

# IL RADDRIZZATORE A VAPORE DI CESIO

(di A. W. Hull, E. E. Burger, R. E. Turrentine - Dalla General Electric Review, Agosto 1951)

Trattasi di un nuovo tipo di raddrizzatore a catodo caldo in cui il vapore di cesio funziona sia da gas conduttore che da materiale termoionico di rivestimento. Il catodo, del tipo tradizionale impiegato nei tiratroni, è costituito da una struttura multicellulare di nichelio fornita di alette e circondata da uno schermo atto a ridurre la dispersione del calore. Esso comunque differisce dai catodi convenzionali per il fatto che le alette non sono rivestite d'altro che dalla pellicola monoatomica di cesio che si riproduce continuamente per condensazione. Durante il funzionamento la temperatura del raddrizzatore deve essere compresa fra 160-180° C allo scopo di mantenere la pressione di vapore fra 0,015 e 0,035 mm di mercurio.

Il cesio è l'elemento che ha il più basso potenziale di ionizzazione (3,88 V) e la più bassa tensione di estrazione; non era quindi difficile prevedere che la sua utilizzazione sarebbe risultata quanto mai conveniente. Il rendimento massimo del raddrizzatore a 250 V supera infatti il 98% in tutti gli esemplari realizzati a scopo sperimentale, essendo la caduta di tensione a 600 A di soli 3,30 V; la corrente massima può raggiungere i 2800 A, mentre la potenza assorbita per il riscaldamento del catodo è di 280 W.

Con caratteristiche siffatte questo nuovo raddrizzatore realizza un ulteriore passo verso il traguardo ideale del rendimento pari al 100%.

La realizzazione di questo raddrizzatore si presenta però estremamente ardua, non essendosi ancora scoperto un sistema idoneo a realizzare una saldatura fra vetro e metallo capace di assicurare la perfetta tenuta del vapore di cesio. A 200° C, che è la temperatura di saldatura più comune, il vapore di cesio riduce infatti gli ossidi di tutti i metalli generalmente impiegati eliminando in tal modo il legame fra i due corpi. Qualche miglioramento si è potuto ottenere con sostanze fortemente idrogenate o a base di platino, che però si sono dimostrate piuttosto deboli dal punto di vista meccanico.

Parecchi anni fa è stato studiato, nel Laboratorio di Ricerche della General Electric, un metodo di saldatura fra metallo e ceramica, usando come legante l'idruro di titanio. Saldature effettuate con questo sistema e impiegando leghe eutectiche di rame e argento, ovvero rame puro, sono apparse assolutamente integre anche dopo cento ore di esposizione al vapore di cesio a 400° C. Questa prova equivale ad un'esposizione di ben 100.000 ore alla temperatura di 200° C se, come si può verificare in molte reazioni chimiche, il tempo si raddoppia per ogni diminuzione di 20° C. Dei vari metalli provati, l'oro si è dimostrato completamente solubile nel cesio, l'argento un po' meno, l'eutectico rame-argento in misura ancor minore, mentre il rame, il nichelio ed il ferro sono apparsi completamente inattaccabili. Ciò consiglia l'impiego del rame come metallo di saldatura e quello del nichelio e del ferro come materiali strutturali.

## L'emissione elettronica nel vapore di cesio.

Le misure preliminari dell'emissione elettronica e della caduta di tensione sono state effettuate su un raddrizzatore il cui catodo è costituito da un cilindro di nichelio piuttosto spesso, del diametro di circa 12 mm, lungo 30, e con un foro di mm 6, entro cui è collocato l'elemento riscaldante di tung-

