specie che non porta corrente i "flussoidi" sono distanziati ad intervalli regolari: il che corrisponde alla condizione di minore energia del sistema.




Un reticolo di "flussoidi" variamente distanziati è indice di trasporto di corrente. Infatti il campo medio di induzione è pari a

$$\phi_o \, n_1 = B_1; \qquad \phi_o \, n_2 = B_2$$

dove $n_1$ ed $n_2$ sono le Densità di flusso per unità di area.

$$\text{rot} \frac{B}{\mu_o} = u_{\text{medio}} = -\frac{dB_2}{dy} = -\phi_o \frac{dn}{dy} \neq 0$$

$\phi_o = 2 \times 10^{-15}$ tesla = quanto di flusso

$n_i$ = numero di vortici (flussoidi).

FIG. 19 - Reticolo di vortici (= flussoidi) in un superconduttore di 2ª specie - a) il superconduttore non porta corrente, b) il superconduttore porta corrente.

A temperatura finita T le espulsioni di flussoidi possono essere attivate termicamente con una probabilità di espulsione p proporzionale a exp(- Fo/Ka T) dove Fo è l'energia di ancoraggio, Ka è la costante di Boltzmann e T la temperatura assoluta. La forza di Lorentz è proporzionale a J. B. (J densità di corrente macroscopica e B induzione) per cui in presenza di un campo magnetico la probabilità di espulsione di un vortice diventa proporzionale a:

$$\exp\left(-\frac{Fo-JB}{Ka\,T}\right)$$

e da piccola questa probabilità di espulsione diventa molto grande quanto più JB tende a Fo.

Questo modello permette di interpretare almeno semiquantitativamente il comportamento dei magneti e degli spezzoni di conduttori superconduttori.

La corrente critica in funzione del campo magnetico come conseguenza di questa teoria è data dalla relazione

$$J_c = \frac{Fo}{Hc}$$

In realtà si è visto da diversi autori che la $J_c(Hc)$ che meglio interpreta il comportamento dei superconduttori è del tipo:

$$J_c = \frac{1}{H_c + Ho} \quad (\text{con } Ho = \text{cost})$$

Questa formula è giustificata dal fatto che a sua volta anche Fo è funzione del campo magnetico e della corrente che modificano i potenziali di ancoraggio.

In un cilindro superconduttore all'aumentare del campo si ottengono come conseguenza della formula sopra scritta distribuzioni di corrente e di campo come indicato in Fig. 20 (la corrente percorre l'asse del cilindro e il campo magnetico è azimutale; o il campo magnetico è assiale e la corrente è azimutale).

Come si vede la corrente penetra all'aumentare del campo nel superconduttore attraverso una serie di stati critici essendo punto per punto soddisfatta la relazione

$$H_s(x) = \int_x^{\infty} J_c(H)\,dx$$

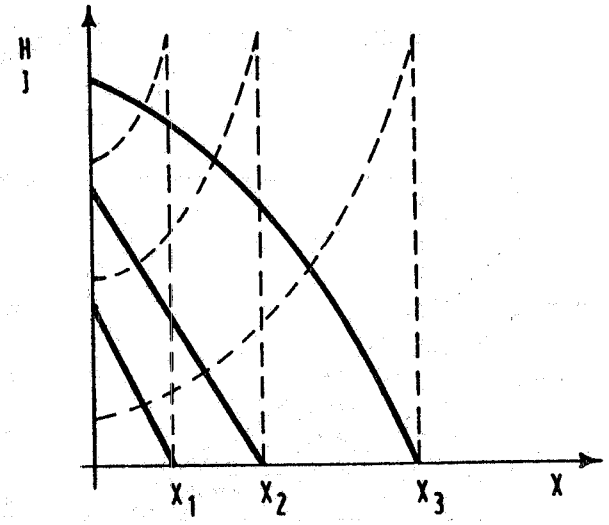



FIG. 20 - Distribuzione di corrente e di campo in un cilindro superconduttore (— H; - - - J).

Così in un filo superconduttore o in un magnete a molte spire cilindriche e concentriche si hanno rispettivamente situazioni descritte nelle Figg. 21 e 22.

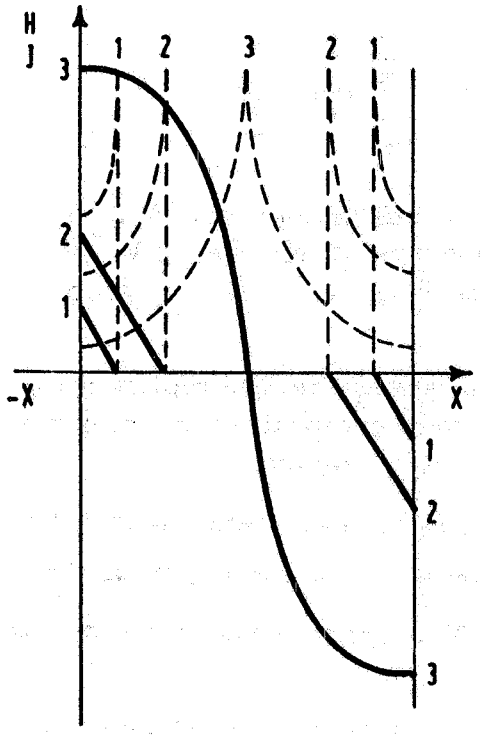



FIG. 21 - Distribuzione della corrente e del campo in un filo superconduttore (—H; - - -J).

Come si può vedere la distribuzione del campo è diversa a seconda se il campo è crescente o decrescente. Infatti se partendo da valori alti il campo diminuisce la corrente comincia ad abbassarsi sulla superficie interna dei cilindri che costituiscono la parete dei conduttori poichè nel transitorio le variazioni di campo si propagano dalla superficie del conduttore verso l'interno e quando la corrente complessiva si riduce a zero rimangono sempre le correnti diamagnetiche.

Questi diagrammi sono stati ricavati con l'ipotesi che la temperatura rimanga costante durante le variazioni di campo.

In realtà quando la distribuzione di corrente cambia nel superconduttore si hanno dissipazioni locali con conseguente riscaldamento. Gli ordini di grandezza di questa dissipazione W per unità di superficie si possono calcolare facilmente nel caso in cui ci si riferisce a superfici cilindriche: infatti è (v. Fig. 23) per un cilindro di altezza unitaria:

$$dW(x) = J_c \, \Delta x \int_0^{\infty} E \, dt = J_c \, dx \int_x^X dB(x)\, dx$$

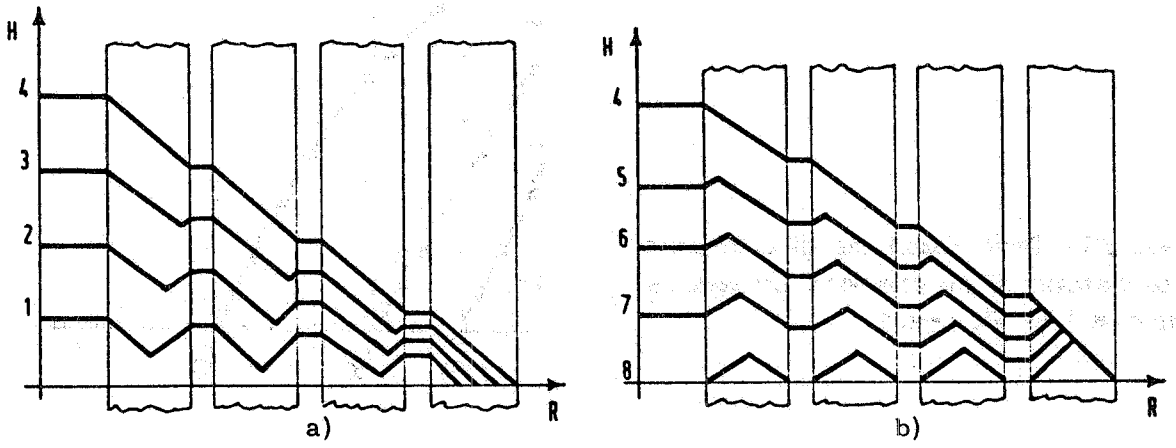



FIG. 22 - Distribuzione della corrente e del campo in un magnete a spire concentriche.

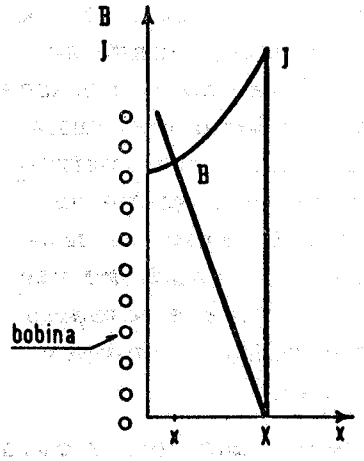



FIG. 23 - Andamento di B e di J in un conduttore cilindrico.

La dissipazione totale ad una variazione di B(x) è:

$$dW = \int_0^X J_c \, dx \int_x^X dB(x)\, dx$$

A seconda delle ipotesi sull'andamento di $J_c(H)$ si ottiene il corrispondente valore per $\Delta W$. Se si assume $J_c$ = cost si ha $B(x) = J_c(X-x)$ e i calcoli si semplificano.

Anche con una ipotesi così semplificata i ragionamenti che seguono permettono di interpretare il comportamento dei magneti.

Se $J_c$ = cost e la corrente penetra in tutto lo spessore del superconduttore $W = (2/3)\mu_o J_c^2 X^3 = (2/3)^2 I^2 X \mu_o$ $I = J_c X$ = corrente per unità di altezza del superconduttore.

Per vedere l'ordine di grandezza della dissipazione si può assumere $J = 10^5$ Amp/cm$^2$ e X = 1 mm.

A questi valori corrisponde un $B_c = 0.63$ tesla: si ottiene una dissipazione di $1.5 \times 10^{-1}$ Joule/cm$^3$. Se si presuppone completamente adiabatico il fenomeno si hanno sovratemperature dell'ordine di 12° (il materiale che si considera è il $Nb_3Sn$). Se lo spessore del conduttore

crescesse la situazione diventerebbe peggiore.

Per vedere in che limite è adiabatico il fenomeno bisogna confrontare i coefficienti di diffusione termica $D_{th}$ e magnetica $D_m$ del materiale definiti dalle equazioni seguenti che regolano la trasmissione dell'induzione magnetica B e della temperatura T

$$\frac{d^2B}{dx^2} D_m + \frac{dB}{dt} = 0 \qquad D_m = \mu_o \rho$$

dove $\rho$ è la resistività del materiale

$$\frac{d^2T}{dx^2} D_{th} + \frac{dT}{dt} = 0 \qquad D_{th} = K/C$$

dove K è il coefficiente di trasmissione termica e C il calore specifico

Se $D_m > D_{th}$ il campo magnetico si diffonde più velocemente del calore e il comportamento è adiabatico (si hanno cioè sensibili aumenti di temperatura). Se $D_m < D_{th}$ il comportamento è isotermico cioè il raffreddamento è efficace.

Di fatto è vero il primo caso: cioè l'ordine di grandezza di $D_m$ è:

$D_m = 2 \times 10^3$ cm$^2$/sec per $Nb_3Sn$ (x)

$D_m = 4 \times 10^3$ cm$^2$/sec per NbTi

$D_{th} = 0.1 \div 1$

Queste ora esposte sono le basi teoriche che permettono di spiegare molti aspetti del comportamento dei superconduttori per magneti.

Se mandiamo corrente crescente nel superconduttore si ha un aumento di temperatura locale che a sua volta crea una diminuzione della corrente critica e spinge maggiormente la corrente a distribuirsi verso l'interno e provoca altra dissipazione e riscaldamento. Il punto ove vi è la massima dissipazione nel materiale si trova ove è massimo $H_c(J_c) \times J_c$; questo punto non è necessariamente il punto ove è massimo il campo. Ciò può spiegare perchè le transizioni catastrofiche nei primi magneti avvenivano in punti ove il campo era intermedio e non ove era massimo.

---

(x) - Questi dati molto incerti si riferiscono al NbSn nello stato normale. Nella letteratura si trovano riportati valori anche molto più bassi e cioè dell'ordine $10 \div 20$ cm$^2$/sec e dipendono dalle condizioni in cui si fa lavorare il materiale.

Il fenomeno quindi è complesso e per il suo trattamento sarebbe necessario conoscere $J_c$, K e C in funzione della temperatura. Si possono ricavare criteri di stabilità approssimati. Si introduce il concetto di suscettività incrementale espressa come $d\phi/dH$ cioè come variazione del flusso (v. Fig. 23) nel superconduttore quando si aumenta il campo magnetico.

Tenendo conto della dissipazione e dei riscaldamenti locali assumendo $J_c = J_c(T)$ non dipendenti da H si ottiene (criterio di Hancox):

$$\frac{d\phi}{dH} = \beta \operatorname{tg} \frac{\delta}{\beta} \qquad \text{ove} \qquad \beta^{-1} = \frac{4\pi J_c \left(-\frac{\partial J_c}{\partial T} \mu_o\right)^{1/2}}{C}$$

dove rappresenta la penetrazione della corrente nel superconduttore. Quando $\delta/\beta = \pi/2$ si ha instabilità. Nel caso di un cilindro si ha $H/J_c = \delta$ per cui la formula ora trovata si traduce nella relazione:

$$H = \frac{1}{8} \frac{C}{\left(\mu_o \frac{\partial J_c}{\partial T}\right)^{1/2}}$$

trovata da Hancox, Shapira e Neuringer. Queste considerazioni portano ad introdurre il concetto di filo intrinsecamente stabile cioè di diametro d così sottile per cui la $d\phi/dH$ non diventa mai infinita.

Usando un campione cilindrico di Nb÷Zr 25% sono stati misurati i campi a cui avvengono i salti di flussi e si è ottenuto un accordo con la formula ora trovata: cioè quella per cui si ha:

$$\frac{\delta}{\beta} = \frac{\pi}{2} (2i+1)$$

Naturalmente cambiano le espressioni e gli ordini di grandezza che si hanno per superconduttori in stretto contatto con metalli normali o porosi per cui è garantito il contatto con elio liquido: per questi tipi di cavi si stabiliscono con gli stessi criteri e tipi di ragionamento i criteri di stabilità.

Esaminiamo ora come si può procedere per prevedere in sede di progetto il comportamento di un filo superconduttore stabilizzato con metallo normale. L'equazione differenziale per valutare l'andamento della temperatura $T_c$ di un conduttore percorso da corrente perpendicolare ad un campo magnetico ed immerso in un bagno di elio è la seguente (vedi Fig. 24).

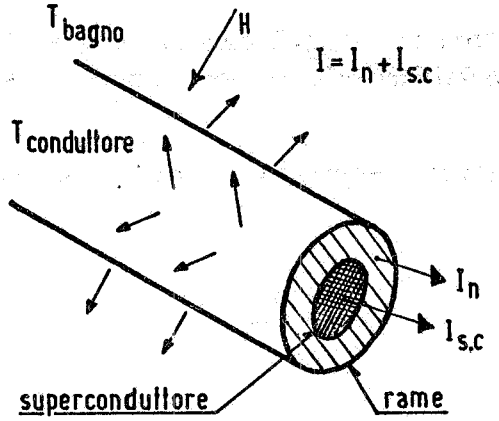



FIG. 24 - Filo superconduttore stabilizzato con metallo normale ed immerso in un bagno di elio.

