

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF - 53/60  
16.10.1953.

G. Sacerdoti: STUDIO DELL'ALIMENTAZIONE DEL MODELLO  
DI SINCROTRONE.-

a) Schema di alimentazione.-

L'alimentazione di cui vien fatto in questa relazione il preventivo, è un'alimentazione mista in c.c.e c.a. Lo schema scelto è quello rappresentato in fig.1.

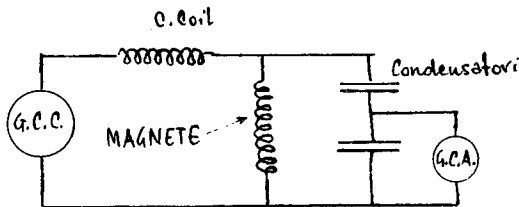


Fig.1

La ragione di questa scelta è quella di riprodurre lo schema che qui si sicuramente sarà scelto per l'alimentazione nel progetto definitivo del sincrotrone. L'esposizione che segue avrà questo ordine:

- 1) Dimensioni del modello e calcole della induttanza offerta da esso, della resistenza, <sup>dei suoi avvolgimenti</sup> della corrente e della tensione necessarie a provocare il campo magnetico previsto, delle perdite che nel modello si hanno. Costo del ferro e del rame di detto modello. Schema del sistema di raffreddamento.
- 2) Dimensionamento della bobina di protezione dei condensatori. Calcolo dell'induttanza e della resistenza da essa offerta, calcolo delle perdite in essa dissipate? Costo del ferro e del rame con cui essa è fatta.
- 3) Calcolo del banco dei condensatori: coste e peso.
- 4) Caratteristiche del generatore a c.a. e del generatore a c.c. e costo.

b) Dimensioni del modello.-

Le dimensioni del pezzo di sincrotrone che ci deve servire come modello si possono rilevare dai disegni allegati. Qui riporto i dati necessari al calcolo dell'induttanza:

$h = 6$  cm (altezza della gap)

$l_1 = 12$  cm (larghezza <sup>utile</sup> della gap)

$l_2 = 100$  cm (lunghezza del pezzo del modello)

$N = 12$  (numero di spire di eccitazione)

$p$  (percentuale flusso disperso concatenato con tutte le spire rispetto il flusso utile  $\Phi_u$ ) = 100% (dato molto incerto fornito da prove su vasca elettrolitica).

### Calcolo dell'induttanza

$$\frac{\mu_0 N I}{b} = B l_1 l_2 N B \left(1 + \frac{p}{100}\right) = \Phi$$

ove  $\mu_0$  = permeabilità magnetica dell'aria

$I$  = corrente

$V$  = tensione

$B$  = campo magnetico

$$\frac{\Phi}{I} = L \text{ (induttanza)} = \frac{N^2 l_1 l_2 \mu_0}{h} \left(1 + \frac{p}{100}\right)$$

### nel sistema Giorgi

$$L = \frac{(12)^2 \cdot 1 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}{0,06} = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ henry}$$

### Calcolo della resistenza dell'avvolgimento

La resistenza dell'avvolgimento è calcolata facendo la somma della <sup>della</sup> parte esterna dell'avvolgimento ( $R_1$ ) della resistenza della parte interna ( $R_2$ ) della resistenza delle testate ( $R_3$ ).

Gli dati che qui riporto si possono calcolare i vari termini:

$N = 12$  (numero conduttori)

$l_3 =$  lunghezza media di un conduttore interne (ed esterno) 1,1 m

$l_4 =$  lunghezza media di un conduttore alle testate  $\approx 0,52$  m

$S_1 =$  Sezione dei conduttori interni  $\approx 7 \times 1,3$  cm<sup>2</sup>

$S_2 =$  sezione dei conduttori esterni  $\approx 2,7 \times 1,3$  cm<sup>2</sup>

$S_3 =$  sezione dei conduttori alle testate  $\approx 5,5 \times 1,3$

$$\rho = \frac{1}{55} 10^{-6} \Omega \text{ mm}$$

Da questi dati risulterà:

$$R_1 = 0,26 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_2 = 0,13 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_3 = 0,31 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Calcolo della tensione e della corrente di alimentazione.-