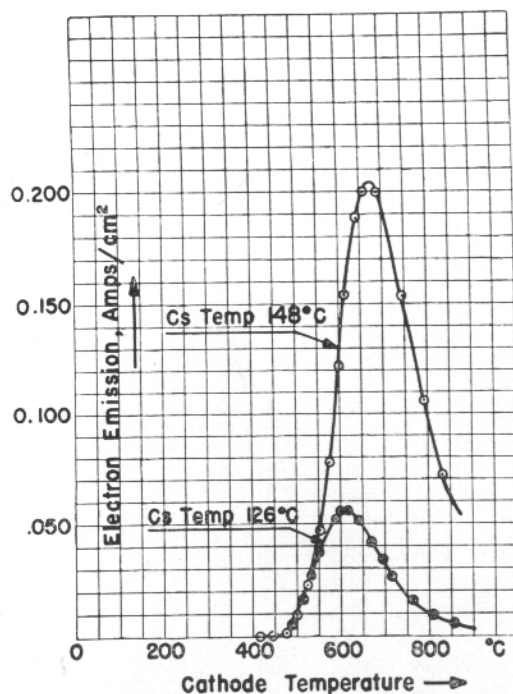


Fig. 1 - Variazione dell'emissione elettronica in funzione della temperatura catodica per diverse temperature del vapore di cesio.

steno circondato da un isolatore in ossido di torio. L'elevato spessore del cilindro assicura l'uniforme temperatura del catodo e ne permette la misura a mezzo di una termocoppia saldata alla superficie. La pressione del vapore di cesio si può controllare immergendo l'intero raddrizzatore in un bagno di olio di silicone mantenuto in agitazione con bollicine d'aria.

Le curve dell'emissione elettronica del cesio sono rappresentate nel diagramma della fig. 1 e concordano pienamente coi valori previsti da Taylor e Langmuir per i filamenti di tungsteno in vapore di cesio a bassa pressione. Come si vede, la corrente cresce rapidamente con la temperatura del catodo, raggiunge un massimo, e successivamente diminuisce dato che la temperatura diviene troppo alta per la conservazione dello strato monoatomico di cesio. I singoli punti delle curve sono stati ricavati applicando una tensione di 6 V fra l'anodo e il catodo che lavora in condizioni di quasi saturazione.

A temperature di cesio inferiori, la massima emissione elettronica del tungsteno si verifica quando lo spessore del rivestimento di cesio è un po' inferiore a quello corrispondente allo strato monoatomico, e più precisamente quando esso è circa pari

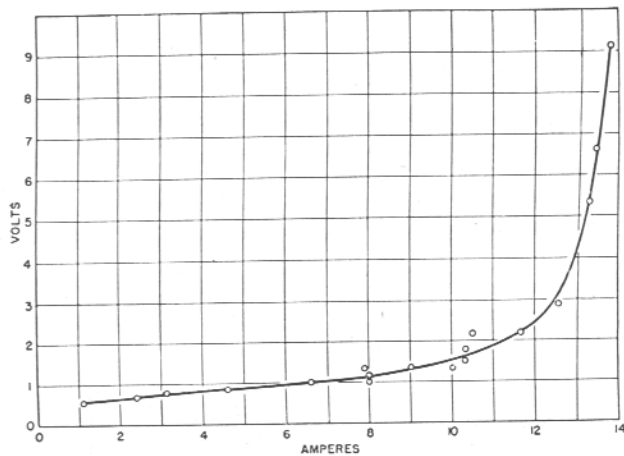


Fig. 2 - Emissione elettronica e caduta di tensione in un tubo sperimentale a vapore di cesio, con superficie catodica pari a 18 cm<sup>2</sup>. Le temperature del catodo e del cesio sono rispettivamente di 725 e 180° C.

al 67% dello stesso strato. In fig. 2 è visibile la curva corrente-caduta di tensione per una temperatura del cesio di 180° C (pressione del vapore 0,035 mm). Da essa risulta che al 50% della corrente di saturazione corrisponde una caduta di tensione di 1 V.

### Caratteristiche costruttive.

Le principali caratteristiche costruttive del raddrizzatore sperimentale al cesio, denominato tubo 103, risultano dalla fig. 3, in cui il catodo multicellulare schermato è circondato da un cilindro di acciaio inossidabile, del diametro di circa 120 mm, che funziona da anodo. Il cesio metallico ammonta a un grammo circa.

Il catodo è costituito da una serie di alette di nichelio non rivestite, disposte radialmente con i lati interni saldati al tubo, pure di nichelio, che costituisce il conduttore catodico. Il suddetto tubo è chiuso all'estremità inferiore in modo da consentire la normale saldatura del conduttore del filamento. Questo sistema evita possibili corti circuiti del filamento ad opera del cesio che tende a condensarsi sull'isolatore, ed inoltre il pericolo di archi a bassa tensione fra i capi del filamento stesso.