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}(K_s A_s + A_m K_m) - hp(A_s + A_m)^{1/2}\theta +$$

$$+ \left[J_s^2 \rho_s A_s + J_s^2 A_m \frac{\rho_s^2}{\rho_m}\right] = \left[\frac{A_s}{D_{ths}} K_s + \frac{A_m K_m}{D_{thm}}\right] \frac{d\theta}{dt}$$

ove $\theta = T_c - T_b$ rappresenta la differenza di temperatura tra conduttore e bagno, $J_s$ la densità di corrente nel conduttore, $D_{ths}$ la diffusione termica nel superconduttore, $D_{thm}$ la diffusione termica nel conduttore normale, hp il coefficiente di trasmissione termica dal superconduttore e dal conduttore normale all'elio.

Il primo termine nel primo membro rappresenta la trasmissione assiale del calore, il secondo termine la trasmissione del calore al bagno di elio ed il terzo la dissipazione locale per effetto Joule per unità di lunghezza.

Il secondo membro rappresenta l'aumento di temperatura del conduttore.

Si possono fare diverse ipotesi sul valore di $\rho_s$ e stabilire diversi procedimenti per arrivare ad un criterio di stabilità.

Per valutare la dissipazione per effetto Joule si presuppone che fino a quando la corrente nel superconduttore $I_s$ si mantiene sotto un valore critico $I_c$ non vi sia caduta di tensione nel superconduttore; non appena supera questo valore nasce una caduta di tensione per unità di lunghezza (regime di flux-flow) pari a:

$$\frac{dv_s}{dz} = -\frac{\rho_s}{A_s}(I_s - I_c); \quad \rho_s = \rho_{sn}\frac{H}{H_{c2(o)}}$$

ove H rappresenta il campo magnetico presente, $H_{c2}$ il campo magnetico critico e $\varrho_{sn}$ la resistività del metallo superconduttore con campi magnetici che ripristinano lo stato normale.

In queste ipotesi si ottiene facilmente l'espressione che ci fornisce la corrente $I_m$ nel metallo normale:

$$I_m = \frac{r_s}{r_m + r_s}(I - I_c); \qquad r_s = \frac{\varrho_s}{A_s}$$

$$I_s = \frac{r_m}{r_m + r_s} I + \frac{r_s}{r_m + r_s} I_c; \qquad r_m = \frac{\varrho_m}{A_m}$$

se $r_s >> r_m$ $I_s = I_c$ $I_m = I - I_c$.

Il termine che riguarda le perdite W per unità di lunghezza si riduce a:

$$W = \frac{\varrho_m I_m}{A_m} I = \frac{\varrho_m}{A_m}(I - I_c) I$$

Il criterio di stabilità si stabilisce dall'equazione:

$$W = S' q(\theta); \qquad \theta = T_c - T_b$$

ove

$$\frac{\varrho_m}{A_m}\left[I - I_c(\theta, H)\right] I = S' q(\theta)$$

e S' rappresenta la superficie del conduttore $q(\theta)$ la quantità di calore trasmesso al bagno per unità di superficie.

Per ogni $\theta$ si ricava la I data da:

$$I = \frac{I_c(\theta)}{2} + \sqrt{\frac{I_c^2(\theta)}{4} + p^2} \qquad p^2 = S' \frac{A_m}{\varrho_m} q(\theta)$$

Si ricava quindi un grafico $I(\theta)$. Il valore massimo rappresenta la corrente critica massima (v. Fig. 25).

Nella letteratura sono riportati calcoli della corrente critica di uno spezzone di conduttore stabilizzato in presenza solo del proprio campo magnetico: in questo caso la resistenza elettrica del superconduttore

tore per $I_s > I_c$ si assume invece proporzionale a $I_s - I_c$ e cioè:

$$R = K R_n (I_s - I_c); \qquad I_s > I_c; \qquad R = 0; \qquad I_s < I_c$$

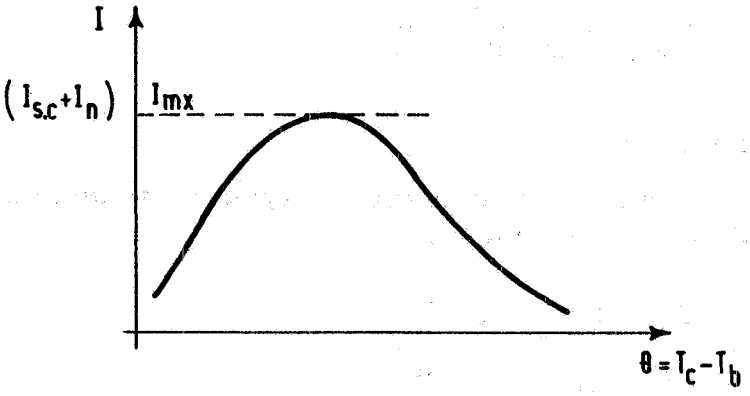



FIG. 25 - Andamento della corrente in funzione del salto di temperatura $\theta = T_c - T_b$.

In altri lavori si ricavano le condizioni di stabilità dinamica. Infatti quando il campo magnetico è variabile anche quando $I < I_c$ e $H \ll H_{c2}$ si hanno dissipazioni dovute al cambiamento della distribuzione di corrente e quindi le dissipazioni vengono valutate con diverse formule e il criterio di stabilità viene determinato calcolando la velocità con cui si trasmette nel conduttore "l'onda di calore" che si provoca in una sezione del superconduttore: questa velocità deve risultare uguale a zero altrimenti l'onda si propaga.

Per calcolare le perdite in tale caso si deve assumere noto lo andamento della densità di corrente critica $J_c$ in funzione del campo magnetico e della temperatura. Ragioniamo per il caso semplificato in cui $J_c$ si possa assumere costante. In tal caso si ha una velocità di penetrazione $v_L$ del campo magnetico (ci si riferisce ad un semispazio superconduttore) pari a (v. Fig. 26):

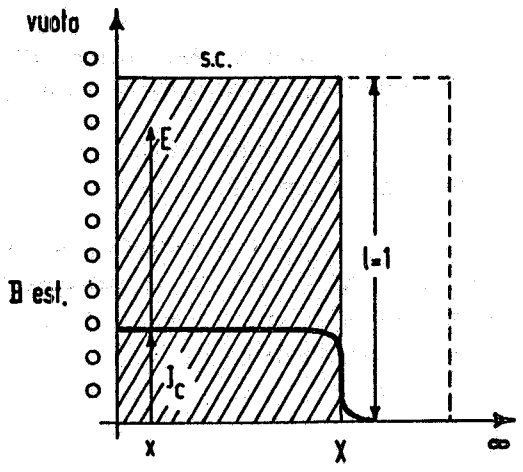



FIG. 26 - Corrente critica $J_c$ e campo elettrico E in un sempispazio superconduttore.

$$v_L = \frac{1}{J_c} \frac{dB_{est}}{dt} \frac{1}{\mu_o}$$

ed una dissipazione P per unità di volume e di tempo pari a:

$$E \times J_c = \frac{1}{\mu_o} B_{int} \frac{dB_{est}}{dt} \frac{x}{X}$$

(E è il campo elettrico locale nel punto x).

Se si confronta con la diffusione del campo magnetico in un conduttore normale che è regolata dall'equazione:

$$\frac{dB_z}{dt} = \frac{\rho_{ns}}{\mu_o} \left( \frac{d^2 B_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dB_z}{dr} \right)$$

si deve assumere quindi un ben determinato valore di $\rho_{ns}$ per ottenere la stessa velocità di penetrazione del superconduttore.

Basta mettere $B = f(r/v_L) - (t)$ nella relazione precedente e si ottiene $_{ns}$. Trascurando il primo termine rispetto al secondo (ciò è stato giustificato per un filo di raggio $r_o$ in un campo magnetico B parallelo all'asse del filo) si ottiene:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\rho_{ns}}{\mu_o} \frac{1}{r} \frac{1}{v_L} \frac{dB}{dr}; \qquad \rho_{ns} = \frac{r_o}{J_c} \frac{dB_{est}}{dt} \frac{1}{\mu_o};$$

$$1 = \frac{\rho_{ns}}{\mu_o} \frac{\mu_o}{r_o} \frac{J_c}{\frac{dB}{dt}}$$

Si ottiene quindi che la resistività equivalente (flux creep) nella zona investita dal flusso è proporzionale a dB/dt.

Naturalmente le cose si complicano assumendo $J_c$ funzione anche della temperatura.

Le equazioni ora descritte permettono di esaminare la stabilità del sistema: nel caso unidimensionale si ricavano per i superconduttori stabilizzati condizioni analoghe a quelle ricavate da Hanco per i superconduttori semplici:

$$J = \frac{1}{dn} \left( Cp\, \delta \frac{ds}{dn} T_o \right)^{1/2}$$

ove $T_o = (J_c)/(dJ_c/dt)$ e $Cp\,\delta$ rappresenta la capacità termica per unità di lunghezza, ds diametro del filo superconduttore e dn diametro del filo normale.

Naturalmente bisogna che le ipotesi siano verificate e cioè che il contatto con metallo normale e superconduttore sia buono dal punto di vista elettrico. Per completare i ragionamenti esposti nella Tabella III sono riportate le caratteristiche fisiche di alcuni materiali di interesse in questi problemi.

Quando l'elio è supercritico cioè appena sotto il punto è probabile che si abbiano trasmissioni termiche molto più alte (anche di un fattore 10) poichè il calore specifico dell'elio diventa molto più alto (vedi Figg. 27 e 28).

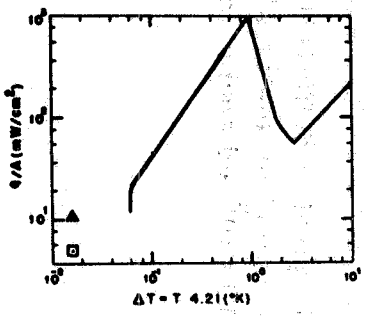



FIG. 27 - Quantità di calore trasmessa in elio liquido in funzione del salto di temperatura tra i conduttori e l'elio.

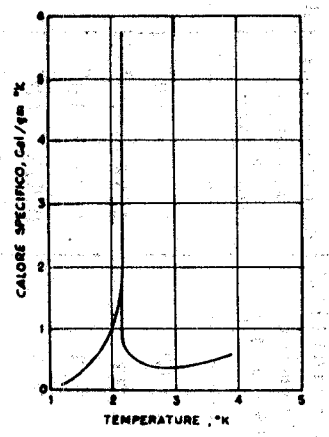



FIG. 28 - Calore specifico dell'elio liquido in funzione della temperatura.

Sulla base delle considerazioni svolte sono stati progettati e costruiti diversi cavi e conduttori di $Nb_3Sn$ Nb Zr, Nb Ti.

In Fig. 29 a); b); c) e d) sono riportati gli schemi di alcuni cavi.

TABELLA III

| Materiale | Capacita' termica ($Wsec/cm^3$) | Conducibilita' termica ($W/cm^2K$) | Coefficiente di diffusione termica ($cm^2/sec$) | Coefficiente di diffusione magnetica ($cm^2/sec$) | Resistivita' elettrica ($\Omega cm \cdot 10^{-6}$) | $\frac{\gamma_{4,2}}{\gamma_{273}} 10^{-4}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ag 99,9% | $14,3 \cdot 10^{-4}$ | 130 | $9 \cdot 10^{4}$ | 0,08 | 1,47 | 40 |
| Al 99,996% | $7,56 \cdot 10^{-4}$ | 33 | $4,36 \cdot 10^{4}$ | 1,25 | 2,5 | 400 ÷ 5 |
| Cu 9995 | $8,95 \cdot 10^{-4}$ | 2,5 | $0,28 \cdot 10^{4}$ | 0,95 | 1,55 | 5 |
| In 99993 | $87,3 \cdot 10^{-4}$ | 8,5 | $0,573 \cdot 10^{4}$ | 2,47 | 8 | 10 ÷ 30 |
| Na 99999 | $17,1 \cdot 10^{-4}$ | 48 | $38,07 \cdot 10^{4}$ | 0,135 | 4,28 | 3 |
| Pb 99998% | $90,0 \cdot 10^{-4}$ | 22 | $0,24 \cdot 10^{4}$ | 0,32 | | |
| Nb | | | | | 16 | 350(99,3) |
| $Nb_3Sn$ | $11 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | 0,35 | | | |
| NbTi 25÷22% | $1,6 \cdot 10^{-4}$ | $0,8 \cdot 10^{-3}$ | 5,4 (*) | | | |
| NbTi 60% | $10 \cdot 10^{-4}$ | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | 1,18 | | | |

(x) - Per questi materiali questo coefficiente dipende fortemente dalle condizioni di lavoro: per valori di materiale normale diventa di $10^4$, per valori intermedi di $10 \div 10^2$ ed anche minore.

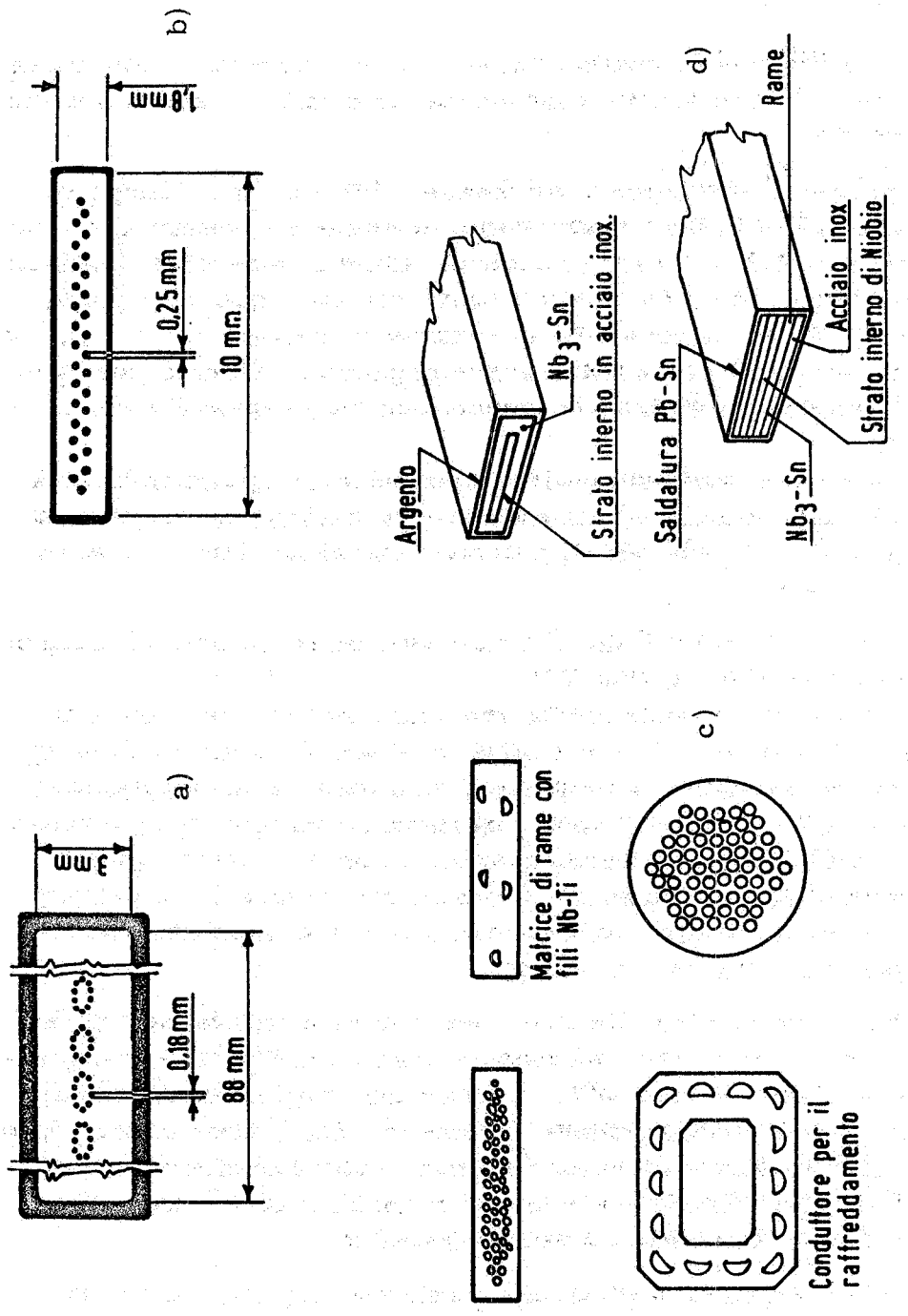



FIG. 29 - Schemi di alcuni cavi.

