

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/119 (1962)

F. Amman, G. Ghigo, G. Sacerdoti, G. Salvini, R. Toschi:
L'ELETTROSINCROTRONE: IL PROGETTO E LA REALIZZAZIONE
DEL MAGNETE.

Estratto dal: Nuovo Cimento; Suppl. 24, 97 (1962)

CAPITOLO I

Il progetto e la realizzazione del magnete.

F. AMMAN, G. GHIGO, G. SACERDOTI, G. SALVINI e R. TOSCHI

1. - La scelta del magnete.

Poichè presumiamo già nota la struttura essenziale del magnete (Parte I, Cap. I), iniziamo dall'esame dei criteri che ci hanno condotto nella scelta di esso. Occorreva decidere anzitutto tra diverse possibili soluzioni alternative, ed in particolare su:

- la frequenza di ripetizione degli impulsi della macchina;
- il tipo di focheggiamento (forte o debole);
- la struttura generale (il numero dei settori, la forma dei blocchi, ecc.).

La scelta della frequenza di ripetizione determina lo spessore del lamierino, e pertanto fortemente influenza la struttura generale del magnete. Il tipo di focheggiamento determina le dimensioni assolute del magnete, e quindi anch'esso influisce in modo decisivo sulla struttura.

La decisione sulla frequenza di ripetizione venne presa piuttosto presto. Già esistevano (la discussione della quale riferiamo è del 1953) elettrosincrotroni (e.s.) sino a 330 MeV [1] ad una frequenza di trenta impulsi al secondo ed eccitati in risonanza con un banco di condensatori: questa era una positiva garanzia sperimentale sui valori massimi accettabili della derivata temporale

$$(III.I.1) \quad \frac{dB}{dt} = \dot{B},$$

del vettore induzione B . Diciamo per fissare le idee che valori della (III.I.1) dell'ordine di $(3 \div 6) \cdot 10^5$ G/s erano già stati impiegati. Chiaramente si voleva la massima frequenza f di impulsi per raggiungere la massima possibile intensità di elettroni e di fascio γ , e conveniva scegliere il massimo valore di f compatibilmente con il costo e lo spessore del lamierino di ferro, le alterazioni del campo per effetto di correnti parassite, le richieste alla radiofrequenza ed all'iniettore, il riscaldamento delle parti. D'altra parte un valore di $f > 10$ portava a scartare altre soluzioni, quali quella con un volano e con ignitron,

al modo di un altro e.s. (*) e dei maggiori protosincrotroni. Infatti uno studio da noi fatto indicava che la soluzione a volano diventava antieconomica per $f > 5$ [2]. Si arrivò quindi alla decisione di una alimentazione del magnete con un banco di condensatori in risonanza, ed a stabilire un valore di f :

$$f = 20 \text{ Hz.}$$

Oggi, a macchina funzionante, consideriamo questa scelta del valore di f una buona scelta.

Il tipo di focheggiamento venne lungamente discusso anche dal gruppo teorico [3], ed i risultati dei calcoli indicarono che alla nostra energia e dimensioni non grandi vantaggi o differenze erano da attendersi tra le due soluzioni. È da riportare questa discussione ai suoi tempi (1953-1954), quando nessuna macchina ancora era funzionante a focheggiamento forte (f.f.) ed alcuni elementi, quali la tensione occorrente di radiofrequenza (R.F.) a causa delle fluttuazioni di irraggiamento degli elettroni, ancora non erano stati acquisiti [4]. La decisione fu alla fine per un magnete a focheggiamento debole (f.d.), sulla base delle seguenti considerazioni:

- Maggiori ovvie garanzie di funzionamento di un magnete convenzionale del tipo già largamente sperimentato. Probabile guadagno di tempo nel progetto e nelle misure meccaniche e magnetiche.
- Alle nostre dimensioni ed energie cioè con orbite di un raggio di $(3 \div 5) \text{ m}$ l'indice n del campo a f.f. non può assumere valori molto elevati (p. es. maggiori di $n \sim (40 \div 50)$). Questo perchè la ciambella non può scendere sotto le dimensioni limite imposte dalle dimensioni del fascio iniettato, dalla precisione assoluta della stabilità meccanica, e diciamo anche dalla garanzia da prendersi da chi fa una macchina di nuovo tipo. Con un valore di $n \leq 40$ i vantaggi del f.f. sono ancora notevoli, ma non sono così prepotenti quanto nelle macchine ad altissima energia e di raggio molto elevato, dove può aversi $n \geq 100$. Si noti che il vantaggio della soluzione f.f. sulla soluzione f.d. può entro certi termini essere misurato dal rapporto Q tra la lunghezza d'onda di betatrone a f.d. e la corrispondente a f.f.:

$$Q = \frac{\lambda_d}{\lambda_f} \approx \sqrt{n},$$

ove n è l'indice di campo a f.f.

- Le dimensioni fisiche di un magnete a f.d. del nostro raggio sono certamente maggiori che nel caso a f.f., ma non ancora tanto da costringere a soluzioni delicate o difficili o parzialmente nuove nell'assemblamento dei lamierini.

(*) L'elettrosincrotrone già da 500 MeV ed oggi da 1300 MeV dell'Istituto di Tecnologia di California (Caltech), Pasadena, Cal.

