

Sul comportamento dell'alternatore durante l'autoeccitazione su carico puramente capacitivo(*)

Premessi alcuni richiami sul fenomeno dell'autoeccitazione di un alternatore anisotropo su carico puramente capacitivo, viene studiato in via teorica l'andamento nel tempo di tale fenomeno transitorio e vengono ricercati i parametri che lo governano, tenendo conto dell'effettivo andamento della caratteristica di eccitazione. Successivamente si indica il modo per ricavare con semplici prove i parametri suddetti, di cui è anche possibile la determinazione con il calcolo in base ai dati costruttivi. Una serie di prove sperimentali, in buon accordo con le previsioni teoriche, confermano che le ipotesi semplificative avanzate sono praticamente accettabili.

1. - Premessa.

Allo scopo di evitare le sovratensioni che si manifestano quando un alternatore è collegato ad una lunga linea ad alta tensione aperta (assimilabile approssimativamente ad una capacità), si procede normalmente all'installazione di organi di regolazione automatica, che nelle evenienze citate operano la diseccitazione, e, se necessario, la contro-eccitazione delle generatrici sincrone.

Poichè il costo di tali organi di regolazione è tanto maggiore quanto più grande è la loro velocità di intervento, ci si può chiedere se è proprio necessario installare nelle centrali di produzione dispositivi autoregolatori a grande velocità, come è la tendenza moderna, o piuttosto se è possibile procedere con velocità inferiori o addirittura, in caso di necessità, alla semplice regolazione a mano dell'eccitazione delle generatrici sincrone.

Nella letteratura tecnica sono apparsi lavori teorici assai interessanti ed esaurienti sulla questione dell'autoeccitazione degli alternatori su carico puramente capacitivo (vedi Bibliografia). Ma in generale si giunge a soluzioni complesse e si considerano parametri di non sempre facile determinazione. Inoltre, come in quasi tutti gli studi di transitori nelle macchine elettriche, non si tien conto dell'effettivo andamento delle caratteristiche magnetiche supponendole invece rettilinee. Limitazione questa assai grave nel caso attuale poichè adottandola si giunge necessariamente a prevedere un fenomeno in permanenza esaltantesi senza nessuna possibilità di raggiungere uno stato di equilibrio.

Tali studi perciò interessano essenzialmente la determinazione delle condizioni sotto le quali può o meno verificarsi il fenomeno dell'autoeccitazione. È stato così dimostrato che, sotto particolari ipotesi semplificative, indicando con X_d e X_q le reattanze sincrone rispettivamente secondo l'asse diretto e trasverso, con ωL_d la reattanza di dispersione, che si suppone per semplicità abbia lo stesso valore secondo i due assi, e con $\frac{1}{\omega C}$ la reattanza capacitiva collegata ai morsetti della macchina, si ha possibilità di autoeccitazione quando:

$$(1) \quad X_d \geq \frac{1}{\omega C} > \omega L_d .$$

(*) Gli Autori dedicano il presente lavoro a S. E. il Prof. Giancarlo Vallauri, alla cui Scuola si sentono legati, sia direttamente, sia indirettamente tramite l'appassionato insegnamento del Prof. Michele Paris.

Inoltre si è visto che, soddisfatta tale condizione, la rapidità con cui si inizia il fenomeno è notevolmente diversa a seconda che $\frac{1}{\omega C} > X_q$ oppure $\frac{1}{\omega C} \leq X_q$. Nel secondo caso il fenomeno avverrebbe con una rapidità assai maggiore che nel primo e tale da non poter essere seguito da nessun regolatore.

Ne consegue che il comportamento degli alternatori a poli salienti ($X_d > X_q$) si differenzia in maniera notevole da quello degli alternatori a induttore liscio per i quali, essendo $X_d \simeq X_q$, risulta sempre $\frac{1}{\omega C} \leq X_q$ quando è soddisfatta la condizione (1).

Con la presente nota si vuol riprendere in esame la questione ricercando, non tanto le condizioni sotto cui si inizia il fenomeno dell'autoeccitazione, quanto lo svolgimento nel tempo di esso, tenendo conto dell'effettiva forma della caratteristica di eccitazione. Per far ciò si è partiti da posizioni un poco diverse da quelle consuete, cercando di semplificare al massimo la trattazione teorica e di ricorrere all'impiego di parametri facilmente calcolabili o di facile determinazione sperimentale.

