

LNF-72/29
31 Marzo 1972

G. Pasotti e G. M. Veca : STUDIO SUL DIMENSIONAMENTO DI
MACCHINE OMOPOLARI SUPERCONDUTTRICI IN CORRENTE
CONTINUA, -

LNF-72/29
31 Marzo 1972

G. Pasotti e G.M. Veca: ^(x)STUDIO SUL DIMENSIONAMENTO DI MACCHINE OMOPOLARI SUPERCONDUTTRICI IN CORRENTE CONTINUA.

INTRODUZIONE -

La disponibilità sul mercato di materiali superconduttori in grado di sopportare alti campi magnetici ad elevata densità di corrente, ha ridato nuovo interesse alla vecchia macchina omopolare⁽¹⁻⁷⁾ di cui praticamente nessuno più si occupava, dopo l'avvento delle macchine a collettore.

I difetti principali di una macchina omopolare convenzionale sono quelli di avere bassissime tensioni con correnti molto intense; il che comporta notevoli problemi alle spazzole e rende antieconomico il trasporto e l'utilizzazione dell'energia elettrica prodotta od assorbita. I materiali superconduttori permettono la realizzazione di induttori ad elevato campo (diversi Tesla) con un minimo consumo di energia elettrica: ciò permette di aumentare la tensione indotta nel rotore. Inoltre è possibile realizzare tale induttori senza circuito magnetico in ferro, con conseguente drastica riduzione del loro peso ed ingombro a parità di caratteristiche funzionali. Le macchine omopolari superconduttrici conservano i gravi problemi relativi alle spazzole, che però ora può valere la pena cercare di risolvere anche con costose ricerche, dato l'interesse tecnico ed economico di tali macchine.

Come esamineremo più dettagliatamente nei paragrafi che seguono, molti ricercatori si sono orientati verso lo studio di contatti liquidi che offrono rispetto alle spazzole tradizionali, una resistenza di contatto estremamente ridotta e permettono una densità di corrente molto più

(x) - Dell'Istituto di Elettrotecnica dell'Università di Roma.

2.

elevata⁽⁵⁻⁸⁾.

Sul principio delle macchine omopolari superconduttrici, molti sono i progetti all' studio e diverse pure sono le realizzazioni eseguite, ne riportiamo alcune a titolo di esempio.

- In Inghilterra, nel 1966 Appleton⁽²⁻⁴⁾ presso la International Research and Development Co. (IRD) ha progettato e successivamente costruito un motore con le seguenti caratteristiche principali: induzione massima 3,5 T, corrente di indotto 5,8 kA con una tensione di 430 V, potenza 3250 HP, velocità 200 giri/1', diametro interno e lunghezza indotto re rispettivamente 227 cm e 57 cm. I contatti sono realizzati con normali spazzole di carbone poichè il rotore, essendo diviso in settori radiali, ha una corrente di alimentazione non troppo elevata. Tale motore è attualmente installato, quale propulsore per una pompa ad acqua, nella centrale elettrica di Fawley ed il suo funzionamento è soddisfacente. Esso rappresenta, per ora, la maggior realizzazione in questo campo, ma sempre alla IRD sono state già progettate diverse altre unità con potenze fino a 200 MW e tensioni fino a 1 kV. Alcune unità, per applicazioni marine, sono già in corso di costruzione.
- In Francia, dal 1966 il Laboratoire Central des Industries Electriques ha iniziato studi che hanno portato alla realizzazione di un prototipo di motore superconduttore omopolare con contatti liquidi in lega Hg-In, avente le seguenti caratteristiche principali: induzione massima 2,62 T, corrente di indotto 15 kA con una tensione di 4,6 V, potenza 61 kW a 600 giri/1', diametro esterno e lunghezza dell'indotto rispettivamente 27 cm e 30 cm.
- In Giappone, la Tokyo Shibaura Electric Co. ha costruito nel 1969 un generatore con indotto di 12 cm di diametro e spazzole in grafite argentata.

Citiamo a questo punto che anche in Italia, presso l'ASGEN di Genova, è in corso di progetto un prototipo di motore superconduttore della potenza di alcune decine di kW.

I principali vantaggi che offrono le macchine superconduttrici a corrente continua, rispetto alle macchine tradizionali^(1, 2, 3, 6, 9, 10) sono:

- minor costo, per potenze superiori a qualche MW (1, 6)
- minori dimensioni
- pesi molto inferiori
- maggior rendimento e quindi economia di esercizio per unità di elevata potenza^(6, 10, 17)
- rotore con bassa costante di tempo ed inerzia, quindi possibilità di sopportare brusche variazioni di carico e velocità

- possibilità di costruire unità di maggiore potenza.

I principali inconvenienti sono invece:

- problema dei contatti
- attuale minor grado di affidabilità; destinato ad aumentare con lo sviluppo delle tecnologie dei materiali superconduttori e dei liquefattori
- notevoli flussi magnetici dispersi
- necessità di efficaci sistemi di protezione dai cortocircuiti quando la macchina è usata come generatore poichè, a causa della bassa impedenza interna, la corrente di cortocircuito potrebbe assumere valori molto elevati.

I motori a corrente continua, per le loro caratteristiche citate, possono essere efficacemente impiegati nei seguenti campi:

- pompe di alimentazione per grandi impianti di produzione termoelettrica, sia tradizionali che nucleari
- grandi laminatoi
- propulsione navale (per es. rompighiaccio, rimorchiatori d'alto mare, posacavi, ecc).
- grandi montacarichi per miniere
- compressori per industrie petrolifere.

Come generatori, le macchine superconduttrici appaiono competitive con gli impianti costituiti da trasformatori e raddrizzatori e possono quindi trovare importanti impieghi nell'industria elettrochimica⁽³⁾.

Nei paragrafi che seguono esamineremo la forma dell'induttore e del rotore, daremo un cenno su alcuni problemi realizzativi e passeremo quindi ad una analisi indicativa dei costi, atta a determinare un criterio di scelta della forma più opportuna della macchina e delle sue dimensioni, per una prefissata potenza compresa tra 1 e 100 MW.

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 in grado di mantenerla alla temperatura dell'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 queste. I contatti sono previsti del tipo a liquido a riempimento totale^(x)(5, 7, 8) per cui tutto il complesso posto all'interno della camicia

(x) - I criteri di questa scelta saranno esposti al par. 3.

4.