— Il costo percentuale del magnete sul costo totale, se si includono nel costo totale tutta la macchina, l'edilizia per avere i laboratori di ricerca, l'edificio macchina partendo dal terreno nudo, l'attrezzatura scientifica per compiere il primo biennio di ricerche della macchina, e gli stipendi dei realizzatori, è circa il 10% del totale nella soluzione a f.d. da noi scelta. La soluzione alternativa a f.f. sarebbe stata certamente con costo percentuale ancora minore, ma comunque, dato il basso costo relativo del magnete, si sono considerati rilevanti nella scelta le garanzie di rapido funzionamento e di elevata intensità che già il f.d. dava e non ancora il f.f.

— Non chiara ancora era la possibilità di iniettare gli elettroni per molti giri in un campo a f.f., mentre già si conoscevano, elaborate dal gruppo teorico [5], la teoria della iniezione degli elettroni in campo a f.d., e la teoria della cattura di essi dalla R.F.

Una volta scelta la frequenza di ripetizione ed il tipo di focheggiamento si passò alla scelta della struttura del magnete.

L'esperienza acquisita con il protosincrotrone di Brookhaven consigliava un magnete a C esterno anziché ad H od a C interno, e per il C esterno appunto si decise. Vantaggi del C esterno la libertà di manovra sulla ciambella e sui parametri di iniezione, e la massima « osservabilità » del fascio. Vantaggi della struttura ad H la maggiore automatica schermatura dalle radiazioni, ed un certo risparmio di peso del ferro. Un magnete a C esterno era anche quello dell'e.s. dell'Università di Cornell (U.S.A.) [4], se pure a f.f. Da quest'ultimo anzi si considerò conveniente imitare il modo originale di fissare i poli ai blocchi, distanziandoli di precisione con colonnine, e con un intermediario elastico tra i poli ed i blocchi.

Sostanzialmente nuovi nella struttura dovevano essere i blocchi di lamierino, le loro sedi, ed il loro incatenamento per la notevole mole del nostro magnete rispetto agli altri esistenti in lamierini sottili.

2. - Scelta dell'alimentazione.

Una volta decisa la frequenza di ripetizione ($f = 20$ Hz) appariva conveniente una eccitazione del magnete in risonanza con un banco di condensatori, cioè un circuito LC ove L fosse in tutto o in parte l'induttanza del nostro magnete. La dimensione del traferro imponeva ogni possibile risparmio sul costo delle capacità e delle induttanze del circuito. In Fig. III.I.1 e in Fig. III.I.2 sono dati gli schemi delle due alternative di alimentazione del magnete da noi considerati, con accanto il ciclo del campo B entro il traferro del magnete.

È chiaro che lo schema di Fig. III.I.2 porta a un risparmio sui condensatori e nelle perdite parassite, poichè la escursione di corrente alternata si dimezza o quasi.

Il risparmio resta notevole anche se si spende per la induttanza L_1 , L_2 , essenzialmente perchè costa meno lo stivare l'energia nell'induttanza anzichè nei condensatori.

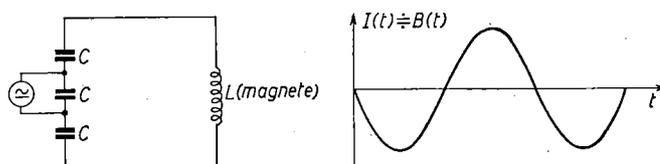


Fig. III.1.1. - Schema di alimentazione del magnete in risonanza LC senza corrente continua di bias.

Le induttanze L_1 e L_2 , dovendo immagazzinare una notevolissima quantità di energia (125 kJ in continua più 11 kJ in alternata ciascuna, qualora la somma delle due induttanze sia come nel nostro caso il triplo dell'induttanza del magnete) debbono essere realizzate, almeno in parte, in aria. Si arrivò ad una soluzione completamente in aria, piuttosto originale ed elegante in queste dimensioni, che si rilevò anche più economica.

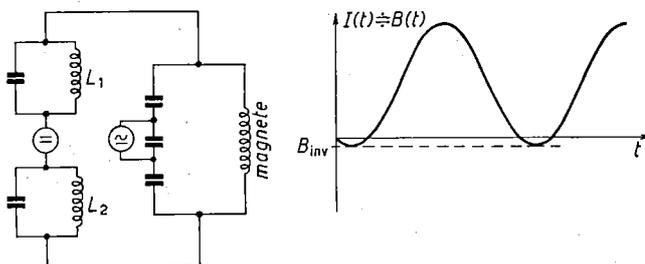


Fig. III.1.2. - Schema di alimentazione del magnete con corrente continua (generatori c.e.) aggiunta alla corrente alternata in risonanza.

Non si esitò nel richiedere una indipendenza della alimentazione dalle condizioni della rete (per tensione e per frequenza), ed una alta ($\approx 1\%$) stabilizzazione di frequenza e corrente di alimentazione. Questa fu certo una saggia decisione, poichè abbiamo avuto modo di constatare l'insufficiente stabilità in tensione e frequenza della nostra rete di alimentazione generale. Si discusse a lungo sulle possibili conseguenze sul fascio accelerato di una curva di $B(t)$ del tipo di Fig. III.1.2 (nessuna macchina aveva ancora funzionato con tale ciclo) e sul valore ottimo del campo inverso B_{inv} . Si concluse comunque alla fine che lo schema di Fig. III.1.2 era accettabile sotto ogni punto di vista.

