

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF - 53/35
18.7.1953.

STUDIO DELL'ALIMENTAZIONE DELLA ECCITAZIONE DEL
MAGNETE DAL PUNTO DI VISTA TECNICO ED ECONOMICO.-

18-VII-53

STUDIO DELL'ALIMENTAZIONE DELLA ECCITAZIONE DEL MAGNETE DAL PUNTO DI VISTA TECNICO ED ECONOMICO. =====

Introduzione.-

Le possibilità di alimentazione dell'eccitazione del magnete sono sostanzialmente le seguenti:

- 1) Con un generatore sincrone che supplisce completamente all'energia necessaria all'eccitazione del Magnete.
- 2) Generatore sincrone che alimenta un condensatore ed il magnete in parallelo (o con varianti come per esempio aggiungendo un condensatore in serie al magnete).
- 3) Con un generatore a corrente continua protetto da una induttanza ed un ~~generatore~~ generatore di alternata protetto da un condensatore che alimentano magnete e condensatori in parallelo (soluzione prevista per Wilson).
- 4) Con un generatore di corrente continua ed alternata insieme.
- 5) Con un generatore di corrente continua che alimenta un circuito di carica e con
- 6) Con una mutua induttanza per proteggere il circuito a c.c. da componenti alternate di corrente ignitrons che scaricano l'energia immagazzinata nel magnete in seguito a comando.

Ad orientare verso una soluzione intervengono criteri tecnici e soprattutto il criterio economico. Il criterio economico naturalmente avrà un aspetto di costo di esercizio e di costo d'impianto. Per avere un'idea della convenienza di un metodo o dell'altro esporremo con ordine:

- I°) I vantaggi della presenza di una componente continua oltre che di una alternata nella eccitazione.-
- II°) Calcolo di massima del costo della prima soluzione (calcolo di massima coi dati del sincrotrone di Wilson).-
- III°) Calcolo di massima del costo della seconda soluzione proposta (calcolo di massima coi dati del sincrotrone di Wilson).-
- IV°) Calcolo di massima del costo della terza soluzione proposta (calcolo di massima coi dati del sincrotrone di Wilson).-
- V°) Esposizione del metodo quarto di eccitazione.
- VI) Calcolo del costo della quinta soluzione proposta (per il sincrotrone per Wilson)
- VII) Esame della VI soluzione

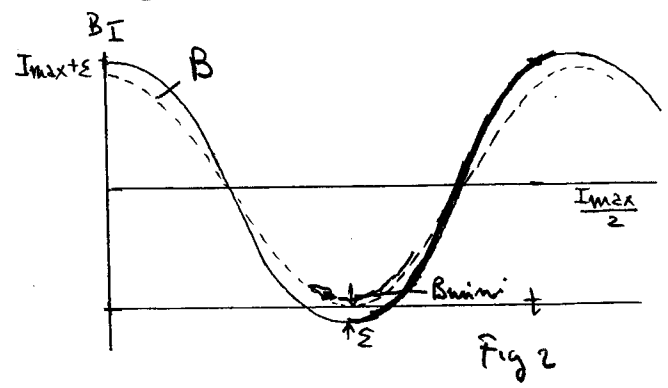
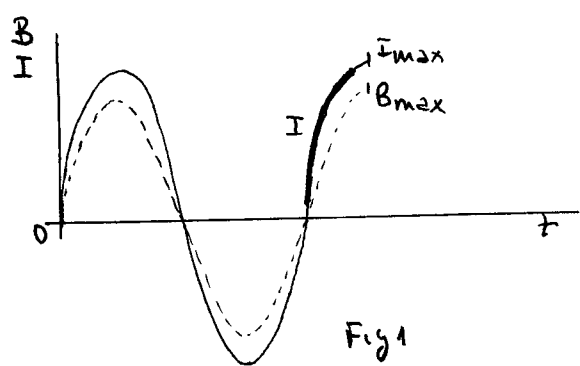
A) I vantaggi della presenza di una componente continua oltre che di una alternata nel circuito di eccitazione del magnete di un sincrotrone.-

Poniamo di voler accelerare in un sincrotrone di dato raggio degli elettroni da una energia E_0 fino ad una energia E . Dovremo provocare nella gap un campo magnetico che vari da valori bassissimi (10-20 gauss) fino a valori B_{max} che nei casi concreti raggiunge valori di 5 000 - 14 000 gauss. Stabiliti i valori di B alla introduzione e all'espulsione, dalle caratteristiche del magnete e dell'avvolgimento si determina il massimo valore di I_{min} e il minimo valore di I_{max} che bisogna raggiungere.

Possiamo all'uopo eccitare con corrente alternata di ampiezza di picco uguale al minimo (o valore di poco maggiore) valore di I_{max} e accelerare gli elettroni per il tratto della sinusoide crescente che viene tagliato dalle coordinate $Max I_{min}$ e $Min I_{max}$ come indicato in grassetto in fig.1 . Possiamo invece fornire una corrente continua di ampiezza $\approx \frac{I_{max}}{2}$ e una corrente alternata di ampiezza massima $\frac{I_{max}}{2} + \epsilon$ allora avremo una corrente che varia da $-\epsilon$ a $I_{max} + \epsilon$ e potremo utilizzare il tratto crescente, i campi magnetici in corrispondenza della corrente agli estremi del tratto essendo B_{min} e B_{max} .

La ragione in cui si introduce il termine ϵ nella corrente alternata è dovuta all'isteresi: per ricondurre a B_{min} bisogna che la corrente raggiunga piccoli valori negativi: ϵ sarà una piccola componente che si determinerà in base a B_{min} e al ciclo d'isteresi del materiale.

Questo tipo di eccitazione è indicato in fig.2 .



Quali vantaggi e svantaggi rappresenta l'eccitazione descritta in fig.2 rispetto a quelli dell'eccitazione di fig.1 ? Prescindendo dal sistema di alimentazione, cioè guardando solo i capi del magnete e condensatore in parallelo possiamo senz'altro affermare che il secondo tipo di eccitazione è preferibile a parità di

frequenza della corrente alternata e di I_{max} e dimensioni geometriche,

II° dal punto di vista del rendimento:

- 1) Le perdite per correnti parassite sono ridotte ad 1/4 del valore assunto nel primo caso essendo proporzionale a $(B \text{ alternato})^2$, ed essendo che il valore di B_{alt} si riduce della metà.-
- 2) Le perdite ohmiche nei conduttori vengono ridotte di 1/4. Infatti nel primo caso saranno proporzionali a $\frac{1}{T} \int_0^T I_{max}^2 \omega^2 \omega t = \frac{I_{max}^2}{2}$ nel secondo caso saranno proporzionali a $\frac{1}{T} \int_0^T (\frac{I_{max}}{2} + \frac{I_{max}}{2} \omega \omega t)^2 dt = I_{max}^2 \frac{3}{8}$.
- 3) Essendo che la potenza dei condensatori viene ridotta ad 1/4 (vedi n.II) le perdite nei condensatori vengono ridotte ad 1/4 ammettendo proporzionalità tra potenza dissipata P_{diss} e potenza immagazzinata dei condensatori.

Oltre che sul rendimento di per se stesso si rende meno impegnativo il sistema di raffreddamento ed inoltre, a parità di perdite specifiche nel rame, si possono aumentare le densità di correnti per cui si possono diminuire le dimensioni del rame e del ferro del sincrotrone, (per dati più precisi bisognerebbe fare calcoli).

III° dal punto di vista di economia dell'impianto:

- 1) Economia del banco dei condensatori che devono fornire solo potenze uguali ad 1/4 di quelle che avrebbe dovuto fornire nel primo caso; si risparmierebbe cioè 3/4 del costo del banco progettato nel primo caso (decine di milioni di lire).
- 2) Il sistema di isolamento nelle bobine di eccitazione del magnete viene rifatto perchè a metà si riduce la tensione di eccitazione (serve solo a provocare la corrente alternata; la corrente continua è provocata da tensioni basse).
- 3) Il periodo in cui viene accelerato il pacchetto di elettroni (a parità di numero di pacchetti di elettroni per secondo) viene raddoppiato; da ciò discende che la tensione applicata al risuonatore a radio frequenza viene ridotta della metà quindi può essere che qualche vantaggio si possa avere in tutto il sistema a radio frequenza.

IV° Vantaggi tecnici:

- 1) Nella prima fase di iniezione (vicino a B_{min}) il campo B è pianeggiante: l'iniezione può essere prolungata ricorrendo in minor misura e forse senza ricorrere, per rendere pianeggiante $B(t)$ all'iniezione, a sbarrette di ferro che si saturino.

8) In un tratto sufficientemente lungo si ha un andamento crescente del campo magnetico quasi rettilineo.

Da quel che si è detto se ne conclude che tutto farebbe propendere per il sistema secondo di alimentazione. Però come abbiamo detto bisognerà tener conto del sistema di alimentazione che annulla in parte e in qualche punto inverte addirittura i vantaggi elencati nel punto I) e II).

— • —

18-VII-53

Reg. M 9

75 260

II° - Eccitazione con macchina rotante che fornisca tutta la potenza attiva e reattiva necessaria al funzionamento del sincrotrone.

Considerato che in tal caso questa macchina da sola potrebbe fornire circa 17.000 kVA, si sconsiglia questa soluzione. In primo luogo il costo della macchina da sola sarebbe presumibilmente superiore al costo dell'impianto previsto nel caso IV°. Inoltre considerato che il rendimento di una tale macchina non sarebbe presumibilmente migliore del 97,5%, si otterrebbero delle perdite di esercizio dell'ordine di 2 o 3 volte di quelle del caso IV°.

Infine oltre ogni altra considerazione di costo iniziale e di rendimento, evidentemente la sistemazione e la manutenzione di una macchina così grossa presenta problemi notevoli e comunque onerosi.

A tutto ciò va ancora aggiunta la considerazione che un guasto nella macchina potrebbe portare all'arresto, forse anche per lungo tempo dell'utilizzo del sincrotrone, mentre evidentemente più rapida e più possibile appare, se necessaria, una eventuale sostituzione provvisoria di elementi di condensatori od anche dei piccoli generatori di c.a. e c.c. che sono previsti nel caso del choke coil.

II° Eccitazione con sistema antirisonante formato con banco di condensatori in parallelo al magnete del sincrotrone.

La soluzione che si prospetta immediatamente come conseguenza delle osservazioni fatte in II° è quella di alimentare il magnete con un generatore a c.a. che abbia il solo compito di fornire ~~energia-attiva~~ la potenza attiva erogata dal sistema, mentre la potenza reattiva viene scambiata tra il magnete del sincrotrone ed un banco di condensatori accordate in ampia risonanza alla frequenza di lavoro (30Hz) col magnete stesso.

Alla fine del punto IV° vengono riportate le caratteristiche tecniche relative all'uso di questo sistema (essenzialmente generatore c.a. e banco di condensatori), confrontate con quelle relative al caso contemplato in IV° (Choke coil) assieme ai costi dei due progetti ed al consumo di energia reale prevista.