Allo scopo di ottenere una grande emissione elettronica con minime perdite di calore, la superficie di emissione delle alette viene accresciuta saldando una specie di garza di nichelio su entrambi i lati di ogni aletta.

Il complesso alettato è circondato da parecchi strati di foglio di nichelio dello spessore di 0,017 mm, accuratamente forati per ridurre l'area di contatto. Il tutto è infine racchiuso in un cilindro pure di nichelio, dello spessore di 0,7 mm. Anche questo cilindro, che funziona da schermo isolante termico, è forato per consentire la fuoruscita degli elettroni. Il numero ed il diametro dei fori è il risultato di un compromesso fra la necessità di contenere le perdite di calore e quella di impedire un'eccessiva riduzione della corrente per la diminuzione dell'area dei fori stessi. Sulla base delle prove effettuate, la superficie totale dei fori viene fatta corrispondere a circa il 10% dell'area totale dello schermo termico.

Il catodo è sostenuto da un cilindro di materiale

isolante ceramico, al quale viene saldato col processo anzidetto dell'idruro di titanio. L'esecuzione di questa saldatura è tale da assicurare un notevole spazio isolante nella superficie interna della ceramica; la sua posizione inoltre è tale da permettere agevolmente il riscaldamento dell'isolatore evitando così la condensazione del cesio. A seguito di esperienze si è dimostrato assai opportuno controllare la temperatura dell'estremità superiore inserendola nel sistema di circolazione d'olio.

La temperatura dell'anodo, nei raddrizzatori a vapore di cesio, deve essere limitata con molta maggior cura che nei cilindri a mercurio; essa deve essere mantenuta fra 170° C, temperatura di condensazione del cesio, e 400° C circa, dato che a questo valore l'emissione elettronica comincia a diventare sensibile. Questa limitazione viene realizzata facendo fluire olio di silicone, a conveniente temperatura, sopra tutte le su-

perfici — saldature, anodo, griglia — e successivamente attraverso un radiatore ad aria soffiata. Dopo l'iniziale riscaldamento, ottenuto mediante un resistore di tipo Calrod disposto intorno al tubo, la temperatura d'ingresso dell'olio è mantenuta costante mediante un termostato che comanda il funzionamento del ventilatore o l'inserzione del resistore a seconda dei casi. In tal modo la temperatura che controlla la pressione di vapore del cesio è mantenuta costante con l'approssimazione di 1 o 2° C, nonostante che tutte le altre parti del raddrizzatore raggiungano temperature assai più elevate. Una sovratemperatura all'uscita di circa 20° C può considerarsi completamente soddisfacente.

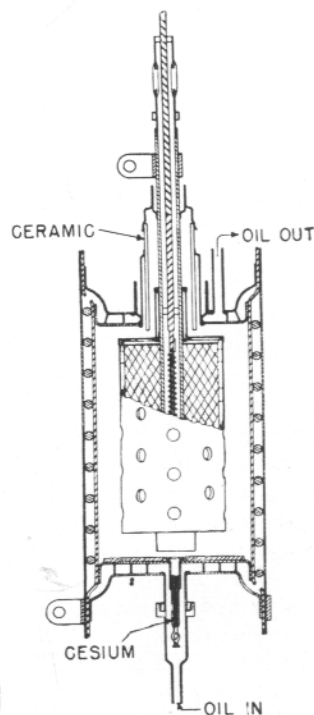


Fig. 3 - Raddrizzatore sperimentale al vapore di cesio (Tubo n. 103).