Le decisioni di massima prima dette erano tutte ormai prese alla fine del 1954. I lavori per il magnete iniziarono presso la ditta commissionaria nel maggio del 1955; i lavori per l'alimentazione nell'ottobre dello stesso anno.

3. - La struttura del magnete.

A) Il magnete è costituito da 64 blocchi della lunghezza di circa 30 cm a forma di C, suddiviso in quattro quadranti. I blocchi sono costituiti di lamierini tranciati di ARMCO D MAX di 0.35 mm di spessore incollati con araldite con intercalati lamierini quadrati di compenso per ottenere l'opportuna sezione trapezoidale. Questi blocchi poggiano su una base di ghisa e sono regolabili in altezza e posizione radiale mediante un sistema di guide e bulloni. La Fig. III.1.3 rappresenta una sezione schematica del magnete. Le basi di

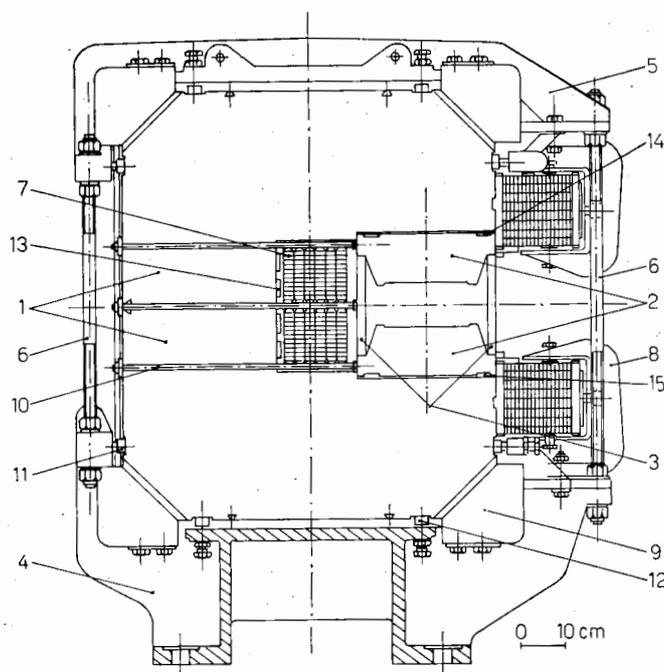


Fig. III.1.3. - Sezione del magnete: 1) blocco a C; 2) poli; 3) colonnine di steatite; 4) base in ghisa; 5) piastrone superiore; 6) tiranti in ottone; 7) bobina; 8) graffe in bronzo; 9) fazzoletti con Belleville; 10) tiranti interni per bobina; 11) guida di regolazione radiale; 12) guida di regolazione verticale; 13) ritorni correnti di correzione; 14) gomma precompressa; 15) spessori di bachelite.

ghisa sono imbullonate su un basamento di cemento armato costituito da quattro colonnati che poggiano direttamente su uno strato lavico che si trova a qualche metro sotto il livello del terreno (v. Parte IX, Cap. I, Sez. 1). I blocchi sono assicurati azimutalmente a due a due mediante otto fazzoletti fissati sulla base

e sul piastrone superiore (v. Fig. III.1.3), che premono i due pacchi l'uno contro l'altro mediante molle Belleville consentendone la dilatazione. Il piastrone superiore è collegato con il basamento in ghisa mediante tiranti in ottone, e serve essenzialmente per ancorare la bobina.

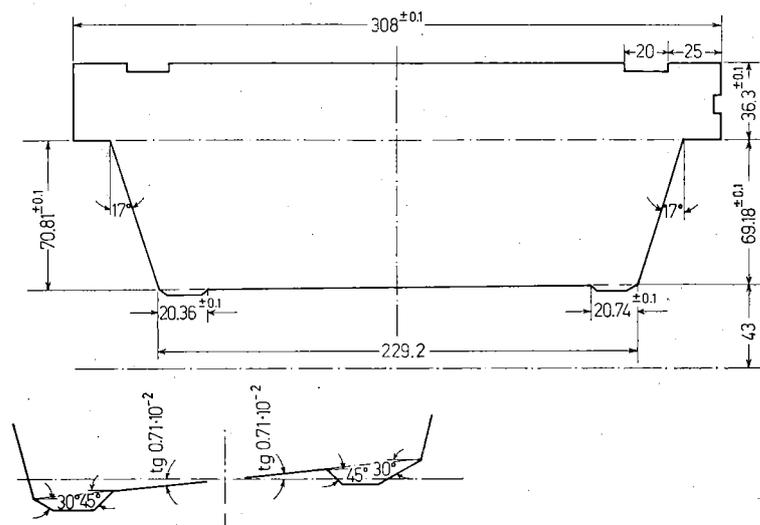


Fig. III.1.4. - Lamierino polo.

B) Le espansioni polari (Fig. III.1.4) sono costituite da pacchi di lamierini dello stesso materiale del C incollati con araldite con l'inserzione di foglietti di carta giapponese per ottenere l'opportuna forma a settore. I poli inferiori sono appoggiati su un piano costituito da pacchi affiancati tramite guide di bachelite alloggiare in apposite scanalature. I poli superiori poggiano sugli inferiori tramite colonnine di steatite che assicurano una grande precisione della distanza tra i poli, e una notevole stabilità alle variazioni di temperatura.

