

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-72/126

A. Echarri e G. Pasotti : STUDI SUL DIMENSIONAMENTO DI ALTERNATORI SUPERCONDUTTORI.

Estratto da: Alta Frequenza 11, 910 (1972)

STUDI SUL DIMENSIONAMENTO DI ALTERNATORI SUPERCONDUTTORI

A. ECHARRI (*) - G. PASOTTI (**)

Vengono analizzate quattro versioni di alternatori trifasi con induttore superconduttore aventi due o quattro poli e l'indotto esterno oppure interno. Viene riportata la distribuzione radiale del campo magnetico prodotto da induttori di diverso spessore e vengono considerati gli effetti della reazione d'armatura al variare della densità di corrente e delle dimensioni dell'indotto.

È stata infine ricavata una serie di grafici della potenza in funzione dei parametri di progetto della macchina per tutti i casi precedentemente considerati.

1. - GENERALITÀ.

L'aumento della richiesta di energia elettrica nel mondo e la necessità di ridurre i costi di produzione, hanno portato ad accrescere continuamente le dimensioni dei generatori. I maggiori turboalternatori a 2 e 4 poli attualmente in funzione hanno rispettivamente potenze di 1000 e 1400 MVA.

È noto che per una frequenza prefissata, la potenza di una macchina elettrica dipende tra l'altro dal quadrato del diametro D del rotore, dalla sua lunghezza l , dall'induzione magnetica B e dalla densità di corrente J_a nei conduttori dell'indotto. Negli ultimi venti anni il prodotto D^2l è aumentato di circa 4 volte, grazie soprattutto ai progressi nella tecnologia degli acciai speciali, ma si ritiene che gli incrementi futuri saranno assai meno importanti. Nello stesso periodo di tempo l'induzione nel traferro è aumentata di circa il 20% ma probabilmente l'attuale limite non subirà variazioni apprezzabili a causa della saturazione del ferro. D'altra parte la densità di corrente negli avvolgimenti è limitata dalle perdite Joule e dai relativi problemi di raffreddamento.

L'avvento dei materiali superconduttori, soprattutto $Nb-Ti$ e Nb_3Sn , ha aperto la possibilità di aumentare la potenza massima ed il rendimento degli alternatori; infatti tali materiali permettono la costruzione di induttori operanti a densità di corrente e induzioni assai elevate ($J \approx 10^8$ A/m², $B \approx 6-8$ T) con minime dissipazioni di energia. Inoltre questi materiali dovrebbero permettere notevoli risparmi sui costi di fabbricazione delle macchine di elevata potenza.

Negli ultimi anni sono stati compiuti molti studi [1-11] e sono stati realizzati alcuni alternatori sperimentali [12, 13] per saggiare la possibilità di utilizzare i superconduttori in questo tipo di macchine.

A titolo di esempio riportiamo che in Francia è stato eseguito un confronto tra un alternatore tradizionale da 600 MVA ed uno di pari potenza con induttore superconduttore. Dai calcoli è risultato che quest'ultimo può

avere un rotore con un diametro inferiore del 30%, un'induzione tre volte superiore, una lunghezza ed un peso pari a un terzo rispetto a quello tradizionale.

Attualmente, presso il Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) è in corso di realizzazione un alternatore da 1 MVA con induttore superconduttore [14] e sono allo studio altre macchine con potenze comprese tra 1000 e 10 000 MVA.

Come è noto, i materiali superconduttori attualmente a disposizione presentano proibitive dissipazioni quando sono percorsi da correnti alternate a frequenza industriale e sono sottoposti ad un campo magnetico anche assai debole (0,1 T). Per questa ragione tutti gli alternatori di cui si è precedentemente parlato sono stati progettati con l'induttore superconduttore e l'indotto in rame. L'unica eccezione è rappresentata da un alternatore [13] con indotto ed induttore in Nb_3Sn il quale però durante le prove ha presentato considerevoli problemi di raffreddamento dell'indotto.

In fig. 1 è rappresentata schematicamente la sezione di due alternatori superconduttori, uno con l'indotto esterno all'induttore ed uno con l'indotto interno. In entrambe le versioni l'induttore superconduttore deve essere mantenuto alla temperatura di circa 4,5 K e pertanto è necessario racchiuderlo in un criostato contenente elio liquido.

Poiché negli alternatori di elevata potenza non è pensabile di far ruotare l'indotto, sorgono notevoli problemi di carattere meccanico e criogenico dalla necessità di far ruotare il criostato contenente l'induttore. Le difficoltà comprensibilmente aumentano se l'induttore è posto esternamente come come in fig. 1 b. Molti laboratori sono impegnati in ricerche su questi problemi e qualche soluzione accettabile comincia ad apparire [9, 10, 14].

Il calore che entra nel criostato fa evaporare l'elio liquido, che deve quindi essere continuamente rinnovato mediante un liquefattore a ciclo chiuso; il costo di tale apparecchiatura è una parte considerevole di quello dell'intera macchina. A titolo informativo riportiamo che il costo di un liquefattore per elio con capacità frigorifera dell'ordine dei kW, come è richiesto per questo tipo di costruzioni, vale in milioni, $C \approx 180 Q^{0,52}$, dove Q è la capacità frigorifera a 4,5 K espressa in kW. La potenza elettrica necessaria ad alimentare un tale liquefattore è circa 500 volte Q [15].

Lo scopo di questo articolo è di analizzare, partendo dal modello matematico di Stekly e Woodson [2], quattro versioni di alternatori trifasi: con induttore superconduttore a 2 e 4 poli e con indotto esterno ed interno.

2. - ELENCO DEI SIMBOLI E RELAZIONI GENERALI.

R_1 = raggio interno dell'avvolgimento di campo;
 R_2 = raggio esterno dell'avvolgimento di campo;

(*) Attualmente professore incaricato di fisica presso l'Università di Granada (Spagna).

(**) Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN.

R_i = raggio interno dell'avvolgimento indotto; W_f = energia magnetica immagazzinata nell'avvolgimento di campo;
 R_0 = raggio esterno dell'avvolgimento indotto; J_f = densità di corrente media nell'avvolgimento di campo;
 $y = R_1/R_2$, $x = R_i/R_0$, $s = \varrho/R_2$, (ϱ = distanza di un generico punto P dall'asse, fig. 1);

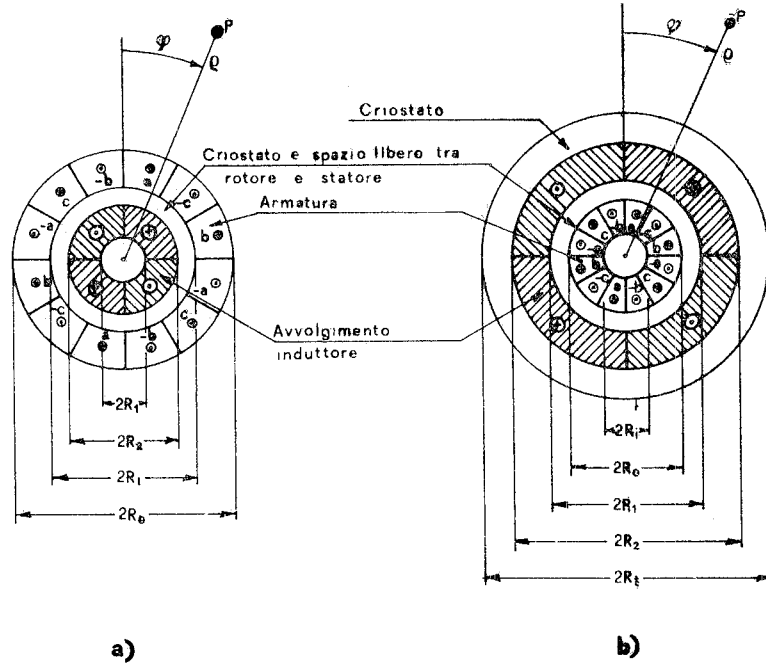


Fig. 1. — Sezione schematica di un alternatore trifase a quattro poli.
 a) Con indotto esterno; b) con indotto interno.

