

LNF - 67/52  
21 Luglio 1967

F. Frazzoli e G. Sacerdoti: TRASFORMATORI DI POTENZA  
CON AVVOLGIMENTI SUPERCONDUTTORI. -

(Nota interna: n. 375)

LNF - 67/52

Nota interna: n. 375  
21 Luglio 1967

F. Frazzoli e G. Sacerdoti: TRASFORMATORI DI POTENZA CON  
AVVOLGIMENTI SUPERCONDUTTORI. -

I. - INTRODUZIONE. -

Come è ovvio, il dimensionamento di un trasformatore di potenza dipende dalla scelta dei materiali e delle sostanze con cui si realizzano:

- a) i lamierini costituenti il nucleo, caratterizzati dal numero di Amp/m assorbiti, dall'induzione di saturazione e dalla cifra di perdita;
- b) i materiali conduttori per gli avvolgimenti, caratterizzati dalla resistività e dalla resistenza meccanica agli sforzi;
- c) l'isolante, caratterizzato oltre che dalle proprietà elettriche (rigidità dielettrica, resistenza, ecc) anche dalle proprietà termiche connesse al passaggio di calore dal conduttore al fluido refrigerante;
- d) fluido refrigerante (olio, aria, ecc).

Dall'inizio del secolo ad oggi si sono ottenuti notevoli progressi per quanto riguarda la realizzazione di materiali per i lamierini magnetici del nucleo e di materiali isolanti, con una conseguente sensibile diminuzione del peso sia del nucleo di Fe che del conduttore (in genere Cu) (in alcuni casi tale diminuzione è del 40-50%); non si sono invece ottenuti progressi notevoli per quanto riguarda i materiali conduttori.

2.

Con la scoperta dei materiali superconduttori, che presentano in continua una resistenza nulla anche in presenza di alti campi magnetici, è naturale chiedersi se e quali vantaggi si possono ottenere con la loro utilizzazione nella costruzione dei trasformatori.

Si potrebbe parlare di vantaggi reali se l'uso dei superconduttori portasse ad una diminuzione del costo di impianto rispetto al costo di un impianto tradizionale; con i materiali superconduttori attualmente usati è comunque problematico pensare di ottenere risparmi sensibili, come ci si può rendere conto esaminando la tabella I, ove sono riportati i costi per Amp/m dei cavi, attualmente prodotti per l'utilizzazione in corrente continua, per diversi valori del campo magnetico.

Riteniamo che un vantaggio nel rendimento della macchina sia trascurabile poichè già nei trasformatori normali tale rendimento è talmente elevato che difficilmente si potrebbe giustificare uno sforzo tecnologico per ottenere un rendimento ancora migliore con l'introduzione dei superconduttori.

Si pensa tuttavia che la riduzione del volume di ingombro e del peso potrebbe risultare utile per qualche particolare applicazione; è evidente infatti che la possibilità di sfruttare una densità di corrente, maggiore di un fattore dieci e più della densità di corrente normale, permetterebbe, a parità di ingombro dell'avvolgimento, di usare una bobina con un numero maggiore di spire e di ridurre quindi le dimensioni del nucleo, oppure, lasciando inalterate queste ultime, di ridurre la sezione del conduttore e quindi ridurne il peso.

Il trasformatore superconduttore, proposto per la prima volta nel 1961 da R. McFee<sup>(1)</sup> ha richiamato l'interesse di alcuni gruppi di ricercatori delle Scuole di Ingegneria della Francia, della Russia e degli Stati Uniti che recentemente hanno realizzato alcuni prototipi sperimentali di trasformatori con avvolgimenti superconduttori<sup>(2,3,4)</sup>.

Le difficoltà che si incontrano tutt'oggi nel progetto di un trasformatore superconduttore sono essenzialmente dovute alla mancanza di sufficienti informazioni sul comportamento dei materiali superconduttori in presenza di campi elettrici e magnetici alternati (a frequenze dell'ordine di qualche decina di Hz); si trovano solo alcuni dati relativi al comportamento in alternata di cavi di Nb-Zr, realizzati originariamente per funzionare in continua. Tali dati non permettono di essere ottimisti sull'avvenire dei trasformatori superconduttori. Peraltro materiali atti a funzionare in alternata non sono stati ancora studiati organicamente e tanto meno realizzati, almeno su scala industriale.

Difficoltà tecniche o addirittura di principio potrebbero essere di ostacolo allo sfruttamento dei superconduttori in regime di corrente alternata in presenza di alti campi magnetici. Per queste ragioni lo scopo di questo articolo non è tanto di trarre conclusioni da un confronto tra trasformatori convenzionali e superconduttori, quanto per mette

# TABELLA I

- Dati caratteristici dei cavi superconduttori di attuale produzione -

MATERIALE	Corr. max (A) per uno spezzone corto di materiale sottoposto ad un campo magnetico di (Kgs):						Corr. (A) che praticamente può sopportare il materiale quando sia avvolto in una bobina di piccolo $\phi$ capace di produrre un campo magnetico di (Kgs):						Densità di corrente media (A/mm <sup>2</sup> ) nella bobina capace di produrre un C. M. di (Kgs):			Prezzo materiale (L./m.)	Prezzo per unità di corr. e di lunghezza (L./Am) del materiale avvolto su bobina capace di produrre un C. M. di (Kgs):			Impiego più appropriato:
	40	60	80	100	120	140	40	60	80	100	120	140	40	80	120		~ 40	~ 80	~ 120	
1) Filo Nb-25%Zr stabilizz. con rame $\phi$ 0.25 mm(x)	50	20					~ 25						250			400	~ 16		bobine di piccolo diametro (1-2 cm)	
2) c. s. Nb-33%Zr(x)	43	28					~ 20	~ 20					200			400	~ 20			
3) Filo Nb-48%Ti stabilizz. con rame $\phi$ 0.25 mm(x)	43	35	23				~ 20	~ 20	~ 20				200	200		370	~ 18	~ 18	bobine di medio diametro (5-15 cm) pur di tenere la corrente più bassa dei valori indicati	
4) Cavo C 7x28 (n. 7 fili di Nb-25%Zr stabilizz. con Cu e uniti con In) $\phi_e = 1.3$ mm(x)	~ 350	~ 140					~ 210						130			2900	~ 14			
5) Cavo c. s. ma con fili di Nb-48%Ti(x)	~ 300	~ 240	~ 160				~ 170	~ 170	~ 150				110	90		~ 2700	~ 16	~ 18	bobine di grandi dimensioni e relativam. basso C. M. ( $\leq 40$ Kgs)	
6) Nastro "Supergenic" SG 700(0) costit. da 9 fili di Nb-25%Zr immersi in un nastro di Cu - sez. mm 12,7x1,02	750						~ 750						54			8300	~ 11			
7) Nastro "SR 2100" RCA - deposito di Nb <sub>3</sub> Sn su nastro di acc. inox - sez. mm 2,3x0,11(+)	170	125	90	65			~ 90	~ 90	~ 80	~ 55			220	200		2700	~ 30	~ 34	bobine di piccolo e medio diametro ad alto C. M.	
8) Nastro c. s. "SR 2101" (+)	~ 250	190	150	110	70	40	~ 70	~ 75	~ 90	~ 90	~ 60		175	220	150	4000	~ 58	~ 45		
9) Nastro c. s. "R 60291" (+)	550	420	320	240	140	80	~ 70	~ 70	~ 90	~ 90	~ 75		150	200	200	5400	~ 78	~ 60		

(x) - Catalogo Supercon N.R.C. dell'11/1/1965 e allegato 65-4A;

(o) - Catalogo AVCO-EVERETT;

(+) - Catalogo RCA 1966;

(-) - 850 L/3

re a fuoco semplicemente i problemi che sorgono nella progettazione di trasformatori superconduttori.

## II. - MATERIALI SUPERCONDUTTORI. -

### II. 1. - Comportamento in d. c.

E' noto che per valori del campo magnetico superiori ad un certo valore critico  $H_c$  la superconduttività viene distrutta. Il valore del campo critico dipende dal materiale ed inoltre diminuisce all'aumentare della temperatura, fino ad annullarsi alla temperatura critica  $T_c$ . Per valori del campo minori di  $H_c$  tali materiali superconduttori escludono completamente il campo magnetico, per valori maggiori di  $H_c$  la resistenza è ripristinata ed il campo magnetico penetra nel materiale: in Fig. (1, a) si riporta una tipica curva di magnetizzazione per un cilindro infinito. Da circa un decennio si sono realizzate delle leghe superconduttrici con campi critici notevolmente alti ( $\sim 20 \text{ Wb/m}^2$ ) e con temperature di transizione relativamente elevate ( $\sim 10 - 20 \text{ }^\circ\text{K}$ ). Tali superconduttori (detti comunemente "hard") si comportano (v. Fig. 1, b) come i superconduttori "soft" per valori del campo magnetico inferiori ad un campo critico  $H_{c1}$ ; per valori del campo compresi tra  $H_{c1}$  ed un secondo campo critico  $H_{c2}$  il materiale è nello stato intermedio: il materiale è sostanzialmente ancora superconduttore, ma vi sono piccole regioni nello stato normale di conduzione in cui penetra il campo magnetico. In Tabella II si riportano i valori dei campi critici e delle temperature critiche per alcuni superconduttori "soft" e "hard".

Con i superconduttori "hard", particolarmente con leghe di Nb-Sn, Nb-Ti, Nb-Zr è possibile la costruzione di solenoidi per ottenere alti campi magnetici statici(5).