## II. - LE APPLICAZIONI DELLA SUPERCONDUTTIVITA' NEL CAMPO DELL'ELETTROTECNICA. -

### II.1. - Generalità. -

La possibilità che la superconduttività possa trovare conveniente applicazione nell'elettrotecnica dipende da molti fattori alcuni dei quali sono qui elencati:

a) Dalla geografia economica del paese. Per es. lo sviluppo economico di un paese può o meno imporre di concentrare le centrali di produzione di energia elettrica in località anche distanti parecchie centinaia di chilometri dai luoghi ove l'energia elettrica stessa viene utilizzata. Si può inoltre presentare la necessità di evitare almeno in certe zone densamente popolate di ricorrere a linee aeree di potenza elevata per la distribuzione della energia elettrica rendendo così necessario il ricorso a cavi sotterranei.

Questo sta già accadendo nelle aeree urbane delle grandi città; ma si prevede che il fenomeno si accentuerà tra qualche decina di anni. Per es. a Parigi verso il 2000 non si potranno installare linee aeree entro un raggio di 100 Km.

In Olanda si prevede di dover ricorrere entro 15 anni al trasporto per 200 Km di potenze di 10.000 MW.

Nel Giappone si prevede che la potenza assorbita nell'area di Tokio diventerà di 21 GW nel 1975 e 45 GW nel 1985; la distribuzione di questa potenza dovrà avvenire, a causa dell'alta densità di popolazione nell'area, a mezzo di cavi sotterranei. Situazioni analoghe si presenteranno comunque nei paesi industrializzati con forti concentrazioni urbane sempre naturalmente che non vi siano cambiamenti radicali nel settore dell'energia come per esempio l'orientamento di ciascun utilizzatore a disporre della propria sorgente di energia.

b) Dal costo di produzione dell'energia elettrica in funzione delle dimensioni degli alternatori: con alternatori tradizionali si sono raggiunte recentemente potenze di 1000 MW. Sembra che ragioni economiche consiglino di aumentare ulteriormente la potenza degli alternatori. Sembra che il macchinario superconduttore e i cavi superconduttori in c.c. e in c.a. comincino a diventare convenienti rispetto a quelli normali solo al di sopra di certi valori della potenza installata.

c) Dai costi di impianto e produzione dell'elio liquido e dell'aria liquida. Possiamo suggerire i seguenti dati che permettono di valutare il costo di questi impianti e la spesa di energia elettrica necessaria alla liquefazione.

Costo in lire italiane di un liquefattore di $N_2 = 16 \times 10^3 \, Q^{0,8}$
Costo in lire italiane di un liquefattore di $He = 7.8 \times 10^6 \, Q^{0,5}$

ove Q è la potenza espressa in Watt che il gas liquido deve pompare dal sistema.

Nella Tabella IV sono riportati i rapporti termodinamici per la liquefazione di vari gas a temperatura ambiente.

TABELLA IV

| Gas | temperatura (K°) | rapporto termodinamico | |
|---|---|---|---|
| | | teorico | effettivo |
| Aria | 110 | 3 | 6 + 10 |
| $N_2$ | 77 | 4 | 20 |
| $H_2$ | 24 | 12 | 40 ÷ 100 |
| He | 4,2 | 75 | 300 ÷ 1000 |

Come si vede per raffreddare 1 Watt alla temperatura dello elio liquido è necessario spendere a temperatura ambiente dai 300 ai 1000 Watt. I rapporti migliori si ottengono quando la potenza del liquefattore aumenta: nei liquefattori di elio infatti si passa da 1000 a 300 quando si passa da impianti per produzione di pochi litri di elio liquido all'ora a qualche decina o qualche centinaio. L'impianto più grosso richiesto fino ad ora all'industria è di 1000 litri di elio/ora;

d) Dalle caratteristiche e dai costi dei materiali superconduttori. Fino ad oggi sono stati realizzati materiali superconduttori adatti per applicazioni in c.c. che sono in grado di portare forti correnti anche in presenza di elevati campi magnetici: il prezzo di questi materiali varia da qualche decina di lire per Ampere metro a qualche centinaio di lire a seconda del tipo di materiale, del grado di stabilizzazione e del campo magnetico massimo cui il materiale si comporta ancora come superconduttore. Non sono ancora stati realizzati materiali superconduttori in grado di funzionare in c.a. ed in campi magnetici superiori a qualche decimo di tesla senza perdite.

In campi magnetici di qualche tesla; a 50 Hz e alla temperatura dell'elio liquido presentano perdite minori i conduttori normali come il rame, l'argento, l'alluminio e il sodio del superconduttore come il Nb-Zr o Nb-Ti. Le applicazioni che sono state maggiormente oggetto di studio e che potrebbero in alcuni casi presentare maggiore convenienza rispetto alle soluzioni convenzionali sono:

- magneti per medi ed alti campi magnetici
- macchinario superconduttore
- cavi superconduttori sia in c.c. che in c.a.
- accumulatori di energia realizzati con magneti superconduttori.

Altre applicazioni, come per es. supporti o trasformatori superconduttori, sono state oggetto di studio: ma la loro realizzazione sembra allo stato attuale della tecnica poco conveniente e comunque molto lontana nel tempo.

II.2. - Cavi superconduttori. -

Sono stati recentemente studiati cavi sia in c.c. che in c.a. capaci di trasportare potenze da parecchie centinaia fino a parecchie migliaia di MVA. In generale questi studi si conducono con confronti economici con cavi convenzionali e con quelli (criogenici) realizzati con conduttori normali (rame e alluminio) raffreddati alla temperatura dell'aria liquida o dell'idrogeno liquido.

Le tensioni prescelte per i cavi superconduttori oggetto di questi studi variano da 33 KV a 440 KV. Nonostante l'incompletezza e la incertezza delle analisi economiche, dovute alla mancanza di dati sperimentali sicuri dovuti alla scarsa sperimentazione sull'argomento, sembra che i cavi superconduttori presentino convenienza economica quando la potenza dell'elettrodotto diventa di qualche migliaio di MVA (o MW se in c.c.).

Nelle Figg. 30, 31, 32 sono riportate le sezioni di vari cavi proposti. Nella Fig. 30 è riportata la sezione schematica di un cavo in c.c.

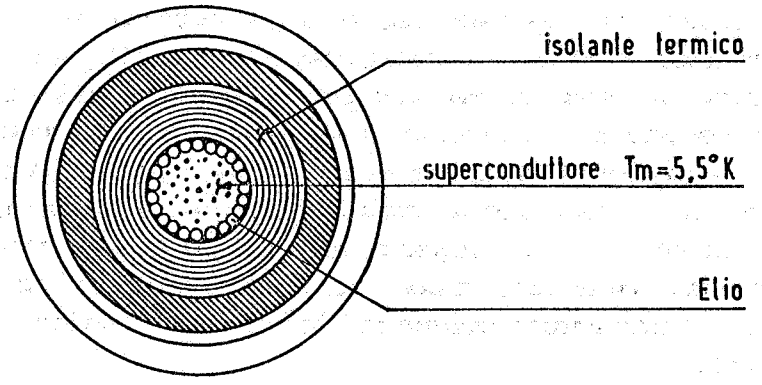



FIG. 30 - Sezione di cavi in corrente continua.

senza raffreddamento intermedio in azoto. Nella Fig. 31 sono riportate sezioni schematiche di cavi in c.a. trifase: nei cavi a) sui singoli conduttori sono esercitate forze elettromagnetiche di frequenza 100 $H_z$ anche considerevoli specie durante eventuali sovracorrenti per guasti, nei cavi c) invece i conduttori sono solo sottoposti ad una pressione radiale e quindi il loro ancoraggio risulta più facile.

In Fig. 32 sono riportate sezioni di cavi ove si può trovare un accenno di soluzione al problema dell'ancoraggio dei conduttori e al problema delle dilatazioni che bisogna assorbire in conduttori particolarmente lunghi sottoposti a salti di temperatura molto elevata (circa 300°)

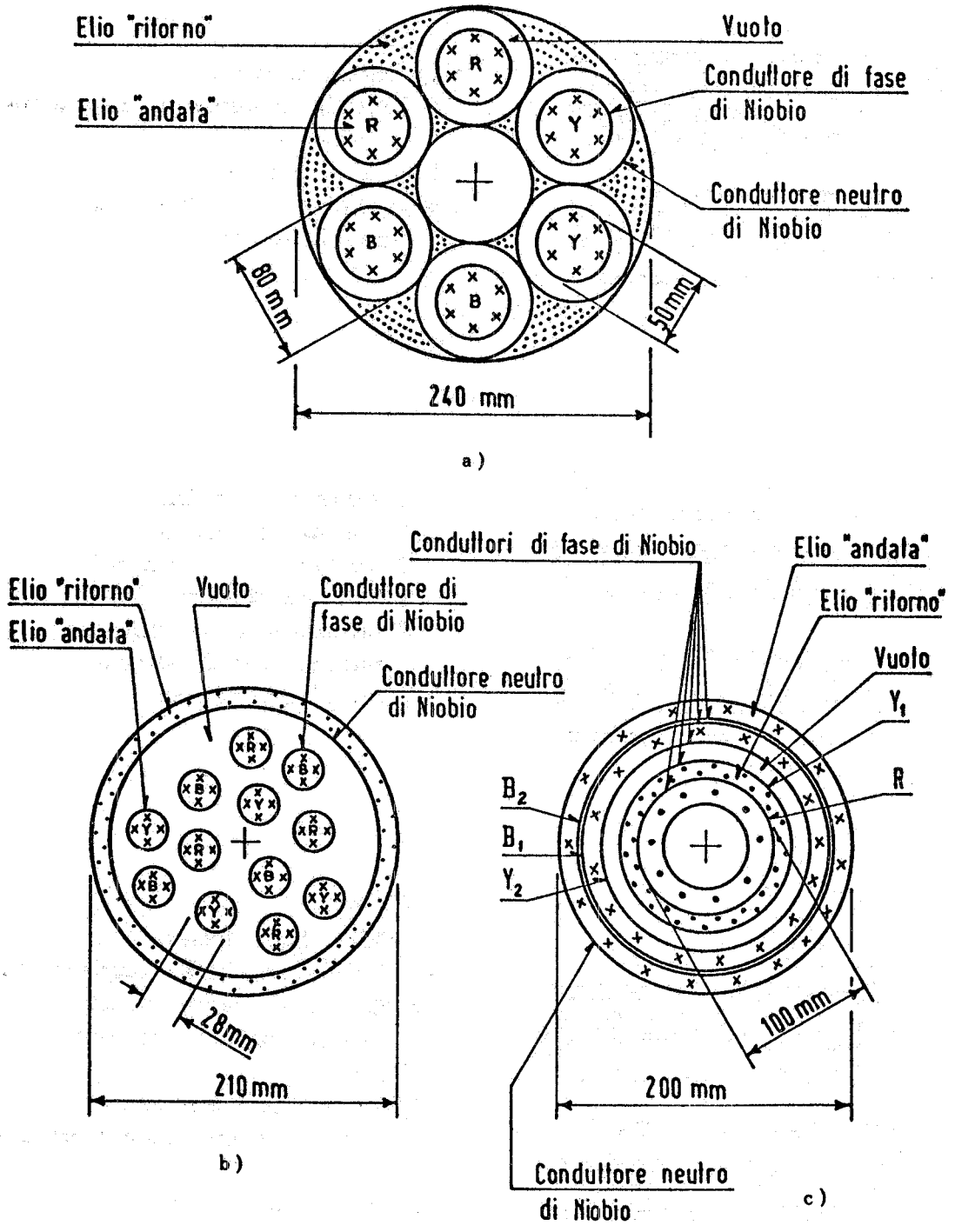
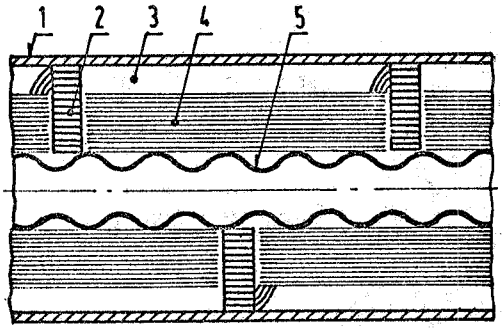
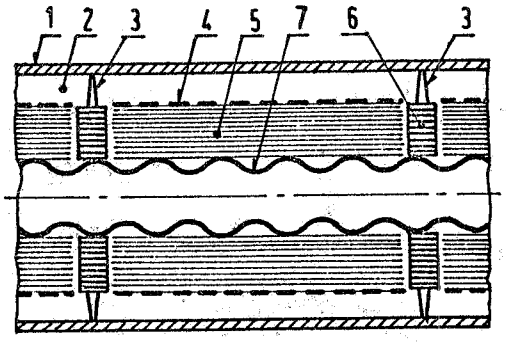


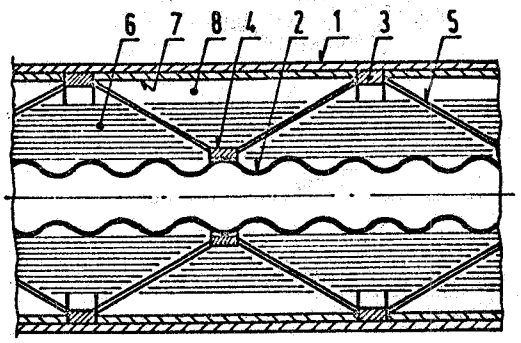

FIG. 31 - Sezioni di cavi in corrente alternata trifase




1 Superficie calda
2 Spirale di supporto in multistrati o plastica
3 Spazio per vuoto
4 Isolamento multistrato
5 Superficie fredda




1 Superficie calda
2 Canale di vuoto
3 Distanziatori singoli
4 Tubo perforato
5 Isolamento multistrato
6 Supporto multistrato
7 Superficie fredda




1 Superficie calda
2 Tubo flessibile a superficie fredda
3 Anello supporto caldo
4 Anello supporto freddo
5 Tubo o filo acc. inox
6 Isolamento multistrato
7 Distanziatore tra gli anelli di supporto
8 Spazio per vuoto

FIG. 32 - Sezioni assiali di cavi

e dove sono impiegati materiali (isolanti, superconduttori, supporti) con coefficienti di dilatazione termica anche molto elevati e diversi tra loro.

Passiamo ora ad esaminare i problemi e le difficoltà che si presentano al tecnico impegnato nella progettazione di questo tipo di cavi.

Una prima limitazione per rendere competitivi i cavi superconduttori con i cavi convenzionali è quella di contenere il consumo di elio liquido entro valori molto piccoli.

Per cavi della potenza superiore al GW questo limite si può fissare in termini di potenza dissipata per metro lineare di cavo, tra qualche decimo di Watt fino ad 1 Watt. Con cifre di questo tipo si può pensare di contenere il costo di esercizio del cavo in 400+1000 lire/KVA Km.