Per quanto riguarda la griglia, il solo problema inerente al suo impiego è quello di mantenere la temperatura della stessa entro limiti che sono ovviamente i medesimi dell'anodo. Nel tiratrone, noto come tubo 106, la griglia è costituita da un disco di rame, dello spessore di circa 6 mm e con fori pure da 6 mm, saldato in argento al cilindro metallico. Questo sistema si è però dimostrato inadatto per correnti elevate, a causa della difficoltà di controllare la temperatura della griglia. Ad esempio il raddrizzatore può funzionare bene erogando una corrente media di 50 A, e consentendo altresì un completo controllo di fase; a 120 A invece il controllo risulta possibile solo per brevi periodi di funzionamento dato che la griglia si riscalda a un punto tale da diventare essa pure una sorgente attiva,

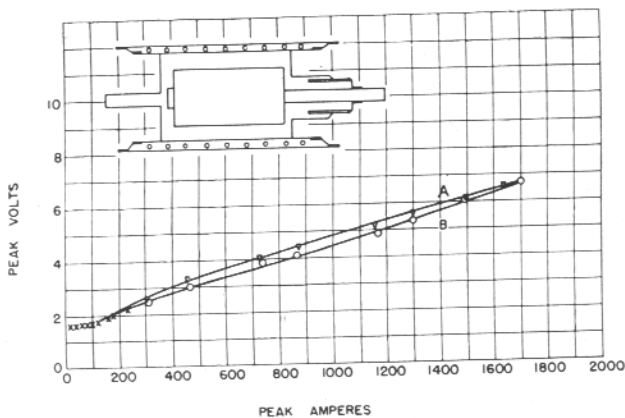


Fig. 4 - Caratteristiche tensione-corrente del tubo 103 con una temperatura del cesio pari a 170° C. La curva A è riferita a una potenza di riscaldamento del catodo pari a 225 W; la curva B ad una potenza di 280 W.

perdendo così la sua peculiarità di poter effettuare il controllo del raddrizzatore.

Migliori risultati si sono ottenuti con un tiratrone, denominato tubo 109, caratterizzato da un nuovo tipo di griglia; questa è costituita da una serie di tubicini metallici attraverso i quali circola l'olio di silicone che asporta l'eccesso di calore.

#### Dati sperimentali.

La fig. 4 mostra la tipica curva della caduta di tensione in funzione della corrente per il tubo 103 di fig. 3. I valori fino a 230 A sono stati ottenuti con funzionamento in corrente continua, mentre quelli maggiori sono stati ottenuti a corrente trifase alternata a 110 V, impiegando un oscillografo magnetico.

Appare evidente come la caduta di tensione è assai maggiore di quella di fig. 2. La causa va ricercata nel lungo e stretto percorso degli elettroni, reso inevitabile dallo schermo termico. La perdita totale rappresentata in fig. 5, dovuta alla potenza richiesta per il riscaldamento e alla caduta interna di tensione, si può calcolare con i valori deducibili dalle curve di fig. 4.

I calcoli presuppongono che il raddrizzatore eroghi corrente costante per un terzo di ciascun ciclo, in modo che la caduta di tensione sia quella corrispondente a tre volte la corrente media. Si vede subito che la perdita, e quindi il rendimento, è praticamente indipendente dalla variazione della potenza di riscaldamento, dato che un maggior valore di questa è compensato da una più bassa caduta. La perdita inoltre è pressochè indipendente

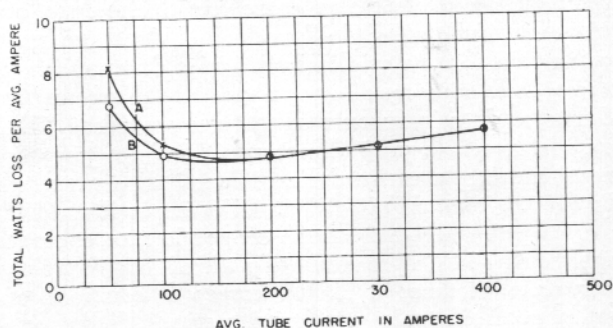


Fig. 5 - Perdita totale per ampere in funzione della corrente media, in funzionamento trifase. Curva A: potenza di riscaldamento al catodo: 280 W; curva B: 225 W.

dal carico entro una zona di variazione della corrente compresa fra 100 e 400 A medi.