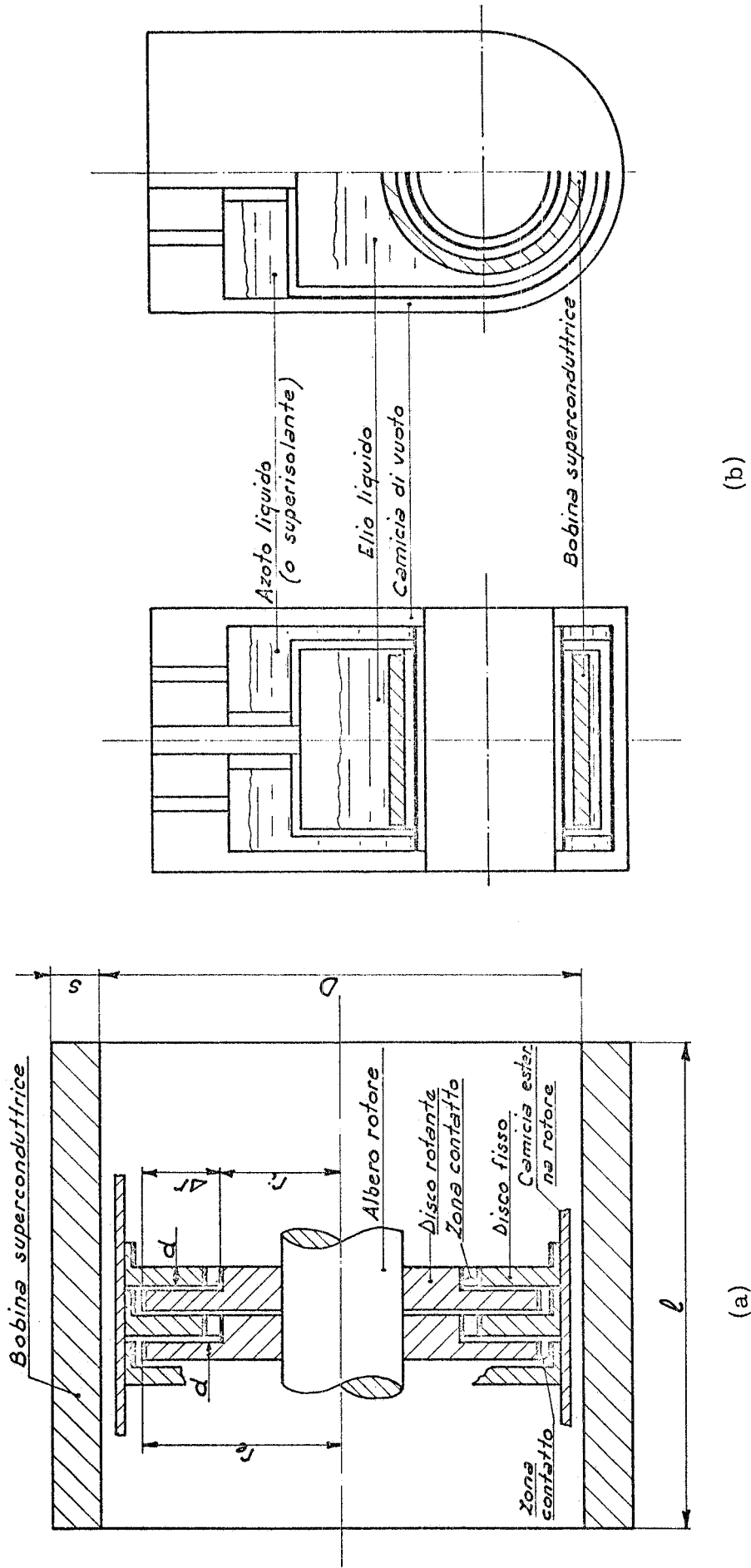


FIG. 1 - Schema della macchina considerata: (a) disposizione schematica di una macchina a dischi multipli; (b) criostato con induttore.

esterna del rotore è riempito da un liquido conduttore che assicura il contatto tra dischi fissi e mobili nelle zone segnate in neretto della Fig. 1. Tutte le altre superfici esposte al liquido sono elettricamente isolate.

Diamo ora un elenco dei simboli usati nel testo (v. Fig. 1):

- B = componente assiale dell'induzione all'interno della bobina superconduttrice
- J = densità di corrente nell'induttore
- D = diametro interno dell'induttore
- l = lunghezza dell'induttore
- $\beta = l/D =$ fattore di forma
- s = spessore della bobina induttrice
- $r_e =$ raggio esterno del disco del rotore
- $r_i =$ raggio interno del disco del rotore
- $\Delta r =$ tratto utile del disco rotante ai fini della forza elettromotrice indotta
- d = spessore dei dischi, sia fissi che rotanti
- $p \simeq 2d =$ interasse dei dischi del rotore
- $\omega =$ 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
- N = numero di dischi del rotore
- e = forza elettromotrice indotta nel disco rotante
- $E = \sum e =$ f.e.m. totale indotta nel rotore
- $e_m = E/N =$ f.e.m. media indotta in un disco
- P = potenza elettrica generata o assorbita a meno delle perdite
- $C_M =$ costo del magnete induttore
- $C_C =$ costo del criostato (esclusi accessori)
- $C_L =$ costo del liquefattore dell'elio
- $C_A =$ costo degli accessori (pompe, misuratori di vuoto per il criostato, ecc.)
- $C_R =$ costo del rotore
- $C_T =$ costo totale della macchina
- $C_S =$ costo specifico per unità di potenza

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 ($B_{Max} \cdot J = 2,5 \times 10^8$ TA/m²); i criteri di tale scelta sono esaminati

6.

nel par. 3.

b) abbiamo fissato il diametro interno della bobina induttrice, $D = 1$ m ed abbiamo calcolato la mappa del campo al variare del fattore di forma β 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 ($\simeq 600$) e mediante un elaboratore elettrico abbiamo calcolato il contributo di ciascuna di esse secondo il metodo suggerito da Hart⁽¹¹⁾ e da noi opportunamente modificato. Tale calcolo è stato eseguito per nove magneti induttori aventi uno stesso diametro interno $D = 1$ m, un $B_J = 2,5 \times 10^8$ TA/m² costante, ed un β variabile tra 0,2 e 3.

2.2. - Determinazione di E e ottimizzazione di r_i . -

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

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

La funzione $B(r)$ è stata approssimata con un polinomio del 4° ordine nel tratto Δr , utilizzando i valori puntuali del campo magnetico precedentemente calcolati.

D'altra parte la corrente max che può attraversare la zona di contatto tra liquido e superficie interna di contatto del disco è:

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

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:

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

Dalla (3') appare evidente come sia interessante ottimizzare il valore di r_i per rendere max $P(r_i)$.

Per eseguire tale ottimizzazione abbiamo fissato per ragioni costruttive $r_e = 0,9 (D/2) = 45 \text{ cm}$ ed abbiamo eseguito i calcoli per le macchine elencate in Tabella I. Nella stessa sono riportati anche i valori max e minimo che assume r ottimale nei vari dischi. Osserviamo che tale ottimizzazione tiene conto solo di fattori geometrici e prescindendo quindi dai valori delle densità di corrente nel rotore, dalla sua velocità di rotazione e del campo magnetico. Facciamo inoltre notare che i casi a β molto elevato e molto basso hanno essenzialmente un interesse teorico e sono serviti per rendere più evidente l'andamento di alcuni diagrammi che saranno nel seguito illustrati.

Abbiamo quindi fissata la velocità di rotazione $n = 100 \text{ giri/1'}$, 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⁾. La densità di corrente max al contatto è stata fissata a $\sigma_{\text{Max}} = 3 \text{ A/mm}^2$ in considerazione sia della resistenza di contatto (v. par. 3) che della massima corrente che può attraversare il disco nella sua parte più interna.