Il consumo di elio per metro lineare di cavo è determinato da quattro termini:

- perdite nel conduttore $W_L$
- perdite nel dielettrico Wd
- perdite per difetto di isolamento termico Wt
- perdite di attrito per mantenere i liquidi refrigeranti (elio) in circolazione $W_p$.

Le perdite nei conduttori sono analizzate diversamente per i cavi in c.a. e per quelli in c.c.

Per i cavi in c.a. ove il conduttore è niobio puro con spessori minori di 2.5/100 mm le perdite sono indicate dai grafici di Fig. 33 che sono riassunti dalla formula:

$$Wc = SK_1 \psi^n$$

dove:

S = perimetro del cavo espresso in metri
$\psi$ = densità lineare espressa in Amp/metro
n = 6.8
$K_1 = 6 \times 10^{-34}$
$W_c$ = potenza lineare espressa in Watt.

Per contenere le perdite entro valori ragionevoli è necessario mantenere le densità lineari di correnti a qualche decina di Amp/mm lineare della periferia del conduttore (per es. 50 Amp/mm al quale valore le perdite risultano inferiori a $8.5 \times 10^{-2}$ Watt/$m^2$ e cioè con 2.67 D Watt/Km con D diametro del conduttore espresso in centimetri). Nei cavi in c.c. si può pensare di aumentare notevolmente la densità di corrente ricorrendo per es. al $Nb_3Sn$ o al NbTi. Bisogna però stare molto attenti a ricorrere a questi tipi di materiali: infatti la presenza di eventuali

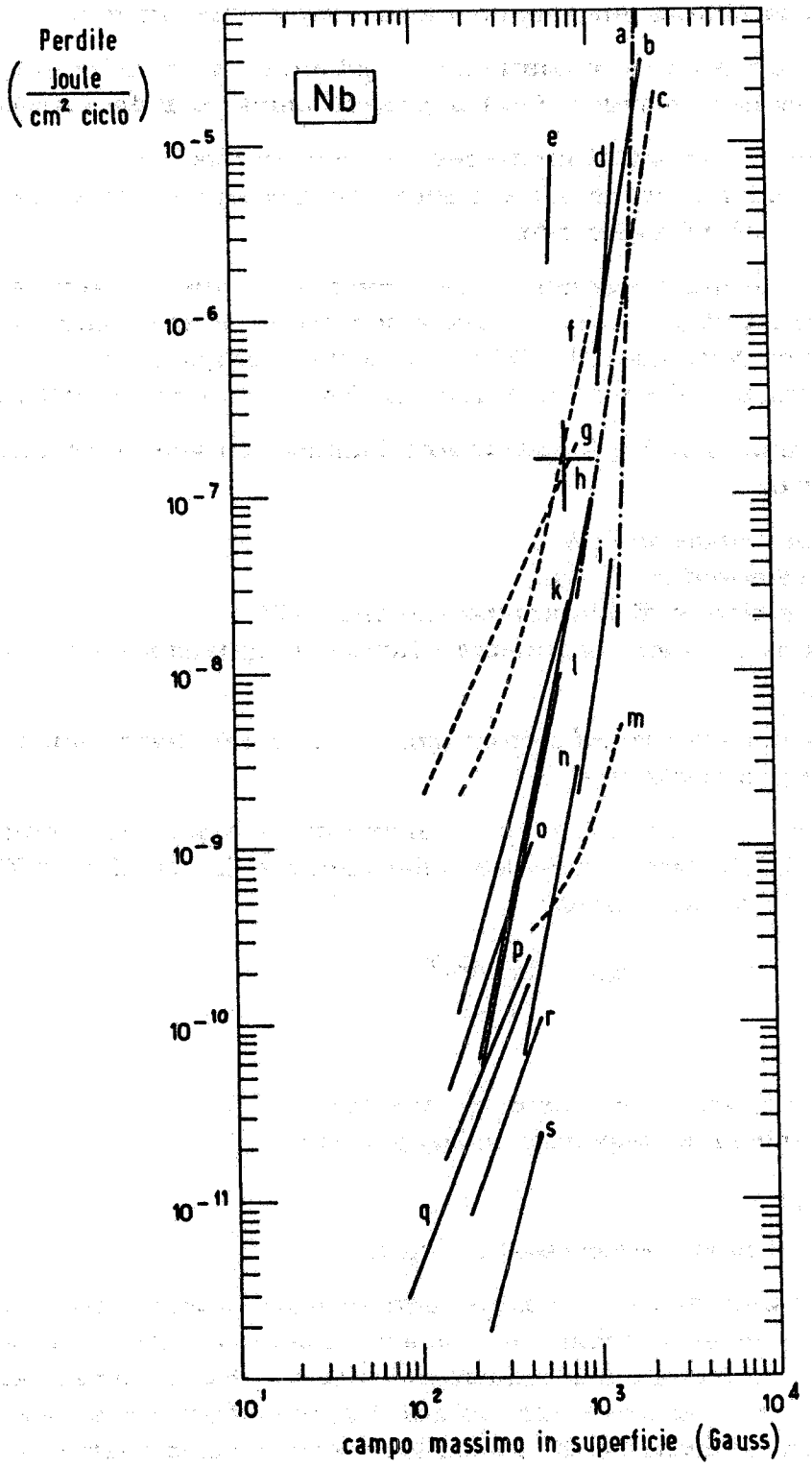



FIG. 33 - Perdite nei cavi in corrente alternata.

armoniche a frequenze industriali introdotte da eventuali cabine di raddrizzamento possono essere fonti di larghe perdite. Infatti come già detto le perdite in c.a. sono più forti in questi materiali superconduttori per alti campi magnetici che nei conduttori normali raffreddati a bassa temperatura.

Le perdite nei dielettrici Wd sono dovute alla conducibilità residua o alle perdite per isteresi dielettrica: naturalmente nei cavi in c.c. è presente solo la prima. Per un cavo di 440000 V basta una conducibilità residua di $10^{-12} \Omega^{-1}$ per metro lineare di cavo per provocare perdite di 0.2 Watt/metro.

Per valutare le perdite per isteresi possiamo affermare che in molti materiali dielettrici l'angolo di perdita si riduce a 4.2°K di un fattore 10 rispetto alla temperatura ambiente.

In Tabella V sono riportati i valori della rigidità dielettrica e di tg $\delta$ per alcuni materiali di interesse per la progettazione dei cavi criogenici e superconduttori.

TABELLA V

| Materiale | Rigidita' dielettrica (Volt/mm) | T (°K) | Angolo di perdita (tg $\delta$) |
|---|---|---|---|
| $N_2$ liquido | 2000 | 77 | |
| $H_2$ liquido | 2000 | 24° | |
| He liquido | 1000 | 4,2 | |
| Polietilene | 50000 | 77 | $10^{-4}$ |
| Carta | 35000 | 27 | $2 \cdot 10^{-3}$ |

In Fig. 34 è riportata in grafico la rigidità dielettrica dell'elio liquido a 4.2°K e a 2.2°K ricavata da vari autori in funzione della distanza tra gli elettrodi.

La discrepanza tra i vari risultati sembra che sia dovuta alla diversa purezza dell'elio: più l'elio è puro più alta è la rigidità dielet-

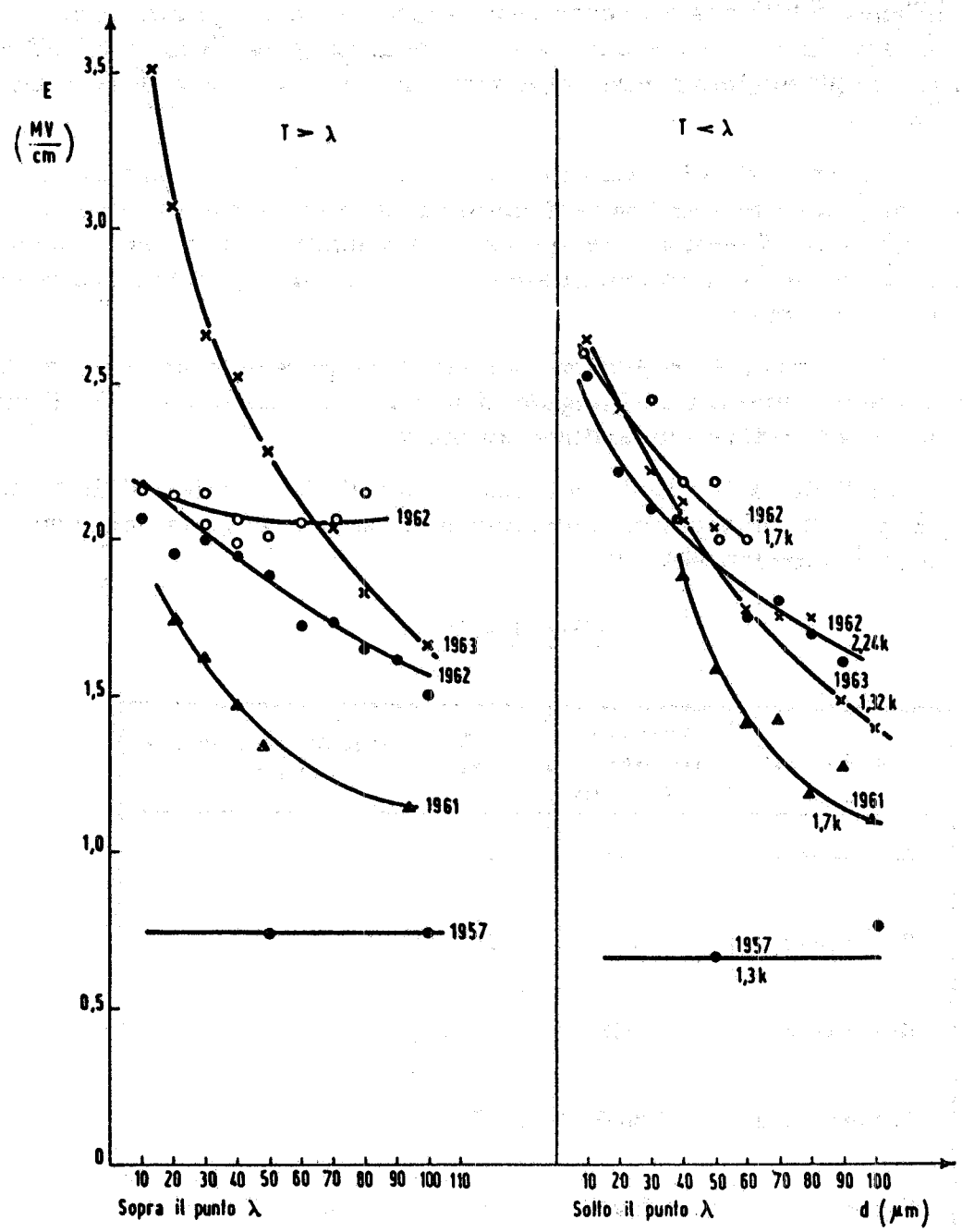



FIG. 34 - Rigidità dielettrica dell'elio liquido a 4.2°K ed a 2.2°K secondo diversi autori in funzione della distanza fra gli elettrodi.

trica. Sembra che l'azoto e l'idrogeno alla temperatura dell'elio liquido solidificando aumentino notevolmente la rigidità dielettrica: però a causa delle dilatazioni termiche tendono a screpolarsi. Anche l'argon aumenta la rigidità dielettrica fino a 20 MV/m.

Un'interessante prospettiva presenta una "lega" di azoto-argon (60% $N_2$) che sembra dare luogo ad un materiale meno fragile e quindi meno soggetto a fratturazione.

La valutazione delle perdite per difetto di isolamento termico è molto incerta perchè bisogna tenere conto anche della trasmissione di calore dei distanziatori. Comunque se si vogliono mantenere le perdite a valori di qualche decimo di Watt/m in elio è necessario ricorrere a intercapedini ove viene fatto vuoto spinto.

In alcune soluzioni tecniche proposte è contemplato un raffreddamento intermedio con $N_2$ liquido, in altre no. Infatti con spessori totali di 25 mm di carta di vetro di 0.5 mm intervallata con fogli di alluminio di 0.05 mm, si può contenere il flusso di calore in 0.21 $W/m^2$ tra temperatura ambiente e l'elio liquido. Si può pensare di usare come isolamento termico anche film di poliestere metallizzato e arricciato per diminuire i punti di contatto tra un foglio e l'altro e quindi la conducibilità termica.

Si può progettare il cavo mantenendo l'energia dissipata per perdite di carico dell'elio entro valori intorno al 10% delle perdite che si hanno per le cause elencate anche sistemando le stazioni di liquefazione dell'elio a distanze di $10 \div 50$ km. Anche le perdite di carico per l'azoto liquido, ove previste, si possono mantenere entro limiti ragionevoli. I condotti dell'elio liquido e dell'azoto devono essere in pressione per evitare il formarsi di fasi miste liquide e gassose; la presenza della fase gassosa ostacolerebbe la trasmissione termica dalla parete al liquido e il regolare flusso del refrigerante causando un aumento delle perdite per gli attriti.

Per dimensionare i condotti di raffreddamento è necessario avere il calore h per unità di peso (sarà espresso in Wh per facilitare i calcoli) al variare della temperatura del liquido (He ed $N_2$). Questi dati sono riportati in Tabella VI; dove sono anche indicate le pressioni necessarie a garantire che non si abbia formazione di fase gassosa.

Nei cavi in c.a. è tollerata una temperatura dell'elio all'uscita del cavo di $5K^o$ poichè la temperatura critica del Nb è relativamente bassa, mentre nei cavi in c.c. può essere tollerata una più alta temperatura dell'elio poichè le temperature critiche dei materiali superconduttori in c.c. sono notevolmente più alte.

TABELLA VI

| Gas | Tmin. (entrata) K° | Tmax. (uscita) K° | h Wh/Kg | Pmin. | Pmax. |
|---|---|---|---|---|---|
| Hl | 4,5 | 5 | 0,8 | 2,6 | 3 |
| | 4,5 | 6 | 6,3 | 2,6 | 5 |
| | 4,5 | 6,5 | 7,2 | 2,6 | 6 |
| | 3,0 | 5 | 2,1 | - | 3 |
| $N_2$ | 80 | 90 | 9,1 | 3,6 | 10 |
| | 80 | 100 | 10,8 | 8,8 | 15 |
| | 80 | 110 | 16,9 | 16,5 | 3 |
| | 80 | 120 | 26 | 27,5 | 34 |
| | 80 | 130 | 50 | 36 | 42 |
| | 80 | 140 | 59 | 36 | 42 |
| | 85 | 90 | 11 | 3,6 | 10 |
| | 65 | 110 | 22,7 | 16,5 | 23 |

Si può porre:

$$M = \frac{qL}{D}\ ; \qquad V = \frac{M}{\gamma}\ ; \qquad \Delta p = \frac{v^2 L}{2gd}\psi\gamma\ ; \qquad d = \frac{4F}{U}$$

ed infine:

$$\frac{F^3}{U} = 9.83 \times 10^{-10}\ \frac{\psi L^3 q^2}{\Delta p \gamma (\Delta h)^2}$$

ove:

- $q$ = quantità di calore da raffreddare per unità di lunghezza e di tempo in W/m;
- $\Delta h$ = calore che il refrigerante può sottrarre, fissate le differenze di temperature in entrata e uscita, in Wh/Kg;
- $L$ = lunghezza del condotto in metri;
- $V$ = portata di refrigerante in volume;
- $M$ = portata di refrigerante in massa;
- $\gamma$ = peso specifico del refrigerante in $Kg/m^3$
- $v$ = velocità del refrigerante in m/sec;
- $\Delta p$ = caduta di pressione nel condotto in atmosfere;
- $d$ = diametro medio del condotto definito dal rapporto tra le sezioni F in metri quadrati e il perimetro U in metri;
- $\psi$ = coefficiente di attrito del fluido.

