

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-62/128 (1962)

A. Alberigi-Quaranta, M. Puglisi, I. F. Quercia: L'ELETTROSINCRO-
TRONE: INTRODUZIONE E DISCUSSIONE DEL PROGETTO DEL SISTE-
MA A RADIOFREQUENZA.

Estratto dal: Nuovo Cimento, Suppl. 24, 234 (1962)

PARTE V.

Il sistema acceleratore a radiofrequenza.

CAPITOLO I

Introduzione e discussione del progetto del sistema a radiofrequenza.

A. ALBERIGI QUARANTA, M. PUGLISI e I. F. QUERCIA

1. - Premessa e descrizione generale.

Il problema di accelerare gli elettroni del fascio circolante entro un sincrotrone è stato generalmente risolto mediante l'impiego di cavità risonanti di vario tipo alimentate da un impianto generatore di radiofrequenza [1-4]. Tali cavità hanno il compito di generare in una determinata posizione lungo l'orbita degli elettroni un campo elettrico sincrono con la frequenza di rivoluzione degli elettroni, e sufficientemente intenso da cedere ad essi l'energia necessaria per mantenersi sull'orbita stabile di equilibrio al crescere del campo magnetico e per compensare le perdite di energia che gli elettroni subiscono prevalentemente per effetto dell'irraggiamento [5, 6].

Inoltre l'ampiezza del campo elettrico a radiofrequenza generato dalle cavità risonanti deve essere tale da soddisfare alle condizioni necessarie per la stabilità di fase [7-10] (v. Parte II, Sez. 4).

Poichè gli elettroni vengono iniettati nel sincrotrone con energia cui corrisponde una velocità che dista di qualche per cento dalla velocità della luce, nella prima fase di accelerazione gli elettroni subiscono un incremento di velocità e quindi un incremento della loro frequenza di rivoluzione entro la macchina. La radiofrequenza in questo primo stadio di accelerazione deve accompagnare l'aumento di frequenza di rivoluzione degli elettroni. Occorre dunque che nella prima parte del ciclo gli elettroni vengano accelerati mediante una tensione a frequenza variabile. Ogni scarto tra la frequenza degli elettroni e la frequenza del campo elettrico acceleratore innesca oscillazioni di sincrotrone che allargano radialmente il fascio intorno all'orbita di equilibrio.

I requisiti cui deve soddisfare l'impianto di radiofrequenza per il sincrotrone, possono essere così riassunti:

1) Generazione di un segnale a radiofrequenza avente in ogni istante frequenza pari, entro tolleranze prefissate, alla frequenza di rivoluzione degli elettroni o ad una sua armonica [8].

2) Controllo della modulazione di frequenza in accordo con il valore istantaneo del campo magnetico cui è vincolata univocamente la frequenza di rivoluzione degli elettroni.

3) Cessione di energia dalla radiofrequenza agli elettroni del fascio mediante un campo elettrico generato in una apposita cavità risonante posta lungo l'orbita degli elettroni.

Le caratteristiche cui deve soddisfare l'impianto a radiofrequenza per l'accelerazione degli elettroni nel sincrotrone dall'energia di iniezione all'energia finale, sono state precisate dagli studi teorici e sono qui appresso indicate sommariamente.

È stato deciso di separare in due parti l'impianto a radiofrequenza (RF).

Una prima parte (RF₁) alimenta una cavità risonante posta lungo una delle sezioni diritte, ed è destinata ad accelerare gli elettroni dall'energia di iniezione (2.5 MeV cinetici) sino ad un valore dell'energia cui corrisponda una velocità degli elettroni che differisce meno di 10^{-3} dalla velocità della luce.

Poichè durante il ciclo di funzionamento della RF₁ gli elettroni aumentano di velocità, e quindi aumenta anche la loro frequenza di rivoluzione nella macchina, occorre che la RF₁ provveda ad una corrispondente variazione della frequenza di eccitazione della cavità.

Una seconda parte (RF₂) alimenta una seconda cavità risonante ed è destinata ad accelerare gli elettroni sino alla loro energia finale ≥ 1000 MeV. La RF₂ deve fornire una frequenza fissa, e deve compensare le perdite di energia per radiazione che al di sopra dei 200 MeV per gli elettroni diventano piuttosto sensibili [5, 6].

I due impianti a radiofrequenza sono stati realizzati presso i Laboratori Nazionali di Frascati, e sono descritti nei successivi Capitoli II e III di questa Parte V.

Nel presente capitolo vengono precisate le prestazioni sulla frequenza, sulle ampiezze e sul controllo richieste dal progetto all'impianto di RF.

2. - Prestazioni sulla frequenza.

Si è deciso di usare per la RF una frequenza corrispondente alla 4^a armonica della frequenza di rivoluzione degli elettroni nella macchina.