In Fig. 2 riportiamo l'andamento della f.e.m. media per disco $e_m = E/N = f(\beta)$. Nella stessa figura è inoltre riportato il grafico $e_{m1} = f(\beta)$ per il caso $r_i = 10 \text{ cm}$, limite sotto al quale è difficile scendere per ragioni meccaniche. Come si può notare, in corrispondenza di $\beta = 0,6 \div 0,8$ in cui si ha il max per la $e_m(\beta)$ e la $e_{m1}(\beta)$, l'ottimizzazione di r_i riduce il valore di e_m di un fattore 1,4 rispetto al caso limite ($r_i = 10 \text{ cm}$); però la corrente risulta aumentata di un fattore 2,7 con un conseguente incremento della potenza di circa un fattore 1,9. Per tracciare il grafico di Fig. 2 abbiamo utilizzato i valori di N indicati in Tab. I; essi discendono dall'aver posto il passo $p = 2,5 \text{ cm}$, costante per tutti i magneti aventi $D = 1 \text{ m}$, e l'asse dei due dischi estremi in corrispondenza dei bordi della bobina induttrice. Facciamo notare che tale scelta è solo esemplificativa, essa infatti influenza i valori di corrente e tensione totale della macchina I ed E , ma quasi per nulla i valori di r ottimale ed e_m .

2.3. - Determinazione della potenza e fattori di scala. -

In Fig. 3 riportiamo il grafico $P = f(\beta)$ ed in Fig. 4 $P = f(D)$ per i casi di Tab. I (nei quali è $D = 1 \text{ m}$). Osserviamo che anche i grafici delle Figg. 3 e 4 sono poco influenzati dalla scelta di N , infatti per un interasse doppio ($p = 5 \text{ cm}$), si avrebbe $E_2 = \left[\frac{N+1}{2} \right] (E_1/N)$, $I_2 = 2I_1$, dai quali $P_2 = \left[\frac{N+1}{N} \right] P_1$, dove con i pedici "1" si sono indicati i valori relativi a $p = 2,5 \text{ cm}$. Nelle figure 3 e 4 sono riportati pure i grafici $P = f(\beta)$ e $P = f(D)$ per altri diametri, ottenuti dai precedenti mediante le seguenti considerazioni sui fattori di scala.

Consideriamo una bobina di diametro $D \neq 1 \text{ m}$, e lasciamo invariati il fattore di forma β , la velocità angolare ω ed il numero di di-

8.

TAB. I - Caratteristiche delle macchine prese in considerazione per l'ottimizzazione di r_i . Diametro $D = 1$ m, passo tra i dischi $p = 2,5$ cm.

β	l (cm)	s (cm)	N	B_{Max} (T)	J (A/cm ²)	r_i ottimale (cm)
0,2	20	21,7	9	5,90	$0,423 \cdot 10^4$	27,3 ÷ 28
0,25	25	17,9	11	5,69	$0,439 \cdot 10^4$	27 ÷ 27,7
0,35	35	13,2	15	5,22	$0,478 \cdot 10^4$	26,6 ÷ 27,5
0,5	50	9,3	21	4,64	$0,540 \cdot 10^4$	26,3 ÷ 27,1
0,65	65	7,53	27	4,22	$0,595 \cdot 10^4$	26,2 ÷ 26,9
0,8	80	6,21	33	3,90	$0,645 \cdot 10^4$	26,1 ÷ 26,7
1	100	5	41	3,58	$0,700 \cdot 10^4$	26,1 ÷ 26,6
1,5	150	3,41	61	3,03	$0,825 \cdot 10^4$	26 ÷ 26,6
2	200	2,57	81	2,68	$0,935 \cdot 10^4$	26 ÷ 26,6
3	300	1,72	121	2,24	$1,12 \cdot 10^4$	26 ÷ 26,6

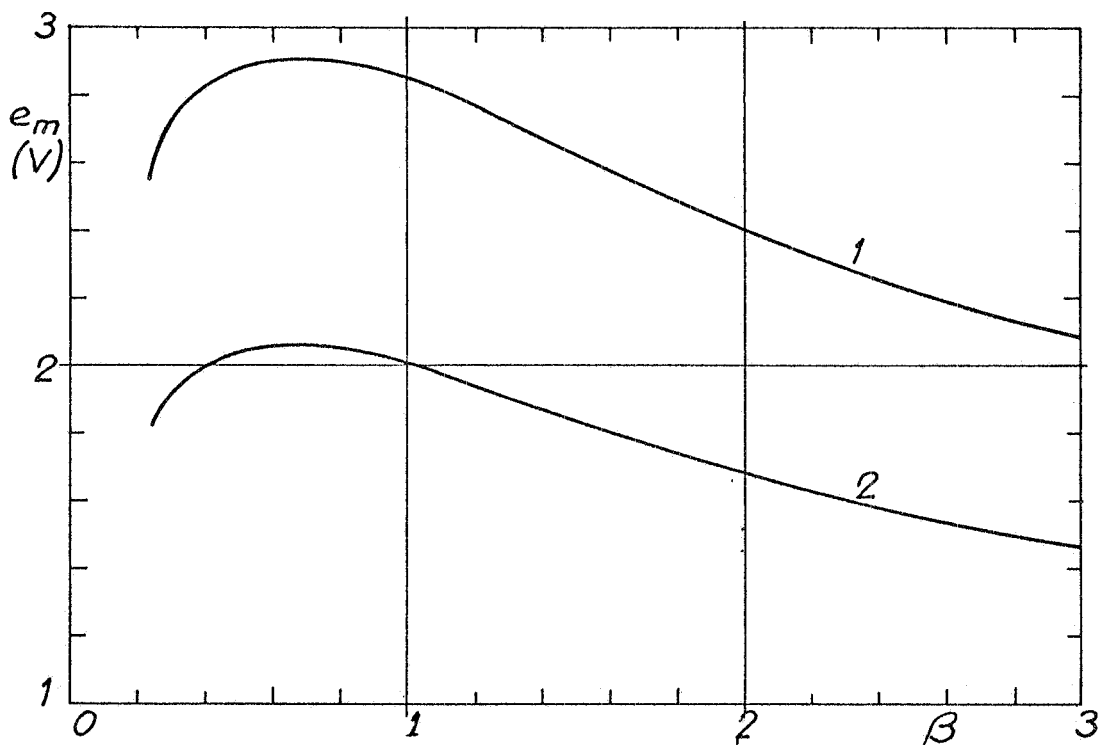


FIG. 2 - Andamento della f.e.m. media per disco $e_m = f(\beta)$ per $D = 1$ m, $n = 100$ giri/1', $r_e = 45$ cm. Curva 1, $r_i = 10$ cm; curva 2, r_i tale da rendere max la potenza ($r_i = 26 + 27,8$ cm).

schi N. Con queste ipotesi è facile rendersi conto che le caratteristiche della macchina generica avente diametro D espresso in metri, diventano:

$$\begin{array}{ll} l = l_0 D & J = J_0 / D^{1/2} \\ s = s_0 D & E = E_0 D^{2,5} \\ p = p_0 D & I = I_0 D^2 \\ B = B_0 D^{1/2} & P = P_0 D^{4,5} \end{array}$$

dove con il pedice "0" abbiamo indicato le grandezze relative al caso $D = 1\text{m}$.