Tra i poli superiori ed il piano superiore dei blocchi sono alloggiati in apposite scanalature blocchetti di gomma precompressa che contrastano la forza attrattiva del campo magnetico. La forma del C e dei poli è stata fissata, in prima approssimazione, in modo che, con campo uniforme di 1 Wb/m^2 nel traferro, non vi fosse alcuna sezione radiale del polo o del C in cui il campo fosse maggiore di 1.5 Wb/m^2 [6]. Ci si è serviti, per questo studio, di rilievi di campo con metodi analogici (vasca elettrolitica e fogli conduttori) [7]. La struttura è completata da otto robusti piastroni in bronzo che costituiscono la fine del quadrante, su cui si trovano i bulloni di spinta per bloccare i pacchi terminali.

C) La bobina di eccitazione del magnete è costituita da 12 spire disposte come in Fig. III.1.3. Su un metro di magnete sperimentale le spire delle bobine

erano costituite di barra in rame massiccio. Poichè, mediante misure magnetiche, si rilevò che l'effetto perturbatore delle correnti parassite sul campo magnetico al valore dell'iniezione era molto forte, si decise di costruire le bobine definitive del magnete con spire di piattine trasposte secondo il sistema Roebel.

Un esame più dettagliato dell'argomento verrà fatto nel Capitolo V di questa Parte III.

La Fig. III.I.5 mostra una sezione di una spira con trasposizione di 44 piattine di rame, e il sistema di raffreddamento costituito da due guance di rame incollate sulle piattine e raffreddate da due tubi di rame

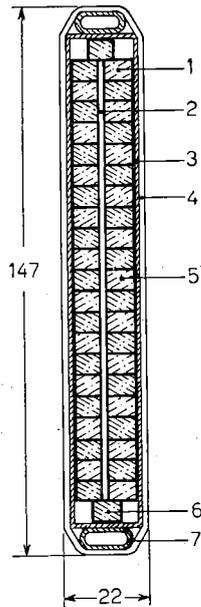


Fig. III.I.5. - Sezione di un conduttore. *Larghezza*: tolleranza conduttori 2 mm; 1) piattina isolata 7.3 mm; 2) interstrato 0.4 mm; 3) guaina 1 mm; 4) isolante esterno 1.5 mm. - *Altezza*: 5) piattina isolata 5.3 mm; 6) piattina trasp. 5.3 mm; 7) tubetti 5 mm; interstrato trasp. 0.2 mm; tolleranza conduttori 2.3 mm; tolleranza piattina 0.1 mm.

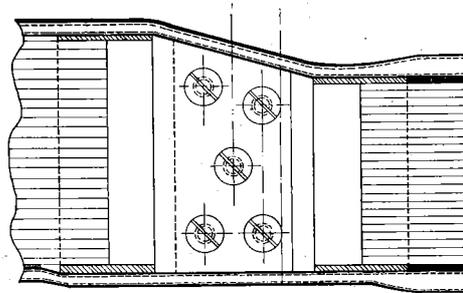


Fig. III.I.6. - Giunto delle spire nella testata.

schiacciati. Misure della temperatura in diversi punti della bobina hanno mostrato che la massima differenza di temperatura tra il rame e l'acqua di raffreddamento è di soli 15°C. Ogni semispira della bobina è stata nastrata in carta mica e compoundata sotto vuoto con la medesima tecnica usata per le zone degli alternatori, il che garantisce ottime proprietà d'isolamento.

Alle testate le semispire sono giuntate meccanicamente con viti mediante particolari terminali (Fig. III.I.6) saldati alle piattine: il tutto è nastrato con