d = spaziatura tra gli avvolgimenti del rotore e dello statore ($d = R_i - R_2$ in fig. 1 a e $d = R_1 - R_0$ in fig. 1 b);
 l = lunghezza della macchina;
 $R_2/R_0 = x/\beta_0$ per la disposizione di fig. 1 a;
 $\beta_0 = (R_2 + d)/R_2$;
 $R_0/R_2 = y/\beta_i$ per la disposizione di fig. 1 b;
 $\beta_i = (R_0 + d)/R_0$;
 n = numero di coppie polari;
 $\omega = 2\pi f$ = pulsazione;
 R = resistenza del carico per fase;
 L = induttanza del carico per fase;
 R_a = resistenza d'armatura per fase;
 L_a = induttanza d'armatura per fase;
 L_f = induttanza dell'avvolgimento di campo;
 M = valore massimo della mutua induttanza tra l'avvolgimento di campo ed una fase dell'avvolgimento di armatura;
 K = valore massimo del coefficiente di accoppiamento tra l'avvolgimento di campo ed una fase dell'indotto;
 $L_{A,2n}$; $L_{F,2n}$; $m_{0,2n}$; $m_{i,2n}$; $k_{0,2n}$; $k_{i,2n}$; $p_{0,2n}$; $p_{i,2n}$ = coefficienti relativi rispettivamente a induttanza, mutua induttanza, accoppiamento magnetico e potenza, le cui espressioni matematiche in funzione dei parametri x e y sono riportate in tab. 1.
 $\alpha = R_a/R$;
 $Q_m = 3\omega L_a/2R$;
 $Q_L = \omega L/R$;

J_a = densità di corrente media nell'avvolgimento di armatura (valore massimo);
 $\gamma = J_a/J_f$;
 N_f = numero di spire nell'avvolgimento di campo;
 N_a = numero di spire per fase nell'armatura;
 I_f = corrente nell'induttore;
 I_a = valore efficace della corrente d'armatura;
 V_a = valore efficace della tensione di fase erogata;
 $P_{c.e.}$ = potenza apparente erogata; induttore alimentato con corrente costante;
 $P_{f.e.}$ = potenza apparente erogata; induttore funzionante a flusso concatenato costante.

In tutto il testo si è usato il sistema di unità di misura *M. K. S.*

Riportiamo una serie di relazioni tra le grandezze precedenti, che verranno utilizzate nel testo.

$$(1) \quad L_a = \mu_0 N_a^2 l L_{A,2n}$$

$$(2) \quad N_f I_f = \pi (R_2^2 - R_1^2) J_f / 2 = \pi R_2^2 J_f (1 - y^2) / 2$$

$$(3) \quad N_a I_a = \pi (R_0^2 - R_i^2) J_a / 6 \sqrt{2} = \pi R_0^2 J_a (1 - x^2) / 6 \sqrt{2}$$

dalla quale si ottiene:

$$(4) \quad N_a I_a / N_f I_f = (J_a / J_f) (R_0^2 / R_2^2) \cdot [(1 - x^2) / (1 - y^2)] / 3 \sqrt{2}$$

$$(5) \quad L_f = \mu_0 N_f^2 l L_{F,2n}$$

TABELLA 1. — Coefficienti relativi all'autoinduttanza, mutua induttanza, accoppiamento magnetico e potenza, in funzione dei parametri x e y (trascurando gli effetti relativi alle estremità della macchina) [2].

	$n = 1$ (Dipolo)	$n = 2$ (Quadrupolo)
L_F	$L_{F2} = 16 (1 + 3 y^4 - 4 y^8) / 3 \pi^2 (1 - y^2)^2$	$L_{F4} = 2 [1 - y^4 - 4 y^4 \ln(1/y)] / \pi^2 (1 - y^2)^2$
L_A	$L_{A2} = 12 (1 + 3 x^4 - 4 x^8) / \pi^2 (1 - x^2)^2$	$L_{A4} = 9 [1 - x^4 - 4 x^4 \ln(1/x)] / 2 \pi^2 (1 - x^2)^2$
Armatura all'esterno	$m_{o2} = 16 (1 - y^2) / \pi^2 (1 + x) (1 - y^2)$ $k_{o2}^2 = 4 (1 - x^2)^2 (1 - y^2)^2 / (1 + 3 x^4 - 4 x^8) \cdot$ $\cdot (1 + 3 y^4 - 4 y^8)$ $p_{o2} = \pi^2 (1 - y^2)^2 m_{o2}^2 / 4 L_{A2}$	$m_{o4} = 6 (1 + y^2) \ln(1/x) / \pi^2 (1 - x^2)$ $k_{o4}^2 = 4 (1 - y^2)^2 [\ln(1/x)]^2 / [1 - x^4 - 4 x^4 \ln(1/x)] \cdot$ $\cdot [1 - y^4 - 4 y^4 \ln(1/y)]$ $p_{o4} = \pi^2 (1 - y^2)^2 m_{o4}^2 / 4 L_{A4}$
Armatura all'interno	$m_{i2} = 16 (1 - x^2) / \pi^2 (1 + y) (1 - x^2)$ $k_{i2}^2 = 4 (1 - y^2)^2 (1 - x^2)^2 / (1 + 3 y^4 - 4 y^8) \cdot$ $\cdot (1 + 3 x^4 - 4 x^8)$ $p_{i2} = \pi^2 (1 - y^2)^2 m_{i2}^2 / 4 L_{A2}$	$m_{i4} = 6 (1 + x^2) \ln(1/y) / \pi^2 (1 - y^2)$ $k_{i4}^2 = 4 (1 - x^2)^2 [\ln(1/y)]^2 / [1 - y^4 - 4 y^4 \ln(1/y)] \cdot$ $\cdot [1 - x^4 - 4 x^4 \ln(1/x)]$ $p_{i4} = \pi^2 (1 - y^2)^2 m_{i4}^2 / 4 L_{A4}$

(6)

$$W_f = (1/2) L_f I_f^2 = \mu_0 l L_{F,2n} R_2^4 J_f^2 \pi^2 (1 - y^2)^2 / 8$$

(7)

$$M = \mu_0 l N_a N_f (R_2/R_0)^n m_{0,2n}$$

per il caso con armatura esterna.

(8)

$$M = \mu_0 l N_a N_f (R_0/R_2)^n m_{i,2n}$$

per il caso di armatura interna.

(9)

$$K_0^2 = M^2 / L_a L_f = k_{0^2,2n} (R_2/R_0)^{2n}$$

per il caso con armatura esterna.

(10)

$$K_i^2 = M^2 / L_a L_f = k_{i^2,2n} (R_0/R_2)^{2n}$$

per il caso con armatura interna.

3. — ANDAMENTO DEL CAMPO MAGNETICO ED EFFETTI DELLA REAZIONE D'ARMATURA.