IV SISTEMA DI ECCITAZIONE DEL MAGNETE DEL SINCROTRONE CON BIAS IN CORRENTE CONTINUA.

Si pensa di poter eccitare il magnete del sincrotrone con una corrente a valor medio non nullo (in particolare col valor medio uguale - o un pò inferiore - a metà dell'escursione massima della corrente stessa).

Nella fig.1, la curva (1) dà l'andamento della corrente ove si eccitasse il magnete semplicemente in corrente alternata a valor medio nullo e valor massimo I . La curva (2) dà invece l'andamento della corrente ove si eccitasse il magnete con corrente di valor medio $(I/2)$. La corrente ha valor medio $(I/2)$ I può ritenersi creata dalla sovrapposizione di due correnti di cui una continua di valore $(I/2)I$ ed una alternata di valor massimo ancora $(I/2)I$, come appare in fig.2 nella quale sono indicate a tratto continuo le due componenti e con linea tratteggiata la corrente risultante.

Un tale sistema presenta i seguenti vantaggi rispetto a quello con eccitazione in corrente alternata a valor medio nullo.

- a) Il valor massimo della corrente alternata viene ridotto a metà. Ciò comporta le ulteriori conseguenze favorevoli.
- b) L'energia scambiata tra i sistemi di condensatori e l'induttanza del magnete viene ridotta ad un quarto. Con ciò viene anche ridotto ad un quarto il costo dei condensatori (che è infatti proporzionale all'energia reattiva per la quale sono calcolati).

- c) Le perdite per correnti parassite del ferro e nel rame del magnete vengono ridotte ad un quarto.
- d) Le perdite dei condensatori si ridurranno anche esse presumibilmente ad un quarto e le perdite ohmiche passano da $(1/2) R I^2$ a $(3/8) R I^2$ delle quali $(1/4) R I^2$ fornite dal generatore di corrente continua ed $(1/8) R I^2$ dal generatore di corrente alternata.
- e) Come conseguenza di c) d) si riduce la potenza del generatore a corrente alternata.
- f) Essendo necessaria in corrispondenza dell'iniezione una pendenza del campo B (t) dell'ordine di $1/4$ di quella massima è pensabile di usufruire a questo scopo del tratto a debole pendenza in corrispondenza del minimo di B.

Il sistema ha però alcuni vantaggi:

- a) Necessità di un generatore a corrente continua capace di fornire la corrente $(1/2)I$ e di potenza tale da sopperire alle perdite ohmiche di c.c. nel magnete e nel choke-coil.
- b) Necessità di una induttanza posta in serie al generatore a corrente continua (choke-coil), per impedire il passaggio della corrente alternata nel generatore stesso.

Il circuito si prevede di massima realizzato secondo lo schema di Fig.3.

La capacità C_2 è necessaria per isolare il generatore a

corrente alternata dalla sorgente a corrente continua.

Si potrebbe pensare di porre questa capacità direttamente in serie al generatore di corrente alternata. Sembra però più conveniente la soluzione di Fig.3 perchè in tal modo la tensione del generatore di corrente alternata viene ridotta, mentre nell'altro caso essa verrebbe aumentata. C'è da notare che la possibilità di ridurre la tensione del generatore a corrente alternata è abbastanza importante, poiché senza C_2 essa è dell'ordine di parecchi KV. C'è ancora da osservare che con la soluzione di Fig.3 il costo dei condensatori C_1 e C_2 rimane uguale a quello del solo condensatore C_1 ove C_2 fosse in serie al generatore di corrente alternata e ciò perchè nel caso di fig.3 sia C_1 che C_2 contribuiscono ad immagazzinare l'energia reattiva da scambiare con il sistema induttivo.

CALCOLO DELL'INDUTTANZA "L" (CHOKE-COIL)

Se si ammette che attraverso il choke-coil possa passare una corrente alternata dell'ordine di $1/10$ di quella che passa per l'avvolgimento del magnete M a prescindere dalla reattanza propria del generatore a corrente continua, dovrà essere :

$$L = 10 M$$

indicando con L l'induttanza del choke-coil

M l'induttanza del magnete del sincrotrone.

Essendo

$$M = 0,013 \text{ Henry}$$

prenderemo "ad abundantiam"

$$L = 0,15 \text{ Henry}$$

Si vuole progettare il choke-coil con avvolgimento di rame e percorso magnetico parte in ferro e parte in aria, in modo che la spesa annua a carico del bilancio del sincrotrone per consumo di energia elettrica per ammortamento di capitale e per interesse sul capitale stesso risulti minimo.

Diciamo :

F = sezione piattina di rame

a e b = dimensioni piattina di rame

l = percorso magnetico del ferro

l_1 = percorso magnetico nell'aria

$$l/l_1 = K$$

N = numero di spire

R = riluttanza circuito magnetico

S = sezione ferro

μ_r = permeabilità relativa del ferro (= 4000)

μ_0 = permeabilità del vuoto (= $4 \cdot 10^{-7}$ h/m)

I = corrente massima nel choke-coil.

Si prevede inoltre per il ferro la sezione quadrata di lato S

Sarà :

$$L = \frac{N^2}{R}$$

con

$$R = \frac{l}{\mu_0 S} \left(l_1 + \frac{l}{\mu_r} \right)$$

quindi

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{l_1 + \frac{l}{\mu_r}}$$

(1)

Inoltre :

$$N I = \frac{l}{\mu_0 \mu_r} \left(\frac{l}{\mu_r} + l_1 \right) B_{\max}$$

ove B_{\max} è il valore massimo ammissibile dell'induzione magnetica per evitare la saturazione del ferro.

E' quindi :

$$L = \frac{N S}{I} B_{\max}$$

$$N S = \frac{L I}{B_{\max}}$$

$$I = I_c + (1/10) I_A$$

ove I_c è la corrente continua generata dal generatore di c.c.

I_A è la corrente massima della corrente alternata nel magnete.

Si assumono :

$$I_c = 1850 \text{ A.}$$

$$I_A = 1850 \text{ A}$$

Ad abundantiam si assume $I = 2100 \text{ A}$

Inoltre si presuppone $B_{\max} = 1,5 \text{ Wb/m}^2$

Perciò :

$$N S = 210 \text{ m}^2$$

Ricordando la :

$$l = K l_1$$

Si può scrivere la (1) così :

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{1 \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{\mu_r} \right)} \quad (\text{I bis})$$

Inoltre posto :

$$l_0 = l + l_{\frac{1}{2}}$$

sarà :

$$l_0 = l \left(1 + \frac{1}{K} \right) = l \frac{1 + K}{K} \quad (2)$$

La lunghezza di l_0 è stabilita dall'ingombro del rame, da quello del ferro; dall'isolante e dalla presenza di canali di raffreddamento.

A prescindere da questa ultima considerazione si può scrivere, supponendo che solo su due gambe del ferro venga avvolto il rame e precisamente secondo quattro strati coassiali,

$$l_0 = 2 \left\{ (b+i) \frac{N}{8} + 2 i + 2 \frac{\sqrt{S}}{2} \right\} + 2 \left\{ 2 \frac{\sqrt{S}}{2} + 8a + 6i'' + 2i' + i''' \right\} \quad (3)$$

ove :

- $i = 2$ mm. spessore isolante tra due piattine
- $i'' = 10$ mm. " " " rame e massa
- $i' = 5$ mm. " " " strato e strato
- $i''' = 10$ mm. " " " le due bobine

Si vuole ancora che la zona occupata dal rame e dall'isolante e dal magnete sia di sezione quadrata. Ossia si abbia :

$$(b+i) \frac{N}{8} + 2 i' = 8 a + 6 i'' + 2 i' + i''' \quad (4)$$

da cui

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{1}{8} \left[(b+i) \frac{N}{8} + 2i' - 6i'' - 2i' - i''' \right] = \\ &= (b+i) \frac{N}{64} - \frac{6}{8} i'' - \frac{1}{8} i''' = (b+2) \frac{N}{64} - 2,75 - 1,25 = \\ &= \left[(b+2) \frac{N}{64} - 4 \right] \text{ mm.} \end{aligned}$$

Per effetto della (4), la (3) si scrive :

$$\begin{aligned} l_0 &= 2 \left\{ 2(b+i) \frac{N}{8} + 4i' + \frac{4\sqrt{5}}{2} \right\} = (b+i) \frac{N}{2} + 8i' + 4\sqrt{5} = \\ &= \left[(b+2) \frac{N}{2} + 4\sqrt{5} + 80 \right] \text{ mm.} \end{aligned}$$

Dalla (1bis) e dalla (2) si ha :

$$l = \frac{N^2 \mu_0 S}{\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\mu_r} \right) L} = \frac{k}{k+1} l_0$$

da cui si ricava :

$$k = \frac{l_0 - \frac{210 \mu_0 N}{L}}{\frac{210 \mu_0 N}{L} - \frac{l_0}{\mu_r}} = \frac{l_0 - 0,17584 \cdot 10^{-2} N}{0,17584 \cdot 10^{-2} N - l_0/\mu_r}$$

Determiniamo il costo del rame e del ferro, assumendo come dati indicati vi i seguenti :

$$C_{Fe} = \text{Cost ferro} = 600.000 \text{ £/ton}$$

$$C_{Cu} = \text{Cost rame} = 1.000.000 \text{ £/ton}$$

quindi detto C il costo complessivo del rame e del ferro si ha :

$$C = S l \gamma_{Fe} C_{Fe} + F \cdot 4 \left[\sqrt{5} + (42 + 35) 10^{-3} \right] N \gamma_{Cu} C_{Cu}$$

Se il tasso di ammortamento è previsto nel 7% (15 anni di esercizio)

l'interesse sul capitale immobilizzato dell'8% si ha per ogni anno di

esercizio un importo a carico del bilancio per ammortamenti ed interessi relativi al choke-coil di :

$$I = \frac{15}{100} \text{ C}$$

Vi sono inoltre le spese relative al consumo di inerzia.