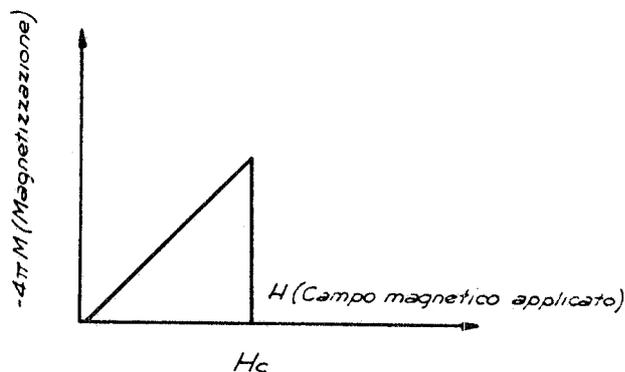


FIG. 1a

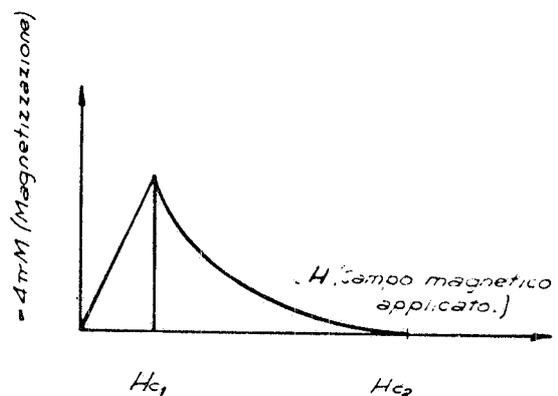


FIG. 1b

TABELLA II

Temperature ed induzioni critiche  
per alcuni materiali superconduttori

Mater.	$T_c(^{\circ}K)$	$T(^{\circ}K)$	$\mu_o H_{c1}(T)$	$\mu_o H_c(T)$	$\mu_o H_{c2}(T)$	
In	3.41	0	---	0.0283	---	Soft
Al	1.19	0	---	0.0099	---	"
Zn	0.88	0	---	0.0053	---	"
Sn	3.72	0	---	0.0306	---	"
Pb	7.23	0	---	0.0803	---	"
$V_3 Ga$	14.5	0	---	---	21.0	Hard
$Nb_3 Sn$	18.2	---	0.03	---	24.5	"
Nb-Ti	9	1.2	---	---	14.5	"
Nb-Zr	11	1.2	---	---	12.5	"
Ti-Va	7.5	1.2	0.03	---	11.5	"
Nb	9.17	4.2	0.145	---	0.295	"
Nb	"	1.2	0.160	---	0.395	"

I valori della induzione sono dati in  $Wb/m^2$ .

Le tecniche necessarie alla costruzione di tali solenoidi superconduttori sono particolarmente complesse per via delle sollecitazioni meccaniche e per le protezioni elettriche richieste. Fino a qualche anno fa i magneti superconduttori di grandi dimensioni, capaci di produrre alti campi difettavano di stabilità nel funzionamento: negli avvolgimenti si generavano, per varie cause, piccole zone con resistenza non nulla, provocando così delle transizioni locali tra fase superconduttrice e fase normale. Tali transizioni, che danno luogo al fenomeno dei "flux jumps"<sup>(20)</sup>, innescano un processo a catena tramite il quale la fase normale si propaga al resto dell'avvolgimento con una velocità dipendente dalle proprietà fisiche del materiale come p. es. la capacità termica, la conducibilità termica, la resistenza elettrica, ecc. Se nel magnete è già immagazzinata una energia magnetica sufficientemente elevata ed il raffreddamento non è sufficientemente rapido ed efficace, il processo può divenire catastrofico e tutto l'avvolgimento perde le sue proprietà superconduttrici. Alcune parti dell'avvolgimento, a causa di un eccessivo riscaldamento,

6.

possono perdere in modo permanente le caratteristiche superconduttrici.

Solo recentemente si è ovviato a tale inconveniente stabilizzando il materiale superconduttore, ed attualmente si trovano in commercio cavi stabilizzati con diverse tecniche per magneti superconduttori di vario tipo. In genere si riveste una o più piattine superconduttrici con una guaina di rame o argento puro (in modo che la resistività normale del materiale superconduttore sia molto maggiore della resistività del Cu o Ag); in questo modo, quando si genera una zona di resistenza non nulla, la corrente devia nel Cu o Ag, cortocircuitando così la zona non superconduttrice, fino a che non si ristabilisce lo stato superconduttore: si evita in questo modo la propagazione della transizione tra fase superconduttrice e fase normale al resto dell'avvolgimento. Nella Tabella I sono riportati alcuni dati caratteristici dei cavi superconduttori di recente produzione.

## II. 2. - Comportamento in a. c. -

Come è noto, un superconduttore "soft" sottoposto ad una corrente alternata a bassa frequenza non dissipa potenza; bisogna giungere fino a frequenze dell'ordine di  $10^8$  Hz perchè si verifichi un'assorbimento rilevabile di potenza, dovuto al movimento degli elettroni normali nel campo elettrico indotto (sebbene a temperature lontane dalla temperatura critica, quando tutti gli elettroni normali sono scomparsi, queste perdite diminuiscono rapidamente). Infine nella regione microonde-infrarosso, transizioni quantistiche provocano la rottura delle coppie di elettroni responsabili della superconduttività a cui segue un'assorbimento apprezzabile dell'energia a tutte le temperature.

Invece i materiali superconduttori "hard", per valori del campo magnetico applicato  $H$  compresi tra i valori  $H_{c1}$  ed  $H_{c2}$ , offrono una resistenza tutt'altro che trascurabile al passaggio della corrente alternata (senza tale resistenza la penetrazione parziale del campo magnetico sarebbe naturalmente impossibile). Misure sperimentali<sup>(6, 7)</sup> mostrano infatti che la curva di magnetizzazione non è reversibile (v. Fig. 2); nei superconduttori "hard" è quindi presente il fenomeno dell'isteresi che, provoca una dissipazione di energia ogni volta che il campo magnetico varia ciclicamente. Sebbene questi effetti siano ancora trascurabili quando si voglia creare, più o meno lentamente, un campo magnetico costante, essi limitano notevolmente la possibilità di realizzare dei campi magnetici pulsati od alternati.

L'andamento della dissipazione di potenza al variare della corrente e dell'induzione è infatti del tipo:

$$(1) \quad P = (\alpha + \beta I^p) H^q$$

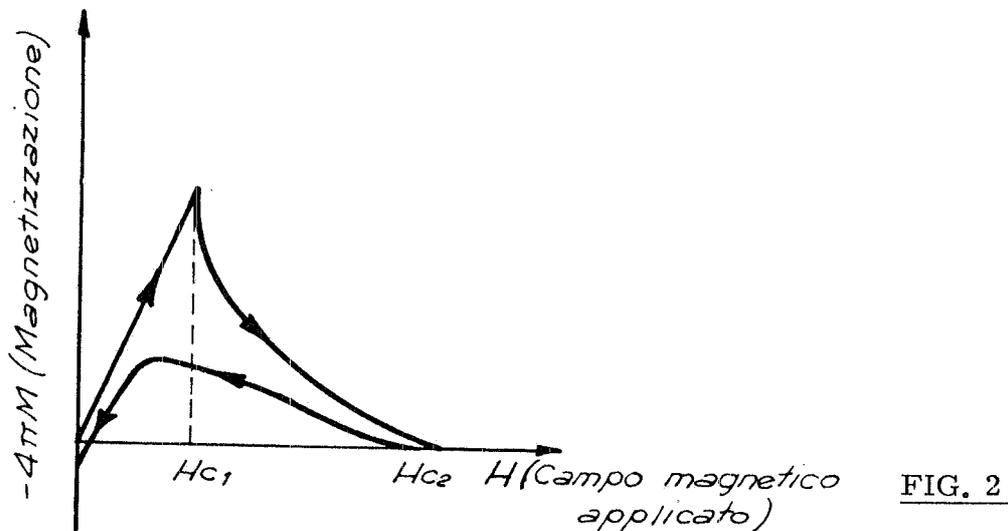


FIG. 2

ove  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $p$ ,  $q$  dipendono dalle caratteristiche del materiale. Quando risulta  $\beta I^p \ll \alpha$  la (1) si riduce a:

$$(2) \quad P = \alpha H^q$$

mentre invece se  $\beta I^p \gg \alpha$  si ha:

$$(3) \quad P = \beta I^p H^q \approx \beta' H^{(p+q)}$$

essendo in generale  $H \equiv I$ .

Riportiamo in Fig. 3 le curve che forniscono le perdite per unità di lunghezza del cavo in funzione del campo magnetico che confermano un andamento del tipo (1) (la scala è logaritmica) rilevate da T. Pech e G. Fournet<sup>(19)</sup> in recenti lavori sperimentali su molti tipi di bobine di Nb-25% Zr. Secondo queste misure le perdite diventano insopportabili per campi magnetici superiori a pochi decimi di  $\text{Wb}/\text{m}^2$ . Allo stadio attuale delle ricerche è comunque ancora discussa l'origine delle perdite in a. c. dei superconduttori "hard" per campi magnetici compresi tra  $H_{c1}$  ed  $H_{c2}$ ; è stato discusso un modello<sup>(10)</sup> secondo cui le perdite in a. c. hanno luogo attraverso il conduttore massiccio. Secondo tale modello, con cui si sono interpretati alcuni risultati sperimentali<sup>(10)</sup>, sembra che le perdite siano proporzionali allo spessore del superconduttore per cui sarebbe conveniente usare films di superconduttori "hard" di spessore dell'ordine di  $10^{-6}$  cm, delle dimensioni cioè della microstruttura superconduttrice che dà ai superconduttori "hard" le proprietà "high-field": in breve essi si comporterebbero come superconduttori "soft" pur tollerando un'alto campo magnetico<sup>(10)</sup> e di conseguenza non diverrebbero sede di perdite in a. c. per frequenze moderate.

8.