Le Figg. 3 e 4 permettono, prefissata la potenza, di ricavare tutte le coppie di valori di D e l con cui realizzare la macchina. Da esse appare un primo criterio di scelta per la forma più conveniente; infatti, avendo fatta l'ipotesi di mantenere costante il costo dell'induttore al variare di β per D costante, è chiaro che risulta più conveniente una forma allungata rispetto ad una corta. Per contro, dalla Fig. 2 appare che il max rendimento della macchina si avrà per $\beta = 0,6 \div 0,8$, infatti mentre quasi tutte le perdite (ohmiche nei dischi e nei contatti ed idrodinamiche nel liquido di contatto) sono costanti in ciascun disco al variare di β , la f.e.m. presenta un massimo appunto per $\beta = 0,6 \div 0,8$.

Criteri aggiuntivi di scelta verranno riportati nel par. 5 relativi ai 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:

- scelta del conduttore
- raffreddamento
- sforzi meccanici
- protezione elettrica.

Com'è noto, i materiali superconduttori presentano una corrente critica tanto più bassa quanto più elevato è il campo magnetico in cui sono immersi. Per molti materiali il prodotto ($B_{\text{max}} J$) è una costante per un ampio intervallo dei valori di campo (tra $2,5 \div 3\text{ T}$ e $6 \div 8\text{ T}$). Per la costruzione di bobine di grandi dimensioni è necessario usare materiali molto stabilizzati^(x), cioè con un elevato rapporto tra la sezione del me

(x) - Per una più dettagliata trattazione del problema della stabilizzazione vedi Bibliografia (12) e (13).

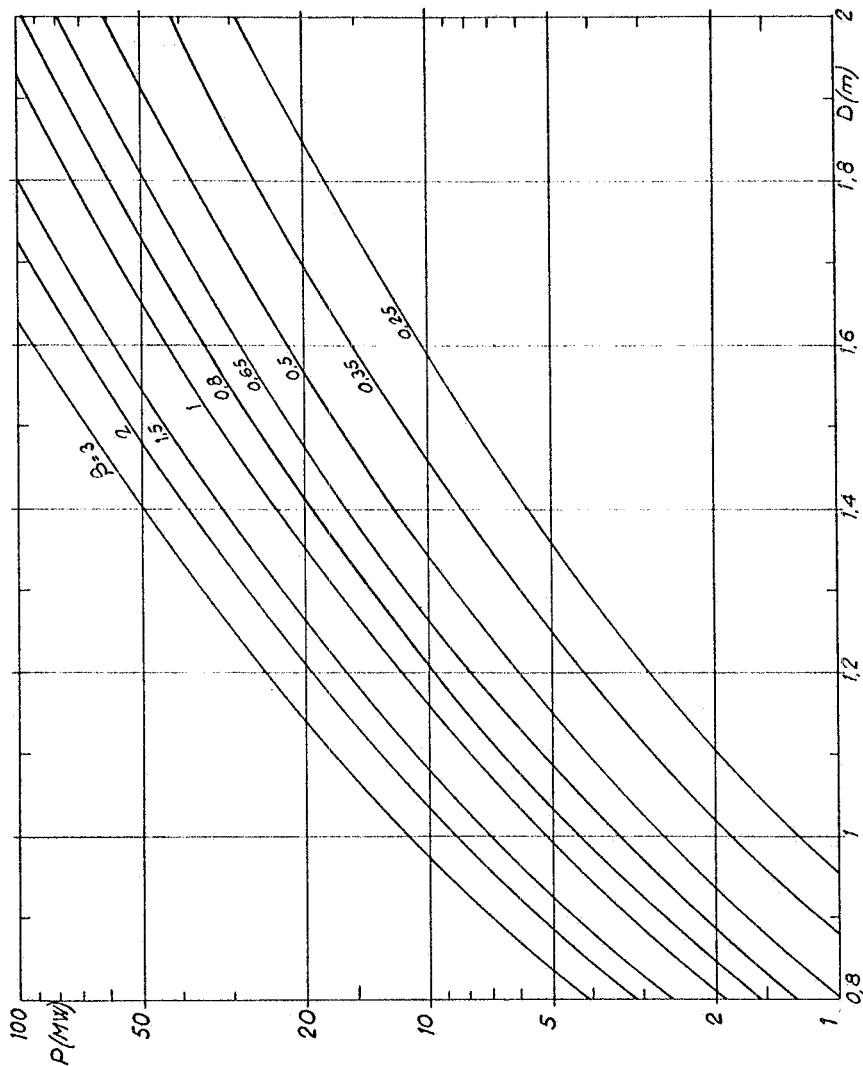


FIG. 4 - Andamento della potenza $P = f(D)$ per $n = 100$ giri/1' e $\beta = \text{cost.}$

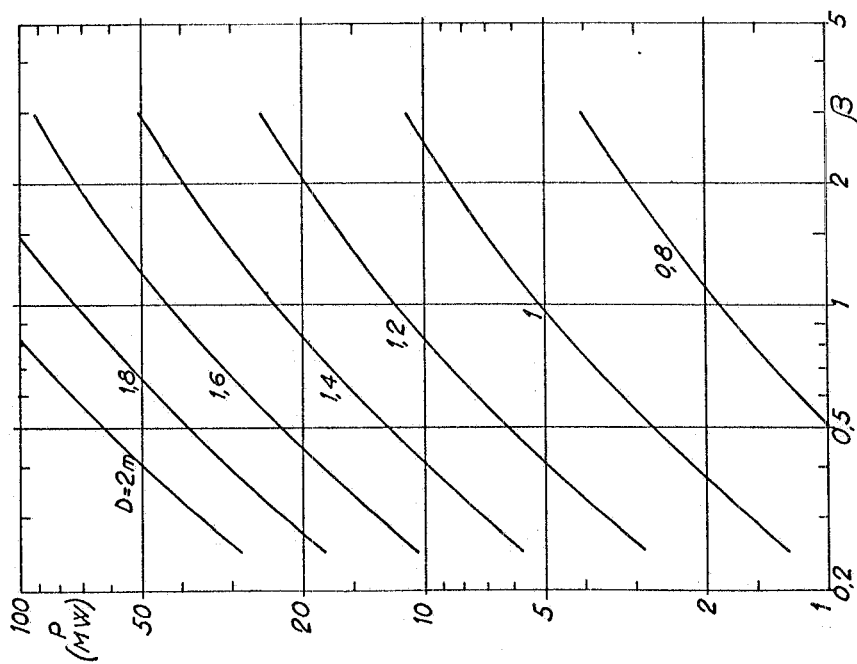


FIG. 3 - Andamento della potenza $P = f(\beta)$ per $n = 100$ giri/1' e $D = \text{cost.}$

tallo di stabilizzazione (Cu o Al) e la sezione del superconduttore. Si comprende quindi, come più alto sia il grado di stabilizzazione, più basso risulti il prodotto ($B_{Max} J$) e più pesante e costosa divenga la bobina a parità di potenza della macchina. Nel nostro caso si è scelto un materiale commerciale con media stabilizzazione avente un $B_{Max} J = 8 \times 10^8 \text{ TA/m}^2$ misurato su campioni corti.