Detto

$$p = 10 \text{ £/KWh}$$

essendo

$$1 \text{ K W h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

sarà l'ammontare delle spese di esercizio, supposto un funzionamento di ~~15/g~~ 15 ore/giorno (5400 ore/anno)

$$C_{\text{kwh/anno}} = R_2 I_1^2 \cdot 3600 \cdot 15 \cdot 360 \frac{10}{3,6 \cdot 10^6} \text{ £} = 54 \cdot R_2 I_1^2 \text{ £}$$

$$R_2 = 8 \frac{C_{cu}}{F} = \frac{1}{55} \frac{4N[\sqrt{5} + (4a + 3S)10^{-3}]}{ab}$$

$$I_1 = 1850 + \frac{185}{\sqrt{2}} = 1980 \text{ A}$$

$$I_1^2 = 3,92 \cdot 10^6 \text{ A}^2$$

Quindi si ha come costo annuo :

$$C_{\text{annuo}} = \left\{ N^2 \gamma_{Fe} C_{Fe} + F \cdot 4 [\sqrt{5} + (4a + 3S)10^{-3}] N \gamma_{Cu} C_{Cu} \right\} \frac{15}{100} + 54 R_2 I_1^2 \text{ Lire}$$

Per il calcolo avremo quindi la seguente espressione :

a) $N S = 210 \text{ m}^2$

b) $l_0 = (b+2) \frac{N}{2} 10^3 + 4\sqrt{5} + 80 \cdot 10^3 \text{ m}$ percorso magnetico

c) $a = (b+2) \frac{N}{24} - 4 \text{ mm}$ altezza piastrina rame

d) $K = \frac{l_0 - 0,17584 \cdot 10^{-2} N}{0,17584 \cdot 10^{-2} N - \frac{l_0}{\mu_r}} \approx \frac{l_0 \cdot 100}{0,17584 N} - 1$ rapporto percorsi magnetici in aria e nel ferro

- e) $l = \frac{k}{k+1} l_0$ percorso magnetico nel ferro
- f) $l_1 = \frac{l}{k}$ percorso magnetico nell'aria
- g) $l_{cu} = 4N [\sqrt{s} + (4a + 3s) \cdot 10^{-3}] m.$ lunghezza cammino elettrico nel rame
- h) $R_2 = \frac{1}{55} \frac{l_{cu}}{ab}$ resistenza rame

$$i) C_{annuo} = (S l \cdot 4,68 \cdot 10^6 F l_{cu} \cdot 8,9 \cdot 10^6) \frac{15}{100} + 3,92 \cdot 10^6 \frac{l_{cu}}{ab} =$$

$$= (0,702 S l + 1,335 F l_{cu} + 3,92 \frac{l_{cu}}{ab}) \text{ milioni di Lire/anno}$$

Il sistema ora scritto è di 9 equazioni ad undici ^{incognite} ~~variabili~~ ~~equazioni~~. Vi sono quindi due parametri che possono venire variati per rendere minima l'espressione i), spesa annua a carico del bilancio per la presenza del choke-coil.

I parametri assunti sono : N e b

Fissato : $N = 600$ spire si è tabulata la tabella I dalla quale appare minima la spesa annua per $b = 20 - 15$ mm.

Fissato allora $b = 15$ mm. si è variato N ottenendosi il minimo in corrispondenza di 250 spire, come appare nella tabella II.

Si pensa di progettare il choke-coil, sulla base dei dati seguenti.

$N = 250$ spire	$S = 0,84 m^2$	$l_I = 0,440 m$
$b = 15$ mm.	$\sqrt{s} = 0,91 m.$	$K = 12,3$
$a = 66$ mm.	$l_0 = 5,845 m.$	$l_{Cu} = 1177 m$
$F = 990 mm^2$	$l = 5,405 m$	$R_2 = 0,0216$

$$\text{Volume } F_e = 81 = 4,540 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso } F_e = 35,41 \text{ ton}$$

$$\text{Costo } F_e = 35,41 \cdot 600.000 = 21.246.000 \text{ £.}$$

$$\text{Ammortamento + interesse annuo } F_e = 3.187.000 \text{ £.}$$

$$\text{Volume } Cu = 1,165 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso } Cu = 10,368 \text{ ton}$$

$$\text{Costo } Cu = 10,368 \cdot 1.000.000 = 10.368.000 \text{ £.}$$

$$\text{Ammortamento + interesse annuo } Cu = 1.555.000 \text{ £.}$$

$$\text{Volume totale} = 5,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso totale} = 45,780 \text{ ton}$$

$$\text{Costo totale} = 31.614.000 \text{ £.}$$

$$\text{Ammortamento annuo} 4.742.000 \text{ £. (rame + ferro)}$$

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 NI}{l_1 + \frac{l_2}{\mu_r}} = 1,500 \text{ Wb/m}^2$$

Induttanza choke-coil

$$L = \frac{\mu_0 S^2 N}{l_1 + \frac{l_2}{\mu_r}} = 0,150 \text{ M.}$$

$$W = R_2 I_1^2 = 0,0216 \cdot 3,42 \cdot 10^6 = 0,254 \cdot 10^6 = 254 \text{ kW}$$

Costo annuo di esercizio per perdite ohmiche C_{kwh}

$$C_{kwh} = 254 \cdot 5400 \cdot 10 = 13.716.000 \text{ Lire}$$

Costo annuo complessivo C_t del choke-coil :

$$C_t = 3.187.000 + 1.555.000 + 13.716.000 = 16.458.000 \text{ Lire}$$

Resistenza totale in serie generatore c.c.

$$R_t = R_1 + R_2 = 0,0132 \Omega + 0,0216 \Omega = 0,0348 \Omega$$

- II -

Tensione continua ai capi generatori c.c. V_c :

$$V_c = 0,0338 \cdot 1850 = 64,4 \text{ V}$$

Potenza generatore c.c. W_c :

$$W_c = 64,4 \cdot 1850 = 119 \text{ kW}$$

ALCUNE CONSIDERAZIONI SUL CIRCUITO DI ECCITAZIONE CON BIAS IN C.C.

a) Capacità in parallelo al generatore c.c.

Ricordando che attraverso il choke-coil passa una corrente alternata dell'ordine di 200 A è possibile che il generatore di c.c. non possa facilmente sopportare questa corrente. In tal caso occorre prevedere una capacità in parallelo al generatore di c.c. stesso tale però che non diminuisca sensibilmente l'impedenza del ramo RS (vedi Fig.5). Si imponga per esempio che la riduzione di impedenza causata da C₃ sia dell'ordine di 1/10 di quella offerta da L,

Ossia :

$$\frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{10} \omega L$$

da cui :

$$C_3 = 1870 \text{ MF}$$

essendo $f = 30 \text{ Hz}$

Questi condensatori sono attraversati da una corrente alternata dell'ordine di $(200/\sqrt{2}) \text{ (A)}$ efficaci a 30 Hz.

Ciò determina una tensione alternata ai loro capi di valore efficace

$$\frac{1}{\omega C} \cdot \frac{200}{\sqrt{2}} = 405,5 \text{ V}$$

In effetti però questi condensatori dovranno poter sostenere una tensione somma della tensione continua del generatore e di quella di cresta della corrente alternata. Ossia dovranno sostenere :

$$V = \sqrt{2} \cdot 405,5 + 65 = 650 \text{ V}$$

La potenza reattiva in gioco è : $405 \cdot \frac{200}{\sqrt{2}} = 58 \text{ k Var}$ efficaci

Il calcolo così fatto per determinare C_3 non tiene conto dell'induttanza del generatore a c.c. Occorrerà accertarsi che il sistema C_3 -induttanza del generatore c.c.-non entri in risonanza perchè in tal caso ai capi del generatore c.c. verrebbe a determinarsi una tensione alternata a 30 Hz che potrebbe raggiungere valori molto elevati e tali da compromettere perfino l'isolamento della macchina. Occorrerà quindi rivedere il calcolo che a condotte alla determinazione di C_3 quando sarà nota l'induttanza del generatore c.c. prescelto.

b) CALCOLO DELLA CAPACITÀ C_1 e C_2

Il lato RS (vedi fig.5), sulla base del precedente punto a) presenta una impedenza per la corrente alternata data da :

$$Z_1 = R_1 + j \cdot \frac{9}{10} \omega L$$

con

$$R_1 = 0,0637$$

$$L = 0,15 \text{ H} \quad \text{XXXXX}$$

$$\omega = 2\pi \cdot 30 \frac{1}{\text{sec}}$$

Quindi :

$$Z_1 = (0,0637 + j \cdot 25,42) \Omega$$

Il lato T V, ha l'impedenza Z_2 :

$$Z_2 = R_2 + j\omega M = (0,0132 + j \cdot 2,45) \Omega$$

L'impedenza dei due rami in parallelo R S e T V è data da :

$$Z_3 = (0,0125 + j \cdot 2,2345) \Omega$$

Poniamo $R_3 = 0,0125 \Omega$ $L_3 = 2,2345 \Omega$

Per cui $Z_3 = R_3 + j\omega L_3$

L'ammettenza che il generatore di c.a. vede ai suoi morsetti A B è data da :

$$Y = \frac{1}{R_3 + j\omega L_3 - \frac{1}{j\omega C_2}} + j\omega C_1$$

ammettenza che si vuole rendere di parte immaginaria nulla.

Si può fissare ancora una condizione ed in particolare il rapporto tra le tensioni tra T e V che diremo V_2 e fra A B che diciamo V_1 .

Diciamo :

$$K = \frac{V_2}{V_1}$$

E' inoltre :

$$V_2 = \frac{i_2}{j\omega C_2} + \frac{i_1}{j\omega C_1}$$

$$V_1 = \frac{i_1}{j\omega C_1}$$

$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{C_1}{C_2} \frac{i_2}{i_1} + 1$$

Ma si ha ancora :

$$V_1 = \frac{1}{j\omega C_1} i_1 = (R_3 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_2}) i_2$$

per cui :

$$i_2 = \frac{1}{j\omega C_1} \frac{1}{R_3 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_2}}$$

per cui la (a) si scrive :

$$k-1 = \frac{C_1}{C_2} \frac{1}{\omega C_1 (R_3 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega L_2})} =$$

$$= \frac{1}{\omega C_2 R_3 + j\omega C_2 L_3 + \frac{1}{j}}$$

da ciò in valore assoluto si ha :

$$k-1 = \frac{1}{\omega^2 C_2^2 R_3^2 + (\omega^2 C_2 L_3 - 1)^2}$$

ed anche :

$$C_2^2 \omega^2 R_3^2 + C_2^2 \omega^4 L_3^2 + 1 - 2\omega^2 L_3 C_2 = \frac{1}{k-1}$$

che, ordinando, diventa :

$$C_2^2 (\omega^2 R_3^2 + \omega^4 L_3^2) - 2\omega^2 L_3 C_2 + \frac{k-2}{k-1} = 0$$

Sostituendo i valori noti si ha :

$$C_2^2 [4\pi^2 \cdot 900 (0,0125)^2 + 4\pi^2 (2,235)^2 \cdot 900] - 2\pi^2 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 2235 C_2 \frac{k-2}{k-1} = 0$$

che con buona approssimazione dà

$$(420,13)^2 C_2^2 + 2 \cdot 420,13 C_2 + \frac{k-2}{k-1} = 0$$

$$C_2 = \frac{420,13 \pm \sqrt{(420,13)^2 - (420,13)^3 \frac{k-2}{k-1}}}{(420,13)^2} = \frac{1}{420,13} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{k-2}{k-1}} \right)$$

ossia : $C = \frac{1}{420,13} \left[1 \pm \sqrt{\frac{1}{k-1}} \right]$

Per la realtà delle soluzioni dovrà essere :

$$0 \leq 1 - \frac{k-2}{k-1} = \frac{1}{k-1}$$

Ossia, tenendo conto dell'approssimazione dei calcoli, C_2 è reale ancora per rapporti k sufficientemente grandi.

Per $k = 1$, C_2 diventa infinitamente grande, come era prevedibile.