Nella fig. 2 *a*, *b* riportiamo la distribuzione dell'induzione radiale in funzione di s , nella posizione corrispondente a $\varphi = 0$ (fig. 1). Da questi grafici sembrerebbe più

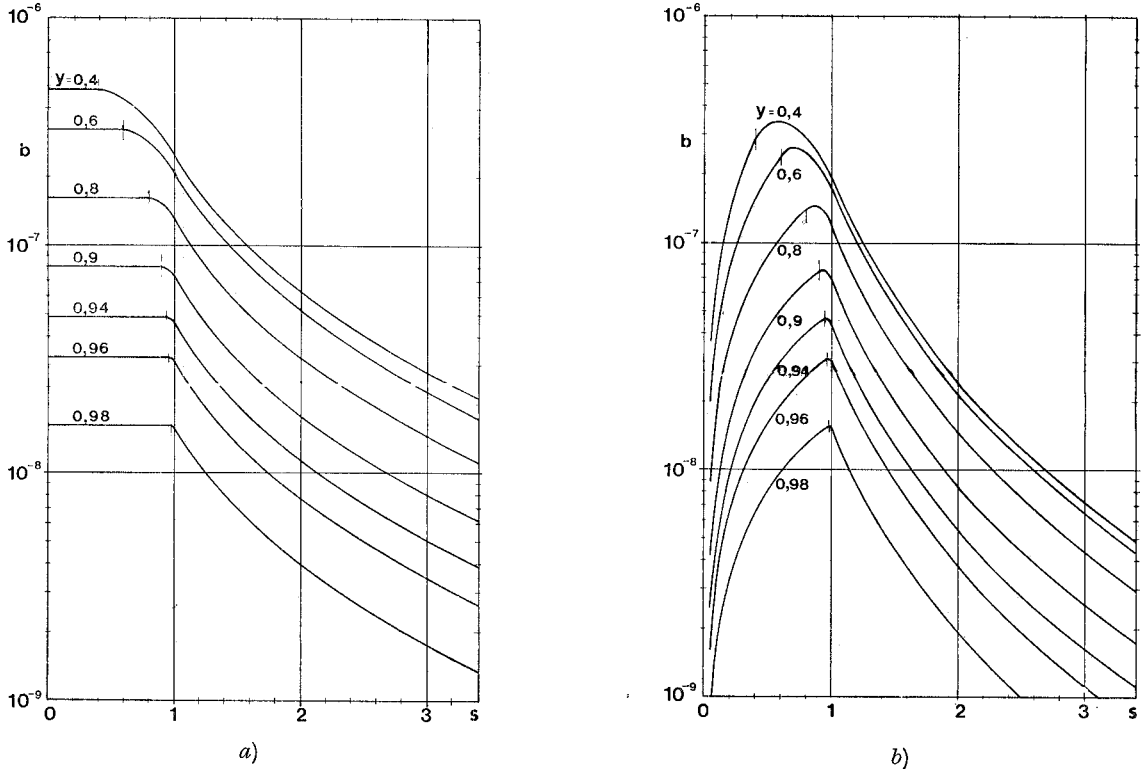
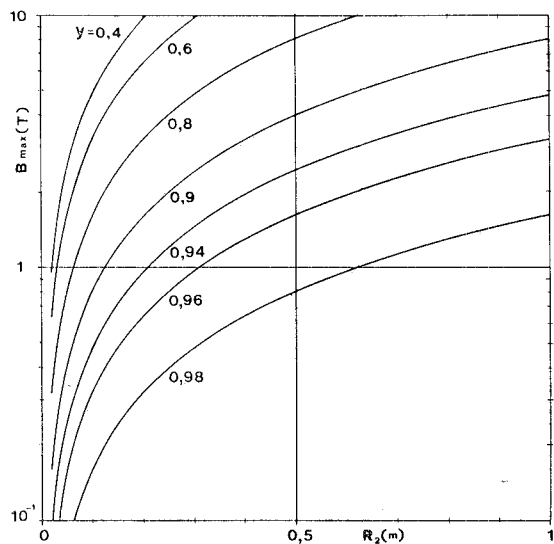


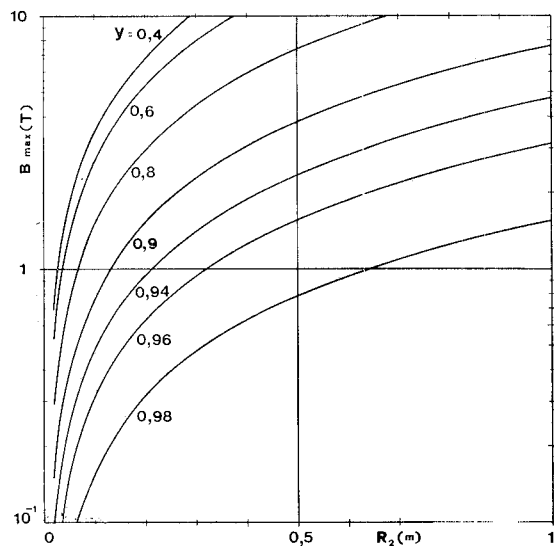
Fig. 2. — Andamento dell'induzione radiale (B_r) normalizzata, $b = B_r/R_2 J_f$ in funzione della posizione radiale normalizzata $s = \rho/R_2$; posizione angolare $\varphi = 0$ (v. fig. 1.).
a) In un dipolo; *b*) in un quadrupolo.

conveniente, almeno nel caso del dipolo, porre l'armatura all'interno dove il campo è più intenso. È facile constatare però che per uno stesso magnete induttore il flusso tagliato da un'armatura posta all'esterno risulta sensibilmente uguale a quello di un'armatura posta all'interno.

Nella fig. 3 *a*, *b* riportiamo il valore massimo dell'induzione cui è sottoposto l'avvolgimento superconduttore, in funzione del suo raggio esterno R_2 , quando la sua densità di corrente media è $J_f = 10^8$ A/m². Tali grafici tengono conto del campo continuo prodotto dal magnete stesso e non di quello dovuto alla reazione d'armatura.



a)



b)

Fig. 3. — Valor massimo dell'induzione prodotta da un magnete di raggio esterno R_2 per $J_f = 10^8$ A/m².
a) In un dipolo; *b)* in un quadrupolo.

La valutazione del campo generato dall'indotto può essere fatta per mezzo dei grafici 2 *a* e 2 *b*, sostituendo R_0 ad R_2 , J_a a J_f ed α a y . Se J_a è dello stesso ordine di grandezza di J_f gli effetti del campo di indotto sono assai rilevanti. Consideriamo una macchina dipolare sce-

gliendo per l'induttore superconduttore i seguenti parametri: $J_f = 10^8$ A/m², $y = 0,8$, $R_2 = 0,25$ m, quindi $R_1 = 0,2$ m; il campo massimo prodotto è di circa 4 T.

Scegliamo la disposizione con indotto interno avente $\alpha = 0,8$, $R_0 = 0,166$ m ($\beta_i = 1,2$) e consideriamo tre valori per la densità di corrente: $J_a = 10^6 - 10^7 - 10^8$ A/m². Nel primo caso il campo prodotto dall'indotto è trascurabile ($B_{max} = 0,026$ T) ma la densità di corrente J_a è debole, perciò la potenza ottenuta dalla macchina è bassa rispetto al costo. Con $J_a = 10^7$ A/m², valore accettabile se l'indotto è raffreddato con acqua o con gas liquefatti, il valore massimo del campo alternato prodotto dall'armatura è 0,26 T. Essendo però tale campo sincrono con l'induttore, il materiale superconduttore è sottoposto solo ad un campo continuo di circa 0,14 T di cui bisogna tener conto in sede di progetto ma che non crea eccessive preoccupazioni. Le bobine di campo sono sottoposte pure ad armoniche, la cui frequenza ed intensità dipendono dal tipo di avvolgimento scelto per l'indotto, ma che possono essere ridotte a valori trascurabili ponendo uno schermo di rame tra indotto e induttore, solidale con quest'ultimo. Una densità di corrente $J_a = 10^8$ A/m² può essere assunta, almeno in linea di principio, per un indotto superconduttore. In tal caso però l'armatura sarebbe sottoposta non solo ad un campo continuo di 4 T, ma anche ad un campo alternato di 2,6 T, attualmente impensabile. L'induttore sarebbe in questo caso sottoposto ad un campo sincrono di circa 1,4 T.

Il campo sull'induttore dovuto alla reazione d'indotto salirebbe a quasi 6 T con un'armatura posta all'esterno avente ancora $J_f = 10^8$ A/m², $\alpha = 0,8$, $\beta_0 = 1,2$.

Nelle macchine a quattro poli, con una opportuna scelta dei parametri, la reazione d'indotto risulta sensibilmente diminuita ma con $J_a = 10^8$ A/m² essa rimane comunque elevata.