Tutti i conduttori che costituiscono l'avvolgimento debbono essere mantenuti ad una temperatura quanto più possibile vicina a quella dell'elio liquido ($\sim 4,5^\circ\text{K}$) e pertanto nelle bobine di forte spessore è necessario lasciare canali all'interno dell'avvolgimento per permettere all'elio liquido di penetrare in tutta la massa; in Fig. 5 riportiamo una vista schematica di alcuni particolari costruttivi dell'avvolgimento.

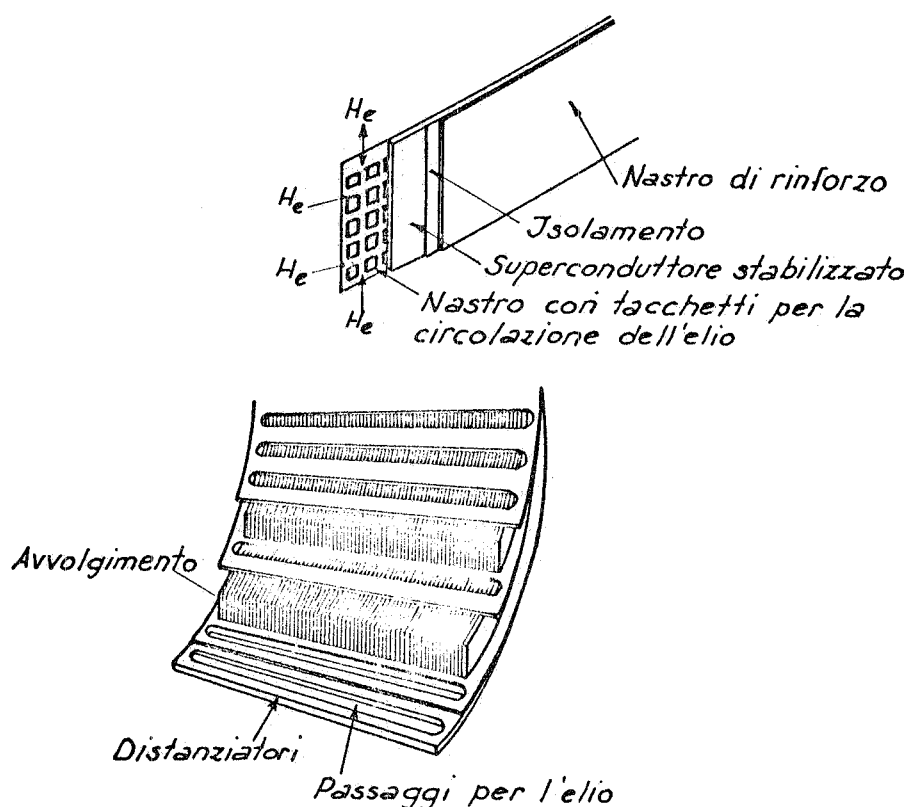


FIG. 5 - Vista schematica dell'avvolgimento.

Ove non fosse possibile lasciare tali canali, occorre almeno costruire l'avvolgimento con conduttori a sezione quadrata o rettangolare ed impregnarla con resine a buona conducibilità termica.

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 necessa

rio disporre una camicia esterna di ritegno a diretto contatto con l'avvolgimento oppure, meglio ancora, nastri di acciaio inox avvolti contemporaneamente al conduttore (v. fig. 5).

Per i motivi sopraesposti (raffreddamento e sforzi meccanici), per tener conto dello spessore dell'isolamento e della degradazione (cioè della riduzione della corrente critica che subisce un filo superconduttore quando è avvolto in bobina^(12, 13)), si comprende come sia stato necessario scegliere per i nostri calcoli un $B_{\max} J$ pari a $2,5 \times 10^8 \text{ TA/m}^2$ cioè meno di un terzo del valore relativo al materiale in campioni corti.

Durante il funzionamento del magnete può verificarsi la transizione dallo stato superconduttore a quello normale per svariate cause (termiche, meccaniche, elettriche). In questa eventualità, se la bobina fosse isolata elettricamente dall'esterno, tutta l'energia magnetica immagazzinata verrebbe trasformata in calore, con conseguente aumento della temperatura dell'avvolgimento fino, in certi casi, alla fusione del materiale.

Per evitare ciò, è necessario disporre di opportuni sistemi di protezione atti a derivare all'esterno la maggior parte dell'energia che si viene a liberare a causa della transizione. Il metodo più immediato consiste nel disporre in parallelo al magnete una resistenza opportunamente dimensionata posta all'esterno del criostato^(7, 12).

3.2. - Rotore. -

Come si è detto, una macchina omopolare ha il grave difetto di presentare una bassa f.e.m. indotta. Per aumentare tale f.e.m. 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, ma in questo modo si ha una costruzione piuttosto complessa e non si elimina il collettore anche se, con opportuni accorgimenti, se ne possono ridurre i problemi di commutazione (v. fig. 6)^(2, 3, 14). In questo caso è possibile però realizzare i contatti con le usuali spazzole a carbone.

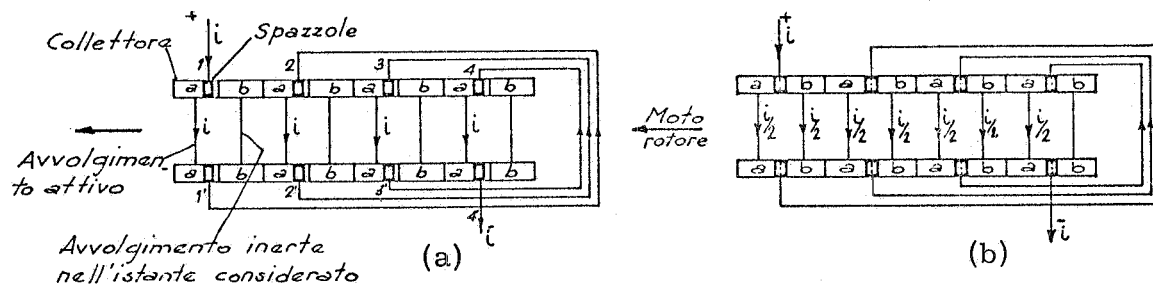


FIG. 6 - Schema elettrico del rotore per una macchina a dischi segmentati.