Con i dati della Tabella VI, assumendo $\psi = 0.05$ i diametri dei condotti di Nb variano tra 40÷250 mm; i valori più grandi si riferiscono a q = 10 W/m e quelli per l'elio tra 30 mm e 400 mm, il diametro più grande riferentesi a un h = 0.8 Wh/Kg e un q = 1 W/m.

Le portate di azoto arrivano a qualche decina di $m^3$ all'ora con differenze di pressione di 6÷7 atmosfere che implicano energie impegnate nell'impianto di refrigerazione di qualche centinaio di KW inferiori di un fattore 2÷4 a quelle che vengono richieste per la circolazione dello elio liquido.

Le pressioni alte nell'azoto sono limitate da considerazioni meccaniche.

In generale possiamo affermare che conviene progettare le stazioni di refrigerazione ogni 40 Km di cavo per i cavi in c.c. e ogni 20 Km di cavo per cavi in c.a. e che è utile progettare un unico liquefattore per l'azoto e l'elio.

Un problema che si pone in modo più grave che nei cavi normali è quello della capacità di portare sovracorrenti e sovratensioni e del conseguente problema di come progettare le protezioni.

In generale nei progetti proposti i cavi superconduttori devono sopportare sovraccarichi di corrente fino a sette volte il valore nominale con dissipazioni durante il transitorio (di durata inferiore al sec.) possibilmente inferiori a 600 $W/m^2$.

Il tempo di ripristino della capacità del cavo deve essere contenuto entro un certo numero di minuti.

La resistenza caratteristica del cavo nei disegni proposti risulta spesso intorno a 10 $\Omega$ e cioè ad 1/3 del valore che si ha nei cavi normali.

Per evitare che le correnti transitorie danneggino il cavo bisogna intervenire in due modi: sovradimensionando il cavo e prevedendo l'intervento dei dispositivi di protezione in tempi molto brevi.

In questo ordine di idee per contenere i danni si dispone in parallelo al superconduttore (di Nb se il cavo è in c.a.) un conduttore di alluminio o di rame od un superconduttore di seconda specie in grado di sopportare per breve tempo la sovracorrente. Questo conduttore ausiliario può essere sistemato entro il tubo di Nb od all'esterno di esso.

Nel primo caso per cavi in c.a. in normale esercizio non diventa sede di correnti parassite, mentre nel secondo caso diventa sede di correnti parassite.

Le perdite nel metallo normale per $m^2$ di superficie vanno calcolate tenendo conto della magnetoresistenza e dell'effetto pelle. Quando

si ha la sovracorrente si presuppone che il superconduttore diventi normale per l'aumento di corrente e del campo magnetico associato.

Da calcoli fatti sembra che sia molto meglio ricorrere ad un "hard" superconduttore piuttosto che al rame o all'alluminio per sopportare l'extra corrente.

Ci si può porre in due ipotesi di lavoro. La prima che l'energia dissipata venga tutta assorbita dal refrigerante (LHe) e l'altra che sia assorbita dal conduttore. Con entrambe le ipotesi bisogna che questa dissipazione non causi danni irreparabili e per questo bisogna che il tempo $\tau_W$ di intervento delle protezioni predisposte allo scopo sia ridotto al minimo.

La condizione nella seconda ipotesi si può porre:

$$h_s < \left(\frac{2}{\mu_o \omega \tau_W}\right)^{1/2} \left[\frac{t}{\delta T_m}\right]^{1/2} \left[\rho T_m^{1/2} \int_o^{T_m} \frac{c_v \, dT}{\sqrt{\rho (T)}}\right]^{1/2}$$

ove:

$h_s$ = densità lineare di corrente nel sec.

$t$ = spessore del metallo normale $> 1.2\, \delta(T_m)$

$\delta(T_m)$ = profondità di penetrazione nel metallo normale alla pulsazione $\omega$ e alla temperatura $T_m$

$C_V$ = calore specifico

$\rho(T)$ = resistività del metallo normale alla temperatura T

$\omega$ = pulsazione

$\tau_W$ = tempo di durata del guasto

$T_m$ = temperatura massima permessa ($< 50^oK$ per evitare sollecitazioni meccaniche troppo elevate causate da rapide deformazioni per dilatazioni termiche).

Per determinare $\tau_W$ bisogna fare ipotesi sul sistema di azione delle protezioni. Se ci si affida alla propagazione dell'aumento di pressione dell'elio che propaga il segnale alla velocità del suono nell'elio (200÷ ÷ 600 m/sec), supponendo distante 15 Km la stazione di rivelazione, dal guasto intercorrono 30 sec.

Durante il transiente si possono avere sovrapressioni nel refrigerante e contrazioni termiche.

Se invece si interviene più rapidamente (certamente questi ri

medi sono utili per superare i danni di un cortocircuito mentre non sono idonei per evitare le sovracorrenti per le oscillazioni pendolari tra generatori di grande potenza con sistemi a elettroluminescenza e cellule fotoelettriche) i danni sono minori. Sono stati realizzati sistemi che intervengono quando la I supera $I_n \sqrt{2}$ ($I_n$ = corrente normale) in tempi di centesimi ed addirittura millesimi di secondo. Se nel cavo si dissipa l'energia magnetica immagazzinata e quella elettrostatica (sensibilmente minore, cioè circa 1/100 di quella magnetica che è di centinaia di Joule per metro) le sovratemperature vengono contenute entro il $12^{o}$; il che implica una messa fuori uso della linea, che deve essere di nuovo raffreddata in 20 minuti.

Se invece si riesce a intervenire in $10^{-4}$ sec, il fuori servizio del cavo potrebbe ridursi a soli 30 sec.

Durante il transitorio le eventuali sovracorrenti fino a 7 volte la corrente nominale provocano sforzi sui conduttori di alcuni tipi di cavo in alternata fino a migliaia di kg/m lineare con frequenze di 100 Hz.

Queste elevate sollecitazioni possono essere causa di seri inconvenienti obbligando per esempio ad aumentare il numero di distanziatori con conseguente peggioramento dell'isolamento termico.

Anche l'impianto di vuoto può essere una causa di danneggiamento del cavo ed adeguate protezioni devono essere predisposte: infatti se il vuoto cala si hanno sovrapressioni per evaporazione rapida dei gas liquefatti e si possono avere scariche per difetto di isolamento.

Due problemi di particolare interesse per i cavi sono:

- raffreddamento iniziale
- adduzione della corrente al cavo.

Il problema del raffreddamento iniziale ha una grandissima importanza e per la spesa e per le difficoltà tecniche che presenta. In un progetto di un cavo per 1000 KVA in c.a. presentato nella letteratura è necessario rimuovere $4 \times 10^{10}$ J ogni 10 Km di cavo di cui il 95% a $77^{o}$K e il 5% alla temperatura dell'elio liquido. Con una portata di 0.2 kg/sec di elio (portata due o tre volte quella richiesta per il normale esercizio) per il raffreddamento occorrerebbero 15 giorni.

Una volta raffreddato l'elio nel cavo il funzionamento del cavo è garantito per 30 minuti anche se viene a mancare il flusso di elio liquido.

La pressione necessaria a far circolare questa quantità di elio sarebbe di 10 kg/cm$^2$ (contro 3 kg/cm$^2$ in condizioni di esercizio). Ma questa valutazione potrebbe non essere giusta perchè vi è la complicazione per il fatto che all'inizio l'elio nel cavo evapora e le perdite di carico nel

resto del tubo diventano più grandi.

Il fronte freddo di elio (e di azoto) si propaga con una certa velocità: le leggi di questa propagazione sono state studiate sperimentalmente solo per corti cavi con forte portata di elio e non per lunghi cavi e piccola portata (L/D 1000). Ancora dati definitivi non sono stati ottenuti.

Per quel che riguarda i terminali si può dire che il problema ha meno importanza per i cavi che per i magneti data la maggiore importanza che ha nel bilancio tecnico economico la linea vera e propria rispetto ai terminali.

Vi sono tre tipi di terminali così classificati da Leroux: connessione elettrica senza recupero, semplicemente collegando i conduttori a temperatura ambiente a quelli alla temperatura dell'elio senza particolari precauzioni.

Connessione elettrica senza recupero totale, facendo passare l'elio che evapora in contro corrente sul cavo di collegamento la conduttura a temperatura ambiente a quella in elio liquido.

Connessione a tre tronchi con raffreddamenti intermedi a T = = 77°K e T = 20°K con $N_2L$ ed $H_2L$.

Le valutazioni teoriche che vengono riportate sono state ottenute sotto l'ipotesi di un andamento della conducibilità elettrica non per un metallo purissimo del tipo Wiedeman-Frenz ma per alluminio reale con rapporto di conducibilità $\gamma 300 / \gamma 4.2 = 1400$ senza però tener conto dello effetto che il campo magnetico ha sulla resistività del materiale. Il calcolo si può impostare tenendo conto e della trasmissione termica e della dissipazione elettrica: si stabilisce così il profilo del conduttore per avere la minima trasmissione di calore nell'elio liquido. Si calcola poi la potenza spesa per ampere trasportati.

I risultati si riassumono nella Tabella VII ove è riportata la potenza reale e teorica spesa a causa delle perdite elettriche e per trasmissione termica che si hanno nelle connessioni.

La potenza reale è stata calcolata con la formula:

$$Q = 7\, q_{N_2L} + 18\, q_{H_2L} + 850\, q_{H_eL}$$

dove $q_i$ rappresenta la potenza dissipata che va a scaldare rispettivamente l'azoto, l'odrogeno e l'elio liquido.

Riportiamo infine il preventivo di spesa fatto per MVA/Km per un cavo trifase da 3000 MVA; 132 KV sia nella soluzione criogenica con

raffreddamento in azoto liquido ed in idrogeno liquido che nella soluzione superconduttrice. La Tabella VIII riporta i vari costi-base ed in Tabella IX sono riportate le proprietà del propilpropilene alle temperature dell'azoto liquido, dell'idrogeno liquido e dell'elio liquido.

TABELLA VII

| Connessioni | Potenza reale (W/A) | Potenza teorica (W/A) |
|---|---|---|
| Connessione senza recupero (300° ÷ 4,2°K) | 20,7 | 3,30 |
| Connessione a recupero (300° ÷ 4,2°K) | 3,5 | 0,42 |
| Connessione a tre tronconi (300÷77; 77÷20; 20÷4,2°K) (1) | 2,9 | 0,58 |

Sulla base di questi dati si è ottenuto un costo per MVA/Km dato dalla Tabella X e si ottengono i diagrammi di quelli riportati in Fig. 35 a) e b).

II.3.- Motori e generatori superconduttori.-

Passiamo ora ad un'altra applicazione interessante e cioè ai motori in c.c. ed ai generatori in c.a. superconduttori.

La produzione di energia elettrica è stata caratterizzata in questi ultimi decenni dall'aumento delle dimensioni dei motori e dei generatori.

La richiesta di energia elettrica nel 2000 sarà parecchie volte l'attuale: questo si può dire con una certa sicurezza se si tiene conto che p. es. negli Stati Uniti in 20 anni la produzione di energia elettrica è aumentata di 4 volte. In 30 anni dovrebbe aumentare di un fattore 8.

Nello stesso periodo la dimensione media dei generatori sincroni è aumentata di 7 volte da 38 MVA a 280 MVA e la dimensione massima è passata a 1000 MVA cioè è aumentata di un fattore 10; e si può prevedere che la massima potenza che dovrebbe raggiungere un generatore

(1) - Nel terzo caso si ha tra 300° e 77°K LI/S = 29.980 A/cm (dove L rappresenta la lunghezza del conduttore ed S la sezione) e tra 77° e 20°K LI/S = 220.000 A/cm e tra 20° e 4.2°K LI/S = 700.000 A/cm.

TABELLA VIII

| Componenti | Costo base |
|---|---|
| Niobio | 75.000 lire/kg |
| Alluminio $\rho = 1,5 \cdot 10^{-9}$ Ω cm 20°K { puro | 750 lire/kg |
| Alluminio $\rho = 1,5 \cdot 10^{-9}$ Ω cm 20°K { commerciale 99,6 | 600 lire/kg |
| Propilpropilene | 750 lire/kg |
| superisolante di 3 cm di spessore | 4.500 lire/$m^2$ |
| tubo in acciaio inox | 280 lire/D/m (diametro D in cm, lunghezza in m) |
| azoto liquido | 30 lire/litro |
| idrogeno liquido | 750 lire/litro |
| elio liquido | 2000 lire/litro |
| Giunti di dilatazione | $75 \cdot 10^6$ lire |
| assemblaggio e ispezione | $150 \cdot 10^6$ lire |
| edifici e impianti | $90 \cdot 10^6$ lire |
| posa in opera in aperta campagna | $300 \cdot 10^6$ lire |
| terminali | $50 \cdot 10^6$ lire |
| strumenti | $15 \cdot 10^6$ lire |
| } per 10 km di cavo | |

TABELLA IX

| Caratteristiche elettriche | Azoto liquido | Idrogeno liquido | Elio liquido |
|---|---|---|---|
| Campo elettrico di lavoro | 150 KV/cm | 150 KV/cm | 100 KV/cm |
| costante dielettrica relativa | 2,35 | 2,35 | 2,35 |
| angolo di perdita (tg δ) | $4 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ |

TABELLA X

| Tipo di cavo | Criogenico | | Superconduttore |
|---|---|---|---|
| | azoto liquido | idrogeno liquido | |
| Costo impianti | $183 \cdot 10^3$ lire | $240 \cdot 10^3$ lire | $106 \cdot 10^3$ lire |
| 10 anni di esercizio | $109 \cdot 10^3$ lire | $116 \cdot 10^3$ lire | $55 \cdot 10^3$ lire |
| Totale | $292 \cdot 10^3$ lire | $356 \cdot 10^3$ lire | $161 \cdot 10^3$ lire |