Da quanto detto appare assai problematico fare previsioni sulla futura possibilità di costruire alternatori con indotto superconduttore. Molte ricerche sono state svolte sinora per tentare di produrre fili superconduttori adatti a questo scopo, sono state effettuate molte misure di perdite in corrente alternata in varie condizioni di lavoro, ma altre ricerche restano ancora da compiere; ad esempio poco si sa sulla stabilità delle correnti alternate in materiali superconduttori sottoposti anche ad un campo magnetico continuo [16].

4. — CALCOLO DELLA POTENZA.

Se si alimentano gli avvolgimenti di campo con corrente costante ed il carico esterno è bilanciato, valgono le seguenti formule [2], per la corrente e la tensione erogate:

(11)

$$I_a = \omega M I_f / \sqrt{2} R [(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L)^2]^{1/2}$$

(12)

$$V_a = \omega M I_f (1 + Q_L^2)^{1/2} / \sqrt{2} [(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L)^2]^{1/2}$$

La potenza apparente erogata è:

$$P_{c.e.} = 3 V_a I_a = 2 K^2 \omega W_f Q_m (1 + Q_L^2)^{1/2} / [(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L)^2].$$

Se gli avvolgimenti superconduttori di campo, dopo essere stati alimentati alla corrente prefissata I_f , vengono invece cortocircuitati mediante un filo superconduttore, rimane concatenato con essi un flusso costante λ_0 ; la corrente I_a e la tensione V_a assumono in tal caso i seguenti valori:

$$I_a = \sqrt{2} Q_m K^2 \lambda_0 [(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L)^2]^{1/2} / 3 M \cdot$$

$$\cdot \{(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L) [Q_m (1 - K^2) + Q_L]\}$$

$$V_a = \frac{\omega M \lambda_0 [(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L)^2]^{1/2} (1 + Q_L^2)^{1/2}}{L_f \sqrt{2} \{(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L) [Q_m (1 - K^2) + Q_L]\}}$$

e la potenza erogata diventa:

$$P_{f.c.} = \frac{\omega \lambda_0^2}{L_f} \frac{Q_m K^2 [(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L)^2] (1 + Q_L^2)^{1/2}}{\{(\alpha + 1)^2 + (Q_m + Q_L) [Q_m (1 - K^2) + Q_L]\}^2}$$

Facciamo notare che operando in quest'ultima maniera, quando il carico diventa induttivo, la reazione d'armatura provoca un aumento della corrente nell'induttore poichè il flusso da esso abbracciato deve rimanere costante. Questo fenomeno risulta particolarmente pericoloso in caso di cortocircuito dell'alternatore poichè, essendo bassa la resistenza dell'indotto, il circuito risulta essenzialmente induttivo e percorso da corrente elevata; ciò può portare al superamento della corrente critica nel superconduttore ed alla sua transizione.

Per rendere più agevoli i calcoli adottiamo d'ora in poi le seguenti ipotesi semplificative: $Q_L = 0$ e $\alpha = 0$ che equivalgono a porre uguale ad uno il fattore di potenza del carico esterno ed a trascurare la resistenza dell'indotto rispetto a quella del carico; la potenza $P_{c.c.}$ si riduce allora a:

$$P_{c.c.} = 2 \omega K^2 W_f [Q_m / (1 + Q_m^2)]$$

Dalle relazioni precedenti si può ricavare che la potenza erogata con l'induttore operante a flusso concatenato costante vale:

$$P_{f.c.} = P_{c.c.} \cdot \{(1 + Q_m^2) (1 - K^2) / [1 + Q_m^2 (1 - K^2)]\}^2$$

e poichè K^2 è sempre inferiore all'unità, per qualunque valore di Q_m si ha sempre $P_{f.c.} < P_{c.c.}$.

In fig. 4 sono riportati in grafico gli andamenti del coefficiente di accoppiamento K^2 in funzione del parametro x , per induttori dipolari e quadrupolari, ricavati assumendo i parametri β_0 e β_i entrambi uguali a 1,2. La scelta dei parametri β risulta dal compromesso tra due esigenze contrastanti, una di porre gli avvolgimenti dell'indotto molto vicini a quelli dell'induttore per avere un buon coefficiente di accoppiamento e l'altra di lasciare tra essi uno spazio sufficiente per il criostato, i sostegni meccanici, ecc.

Per il calcolo della potenza esprimiamo ora il secondo termine della (17) in funzione dei parametri di progetto.

Per comodità riportiamo separatamente il termine entro la parentesi quadra e quello esterno ad essa. Dalle defini-

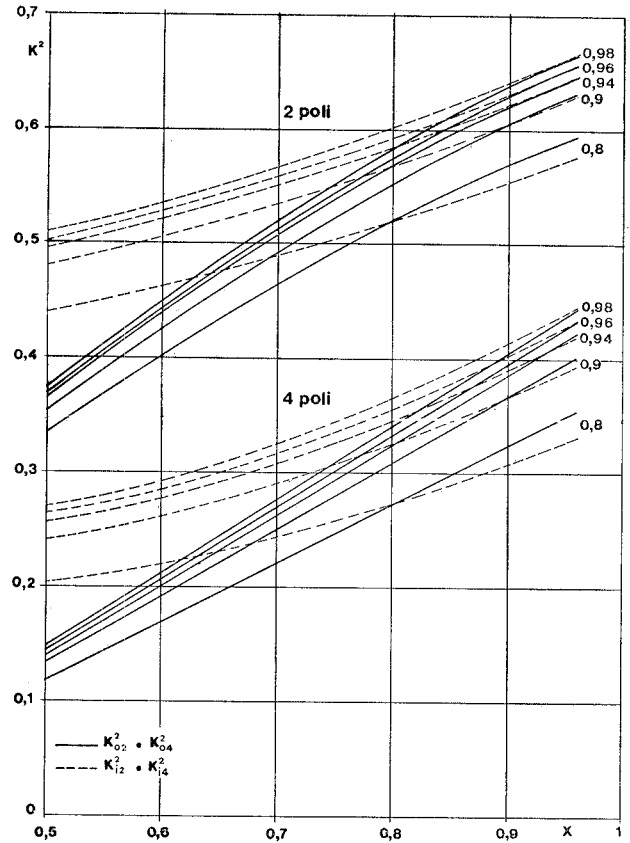


Fig. 4. — Andamento del quadrato del coefficiente di accoppiamento massimo tra l'induttore ed una fase dell'indotto, in funzione del parametro $x = R_0/R_i$.

K^2_{02} e K^2_{04} = coefficienti per alternatori con indotto esterno;
 K^2_{i2} e K^2_{i4} = coefficienti per alternatori con indotto interno.

zioni e relazioni generali del par. 2 si ricava per un alternatore con induttore dipolare e armatura esterna:

$$Q_m / (1 + Q_m^2) = [L_{A2} (1 - x^2) / 2 m_{02} (1 - y^2)] \cdot$$

$$\cdot (J_a / J_f) (R_0 / R_2)^3 \cdot$$

$$\cdot \{1 - [L_{A2} (1 - x^2) / 2 m_{02} (1 - y^2)]^2\} \cdot$$

$$\cdot (J_a / J_f)^2 (R_0 / R_2)^6 \}^{1/2}$$

per induttore dipolare e armatura interna:

$$Q_m / (1 + Q_m^2) = [L_{A2} (1 - x^2) / 2 m_{i2} (1 - y^2)] \cdot$$

$$\cdot (J_a / J_f) (R_0 / R_2) \cdot$$

$$\cdot \{1 - [L_{A2} (1 - x^2) / 2 m_{i2} (1 - y^2)]^2\} \cdot$$

$$\cdot (J_a / J_f)^2 (R_0 / R_2)^2 \}^{1/2}$$

per induttore quadrupolare e armatura esterna:

$$Q_m / (1 + Q_m^2) = [L_{A4} (1 - x^2) / 2 m_{04} (1 - y^2)] \cdot$$

$$\cdot (J_a / J_f) (R_0 / R_2)^4 \cdot$$

$$\cdot \{1 - [L_{A4} (1 - x^2) / 2 m_{04} (1 - y^2)]^2\} \cdot$$

$$\cdot (J_a / J_f)^2 (R_0 / R_2)^8 \}^{1/2}$$

per induttore quadrupolare e armatura interna:

$$(19.d) \quad Q_m/(1 + Q_m^2) = [L_{A4}(1 - x^2)/2 m_{i4}(1 - y^2)] \cdot (J_a/J_f) \cdot \{1 - [L_{A4}(1 - x^2)/2 m_{i4}(1 - y^2)]^2 \cdot (J_a/J_f)^2\}^{1/2}$$