Per $k < 1$ non si hanno soluzioni reali

Per $k > 1$ e non troppo grande (al massimo alcune migliaia di unità) si hanno due soluzioni reali, per le quali però bisogna osservare che :

Per $1 < k \leq 2$ si ha una sola soluzione accettabile del problema.

Per $k > 2$ si hanno due soluzioni accettabili.

Si prevede $k = 2$ In tal caso si ha :

$$C_2 = 4760 \mu F$$

Con questo e gli altri valori noti entriamo nella espressione della ammettenza X Y per determinare C_1 con la condizione già scritta di rendere nulla la componente immaginaria della stessa.

Ricordiamo che si ha :

$$Y = \frac{1}{R_3 + j\omega L_3 - i/\omega C_2} + j\omega C_1 = \frac{R_3 - j(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_2}) + j\omega C_1 [R_3^2 + (\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_2})^2]}{R_3^2 + (\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_2})^2}$$

Per la condizione posta dovrà essere :

$$C_1 = \frac{\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_2}}{\omega [R_3^2 + (\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_2})^2]} = 4750 \mu F$$

In tali condizioni si ha per Y il seguente valore :

$$Y = \frac{R_3}{R_3^2 + (\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_2})^2} = 0,00998 \frac{1}{\Omega}$$

$$Z = 1/Y = 100,2 \Omega$$

La corrente che passa per l'eccitazione del magnete è di 3700 Amax di cui 1850 A corrente continua e 1850 A massimo della corrente alternata a 30 Hz.

Nel ramo parallelo RS (se si prevede la presenza di C3) vi sarà una corrente alternata a 30 Hz di valore massimo

$$\frac{1}{9} 1850 = 205 \text{ A}$$

Per ciò attraverso alla capacità C2 passa una corrente alternata di ~~2055~~ 2055 A picco.

Da ciò si deduce che la tensione tra A e B sarà data da :

$$V_1 = 2300 \text{ V massimi}$$

$$V_{1\text{eff.}} = \frac{2300}{\sqrt{2}} = 1630 \text{ Veff}$$

Potenza reale erogata dal generatore di c.a. per sopperire alle perdite ohmiche causate dalla corrente alternata è :

$$W = \frac{(V_{1\text{eff}})^2}{Z} = \frac{(1630)^2}{100} = 26,569 \text{ kW}$$

Diciamo I1 la corrente di picco attraverso C1, essa sarà :

$$I_1 = C_1 V_1 = 2058 \text{ A}$$

Ogni uno dei due banchi di condensatori deve quindi avere le seguenti caratteristiche :

- C = 4750 μ F
- Vmax = 2300 V
- I_{max} = 2060 A
- V_{eff} = 1630 V
- I_{eff} = 1460 A

Potenza reattiva massima = 4,738.kVAR

Potenza reattiva efficacia = 2,379 kVAR

Rapporto tra la potenza reattiva dei condensatori senza bias in c.c.
senza e quella con bias è :

$$\frac{16.764}{2.2369} = 3.53$$

CONFRONTO FRA I PROGETTI DI ECCITAZIONE CON E SENZA BIAS IN C.C.

a) Con circuito antirisonante senza bias

b) Con circuito antirisonante con bias

Macchine occorrenti

b)

1) generatore monofase c.a.

30 Hz; 250 kW ; 6,4 kV_{eff};

40 A_{eff}

2) banco condensatori

17.000 kVAR ; 2167 μF ;

9 kV_{max} ; 3700 A_{max} ; 30 Hz.

1) Generatore monofase c.a.

30 Hz; 60 kW ; 1630 V_{eff};

37 A_{eff}

2) due banchi condensatori :

ciascuno da : 2370 kVAR ; 4750 μF;

2300 V_{max} ; 2060 A_{max} ; 30 Hz.

3) generatore c.c. 120 kW; 65 V

1850 A

4) un banco condensatore : 58 kVAR ;

1870 μF; 650 V_{max} ; 150 A ; 30 Hz

5) un choke-woil.

Diamo qui di seguito i costi di massima degli elementi costituenti i due progetti, tenendo conto che per quanto riguarda i generatori c.a. essi sono comprensivi del costo di quattro macchine (motore asincrono, dinamo, motore c.c., generatore monofase) e per il generatore c.c. il costo si riferisce al gruppo motore asincrono dinamo.

a)	b)
1) generatore monofase 30 Hz 19 milioni £	1) generatore monofase 30 Hz 6,1 milioni £
2) banco condensatori da 17.000 kVAR α) se fornito dalla Passoni e Villa ⁶⁰ 85 " "	2) due banchi condensatori tot. 4740 kVAR α) se forniti dalla Passoni e Villa ¹⁶ 24 milioni la
β) se fornito dalla Icar ¹⁰⁴ 156 " "	β) se forniti dalla Icar ³⁰ 43 " "
	3) generatore c.c. 2,9 " "
	4) un banco condensatore 58 kVAR 0,6 " "
	5) un choke-coil 32 " "

Dal confronto dei due casi si ha nella situazione più onerosa (condensatori Icar)

a) costo totale ¹¹⁵575 milioni £. b) costo totale ^{71,6}84,6 milioni £.

Nelle condizioni meno onerose (condensatori Passoni e Villa)
a) costo totale ⁷⁹104 milioni £. b) costo totale ^{57,6}65,6 milioni £.

Di seguito diamo il conto potenza perduta nei due casi :

CASO a)

Conto potenza perduta

Nel rame del magnete per perdite ohmiche dovute a c.a.	90 kw
Nel rame del magnete per correnti parassite	50 "
Nel ferro del magnete	40 "
Nei condensatori	30 "
	<hr/>
Totale	210 kw

Costo annuo per energia (5400 ore/anno di utilizzo) con un costo di 10 £/kWh : £. 11.340.000 (a meno delle potenze perdute nei gruppi generatori).

CASO b)

Conto potenza perduta

Nel rame del magnete per perdite ohmiche dovute a c.a.	26,6 kw
Nel rame del magnete per correnti parassite	12,5 "
Nel ferro del magnete	10 "
Nei condensatori C ₁ e C ₂	10 "
	<hr/>
Totale potenza che deve essere fornita dal generatore c.a.	59,1 kw

segue conto potenza perduta caso b)

Potenza dissipata per perdite ohmiche della c.c. nel magnete fornita dal generatore c.c.	45,2 kW
Potenza dissipata per perdite ohmiche della corrente conti- nua nel magnete del choke-coil	74 "
	<hr/>
Potenza che deve essere fornita dal generatore c.c.	119,2 kW

Potenza totale dissipata dai due generatori di c.c. e c.a. . . 178,3 kW

=====

Costo annuo per energia (5400 ore/anno di utilizzo) con un
costo di 10£./kWh : £. 9.628.000 (a meno delle potenze per-
dute nei gruppi generatori.

C O N C L U S I O N E

Da questo esame appare evidente il risparmio che si ottiene
utilizzando l'alimentazione con bias in c.c. In particolare si ottiene
un risparmio per minore capitale immobilizzato che nella condizione
che abbiamo chiamato più favorevole si aggira sui 40.000.000 di lire,
mentre in quella più sfavorevole arriva fino a 90 milioni di lire.

Da notare anche il risparmio dell'ordine del 15% di potenza
richiesta.

Breve esposizione di idee nuove per un generatore di tensione continua ed alter-
nata insieme.-

a) ^{quello di} Abbiassi uno statore con un avvolgimento del tipo di un ordinarie motore a cor-
rente continua con lamelle ai capi della matassa. Per fissare le idee sia esso es-
citato da un magnete costituito da una coppia di poli.

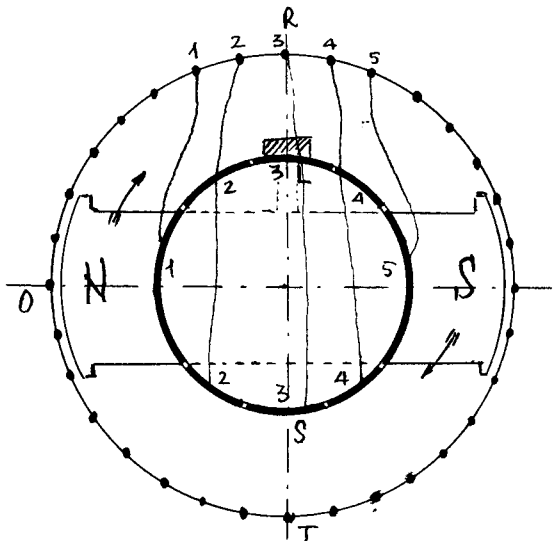


FIG. 1

Se un paio di spazzole rimangono fisse nei punti T ed R, ^{fig. 1} mentre il magnete ruota, evidentemente raccolgono corrente alternata. Il magnete ruotando fa ruotare un'on-
da di tensione sinusoidale solidalmente con sè. In fig. 2 si vede schematicamente l'andamento del fenomeno.

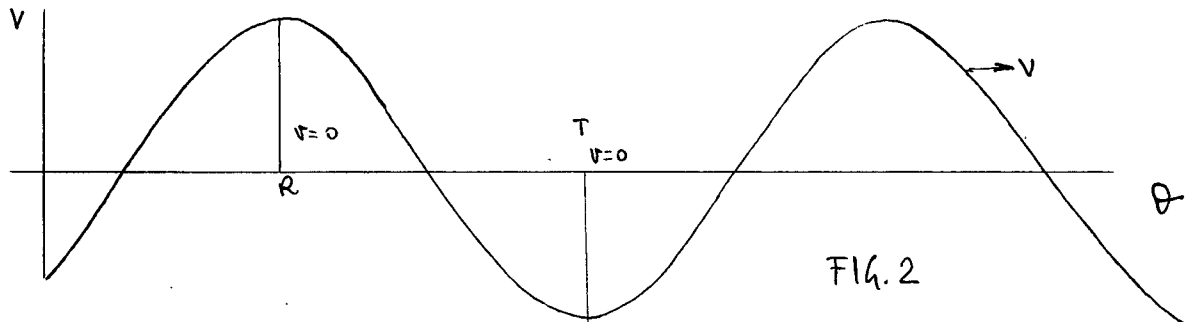


FIG. 2

Se il paio di spazzole si muove solidalmente con il magnete, evidentemente racco-
glie tensione pressochè continua (vedi fig. 3).