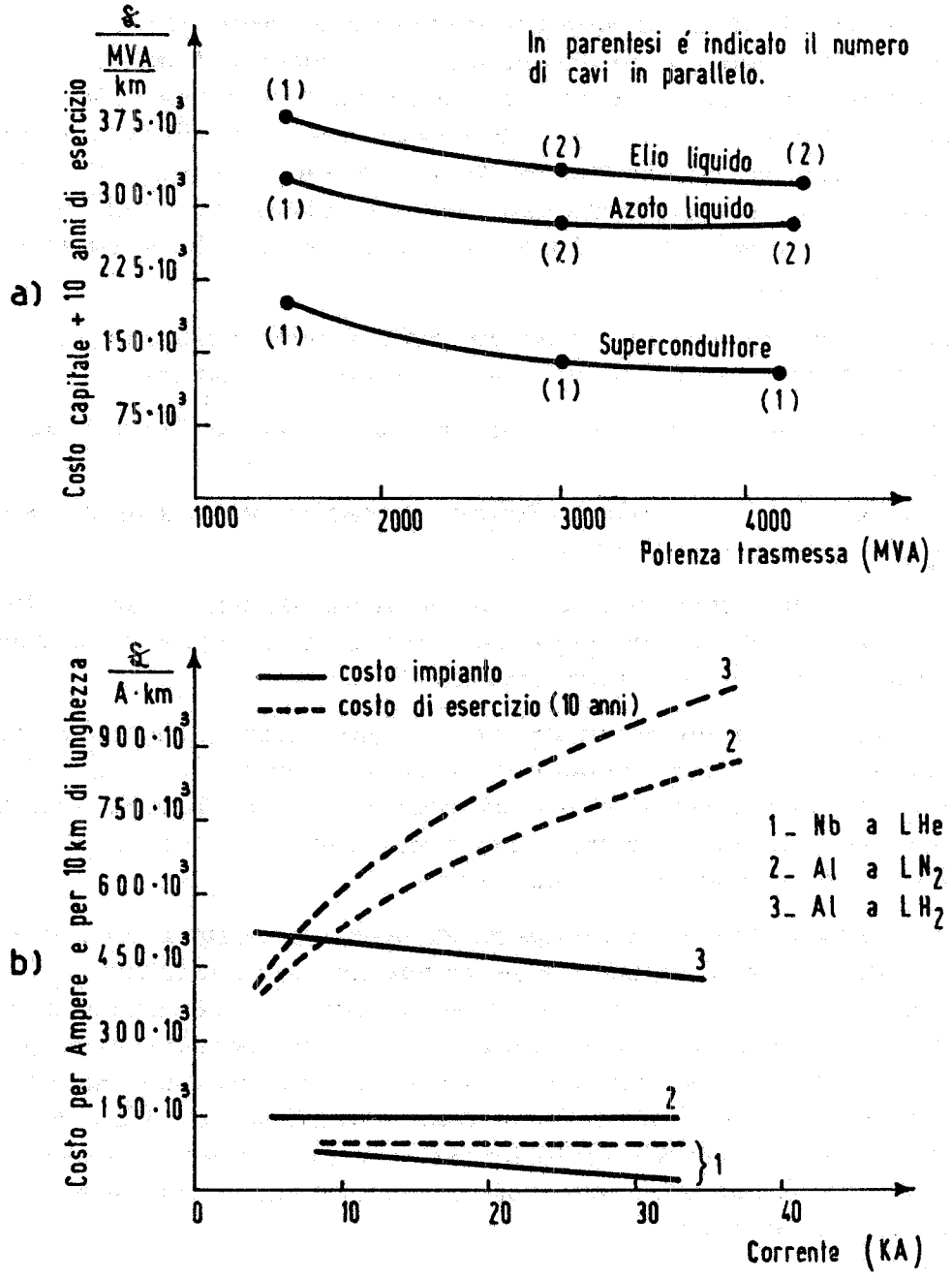



FIG. 35 - Confronto di costo dei cavi criogenici e superconduttori.

installato potrebbe essere di 5000 MVA nel 1985 e 30.000 MVA nel 2000.

A questi traguardi spingono l'economicità degli impianti e della energia elettrica. Però si presentano difficoltà tecniche legate all'uso del rame e del ferro quando le dimensioni della macchina superano i valori ormai raggiunti per avvicinarsi a quelle potenze: è necessario ricorrere allora a nuovi materiali e cioè ai superconduttori. Si può prevedere di realizzare grossi generatori da 5000 MVA nel 1990 e da 10.000 MVA nel 2000. Queste sono le opinioni espresse da scienziati giapponesi al congresso di Londra nel marzo 1969 sulle applicazioni della superconduttività nell'elettrotecnica.

La potenza di una macchina elettrica è proporzionale a B.J., dove B è l'induzione magnetica e J la corrente di armatura.

Nei superconduttori l'induzione massima può aumentare da 5 a 10 volte.

Se si usa NbTi (7 tesla) o $Nb_3Sn$ (15 tesla) la densità di corrente passa da $1 \div 10$ A/mmq a $10^2$ A/mmq.

Quindi le potenze specifiche possono aumentare anche di fattori 100 rispetto alle macchine convenzionali: in realtà la necessità di adeguati ancoraggi diminuisce questi valori limiti.

Rimangono comunque da affrontare molti problemi tecnici come il realizzare materiali superconduttori a basse perdite in c.a., alberi di rotazione con guarnizioni a tenuta efficace per l'elio liquido, spazzole di commutazione efficaci, centrali di conversione c.c. in c.a. di grossissima potenza con buoni rendimenti ecc.

Però i problemi sono semplificati se ci si limita a macchine semisuperconduttrici nelle quali i superconduttori sono utilizzati solo per realizzare gli avvolgimenti per i campi magnetici statici entro cui si muove il rotore. Con macchine di questo tipo si può pensare di raggiungere potenze di 5000 MVA: turbine a vapore di forte potenza sono realizzabili aumentando i raggi delle turbine convenzionali da 1.25 a 1.65 m e le temperature cui i materiali delle turbine a vapore possono essere fatti lavorare in combinazione p. es. con un reattore nucleare raffreddato con gas ad alta temperatura.

Dovrebbe così essere fatta un'analisi per confrontare la conversione diretta di calore in energia con metodi magneto-idrodinamici realizzata con l'ausilio di magneti superconduttori non con i sistemi convenzionali di conversione, ma con quelli realizzati con l'impiego dei superconduttori per vedere in che direzione orientare i programmi di ricerca per la produzione di energia elettrica con sistemi non convenzionali.

Motori e generatori sono stati già studiati ed un motore da 3250 HP deve entrare in funzione in questi giorni nella centrale di Fawley in Inghilterra curata da Appletown della Int. Res. Dev. Lo schema del motore è indicato in Fig. 36.

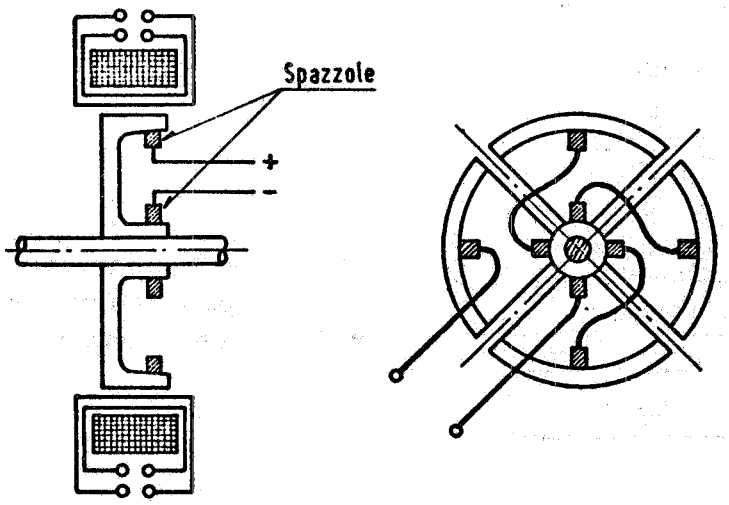



FIG. 36 - Schema di motore da 3250 HP della centrale di Fawley.

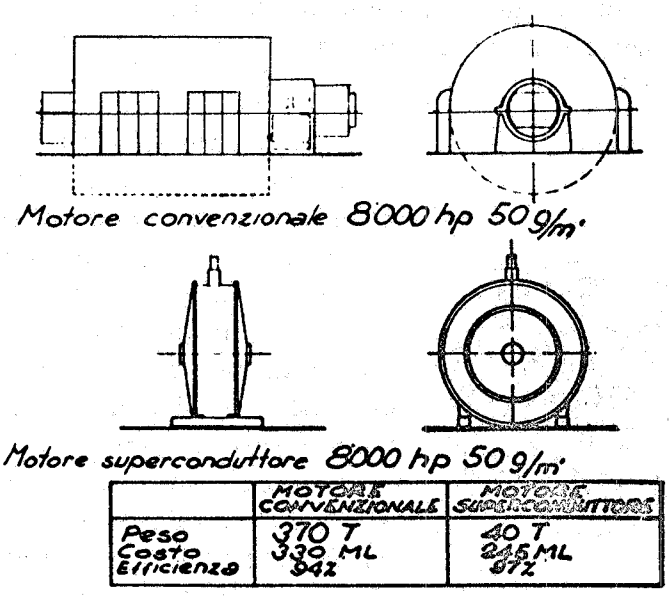
Come si vede si tratta di una ruota di Farday: per aumentare la tensione nelle versioni come generatore si chiude la ruota in diversi settori (fino ad otto) uniti da collegamenti fissi mediante un sistema di spazzole. Naturalmente il problema della commutazione e della caduta di tensione alle spazzole crea qualche difficoltà. Per il motore di Appletown si sono impiegati conduttori di Nb-Ti in rame (5 filamenti di 0.5 mm di diametro in un corpo di rame da $(10 \times 1.8)$ mm$^2$ per un peso totale di 5.5 tonnellate (di cui 500 Kg di superconduttore).

L'avvolgimento realizza $2.85 \times 10^6$ Amperspire ed un'energia magnetica di $1.46 \times 10^7$ Joule (da confrontare con $10^8$ Joule del magnete ora realizzato per la camera "a bolle" dell'Argonne National Laboratory). I conduttori sono isolati con vernice e con fibra di vetro di 0.1 mm.

Come si vede il progetto è conservativo e si utilizza un superconduttore molto stabilizzato. E' attendibile quindi il confronto che Appletow, ha fatto tra un generatore in c.c. da 8000 HP superconduttore ed uno normale della stessa potenza che si riassume in due cifre: rapporto tra costo di impianto e rapporto tra i costi di esercizio in funzionamento regolare (dissipazione + manutenzione). Entrambi i rapporti sono a favore del superconduttore e sono pari a 1.8. In Fig. 37 sono indicate le caratteristiche dei due generatori.

Il peso ed il momento di inerzia di quello superconduttore sono particolarmente ridotti di un fattore 3 + 4 rispetto a quello normale.

I motori superconduttori nei quali è eliminato gran parte del ferro che ha solo in tal caso funzione di sostegno non di guida per i flussi magnetici presentano campi magnetici sensibili anche a distanza di parecchi metri e questo rappresenta un inconveniente.




| | MOTORE CONVENZIONALE | MOTORE SUPERCONDUTTORE |
|---|---|---|
| Peso | 370 T | 40 T |
| Costo | 330 ML | 245 ML |
| Efficienza | 94% | 97% |

FIG. 37 - Dimensioni dei due generatori normale e superconduttore.

II.4. - Accumulatori di energia in depositi magnetici superconduttori. -

A questa applicazione si è già pensato ma poco lavoro è stato fatto in questa direzione sia teorico che sperimentale.

Si ritiene utile riportare un progetto un po' fantascientifico che il francese Dott. Ferrier ha presentato al congresso di Londra nel marzo 1969 sulle applicazioni della superconduttività.

Per ottenere un volano per tutta la rete attuale francese sarebbe necessario disporre di un accumulo di $10^{13}$ J (2800 MWh) anche se un accumulo di $10^{12}$ J già troverebbe interessanti applicazioni.

Nel dimensionare accumulatori di questa capacità si ottengono magneti di $60 \div 100$ metri di raggio con volumi di superconduttore stabilizzato di $50 \div 100$ m$^3$ e superfici di criostato comprese tra $2 \div 8 \times 10^4$ m$^2$.

Oltre che alle perdite per conduzione termica dalle pareti, una certa importanza presentano le perdite per isteresi superconduttrice dovute al fenomeno dei "flux creep".

Il moto dei flussoidi magnetici nel superconduttore è dato dalla equazione:

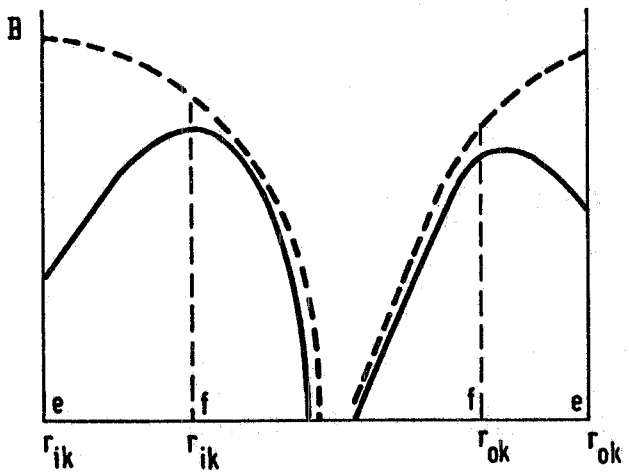
$$\frac{B_o}{\mu}\frac{dB}{dr} + \lambda \alpha B^{\gamma} + \lambda \beta v B = 0 \qquad \left(\frac{dB}{dr} = J \text{ densità di corrente}\right)$$

(2)

$$\frac{dB}{dt} + \frac{\lambda}{r}\frac{dr\, vB}{dr} = 0$$

Il primo termine della prima equazione rappresenta la forza di Lorentz che agisce sui flussoidi; il secondo rappresenta la forza di ancoraggio dei flussoidi alle impurezze ($\alpha$ e $\gamma$ sono coefficienti sperimentali: $\lambda = \pm 1$ a seconda della direzione in cui si muovono i flussoidi); il terzo termine rappresenta la resistenza viscosa al moto essendo v la velocità del moto dei flussoidi.

La seconda è l'equazione di continuità. I calcoli nel caso di una bobina a più spire sono laboriosi anche se concettualmente non difficili: questo è vero anche se ci si pone nel caso in cui dB/dt sia piccolo e $\lambda\beta vB$ sia trascurabile rispetto a $\lambda\alpha B^{\gamma}$ in modo da garantire un evolversi del campo magnetico attraverso diverse configurazioni di equilibrio. Se i flussoidi si muovono con velocità contrastata dalle forze di attrito la potenza dissipata nella scarica della bobina nei singoli conduttori è data da (v. Fig. 38):




– – – – distribuzione dell'induzione magnetica nello spessore del superconduttore all'istante iniziale.

——— distribuzione finale della induzione magnetica nello spessore del superconduttore al tempo t.

FIG. 38 - Distribuzione iniziale e finale dell'induzione magnetica nello spessore del superconduttore.

$$W_{pk} = \frac{1\alpha}{4} \int_0^t dt \left[ \int_{r_{ik}}^{r_{ik}^{(f)}} + \int_{r_{0k}}^{r_{0k}^{(f)}} \right] r\, v B^{\gamma}\, dr$$

e nel superconduttore è data da:

$$W = 1\alpha \int_0^t dt \left[ \int_{r_{ik}^{(f)}}^{r_{ik}^{(e)}} + \int_{r_{0k}^{(f)}}^{r_{0k}^{(e)}} \right] \alpha B^{\gamma}\, v\, 2\pi r\, dr$$

I calcoli effettuati con queste ipotesi e con constanti ricavate sperimentalmente portano alla seguente espressione del rapporto $\xi_L$ tra le perdite per isteresi e la energia magnetica immagazzinata in funzione del rapporto Hm/Ha dove Hm è il campo massimo nella bobina e Ha il campo al cui valore la penetrazione del flusso nel (solo s.c.) superconduttore è completa:

$$\xi_L = AK\left(\frac{10\,Ha}{Hm}\right)^{\Gamma} \quad \text{dove} \quad K = \frac{2\,N\,d}{R_o}$$

essendo d lo spessore della piattina nel superconduttore, $R_o$ il raggio medio e N il numero di strati. A e $\Gamma$ sono funzioni della storia del superconduttore pari a:

$$A = \frac{0.25}{2.2 -} \qquad \Gamma = 1.3 \div 0.45\,\gamma$$

per la scarica iniziale.

$$A = \frac{0.15}{2 - \gamma} \qquad \Gamma = 1.3 \div 0.5\,\gamma$$

per le successive scariche.

