

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-73/54

G. Pasotti e G. M. Veca :  
STUDIO SUL DIMENSIONAMENTO DI MACCHINE OMOPOLARI  
SUPERCONDUTTRICI

Elettrotecnica 60, 733 (1973).

---

---

# STUDIO SUL DIMENSIONAMENTO DI MACCHINE OMOPOLARI SUPERCONDUTTRICI

G. PASOTTI (\*) - G. M. VECA (\*\*)

---

*In questo articolo viene presentato un parallelo critico tra le macchine in corrente continua di tipo tradizionale e macchine che fanno uso di avvolgimenti di campo realizzati con materiale superconduttore. Eseguivone un esame morfologico, si è proceduto al calcolo della potenza e del costo al variare delle caratteristiche geometriche. Sono stati pure presi in considerazione i più importanti problemi realizzativi.*

## INTRODUZIONE.

Com'è noto la superconduttività è quel fenomeno per cui in alcuni metalli o leghe portati ad una temperatura  $T_c$ , detta temperatura critica, molto prossima allo zero assoluto, la resistenza elettrica scende bruscamente a valori inferiori a  $10^{-25}$   $\Omega$ m.

Questa proprietà viene a mancare se il materiale è sottoposto ad un'induzione magnetica uguale o superiore ad un valore  $B_c$  detto critico, specifico di ogni materiale. Analogo effetto si ha se il superconduttore è percorso da una corrente  $I \geq I_c$ , detta corrente critica. Il valore di  $I_c$  è legato al valore dell'induzione  $B$ , nel senso che ad un aumento di  $B$  corrisponde una diminuzione di  $I_c$  e viceversa.

Il valore di  $B_c$  degli elementi e delle leghe note sino a pochi anni fa era inferiore a 1 T e non era quindi possibile utilizzare il fenomeno della superconduttività per applicazioni pratiche. La scoperta, avvenuta negli anni '60, di leghe e composti intermetallici quali ad es. il Nb-Ti ed il Nb<sub>3</sub>Sn aventi un'induzione critica rispettivamente di 10 T e 24 T, ha aperto la possibilità di sfruttare il fenomeno della superconduttività per fini industriali. Tra le utilizzazioni più interessanti si può considerare la costruzione degli induttori delle macchine elettriche rotanti; infatti questi superconduttori permettono la realizzazione di bobine ad elevato campo (parecchi tesla), senza circuito in ferro e con un minimo consumo di energia.

La possibilità di realizzare induttori con caratteristiche così diverse dalle usuali ha portato ad un riesame della morfologia delle macchine stesse, e per quanto riguarda quelle a corrente continua, oggetto del presente articolo, si è trovato che la vecchia macchina omopolare si prestava meglio del tipo tradizio-

nale a questo genere di applicazioni (1÷7). Com'è noto essa era stata abbandonata, dopo l'avvento delle macchine a collettore, in quanto presentava il grave difetto di avere bassissime tensioni e correnti molto intense. Questo fatto dava luogo a notevoli problemi per le spazzole e rendeva antieconomico il trasporto e l'utilizzazione dell'energia elettrica prodotta od assorbita. La presenza dell'induttore superconduttore ad alto campo permette ora di aumentare considerevolmente la tensione indotta, attenuando così sostanzialmente il più grave dei problemi connessi con la macchina omopolare.

L'assenza di ferro riduce inoltre l'ingombro e soprattutto il peso dell'unità, a parità di caratteristiche funzionali. Il rotore presenta altresì una bassa costante di tempo ed una debole inerzia per cui la macchina è in grado di sopportare brusche variazioni di carico e di velocità.

Altri pregi che presentano le macchine omopolari superconduttrici rispetto alle tradizionali consistono nella possibilità di costruire unità di maggior potenza, nel minor costo di investimento per potenze superiori a qualche megawatt [1, 6] e nel minor costo di esercizio in virtù del maggior rendimento [6, 9÷11].

Per contro tali macchine presentano alcuni inconvenienti, taluni legati alla loro stessa natura, tal'altri dovuti all'impiego dei materiali superconduttori; accenniamone i principali. I problemi relativi alle spazzole, per quanto attenuati dalla maggior tensione disponibile, permangono; ora però, dato il rinnovato interesse tecnico ed economico per questo tipo di macchine, molti laboratori si sono impegnati in approfondite ricerche per la soluzione del problema [5÷8]; esamineremo nel testo quali sono le soluzioni attualmente proposte. A causa dell'assenza del circuito in ferro le macchine hanno notevoli flussi magnetici dispersi <sup>(1)</sup> ed inoltre presentano una bassa impedenza interna per cui, nel caso d'impiego come generatori, è necessario un efficace sistema di protezione dai cortocircuiti.

Per le sue caratteristiche, questo tipo di macchina può trovare efficace impiego quale motore, per azionare ad esempio, pompe di alimentazione in grandi impianti termoelettrici, grandi laminatoi, montacarichi per miniere, compressori per industrie petrolifere o nella propulsione navale per unità del tipo rompi-

---

(\*) G. PASOTTI: dei Laboratori Nazionali del CNEN di Frascati.

(\*\*) G. M. VECA: assistente ordinario di Misure Elettriche dell'Istituto di Elettrotecnica dell'Università di Roma.

(1) È possibile eliminare tali flussi dispersi mediante schermi superconduttori esterni che però fanno aumentare il costo della macchina.

ghiaccio, rimorchiatori d'alto mare, posacavi [1]. Le macchine superconduttrici possono trovare importanti impieghi anche quali generatori; nell'industria elettrochimica, ad esempio, esse possono sostituire vantaggiosamente impianti realizzati con trasformatori e raddrizzatori [3].

In diversi Paesi (Inghilterra, Francia, Giappone [2 ÷ 4,9]), sono stati eseguiti progetti e sono state realizzate macchine omopolari superconduttrici <sup>(2)</sup>. La maggiore di queste realizzazioni è rappresentata dal motore costruito in Inghilterra nel 1968 da Appleton, presso la International Research and Development Co. (I.R.D.) [2 ÷ 4], esso ha una potenza di 2390 kW con una velocità di 200 giri/min. Tale motore è attualmente installato quale propulsore di una pompa di alimentazione nella centrale elettrica di Fawley ed il suo funzionamento è soddisfacente.