Le stesse caratteristiche, ma riferite ai tubi 105 e 107, sono riportate nelle figg. 6 e 7. I singoli valori sono stati desunti da oscillogrammi presi dopo circa 1 minuto secondo di funzionamento, ad eccezione di quelli contrassegnati da un asterisco che sono stati rilevati dopo un minuto primo. Si nota chiaramente che la caduta di tensione è più bassa a pressioni di vapore maggiori. La diminuzione che si riscontra ad alte pressioni è molto minore di quanto non si verifichi nel caso di gas come argon e mercurio, che sono caratterizzati da stati metastabili e sono capaci di ionizzazione in due

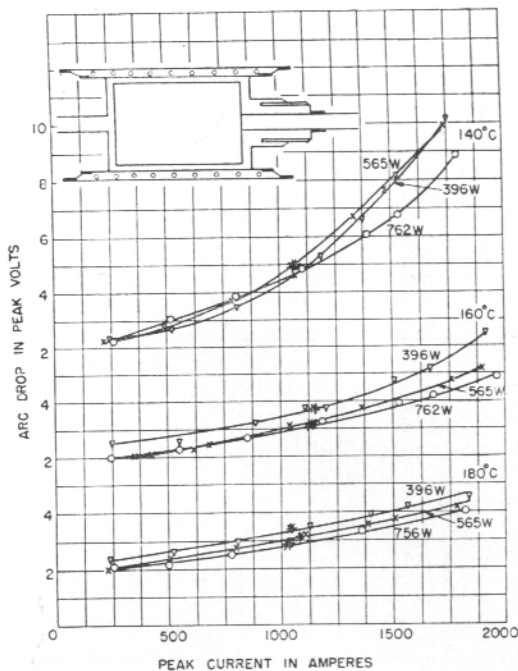


Fig. 6 - Caratteristiche tensione-corrente del tubo 105 per temperature del cesio pari a 140, 160 e 180° C (pressioni pari rispettivamente a 0,0055, 0,015 e 0,035 mm). Curva A, 400 W al catodo; B, 565 W; C, 760 W. Gli asterischi si riferiscono a letture effettuate dopo funzionamenti di un minuto primo.

stadi. La caduta di tensione decresce inoltre con l'aumento della temperatura catodica. L'imprevisto fenomeno viene interpretato come il risultato della disuniformità di temperatura, per cui solo una parte del catodo si trova al valore optimum richiesto per un certo valore di corrente erogata; ai valori più alti di questa, la parte di catodo all'optimum di temperatura è limitata alla sola zona periferica, ivi compresa la superficie interna dello schermo, la cui vicinanza all'anodo giustifica la bassa caduta di tensione.

La fig. 8 mostra la perdita totale riferita ad ampere medio, per il tubo 105. Essa è all'incirca costante per una corrente media compresa fra 200 e 600 A (cui corrispondono valori massimi rispettivamente di 600 e 1800 A) e per potenze di riscaldamento del catodo variabili fra 400 e 700 W, e risulta di circa 5 W per ampere medio. Ciò corrisponde ad un rendimento del 95% a 100 V, ovvero del 98% a 250 V. La fig. 9 rappresenta la caratteristica tensione-corrente del tiratrone di fig. 4 (tubo 109).

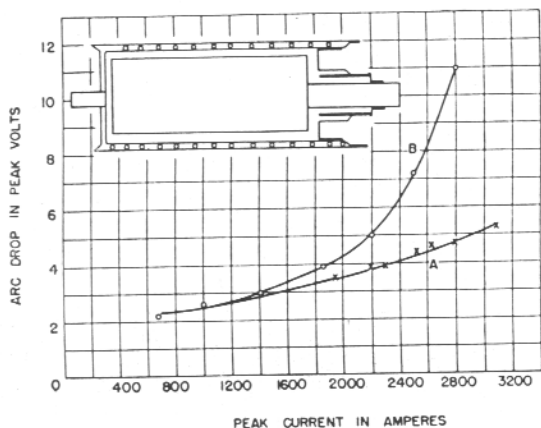


Fig. 7 - Caratteristiche tensione-corrente del tubo 107, a temperature del cesio pari a 160 e 180° C (rispettivamente curve A e B).