Se per esempio si assume:

$$Hm = 10 \text{ tesla}; \qquad Ha = 3.5 \text{ tesla}; \qquad \gamma = 0.5 \div 1$$

$$R_o = 6 \text{ metri}; \qquad \xi_L = 0.5 \div 1 \times 10^{-4}$$

si ha:

$$\xi_L \times \eta_{termico} = 5 \div 10\%$$

se $\eta = 10^3$ (in realtà questo valore è pessimistico).

Il valore per immagazzinare energia con un recupero accettabile corrisponde ad energia di $5 \div 10 \times 10^{11}$ Joule. Se l'energia aumenta, aumenta anche il rendimento di isteresi (poichè $R_o$ aumenta). Questi rendimeni sono ancora abbassati dai rendimenti dei gruppi di conversione e dalle perdite per presenza di armoniche a più alta frequenza.

## II.5. - Magneti superconduttori. -

L'applicazione più importante della superconduttività è la costruzione di magneti superconduttori da utilizzarsi per diversi scopi, come

per la conversione diretta del calore in energia, per camere a "bolle" in fisica nucleare, per il trasporto di fasci di particelle (quadripoli ed altri sistemi di lenti) per schermo contro le radiazioni in astronavi e per lenti magnetiche per microscopi elettronici con alto potere risolutivo ove l'ottica deve essere realizzata con grande precisione.

Nel progetto dei magneti ad alto campo oltre ai materiali con cui realizzarli bisogna tenere conto di altri elementi che possono influenzare le soluzioni tecniche e questi fattori discuteremo prima di dare un quadro dei principali magneti costruiti o in costruzione o di cui si prevede una prossima costruzione.

Questi fattori sono:

1) alimentazione elettrica dell'impianto
2) pompe di flusso
3) interruttori superconduttori
4) contatto elettrico tra superconduttori e tra superconduttori e conduttori normali
5) problema del raffreddamento
6) uniformità di campo magnetico e accessibilità nell'interno del magnete
7) considerazioni sulle sicurezze e sugli effetti di radiazioni
8) economia dei magneti.

E' stato visto che per fare arrivare corrente dall'alimentatore a temperatura ambiente al magnete superconduttore, bisogna spendere dell'energia. Per es. per 100 A un conduttore ben progettato assorbe a temperatura ambiente una potenza di 300 Watt (corrispondente a 0.2 Watt alla temperatura dell'elio liquido) per cui per magneti di piccola dimensione non si può prevedere correnti maggiori di qualche centinaio di Ampere, mentre per magneti di grosse dimensioni le correnti possono arrivare a qualche migliaio e addirittura a qualche decina di migliaia di Ampere. In esercizio normale la tensione dell'alimentatore è solo di qualche Volt: però bisogna che siano previste delle tensioni più alte per rendere più breve il tempo di carica del magnete quando l'energia magnetica immagazzinata diventa molto elevata. Per un magnete di 1000 A ed energia immagazzinata di $10^8$ Joule, affinchè la carica avvenga in $10^4$ sec è necessaria una tensione di 20 Volt. L'induttanza è di 200 H e affinchè la carica o la scarica avvengono in un secondo in condizioni di emergenza, la tensione ai terminali dovrebbe raggiungere i 200.000 Volt.

Per evitare le perdite nei terminali dei conduttori che la presenza di elevate correnti inevitabilmente comportano, sono state proposte da Mendelsohn delle pompe di flusso fin dal 1933.

Il funzionamento di una pompa di flusso si può schematizzare nella seguente maniera: un elettromagnete viene mosso meccanicamente fino a concatenare il suo flusso con il magnete superconduttore.

A questo punto l'elettromagnete inverte il suo flusso in modo da far aumentare la corrente nel magnete superconduttore e viene successivamente spostato in modo tale che il flusso magnetico ad esso associato non è più concatenato con il magnete superconduttore. Ad ogni ciclo aumenta il flusso del magnete e quindi l'energia magnetica in esso immagazzinata (v. Fig. 39).

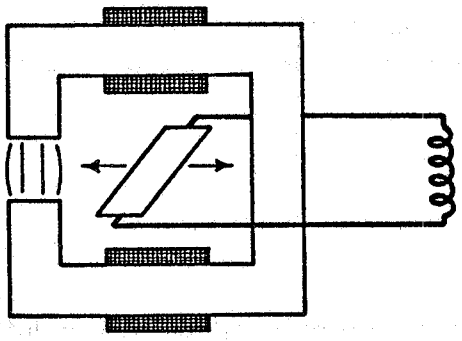


FIG. 39 - Schema di "pompa di flusso".

Sono state costruite diverse pompe di flusso: però nascono delle limitazioni nel loro uso quando l'energia da immagazzinare diventa molto elevata.

Un magnete da $10^8$ Joule, da caricarsi in $10^4$ sec assorbe una potenza di 10 KW. Anche se la pompa di flusso avesse un rendimento del 99% si dovrebbero necessariamente dissipare 100 W alla temperatura dell'elio liquido con un consumo di 100 litri all'ora. Se il rendimento scendesse al 95% la situazione diventerebbe intollerabile (500 litri/hxper diverse ore). Quindi le pompe di flusso sono utili per magneti piccoli. Ne è stata realizzata una per un magnete utilizzato per un martello magnetico.

Per un magnete grosso si può pensare di evitare egualmente connessioni elettriche di corrente verso l'esterno durante l'esercizio utilizzando una alimentazione esterna solo durante la carica del magnete e successivamente cortocircuitando la corrente superconduttrice. Anche se il cortocircuito dovesse avere una resistenza residua di qualche millesimo di $\mu\Omega$ con induttanza di 10 H, la costante con cui decadrebbe la corrente del magnete sarebbe di $10^{10}$ sec, cioè $10^5$ giorni. Un altro sistema per alimentare un magnete è quello di usare un trasformatore e un sistema di raddrizzatori a bassa temperatura basato sul principio del "criotrone".

Anche questi raddrizzatori funzionano con gli stessi limiti già indicati per le pompe di flusso.

In Fig. 40 è indicato lo schema di un dispositivo di questo tipo che permette di raddrizzare tensioni fino a parecchie centinaia di mV.

Il problema dei contatti è un problema importante nei magneti superconduttori: infatti bisogna prevedere i contatti tra superconduttore e superconduttore e tra i metalli normali superconduttori.

Sono state realizzate per questi ultimi tipi di contatto resistenze inferiori a $10^{-8}\Omega$. Nei contatti superconduttori tra giunti di Nb-Ti e

di Nb-Zr talvolta il contatto si ottiene mediante saldatura con l'uso di esplosivo; però le proprietà del materiale stesso risultano nel punto di saldatura degradate. Non è stato ancora risolto bene il problema delle connessioni tra Nb-Sn.

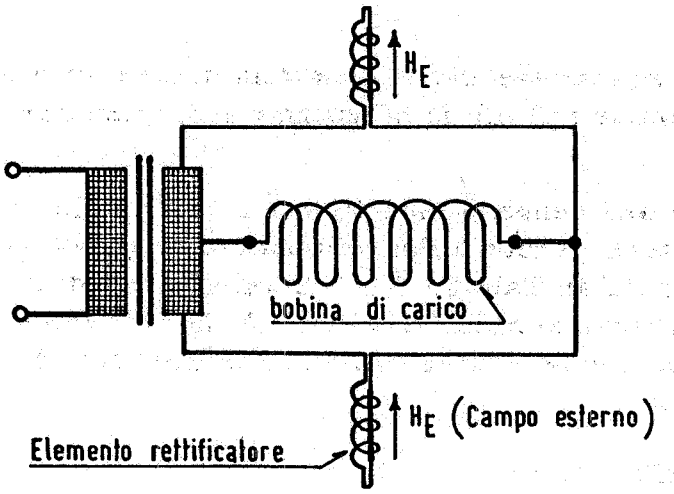



FIG. 40 - Dispositivo di raddrizzatori per alimentare un magnete.

Nella costruzione di magneti bisognerà tenere queste saldature tra materiali in posizioni dove il campo magnetico è più basso. Per quello che riguarda l'omogeneità del campo possiamo dire che essa è legata alla forma della bobina, almeno a campo magnetico alto: il campo magnetico residuo può danneggiare l'uniformità del campo. E' possibile in linea di massima fare qualche previsione anche se incerta sull'andamento di questo campo.

Per quello che riguarda gli effetti delle radiazioni possiamo dire che la sperimentazione è abbastanza incompleta e talvolta i difetti prodotti dal bombardamento di radiazioni (protoni ed elettroni) possono anche migliorare le qualità del superconduttore. In altre misure fatte si è visto che una bobina di Nb Zr bombardata con neutroni ha subito una certa degradazione.

Qualche attenzione quando il magnete va in ambiente radioattivo bisogna fare nella scelta degli isolanti per il magnete e alla potenza persa dalle radiazioni in relazione al consumo seguente di elio.

Il problema della sicurezza diventa importante quando la energia magnetica immagazzinata diventa elevata. Infatti bisogna evitare che una transizione accidentale superconduttore-normale provocata p. es. dalla mancanza di elio liquido nella parte superiore della bobina possa provocarne la distruzione per riscaldamento o sovratensione della bobina stessa o per evaporazione troppo rapida dell'elio provocata da una rottura del dewar.

Ci si può proteggere da questo danno con la sistemazione di shunt di dewar che quando accadono questi fenomeni fanno sì che l'energia magnetica immagazzinata venga dissipata in dispositivi esterni di dewar. Questi shunt previsti fra diverse sezioni porterebbero ad un aumento considerevole del costo di refrigerazione del magnete per la presenza di connessioni esterne.

Comunque devono essere previste delle valvole di sicurezza per pompare rapidamente sia l'azoto che l'elio liquido quando si verificano queste condizioni di emergenza.

Fatte queste considerazioni vengono riportati in Tabella XI i dati relativi al più grosso magnete superconduttore funzionante (più grosso come energia immagazzinata), ed in Tabella XII il confronto tra due magneti normali e superconduttore da cui risulta chiara la convenienza della soluzione non convenzionale, cioè con magnete superconduttore. In Fig. 41 è riportata la fotografia.

TABELLA XI

| CARATTERISTICHE DEL MAGNETE SUPERCONDUTTORE PER LA CAMERA A "BOLLE" IN IDROGENO DI CIRCA 4 m | |
|---|---|
| Induzione | 1,86 tesla |
| Amperspire | $5 \cdot 10^6$ |
| Corrente | 2000 A |
| Induttanza dell'avvolgimento | 40 H |
| Energia magnetica accumulata | $80 \cdot 10^6$ Joule |
| Peso del rame | 45.300 kg |
| Peso del superconduttore | 317 - 453 kg |
| Sforzo di trazione nell'avvolgimento | 4,4 kg/mmq |
| Sforzo di compressione nella bobina | $6,8 \cdot 10^5$ kg |
| Peso del ferro | 1600 ton |
| Diametro interno della bobina | 5,3 m |
| Lunghezza della bobina | 3,3 m |
| Tensione di alimentazione | 10 V |
| Tempo di carica | 2¼ ore |

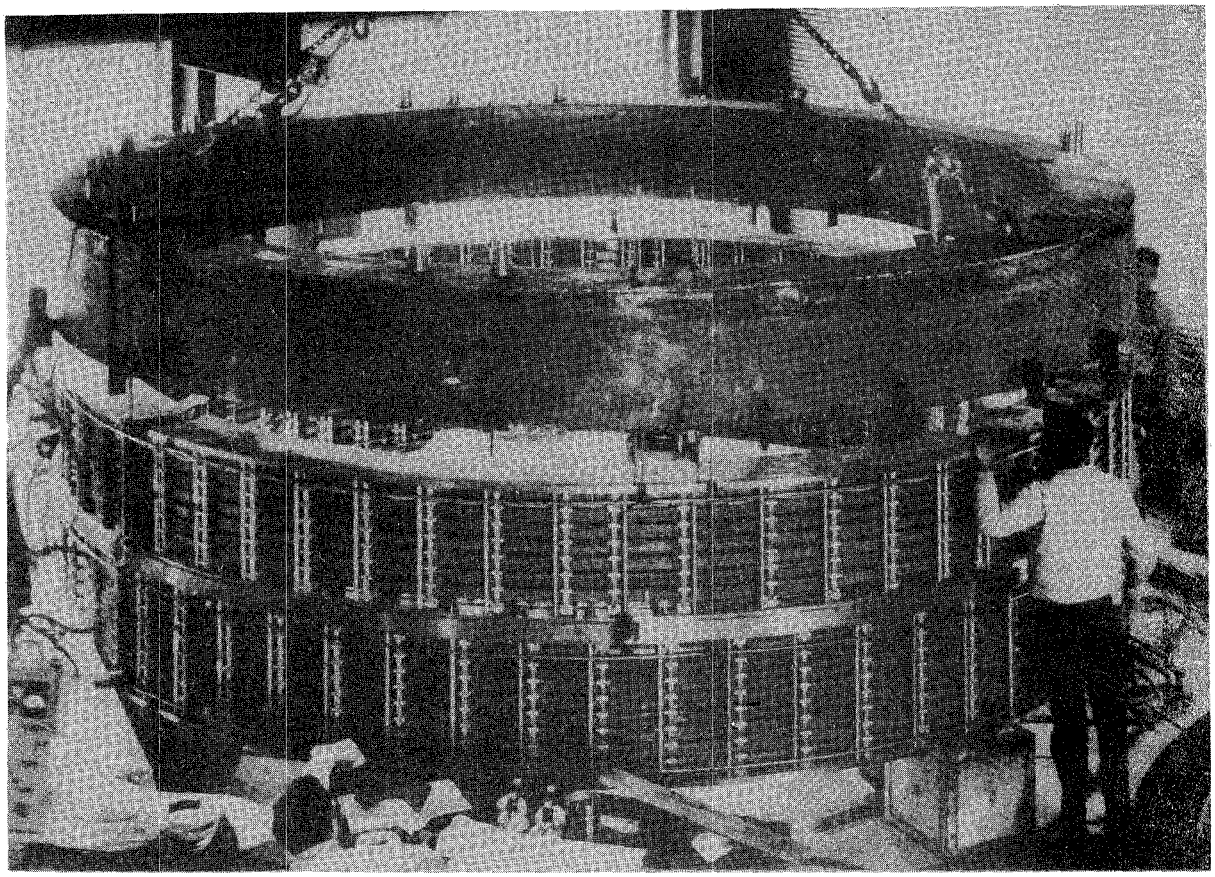


FIG. 41 - Il grosso magnete della camera a "bolle" del Laboratorio di Argonne (USA).

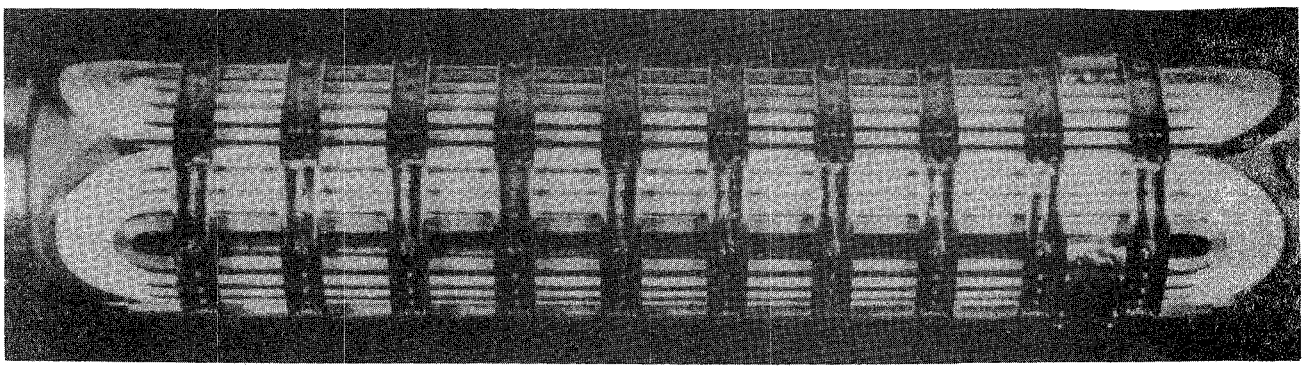


FIG. 42 - Lente magnetica quadripolare con avvolgimenti superconduttori realizzata nei Laboratori Nazionali di Brookhaven (USA).