Nel presente articolo abbiamo esaminato macchine omopolari con induttore superconduttore e indotto a dischi multipli, di potenza compresa tra 1 e 100 MW; da tale esame è emerso un criterio di scelta della forma più opportuna da assegnare alla macchina. Abbiamo altresì riportata un'analisi indicativa dei costi che può dare un ulteriore contributo alla scelta della forma. Sono stati trattati pure i principali problemi costruttivi per indicare quali siano le maggiori difficoltà che si incontrano in queste realizzazioni.

### 1. - SCHEMA DELLA MACCHINA ED ELENCO DEI SIMBOLI.

Riportiamo in fig. 1 un disegno schematico della macchina in esame. Essa consiste in una bobina superconduttrice racchiusa all'interno di un criostato di forma anulare riempito di elio liquido. Nell'apertura centrale del criostato è inserito il rotore, costituito da tanti dischi conduttori isolati tra loro e calettati su un albero. In corrispondenza di ciascun disco rotante esiste un controdisco fisso, montato su di una camicia esterna e isolato elettricamente da questa. I contatti sono previsti del tipo a liquido a riempimento totale <sup>(3)</sup> [5, 7, 8] per cui tutto il rotore è immerso in un liquido conduttore che assicura il contatto tra dischi fissi e mobili nelle zone segnate in neretto della fig. 1; tutte le altre superfici sono elettricamente isolate.

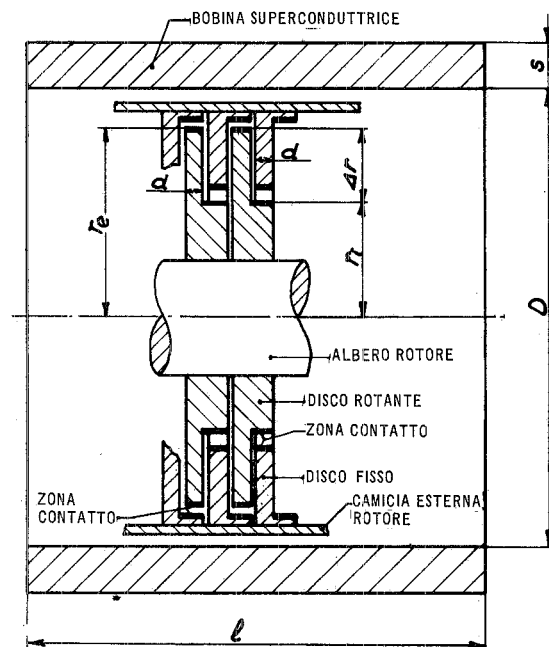
Diamo un elenco dei simboli usati nel testo con riferimento alla fig. 1:

- $B$  = componente assiale dell'induzione all'interno della bobina superconduttrice;
- $\mathcal{J}$  = densità di corrente nell'induttore;
- $D$  = diametro interno dell'induttore;
- $l$  = lunghezza dell'induttore;
- $\beta$  =  $l/D$  = fattore di forma;
- $\gamma$  =  $D/D_0$  = fattore di scala;
- $s$  = spessore della bobina induttrice;
- $r_e$  = raggio esterno del disco del rotore;
- $r_i$  = raggio interno del disco del rotore;

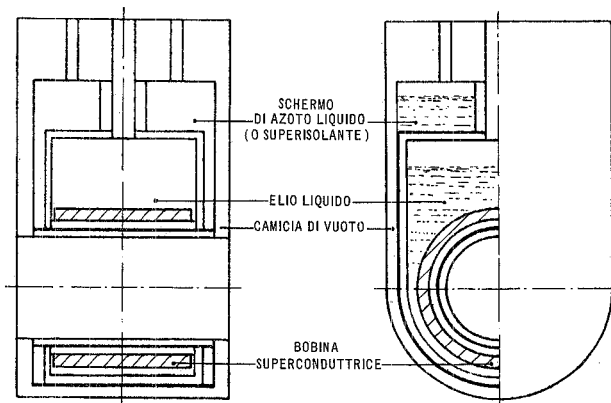
<sup>(2)</sup> Ricordiamo inoltre che su questo argomento spesso le notizie non vengono diffuse o vengono pubblicate con un certo ritardo perchè coperte da segreto militare o industriale.

<sup>(3)</sup> I criteri di questa scelta saranno esposti al par. 3.

- $r_i^*$  = raggio interno ottimale ai fini della potenza;
- $\bar{r}_i^*$  = raggio interno ottimale mediato su tutti i dischi del rotore;
- $\Delta r$  = tratto del disco rotante utile ai fini della forza elettromotrice indotta;
- $d$  = spessore di ciascun disco, sia fisso che rotante;
- $p \simeq 2d$  = interasse dei dischi del rotore;



a)



b)

Fig. 1. - Disposizione schematica di una macchina a dischi multipli; a) sezione rotore; b) criostato con induttore.

- $\omega$  = velocità angolare di rotazione del rotore;
- $n$  = numero di giri al minuto del rotore;
- $\sigma$  = densità di corrente max al contatto tra disco e liquido, nel rotore;
- $I$  = corrente max nel rotore;
- $\mathcal{N}$  = numero di dischi del rotore;
- $e$  = forza elettromotrice indotta in ciascun disco rotante;
- $E$  =  $\Sigma e$  = f.e.m. totale indotta nel rotore;

$e_m$  =  $E/N$  = f.e.m. media indotta nel rotore;  
 $P$  = potenza elettrica generata o assorbita a meno delle perdite.

interna del contatto del disco, è:

$$(2) \quad I = 2 \pi r_i \sigma d$$

2. - ESAME DELLA MORFOLOGIA DELLA MACCHINA.

2.1. - Determinazione della mappa del campo.

Per l'analisi che segue abbiamo fissato le seguenti ipotesi di lavoro:

a) abbiamo tenuto costante il prodotto dell'induzione massima cui è sottoposta la bobina superconduttrice per la densità di corrente media ( $B_{max} \bar{J} = 2,5 \times 10^8 \text{ T A/m}^2$ ); i criteri di tale scelta sono stati esaminati nel paragrafo 3.

b) abbiamo fissato il diametro interno della bobina induttrice  $D = 1 \text{ m}$  ed abbiamo calcolato la mappa del campo per dieci magneti aventi fattore di forma  $\beta$  compreso tra 0,2 e 3, mantenendo costante il volume dell'avvolgimento e quindi con buona approssimazione il costo del superconduttore.