I valori numerici sull'emissione elettronica sono stati ricavati da oscillogrammi presi nel corso di prove di corto circuito con alimentazione in corrente alternata. Quando la corrente erogata da un tubo termoionico viene aumentata oltre un certo valore la caduta di tensione cresce rapidamente per l'insufficiente emissione catodica. Per raddrizzatori a vapori di cesio il limite di emissione viene convenzionalmente considerato come la corrente che provoca una caduta d'arco di 15 V. Con cadute di 20 o 30 V, si può verificare la formazione di macchie catodiche anche sulla superficie esterna dello schermo, il che evidentemente dà luogo ad un'emissione anormale. Per il tubo 103, con una temperatura del cesio di 170° C e una potenza di riscaldamento catodico pari a 280 W, la massima emissione elettronica, come sopra definita, è risultata di 2850 A. Questo valore corrisponde ad una emissione di 1,25 A/cm<sup>2</sup> della superficie catodica e ad un rendimento di 10 A per watt di potenza riscaldante. Per il nichelio rivestito di cesio esso equivale a 1,63 W per ampere, il che corrisponde a più di 16 volte il calore totale fornito dall'esterno per riscaldare il catodo al massimo carico del raddrizzatore. Se ne deduce che il calore applicato serve per la massima parte a compensare le perdite per radiazione e che praticamente tutto il calore occorrente per provocare l'emissione elettronica deve essere fornito dal circuito anodico sotto forma di radiazione e di forza d'urto degli atomi e ioni convenientemente eccitati. Queste perdite vengono conglobate nella caduta di tensione. Il suddetto meccanismo di riscaldamento catodico implica un equilibrio fra il « calore di ritorno » ed il raffreddamento della sorgente emissiva vera e propria, in modo da mantenere costante la temperatura del catodo; ciò è particolarmente importante nei raddrizzatori a vapore di cesio, dato che l'emissione elettronica diminuisce rapidamente con la variazione di temperatura sia in un senso che nell'altro (fig. 1). Gli oscillogrammi presi col tubo 105, subito dopo la chiusura del circuito e dopo 1 minuto primo di funzionamento, non mostrano alcuna differenza nella caduta d'arco, anche con correnti medie di 400 A (pari a 1200 A massimi).

Ciò conferma un sufficiente equilibrio nel raddrizzatore e contrasta notevolmente col comporta-

mento dei raddrizzatori a vapori di mercurio di analoga costruzione, nei quali il calore di ritorno supera di gran lunga l'azione raffreddante.

### «Limite del gas» e magnetostrizione.

Come ben noto, l'emissione elettronica non è la sola causa della limitazione della corrente nei raddrizzatori a gas. Un'altra possibile causa risiede nel cosiddetto « limite del gas », vale a dire nel prodotto della densità di vapore per la minima sezione retta totale disponibile per la scarica. Nel caso specifico la sezione limitatrice è rappresentata dalla superficie dei fori sullo schermo; per il tubo 103 quest'area è di 30 cm<sup>2</sup>. Estrapolando i valori risultanti da misure precedenti risulta che la massima densità di corrente nel vapore di mercurio a 0,023 mm è di 100 A/cm<sup>2</sup>.

La densità di corrente rilevata nel vapore di cesio è invece pari a 2850/30 = 95 A/cm<sup>2</sup> ed è perciò assai prossima al suddetto limite se si ammette che il cesio ed il mercurio si comportino in modo analogo nei confronti del massimo grado di ionizzazione. Esiste però un terzo elemento limitatore nei tubi per correnti elevate, e cioè l'effetto del campo magnetico dovuto alla corrente vera e propria. Quest'effetto è stato già previsto da molto tempo nei raddrizzatori a vapore di mercurio, tuttavia non si è mai potuto dimostrarlo rigorosamente. I valori di caduta indicati nella fig. 7 starebbero comunque a confermare che tale limitazione esiste sicuramente nel caso del tubo 107. Come sopra detto, i catodi dei tubi 107 e 105 sono identici salvo che nelle rispettive lunghezze il cui rapporto è pari a 1,56. Si sarebbe pertanto indotti a pensare che la caduta in questi tubi sia la stessa quando le correnti e le potenze assorbite dal riscaldamento catodico stiano fra loro in questo rapporto: ad esempio, che la caduta d'arco nel tubo 107 a 2800 A e 1000 W sia la medesima di quella nel tubo 105 a 1800 A e 700 W. Il confronto fra le figg. 6 e 7 mostra invece che le cose si presentano in modo ben diverso.