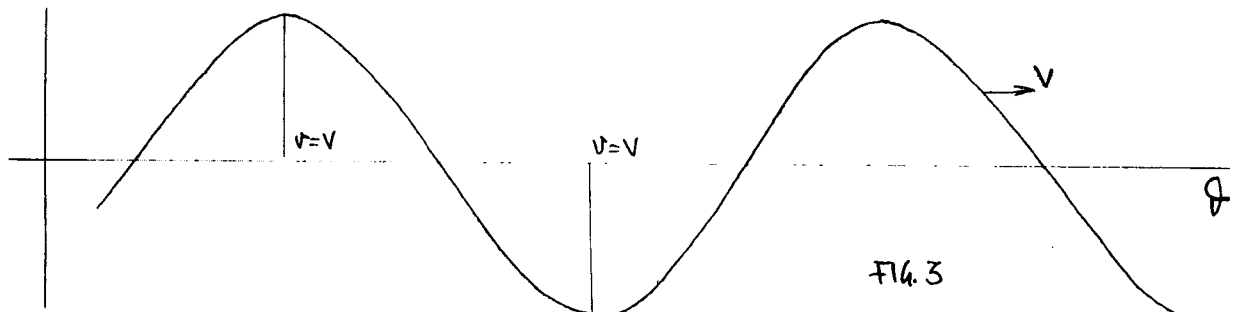


FIG. 3

Se noi invece facciamo in modo che le spazzole oscillino intorno alle posizioni
R e T (vedi fig. 1) oppure intorno alle posizioni L ed S (solidali col magnete)

allora o si aggiunge una componente continua alla tensione alternata, o si aggiunge una componente alternata alla tensione continua.

Schematizziamo il fenomeno in fig.4

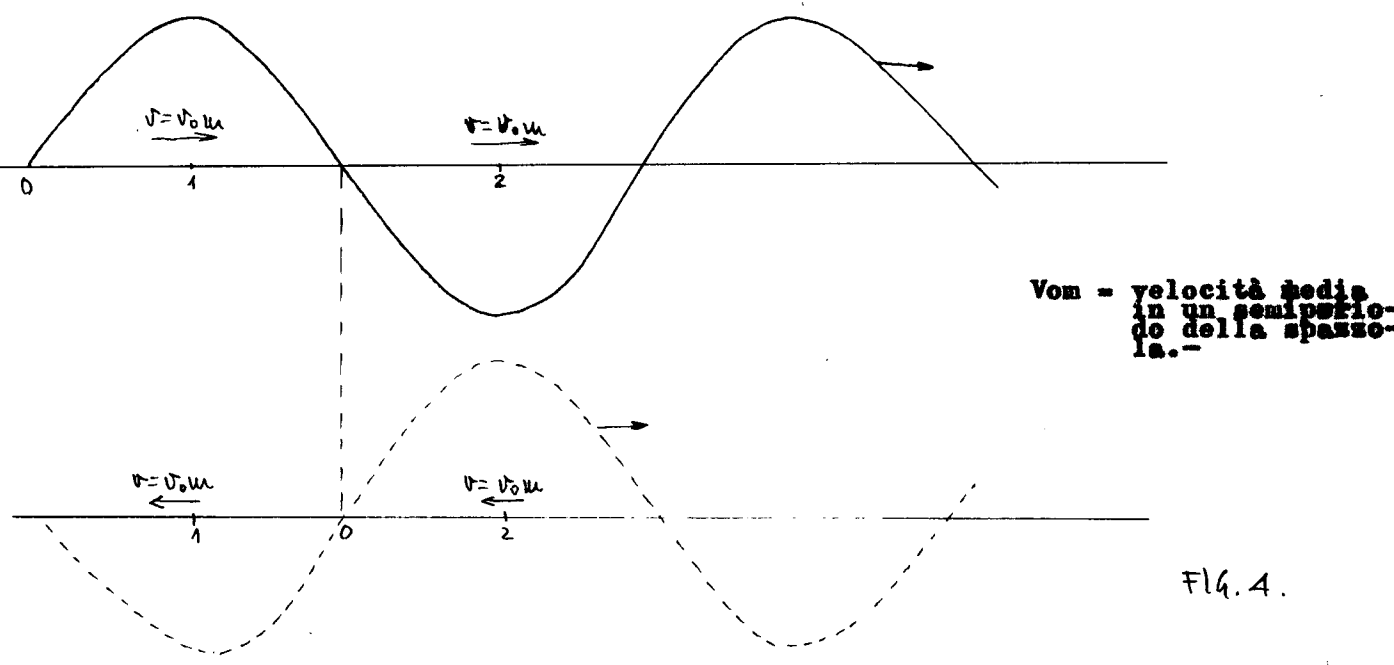


Fig. 4.

E' evidente che la spazzola 1 starà più tempo sotto la semionda positiva che sotto la semionda negativa (l'inverso avverrà per la spazzola 2). Sarà :

$\frac{\pi r}{v - v_{om}} = T$ tempo in cui si trova sotto la semionda positiva la spazzola n.1.

$\frac{\pi r}{v + v_{om}} =$ tempo in cui si trova sotto la semionda positiva la spazzola n.2.

Ne nascerà una tensione del tipo di fig.5.

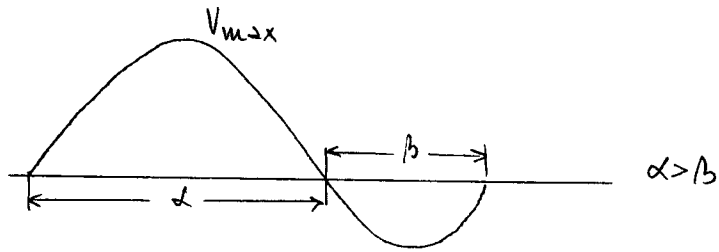


Fig. 5

b) Ora suggeriamo una soluzione tecnica per realizzare il concetto esposto in a). Sarà sufficiente costruire due spazzole solidali col magnete eccitatore; costruire due anelli (uno, per la spazzola positiva, l'altro per la spazzola negativa) su cui si trovano lamelle collegate come in fig.1 con un gruppo di lamelle dello statore (due a due) (Le lamelle simmetriche rispetto all'asse dei poli devono essere collegate tra loro). Gli anelli rimangono fissati allo statore.

In fig.1 sono collegate solo 5 lamelle positive (le 5 negative e l'anello della spazzola negativa non sono indicate in figura). I settori delle lamelle nell'anello sono uguali (eventualmente si potrebbe esaminare se una dissimmetria porta vantaggi).

c) Esaminiamo ora un pò più dettagliatamente il comportamento del dispositivo esaminato. Tracciamo in funzione del tempo (fig.6) le onde di tensione sinusoidali che vengono ad aversi nella spazzola 1, 2, 3, 4, 5.

Se $\frac{1}{k}$ è l'angolo al centro che guarda $\hat{1}_2 (= \hat{2}_3 = \hat{3}_4 = \hat{4}_5)$ diviso per 2π gli sfasamenti temporali tra le sinusoidi saranno di $\frac{T}{k}$ ove T è il periodo di rotazione. Al tempo $t=0$ la spazzola positiva è a contatto con la lamella 3 e per $\frac{T}{20}$ rimane ancora a contatto. (La spazzola negativa con la lamella 3'). Tra le due spazzole viene sentita una tensione $2V_A$. Dopo $\Delta t = \frac{T}{20}$ la tensione si sarà ridotta al valore $2V_B$. In questo istante si alza al valore $2V_G$ perchè la spazzola entra in contatto con la lamella 4.

Come risultante si avrà una tensione variabile nel tempo come in fig.4 (linea grassetto).

Evidentemente vi saranno altre componenti armoniche oltre alla componente continua ed alla componente alternata fondamentali. Essendo però che nel caso che interessa il sincrotrone la componente continua è molto ridotta e quindi molto ridotta la distorsione dell'onda alternata (in altre parole molto grande $\frac{1}{5}$), le armoniche superiori perdono di importanza rispetto alle componenti principali.

d) Faremo ora alcune considerazioni sui vantaggi di una alimentazione della eccitazione di un sincrotrone usante un dispositivo come quello in tracciato nelle precedenti pagine. Nel paragrafo seguente e) metteremo in luce, in base ai valori delle grandezze che si hanno nel sincrotrone di Wilson, le difficoltà che si potranno incontrare nella costruzione di detta macchina per una applicazione al sincrotrone di Cornell.

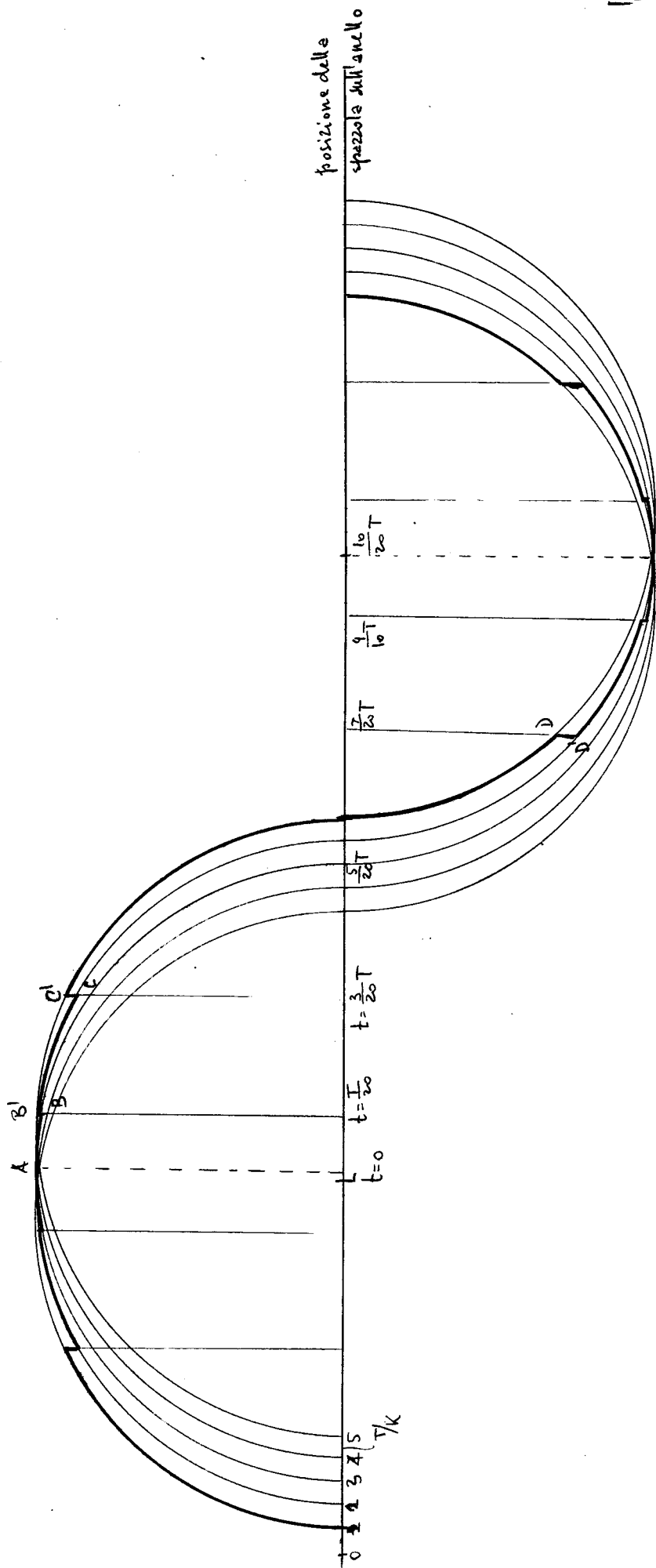


FIG. 6

Il mezzo di cui ai paragrafi precedenti avrebbe lo scopo di provocare una alimentazione dell'eccitazione del tipo di fig.7 .