Ora, poichè è $2 \omega K^2 W_f = \omega K^2 L_f I_f^2 = \omega M^2 I_f^2/L_a$, riportiamo le espressioni relative a questo termine; per un alternatore con induttore dipolare e armatura esterna:

$$(20.a) \quad \omega I_f^2 M_{02}^2/L_{a2} = \omega \mu_0 l J_f^2 R_2^4 \left(\frac{R_2}{R_0}\right)^2 \dot{p}_{02}$$

per un induttore dipolare e armatura interna:

$$(20.b) \quad \omega I_f^2 M_{i2}^2/L_{a2} = \omega \mu_0 l J_f^2 R_2^4 \left(\frac{R_0}{R_2}\right)^2 \dot{p}_{i2}$$

per un induttore quadrupolare e armatura esterna:

$$(20.c) \quad \omega I_f^2 M_{04}^2/L_{a4} = \omega \mu_0 l J_f^2 R_2^4 \left(\frac{R_2}{R_0}\right)^4 \dot{p}_{04}$$

per un induttore quadrupolare e armatura interna:

$$(20.d) \quad \omega I_f^2 M_{i4}^2/L_{a4} = \omega \mu_0 l J_f^2 R_2^4 \left(\frac{R_0}{R_2}\right)^4 \dot{p}_{i4}$$

Mediante le formule (19) e (20) è stata calcolata la potenza erogata nel caso si alimenti l'induttore con corrente costante; sono stati prefissati i seguenti parametri:

Frequenza $f = 50$ Hz.

$l = 1$ m;

$\beta_0 = \beta_i = 1,1, 1,2;$

$\gamma = 10^{-2}, 10^{-1}, 1;$

$y = 0,8, 0,9, 0,94, 0,96, 0,98.$

Nelle figg. 5 ÷ 8 sono riportati i grafici di $P_{c.c.}/R_2^4 J_f^2$ in funzione del parametro x .

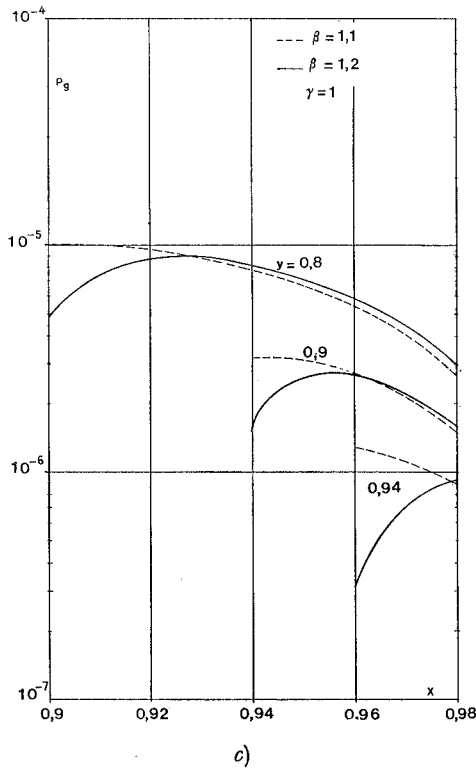
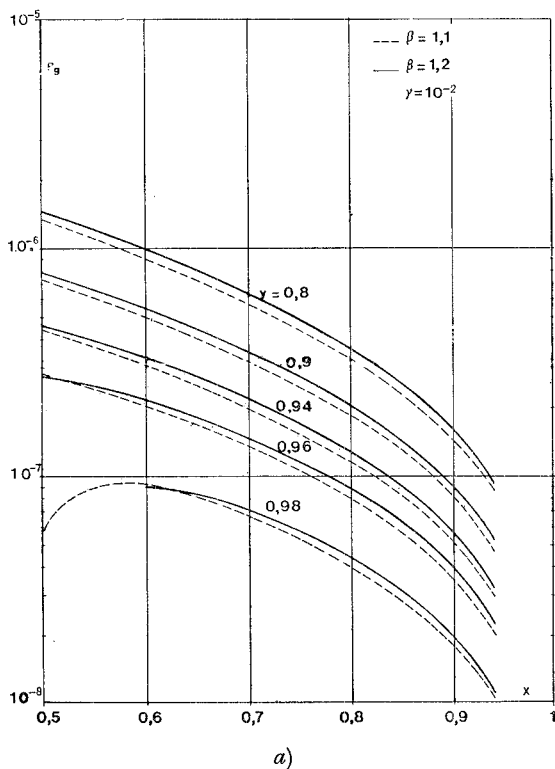
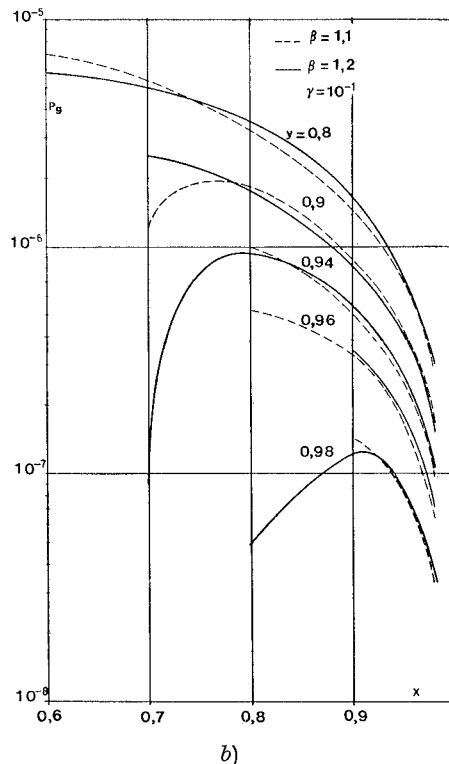


Fig. 5. — Andamento della potenza normalizzata $P_g = P_{c.c.}/R_2^4 J_f^2$ in funzione di x , in un alternatore dipolare con armatura esterna sotto le ipotesi elencate nel testo ($f = 50$ Hz, $l = 1$ m, $R_a = 0$, $L = 0$, ecc.).

a) $\gamma = J_a/J_f = 10^{-2}$; b) $\gamma = 10^{-1}$; c) $\gamma = 1$.

Dalla fig. 5 appare che la potenza erogata da una macchina dipolare con indotto esterno aumenta all'aumentare della distanza d tra rotore e statore; bisogna però tener presente che per un valore prefissato di x , all'aumentare della distanza d , aumenta il diametro esterno dell'indotto e quindi il suo peso.

Per uno stesso induttore e stessi valori di γ , x e β , una macchina con l'indotto esterno eroga una potenza molto superiore rispetto ad una con l'indotto interno; il volume dell'indotto è però superiore, nel primo caso,

TABELLA 2. — Confronto tra i volumi dell'indotto e tra le potenze erogate, in alternatori aventi lo stesso induttore e l'indotto esterno oppure interno.

x	y	V_e/V_i	P_e/P_i	
			2 Poli	4 Poli
0,7	0,8	6,61	5,1	4,75
0,9	0,9	3,15	3,96	3,00
0,94	0,98	2,25	2,27	2,11

dove

V_e = volume di un indotto posto all'esterno dell'induttore;
 V_i = volume di un indotto posto all'interno dello stesso induttore;
 P_e = potenza erogata con indotto esterno;
 P_i = potenza erogata con indotto interno.

di un fattore $\beta^4/x^2 y^2$. In tab. 2 riportiamo un confronto tra potenze e volumi calcolati per $\gamma = 10^{-1}$, $\beta = 1,2$ e tre coppie di valori dei parametri x e y .