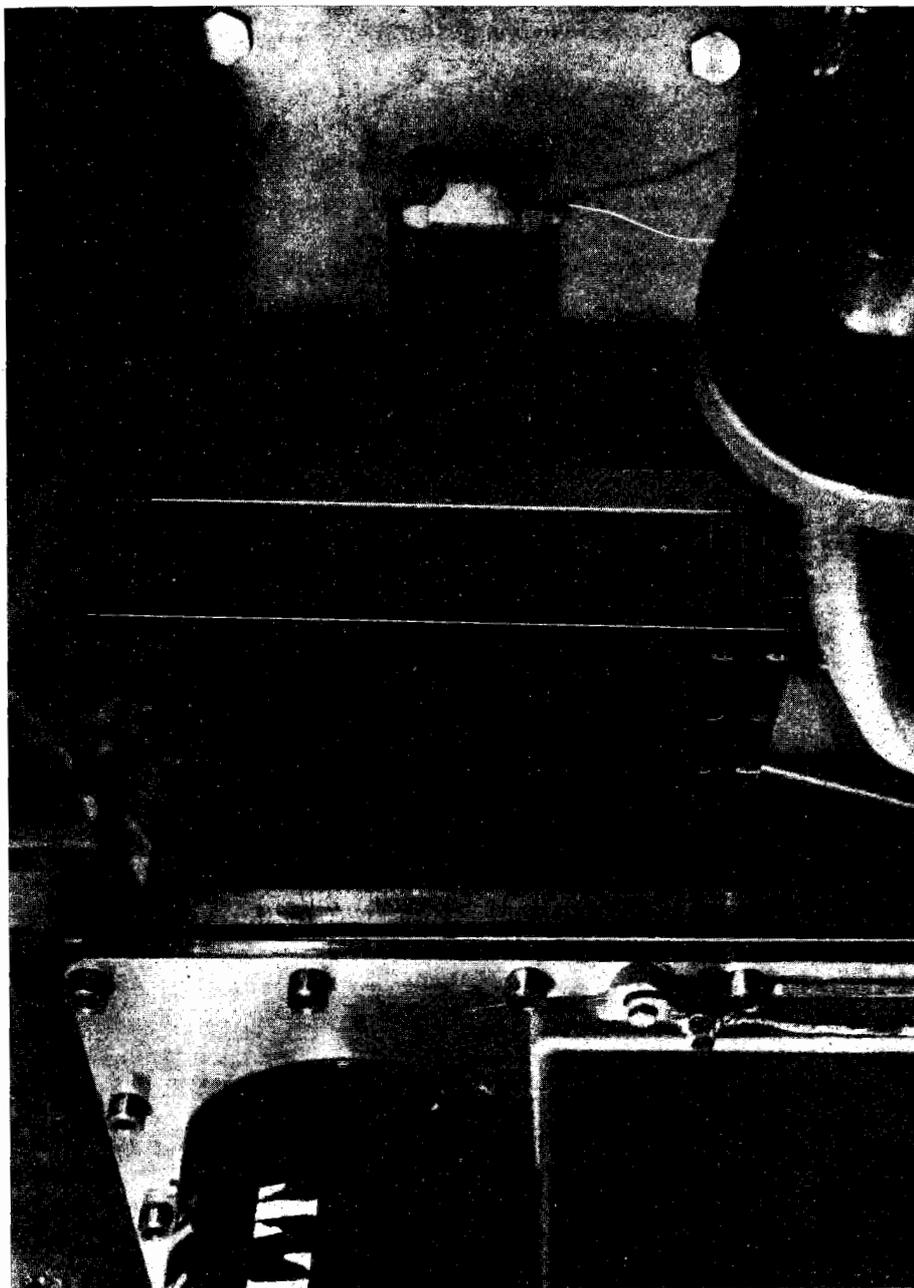


Fig. III.1.7.

carta mica e verniciato di Compound in aria. La bobina è assiemata mediante una scatola di bachelite che serve come protezione meccanica e ulteriore isolamento verso il ferro. Essa viene montata in blocco sul magnete facendola scivolare sul piano del C, e levandone i due blocchi di testata. L'ancoraggio della bobina è costituito esternamente da robuste graffe in bronzo (Fig. III.1.3) e nelle cave interne da tiranti che passano tra le coppie di pacchi a C e che vengono registrati dall'interno del magnete. Tra la bobina e il ferro sono ricavate delle piccole cave sulla scatola di bachelite per alloggiare i ritorni degli avvolgimenti di correzione.

D) Alle testate del magnete in corrispondenza dei risvolti della bobina è stato necessario porre delle scatole in lamierini da 0.35 mm (Fig. III.1.7) per schermare un forte effetto perturbatore del campo magnetico dovuto alle correnti parassite generate nei sistemi di giunzione che sono di rame massiccio. I poli di testata sono stati sperimentalmente sagomati in modo che la temperatura, con un semplice raffreddamento ad aria, non superasse i 40° C.

4. - L'impianto di raffreddamento e le caratteristiche elettriche del magnete.

L'impianto di raffreddamento dell'e.s. è costituito da due circuiti d'acqua separati, uno per il ferro ed uno per la bobina, come rappresentato schematicamente.

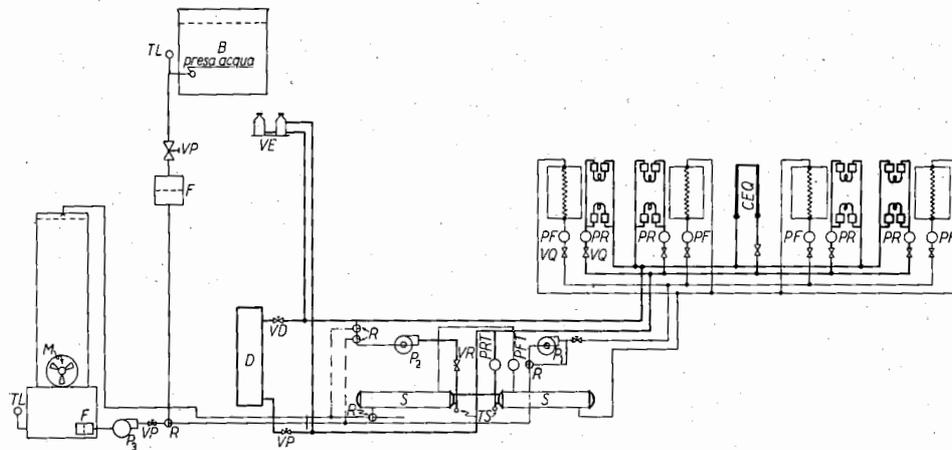


Fig. III.1.8. - Schema impianto di raffreddamento. B) bacino di carico; VP) valvola principale; F) filtro; VE) vasca di espansione; D) depuratore; VD) valvola al depuratore; R) valvola a tre vie; S) scambiatore di calore; P₁) pompa acqua fluente; P₂) pompa acqua distillata; P₃) pompa torre refrigerante; M) motore ventilazione torre refrig.; VR) valvola regolazione portata; TS) tappo per scarico scambiatori; VQ) valvola regolazione acqua; TL) teleindicatore di livello; PRT) misuratore portata totale acqua distillata; PFT) misuratore portata totale acqua fluente; PF) misuratore portata acqua fluente con teleindicazione; PR) misuratore portata acqua distillata con teleindicazione; CEQ) connessioni elettriche tra i quadranti.