Con queste ipotesi abbiamo ricavato la mappa delle componenti assiali  $B$  del campo. Per questo calcolo abbiamo suddivisa la sezione dell'avvolgimento in un elevato numero di spire e, mediante un elaboratore elettronico, abbiamo calcolato il contributo di ciascuna di esse secondo il metodo suggerito da Hart [12]. In fig. 2 riportiamo a titolo esemplificativo la mappa del campo relativa alla bobina avente  $\beta = 1$ .

La potenza  $P$  della macchina è, a meno delle perdite interne, uguale a:

$$(3) \quad P = EI = 2 \pi \omega N \sigma r_i d \int_{r_i}^{r_e} B(r) r dr$$

Trascurando lo spessore di liquido tra disco fisso e mobile (qualche decimo di mm) si ha che  $2Nd = 1$  per cui la (3) diventa:

$$(3') \quad P(r_i) = \pi \omega \sigma r_i l \int_{r_i}^{r_e} B(r) r dr$$

Poichè la potenza risulta essere funzione di  $r_i$  appare evidente come sia interessante ottimizzarne il valore per rendere massima la potenza. A tal fine si è approssimata la funzione  $B(r)$  con una polinomiale del 4° ordine del tratto  $\Delta r$ , utilizzando i valori puntuali del campo magnetico precedentemente calcolati. Abbiamo fissato per ragioni costruttive  $r_e = 45 \text{ cm}$  ed abbiamo eseguito i calcoli per le macchine elencate in tabella 1. Osserviamo che tale ottimizzazione tiene conto solo di fattori geometrici e prescinde quindi dai valori della densità di corrente nel rotore, dalla velocità di rotazione e dal campo magnetico.

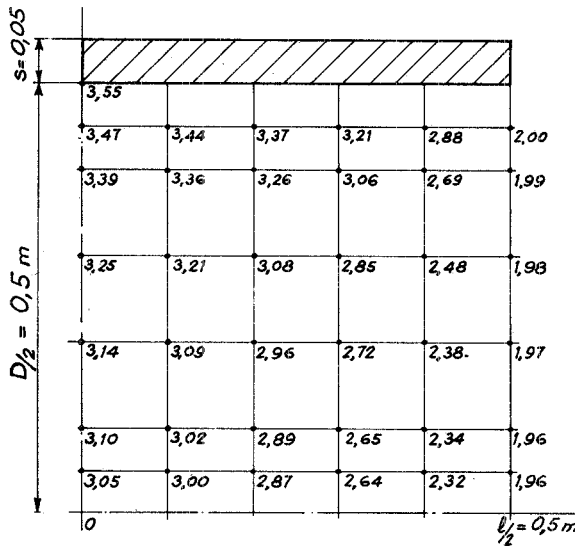


Fig. 2. - Mappa dell'induzione assiale in una bobina avente  $\beta = 1$ ,  $D = 1 \text{ m}$ ,  $s = 5 \text{ cm}$ ,  $\bar{J} = 0,703 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ .

TABELLA 1. - Caratteristiche delle macchine considerate per l'ottimizzazione di  $r_i$ . Diametro  $D = 1 \text{ m}$ , passo tra i dischi,  $p = 2,5 \text{ cm}$ .

$\beta$	$l(\text{cm})$	$s(\text{cm})$	$N$	$B_{max}$	$\bar{J}(\text{A/cm}^2)$	$\bar{r}_i^*(\text{cm})$
0,2	20	21,6	9	5	$0,500 \cdot 10^4$	27,44
0,25	25	17,8	11	4,99	$0,501 \cdot 10^4$	27,35
0,35	35	13,2	15	4,81	$0,520 \cdot 10^4$	27,13
0,5	50	9,58	21	4,44	$0,563 \cdot 10^4$	26,86
0,65	65	7,51	27	4,11	$0,608 \cdot 10^4$	26,67
0,8	80	6,18	33	3,85	$0,649 \cdot 10^4$	26,37
1	100	5,00	41	3,55	$0,703 \cdot 10^4$	26,43
1,5	150	3,38	61	3,06	$0,818 \cdot 10^4$	26,28
2	200	2,56	81	2,71	$0,924 \cdot 10^4$	26,21
3	300	1,72	121	2,26	$1,108 \cdot 10^4$	26,30

2.2. - Determinazione della f.e.m. e della potenza.

Nei dischi rotanti (v. fig. 1) la forza elettromotrice  $E$ , indotta ad opera del flusso tagliato, è esprimibile analiticamente da:

$$(1) \quad E = N \int_{r_i}^{r_e} B(r) \omega r dr$$

D'altra parte la corrente massima, che può attraversare la zona di contatto tra liquido e superficie

Abbiamo quindi fissato la velocità di rotazione  $n = 100 \text{ giri/min}$ . sia in considerazione del campo di applicazione di questo tipo di macchine [1, 2, 3, 7], che della possibilità di usare mercurio per la realizzazione dei contatti tra dischi fissi e mobili [7].

In fig. 3 riportiamo l'andamento della f.e.m.  $e_m$  ricavata nelle ipotesi di cui sopra, in funzione del parametro  $\beta$ , ponendo  $r_i = \bar{r}_i^*$  e utilizzando i valori

di  $N$  indicati in tab. 1 (4). Nella stessa figura è inoltre riportato il grafico della f.e.m. nel caso in cui il raggio interno sia 10 cm, limite sotto al quale è difficile scendere per ragioni meccaniche. Come si può notare, in corrispondenza di  $\beta = 0,5$ , in cui si ha il massimo per la  $e_m(\beta)$ , l'aver assunto  $r_i = \bar{r}_i^*$  porta ad una riduzione della f.e.m. di un fattore 1,4 rispetto a quella che si avrebbe ponendo  $r_i = 10$  cm; però la corrente risulta aumentata di un fattore 2,7 con un conseguente incremento nella potenza di circa un fattore 1,9.