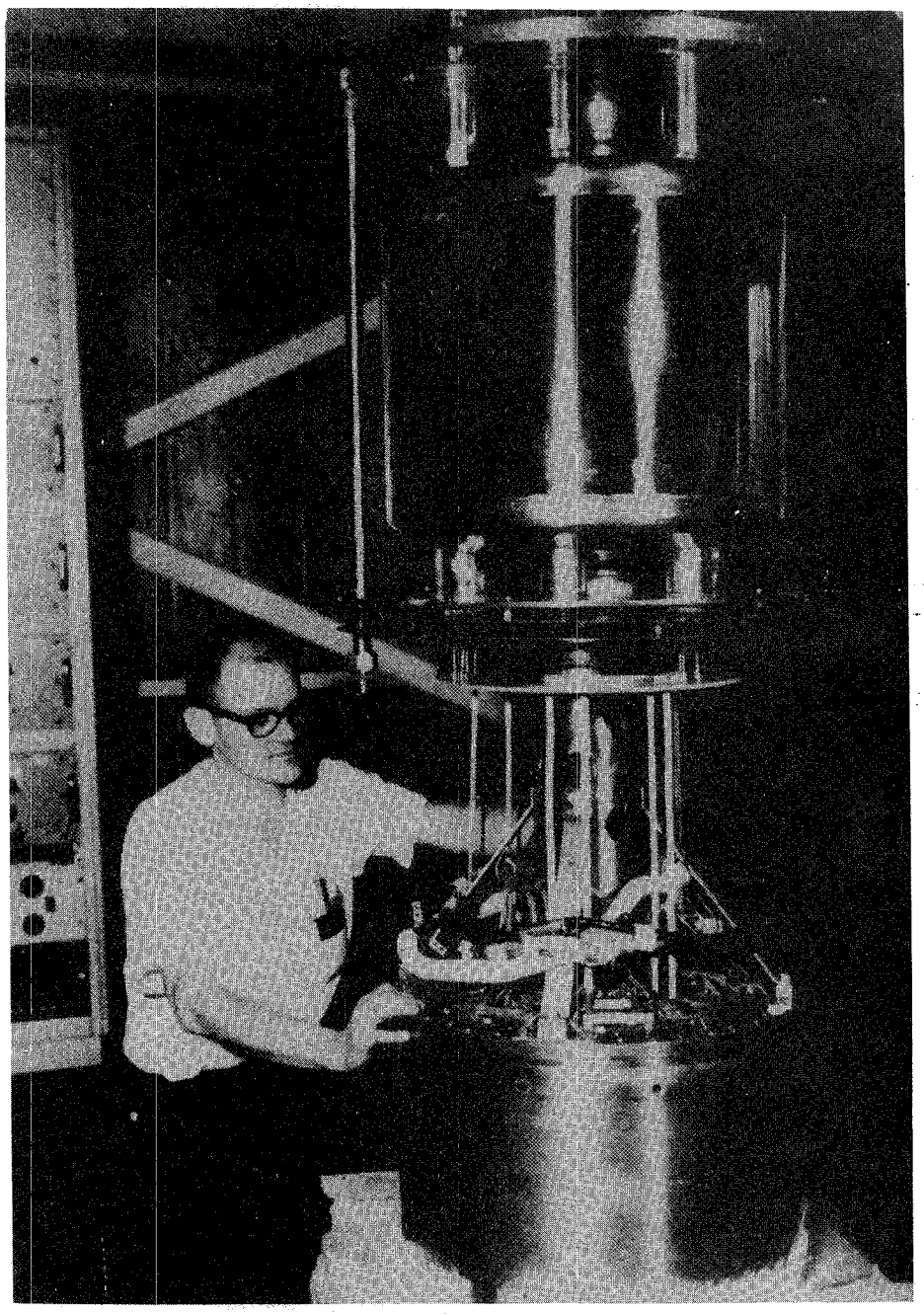


FIG. 43 - Magnete con conduttori di $Nb_3Sn$ della RCA con cui si realizzano induzioni di 4 tesla.

## TABELLA XII

| Costi per un magnete normale da 1,8 tesla | | Costi per un magnete superconduttore | |
|---|---|---|---|
| Giogo (1900 ton) | $650.000 \cdot 10^3$ | Giogo | $650.000 \cdot 10^3$ |
| Bobine (90 ton di rame) | $351.000 \cdot 10^3$ | Bobine | $146.000 \cdot 10^3$ |
| Installazione | $117.000 \cdot 10^3$ | Bobine (20% di sicurezza) | $29.000 \cdot 10^3$ |
| Alimentazione | $195.000 \cdot 10^3$ | Dewar, supporto bobine | $130.000 \cdot 10^3$ |
| Sbarre principali | $45.000 \cdot 10^3$ | Installazione | $32.500 \cdot 10^3$ |
| Controllo e accesso | $97.500 \cdot 10^3$ | Alimentazione | $16.000 \cdot 10^3$ |
| Torre refrigerante (12 MW) | $97.500 \cdot 10^3$ | Refrigerante (elio) | $130.000 \cdot 10^3$ |
| Totale costo capitale | $1.553.000 \cdot 10^3$ | Totale costo capitale | $1.133.500 \cdot 10^3$ |
| 10 anni al 50% di funzionamento | $2.600.000 \cdot 10^3$ | 10 anni di funzionamento (1 MW per refrigerazione) | $260.000 \cdot 10^3$ |
| Costo totale 10 anni | $4.153.000 \cdot 10^3$ | Costo totale 10 anni | $1.393.500 \cdot 10^3$ |

Sono pure riportate in Figg. 42 e 43 le fotografie di una lente magnetica superconduttrice di tipo quadripolare e di un magnete da 140 Kg.

II.6.- Altre applicazioni.-

Ci limitiamo ancora a citare proposte per supporti e guide superconduttrici per mezzi di trasporto come treni per distanze 300÷500 Km a velocità di 500 Km/orari in tubi sottovuoto, nonchè raddrizzatori superconduttori a rendimento elevato.

Poche prospettive di applicazione sembra che abbiano i trasformatori superconduttori senza ferro fino almeno a quando non si troveranno materiali superconduttori che funzionano ad alti campi magnetici e in c.a. con basse perdite. Sono stati proposti trasformatori con ferro per adattare cavi superconduttori ai generatori.

BIBLIOGRAFIA. -

PARTE I -


- B. B. Goodman, Introductory Notes on Superconductivity, lezioni tenute a Varenna (1964).
- P. G. De Gennes, Theory of Hard Superconductors (Benjamin, New York, 1966).
- H. Brechna, Materials and conductor configurations in superconducting magnets, SLAC Pub 464 (1968).
- S. Lubell and S. L. Wipf, Magnetic diffusivity in a Type II superconductor, J. Appl. Phys. 37, 1012 (1966).
- G. Horn and E. Saur, Präparation und Supraleitungseigenschaften von Niobnitrid sowie - Niobnitrid und Titan - Zirkon und tantalzusatz, Z. Phys. 210, 70 (1968).
- Synthesis Characterization and application of Superconducting Niobium Stannide ($Nb_3Sn$), RCA Rev. 25, 333 - 626 (1964).
- B. W. Roberts, Superconductive Materials and some of their properties, General Electric, Report n. 63-RL 325 2M, Schenectady (1963).
- C. B. Muller and E. J. Saur, Influence of mechanical constraints on critical currents of superconduting surface layers of $Nb_3Sn$ on Niobium and $V_3Ga$ on Vanadium in transverse Magnetic fields, Adv, Cryogenic Engineering (Plenum Press New York, 1964) Vol. 9, p. 338.
- H. Wizgall et al., Critical data of some A 15 Type Superconductors in transverse fields up te 230 Koe, J. Low Temp. Phys. 1 (1969).
- D. M. Kroeger and M. S. Lubell, Stability of the flux-flow state in superconducting NbTi Strips, Appl. Phys. Letters 13, 63 (1968).
- W. F. Gauster et al., On the Theory of stabilized superconducting wires, Cryogenics, 8, 13 (1968).
- A. E. Bindary and R. E. Bernett, Improved stabilized superconductors, Appl. Phys. 39, 2532 (1968).
- M. G. Benz, Mechanial and Electrical Properties of Diffusion - Processed $Nb_3Sn$ - Copper - Stainless steel composite conductors, Appl. Phys. 39, 2533 (1968).
- J. B. Vetrane et al., Superconductivity critical current Densities in Ti-V Alloys, Appl. Phys. 39, 2524 (1968).
- G. H. Morgan, The Beam model of ac losses in type II superconductors Brookhaven Nat. Lab., dec. 1968.
- W. H. Bergman, On He II - Micostabilization of $Nb_3Sn$, Argonne National Laboratory, (1968).
- Y. B. Kim, C. F. Hempstead and A. R. Strnad, Flux Creep in Hard Superconductors, Phys. Rev. 131, 2486 (1963).
- S. Shimamoto, Critical current of composite - Superconducting cables, Jap. J. Appl. Phys. 6, 1348 (1967).
- P. H. Morton, Stable superconductors and their uses, in Conf. on Low

Temperatures and Electric Power, London, March 1969 (Intern. Inst. of Refrigeration, 1969), p. 186.
- E. Adam et J. Dosdat, Elaboration et applications des superconducteurs en Niobium - Titane et en Niobium - Etain, in Conf. on Low Temperatures and Electric Power, London, March 1969 (Intern. Inst. of Refrigeration, 1969), p. 246.
- Comunicazioni private sulla fabbricazione del $Nb_3Sn$ da parte dei tecnici dei Laboratori Nazionali di Frascati.
- Cataloghi vari (RCA, British Thompson Houston, Imp. Metall. Industry, Siemens, ecc.).

PARTE II -

- Paper of the European Study Conference on the Technological Aspect of Large Superconducting Magnets CERN, Geneva (1968).
- W. B. Sampson, Superconducting magnets, IEEE Trans. Magnetics (1968).
- W. H. Bergmann, State of the art: superconducting magnets, Argonne National Lab. ANL/HEP 6818 (1968).
- C. Laverick, Superconducting magnet technology in Advances in Electronics and Electron Phys., (Academic Press, New York, 1967) Vol. 23, p. 385.
- C. Laverick, Superconducting magnet Technology, Part. II, Argonne National Laboratory ANL/HEP 6810 (1968).
- V. N. Agurev, Stable optimized superconducting split coils, Cryogenics, 9, 26 (1969).
- P. F. Chester, Superconducting magnets, Electricity Council Research Centre, Capluhurst, Chester (1969).
- R. Hancox, Stabilization of superconducting magnets, Proc. Second Int. Conf. on Magnet Technology, Oxford (1968), p. 477.
- B. J. Maddock et al., A. 48 KG 10 cm bore superconducting magnet..., ibidem, p. 533.
- S. D. Lindenbaum and J. F. Becker, A partially stable 90 KG composite Superconducting solenoid J. Appl. Phys. 39, 2627 (1968).
- W. Wurz, High-field superconducting magnet, J. Appl. Phys. 39, 2628 (1968).
- P. G. Kruger and J. N. Snyder, Progress in superconducting beam handling and accelerator structures since november 1966, J. Appl. Phys. 39, 2633 (1968).
- J. R. Hale and J. E. C. Williams, High-field magnets 2, J. Appl. Phys. 39, 2634 (1968).
- D. Atherton, High-efficiency superconducting homopolar dc generators, J. Appl. Phys. 39, 2639 (1968).
- H. L. Lagner, Automatic superconducting switches, J. Appl. Phys. 39, 2639 (1968).
- E. J. Lucas et al., The design of an 88-Kg, 20-in-bore superconducting magnet system, J. Appl. Phys. 39, 2641 (1968).

- E. J. J. Stecly et al., Results of tests on models for an 88-KG, 51-cm--bore-diameter solenoid, J. Appl. Phys. 39, 2641 (1968).
- W. F. Ganster and D. L. Coffey, Problems in designing nonaxisymmetrical syperconducting magnet systems, J. Appl. Phys. 39, 2647 (1968).
- D. R. Edwards and J. Slanghiter, Superconducting power cables, Electrical Times 3, 166 (1967).
- S. H. Minnich and G. R. Fex, Cryogenic power Transmission, Research and development center, General Electric Comp. Schenectady, New York (1969); Cryogenics 9, 165 (1969).
- P. Klaudy, Supraleitende Kabel, E. T. Z. 89, 325 (1968).
- H. Voight, Basic Problems of D.C. power transmission by cryogenic cables, in Conf. on Low Temperatures and Electric Power, London, March 1969 (Intern. Inst. of Refrigeration, 1969), p. 47; G. Delile, Transport d'energie par cable superconducteur a courant continu, ibidem, p. 143; M. T. Taylor, Composite conductors for a superconducting a.c. power transmission cable, ibidem, p. 61; E. C. Rogers, A comparison of superconducting and cryoresistive power cables , ibidem, p. 83; D. N. H. Cairns et al., Electrical considerations for an a.c. superconducting cable, ibidem, p. 16; D. W. H. Cairns et al., Refrigeration and circulation of Helium in superconducting power cables, ibidem, p. 24; A. M. Schwab et al., Etude generale des problemes lies a la refrigeration d'une liaison electrique supraconductrice a courant continu, ibidem, p. 135; A. Sellmaier, Cooling of superconducting cables, ibidem, p. 98; P. Barret, Protection des dispositifs supraconducteurs contre le surintensites , ibidem, p. 180; U. Hildebrant, Special cryogenic Problems on the performance of superconducting cables, ibidem, p. 105; K. Kellner et al., The coobdown of long ducts, ibidem, p. 77.
- F. Irie and K. Yamafuji, Some fundamental problems of superconducting energy storages, in Conf. on Low Temperatures and Electric Power, London, March 1969 (Intern. Inst. of Refrigeration, 1969), p. 39.
- M. Ferrier, Stockage d'energie dans un euroulement supraconducteur, in Conf. on Low Temperatures and Electric Power, London, March 1969 (Intern. Inst. of Regriferation, 1969), p. 150.
- A. D. Appleton, Motors generators and flux pomps, Cryogenics 9, 147 (1969).
- A. D. Appleton and J. S. H. Ross, Aspect of a superconducting Winding for a 3250 HP motor, in Conf. on Low Temperatures and Electric Power, London, March 1969 (Intern. Inst. of Refrigeration, 1969), p. 129.
- M. Yamamoto, Semi-superconductive rotary Machine, in Conf. on Low Temperatures and Electric Power, London, March 1969 (Intern. Inst. of Refrigeration, 1969), p. 55.
- T. A. Buchold, The magnetic forces on superconductors and their applications for magnetic Bearings, Cryogenics 1, 203 (1961).
- H. T. Coffey et al., Magnetic suspension and guidance of high speed vehicles, in Conf. on Low Temperatures and Electric Power, London

March 1969 (Intern. Inst. of Refrigeration, 1969), p. 194.
- R. Fasel and J. L. Obsen, Superconducting rectifiers, in Conf. on Low Temperatures and Electric Power, London, March 1969 (Intern. Inst. of Refrigeration, 1969), p. 32.