All'alta temperatura del cesio (curva A, fig. 7 e curva 180° C, fig. 6) le cadute sono all'incirca dello stesso ordine di grandezza e cioè rispettivamente 4,9 e 3,9 V. A 160° C (curva B, fig. 7 e curva 160° C, fig. 6) esse risultano invece di 11 e 4,5 V. Sembra senz'altro verosimile che la differenza di

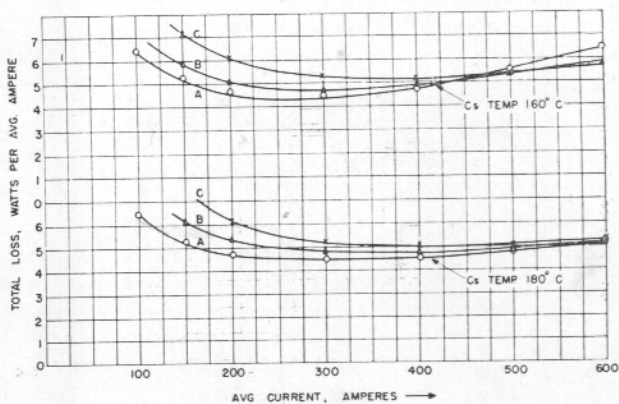


Fig. 8 - Perdita totale per ampere medio nel tubo 105. Le curve A sono riferite a potenze di riscaldamento catodico pari a 400 W, le B a 565 W e le C a 760 W.

caduta nei tubi sia dovuta all'effetto antagonista del campo magnetico più forte che si verifica nel catodo più lungo, dato che quest'effetto è inversamente proporzionale alla pressione di vapore per la maggior lunghezza libera del percorso degli elettroni.

Considerando la zona di catodo più prossima al morsetto, una corrente di 2800 A, attraversante il catodo, produrrebbe un campo di 450 gauss lungo l'orlo interno delle alette, 185 gauss al centro a 120 gauss all'orlo esterno.

Si è potuto verificare l'effetto di tali campi circondando il tubo 105 con un solenoide, avente sia il diametro che la lunghezza pari a 250 mm, costituito da 340 spire. Una corrente di 15 A in questa bobina produce, all'incirca nel suo centro, un campo di 188 gauss. Esso risulta uguale a quello prodotto al centro delle alette da una corrente di 2800 A; entrambi i campi formano un angolo di 90° con la direzione della corrente elettronica. I valori di caduta con e senza questo campo risultano dagli oscillogrammi di fig. 10.

Vi si vede chiaramente come la caduta di tensione a 1800 A subisca un aumento, a causa del campo magnetico, da 5,3 a 11,3 V.

La circostanza che l'aumentata caduta risulti la medesima di quella della curva B, fig. 7, è puramente occasionale, dato che la conformazione geometrica dei campi è completamente diversa. E' evidente comunque che l'effetto è assai sensibile.

I valori trovati dimostrano che quando la corrente nel tubo più lungo 107 si avvicina a 2800 A, la zona catodica più prossima al morsetto si trova praticamente nell'impossibilità di contribuire all'emissione elettronica, a causa appunto del campo magnetico provocato dalla corrente che fluisce lungo il gambo del catodo.

#### Prove a carico.

Queste prove sono state eseguite usando un circuito di potenza trifase a stella ad una tensione di fase di 264 V efficaci e ad una tensione di carico di 309 V c.c.

I tubi 103 e 109 hanno superato tutte le prove, senza archi di ritorno, alla corrente nominale di 200 A. Esse comprendevano un funzionamento di 8 ore a 200 A, di 2 ore a 300 A e di 1 minuto primo a 400 A. La corrente massima istantanea ha raggiunto i 3000 A circa.