L'andamento della frequenza in funzione del campo magnetico B_0 sull'orbita centrale di equilibrio, è dato nel diagramma della Fig. V.I.1 [10]. Poichè il campo magnetico B_0 è proporzionale al momento degli elettroni, questo diagramma non dipende dall'andamento del campo in funzione del tempo.

La tolleranza ammessa nello scarto di frequenza dal valore teorico è fissata a $\pm 1/1000$.

Per energia degli elettroni all'iniezione di 2.5 MeV totali il valore della frequenza all'istante di iniezione è

$$\nu_1 = 42.9 \cdot 10^6 \text{ Hz ,}$$

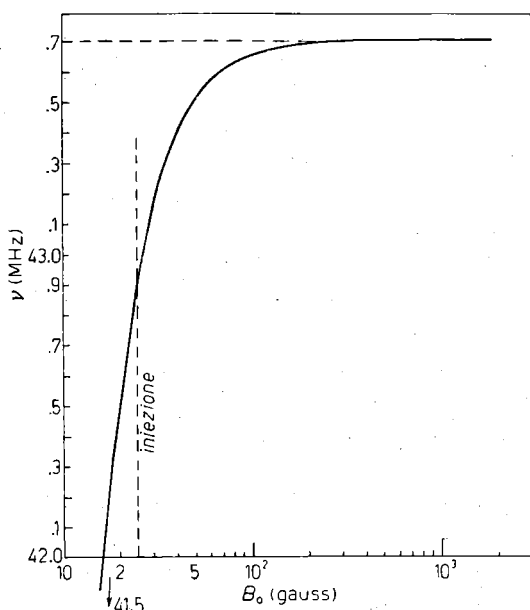


Fig. V.I.1. - Variazione della frequenza 4^a armonica in funzione del campo B_0 .

corrispondente al valore di $B_{01} = 27.2 \text{ G}$

Il valore asintotico della frequenza è

$$\nu = 43.69 \cdot 10^6 \text{ Hz .}$$

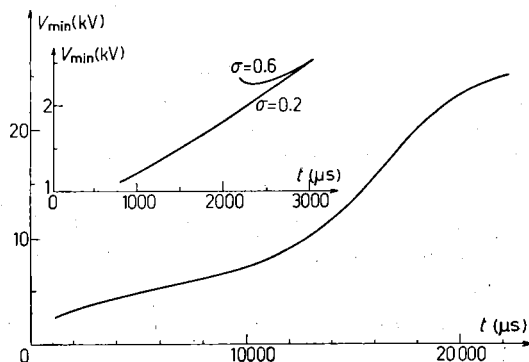
Questo valore viene raggiunto entro 10^{-3} per un valore di B_0 pari a 120 G come è mostrato in Fig. V.I.1. La modulazione di frequenza necessaria è quindi pari a circa 1.85 %.

Poichè si è previsto di poter iniettare gli elettroni nella macchina anche ad energie inferiori a 2.5 MeV cinetici è stato deciso che l'impianto potesse consentire una modulazione di frequenza fino al 2.5 %.

3. - Prestazioni sulla tensione.

La tensione di cresta a radiofrequenza che deve svilupparsi tra le armature del risonatore dipende dall'energia istantanea degli elettroni, e dalla velocità di variazione del campo magnetico $B_0(t)$ sino a quando non intervengono perdite di energia per irraggiamento. Nella Fig. V.I.2 è dato,

Fig. V.I.2. - Tensione minima della RF necessaria per accelerare gli elettroni.



in funzione del tempo, l'andamento della tensione minima necessaria durante il ciclo di accelerazione [9, 10, 12]. Questa tensione è stata calcolata nel caso specifico relativo all'elettrosincrotrone (e.s.) di Frascati.

Sempre dalla Fig. V.1.2 appare come la tensione minima che deve essere fornita dall'impianto RF dipenda dalla spiralizzazione (v. Parte II, Sez. 3) durante la prima fase dell'accelerazione. In Fig. V.1.3 sono riportati per confronto i valori di questa tensione minima e della tensione massima che può essere fornita dall'impianto di radiofrequenza per la quale si ha ancora stabilità. In Fig. V.1.4, e sempre con riferimento all'e.s. di Frascati, sono riportati i rendimenti di cattura [10] (v. Parte II, Sez. 4) in funzione della tensione fornita dall'impianto di radiofrequenza all'inizio

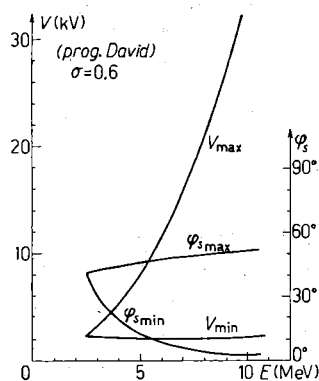


Fig. V.1.3. - Tensioni a RF e fasi sincrona minime e massime permesse, in funzione dell'energia totale degli elettroni.