Per ottenere  $B_{\max} = 1$  Weber/mq (raggio del sincrotrone = 3,75 m Energia 1000 MeV), metà dovuta alla corrente continua, metà all'alternata, occorrerà una corrente alternata massima  $I_{a \max}$  uguale alla corrente continua  $I_c$  data da

$$I_{a \max} = \frac{B_{\max}}{2} \frac{h}{\mu_0} = 2020$$

La tensione alternata massima risulterà, se  $f=30p/sec$  ( $f$ = frequenza di esercizio):

$$V = 2\pi f L I_{a \max} = 6,28 \cdot 30 \cdot 5,4 \cdot 2020 \cdot 10^{-4} \approx 273 \text{ Volt}$$

(La tensione alternata massima se  $f=60p/sec$  sarà data da 550V. Questo dato ci serve se prevediamo di fare delle prove sul modello a frequenza variabile fino a 60p/sec).

La tensione continua  $V_c$  ai capi del sincrotrone sarà data da:

$$V_c = RI \approx 1,5 \text{ Volt}$$

Per lo schema del sistema di raffreddamento vedi allegati disegni.

Per la pompa, di piccola potenza, ci si servirà di mezzi che si trovano in Istituto.

Il peso del ferro sarà dato (il calcolo è stato eseguito servendoci delle dimensioni rilevate dalle tavole) Kg 2.300

Il costo del ferro sarà dato da (£.600 al kg) £.1.400.00

Il peso del rame (calcolo eseguito colle dimensioni rilevate dalle tavole allegate alla relazione) è dato da, Kg.360.

Il costo del rame sarà dato da (£.1.000 al Kg) £. 360.000.

e) Progetto del choke coil.-

Si tratta di realizzare una induttanza di circa  $7,2 \cdot 10^{-3}$  henry ( $= \frac{1}{10} L_{\text{sincrotrone}}$ ) per proteggere il motore a c.c., nell'avvolgimento della quale passa una corrente massima di circa 2200 Ampère (somma della corrente continua e di una componente alternata il cui valor massimo è pari a circa 1/10 della componente alternata passante per il sincrotrone).

I criteri del calcolo possono essere tre:

1), Calcolare un choke coil che possa essere messo in serie con il choke coil di dimensioni più grosse che dovrà servire per il circuito di alimentazione del sincrotrone. In tal caso si deve dimensiona-

re tenendo conto del rendimento. Ha il vantaggio di poter essere utilizzato nello schema definitivo, ove il choke coil grosso viene ad essere leggermente ridotto.

2) Calcolare il choke coil solamente in base alla sola spesa di impianto, senza tener conto del suo rendimento nelle prove, e del raffreddamento (prove intermittenti), senza cioè prevedere di utilizzarlo poi nel sincrotrone definitivo.

3) Calcolare un choke coil di dimensioni tali che possa servire a proteggere anche il sincrotrone vero.

L'ultima soluzione è la più economica perchè viene tutto utilizzato anche alla fine delle prove. Prima della costruzione di un choke coil di queste dimensioni sarà però prudente costruirne uno piccolo per fare delle prove sull'efficacia del suo comportamento.

Un choke coil di questo tipo non richiede praticamente aggiunta di condensatori in parallelo poichè non richiama che una minima corrente alternata.

Nella prima e seconda soluzione si tratterebbe di fare un choke coil di induttanza di circa  $7,2 \times 10^{-3}$

Per prevedere di massima il costo di questo choke coil riferito al costo del grosso chokecoil vediamo come dobbiamo modificare il choke coil grosso per diminuirne l'induttanza nei casi n.1 e n.2. Daremo qui di seguito un elenco dei simboli che useremo nei nostri ragionamenti.

- s = sezione del conduttore
- N = numero spire avvolgimento
- h = intraferro
- S = sezione ferro

Per ridurre, partendo dallo schema originario del choke coil per il sincrotrone, l'induttanza di  $1/25$  circa riduciamo ad  $1/5$  il numero di spire. Ma in tal caso possiamo ridurre di 5 l'intraferro per via che diminuiscono le amperspire saturate e quindi possiamo ulteriormente ridurre a  $\frac{1}{\sqrt{5}}$  il numero di spire.