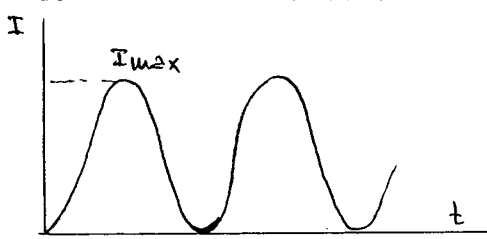


FIG.7

Necessita quindi, per un carico costituito dal magnete del sincrotrone, una tensione V alternata grande, forte essendo l'impedenza alla corrente alternata, e una V continua piccola, essendo la resistenza alla corrente continua piccolissima, affinché il picco della componente alternata uguagli il valore della componente continua.

Praticamente per la macchina dovrà passare una corrente $\frac{I_{max}}{2} + \frac{I_{max}}{2} \cos \omega t$ che equivale agli effetti della dissipazione a una corrente (vedi paragrafo I° - I-2) $\frac{\sqrt{3}}{2} I_{max}$; ad una tensione massima $\approx \frac{V_{max}}{2}$ ove V_{max} sarebbe la tensione che dovrebbe aversi al capo del magnete per ottenere una corrente alternata di picco I_{max} .

Quindi la potenza del motore passando dal caso descritto nel numero II° al caso di una eccitazione del tipo di fig.8 verrebbe ridotta a 43,25% . Se usassimo una alimentazione del tipo di fig.9 verrebbe ridotta la potenza del motore ad 1/4 e ugual potenza fornirebbe il banco dei condensatori.

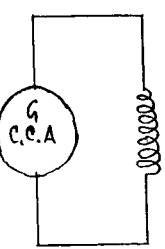


FIG.8

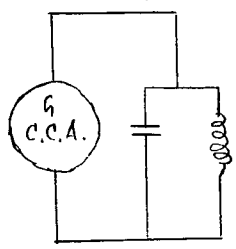


FIG.9

e) Contro questo tipo di soluzione intervengono due fatti sostanziali: 1) la mancanza di esperienza in un genere di motore di quello descritto; 2) le forti correnti alle spazzole (1850 nel caso di fig.8 o 3700 nel caso di fig.7) per il sincrotrone di Wilson) rendono arduo il problema della commutazione ($V_{continua} = 30$ Volt; $\frac{V_{max}}{2}$ alternata = 5 000 Volt).

Per quel che riguarda il rendimento basta che questo sia del 98% , che complessivamente il rendimento di esercizio generatore e magnete migliora.

Infatti riferiamoci ai dati che appaiono sulla relazione di Wilson sul sincrotrone di Cornell. Nel magnete le perdite, nel caso di un generatore che alimenta gli condensatori e magnete in parallelo sarebbero di $240 \cdot 10^3$ Watt. La potenza apparente fornita al magnete di $\frac{1}{2} L \frac{I^2}{2} f = \frac{10^5 \cdot 20}{2} = \frac{2 \cdot 10^6}{2 \cdot 2} = 9,8 \text{ joule}$

Nel caso della alimentazione con un generatore come in fig. 7, nel magnete le perdite si ridurrebbero a $90 \cdot 10^3$ Watt. Il motore dovrebbe fornire $\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 9,8}{2 \cdot 2}$ Watt cioè 10^6 Watt. Basta che η (rendimento motore) sia del 90% (perdite 140 000) che le perdite complessive motore + sincrotrone sarebbero sempre pressochè uguali rispetto ~~mutuam~~ alle perdite nel tipo usuale di eccitazione.

f) Conclusioni. - Come anche è stato discusso col Chiar. Prof. Barozzi, prima di decidere e poter avere un preciso criterio di scelta per questa soluzione è necessario fare un esame più approfondito con i costruttori per quel che riguarda il costo e la possibilità di commutazione. E' pure da prendersi in considerazione la disposizione di più di un generatore in parallelo.

La soluzione prospettata presenterebbe, secondo l'esame sommario precedente, convenienza sia dal punto di vista dell'economia di impianto e di rendimento e vantaggi sulla forma della corrente di eccitazione da un punto di vista del funzionamento del sincrotrone.

La soluzione che viene descritta al N.IV nella relazione dell'Ing. Canarutto, proposta anche da Wilson, ha notevoli vantaggi in comune con questa relazione, ha in più il vantaggio che il problema della commutazione non si presenta, mentre ha lo svantaggio, rispetto alla soluzione sostituita esposta, sulla questione del rendimento per le perdite nel Choke-coil presumibilmente.

M-289/0

ALIMENTAZIONE DEL MAGNETE DEL SINCROTRONE IN C.C. e C.A. CON MUTUA INDUTTANZA

Il Prof. Someda suggerisce di studiare il seguente modo di eccitazione del sincrotrone (fig. I).

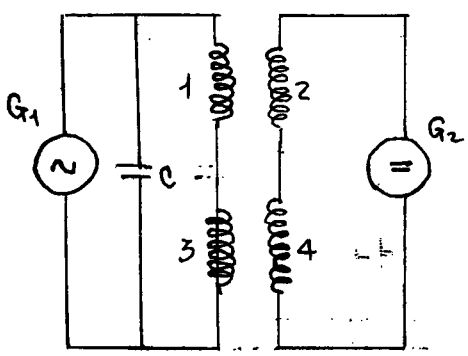


Fig. I

L'avvolgimento del sincrotrone non viene più alimentato come nel progetto con choke coil (cui ripetutamente qui ci riferiremo) tutto in corrente alternata a valor medio pari ad una metà del valor massimo (ottenendosi questa corrente dalla sovrapposizione di una componente continua fornita dal generatore c.c. protetta da choke coil, e da una componente alternata a valor massimo pari al valor

della c.c.) bensì l'avvolgimento stesso viene diviso in due parti delle quali l'una (segnata con 1 in fig. I) alimentata in c.a. e l'altra (segnata con 2 nella stessa fig.) con c.c.

Evidentemente però l'avvolgimento 1 induce in 2 una tensione alternata.

Per proteggere il generatore c.c. da questa tensione ed in genere per evitare che una componente di corrente *veniva a circolare nel ramo a corrente* alternata continua, si progetta una mutua induttanza alimentata al primario dalla stessa c.a. che passa in 1 e che al secondario fornisce una tensione uguale a quella ai capi di 2. Se naturalmente i collegamenti sono fatti in modo che nel circuito secondario le tensioni indotte nei capi di 2 e di 4 siano fra loro opposte, evidentemente nessuna componente di c.a. passa nel secondario stesso.

Si facciano alcune considerazioni generali supponendo in prima approssimazione che siano uguali le sezioni di rame per la c.a. e per quella continua. In totale nel sincrotrone devono esserci per eccitare la gap 44.000 Ampere max. Se in totale si prevedono (come in Wilson) 12 spire, di queste 6 vengono fatte attraversare dalla c.c. e 6 dalla c.a.

Ciò comporta $I_1 = 3700 \text{ A c.c.}$

e $I_2 = 3700 \text{ A massimi in c.a. (30 Hz).}$

La tensione alternata indotta di 1 in 2 è la stessa che si ha ai capi di 1 e pari a

$$V_1 = \omega N_1^2 \frac{\mu_0 S_s}{l_s} I_1 = \frac{L}{4} I_1 \quad (1)$$

con L induttanza del sincrotrone con le N_1 ed N_2 spire in serie (come nel progetto originale di Wilson).

Da ciò: (essendo $L = 0,013$ H)

$$V_1 = 2 \pi 30 \cdot \frac{0,013}{4} \cdot 3700 = 2250 \text{ V massimi}$$

Analoga tensione dovrà trovarsi ai capi di 4

Ossia :

$$\omega M I_1 = V_1 \quad (2)$$

con

$$M = \frac{\mu_0 N_3 N_4 S_m}{l_s} \quad \text{Dalla (1) e (2) si ha che dovrà essere } M = \frac{L}{4}$$

Ricordando che nel caso del choke coil questo aveva una induttanza L_c pari a $\frac{1}{40} L$ avremo che

$$M = \frac{L_c}{40} \quad (3)$$

Osserviamo ancora che fissato restando (come deve essere) il prodotto $N_3 N_4$, per avere minimo il numero di spire $N_3 + N_4$ dovrà essere :

$$N_3 = N_4 = N \quad (4)$$

perciò :

$$M = N^2 \frac{\mu_0 S_m}{l_m} \quad (5)$$

Inoltre dovrà essere nella mutua

$$B_{Max} = \frac{\mu_0}{l_m} N (I_1 + I_2) = \frac{\mu_0 N}{l_m} 2I \quad (6)$$

con $I = 3700$ A.

Nel caso di choke coil si ricavava :

$$L_c = \frac{N_c^2 \cdot \mu_0 \cdot S_c}{l_c} \quad (7)$$

e trascurando per semplicità la componente alternata (pari ad 1/10 di quella continua)

$$B_{\max} = \mu_0 \frac{N_c}{l_c} \cdot \frac{I}{2} \quad (8)$$

Fisso restando nei due casi il traferro ($l_c = l_M$) e supponendosi di usare la stessa qualità di lamierini (B_{\max} costante)

dovrà essere per la (8) e la (8) :

$$\frac{N_c}{2} = 2 N$$

ossia $N = \frac{N_c}{4} \quad (10)$

Per le (3) (5) e (7) con la condizione (9) :

$$40 N^2 S_M = N_c^2 S_c$$

e per la (10)

$$40 \cdot \frac{I}{I_0} S_M = S_c$$

cioè

$$S_M = \left(\frac{2}{5} \right) S_c = 0,4 S_c$$

La sezione di rame viene raddoppiata passando dal choke coil alla mutua (se si mantiene costante la densità di corrente) essendo raddoppiata (a prescindere dalla componente in c.a. nel choke coil) la corrente attraverso ciascun avvolgimento. Quindi nei due casi il volume di rame rimane costante, infatti si ha :

Mutua	choke coil
2 Avvolgimenti da $\frac{N}{4}$ spire ciascuno per totali $\frac{N}{2}$ spire	1 avvolgimento da N spire
Sezione piattine 2 F	Sezione piattine F
Volume rame F N	Volume rame F N.

La tensione alternata ai capi del sincrotrone viene ridotta ad una metà (nel caso della mutua in confronto al caso con choke coil) essendosi ridotta ad 1/2 l'induttanza del sincrotrone, ed essendosi raddoppiata la corrente alternata di eccitazione.