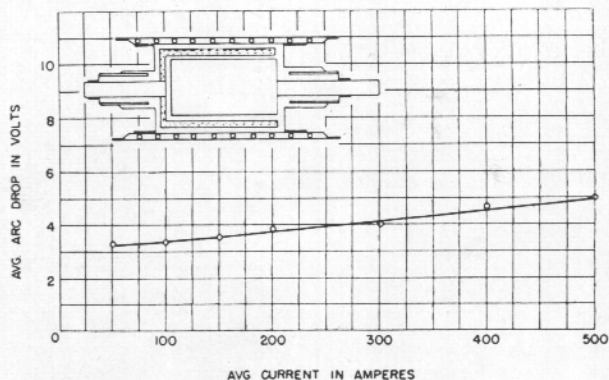


Fig. 9 - Caratteristiche tensione-corrente del tiratrone di fig. 4 ad una temperatura del cesio pari a 160° C (pressione 0,015 mm) e con 240 W di riscaldamento catodico.

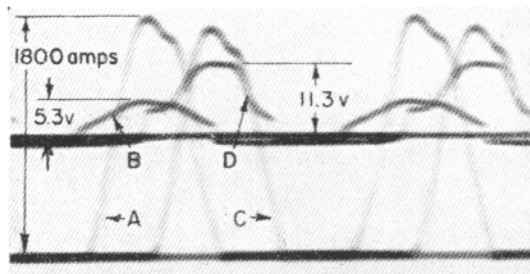


Fig. 10 - L'oscillogramma mostra l'aumento della caduta di tensione nel tubo 105 prodotto da un campo magnetico di 188 gauss. Curve A e B, corrente e caduta di tensione senza campo; C e D, col campo magnetico. Questo determina un aumento della caduta da 5,3 a 11,3 V.

Anche i tubi 105 e 107 hanno funzionato soddisfacentemente a 400 A, pur non tollerando sovraccarichi del 50 %.

Il tubo 109 ha consentito il regolare controllo di griglia fino a 100 A medi, richiedendo, per impedire l'adescamento, un potenziale negativo di soli 4 V.

In questa prova si è osservato che la corrente di dispersione sull'isolatore ceramico richiedeva un controllo di griglia potente. Alla corrente media di 200 A, la griglia poteva effettuare il comando solo per un tempo brevissimo, mostrando così l'esistenza di una corrente di dispersione eccessiva, ovvero l'emissione elettronica di qualche elemento strutturale riscaldato eccessivamente dalla scarica.

#### Conclusioni.

Le prove effettuate dimostrano che la bassa caduta di tensione e l'alta emissione elettronica, che costituiscono le caratteristiche fondamentali del cesio, possono essere senz'altro utilizzate in raddrizzatori a gas sia per l'alto rendimento che per la sicurezza di esercizio. I risultati dimostrano anche che, con un adatto dimensionamento, i raddrizzatori al cesio ed i tiratrone possono essere previsti per qualunque valore di corrente e per tensioni almeno fino a 300 V.

I problemi costruttivi che richiedono tuttora ulteriori ricerche sono quelli inerenti sia alle perdite di dispersione sugli isolatori ceramici in presenza di vapore di cesio, sia agli effetti del campo magnetico.

Per quanto riguarda il primo punto si confida nella possibilità di scoprire materiali ceramici inattaccabili dal cesio e capaci di rendere trascurabile l'entità delle perdite di dispersione.

Anche l'effetto del campo magnetico richiede ulteriori indagini. Occorre tuttavia tener presente che quest'effetto è stato osservato solo per elevate correnti in piccoli raddrizzatori, e di conseguenza può probabilmente essere evitato con un'oculata progettazione degli apparecchi; esso infatti è apparso irrilevante con densità di corrente dell'ordine di quelle proprie dei normali raddrizzatori a vapore di mercurio. Tali effetti di magnetostrizione non sono invece da attendersi nei raddrizzatori al cesio per forti correnti, purchè i tubi vengano sistemati in custodie di dimensioni appropriate, paragonabili a quelle dei raddrizzatori di pari potenza a vapore di mercurio.

*I tubi descritti sono ancora allo stadio sperimentale e non vengono perciò costruiti per la vendita.*