In tal caso possiamo ridurre di  $\frac{1}{\sqrt{5}}$  l'intraferro e così di seguito. Possiamo ridurre il numero di spire nel rapporto  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{5\sqrt{5} \sqrt[4]{5} \sqrt[3]{5}} = \frac{1}{25}$  e l'intraferro nella stessa maniera.

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \lg 5 \sqrt{5} \sqrt[4]{5} \sqrt[3]{5} \sqrt[2]{5} &= \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \lg 5 + \frac{1}{2} \lg 5 + \frac{1}{4} \lg 5 + \dots + \frac{1}{2^n} \lg 5 = \\ &= \lg 5 \lim_{n \rightarrow \infty} 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2^n} = 2 \log 5 \end{aligned}$$

Il numero di spire ridotto di  $1/25$  l'intraferro nella stessa maniera. (Con ragionamento meno complicato si può giungere alle stesse conclusioni).

La finestra del rame viene ridotta  $1/25$ . La lunghezza del circuito del ferro ridotta di meno di  $1/5$ . Quindi nel caso n.1 il costo del rame viene ridotto ad  $1/25$ , il costo del ferro di meno di  $1/5$ . Si può operare invece come segue nel caso n.2: ridurre alla metà il numero di spire, ad  $1/2$  l'altezza dell'intraferro, ad  $1/12$  la sezione del ferro; l'induttanza si riduce ad  $1/24$ ; la sezione del rame viene ridotta ad  $1/2$ , avremo che (densità di corrente 2 volte tanto) il peso del rame viene ridotto ad un  $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{12}} \cdot \frac{1}{2}$  del peso originario cioè ad  $\frac{1}{3,464} = \frac{1}{5}$

Il peso del ferro viene ridotto invece di circa

$$\frac{1}{\sqrt{2} \cdot 2} \cdot \frac{1}{12} = \frac{1}{2,828} \approx \frac{1}{24}$$

L'aumento della densità di corrente porta ad un risparmio abbastanza notevole nel peso del materiale occorrente alla costruzione dell'induttanza e quindi nel costo di questa.

Le prove forse devono essere periodiche perchè il riscaldamento è forte. Il costo viene ridotto a circa  $1/20$  del costo del choke coil grezzo. Ricorreremo a quest'ultima soluzione.

Passiamo ora al dimensionamento effettivo:

$N$  = numero di spire = 128

$h$  = altezza intraferro = 14+14 cm

$l$  = lato della sezione quadrata di ferro = 0,287 mm

$F$  = sezione piastrina di rame = 10x50 mm  $[(10+0,2) \times (50+0,2)]$  con gli isolanti

$$S = \text{sezione ferro} = \frac{0,84}{12} = 0,082 \text{ m}^2$$

[8x8]x2 disposizione dei conduttori.

Vedi per maggior chiarezza lo schema dei disegni.

La finestra nel ferro che dovrà ospitare i conduttori risulterà delle seguenti dimensioni:

$$(8 \times 10,2) 2 + 15 + 5 = \text{larghezza} = b = 183 \text{ mm}$$

$$(8 \times 50,2) + 10 + 5 = \text{altezza} = a = 416 \text{ mm}$$

$$5 \text{ mm} = \text{margine di sicurezza}$$

$$10 \text{ mm} \quad 15 \text{ mm} \quad \text{sono gli spessori degli isolanti}$$

La lunghezza media di un conduttore di rame risulta dalle dimensioni fornite di circa 1510 mm

Il peso dei conduttori risulta di  $\approx 870 \text{ kg}$

La resistenza dell'avvolgimento risulta  $R = 0,74 \cdot 10^{-2} \text{ ohm}$

La potenza dissipata risulta  $\approx 25 \text{ kW}$

La tensione continua necessaria a provocare il passaggio di corrente risulta di  $V_c = 14 \text{ Volt}$