Ai capi primari della mutua viene a stipularsi una ulteriore differenza di potenziale alternata pari a quella che si stabilisce ai capi del sincrotrone, per cui nel caso della mutua la potenza reattiva che viene scambiata con il banco di condensatori aumenta ^{rispetto a} ~~discontinua~~ quella nel caso di choke coil nel rapporto di $\frac{2}{1 + \frac{I}{I_0}}$

Le perdite ohmiche nella mutua sono uguali a quelle nel choke coil. Le perdite ohmiche nel sincrotrone aumentano nel caso della mutua. Infatti nel caso di choke coil si ha :

$$12R \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{I}{2} + \frac{I}{2} \cos \omega t \right)^2 dt = 12R \left(\frac{I^2}{4} + \frac{I^2}{8} \right) = 12 \frac{3}{8} I^2 R = \frac{9}{2} I^2 R$$

con R indicando la resistenza di ciascuna delle 2 spire.

Nel caso della mutua ossia di separazione dei circuiti in c.a. ed in c.c. supponendo che la resistenza di ogni spirale sia rimasta invariata attribuendo pari numero di spire a ciascuno dei due circuiti in c.c. e c.a. si avrà :

$$6R I^2 + 6R \frac{I^2}{2} = 6R \cdot \frac{3}{2} I^2 = 9R I^2 \quad (II)$$

quindi si avrebbe una perdita doppia. Si può pensare però di proporzionare le sezioni del rame attraversate dalla c.c. e della c.a. in modo tale che la perdita totale per effetto ohmico risulti minima

Sarà allora :

$$W = 6 I^2 \rho \ell \left(\frac{1}{S'} + \frac{1}{2S''} \right) \quad (I2)$$

con la condizionee che $S' + S'' = 2S$ (essendo S la sezione di ciascun conduttore)

nei casi precedenti). La (12) diventa minima per

$$S'' = \frac{1}{\sqrt{2}} S'$$

$$S' = \frac{2 \sqrt{2} S}{1 + \sqrt{2}} ; \quad S'' = \frac{2 S}{1 + \sqrt{2}}$$

Per cui si ha come perdita totale :

$$W = 6 R I^2 \frac{3 + 2 \sqrt{2}}{4}$$

che è di poco inferiore al valore dato in (11).

Le perdite di ~~f~~cault nel rame del sincrotrone sono diminuite di una metà; nello stesso tempo sono però aumentate un pò le perdite per questo effetto nella mutua, per cui in totale le perdite per effetto ~~f~~cault sono ridotte nel caso della mutua a circa ~~1/10~~ i 7/10 di quelle che si hanno complessivamente nel caso di choke coil.

Riassumendo, la soluzione con choke coil sembra preferibile poichè con la mutua ad una riduzione nella sezione (e quindi nel peso) del ferro a 0,4 di quello del choke coil, (riduzione che comporta al massimo una riduzione di costo di 12 milioni) corrisponde un ~~raddoppio~~ raddoppio all'energia reattiva per la quale devono venire previsti i condensatori (~~in~~ ^{cui} corrispondenza un costo supplementare non inferiore ai 24 milioni). Oltre a ciò si deve tener conto dell'aumento delle perdite nel caso della mutua.

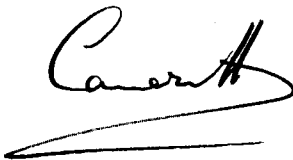


TABELLA I.

N	b	$S = \frac{2b^2}{m^2}$	\sqrt{S}	$(\frac{b^2}{2}) N \cdot 10^{-3}$	l_0 m.	$N/64$	$3 \cdot (b \cdot 10^{-2})^2 \cdot 4$ mm.	$K = \frac{l_0}{87588 \cdot N \cdot m^{-1}}$	$l_1 = \frac{1}{m}$	$l_2 = \frac{1}{m}$	$(4+35) \cdot 10^{-15}$ (4+35) D	l_0 4 A 2	F. ab B H	l_0/f Q/R	$R_{1-5} \cdot \frac{b^2}{f}$ 1/5 T. z.	$0,7025 l_0$ 0,7025 CM	1,335 F. l. c 1,335 OR	$3,42 \cdot \frac{b^2}{f}$ 3,42 T.	Totale V. M. X		
A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	P	Q	R	T	U	V	W	X	Y
00	7	0,35	0,591	2,7	5,144	9,375	80,375	1,055	3,976	4,086	1,054	0,947	2,074	582,7	4,04 · 10 ⁻⁶	0,0735	1,0044 · 10 ⁶	1,708 · 10 ⁶	15,837 · 10 ⁶	48,55 · 10 ⁶	
10	10	0,35	0,591	3,6	6,044	9,375	108,5	1,055	5,376	5,490	1,021	1,200	2880	1085	2,654 · 10 ⁻⁶	0,0481	1,348 · 10 ⁶	4,172 · 10 ⁶	10,405 · 10 ⁶	15,928 · 10 ⁶	
15	15	0,35	0,591	5,1	7,544	9,375	155,36	1,055	6,151	6,418	0,935	1,047	2992	2350	1,084 · 10 ⁻⁶	0,0233	1,629 · 10 ⁶	9,307 · 10 ⁶	5,053 · 10 ⁶	15,046 · 10 ⁶	
20	16	0,35	0,591	5,4	7,844	9,375	164,75	1,055	6,435	6,789	1,085	1,085	3084	2656	1,169 · 10 ⁻⁶	0,0212	1,668 · 10 ⁶	10,853 · 10 ⁶	4,582 · 10 ⁶	17,103 · 10 ⁶	
25	18	0,35	0,591	6	8,444	9,375	183,5	1,055	7,908	7,489	0,947	1,160	3824	3505	0,988 · 10 ⁻⁶	0,0179	1,840 · 10 ⁶	14,393 · 10 ⁶	3,072 · 10 ⁶	20,465 · 10 ⁶	

TABELLA II.

N	b	$S = \frac{2b^2}{m^2}$	\sqrt{S}	$(\frac{b^2}{2}) N \cdot 10^3$	l_0 m.	$N/64$	$3 \cdot (b \cdot 10^{-2})^2 \cdot 4$ mm.	$K = \frac{l_0}{87588 \cdot N \cdot m^{-1}}$	$l_1 = \frac{1}{m}$	$l_2 = \frac{1}{m}$	$(4+35) \cdot 10^{-15}$ (4+35) D	l_0 4 A 2	F. ab B H	l_0/f Q/R	$R_{1-5} \cdot \frac{b^2}{f}$ 1/5 T. z.	$0,7025 l_0$ 0,7025 CM	1,335 F. l. c 1,335 OR	$3,42 \cdot \frac{b^2}{f}$ 3,42 T.	Totale V. M. X		
A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	P	Q	R	T	U	V	W	X	Y
00	15	1,05	1,024	1,7	5,876	3,125	49	0,3516	16,71	5,544	0,3314	1,255	1,004	735	4,165 · 10 ⁻⁶	0,0249	4,086 · 10 ⁶	98,5 · 10 ⁶	5,350 · 10 ⁶	10,421 · 10 ⁶	
10	15	0,840	0,91	2,105	5,845	3,60	60,5	0,4506	12,30	5,4654	0,459	1,210	1210	994,5	1,210 · 10 ⁻⁶	0,0221	5,187 · 10 ⁶	4,606 · 10 ⁶	4,765 · 10 ⁶	9,559 · 10 ⁶	
20	15	0,700	0,836	2,55	5,974	4,08	75,5	0,5275	10,325	5,446	0,517	1,175	147	4132	1,243 · 10 ⁻⁶	0,0216	2,476 · 10 ⁶	2,126 · 10 ⁶	4,372 · 10 ⁶	9,874 · 10 ⁶	
30	15	0,525	0,724	3,4	6,576	6,250	102,25	0,703	8,07	5,672	0,716	1,168	1868	1554	1,118 · 10 ⁻⁶	0,0214	2,090 · 10 ⁶	3,825 · 10 ⁶	4,774 · 10 ⁶	10,689 · 10 ⁶	
40	15	0,420	0,647	4,25	6,910	7,812	152,00	0,879	7,87	6,156	0,779	1,010	2420	1992	1,215 · 10 ⁻⁶	0,0221	1,809 · 10 ⁶	6,435 · 10 ⁶	4,762 · 10 ⁶	15,006 · 10 ⁶	
50	15	0,35	0,591	5,1	7,544	9,375	155,36	1,055	7,151	6,610	0,925	1,047	2992	2350	1,084 · 10 ⁻⁶	0,0235	1,624 · 10 ⁶	9,206 · 10 ⁶	5,035 · 10 ⁶	15,965 · 10 ⁶	

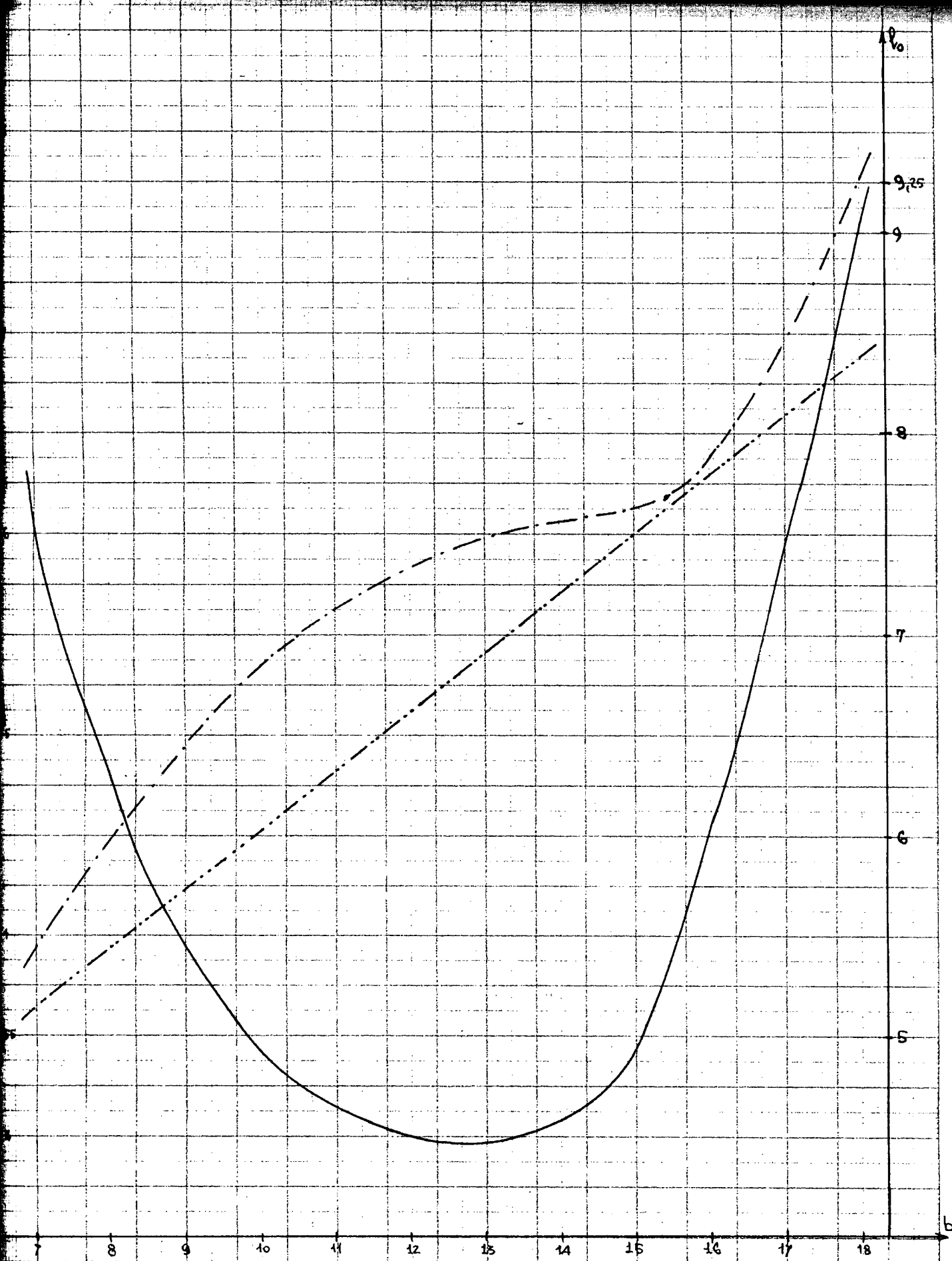


DIAGRAMMA I

— y = costo per anno d'esercizio

- - - k = rapporto tra le lunghezze geometriche medie del percorso magnetico nel ferro e quello nell'aria