camente in Fig. III.1.8. L'acqua di raffreddamento del ferro in circuito aperto scorre entro tubi di rame saldati a piastre di rame incollate con araldite ai tre lati liberi del C, e all'uscita del circuito entra dentro a due scambiatori di calore dove vien raffreddata l'acqua distillata del circuito chiuso del rame.

Inizialmente l'acqua di scarico del raffreddamento del magnete veniva impiegata per il raffreddamento dei magneti per le esperienze e quindi scaricata. Attualmente l'impianto di raffreddamento del sincrotrone e dei magneti per esperienze utilizza due torri di raffreddamento ad aria forzata da 750 kW l'una. Per il rame si è preferito il circuito chiuso ad acqua distillata oltre che per non avere depositi od otturazioni delle tubazioni, anche per non aver dispersioni di corrente verso terra che avrebbero reso disuniforme la distribuzione della corrente nei quadranti.

Con questo sistema di raffreddamento il ferro si mantiene a qualche grado sopra la temperatura ambiente e il rame non supera in nessun punto i 38 °C, avendo una portata di 6 l/s nel circuito aperto e 3 l/s nel circuito chiuso.

Ai collaudi le caratteristiche elettriche del magnete risultarono soddisfacenti e leggermente migliori di quelle previste in sede di progetto.

Il collaudo è stato effettuato nelle normali condizioni di esercizio a 1 000 MeV elencate qui di seguito:

Corrente continua	2 700 A .
Corrente alternata	2 140 A .
Campo massimo	9 260 G .
Campo inverso	148 G .
Derivata del campo all'iniezione	156 000 G/s .

Le temperature dell'acqua del circuito chiuso e quella del circuito aperto sono riportate nella Tabella I e da questi dati si può ricavare con buona approssimazione un bilancio delle perdite nel magnete. Tenuto conto che le perdite totali nel circuito del magnete sono 140 kW e che le perdite nei condensatori ($\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-3}$) sono di circa 30 kW si possono valutare in 70 kW le perdite nel rame e in 40 kW le perdite nel ferro.

Il magnete lavora ottimamente anche con un campo massimo di 10 200 G corrispondenti a 1.1 GeV e da prove fatte si può pensare di lavorare per brevi periodi a 1.2 GeV.

Altre grandezze elettriche caratteristiche misurate sul magnete sono:

Induttanza	$17 \cdot 10^{-3}$ H .
Resistenza	$7 \cdot 10^{-3}$ ohm .
Densità di corrente efficace	2.2 A/mm ² .
Resistenza della bobina verso terra (*)	2 000 ohm .

(*) Con acqua distillata nel circuito chiuso.

TABELLA I.

Ora	Alternatore			Corrente dinamo	Tensione magnete	t_a	Ferro C				Rame C		
	tens.	corr.	cos				t_e	t_u	t_{us}	q	t_e	t_u	q
13	915	210	0.975	2 630	4 350	20.5	11.3	11.3	11.3	6.5	11.3	12	3.3
13.30	900	210	0.960	2 670	4 350	20.5	11.2	11.2	14.5	6.5	13.5	21.5	3.3
14	—	—	—	—	—	20.5	11.2	11.2	15.6	6.5	13.5	22.5	3.3
15	840	235	0.89	2 640	4 350	21.5	11.2	11.4	16.2	6.5	14	23	3.3
16	825	248	0.85	2 650	4 350	22	11.2	11.6	16.2	6.5	14	23	3.3
18	860	210	0.96	2 650	4 350	21	11.2	11.8	16.2	6.5	14	23	3.3
2	850	215	0.945	2 650	4 350	21	11.2	11.8	16.4	6.5	14.4	23.3	3.3
22	855	220	0.930	2 650	4 350	21	11.2	11.8	16.4	6.5	14.4	23.5	3.3
24	850	220	0.930	2 650	4 350	20	11.2	11.9	16.5	6.5	14.4	23.8	3.3
2	850	220	0.930	2 650	4 350	20	11.2	12	16.5	6.5	14.4	23.8	3.3
4	850	222	0.930	2 650	4 350	20	11.2	12	16.4	6.5	14.4	23	3.3
6	850	220	0.935	2 650	4 350	20	11.4	12	16.5	6.5	14.3	23.1	3.3
8	850	218	0.935	2 650	4 350	20.5	11.4	12	16.5	6.5	14.2	23	3.3
9.30	850	217	0.935	2 650	4 340	21	11.4	12.1	16.6	6.5	14.4	23.2	3.3

t_a : temperatura ambiente;
 t_e : temperatura H₂O entrata;
 t_u : temperatura H₂O uscita;
 t_{us} : temperatura H₂O uscita scambiatore.