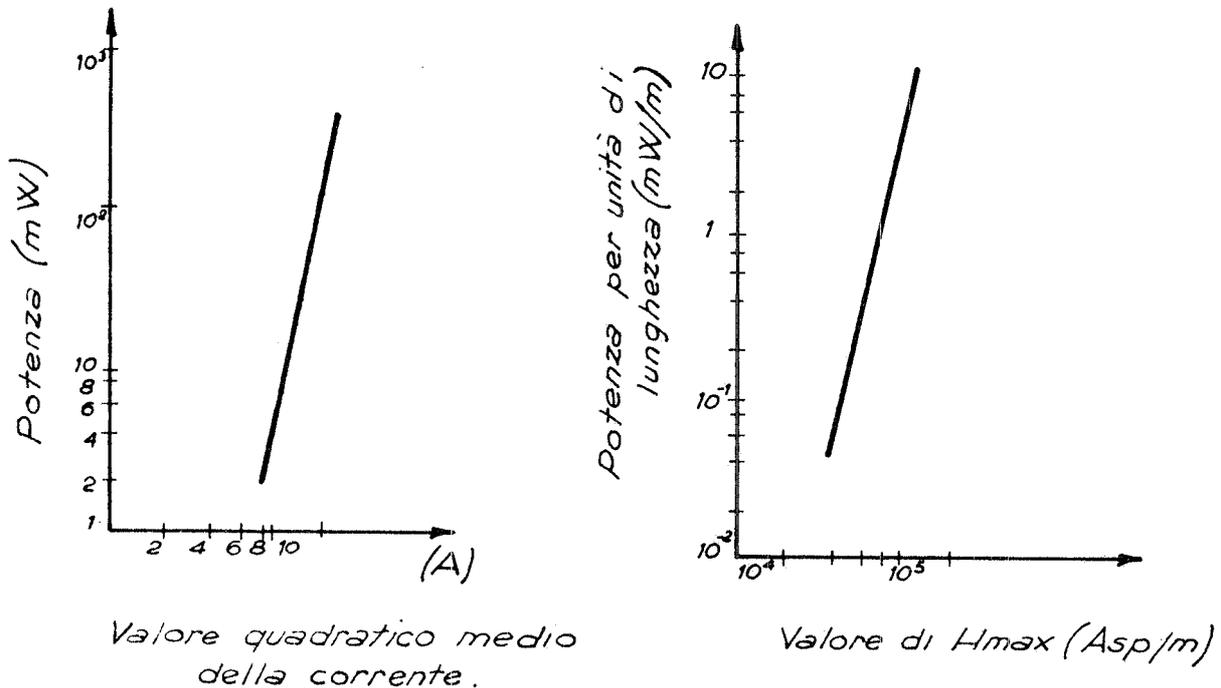


FIG. 3 - Le curve riportate si riferiscono ad un avvolgimento di lunghezza di 27 mm, con diametro interno di 20 mm con 6 strati di 90 spire ciascuno.

Dalle misure sperimentali<sup>(8, 9, 19)</sup> con tecniche calorimetriche ed elettriche risulta inoltre che i superconduttori "hard" dissipano potenza anche per campi magnetici inferiori ad  $H_{c1}$  per frequenze industriali, contrariamente alle previsioni teoriche. Secondo i risultati sperimentali si è potuto distinguere tra perdite per isteresi (proporzionali alla frequenza) e quelle dovute alle normali correnti parassite (proporzionali al quadrato della frequenza) con il risultato che nei superconduttori "hard" le perdite derivano prevalentemente dall'isteresi. Dai risultati ottenuti sembra inoltre che le dissipazioni siano fortemente dipendenti dalle proprietà superficiali come la levigatezza, le tensioni interne e gli sforzi meccanici ed inoltre dalla presenza di piccole quantità di gas assorbiti: le perdite sembrano cioè associate ad una debole penetrazione del campo magnetico (oltre la profondità di penetrazione normale) ed ad un intrappolamento di flusso che può essere causato da scabrosità superficiali e piccoli vuoti in prossimità della superficie. È stata calcolata<sup>(9)</sup> una profondità di penetrazione  $\delta$ , dovuta all'isteresi, che con un campo magnetico  $H = 1500$  Oe alla frequenza di 300 Hz, risulta  $\sim 10^{-6}$  cm, inferiore alla profondità di penetrazione in continua  $\lambda \sim 10^{-5}$  cm; ciò mostra che il flusso connesso con l'isteresi è  $\sim 10\%$  del flusso in penetrazione. Risulta inoltre  $\delta$  rapidamente crescente con  $H$  in accordo con i dati sperimentali che danno le perdite in funzione di  $H$ .

### III. - CENNI SUI PROBLEMI CRIOGENICI CONNESSI ALLA REALIZZAZIONE DI UN TRASFORMATORE SUPERCONDUTTORE. -

Usualmente per ottenere le basse temperature necessarie alla superconduttività, il materiale superconduttore viene posto in un bagno di LHe (elio liquido). La temperatura di ebollizione di LHe, alla pressione atmosferica, è di 4,2°K; in queste condizioni la potenza di 1 Watt, dissipata in LHe, provoca l'evaporazione di  $\sim 1.5$  litri di LHe/ora; si vede quindi facilmente l'importanza di ridurre le perdite in LHe.

Per minimizzare le perdite per conduzione conviene che i supporti del dewar, contenente LHe, realizzati con materiali a bassa conducibilità termica, siano dimensionati in modo che il rapporto sezione/lunghezza sia minimo possibile. Le perdite per convezione, attraverso la camicia di vuoto attorno al dewar di LHe, sono trascurabili rispetto alle altre perdite se si ha cura di produrre nella camicia un vuoto preliminare di almeno  $10^{-5}$  mmHg.

Quanto alle perdite per irraggiamento, tenendo presente la formula di Stefan-Boltzman, conviene minimizzare la differenza di temperatura tra il dewar di LHe e l'esterno, utilizzando per es. una camicia di LN<sub>2</sub> (azoto liquido), oltre naturalmente a metallizzare e lucidare le superfici interessate. Nello studio di un trasformatore bisogna considerare in particolare le perdite nel circuito e negli adduttori di corrente. Nel circuito magnetico di un trasformatore si producono perdite a causa dell'isteresi magnetica e delle correnti di Foucault.

Tali perdite dipendono dalla temperatura e dal valore dell'induzione magnetica a cui il materiale ferromagnetico è sottoposto<sup>(12)</sup>. Poichè esse aumentano al diminuire della temperatura del nucleo, il progetto di un trasformatore superconduttore deve prevedere il circuito magnetico, in aria oppure in Fe, a temperatura ambiente, separato dal dewar contenente LHe. Perdite rilevanti sono inoltre provocate dal percorso in He-gas degli adduttori di corrente che trasmettono al bagno di He calore prelevato dall'esterno, o in essi stessi provocato per effetto Joule.

Tali perdite si possono comunque ridurre a  $\sim 0.3$  litri/ora anche con correnti di  $\sim 100$  Amp sfruttando degli adduttori disponibili commercialmente che vengono raffreddati tramite un'opportuno flusso e controflusso di He-gas che evapora dal bagno.

10.

IV. - VOLUME E COSTO DI UN TRASFORMATORE SUPERCONDUTTORE IN FUNZIONE DELLA POTENZA. -

La potenza  $W$  di un trasformatore può esprimersi, facendo riferimento alla situazione di Fig. 4, come

$$(4) \quad W \approx \frac{1}{2} I \omega \mu_0 \mu H \pi r_0^2 n$$

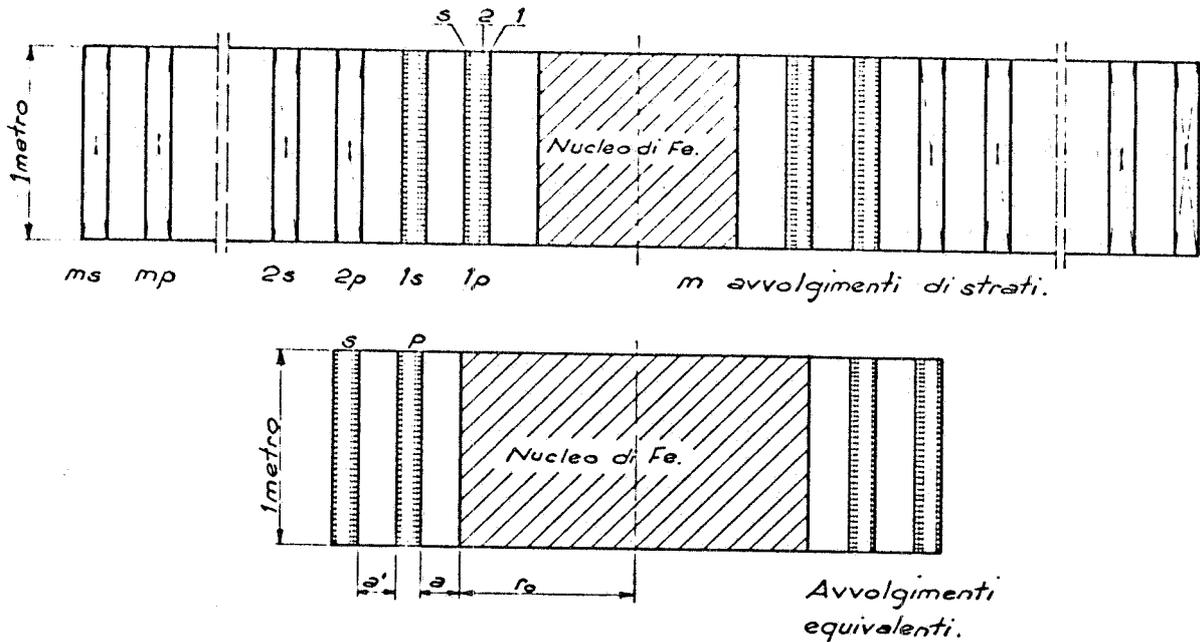


FIG. 4

per un tratto di trasformatore lungo 1 m, dove  $n$  è il numero di spire/m. Supporremo di realizzare il massimo impacchettamento degli avvolgimenti in modo che se con  $m$  indichiamo il numero di sezioni in cui sono divisi gli avvolgimenti primario e secondario e con  $s$  il numero degli strati in ciascuna sezione, risulta:  $n = ms(1/d)$  dove  $d$  è il diametro del filo usato per l'avvolgimento, espresso in m. Supporremo dapprima di trattare un trasformatore con nucleo di Fe; in tal caso la (4) assume la forma:

$$(5) \quad W = \frac{1}{2} I \omega B_s \pi r_0^2 n \quad \text{con} \quad B_s \approx 1.4 \text{ Wb/m}^2 .$$