Uno schema concettualmente più semplice per il rotore, si ha disponendo tanti dischi, elettricamente in serie, calettati su di uno stesso albero. In questo caso, a parità di potenza, si avrà una macchina di forma più allungata della precedente e di diametro inferiore e, ammettendo che il numero di dischi sia circa uguale al numero di settori del caso precedente, si avrà una corrente più elevata ed una tensione più bassa. Con una macchina a dischi multipli non è praticamente possibile utilizzare spazzole di carbone a causa della forte caduta di tensione al contatto in rapporto alla bassa f. e. m. prodotta; il rapporto tra questa caduta di tensione e la densità di corrente che la attraversa è di circa $10^{-5} \text{ Vm}^2/\text{A}^{(5)}$, e ciò comporta un basso rendimento elettrico e forti problemi di raffreddamento; inoltre dovendo porre le spazzole in zone di difficile accesso, sorgono notevoli complicazioni costruttive. La utilizzazione di contatti liquidi (Hg, Hg-In, Na-K, Ga, ecc.) permette di abbassare il rapporto tra caduta di tensione e densità di corrente a valori di circa $10^{-8} \div 10^{-9} \text{ Vm}^2/\text{A}$; le densità di corrente al contatto possono così essere anche dell'ordine di 10 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, il Hg... a causa della sua alta viscosità dinamica, è indicato solo per basse velocità di rotazione del rotore ($n \simeq 100$ giri/1') e diametro non troppo elevati ($r_e \simeq$ qualche decina di centimetri). Inoltre le superfici di contatto debbono essere costituite da metalli che siano bagnati dal liquido ma che, ovviamente, non ne siano corrosi. Nella disposizione di fig. 1a) la corrente passa da un disco all'altro secondo una direzione perpendicolare al campo, ne nasce una forza che porta in rapida rotazione la vena liquida con conseguente erosione dei dischi; si sviluppano pure forti pressioni che debbono essere almeno parzialmente bilanciate con speciali dispositivi per evitare fughe di liquido attraverso le tenute. Si può ovviare a tale inconveniente 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 in cui avviene il contatto, 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 completa e per ora sono stati realizzati con essi solamente macchine sperimentali, ma gli studi in questo campo sono in corso in molti laboratori^(5+8, 15, 16) ed è quindi lecito sperare in una loro prossima utilizzazione su scala industriale.

4. - CENNI SUI RENDIMENTI -

A titolo orientativo riportiamo i valori dei rendimenti di due macchine di potenza simile, l'una con contatti in carbone e rotore realizzati con un disco suddiviso in settori⁽¹⁷⁾ e l'altra con contatti in Na - K e rotore a dischi multipli⁽⁶⁾. La prima è la macchina costruita da Appleton; essa ha una potenza di 2,4 MW, una velocità di 200 giri/1' ed un rendimento del 97%. La seconda è una macchina progettata in Francia, per una potenza di 3 MW a 1500 giri/1'. Le perdite complessive del rotore sono valutate a 6,6 kW e considerando che anche per essa sarà necessario un refrigeratore circa uguale a quello usato da Appleton, le perdite totali assumeranno a circa 30 kW; il rendimento risulterà allora pari a circa il 99%.

Nel nostro caso il rendimento calcolato per una macchina da 5 MW e 100 giri/1' con $D = 1$ m e $\beta = 1$ è leggermente superiore al 97%. Con un rotore avente dischi in rame anziché alluminio il rendimento sarebbe a circa il 98%; il costo della macchina sarebbe però in tal caso lievemente aumentato. E' possibile aumentare ancora 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.

Osserviamo che comunque tali rendimenti risultano elevati se si considera che macchine di tipo convenzionale e caratteristiche analoghe hanno rendimenti dell'ordine del $94 \div 95\%$ ^(10, 17).

5. - CONSIDERAZIONI SUI COSTI E CRITERI DI SCELTA -

Per poter eseguire la scelta tra una forma di macchina ed un'altra è necessario, oltre ai criteri riportati in par. 2, fare anche considerazioni sui costi dei vari componenti. 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 una inevitabile incertezza. 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 1971 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 delle macchine è stato suddiviso in cinque voci e precisamente:

- C_M = costo del magnete induttore,

- C_C = costo del criostato (esclusi accessori),
- C_L = costo del refrigeratore a ciclo chiuso per l'elio (della potenza di 25 W a 4,5°K),
- C_A = costo accessori (alimentatore per l'induttore, pompe e misuratori per il vuoto dell'intercapedine del criostato, ecc.),
- C_R = costo del rotore, completo di liquido per i contatti.

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

$$\begin{array}{ll}
 D = 1 \text{ m} & N = 41 \text{ dischi} \\
 l = 1 \text{ m (per cui } \beta = 1) & r_e = 0,45 \text{ m} \\
 s = 5 \text{ cm} & n = 100 \text{ giri/1'}
 \end{array}$$

Abbiamo poi eseguito un'analisi simile per alcune altre macchine aventi β e diametri diversi ed abbiamo ricavato dei criteri di variazione delle singole voci di costo per estendere i risultati a casi intermedi a quelli considerati. Osserviamo che tali criteri di variazione sono piuttosto grossolani ma possono fornire una stima di massima dei costi delle varie macchine ed un orientamento nella loro scelta. In Tabella II riportiamo la valutazione dei costi della macchina base ed i fattori di proporzionalità dei costi al variare di β e del diametro D.

TAB. II - Costi della macchina base e fattori di proporzionalità per β e D. I parametri della macchina base ($D = 1\text{m}$, $\beta = 1$) hanno il pedice "0".

	Stima Costi (MLt.)	D = cost. = 1 m β variabile	β = cost. = 1 D variabile
C_{Mo}	34	$C_M = \text{cost.} = C_{Mo}$	$C_M = C_{Mo} \cdot D^3$
C_{Co}	5	$C_C = C_{Co} \cdot \beta^{0,5}$	$C_C = C_{Co} \cdot D^2$
C_{Lo}	45	$C_L = C_{Lo} \cdot \beta^{0,25}$	$C_L = C_{Lo} \cdot D$
C_{Ao}	7	$C_A = \text{cost.} = C_{Ao}$	$C_A = \text{cost.} = C_{Ao}$
C_{Ro}	15	$C_R = C_{Ro} \cdot \beta$	$C_R = C_{Ro} \cdot D^3$
C_{To}	106		

Dai grafici delle figure 3 e 4 e con le considerazioni riportate in Tab. II sono stati calcolati gli andamenti dei costi specifici in funzione della potenza riportati nelle Figg. 7 e 8. Allo scopo di evidenziare la presenza di minimi nei costi specifici per un prefissato valore di potenza di β e D, si sono tracciate alcune curve del costo specifico