Lo studio si limita al caso più frequente di una macchina a poli salienti chiusa su una capacità la cui reattanza è compresa tra i valori di X_d e X_q . Gli Autori si ripromettono di riprendere in un secondo tempo lo studio del caso di $\frac{1}{\omega C} \leq X_q$ nel quale rientra praticamente quello della macchina con rotore liscio.

Inoltre si è ritenuto opportuno di adottare il procedimento matematico classico delle equazioni differenziali, ciò perchè la semplicità delle equazioni a cui si giunge non rende necessaria l'adozione del calcolo operatorio funzionale.

2. - Analisi teorica.

Si avanzano le seguenti ipotesi semplificative:

- a) sia trascurabile la resistenza d'indotto;
- b) esista concatenamento magnetico perfetto tra i due circuiti elettrici, induttore, indotto, e smorzatore, agenti secondo l'asse magnetico diretto;
- c) sia costante la velocità angolare di rotazione, anche durante il regime transitorio;
- d) la durata del fenomeno transitorio sia ri-

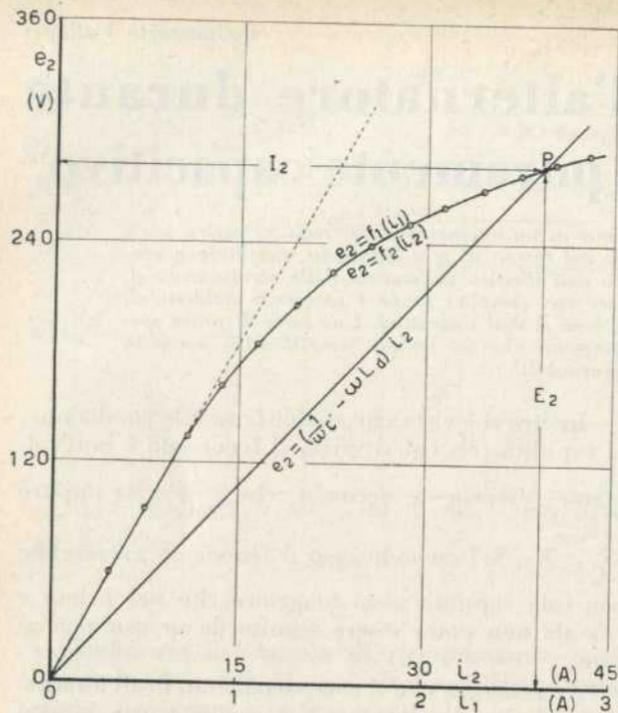


Fig. 1. - Caratteristica di eccitazione dell'alternatore su cui si sono eseguite le prove ed esempio di caratteristica di carico capacitivo.

levante in confronto alla durata del periodo delle grandezze sinusoidali;

e) sia trascurabile l'effetto derivante dalla presenza di campi armonici.

Si ricorda inoltre come la caratteristica di eccitazione rotorica $e_2 = f_1(i_1)$ (figura 1), che si ricava dalla consueta prova a vuoto degli alternatori, può rappresentare anche la caratteristica di eccitazione statorica $e_2 = f_2(i_2)$ dovuta ad una corrente i_2 nel circuito indotto diretto; è sufficiente per questo riportare la corrente i_2 al numero di spire dell'induttore moltiplicandone l'intensità per il « coefficiente di reazione » K_2 ricavabile dal triangolo di Potier. Infatti si può definire K_2 come rapporto fra la corrente di eccitazione i_1 e la corrente statorica i_2 , ad essa equivalente agli effetti magnetici.

Per l'ipotesi a), con carico puramente reattivo, la corrente di indotto dell'alternatore interessa esclusivamente il circuito diretto. Inoltre se la reattanza è capacitiva, la relazione tra la f.e.m. e_2 e la corrente i_2 è data dalla relazione

$$(2) \quad i_2 = \frac{e_2}{\frac{1}{\omega C} - \omega L_d}$$

che sul piano cartesiano (e_2, i_2) rappresenta una retta passante per l'origine (figura 1).