Il peso del ferro risulta di circa 1200 kg

Il costo del rame (1.000 £/kg) risulta circa 870.000 Lit

Il costo del ferro (600 £/kg) risulterà circa 720.000 Lit

Costo totale £. 1.600.000.£

L'ingombro è dato da circa  $1,3 \times 0,62 \times 0,4 \text{ m}^3$

L'induttanza è data da  $L = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ henry}$  se  $p = \frac{\Phi_{\text{disperso}}}{\Phi_{\text{intraferro}}} = \frac{1}{3}$

La  $B_{\text{max}}$  (per  $I = I_c + I_{\text{alt}} = 2200$ ) sarà  $1,26 \frac{\text{Weber}}{\text{m}^2}$

#### d) Calcolo del banco di condensatori per il modello.-

Lo schema che verrà usato per l'alimentazione in seguito alle informazioni ottenute sul costo dei condensatori verrà modificato nel senso della fig.2 rispetto a quelle della fig.1

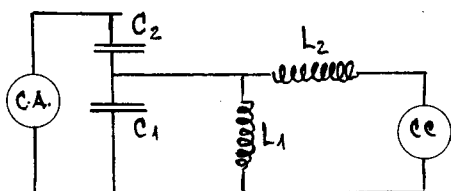


FIG. 2

$$L_1 = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ henry}$$

$$L_2 = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ henry}$$

$C_1$  verrà accordato sulla frequenza di funzionamento

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 L_1}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_1''}}$$

$$C_1' + C_2'' = C_1$$

$$C_1' = \frac{1}{L_1 f^2 (2\pi)^2}$$

$$C_1'' = \frac{1}{L_2 f^2 (2\pi)^2}$$

$$C_1' = \frac{1}{2,15}$$

$$C_2' = \frac{1}{2,77}$$

$$C_2' = 40000 \mu F$$

$$C_2'' = 3600 \mu F$$

$$C_1 = 43600 \mu F$$

$$V_{max} = 272$$

$$V_{eff} = 193$$

$$I_2 = 20 \text{ Ampere}$$

$$I_2 \omega C_2 = \text{Vollaggio}$$

(vedi parte della relazione per il calcolo perdite)

Se  $C_2$  si assume del valore  $1000 \mu F$

$$V = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot C_2 \cdot 28 = \text{volt} \quad = 4 \text{ Volt alternata efficace}$$

In tal caso saranno necessari due banche di condensatori, uno da  $43000 \mu F$  a tensione  $\approx 272$  e frequenza  $30 \text{ p.sec.}$  (eventualmente cambiando disposizione nel senso della Fig?1 sarà possibile una alimentazione a  $60 \text{ p.sec.}$ ) e l'altro  $C_2 = 1000 \mu F$  a tensione bassissima.

Secondo i prezzi informativi della Passoni & Villa si ha che il costo del banco si aggira sui  $4.000.000 - 4.300.000$  di lire. ( $V_{eff} = 193 \text{ Volt}$   
 $V_{nom} = 250 \text{ V}$ )

c) Calcolo della potenza dei motori di alimentazione.-

La tensione del motore a corrente continua è data da:

$$I_c (R_1 + R_2 + R_3 + R_{cc}) = V_c$$

ove  $R_1 + R_2 + R_3$  = resistenza del modello del sincrotrone =  $0,7 \cdot 10^{-3}$

$R_{cc}$  = resistenza induttanza di protezione del motore a corrente continua =  $0,7 \cdot 10^{-2}$

$I_c$  = componente continua del modello di sincrotrone  $\approx 2100$

$$V_c = 15,4 \text{ Volt}$$

La potenza che il motore a c.c. deve fornire è data da

$$V_c I_c \approx 32 \text{ KVA}$$

(Si chiederà alle Ditte se è possibile adattare il motore a c.c. per il motore vero a queste funzioni).



La tensione del motore a c.a. è già stata calcolata

$$V_{am} = 272 \text{ Volt}$$

$$V_{a \text{ eff}} = 190 \text{ Volt}$$

$V_{am}$  = tensione massima

$V_{a \text{ eff}}$  = tensione efficace

La corrente fornita dal motore a c.a. deve supplire alle perdite che si hanno.