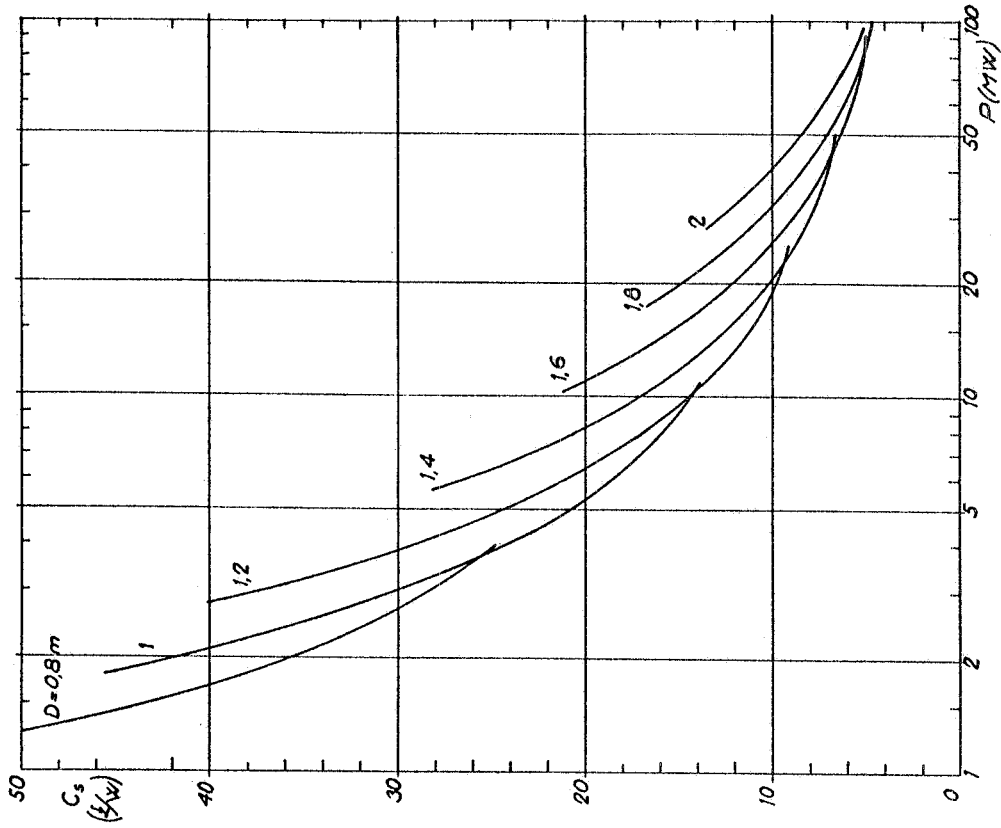


FIG. 8 - Andamento dei costi specifici $C_s = f(P)$ per $n = 100$ giri/1' e $D = \text{cost.}$

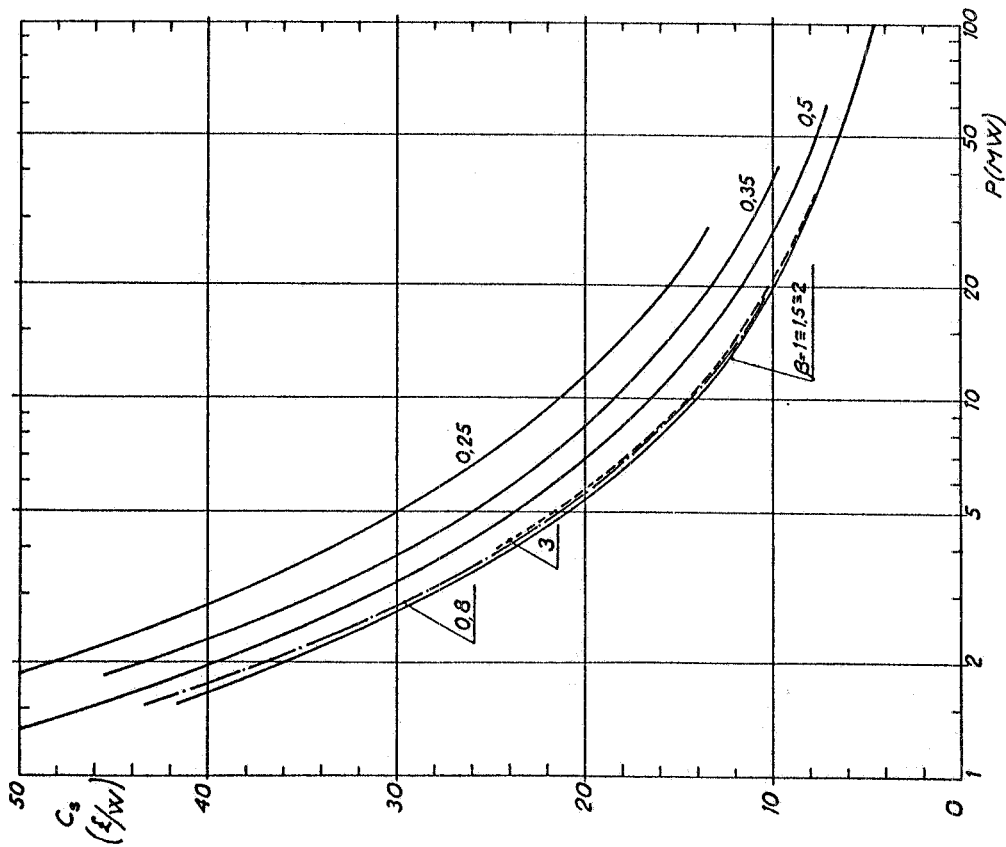


FIG. 7 - Andamento dei costi specifici $C_s = f(P)$ per $n = 100$ giri/1' e $\beta = \text{cost.}$

a potenza costante, ricavandole dalle Figg. 7 e 8. Dalla Fig. 9 appare una zona di minimo dei costi piuttosto ampia, per tutta la potenza considerata, corrispondente a β compreso tra 0,8 e 2. Dalla Fig. 10 notiamo dei minimi più accentuati, come era prevedibile considerando che la potenza cresce come D^4 ,⁵. Tali minimi si spostano da un diametro di 0,9 ad uno di 1,6 m, passando la potenza da 4 a 50 MW.

Mediante i diagrammi riportati su una delle due figure 9 e 10 e le curve di una delle figure 3 e 4 è possibile determinare, fissata la potenza, le caratteristiche geometriche della macchina avente il costo specifico minimo.

A titolo di confronto facciamo presente che una macchina di tipo tradizionale da 12 MW a 50 giri/1' costa circa 300 ML. Dai grafici precedenti si ricava che una unità del tipo da noi studiata da 12 MW a 100 giri/1' costa ~ 150 ML, una da 24 MW a 100 giri/1' (in grado cioè di fornire 12 MW a 50 giri/1') verrebbe a costare ~ 220 ML. Riportiamo ancora che una macchina tradizionale da 5 MW a 500 giri costa circa 75 ML; una del tipo ad induttore di egual potenza a 100 giri/1' costa ~ 100 ML, 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 studiata, ma con contatti liquidi in Na-K tali da consentire la velocità di 500 giri/1', verrebbe a costare circa 50 ÷ 60 ML.

6. - CONCLUSIONI -

Come abbiamo avuto modo di vedere nei paragrafi precedenti, il problema dei contatti nelle macchine omopolari superconduttrici presenta ancora aspetti che necessitano di ulteriori studi, sebbene notevoli progressi siano stati raggiunti negli ultimi anni.

Tali macchine presentano però, come si è visto delle evidenti riduzioni di costo, specialmente nelle unità di elevata potenza. Esse presentano inoltre rendimenti più elevati delle macchine tradizionali con conseguente vantaggio nel costo di esercizio. Queste prospettive hanno spinto molti laboratori, anche industriali, a studiare attivamente queste macchine e molte sono le pubblicazioni apparse sulla letteratura in questi ultimi anni. Inoltre le notizie spesso non vengono diffuse o vengono pubblicate con un certo ritardo, perchè coperte da segreto militare o industriale.