Per il calcolo della potenza delle macchine aventi  $D = 1$  m ci siamo valse della (3') dopo aver fissato  $\sigma = 3 A/mm^2$  in considerazione sia della resistenza

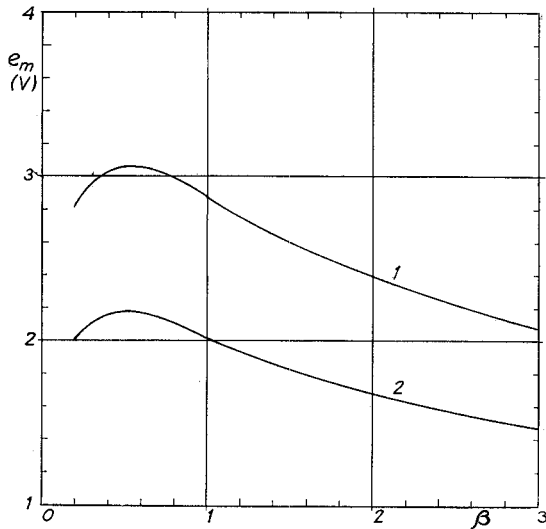


Fig. 3. — Andamento della f.e.m. media per disco in macchine aventi  $D = 1$  m,  $n = 100$  giri/1',  $r_e = 45$  cm. Curva 1 per  $r_i = 10$  cm; curva 2 per  $r_i = \bar{r}_i^*$ .

di contatto (v. paragrafo 3) che della massima densità di corrente che possono sopportare i dischi nella loro parte più interna per mantenere la dissipazione entro valori ragionevoli.

Per estendere il campo di validità dei risultati abbiamo eseguito il calcolo della potenza anche in macchine aventi diametro  $D \neq 1$  m e dimensioni geometriche ottenute moltiplicando per il rapporto  $\gamma = D/D_0$  quelle corrispondenti relative alla macchina avente  $D_0 = 1$  m. Con queste ipotesi, mantenendo invariata la velocità angolare  $\omega$ , è facile rendersi conto che le caratteristiche della macchina avente generico diametro  $D$ , diventano:

$$\begin{aligned} l &= l_0 \gamma & \mathcal{J} &= \mathcal{J}_0 \gamma^{-1/2} \\ s &= s_0 \gamma & E &= E_0 \gamma^{2,5} \\ p &= p_0 \gamma & I &= I_0 \gamma^2 \\ B &= B_0 \gamma^{1/2} & P &= P_0 \gamma^{4,5} \end{aligned}$$

dove con il pedice « 0 » abbiamo indicato le grandezze relative al caso  $D_0 = 1$  m. Nelle figg. 4 e 5 riportiamo

(4) Tali valori discendono dall'aver posto il passo  $p = 2,5$  cm, ed il piano mediano dei due dischi estremi in corrispondenza dei bordi della bobina induttrice. Tale scelta è solo esemplificativa: essa infatti influenza i valori di corrente e tensione totale della macchina ma quasi per nulla i valori di  $\bar{r}_i^*$  ed  $e_m$ .

i grafici  $P = f(\beta)$  e  $P = f(D)$  per  $\beta$  compreso tra 0,2 e 3 e  $D$  compreso tra 0,8 e 2 m.

Da essi appare un primo criterio di scelta per la forma della macchina; infatti, avendo fatto l'ipotesi

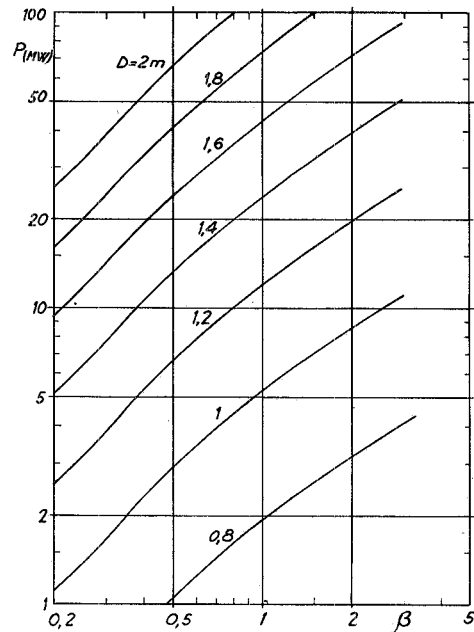


Fig. 4. — Andamento della potenza  $P = f(\beta)$  per  $n = 100$  giri/1' e  $D =$  costante.

di mantenere costante il costo dell'induttore al variare di  $\beta$  per  $D$  costante, è chiaro che, crescendo la potenza con la lunghezza, risulta più conveniente una

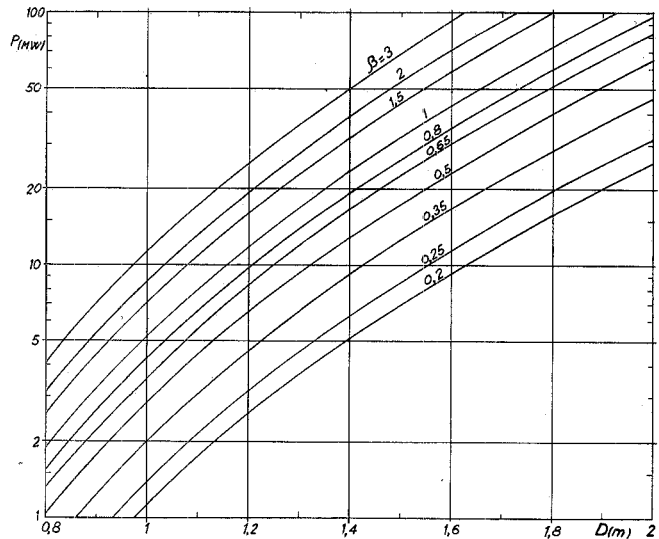


Fig. 5. — Andamento della potenza  $P = f(D)$  per  $n = 100$  giri/1' e  $\beta =$  costante.

forma allungata rispetto ad una corta. Per contro, dalla fig. 3 appare che il massimo rendimento della macchina si ha per  $\beta = 0,5$ ; infatti la f.e.m. presenta un massimo per questo valore, mentre quasi tutte le perdite sono costanti in ciascun disco al variare di  $\beta$ .

Criteri aggiuntivi di scelta verranno riportati nel paragrafo 5 in seguito a considerazioni sui costi dei vari componenti della macchina.