Supponendo di utilizzare un'avvolgimento superconduttore, il campo magnetico critico  $H_c$  è legato alla corrente  $I$  dalla relazione(12):

$$H_c = \frac{nI}{m} \frac{1}{1-D} + \frac{I}{\pi d} = \frac{s}{d} \frac{I}{1-D} + \frac{I}{\pi d}$$

(D è il coefficiente di demagnetizzazione; nel nostro caso assumeremo  $D \cong 0,3$ ).

da cui:

$$I = H_c \frac{d}{\frac{s}{1-D} + \frac{1}{\pi}}$$

per cui la (5) diventa:

$$W = \frac{1}{2} H_c \frac{1}{\frac{s}{1-D} + \frac{1}{\pi}} \omega B_s \pi r_o^2 \text{ m s .}$$

Il volume del Fe risulta dunque, per metro di lunghezza, ponendo  $B_s = 1,4 \text{ Wb/m}^2$  e  $\omega = 314 \text{ sec}^{-1}$  (con W in Watt,  $H_c$  in Amp/m):

$$(6) \quad \begin{aligned} \pi r_o^2 &= \left( \frac{s}{1-D} + \frac{1}{\pi} \right) \frac{2}{\omega B_s \text{ m s}} \frac{W}{H_c} = \\ &= \frac{1,43s + 0,318}{\text{m s}} 0,455 \times 10^{-2} \frac{W}{H_c} \end{aligned}$$

mentre:

$$r_o = 0,381 \times 10^{-1} \left( \frac{1,43s + 0,318}{\text{m s}} \frac{W}{H_c} \right)^{1/2} .$$

La lunghezza del filo superconduttore è data da:

$$(7) \quad \left[ 2 \pi (r_o + a) + 2 \mathcal{J} (r_o + a') \right] \frac{s}{d} \text{ m}$$

dove a, a' entrambi  $< r_o$ , sono i valori medi delle distanze dal nucleo degli avvolgimenti primari e secondari (v. Fig.4).

Risulta ancora che il volume del superconduttore impiegato è dato da:

$$2 \pi (2r_o + a + a') \frac{s}{d} \text{ m } \pi d^2 = 2 \pi^2 (2r_o + a + a') s \text{ dm} .$$

Il volume del trasformatore, per metro, risulta allora:

$$\begin{aligned} V_t &= 0,455 \times 10^{-2} \frac{1,43s + 0,318}{\text{m s}} \frac{W}{H_c} + \\ &+ 0,755 \left( 2 + \frac{a+a'}{r_o} \right) \left[ (1,43s + 0,318) \text{ m s } \frac{W}{H_c} \right]^{1/2} \text{ d.} \end{aligned}$$

12.

Il volume  $V_t$  è stato calcolato per i seguenti valori delle costanti e dei parametri:

$$d = 0.25 \times 10^{-3} \text{ m} \qquad \frac{a+a'}{r_o} = 0.1$$

$$s = 1 + 2 + 4 + 8 \qquad m = 1 + 2 + 4 + 8$$

(8)

$$H_c = (10 + 30 + 90) \times 10^4 + 10^5 + 10^6 \text{ Amp/m}$$

$$10^6 \text{ W} \leq W \leq 10^8 \text{ W.}$$

Si è tentata una stima del costo in lire del trasformatore superconduttore, in funzione della potenza, supponendo di usare un'avvolgimento realizzato con filo superconduttore di Nb-25% Zr, di diametro  $d = 0.254 \text{ mm}$  e del costo di  $\$ = 353/\text{km}$ . In tal caso il costo del superconduttore in lire per metro di trasformatore risulta dalla (7):

$$\text{Costo sc.} = 2 \pi \left(2 + \frac{a+a'}{r_o}\right) r_o \frac{s}{d} \text{ m} \times 353 \times 10^{-3} \times 900 .$$

Il valore di  $H_c$  per tale superconduttore per cui le perdite rimangono entro limiti accettabili<sup>(12)</sup> è:

$$H_c = 2 \times 10^5 \text{ Asp/m}$$

per cui si ottiene:

$$\text{Costo sc.} = 6.75 \times 10^2 \left(2 + \frac{a+a'}{r_o}\right) \left[ (1.43 s + 0.318) \text{ m s W} \right]^{1/2}$$

Il costo del Fe è semplicemente:

$$\text{Costo Fe} = \pi r_o^2 \times 7.9 \times 10^3 \times 500 = 9 \times 10^{-2} \frac{1.43 s + 0.318}{\text{m s}} \text{ W}$$

dove 500 Lire è il costo del Fe per Kg.

$$\text{Costo}_{\text{totale}} = 9 \times 10^{-2} \frac{1.43 s + 0.318}{\text{m s}} \text{ W} +$$

$$+ 6.75 \times 10^2 \left(2 + \frac{a+a'}{r_o}\right) \left[ (1.43 s + 0.318) \text{ m s W} \right]^{1/2}$$

Il costo totale è stato calcolato per i valori delle costanti e dei parametri riportati nella (8). In Fig. 6 sono riportati gli andamenti di  $V_t$  e del costo

totale per  $m=1$ ,  $s=1$  e  $H_c = 10^4$  Asp/m.

Trasformatore senza ferro. -

Supponiamo di avere un trasformatore senza nucleo di ferro con un avvolgimento diviso in  $m$  sezioni di  $n$  spire ciascuno del tipo rappresentato in Fig. 4. La corrente massima in ogni sezione sia  $(1/2)H_c$  e il campo massimo, nella parte centrale dell'avvolgimento sia  $(1/2)H_c$ . In tali condizioni l'avvolgimento rimane ancora superconduttore poichè il campo magnetico massimo (tra le spire più interne) è pari ad  $H_c$ .

In queste condizioni la formula (4) diviene:

$$W = \frac{1}{2} \omega \mu_o \pi r_o^2 \left(\frac{1}{2} H_c\right)^2 m = \frac{1}{8} \omega \mu_o \pi r_o^2 H_c^2 m$$

L'ingombro del trasformatore risulta, supponendo lo spessore radiale degli avvolgimenti molto minore di  $r_o$ :

$$I_t = \pi r_o^2 = \frac{8}{\omega \mu_o} \frac{W}{H_c^2 m} = 2.022 \cdot 10^4 \frac{W}{H_c^2 m}$$

da cui:

$$r_o = 80.20 \frac{1}{H_c} \sqrt{\frac{W}{m}}$$

Un cavo superconduttore può sopportare al massimo una corrente  $i_{\max} = (\sigma/s)$  dove  $\sigma$  è la densità di corrente massima ed  $s$  è la sezione; quindi la sezione di cui sopra consiste di  $n = (H_c/2) (1/s\sigma)$  spire. Allora la lunghezza del filo superconduttore è:

$$L_{s.c.} = 2 m 2 \pi r_o n = 1.026 \cdot 10^{10} \frac{1}{\sigma} \sqrt{mW}$$

ed il suo volume è:

$$V_{s.c.} = 2 m 2 r_o \pi n s = 5.036 \cdot 10^2 \frac{1}{\sigma} \sqrt{mW}$$

(Nel seguito faremo l'ipotesi che sia  $s = \text{cost}$ ; confronta la Tabella dei valori delle costanti e dei parametri).

Si è tentata una stima, analogamente al caso precedente, del costo di un tale trasformatore in funzione della potenza. In tal caso il costo/m del trasformatore risulta:

14.

$$C_t = 2m \cdot 2\pi r_o \cdot n \cdot \text{costo cavo s.c. /m} = L_{s.c.} \cdot \text{costo cavo s.c. /m} = \\ = 1.026 \cdot 10^{10} \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{mW} \cdot \text{costo cavo s.c. /m}.$$

Le grandezze  $I_t$ ,  $C_t$  e  $V_{s.c.}$  sono state calcolate per i seguenti valori delle costanti e dei parametri:

$$\omega = 314 \text{ sec}^{-1}$$

$$s = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$d = 0.25 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

$$\sigma = (1, 2, 3) \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$$

$$m = 1 \div 3 \div 9 \div 27$$

$$H_c = (10 \div 30 \div 90) \cdot 10^4 \div 10^5 \div 10^6 \text{ Amp/m.}$$

$$10^6 \text{ W} < W < 10^8 \text{ W.}$$

$$(\text{costo cavo/m}) = (1, 2, 3) \cdot 10^3 \text{ lire.}$$

In Fig. 7 sono riportati gli andamenti dell'ingombro del trasformatore, il volume del superconduttore ed il costo al trasformatore per  $m = 1$ ,  $\sigma = 10^8 \text{ Amp/m}^2$ ,  $H_c = 10^5 \text{ Amp/m}$  e costo cavo/m=1000 lire.

#### V. - PROTEZIONI ELETTRICHE DI UN TRASFORMATORE SUPERCONDUTTORE. -

Un trasformatore superconduttore è soggetto ad alcune stringenti limitazioni per quanto riguarda i valori della corrente massima, del campo magnetico massimo e della potenza elettrica dissipata nel transistorio che si manifesta all'atto dell'inserimento del trasformatore nella linea o, eventualmente, in caso di guasti.

Queste limitazioni sono aggravate dal fatto che, a causa della mancanza di resistenza dell'avvolgimento (qualora anche in transistorio si possa considerare trascurabile la sua resistenza) si hanno delle extra correnti che si smorzano molto lentamente o addirittura nel caso che la resistenza dell'avvolgimento sia rigorosamente nulla, rimangono costanti nel tempo. Nascono quindi alcuni problemi sulle protezioni necessarie appunto alle sovracorrenti di chiusura (con sincronizzazione della chiusura dell'interruttore di inserzione) ed alle sovracorrenti di corto circuito.