Indicando tale retta col nome di « caratteristica di carico capacitivo », si può notare come essa, e la caratteristica di eccitazione statorica, rappresentino due legami tra le stesse variabili; legami che possono essere entrambi soddisfatti solo se le due curve hanno punti a comune e se tali punti corrispondono a condizioni di equilibrio stabile.

Ne risulta che si verifica o no il fenomeno dell'autoeccitazione a seconda che la caratteristica di carico capacitivo è inferiore o superiore alla retta tangente alla parte iniziale della caratteristica di eccitazione. I due casi sono separati dalla coincidenza delle due rette, cui corrisponde un particolare valore della reattanza capacitiva di carico che indicheremo come « reattanza capacitiva limite » e che, riferendosi a quanto detto nella premessa, coincide in valore assoluto con la reattanza sincrona diretta.

Nel caso in cui si verifica l'autoeccitazione, si può ricavare il valore della f.e.m. E_2 a regime dal punto di incontro delle due caratteristiche (punto P di figura 1). La tensione ai morsetti V_2 si potrà ottenere sommando ad E_2 la caduta dovuta alla reattanza di dispersione ωL_d per la corrente I_2 , ascissa del punto P, oppure più semplicemente mediante la relazione

$$(3) \quad V_2 = E_2 \frac{1}{1 - \omega^2 L_d C}$$

Poichè tale tensione non viene raggiunta istantaneamente all'atto della chiusura dell'alternatore sul carico capacitivo, ci si propone di ricercare la funzione del tempo, $e_2 = e_2(t)$, da cui si ricava facilmente mediante la (3) la $v_2 = v_2(t)$, essendosi indicati con e_2 e v_2 rispettivamente i valori efficaci istantanei ⁽¹⁾ della f.e.m. interna e della tensione ai morsetti della generatrice sincrona.

Oltre alle notazioni adottate si indichi ora con:

- i_1, i_2, i_g il valore istantaneo delle correnti circolanti rispettivamente nel circuito induttore, indotto, smorzatore;
- i una corrente fittizia che circolando nell'induttore produce da sola una f.m.m. pari alla f.m.m. totale sull'asse diretto;
- R_1, R_g le resistenze ohmiche del circuito rispettivamente induttore e smorzatore;
- N_1, N_2, N_g il numero di spire equivalente (cioè comprensivo del fattore di avvolgimento e di altri eventuali coefficienti numerici) relativo al circuito induttore, indotto, smorzatore;
- K_g il rapporto $\frac{N_g}{N_1}$ di trasformazione fra circuito smorzatore ed induttore;
- ϕ il flusso magnetico risultante secondo l'asse diretto;
- E_1 la f.e.m. continua di eccitazione.

Si ritiene opportuno fare ricorso ad un circuito equivalente della macchina sincrona. In virtù dell'ipotesi di assenza di flusso magnetico secondo l'asse trasverso della macchina e dell'altra ipotesi relativa al perfetto concatenamento esistente fra i circuiti che abbracciano il flusso diretto, la macchina sincrona considerata da un osservatore solidale nella rotazione con il rotore, può riguardarsi

⁽¹⁾ La dizione « valore efficace istantaneo » è giustificata dalla supposizione che la durata del fenomeno transitorio in studio sia rilevante in confronto al periodo (ipotesi d)).

come costituita da tre circuiti elettrici come è specificato in figura 2.

Il circuito induttore è sottoposto in generale sia alla f.e.m. di eccitazione E_1 sia ad una f.e.m. $(-N_1 \frac{d\phi}{dt})$ indotta dalla variazione del flusso diretto concatenato.

Il circuito smorzatore, che deve intendersi costituito non solo della gabbia smorzatrice vera e propria secondo l'asse magnetico diretto ma anche dai vari circuiti presenti nelle parti metalliche massicce, è soggetto alla sola f.e.m. $(-N_g \frac{d\phi}{dt})$ indotta in esso dalla variazione del flusso diretto concatenato.

Per quanto concerne il circuito statorico, si osservi come la corrente alternata che in esso circola produca nel caso attuale una f.m.m. rotante che agisce secondo l'asse diretto, in concomitanza con la f.m.m. primaria; ciò, dal punto di vista magnetico, equivale a dire che il circuito indotto si comporta come un avvolgimento avente in ogni istante il proprio asse orientato secondo l'asse magnetico diretto — e quindi con esso rotante — percorso da una corrente continua fittizia i_2 .