Per calcolare detta corrente sarà necessario fare un computo sommario delle perdite per c.a. che così si possono analizzare:

- 1) perdite ohmiche nel modello del sincrotrone per c.a.
- 2) Perdite di Foucault nel modello del sincrotrone
- 3) perdite nel ferro del modello di sincrotrone
- 4) perdite nei condensatori
- 5) perdite ohmiche nel choke coil
- 6) perdite di Foucault nel choke coil

Le perdite ohmiche nel modello del sincrotrone per c.a. sono date da:

$$P_{oca} = \frac{I_{max}^2 (R_1 + R_2 + R_3)}{2} = 1,400 \text{ KW}$$

(i dati numerici sono indicati nel resto della relazione)

Le perdite di Foucault nel sincrotrone saranno date (ricorrendo a criteri di similitudine col sincrotrone si deducono facilmente) <sup>dalle stesse perdite calcolate per il sincrotrone di Wilson</sup> da:

$$P_{oc2} \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{0,26}{0,7} 1400 = 520 = P_{fo}$$

Le perdite nel ferro dedotte per similitudine approssimativamente dai dati già calcolati per il sincrotrone di Wilson

$$P_{fes} = 1,6 \text{ KW}$$

Le perdite nei condensatori sono molto piccole e vengono trascurate

Le perdite ohmiche per c.a. nella induttanza (choke coil) saranno date da:

$$\frac{I_{cacc}^2}{2} R = 0,14 \text{ KW}$$

$I_{cacc}$  = corrente alternata massima nel choke coil

Le perdite per correnti di Foucault nel choke coil vengono trascurate.

In totale la potenza richiesta sarà data da:

$$1600 + 1400 + 520 + 140 \approx 3700 \text{ watt} \quad \text{con } f = 30 \text{ Hz}$$

Ma il motore e i circuiti di alimentazione avranno ulteriori perdite da cui una cifra come 4000 VA invece di 3700 VA può essere ancora ritenuta scarsa.

Se  $V_{eff} = 190$  ne risulterà una corrente (a 30 Hz) di

$$\frac{4000}{190} = 21 \text{ ampere}$$

Hz 30

$V_{eff} = 190$

$I_{eff} = 21 \text{ Ampere}$

Se la frequenza aumenta  $I_{ca}$  può aumentare o diminuire; le perdite per resistenza rimangono tali e quali, mentre la tensione aumenta per l'aumentare della impedenza ( $I_{ecc}$  del sincrotrone rimane la stessa), quindi la corrente dovuta a queste perdite risulta diminuita; d'altro canto le perdite per correnti parassite aumentano col quadrato della frequenza e quindi la corrente ha un termine proporzionale alla frequenza; il termine dovuto alle perdite di isteresi invece rimane invariato.

Se le perdite nei lamierini sono per ipotesi dovute soprattutto alle correnti di Foucault nel nostro caso si avrà press'a poco una legge di variazione di  $I_{ca}$  in funzione di  $f$  del tipo seguente:

$$\frac{1}{190} \left[ 1800 \frac{f_0}{f} + 2200 \frac{f}{f_0} \right] = I_{ca}(f)$$

per  $f > f_0$  la corrente aumenta, cioè aumenta all'aumentare della tensione.

Per  $f = 2f_0 = 60 \text{ Hz}$

La corrente risulterà  $I_{60} = 28 \text{ Ampere}$

La tensione invece  $V_{60} = 550 \text{ Volt}$

In base a questi dati si può fare un preventivo informativo del costo della costruzione del modello e della sua eccitazione. (Vedi tabella allegata).

Gian Carlo Sacerdoti

*Gian Carlo Sacerdoti*

	COSTO	PESO	POTENZA	POT. NOMINALE a 50 Hz	RILUPERO	COSTO DEL RILUPERO	INGOMBRO
MODELLO	lit. 1.800.000	2700 kg.			Rothame o Synchronone		
CHOKE COIL	lit. 1.500.000	2000 kg.			Rothame		
CONDENSATORI	lit. 4.300.000		500 KVA	850 KVA	Synchronone		
G. a C.A.			32 KVA				
G. a C.A.			5-4 LVA		Rothame		
ACCESSORI	10%						
MONTAGGIO	10%						
COMPRESSIVO							