..... l_0 = lunghezza geometrica media del percorso magnetico

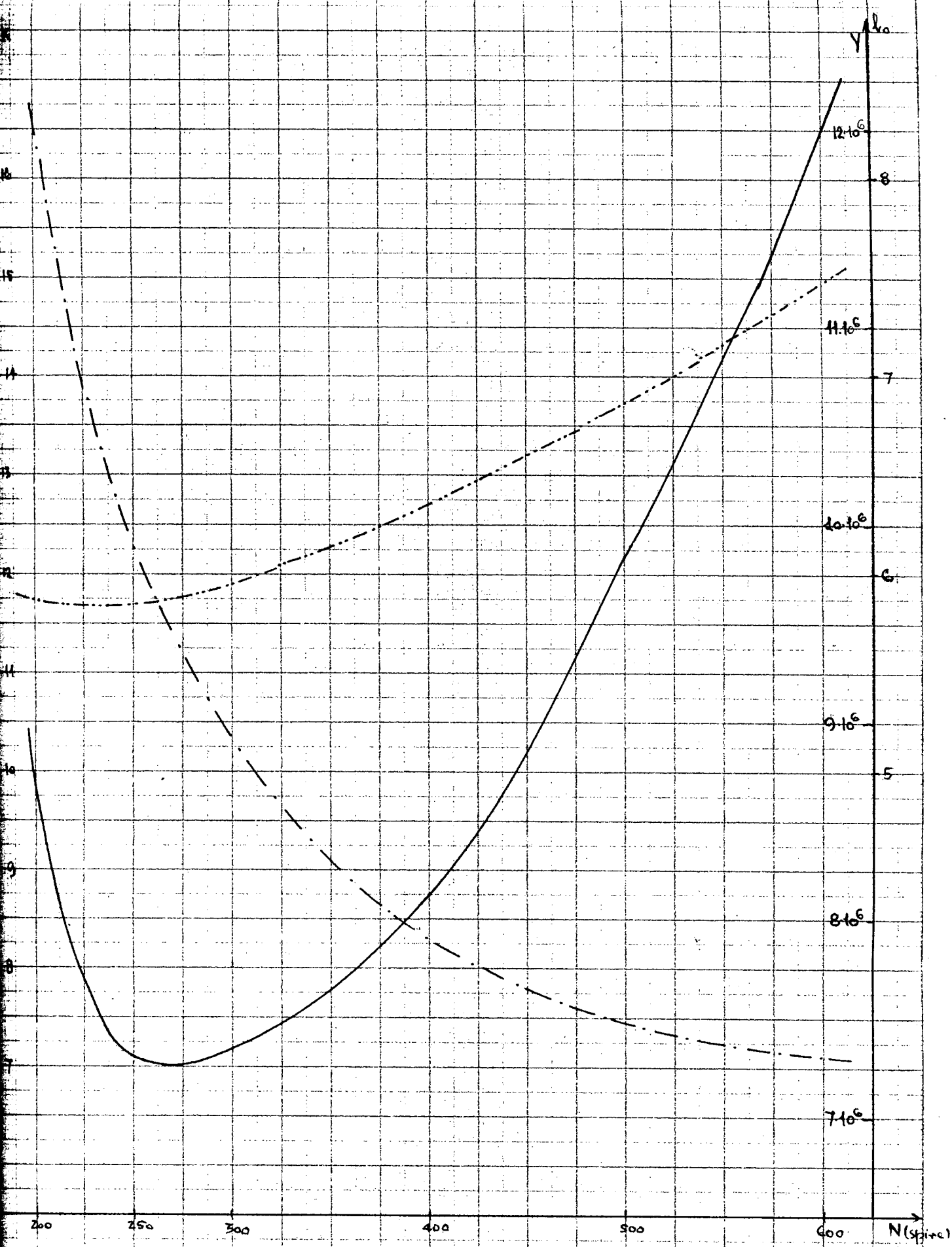


DIAGRAMMA II

y = costo per anno d'esercizio

k = rapporto tra le lunghezze medie del percorso magnetico nel ferro e quello nell'aria

l_0 = lunghezza geometrica media del percorso magnetico

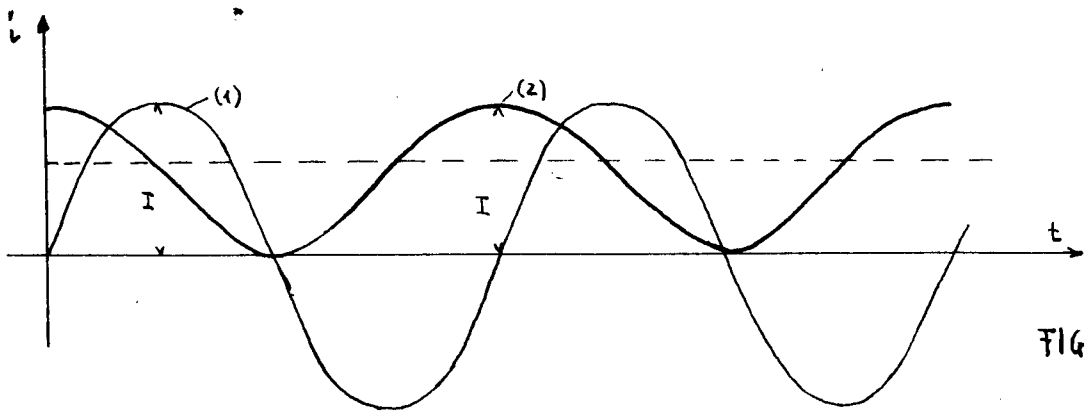


FIG. 1

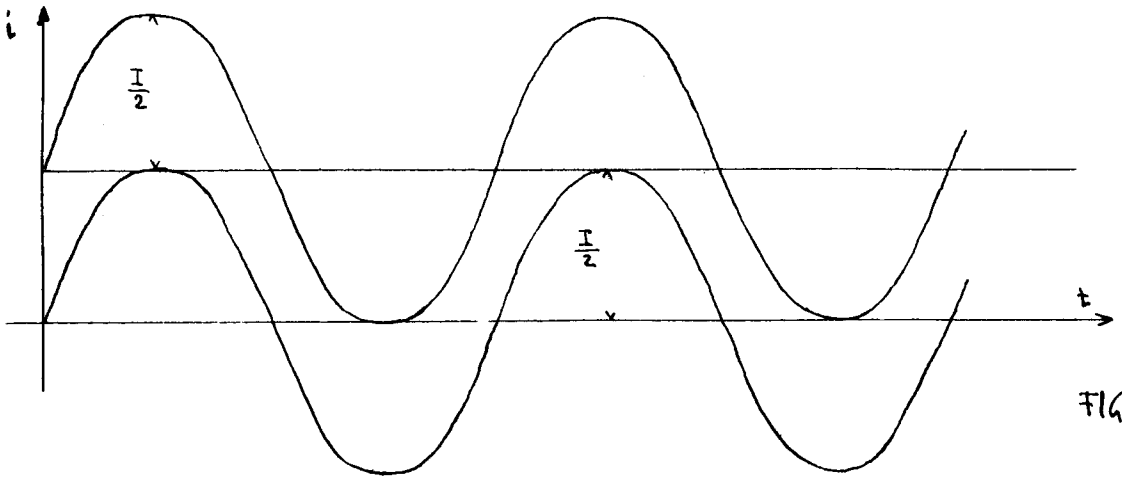


FIG. 2

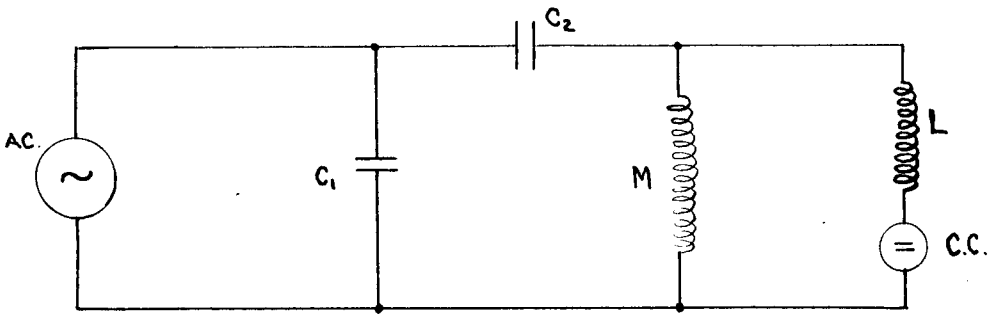


FIG. 3

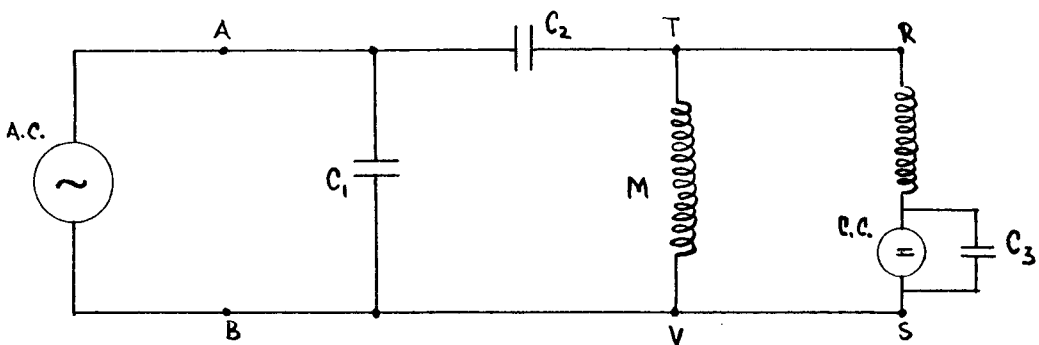


FIG. 5