Per fornire alcune indicazioni sul comportamento del trasformatore superconduttore (caratterizzate dalla resistenza nulla degli avvolgimenti) abbiamo svolto in appendice alcuni calcoli per valutare le sovracorrenti all'atto della chiusura. I risultati ottenuti confermano la

necessità di predisporre opportuni dispositivi per sincronizzare la chiusura del trasformatore sulla linea oltre ad idonei dispositivi di protezione.

#### VI. - CONCLUSIONI. -

Dall'analisi e dalle considerazioni svolte in precedenza ritengo che fino a che non saranno sviluppati materiali superconduttori adatti per funzionare in regime di corrente alternata per induzioni di 10-20 Wb/m<sup>2</sup> la realizzazione di trasformatori superconduttori non presenta vantaggi notevoli dal punto di vista del peso e del volume totali, del costo e della dissipazione di potenza.

APPENDICE. - Richiami sul comportamento di un trasformatore ideale in transitorio. -

Consideriamo un trasformatore ideale costituito da un nucleo di Fe e da due avvolgimenti cilindrici coassiali infinitamente lunghi. Le correnti  $I_1$  ed  $I_2$  nei due avvolgimenti soddisfano le seguenti equazioni:

$$V(t) = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt}$$

$$0 = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt}$$

con ovvio significato dei simboli (confronta Fig. 5).

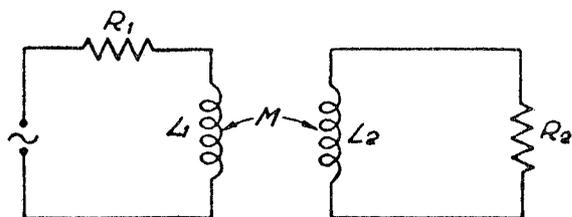


FIG. 5

Nel seguito faremo riferimento alla disposizione geometrica in Fig. 4, ed inoltre supporremo un comportamento ideale del nucleo di Fe descritto dalle seguenti condizioni:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad \begin{array}{l} \mu_r = \mu_{r1} \quad \text{per } H \leq 2 \times 10^3 \text{ Asp/m} \\ \mu_r = 1 \quad \text{per } H > 2 \times 10^3 \text{ Asp/m} \end{array} \quad \left[ \begin{array}{l} B_s = 1.4 \\ \text{Wb/m}^2 \end{array} \right]$$

Supponendo di alimentare il trasformatore con una tensione alternata puramente sinusoidale, abbiamo considerato esplicitamente le seguenti tre situazioni ideali:

- resistenza nulla sul circuito primario, e circuito secondario aperto;
- resistenza nulla sul circuito primario, e circuito secondario chiuso su un carico resistivo;
- resistenza non nulla sul circuito primario e circuito secondario aperto.

Nei caso esaminati si è supposto che l'inserzione del trasformatore avvenga nell'istante in cui la tensione alternata è nulla; in queste condizioni le correnti assumono i valori massimi.

Dall'analisi dei risultati si può dedurre come anche nel caso di permeabilità  $\mu_r$  variabile il solo carico resistivo sul circuito secondario provochi oltre ad uno smorzamento estremamente lento del transitorio anche la presenza di una componente continua della corrente; si può inoltre vedere come solo con una resistenza sul primario si possa ottenere un transiente rapido.

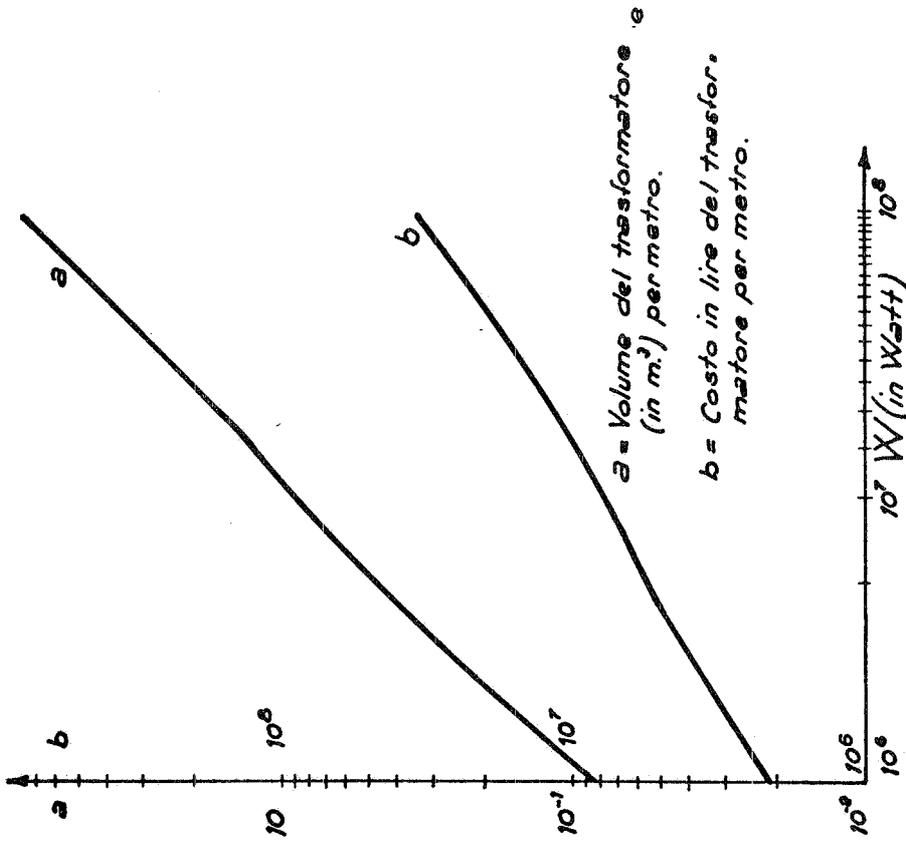


FIG. 6 - I grafici a e b rappresentati si riferiscono al caso in cui  $s = 1$ ,  $m = 1$ ,  $H_c = 10^4$  Asp/m.

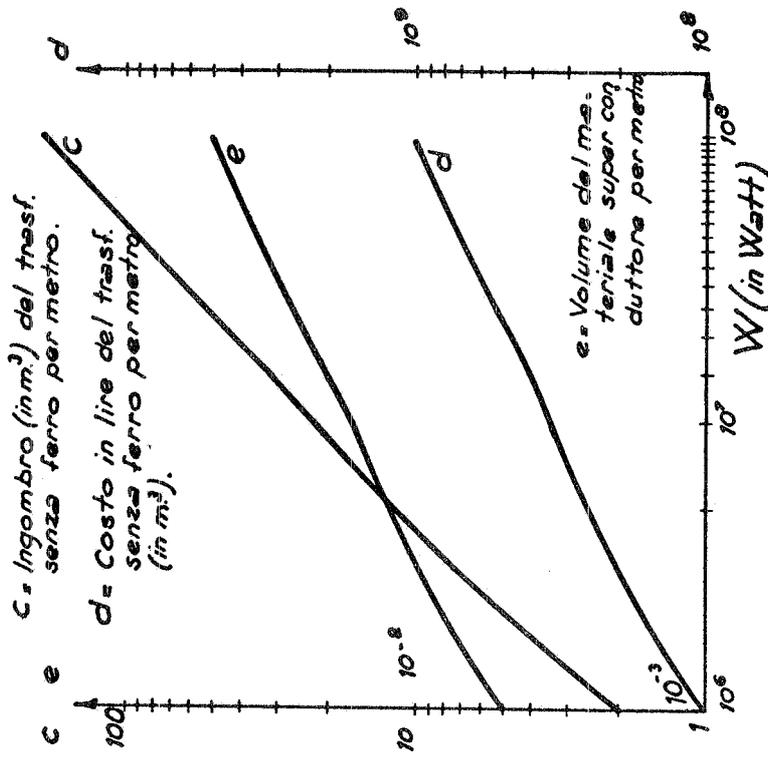


FIG. 7 - I grafici c, d, e. rappresentati si riferiscono al caso in cui  $H_c = 10^5$  Asp/m,  $m = 1$ ,  $\bar{S} = 10^7$  A/m<sup>2</sup> e il costo del cavo = 1000 lire/m.

18.

1° caso - Ipotesi: a) circuito secondario aperto

b)  $R_1 = 0$

c)  $I_1 = i$

$$(1) \quad V_0 \sin \omega t = 2 \pi r_0 a \mu_0 \frac{di}{dt} + \pi r_0^2 \mu_0 \mu_r \frac{di}{dt}$$

Definiamo le seguenti grandezze adimensionali:

$$\alpha_v = \frac{V_0}{\omega (\pi r_0^2 B_s + \frac{B_s}{\mu_{r1}} 2 \pi r_0 a)} \quad \alpha_i = \frac{i}{\frac{B_s}{\mu_0 \mu_{r1}}}$$

la quantità  $\omega (\pi r_0^2 B_s + \frac{B_s}{\mu_{r1}} 2 \pi r_0 a)$  rappresenta la tensione massima indotta dalla variazione di flusso concatenato con il nucleo e con l'avvolgimento, mentre la quantità  $\frac{B_s}{\mu_0 \mu_{r1}}$  rappresenta il campo magnetico massimo, sfruttabile con il Fe, che data la geometria del sistema, coincide con la corrente massima.