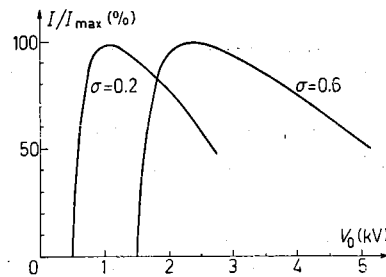


Fig. V.1.4. - Rendimento relativo di cattura degli elettroni in funzione della tensione RF iniziale per due valori della spiralizzazione.

dell'accelerazione. Dall'esame di questi dati in sede di progetto si è deciso che l'impianto RF₁ deve poter fornire una tensione di 3 000 V all'istante di iniezione, che possa salire fino ad almeno 7 000 V alla fine del suo ciclo di funzionamento.

La tensione di cresta a radiofrequenza che deve svilupparsi tra le armature delle cavità RF₂ a frequenza fissa, deve soddisfare a condizioni piuttosto stringenti, per le seguenti ragioni:

1) Al di sopra di 200 MeV le perdite di energia per irraggiamento da parte degli elettroni del fascio diventano considerevoli. Tenendo conto solo delle perdite per irraggiamento classico, cioè trascurando le fluttuazioni dovute ad effetti quantistici [12], a 1 000 MeV le perdite di energia per irraggiamento ammontano a 27 keV. Pertanto per ogni giro occorre rifornire al fascio almeno questa energia. In realtà occorre tenere conto degli effetti quantistici sulle perdite di energia, ciò che richiede, per portare gli elettroni a 1 000 MeV, una tensione di cresta alla RF₂ dell'ordine di 70 keV (v. Parte II. Sez. 5).

2) Il fascio di elettroni accelerato viene utilizzato per produrre un fascio di raggi γ mediante radiazione di frenamento generata nell'urto contro un bersaglio interno alla ciambella. Per molte esperienze è utile che il fascio di raggi γ sia distribuito in un tempo dell'ordine di 3 ms con la maggiore uniformità possibile. Ciò lo si ottiene facendo decrescere lentamente, alla fine del ciclo di accelerazione, la tensione della RF_2 . In questo modo il fascio degli elettroni, spiralizzando verso il centro della macchina, colpisce il bersaglio interno.

La modulazione di ampiezza necessaria per ottenere dalla RF_2 le prestazioni richieste è piuttosto critica e le condizioni migliori sono state trovate empiricamente come verrà precisato nel Cap. IV di questa Parte V.

4. - Prestazioni sul controllo.

Il controllo deve provvedere ad ogni ciclo di accelerazione a fornire agli impianti RF una sequenza di ordini e di informazioni, in modo che vengano realizzate le prestazioni descritte.

Le operazioni di controllo vengono eseguite dal « sincronizzatore principale » che è descritto in particolare nella Parte VII, Cap. II. Ne ricordiamo qui solo alcune delle principali caratteristiche.

La sequenza delle operazioni di controllo delle RF è iniziata da un impulso di tensione fornito da una peaking strip (v. Parte III, Cap. IV) all'istante in cui il campo B_0 passa per un valore di poco inferiore al valore del campo di iniezione B_{0i} . Seguono le operazioni:

- modulazione di frequenza dell'oscillatore pilota della RF_1 ;
- modulazione di ampiezza della tensione fornita dalla RF_1 ;
- spegnimento della RF_1 , accensione della RF_2 ;
- modulazione di ampiezza delle tensioni della catena RF_2 ;
- spegnimento RF_2 .

BIBLIOGRAFIA

- [1] Synchrotron Progress Report, Cornell University (1949).
- [2] M. H. DAZEY, J. V. FRANCK, A. C. HELMHOLZ, C. S. NUNAN e J. M. PETERSON: *Rev. Sci. Instr.*, **21**, 436 (1950).
- [3] G. SALVINI: *Suppl. Nuovo Cimento*, **12**, 77 (1954).
- [4] R. R. WILSON: *Handb. d. Phys.*, **44**, 170 (1959).
- [5] J. SCHWINGER: *Phys. Rev.*, **75**, 1912 (1949).

- [6] P. G. SONA: Relazione no. PT 6 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1954).
- [7] D. BOHM e L. FOLDY: *Phys. Rev.*, **70**, 249 (1946).
- [8] E. PERSICO: Relazione no. T 4 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1953).
- [9] E. PERSICO: Relazione no. T 19 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1955); *Suppl. Nuovo Cimento*, **2**, 459 (1955).
- [10] E. PERSICO: Relazione no. T 16 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1954).
- [11] G. SALVINI: Relazione no. G 19 dei Laboratori Nazionali di Frascati (1955).
- [12] R. F. CHRISTY: *Synchrotron beam loss due to quantum fluctuations in the radiation*, Caltech Internal Report (1957); M. SANDS: *Proc. CERN Symposium on High Energy Accelerators and Pion Physics*, vol. 1 (1956) p. 298.