3. — CONSIDERAZIONI SU ALCUNI PROBLEMI REALIZZATIVI.

3.1. — *Magnete induttore.*

I principali problemi che si incontrano nella realizzazione di una bobina superconduttrice di grandi dimensioni sono essenzialmente i seguenti: stabilizzazione e raffreddamento del conduttore, sforzi meccanici e protezione elettrica della bobina.

Come si è detto, i materiali superconduttori presentano una corrente critica ( $I_c$ ) tanto più bassa quanto più elevata è l'induzione magnetica cui sono sottoposti. Per molti materiali il prodotto ( $B_{max} \mathcal{J}$ ) è una costante per un ampio intervallo dei valori di campo (2,5 ÷ 6 T). Questo fatto fisico giustifica la scelta da noi operata di mantenere costante il prodotto ( $B_{max} \mathcal{J}$ ) al variare delle dimensioni geometriche della macchina.

Il valore di  $I_c$  di un filo superconduttore avvolto a formare una bobina, è notevolmente inferiore a quello misurato su di un campione corto del medesimo filo. Tale fenomeno, che prende il nome di degradazione, è tanto più marcato quanto più grandi sono le dimensioni della bobina. Per ovviare, almeno parzialmente, a questo inconveniente si usano cavi superconduttori stabilizzati; essi sono costituiti da un numero notevole di sottili filamenti superconduttori immersi in una matrice di rame o alluminio.

Per la costruzione di bobine di grandi dimensioni è necessario usare materiali molto stabilizzati; tali materiali hanno un elevato rapporto tra la sezione del metallo di stabilizzazione (Cu o Al) e la sezione del superconduttore<sup>(5)</sup>. Si comprende quindi, come più alto sia il grado di stabilizzazione, più basso risulti il prodotto ( $B_{max} \mathcal{J}$ ) e più pesante e costosa divenga la bobina a parità di potenza. Nel nostro caso si è scelto un materiale commerciale con buona stabilizzazione, avente ( $B_{max} \mathcal{J}$ ) =  $8 \times 10^8 \text{ T A/m}^2$ .

Tutti i conduttori che costituiscono l'avvolgimento debbono essere mantenuti ad una temperatura quanto più possibile vicina a quella dell'elio liquido ( $\sim 4,2 \text{ K}$ ) e pertanto nelle bobine di forte spessore è necessario lasciare dei canali all'interno dell'avvolgimento per permettere all'elio liquido di penetrare in tutta la massa: in fig. 6 riportiamo una vista schematica di alcuni particolari costruttivi dell'avvolgimento. Ove non fosse possibile lasciare tali canali, occorre almeno inserire nella massa della bobina, durante l'avvolgimento, delle lastre di rame o alluminio atte a favorire il raffreddamento del superconduttore.

Nelle bobine di grandi dimensioni nascono rilevanti sforzi meccanici dovuti all'interazione tra campo e corrente. Per evitare danni all'avvolgimento, ove il conduttore non sia costruito con opportuni rinforzi (per es. fili di acciaio inox annegati nel cavo stesso [7]) è necessario disporre una camicia esterna di ritegno oppure nastri di acciaio inox avvolti contemporaneamente al conduttore (v. fig. 6). Per i motivi sopra-

esposti e per tener conto dello spessore dell'isolamento e della degradazione, si comprende come sia stato necessario scegliere per i calcoli precedentemente svolti un ( $B_{max} \mathcal{J}$ ) pari a  $2,5 \times 10^8 \text{ T A/m}^2$  cioè meno di un terzo del valore proprio del materiale.

Durante il funzionamento del magnete può verificarsi la transizione dallo stato superconduttore a quello normale per cause di natura termica, meccanica od elettrica. In questa eventualità, se tutta l'energia magnetica immagazzinata venisse dissipata nella bobina, ne conseguirebbe un aumento della temperatura della stessa fino, in certi casi, alla fusione del materiale. Durante la transizione potrebbero verificarsi altresì, agli estremi del magnete, delle tensioni molto elevate (parecchie migliaia di volt) che porterebbero alla perforazione dell'isolante ed al danneggiamento del superconduttore. Per evitare ciò, è necessario disporre opportuni sistemi di protezione atti a derivare all'esterno la maggior parte dell'energia che si viene a liberare. Il metodo più immediato consiste nel disporre in parallelo al magnete una resistenza opportunamente dimensionata posta all'esterno del criostato [7, 12].

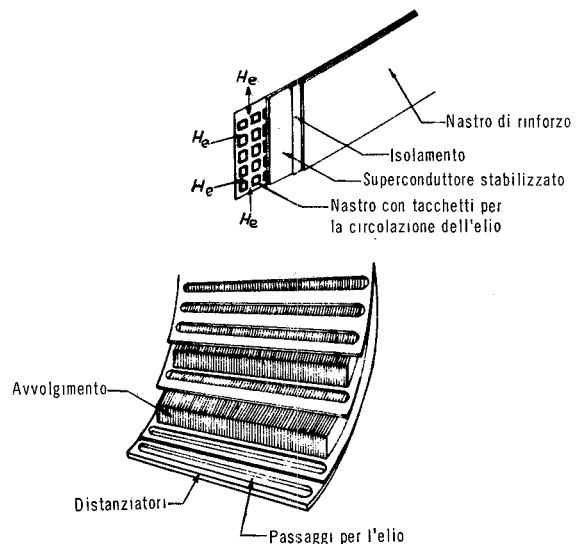


Fig. 6. — Vista schematica dell'avvolgimento.

3.2. — *Rotore*

Per aumentare la f.e.m. di una macchina omopolare vi sono due possibilità: o aumentare il numero di dischi del rotore, o suddividere il disco in diversi settori radiali elettricamente isolati tra loro e posti in serie. In quest'ultimo caso è possibile, facendo un elevato numero di settori, riportare i valori di tensione e corrente entro il campo delle macchine a collettore e utilizzare per i contatti le usuali spazzole a carbone; si ha però in tal modo una costruzione piuttosto complessa e non si elimina il collettore anche se, con opportuni accorgimenti se ne possono ridurre i problemi di commutazione. In fig. 7 è illustrato lo schema elettrico di un rotore studiato in passato [16] sul cui principio Appleton ha realizzato il suo motore [2, 3]. In esso soltanto una metà dei circuiti

<sup>(5)</sup> Per una dettagliata trattazione del problema della degradazione e della stabilizzazione vedi Bibliografia [13 ÷ 15].

dell'indotto è normalmente attiva, in tal modo la spazzola, passando da una lamella all'altra del collettore, non cortocircuita alcuna sezione del rotore, come avviene quando tutti i circuiti sono attivi. Viene in tal modo eliminata la causa prima dello scintillio.