Con tali sostituzioni l'eq. (1) diventa:

$$\alpha_v (\pi r_0^2 B_s + \frac{B_s}{\mu_{r1}} 2 \pi r_0 a) \sin \omega t = \pi r_0 \mu_0 (2a + r_0 \mu_r) \frac{B_s}{\mu_0 \mu_{r1}} \frac{d\alpha_i}{dt}$$

$$(2) \quad \alpha_v \sin \omega t = \frac{1 + \frac{r_0}{2a} \mu_r (\alpha_i)}{1 + \frac{r_0}{2a} \mu_{r1}} \frac{d\alpha_i}{dt}$$

La soluzione dell'eq. (2), con la condizione iniziale  $t=0 \quad \alpha_i(0)=0$ , è:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_i \leq 1 \quad 0 \leq t \leq t^x \quad T - t^x \leq t \leq T \quad \left[ T = \frac{2\pi}{\omega} \right] \\ \alpha_i(t) = \alpha_v (1 - \cos \omega t) \\ \alpha_i > 1 \quad t^x < t < T - t^x \\ \alpha_i(t) = \alpha_v \frac{1 + \frac{r_0}{2a} \mu_{r1}}{1 + \frac{r_0}{2a} \mu_r} \left[ \cos \omega t^x - \cos \omega t \right] + 1 \end{array} \right.$$

(L'istante  $t^x$  soddisfa la relazione:  $\cos \omega t^x = \frac{\alpha_v - 1}{\alpha_v}$ ).

La soluzione dell'eq. (2) è stata tabulata per i seguenti valori delle costanti e dei parametri:

$$\begin{aligned} \omega &= 314 \text{ sec}^{-1} & \alpha_v &= 0.6 \div 0.8 \div 1.0 \\ \mu_{r1} &= 2000 & r_o/2a &= 0.5 \div 5 \div 50 \div 500 \\ T &= 210^{-2} \text{ sec} \end{aligned}$$

Nelle figg. 8 e 9 sono riportati i grafici delle soluzioni  $\alpha_i(t)$  della (2) per  $(\alpha_v=0.6, r_o/2a=50)$  e  $(\alpha_v=1.0, r_o/2a=5)$ .

2° caso - Ipotesi: a) circuito secondario chiuso su un carico  $R=R_2$   
b)  $R_1=0$

$$\begin{aligned} V_o \sin \omega t &= 2 \pi r_o a \mu_o \frac{di_1}{dt} + \pi r_o^2 \mu_o \mu_r \frac{d(i_1-i_2)}{dt} \\ 0 &= \pi r_o^2 \mu_o \mu_r \frac{d(i_1-i_2)}{dt} - R i_2 \end{aligned}$$

ponendo  $(i_1-i_2)=i$  (corrente magnetizzante), si ottiene:

$$\begin{aligned} V_o \sin \omega t &= 2 \pi r_o a \mu_o \frac{d(i_1-i_2)}{dt} + 2 \pi r_o a \mu_o \frac{di_2}{dt} + \pi r_o^2 \mu_o \mu_r \frac{d(i_1-i_2)}{dt} = \\ &= 2 \pi a r_o \mu_o \frac{di}{dt} + \frac{\pi r_o^2 \mu_o \mu_r}{R} 2 \pi r_o a \mu_o \frac{d^2 i}{dt^2} + \pi r_o^2 \mu_o \mu_r \frac{di}{dt} \end{aligned}$$

Definendo  $\alpha_v$  ed  $\alpha_i$  come nel I° caso si ottiene:

$$\begin{aligned} \alpha_v \omega \left( \pi r_o^2 + 2 \pi r_o \frac{a}{\mu_{r1}} \right) B_s \sin \omega t &= 2 \pi a r_o \mu_o \frac{B_s}{\mu_o \mu_{r1}} \frac{d\alpha_i}{dt} + \\ &+ \frac{\pi r_o^2 \mu_o \mu_r}{R} \frac{2 \pi r_o a \mu_o}{\mu_o \mu_{r1}} B_s \frac{d^2 \alpha_i}{dt^2} + \pi r_o^2 \mu_o \mu_r \frac{B_s}{\mu_o \mu_{r1}} \frac{d\alpha_i}{dt} \\ \alpha_v \omega \left( \frac{r_o}{2a} + \frac{1}{\mu_{r1}} \right) \sin \omega t &= \left( \frac{1}{\mu_{r1}} + \frac{r_o}{2a} \frac{\mu_r}{\mu_{r1}} \right) \frac{d\alpha_i}{dt} + \\ &+ \frac{r_o}{2a} \frac{1}{\omega} \frac{\mu_o 2 \pi r_o a \omega \mu_r}{R} \frac{d^2 \alpha_i}{dt^2} \end{aligned}$$

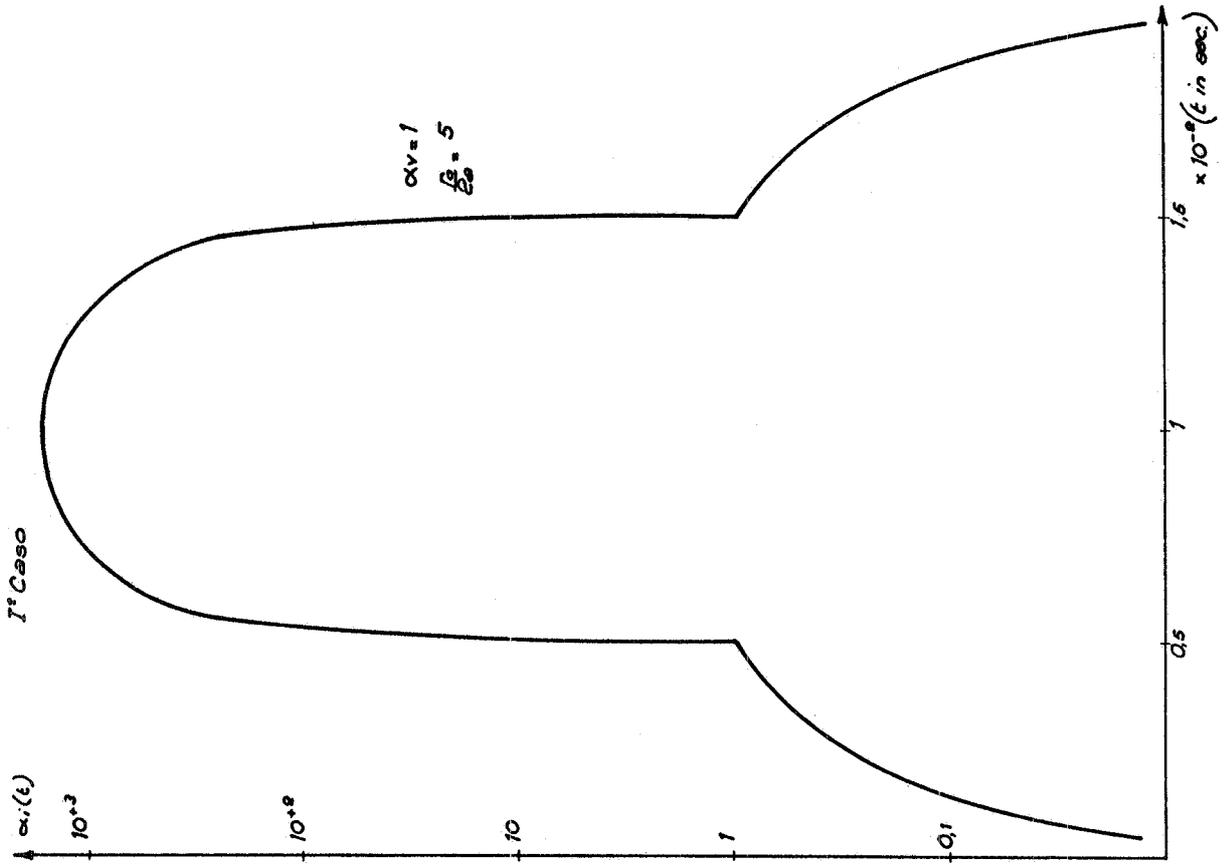


FIG. 9

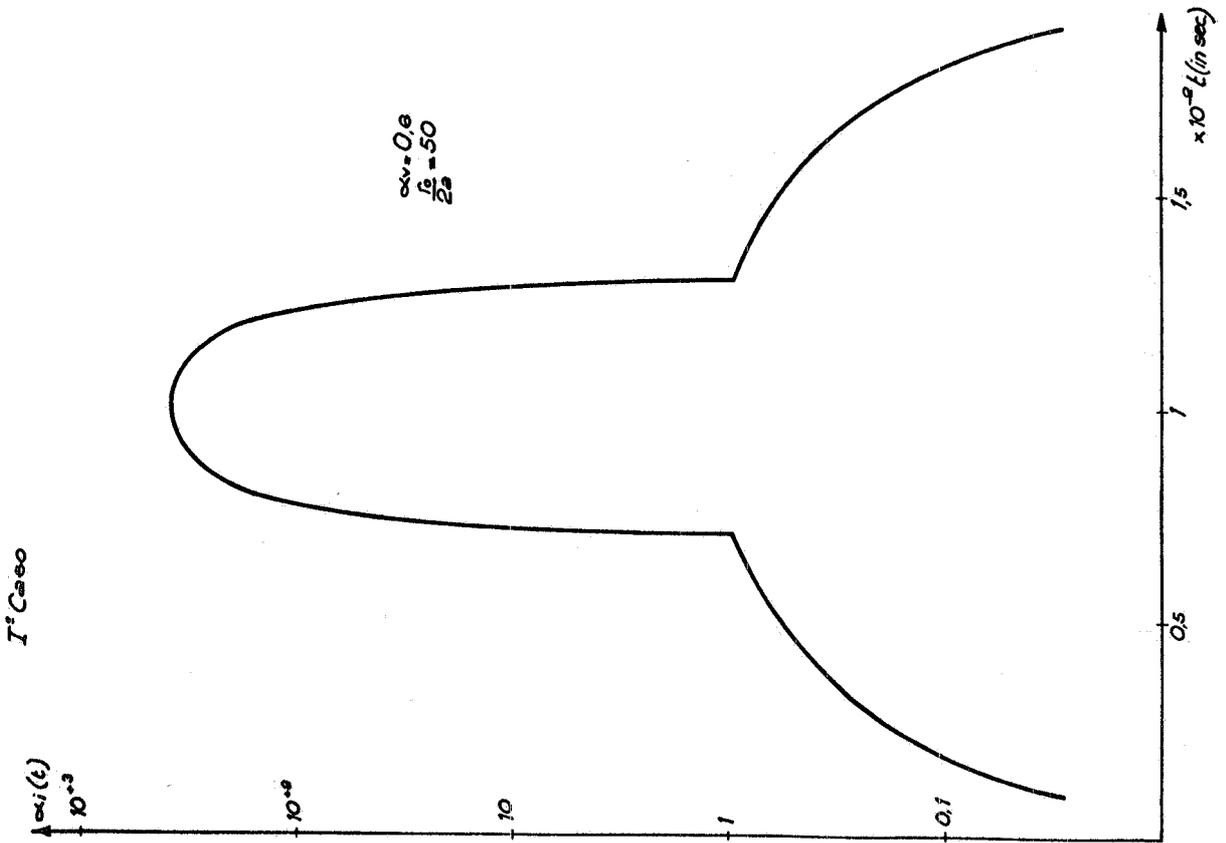


FIG. 8

ponendo per semplicità:

$$C_1 = \alpha_v \omega \left( \frac{r_0}{2a} + \frac{1}{\mu_{r1}} \right), \quad C_2 = \left( \frac{1}{\mu_{r1}} + \frac{r_0}{2a} \frac{\mu_r}{\mu_{r1}} \right), \quad C_3 = \frac{r_0}{2a} \frac{1}{\omega} \frac{\mu_0 2\pi r_0^2 \omega \mu_r}{R \mu_{r1}}$$

si ottiene:

$$(3) \quad C_3 \frac{d^2 \alpha_i}{dt^2} + C_2 \frac{d\alpha_i}{dt} - C_1 \sin \omega t = 0$$

con le condizioni iniziali:  $t=0 \rightarrow \alpha_i = 0, \quad \frac{d\alpha_i}{dt} = 0$ .

La soluzione generale dell'eq. (3) ha la forma:

$$\alpha_i(t) = A + B e^{-\frac{C_2 t}{C_3}} + C \sin \omega t + D \cos \omega t$$

con:

$$C = \frac{-C_1/C_2}{\omega^2 \frac{C_3}{C_2} + \frac{C_2}{C_3}} \quad D = \frac{-C_1/C_2}{\left(\frac{C_3}{C_2}\right)^2 \omega^3 + \omega}$$

i valori di A e B dipendono dalle condizioni iniziali nei vari tratti.

Per il tratto iniziale risulta:

$$A = \frac{\omega C_1/C_2}{\omega^2 + \left(\frac{C_2}{C_3}\right)^2} + \frac{\frac{1}{\omega} \frac{C_1}{C_2}}{\omega^2 \left(\frac{C_3}{C_2}\right)^2 + 1} \quad B = - \frac{\omega C_1/C_2}{\omega^2 + \left(\frac{C_2}{C_3}\right)^2}$$

Nei tratti successivi le condizioni iniziali divengono, ai vari istanti  $t_i^x$  in cui  $\alpha_i(t)$  assume il valore 1 crescendo:

$$\alpha_i(t_i^x) = 1, \quad \frac{d\alpha_i}{dt} \Big|_{t=t_i^x} = \mu_{r1} \frac{d\alpha_i}{dt} \Big|_{t=t_i^x}; \quad \text{mentre quando}$$

$\alpha_i(t)$  decrescente, attraversa l'asse  $\alpha_i = 1$  le condizioni iniziali sono:

$$\alpha_i(t_j^x) = 1, \quad \frac{d\alpha_i}{dt} \Big|_{t=t_j^x} = \frac{1}{\mu_{r1}} \frac{d\alpha_i}{dt} \Big|_{t=t_j^x}.$$

La soluzione del problema è stata tabulata per i seguenti valori delle costanti e dei parametri:

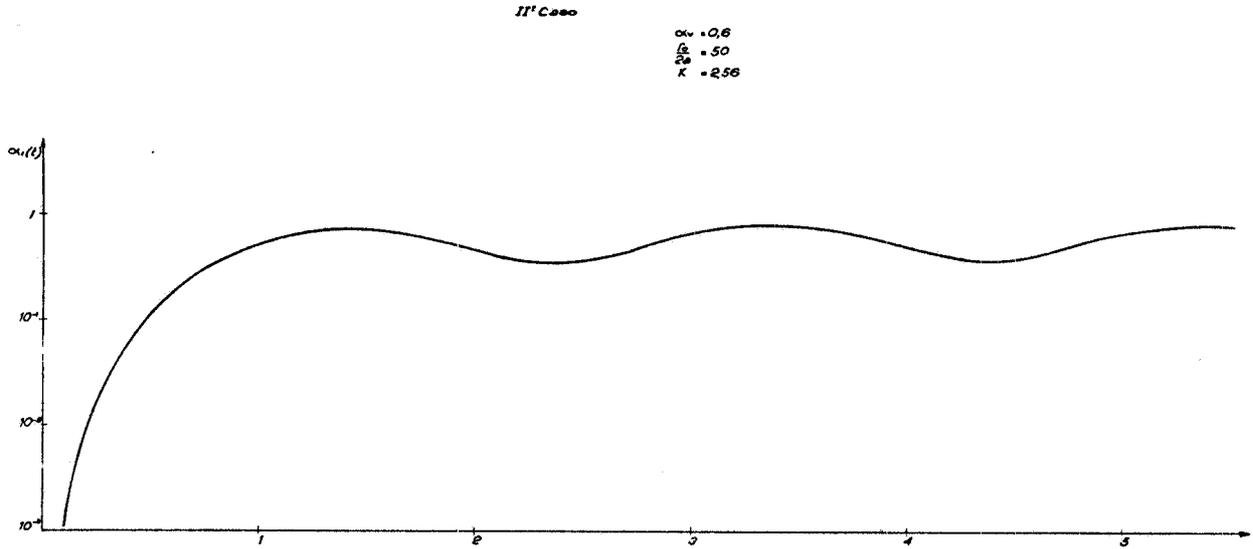


FIG. 10

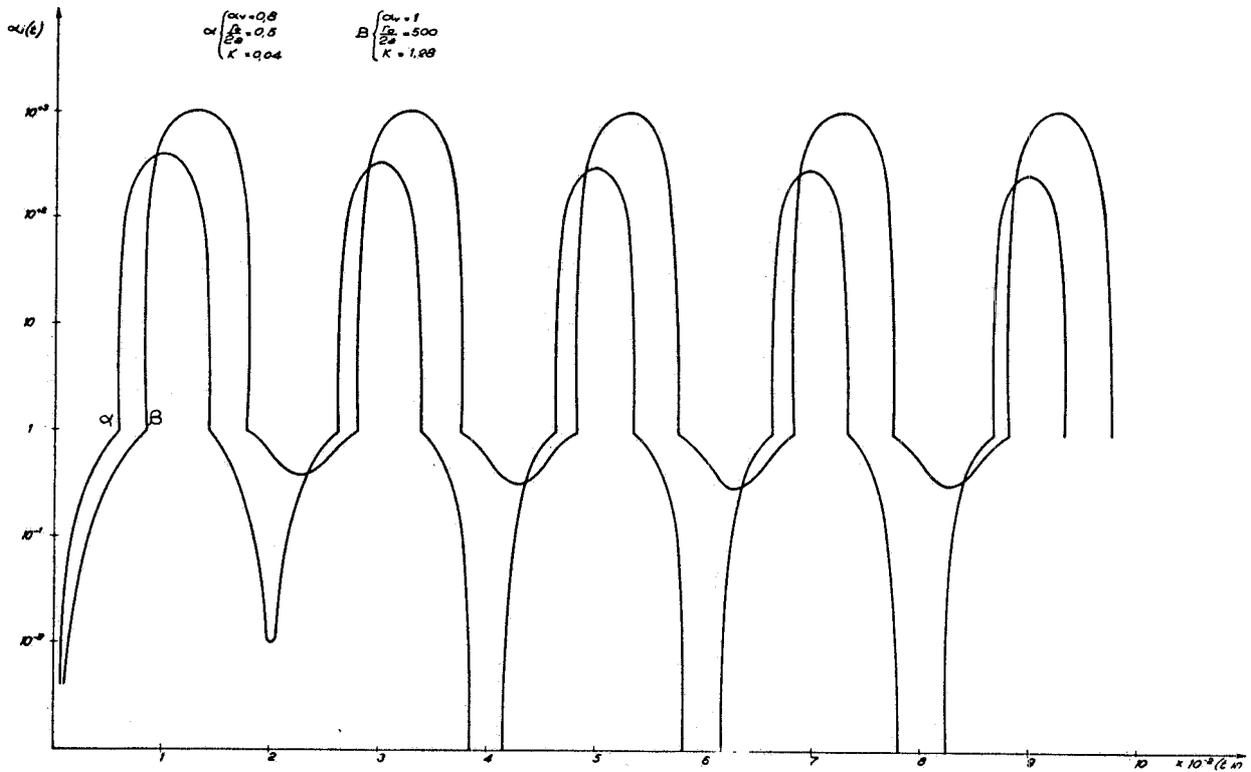


FIG. 11

$$\frac{\omega 2 \pi r_o a \mu_o}{R} = 0.01 \div 0.02 \div 0.04 \div 0.08 \div 0.16 \div 0.32 \div 0.64 \div 1.28 \div 2.56$$

$$\mu_{r_1} = 2000 \quad \alpha_v = 0.6 \div 0.8 \div 1.0$$

$$\omega = 314 \text{ sec}^{-1} \quad r_o/2a = 0.5 \div 5 \div 50 \div 500$$

Nella fig. 10 è riportato il grafico della soluzione  $\alpha_i(t)$  della (3) per  $\alpha_v = 0.6$ ,  $r_o/2a = 50$ ,  $K = 2.56$ ; si può vedere come per tale scelta dei parametri  $\alpha_i(t)$  risulta sempre  $< 1$ . Nella fig. 11 sono riportati i grafici della soluzione  $\alpha_i(t)$  della (3) per ( $\alpha_v = 1$ ,  $r_o/2a = 500$ ,  $K = 1.28$ ) e ( $\alpha_v = 0.8$ ,  $r_o/2a = 0.5$ ,  $K = 0.04$ ).