5. - Considerazioni generali sul progetto.

A) A distanza di circa due anni dall'inizio del funzionamento dell'e.s., tenendo anche conto di tutte le misure magnetiche e meccaniche, possiamo ora cercare di raccogliere qui alcuni commenti sulla scelta del tipo di magnete e di alimentazione e sulla loro realizzazione.

Il sistema a f.d. presenta un notevole svantaggio, che all'epoca del primo progetto non era sufficientemente conosciuto, rispetto al f.f.: la tensione di radiofrequenza richiesta, a parità di perdite di elettroni lungo il ciclo, è più alta, di un fattore compreso tra 1.5 e 2.

Sino ad alcuni anni fa si temeva che, a causa del basso valore del «momentum compaction», cui corrisponde una piccola spiralizzazione, sarebbe stata difficile la iniezione senza introdurre una perturbazione azimutale nel campo per evitare la perdita del fascio contro il dorso del deflettore dopo il primo giro. Questa perturbazione, necessariamente funzione del tempo, avrebbe permesso l'iniezione di un solo giro o meno. L'operazione delle macchine a f.f. dell'Università di Cornell e dell'Università di Bonn ha mostrato che è possibile l'iniezione senza ricorrere a perturbazioni funzioni del tempo.

Un altro svantaggio del f.d., rispetto a quello forte, sta nella minore accettabilità in momento: nella nostra macchina le orbite di equilibrio di due elettroni il cui momento differisce dell'1% hanno raggi di curvatura che differi-

scono del 2.5%, e cioè di circa 9 cm. Nella macchina di Cornell a f.f., ad una differenza di momento dell'1% corrisponde una differenza di raggio medio dello 0.28%, pari a circa 1 cm.

Si vede da ciò che in un sincrotrone a f.f. con $n \simeq 20 \div 30$, del tipo ad esempio di quello di Cornell, si possono iniettare elettroni aventi una dispersione in momento circa 10 volte maggiore di quella che viene accettata nella nostra macchina (questo naturalmente vale supponendo che l'accettanza in momento del sistema di deflessione sia maggiore di quella del magnete ed a parità di larghezza della ciambella). Di conseguenza si ha, per i sincrotroni a f.d., una limitazione nella scelta del tipo di iniettore: nel nostro caso, ad esempio, potrebbe non essere conveniente usare un acceleratore lineare, la cui dispersione in momento è dell'ordine del 2% per la metà della corrente di uscita, poichè in tal caso il rendimento di iniezione cala notevolmente.

Questa limitazione porta di conseguenza ad una limitazione anche nell'energia di iniezione, in quanto fra i tipi di macchine che possono essere usate come iniettori attualmente solo con gli acceleratori lineari si ottengono energie superiori ai (4 ÷ 5) MeV. Per l'utilizzazione del fascio di elettroni e per la soluzione di vari problemi tecnici, connessi principalmente alla ciambella, si è dimostrata vantaggiosa la scelta di dimensioni del traferro piuttosto abbondanti: anche se questo costituisce un maggior costo del complesso esso è certamente ripagato nell'esercizio.

B) La lunghezza delle sezioni diritte da noi scelta si è rivelata piuttosto scarsa: ciò ha posto notevoli problemi tecnici nella realizzazione del deflettore e delle cavità acceleratrici, e ha portato come conseguenza un peggioramento del campo magnetico nelle sezioni diritte all'iniezione dove il campo di fuga è ancora abbastanza alto (dell'ordine del (10 ÷ 20)% del campo nel traferro).

Come già detto, dopo le prime misure magnetiche nel traferro, la bobina venne modificata per diminuire il campo dovuto alle correnti parassite nel rame; tale modifica (suddivisione del conduttore in tante piattine elementari trasposte in modo da rendere nulla la corrente di circolazione tra le piattine) è stata limitata al tratto di bobina lungo il quadrante. I risvolti alla testate si sono mantenuti, per ovvie ragioni tecniche, in rame massiccio.

Il campo magnetico alle testate è quindi la somma del campo di fuga del traferro e del campo dovuto alle correnti parassite nei risvolti: all'iniezione il campo delle correnti parassite corrispondeva ad un tratto lungo circa 40 cm di campo pari al campo nel traferro. Con opportuni schermi questo effetto venne ridotto di un fattore circa 4 o 5, ma certamente alla testata e nella sezione diritta la distribuzione del campo è funzione del tempo e, a bassi campi, è notevolmente diversa dalla distribuzione che si avrebbe con alimentazione in corrente continua.

Riteniamo che il problema di avere un campo buono alle testate e nella sezione diritta sia stato da noi, e non soltanto da noi, sottovalutato; l'effetto

di una cattiva distribuzione di campo alle testate è difficile da correggere e, per magneti a C come il nostro, può variare l'indice di campo medio dell'intero magnete anche di $0.1 \div 0.15$.

Le soluzioni meccaniche adottate nella realizzazione del magnete si sono di massima dimostrate soddisfacenti. Dopo circa 10 000 ore di funzionamento, pari a 720 milioni di cicli, non vi è accenno ad un aumento delle vibrazioni o a spostamento dei C o dei poli. Particolarmente indovinata per la sua semplicità e funzionalità si è rilevata la soluzione della gomma piena come elemento di compressione dei poli sulle colonnine di steatite.