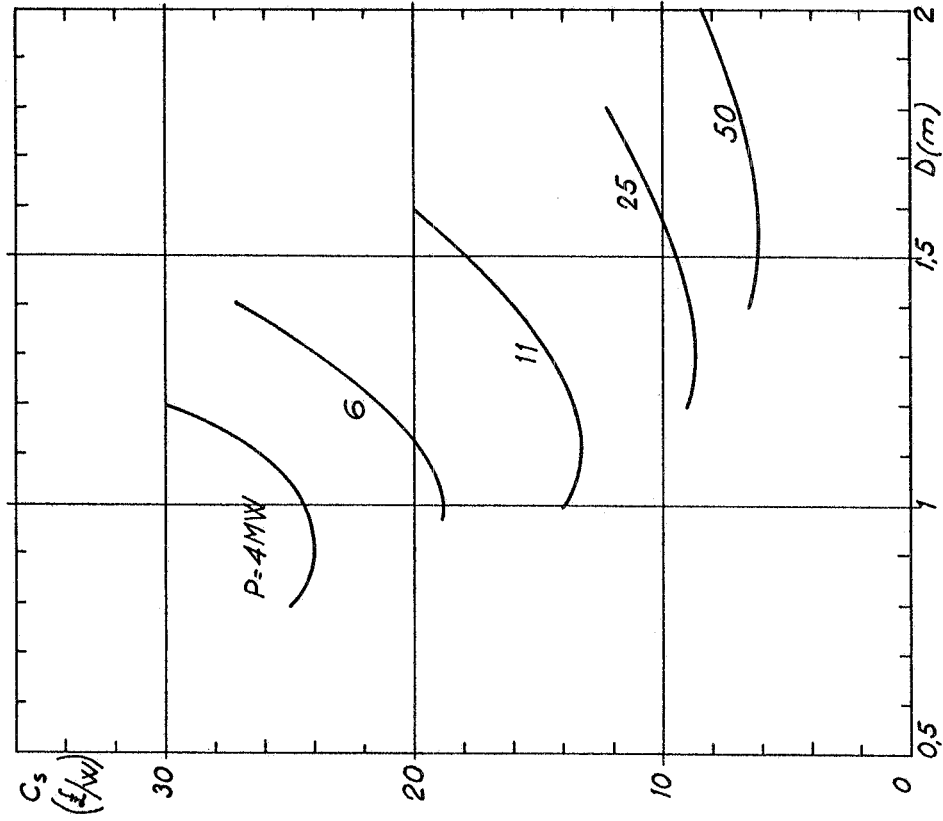


FIG. 10 - Andamento del costo specifico $C_s = f(D)$ per $P = \text{costante}$.

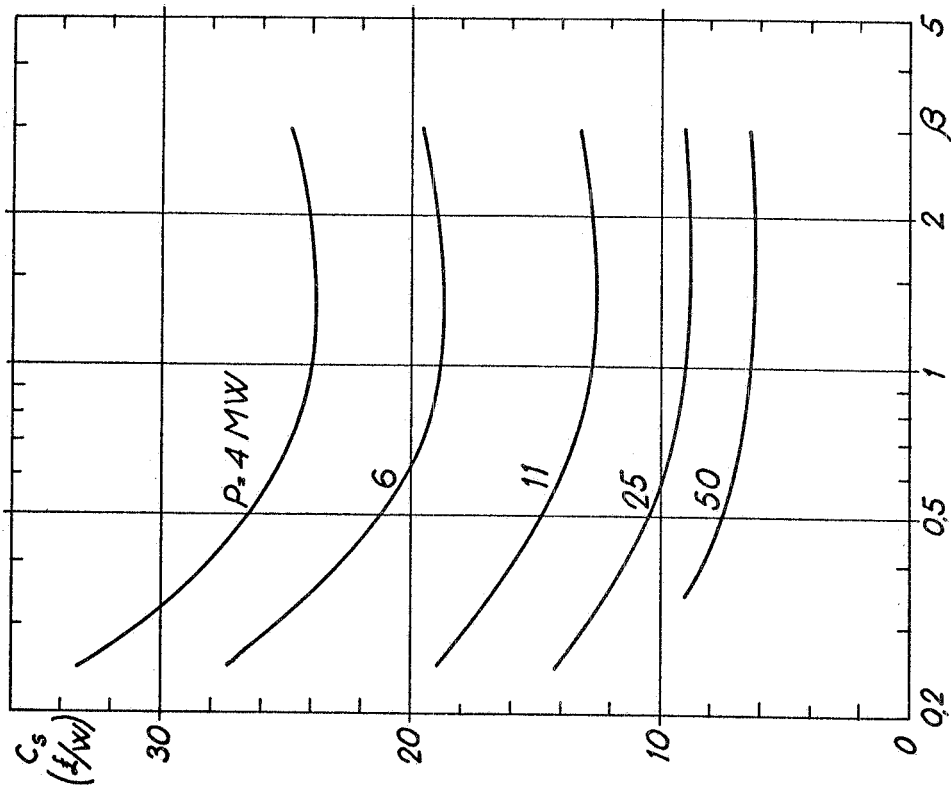


FIG. 9 - Andamento del costo specifico $C_s = f(\beta)$ per $P = \text{costante}$.

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.

BIBLIOGRAFIA -

- (1) - D. Fishlock in: "A guide to superconductivity" (Mac Donald, London, 1969).
- (2) - A.D. Appleton, Superconductors in Motion, in "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 and 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 et A. Mailfert, Machines unipolaires superconductrices de faible puissance, Atti Congresso della Società Francese degli Elettrotecnici, Nizza (1971).
- (6) - D. Neveu-Lemaire et B. Leon, Interêt et faisabilité de cryomoteurs a courant continu de grade puissance, Atti Congresso della Società Francese degli Elettrotecnici, Nizza (1971).
- (7) - A. Malandain, Machines unipolaires superconductrices a fort couple, Atti Congresso della Società Francese degli Elettrotecnici, Nizza (1971).
- (8) - J.P. Chabrerie, G. Fournet et 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 e G. Pasotti, Applicazioni della superconduttività all'elettrotecnica, CNEN - Tavola rotonda sulle applicazioni della superconduttività - Frascati (1971).
- (10) - Superconducting field system for 3.250 hp motor, Electrical Times 1 Febbraio (1968).
- (11) - P.J. Hart, Universal Tables for Magnetic Field of Filamentary and Distributed Circular Currents (American Elsevier Publishing, New York, 1967).
- (12) - P.F. Smith, The Technology of large Magnets, in "A guide to superconductivity" (Mac Donald, London, 1969).
- (13) - M.V. Ricci e M. Spadoni, Proprietà fisiche e rassegna comparativa dei superconduttori per alti campi magnetici, CNEN - Tavola rotonda sulle applicazioni della superconduttività all'elettrotecnica, Frascati (1971).

20.

- (14) - E. Astuni, La Paraldinamo, Elettrotecnica 4, 135 (1948).
- (15) - L. A. Sukhanov et al., Calculation of the liquid metal slip ring in homopolar machines, Elektroteckhnike, 36, 14 (1965).
- (16) - J. P. Chabrerie et A. Mailfert, Perfectionnement aux machines homopolaires à contact pour remplissage total, Brevet ANVAR n. 70.41.767.
- (17) - Cryophysics, Newsletter 8, 1 (1970).