3° caso - Ipotesi: a) circuito secondario aperto

b)  $R_1 = R$

c)  $I_i = i$

$$V_o \sin \omega t = 2 \pi r_o a \mu_o \frac{di}{dt} + \pi r_o^2 \mu_o \mu_r \frac{di}{dt} + Ri$$

Introducendo come al solito le grandezze adimensionali  $\alpha_i$  ed  $\alpha_v$ :

$$\alpha_v \omega (\pi r_o^2 + 2 \pi r_o a \frac{1}{\mu_{r_1}}) \sin \omega t = (\pi r_o^2 \frac{\mu_r}{\mu_{r_1}} + 2 \pi r_o a \frac{1}{\mu_{r_1}}) \frac{d\alpha_i}{dt} + \frac{R}{\mu_o \mu_{r_1}} \alpha_i$$

$$\alpha_v \omega \sin \omega t = \frac{\frac{r_o}{2a} \mu_r + 1}{\frac{r_o}{2a} \mu_{r_1} + 1} \frac{d\alpha_i}{dt} + \frac{R \omega}{\mu_o \mu_{r_1} (\pi r_o^2 + 2 \pi r_o a \frac{1}{\mu_{r_1}}) \omega} \alpha_i$$

definendo: 
$$K = \frac{\omega \mu_o \mu_{r_1} (\pi r_o^2 + 2 \pi r_o a \frac{1}{\mu_{r_1}})}{R}$$

$$C_3 = \alpha_v \omega, \quad C_2 = \frac{\omega}{K}, \quad C_1 = \frac{\frac{r_o}{2a} \mu_r + 1}{\frac{r_o}{2a} \mu_{r_1} + 1}$$

si ottiene l'equazione:

24.

$$(4) \quad C_3 \sin \omega t = C_1 \frac{d\alpha_i}{dt} + C_2 \alpha_i \quad \text{combinazione iniziale } \alpha_i(0) = 0 .$$

La soluzione dell'eq. (4) è del tipo:

$$\alpha_i(t) = A e^{-\frac{C_2}{C_1}t} + B \sin \omega t + C \cos \omega t$$

$$\text{con:} \quad B = \frac{C_3/C_2}{(C_1 \omega / C_2)^2 + 1} \quad , \quad C = \frac{-C_3/C_1 \omega}{(C_2/C_1 \omega)^2 + 1}$$

Nel tratto iniziale risulta  $A = -C$ ; nei tratti successivi imponendo la condizione iniziale  $\alpha_i(t_i^x) = 1$ , risulta:

$$A = e^{\frac{C_2}{C_1}t_i^x} \left[ 1 - B \sin \omega t_i^x - (\cos \omega t_i^x) \right]$$

La soluzione è stata tabulata per i seguenti valori delle costanti e dei parametri:

$$\begin{aligned} \omega &= 314 \text{ sec}^{-1} & \alpha_v &= 0.6 + 0.8 + 1.0 \\ \mu_{r1} &= 2000 & \frac{r_o}{2a} &= 0.5 + 5 + 50 + 500 \\ & & K_1 &= \frac{2\pi r_o a \mu_o \omega}{R} = 0.1 + 0.5 + 1.0 + 1.5 + 2 \\ & & K &= K_1 + \mu_{r1} K_1 \frac{r_o}{2a} \end{aligned}$$

Nella fig. 12 sono riportati i grafici della soluzione  $\alpha_i(t)$  della (4) per  $(\alpha_v = 1.0, r_o/2a = 5.0, K_1 = 0.5)$  e  $(\alpha_v = 1.0, r_o/2a = 5.0, K_1 = 1.0)$ .

$$\alpha \begin{cases} K_1 = 0,5 \\ \frac{f_0}{T_0} = 5,0 \\ \alpha_v = 1,0 \end{cases} \quad \beta \begin{cases} K_1 = 1,0 \\ \frac{f_0}{T_0} = 5,0 \\ \alpha_v = 1,0 \end{cases}$$

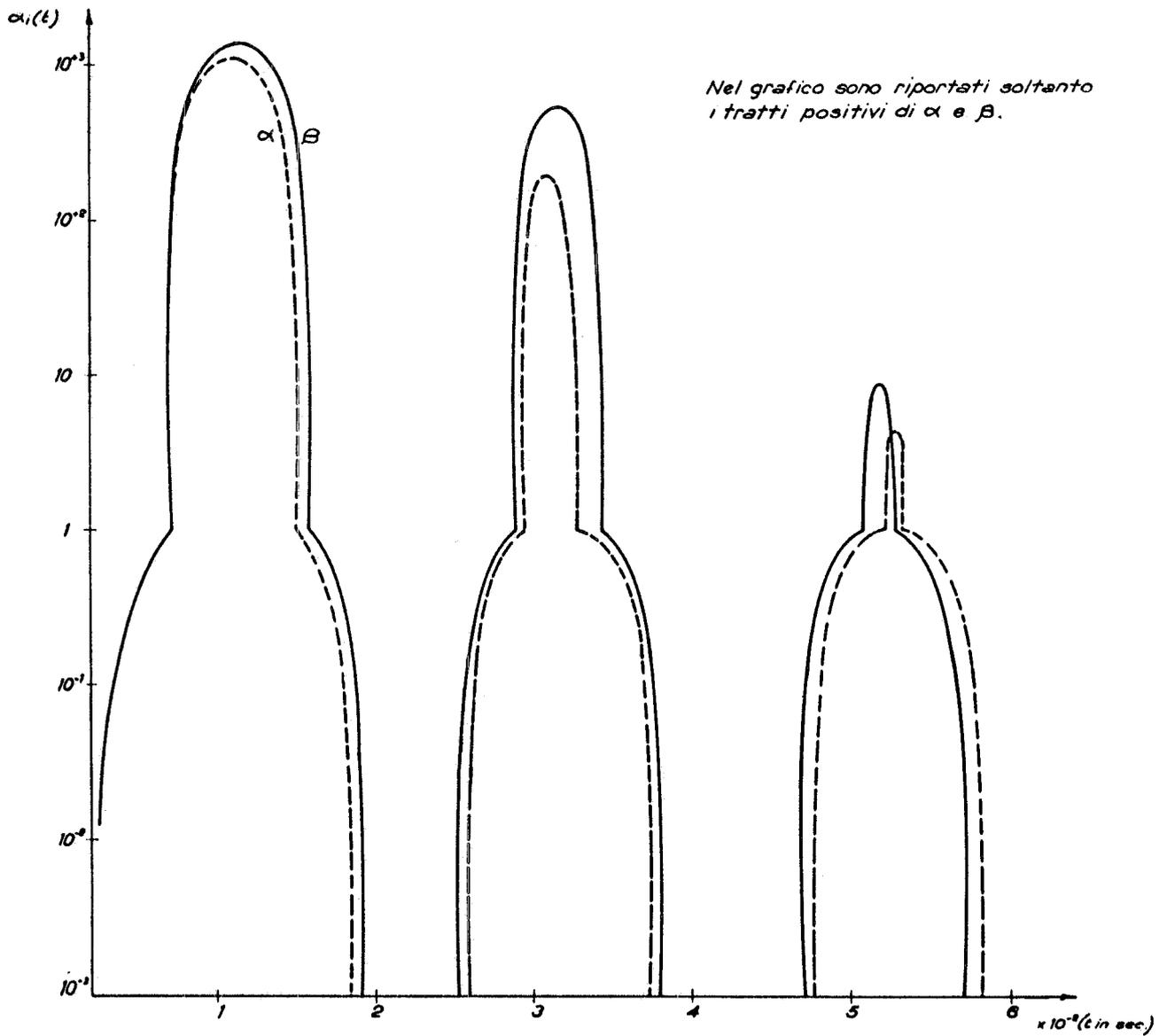


FIG. 12

## BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - R. Mc Fee, *Electr. Eng.* 81, 122 (1962).
- (2) - K. J. R. Wilkinson, *Proc. IEE* 110, 2271 (1963).
- (3) - B. B. Goodmann, *J. de Physique* 25, 171A (1964).
- (4) - A. Mailfert, G. Fournet, *C. R. Ac. Sci.* 258, 2271 (1964).
- (5) - G. Pasotti, N. Sacchetti, G. Sacerdoti, G. Sanna, *l'Elettrotecnica* LIV, 80 (1967).
- (6) - J. D. Livingstone, *Phys. Rev.* 129, 1943 (1963).
- (7) - T. Kinsel, E. A. Lynton, B. Serin, *Phys. Letters* 3, 30 (1962).
- (8) - T. A. Bucchold, P. T. Molenda, *Cryogenics* 2, 344 (1962).
- (9) - T. A. Bucchold, *Cryogenics* 3, 141 (1963).
- (10) - H. London, *Phys. Letters* 6, 162 (1963).
- (11) - N. Elnkave, *Rapporte Interne (L. C. I. E.)* n. 690, 629 (1964).
- (12) - A. Mailfert, *Rev. Gen. de l'Electricitè* 75, 315 (1966).
- (13) - R. M. F. Linford, *Phys. Letters* 17, 18 (1965).
- (14) - R. A. Kamper, *Phys. Letters* 2, 290 (1962).
- (15) - E. C. Rogers, *Phys. Letters* 5, 317 (1963).
- (16) - C. Gremer, B. Elschen, *Philips Res. Reports* 20, 235 (1964).
- (17) - R. G. Rhodes, E. C. Rogers, R. J. A. Seebold, *Cryogenics* 4, 206 (1964).
- (18) - F. J. Young, H. C. Schenk, *J. Appl. Phys.* 35, 980 (1964).
- (19) - T. Pech, G. Fournet, *Cryogenics*, 7, 26 (1967).
- (20) - Y. B. Kim, C. F. Hempstead, A. R. Struad, *Phys. Rev.* 129, 528 (1963).
- (21) - Borchers, *Proc. IEE* 113, 1953 (1966).