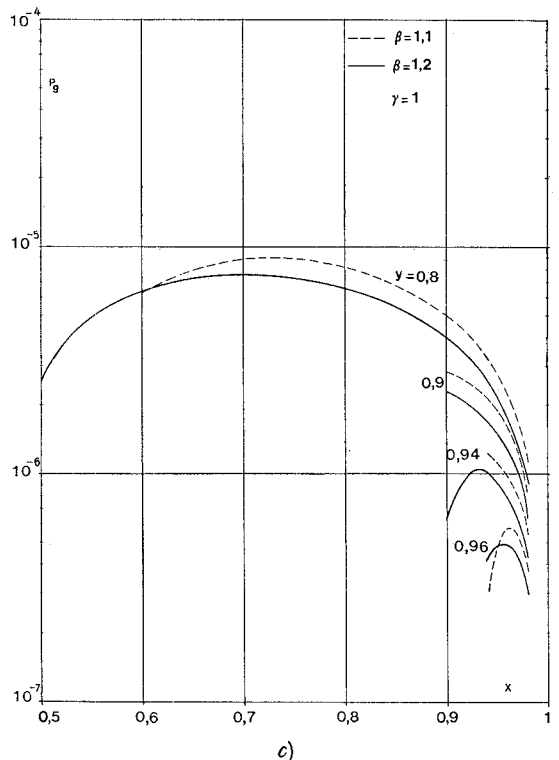
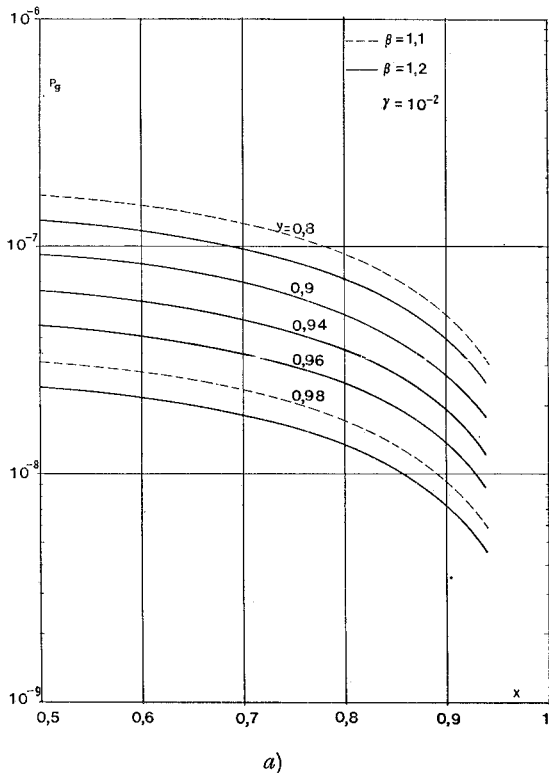
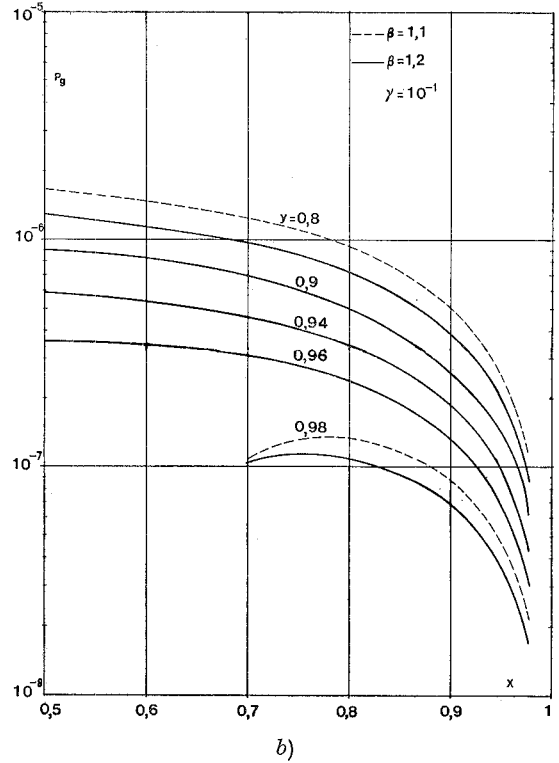


Fig. 6. — Come fig. 5, per macchina dipolare con armatura interna. Per $x \geq 0,5$, $y \leq 0,96$, $\gamma = 10^{-2}$ e 10^{-1} , vale: P_g (con $\beta_i = 1,1$) = $= 1,3 P_g$ (con $\beta_i = 1,2$).

Risulta chiaro dalla tabella che la maggior potenza erogata da una macchina con indotto esterno è essenzialmente dovuta al maggior volume dell'armatura, va però ricordato che l'induttore è lo stesso in entrambi i casi, il che rappresenta un ovvio vantaggio per la macchina di maggior potenza. Ciò rende conto in parte della preferenza manifestata dai progettisti [9, 10, 12, 14] per la soluzione con induttore superconduttore interno, anche se in tal caso esso è sottoposto ad un maggior campo dovuto all'armatura.

Dai grafici delle figg. 5 ÷ 8 si nota che non è stato possibile definire la potenza per tutti i valori prescelti dei parametri x , y , γ e β ; infatti come si può vedere dalle

formule (19) esistono certi valori combinati dei parametri suddetti che danno luogo ad un valore immaginario

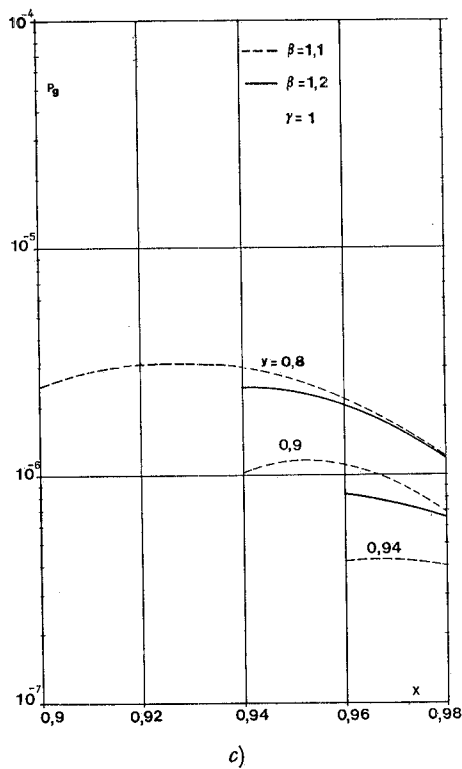
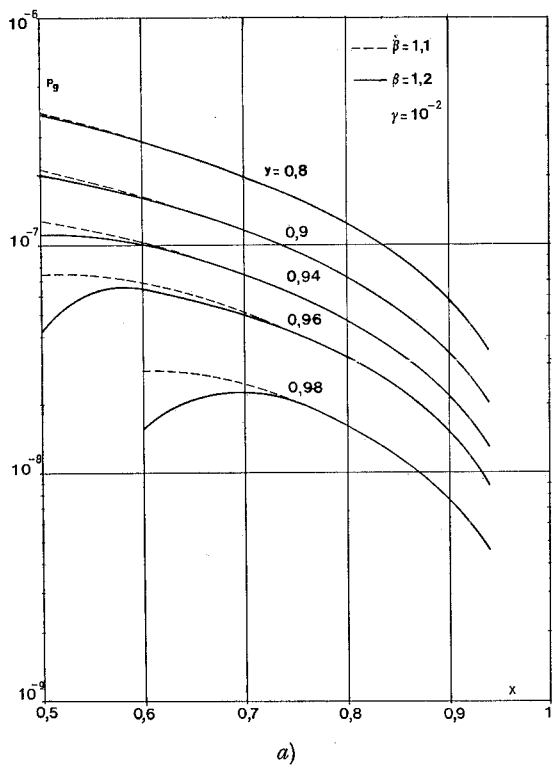
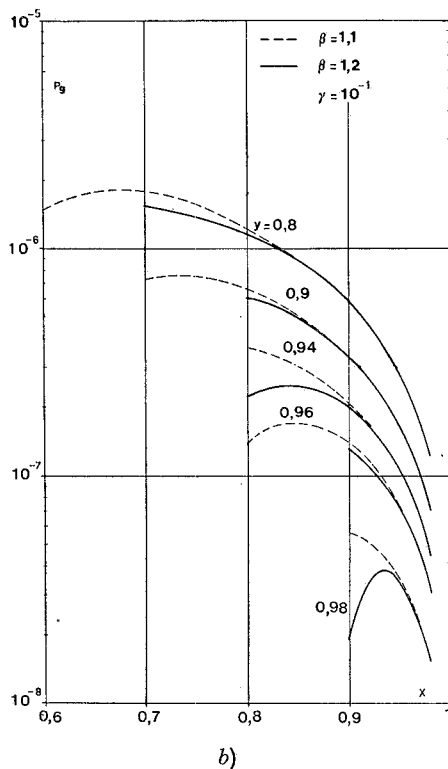