Uno schema concettualmente più semplice per il rotore, che è quello da noi adottato, si ha disponendo tanti dischi, elettricamente in serie, calettati su di uno stesso albero. In questo caso, ammettendo che il numero di dischi sia uguale al numero dei settori del caso precedente, si avrà, a parità di potenza e di velocità, una macchina di forma più allungata, di diametro inferiore e con una corrente di rotore più elevata.

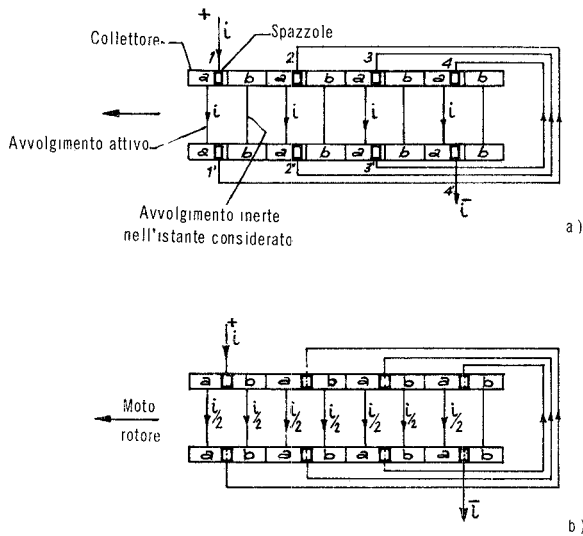


Fig. 7. — Schema elettrico del rotore per una macchina a dischi segmentati.  
a) Situazione prima della commutazione; b) Situazione all'atto della commutazione.

Con una macchina a dischi multipli non è praticamente possibile utilizzare spazzole di carbone sia a causa della forte caduta di tensione al contatto rispetto alla bassa tensione indotta, che a causa delle complicazioni costruttive che sorgono nell'ubicare le spazzole in zone di difficile accesso. Il rapporto tra la caduta di tensione al contatto e la densità di corrente che attraversa una spazzola di carbone è di circa  $10^{-5} \text{ V m}^2/\text{A}$  [5]; ciò comporta, a causa della debole f.e.m. indotta, un basso rendimento elettrico e forti problemi di raffreddamento. La utilizzazione di contatti liquidi (Hg, Hg-In, Na-K, Ga, ecc.) permette di abbassare tale rapporto a valori di circa  $10^{-8} \div 10^{-9} \text{ V m}^2/\text{A}$ ; le densità di corrente al contatto possono così essere anche dell'ordine di  $10 \text{ A/mm}^2$  pur conservando la macchina un elevato rendimento.

L'uso di questi contatti richiede speciali accorgimenti e presenta difficoltà di vario genere, citiamo ad esempio che il Na-K deve essere mantenuto in atmosfera neutra, il Ga presenta costi elevati ed il Hg a causa della sua alta viscosità dinamica è indicato solo per basse velocità di rotazione del rotore ( $n \leq 100 \text{ giri/min.}$ ) e diametro non troppo elevato

( $r_e =$  qualche decina di centimetri). Inoltre le superfici di contatto devono essere costituite da metalli che siano bagnati da liquido ma che, ovviamente, non ne siano corrosi. Nella disposizione di fig. 1 a) la corrente passa da un disco all'altro secondo la direzione perpendicolare al campo; ne nasce una forza che porta in rapida rotazione la vena liquida con conseguente erosione dei dischi. Si sviluppano in tal modo anche forti pressioni che debbono essere almeno parzialmente bilanciate con speciali dispositivi per evitare fughe di liquido attraverso le tenute. Si può ovviare a tali inconvenienti disponendo i contatti sulle superfici laterali dei dischi, in modo che la corrente nel liquido scorra lungo le linee di forza del campo. In tal caso però il liquido cortocircuita la f.e.m. prodotta nel tratto scoperto del disco con conseguenti perdite Joule; studiando opportunamente la disposizione, si può tuttavia limitare tali perdite a qualche decina di watt per ogni disco.

Come si vede, dunque, la messa a punto dei contatti liquidi non è ancora perfetta e per ora sono stati realizzati con questo sistema solamente macchine sperimentali ma, come si è detto, gli studi in questo campo sono in corso in molti laboratori [5 ÷ 8, 17, 18] ed è quindi lecito sperare in una prossima utilizzazione su scala industriale.

#### 4. — CENNI SUI RENDIMENTI.

Si è calcolato il rendimento per una macchina del tipo da noi studiato avente le seguenti caratteristiche:  $P = 3 \text{ MW}$ ,  $n = 100 \text{ giri/min.}$ ,  $D = 1 \text{ m}$  e  $\beta = 1$ ; esso è risultato pari a circa il 97%. Con un rotore avente dischi in rame anziché alluminio, il rendimento salirebbe a circa il 98%; il costo della macchina sarebbe però in tal caso lievemente aumentato. È possibile innalzare ulteriormente il rendimento riducendo la densità di corrente nel rotore ma ciò ovviamente porta ad una riduzione di potenza e quindi ad un aumento del costo specifico; un giusto compromesso può essere trovato in base all'uso previsto per la macchina.

A titolo di confronto riportiamo il valore del rendimento di due macchine superconduttrici di potenza simile a quella da noi considerata: l'una con contatti di carbone e rotore a disco suddiviso in settori [11] e l'altra con contatti in Na-K e rotore a dischi multipli [6]. La prima, che è la macchina di Appleton, ha una potenza di 2,4 MW alla velocità di 200 giri/min. ed un rendimento del 97%. La seconda è una macchina progettata in Francia, ha una potenza di 3 MW a 1550 giri/min. e le perdite complessive nel rotore sono valutate a 6,6 kW, per cui, considerando che anche per essa sarà necessario un refrigeratore circa uguale a quello usato da Appleton, le perdite totali assommeranno a circa 90 kW; il rendimento risulterà allora pari a circa il 97%.