Affinchè in tale circuito equivalente statorico circoli la corrente i_2 è necessario supporre l'esistenza di una f.e.m. esterna continua e_2 proporzionale al flusso diretto concatenato ϕ ($e_2 = h\phi$) nonchè la chiusura del circuito su una resistenza fittizia di valore $(\frac{1}{\omega C} - \omega L_d)$.

I segni di e_2 e di $(\frac{1}{\omega C} - \omega L_d)$ sono scelti in modo che, se nel circuito statorico prevale la reattanza capacitiva, la resistenza fittizia risulta positiva e la corrente dovuta ad e_2 ha effetto magnetico concomitante con la corrente di eccitazione i_1 , mentre se prevale la reattanza induttiva, la resistenza fittizia è negativa e la corrente dovuta ad e_2 ha effetto smagnetizzante; ciò è in accordo con i fenomeni di reazione d'indotto nel caso di carico reattivo. Si può ritenere che tale circuito equivalente statorico, la cui adozione è pienamente giustificata nella condizione di regime, valga anche durante il transitorio, per cui in esso in tali circostanze, oltre alla f.e.m. e_2 , agirà anche la f.e.m. $(-N_2 \frac{d\phi}{dt})$ derivante dalla variazione del flusso ϕ .

Premesso quanto sopra e con riferimento alla figura 2 si possono scrivere le seguenti relazioni, derivate dall'applicazione del II principio di Kirchhoff rispettivamente alle maglie rappresentate dai circuiti induttore, smorzatore ed indotto:

$$(4) \quad \begin{cases} E_1 - N_1 \frac{d\phi}{dt} = R_1 i_1 \\ -N_g \frac{d\phi}{dt} = R_g i_g \\ e_2 - N_2 \frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_d \right) i_2 = \frac{1}{\omega C'} i_2 \end{cases}$$

avendo posto nell'ultima espressione:

$$(5) \quad C' = \frac{C}{1 - \omega^2 L_d C}$$

Poichè la f.e.m. e_2 è, per l'ipotesi di velocità di rotazione costante, direttamente proporzionale al flusso ϕ , avendo indicato con h il coefficiente di proporzionalità ($e_2 = h\phi$), le (4) divengono:

$$(6) \quad \begin{cases} E_1 - \frac{N_1}{h} \frac{de_2}{dt} = R_1 i_1 \\ -\frac{N_g}{h} \frac{de_2}{dt} = R_g i_g \\ e_2 - \frac{N_2}{h} \frac{de_2}{dt} = \frac{1}{\omega C'} i_2 \end{cases}$$

D'altra parte il flusso ϕ , e con esso la f.e.m. e_2 , dipendono dalla f.m.m. totale agente secondo l'asse diretto e quindi dalla corrente:

$$(7) \quad i = i_1 + K_2 i_2 + K_g i_g$$

La relazione tra e_2 e la corrente i è data dalla caratteristica di eccitazione, che può esprimersi con la relazione:

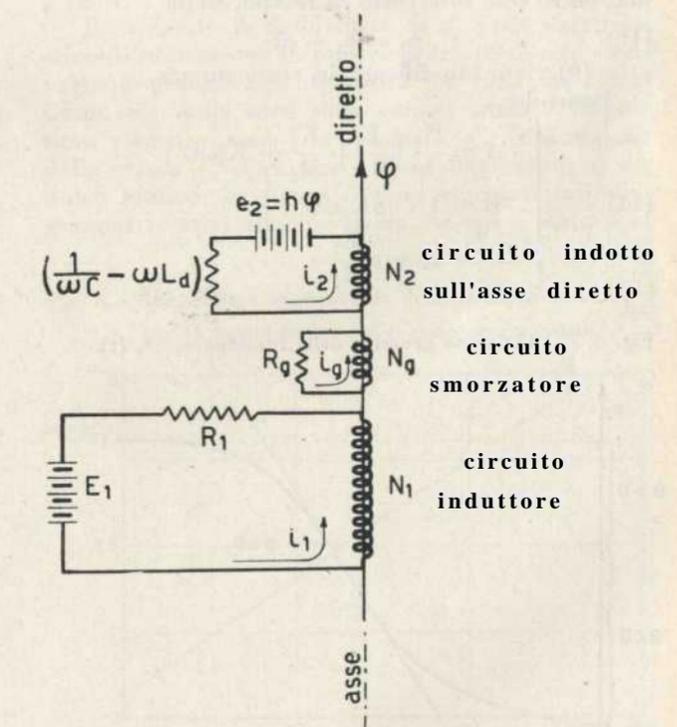
$$(8) \quad e_2 = f(i) = f(i_1 + K_2 i_2 + K_g i_g)$$