Fig. 7. — Come fig. 5, per macchina quadrupolare con armatura esterna.

della potenza; questo accade più frequentemente quando γ si avvicina all'unità. Dal punto di vista fisico ciò significa che in tali condizioni la caduta di tensione interna risulterebbe superiore alla forza elettromotrice indotta.

Dalle equazioni (19) abbiamo calcolato il valore di $\omega L_a/R$, che dà il rapporto tra la caduta di tensione interna e la tensione erogata, per $\beta = 1,2$ e $\gamma = 10^{-2}, 10^{-1}, 1$; nella fig. 9 sono riportati i grafici relativi. Dalla relazione (17) si ricava che l'alternatore con induttore alimentato a corrente costante eroga la massima potenza quando $Q_m = 1$, cioè per $\omega L_a/R = 2/3$.

La potenza erogata da alternatori con induttore fun-

zionante a flusso concatenato costante può essere calcolata dalla (18) e dai grafici riportati nel testo.

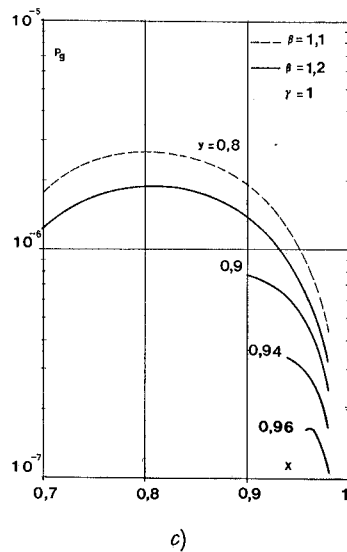
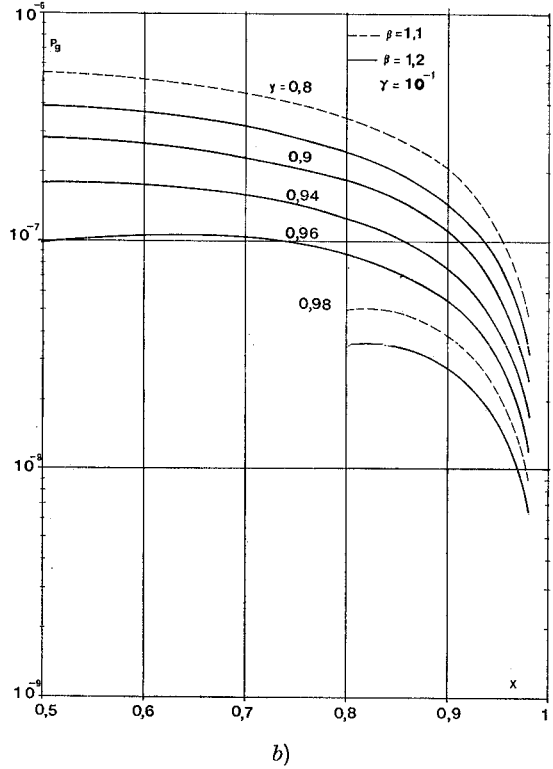
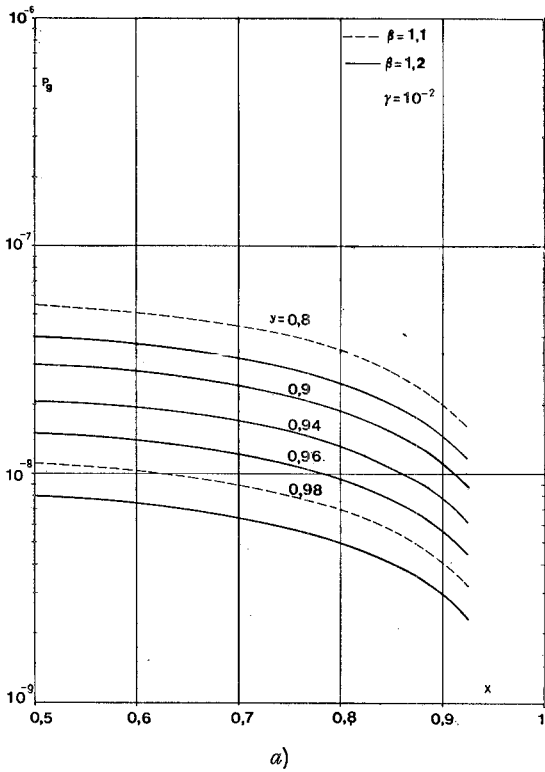


Fig. 8. — Come fig. 5, per macchina quadrupolare con armatura interna. Per tutte le curve vale: P_g (con $\beta_i = 1,1$) = 1,42 P_g (con $\beta_i = 1,2$).