Osserviamo che tali risultati possono considerarsi soddisfacenti se si considera che le macchine di tipo convenzionale e caratteristiche analoghe hanno rendimenti dell'ordine del 93 ÷ 94%.

5. - CONSIDERAZIONI SUI COSTI.

Oltre ai criteri di scelta esposti al paragrafo 2, riportiamo alcune considerazioni sui costi atte a fornire ulteriori indicazioni sulla scelta della forma più opportuna per la macchina. Dare una valutazione precisa in termini economici di lavorazioni così particolari è molto difficile, pertanto alcuni dei valori che riportiamo nel seguito saranno affetti da un'inevitabile inesattezza. Tuttavia le principali voci di costo sono costituite dal materiale superconduttore con cui è realizzato l'induttore e dal liquefattore dell'elio; tali valutazioni sono fatte sulla base di prezzi del 1972 e quantunque possano subire oscillazioni, risultano sufficientemente precise; quindi sostanzialmente validi possono ritenersi gli andamenti generali dei grafici ricavati nel corso della nostra indagine.

Il costo totale della macchina è stato suddiviso in 5 voci:

- $C_M$  = costo del magnete induttore,
- $C_C$  = costo del criostato (esclusi gli accessori),
- $C_L$  = costo del refrigeratore a ciclo chiuso per l'elio (della potenza di 25 W a 4,5 K),
- $C_A$  = costo degli accessori (alimentatore per l'induttore, pompe e misuratori per il vuoto della intercapedine del criostato, ecc.),
- $C_R$  = costo del rotore, completo di liquido per i contatti,
- $C_T$  = costo totale della macchina,
- $C_S$  = costo specifico per unità di potenza.

Abbiamo eseguito un'analisi dei costi di una macchina che chiameremo « macchina base » i cui parametri sono qui riportati:

- $D = 1 \text{ m}$              $N = 41 \text{ dischi}$
- $l = 1 \text{ m}$              $r_e = 0,45 \text{ m}$
- $s = 5 \text{ cm}$              $n = 100 \text{ giri/min.}$

Abbiamo poi eseguito un'analisi simile per alcune altre macchine aventi  $\beta$  e diametri diversi ed abbiamo ricavato dei criteri di variazione delle singole voci di costo, onde estendere i risultati a casi intermedi a quelli considerati. In tabella 2 riportiamo le voci di spesa della macchina base ed i fattori di proporzionalità al variare di  $\beta$  e del diametro. Dai grafici delle figure 4 e 5 e con le considerazioni riportate in tab. 2 sono stati calcolati gli andamenti dei costi specifici in funzione della potenza riportati in fig. 8. Allo scopo di evidenziare la presenza di minimi nell'andamento dei costi specifici in funzione di  $\beta$ , si sono tracciate in figura 9 alcune curve a potenza costante; da esse appare una zona di minimo dei costi piuttosto ampia, per tutte le potenze considerate, in corrispondenza di  $\beta$  compreso tra 0,8 e 2.

Mediante i diagrammi riportati sulla fig. 9 e le curve delle figg. 3 e 4 è possibile determinare, fissata

TABELLA 2. - Costi della macchina base e fattori di proporzionalità per  $\beta$  e  $D$ . I parametri della macchina base hanno il pedice « o ».

	Stima Costi (MLt)	$D = \text{cost.} = 1 \text{ m},$ $\beta$ variabile	$\beta = \text{cost.} = 1,$ $D$ variabile
$C_{M_o}$	34	$C_M = \text{cost.} = C_{M_o}$	$C_M = C_{M_o} \cdot D^3$
$C_{C_o}$	5	$C_C = C_{C_o} \cdot \beta^{0,5}$	$C_C = C_{C_o} \cdot D^2$
$C_{L_o}$	45	$C_L = C_{L_o} \cdot \beta^{0,25}$	$C_L = C_{L_o} \cdot D$
$C_{A_o}$	7	$C_A = \text{cost.} = C_{A_o}$	$C_A = \text{cost.} = C_{A_o}$
$C_{R_o}$	15	$C_R = C_{R_o} \cdot \beta$	$C_R = C_{R_o} \cdot D^3$
$C_{T_o}$	106		

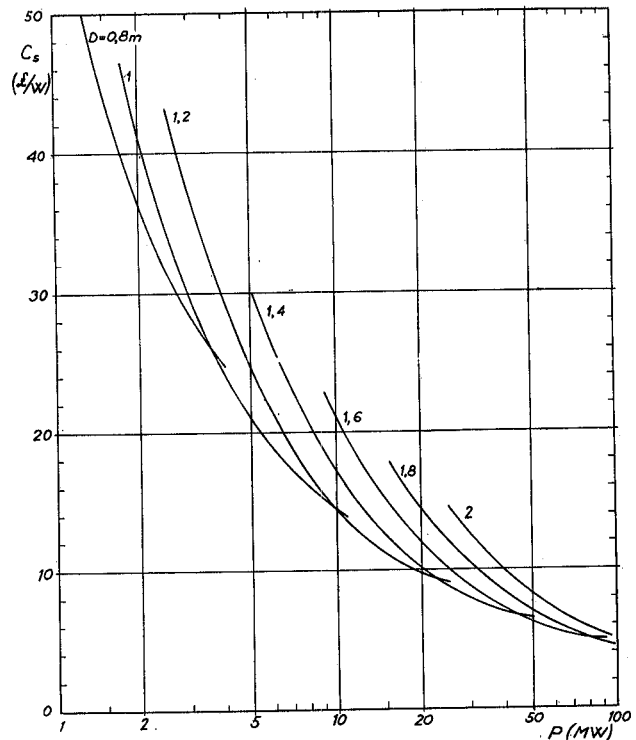


Fig. 8. — Andamento dei costi specifici  $C_s = f(P)$  per  $n = 100 \text{ giri/1'}$  e  $D = \text{costante}$ .

la potenza, le caratteristiche geometriche della macchina avente il costo specifico minimo.