I criteri seguiti nel progetto degli avvolgimenti di correzione sono ancor oggi pienamente accettabili. Particolarmente vantaggioso si è dimostrato il sistema di alimentazione con « cathode followers »; nonostante il grande numero di valvole (circa 100) non abbiamo sinora avuto alcun inconveniente (v. Parte III, Cap. VIII). Il grande numero di componenti necessario per il complesso degli avvolgimenti di correzione e la possibilità che anche un piccolo guasto in esso portasse come conseguenza danni molto maggiori alla ciambella o alla bobina principale del magnete, ci ha consigliato di considerare il problema non solo nella sua importanza intrinseca, ma rapportandolo al valore dell'intero magnete. Dopo vaste ricerche di mercato e approfondito studio delle possibili soluzioni, l'impianto è stato realizzato con ampi margini di sicurezza ricorrendo alle soluzioni più semplici, anche se, a prima vista, esse potevano apparire meno brillanti.

C) Abbiamo già detto (Sez. 1) le buone ragioni della decisione di una frequenza di 20 Hz, e quindi di una eccitazione in risonanza. Dobbiamo però dire che un elemento di cui non si tenne sufficiente conto in questa scelta, e che va a favore se mai di una alimentazione con volano, è la facilità di cambiamento dell'energia massima dell'e.s. Con alimentazione a volano e raddrizzatori, il cambiamento dell'energia non richiede il cambiamento del ciclo magnetico: basta, al valore di energia voluto, introdurre un tratto a campo costante (tensione di alimentazione nulla) e spegnere in modo adatto la radiofrequenza, perchè il fascio di elettroni vada ad urtare contro la targhetta interna, dopodichè il ciclo magnetico riprende e continua sino al valore massimo per poi ridiscendere normalmente.

Di conseguenza tutte le perturbazioni del campo magnetico all'iniezione, che sono sempre funzioni del ciclo magnetico percorso in precedenza oltre che dei valori istantanei del campo e delle sue derivate, restano costanti al variare dell'energia massima dei γ , e costanti pure restano naturalmente tutte le correzioni che si debbono apportare per ottenere un'iniezione efficiente.

Nel caso invece di un circuito risonante magnete-condensatori, non è possibile ottenere lungo il ciclo magnetico un tratto a campo costante (o quasi costante), se non alla sommità del ciclo stesso.

Per variare l'energia dei γ è quindi necessario variare l'ampiezza del ciclo

magnetico, e di conseguenza tutte le correzioni del campo stesso, soprattutto quando, come nel nostro caso per le correzioni alle testate, esse sono di primo ordine rispetto al valore del campo e non di primo ordine rispetto alla sua derivata rispetto al raggio.

La possibilità di introdurre un gradino orizzontale nella sinusoide all'altezza dell'energia, quindi del campo magnetico, desiderata, è stata da noi considerata (per esempio con elementi di magneti in ferro saturo e ignitron). Essa non è facile, ma non è impossibile.

Per dare un ordine di grandezza, si può dire che, attualmente, cambiare l'energia del fascio γ in uscita richiede circa mezz'ora.

D) Come già si è detto, data la ben nota situazione della distribuzione di energia elettrica, e prevedendone al tempo del progetto un certo peggioramento, abbiamo deciso di ricorrere ad un disaccoppiamento completo dalla rete di alimentazione: due ampole raddrizzatrici a vapori di mercurio convertono l'alternata in continua operando contemporaneamente una stabilizzazione rapida della tensione.

La tensione continua stabilizzata alimenta il motore di traino di un gruppo rotante comprendente un alternatore a 20 Hz, una dinamo ed un piccolo alternatore a 60 Hz, che viene usato per alimentare alcune parti particolarmente delicate con una tensione sincrona col campo magnetico.

Ebbene, noi riteniamo che l'aver dato tanta importanza alla stabilizzazione del magnete abbia contribuito non poco alla rapidità della messa in funzione del sincrotrone.

Ciò che, con l'esperienza di oggi, cambieremmo nell'impianto di alimentazione è la disponibilità di potenza sincrona col campo magnetico: l'alternatore a 60 Hz ha una potenza disponibile per i servizi di soli 20 kW, mentre, data la criticità di molti parametri della macchina, sarebbe meglio che tutti i controlli, le catene a radiofrequenza, l'iniettore, il deflettore e tutti gli altri servizi connessi col funzionamento del sincrotrone fossero alimentati con potenza sincrona col campo magnetico, stabilizzata in tensione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. THOMAS, W. KRAUSHAAR e I. HALPERN: *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **1**, 175 (1952).
- [2] G. SACERDOTI: Relazione no. M 26 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1953).
- [3] G. SALVINI: *Suppl. Nuovo Cimento*, **2**, 442 (1955).
- [4] R. WILSON: *Handb. d. Phys.*, **44**, 170 (1959); M. SANDS: *Phys. Rev.*, **97**, 470 (1955).
- [5] E. PERSICO: *Suppl. Nuovo Cimento*, **2**, 459 (1955).
- [6] G. SACERDOTI: Relazione no. M 48 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1954); G. SACERDOTI e R. TOSCHI: Relazione no. M 54 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1955).
- [7] F. AMMAN e L. DADDA: *Nuovo Cimento*, **3**, 184 (1956).