Ricavando dalla (6) le correnti nei tre circuiti ed introducendole nella (8), si ha in definitiva per e_2 l'equazione differenziale:

$$(9) \quad e_2 = f \left[\frac{E_1}{R_1} - \frac{de_2}{dt} \frac{N_1}{h} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{K_2^2}{R_g} + K_2^2 \omega C' \right) + K_2 \omega C' e_2 \right]$$

Alla difficoltà di risoluzione di tale equazione, dovuta al fatto che la caratteristica di eccitazione

Fig. 2. - Circuito equivalente dell'alternatore per lo studio dell'autoeccitazione.



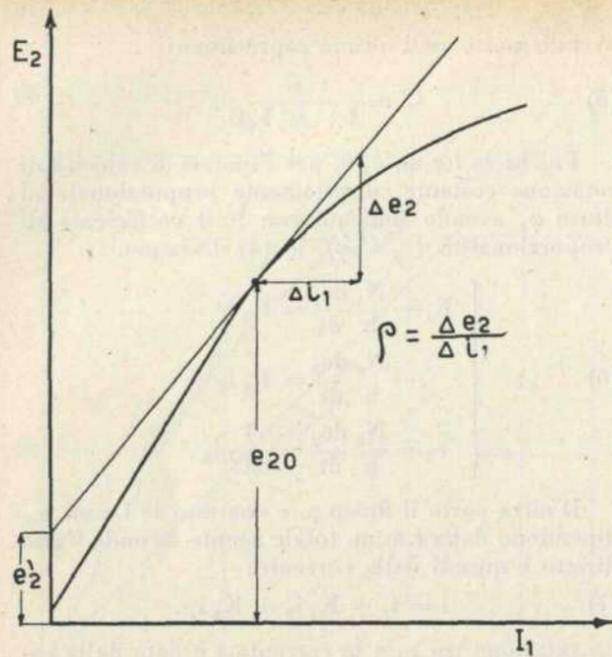


Fig. 3. - Procedimento per il rilievo dei parametri ρ ed e'_2 dalla caratteristica di eccitazione.

non è esprimibile analiticamente, si può ovviare operando entro intervalli di tempo sufficientemente piccoli e conseguentemente con piccoli incrementi di f.e.m. e_2 , tali che il tratto di caratteristica interessato possa confondersi con la propria tangente.

Indicando allora (figura 3) con e_{20} il valore assunto dalla f.e.m. all'inizio dell'intervallo di tempo considerato, con ρ il coefficiente angolare della tangente geometrica alla caratteristica di eccitazione nel punto $e_2 = e_{20}$, e con e'_2 l'intersezione di tale tangente con l'asse delle ordinate, la (8) si trasforma, entro tale intervallo di tempo, nella

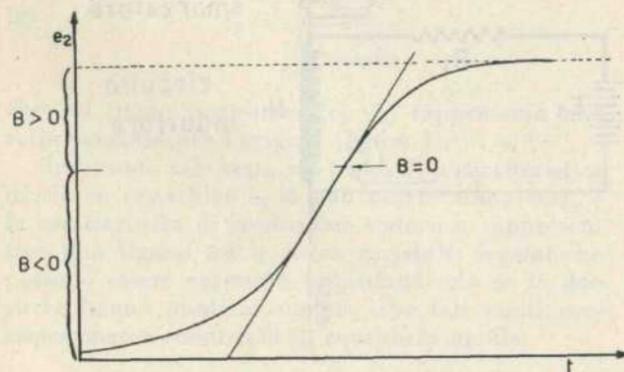
$$(10) \quad e_2 = e'_2 + \rho i$$

e la (9) viene modificata in conseguenza.