A titolo di confronto osserviamo che una macchina del tipo da noi studiato della potenza di 12 MW a 50 giri/min. costa circa 220 MLt<sup>(6)</sup>, mentre una di tipo tradizionale, di uguali prestazioni, costa circa 300 MLt. Riportiamo ancora che una macchina tradizionale da 5 MW a 550 giri/min. costa circa 75 MLt; una del tipo ad induttore superconduttore di egual potenza a 100 giri/min. costa ~ 100 MLt, ma com'è noto, una macchina lenta, a parità di potenza costa sempre assai di più di una veloce. Infatti un'unità di egual potenza del tipo da noi studiato, ma con contatti liquidi in Na-K tali da consentire la velocità di 500 giri/min. verrebbe a costare circa 50 ÷ 60 MLt.

(6) Tale costo è stato ricavato dai nostri grafici per una macchina della potenza di 24 MW a 100 giri/min.



CONCLUSIONI.

Dall'esame dei risultati cui siamo pervenuti si nota come il rendimento raggiunga il massimo per macchine di forma piuttosto raccorciata ( $\beta = 0,5$ ) mentre il minimo di costo specifico si abbia per macchine di maggior lunghezza ( $\beta \geq 1$ ); un buon compromesso può quindi essere una macchina con  $\beta = 0,8 \div 1$ .

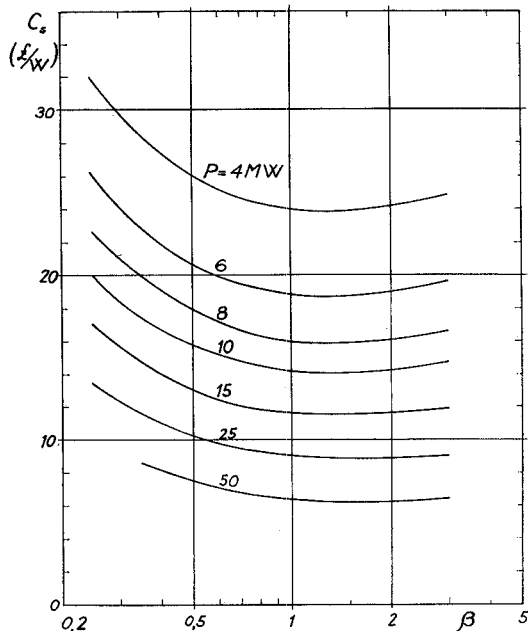


Fig. 9. — Andamento del costo specifico  $C_s = f(\beta)$  a potenza costante;  $n = 100$  giri/1'.

Come si è visto, le macchine superconduttrici, e segnatamente quelle a contatti liquidi, hanno attualmente rispetto alle tradizionali una minore sicurezza di funzionamento; dato però il rapido progresso tecnologico in corso in questo settore, il loro grado di affidabilità è certamente destinato ad aumentare e quindi, per i notevoli pregi che presentano, le macchine superconduttrici potranno trovare in futuro ampie applicazioni.

RINGRAZIAMENTI.

Desideriamo ringraziare il prof. G. Sacerdoti per l'incoraggiamento al presente lavoro e le utili discussioni; ringraziamo altresì la Ditta ASGEN di Genova per aver fornito alcune informazioni economiche su macchine tradizionali.

Manoscritto pervenuto il 9 gennaio 1973.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. FISHLOCK: *A guide to superconductivity*. - (Mac Donald, London, 1969).
- [2] A. D. APPLETON, *Superconductors in Motion: A guide to superconductivity*. - (Mac Donald, London, 1969).
- [3] A. D. APPLETON: *Motors, Generators, and Flux Pumps*. - *Cryogenics*, 9, 147 (1969).
- [4] A. D. APPLETON, J. S. H. ROSS: *Aspect of a superconducting winding for a 3250 hp motor, Low Temperatures and Electric Power*. - London (1969), pag. 123.
- [5] J. P. CHABRERIE, MAILFERT: *Machines unipolaires superconductrices de faible puissance*. - Atti Congresso della Società Francese degli Elettrotecnici, Nizza (1971).
- [6] D. NEVEU-LEMAIRE, B. LEON: *Intérêt et faisabilité de cryomoteurs à courant continu de grade puissance*. - Atti del Congresso della Società Francese degli Elettrotecnici, Nizza (1971).
- [7] A. MALANDAIN: *Machines unipolaires superconductrices à fort couple*. - Atti Congresso della Società Francese degli Elettrotecnici, Nizza (1971).
- [8] J. P. CHABRERIE, G. FOURNET, A. MAILFERT: *Etude d'un mode de contact pour métaux liquides dans une machine homopolaire*. - « *Revue Générale de l'Electricité* », 3, (1968).
- [9] A. ECHARRI, G. PASOTTI: *Applicazioni della superconduttività all'elettrotecnica, C.N.E.N.* - Tavola rotonda sulle applicazioni della superconduttività, Frascati (1971).
- [10] *Superconducting field system for 3.250 hp motor*. - « *Electrical Times* », 1 February, (1968).
- [11] *Cryophysics, Newsletter* 8, 1 (1970).
- [12] P. J. HART: *Universal Tables for Magnetic Field of Filamentary and Distributed Circular Currents*. - (American Elsevier Publishing, New York, 1967).
- [13] P. F. SMITH: *The Technology of large Magnets: « A guide to superconductivity »*. - (Mac Donald, London, 1969).
- [14] M. V. RICCI, M. SPADONI: *Proprietà fisiche e rassegna comparativa dei superconduttori per alti campi magnetici, C.N.E.N.* - Tavola rotonda sulle applicazioni della superconduttività all'elettrotecnica, Frascati (1971).
- [15] P. DEL VECCHIO, G. SACERDOTI, G. M. VEGA: *Perdite in cavi superconduttori eccitati con tensione a gradino*. - « *L'Elettrotecnica* », 10, (1972).
- [16] E. ASTUNI: *La Paraldinamo* - « *L'Elettrotecnica* », 4, 135 (1948).
- [17] L. A. SUKHANOV et al.: *Calculation of the liquid metal slip ring in homopolar machines*. - « *Elektrotechnike* », 36, 14 (1965).
- [18] J. P. CHABRERIE, A. MAILFERT: *Perfectionnement aux machines homopolaires à contact pour remplissage total*. - Brevet ANVAR, n. 70 41 767.