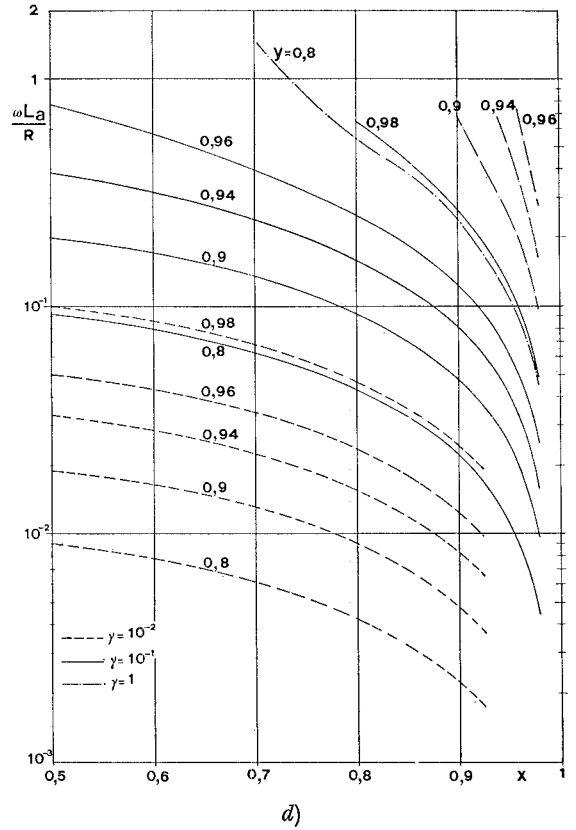
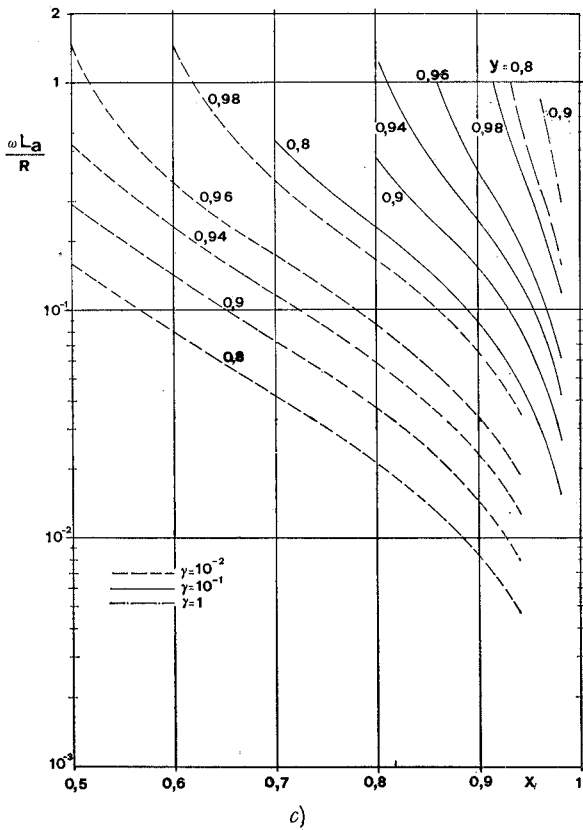
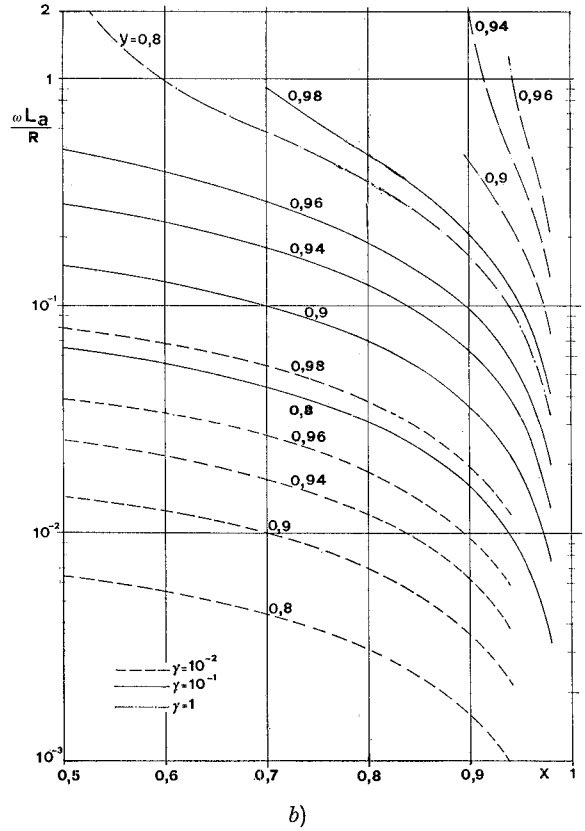
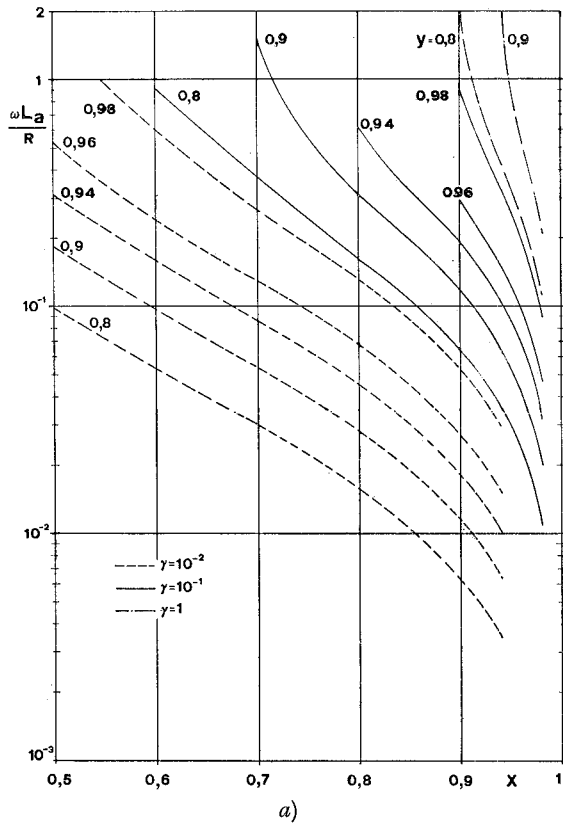


Fig. 9. — Andamento del rapporto $\omega L_a/R$ in funzione di x per $\beta = 1,2$.

a) Alternatore dipolare con indotto esterno; b) alternatore dipolare con indotto interno; c) alternatore quadrupolare con indotto esterno; d) alternatore quadrupolare con indotto interno.

Desideriamo qui ringraziare il Prof. G. Sacerdoti per le utili discussioni durante lo svolgimento del presente lavoro ed il Sig. A. Borgia, operatore dell'elaboratore Univac 1108 con il quale sono stati eseguiti i calcoli.

Manoscritto pervenuto il 19 Ottobre 1971.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. J. PIERRO, L. E. UNNEWEHR: *An investigation of superconductivity applied to rotary energy converters.* - « IEEE Trans. AS-1 », (1963), p. 838.
- [2] Z. J. J. STEKLY, H. H. WOODSON: *Rotating machinery utilizing superconductors.* - « IEEE Trans. AS-2 », (1964), p. 826.
- [3] M. L. CLAUDE: *On the study of an alternator with superconducting inductive windings.* - *Compt. Rend.* vol. 261, (1965), p. 349.
- [4] J. J. DRAUTMAN: *Superconducting alternators.* U. S. Patent 3, 252, 018 (17 maggio 1966).
- [5] H. H. WOODSON, Z. J. J. STEKLY, E. HALAS: *A study of alternators with superconducting field windings. I - Analysis.* - « IEEE Trans. PAS-85 », (1966), p. 264.
- [6] K. D. MADSEN: *Rotating electric high power machine with superconducting stator.* - U. S. Patent 3, 368, 087 (febbraio 1968).
- [7] E. HALAS: *Superconducting generators.* - U. S. Patent 3, 405, 290 (ottobre 1968).
- [8] J. C. FAKAN: *Superconducting alternators.* - U. S. Patent 3, 393, 332 (luglio 1968); U. S. Patent 3, 443, 128 (maggio 1969).
- [9] P. TULLEN, J. L. SMITH JR.: *The design of a rotating dewar and field winding for a superconducting alternator.* - *Cryogenic Eng. Conf.* 15th, Los Angeles, California (1969), paper G-1.
- [10] P. THULLEN, J. L. SMITH JR.: *Mechanical design concept for 1000 MVA superconducting turboalternator.* - *American Society of Mechanical Engineers Winter Annual Meeting*, Los Angeles, California (1969), paper 69-WA/PID-3.
- [11] H. H. WOODSON: *Applications of superconductivity and cryogenics in electric power systems.* - *Cryogenic Engineering Conference* 16th, Boulder, Colorado (1970), Session A.
- [12] Z. J. J. STEKLY, H. H. WOODSON, A. M. HATCH, L. O. HOPPIE AND E. HALAS: *A study of alternators with superconducting field windings. II - Experiment.* - « IEEE Trans. PAS-85 », (1966), p. 274.
- [13] C. J. OBERHAUSER, H. R. KINNER: *Some considerations in the design of a superconducting alternator.* - *Adv. in Cryogenic Eng.* (1968), vol. 13, p. 161.
- [14] *M.I.T. to build another superconducting generator.* - « *Electrical Rev.* », (luglio 1971), p. 94.
- [15] N. KURII: *The cost of refrigeration.* - « *New Scientist* », (1967), p. 604.
- [16] K. KAIHO, K. KOYAMA, I. TODOZIKI: *Stability of the hard superconductor in the changing magnetic field plus superimposed direct magnetic field.* - *Inter. Inst. of Refrig., Commission I, Meeting*, Tokyo (1970), paper n. S-3.