Ponendo:

$$(11) \quad \begin{cases} A = \frac{N_1}{h} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{K_g^2}{R_g} + K_2^2 \omega C' \right) \\ B = 1 - \rho K_2 \omega C' \\ E^* = e'_2 + \rho \frac{E_1}{R_1} \end{cases}$$

Fig. 4. - Andamento generico della funzione $e_2 = f_1(t)$.



e tenendo conto della (10), la (9) diviene:

$$(12) \quad \rho A \frac{de_2}{dt} + B e_2 = E^*$$

Date le ipotesi stabilite, detta equazione differenziale risulta, entro l'intervallo di tempo considerato « non omogenea ed a coefficienti costanti » e la sua soluzione, tenendo conto delle condizioni ai limiti, vale:

$$(13) \quad e_2 = \frac{E^*}{B} - \left(\frac{E^*}{B} - e_{20} \right) \varepsilon^{-\frac{B}{\rho A}(t-t_i)}$$

essendosi indicato con t_i l'istante iniziale dell'intervallo di tempo considerato, e con ε la base dei logaritmi naturali.

L'equazione algebrica (13) si compone del termine $\frac{E^*}{B}$, da ritenersi costante nell'intervallo di tempo considerato, e del termine

$$\left(\frac{E^*}{B} - e_{20} \right) \varepsilon^{-\frac{B}{\rho A}(t-t_i)}$$

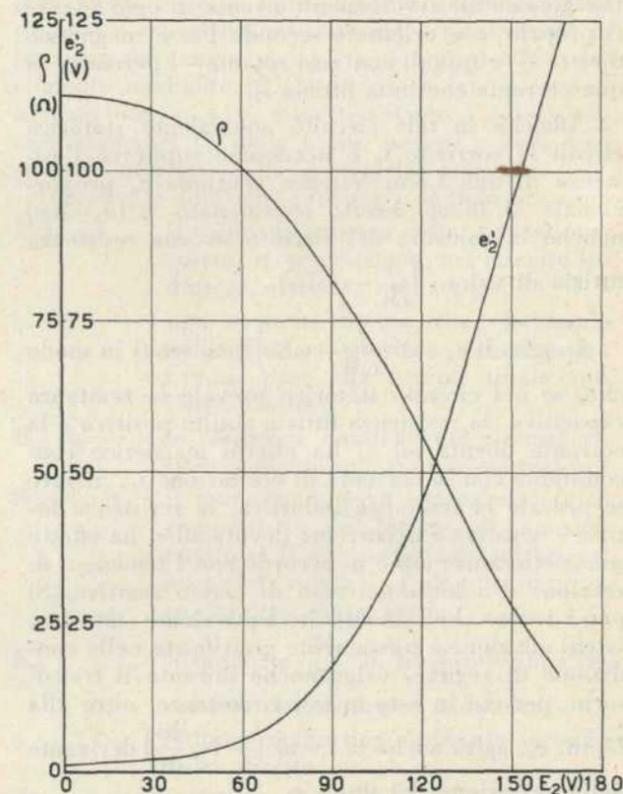


Fig. 5. - Valori di ρ ed e'_2 in funzione della f.e.m. stellata per l'alternatore su cui è stato sperimentato.

che rappresenta nello stesso intervallo una tensione variabile con legge esponenziale, la cui costante di tempo $\frac{\rho A}{B}$ è variabile da istante a istante.

La quantità B ha una importanza decisiva sia nello stabilire il segno della tensione $\frac{E^*}{B}$, che interviene in ambedue i termini della (13), sia nel determinare il segno dell'esponenziale.

Praticamente, stabilito il valore della capacità C suscettibile di provocare l'autoeccitazione, la quantità B , data dalla seconda delle (11), in virtù della variabilità del coefficiente ρ , decrescente al crescere di e_2 , risulta:

$B < 0$, nel primo tratto della caratteristica di eccitazione: in tal caso l'esponenziale che compare nella (13) ha esponente positivo, ciò che corrisponde ad un fenomeno esaltantesi nel tempo;

$B = 0$, nel punto della caratteristica di eccitazione la cui tangente geometrica è parallela alla caratteristica di carico capacitivo tracciata in figura 1; nell'intorno di detto punto si vedrà che il fenomeno segue una legge lineare col tempo;

$B > 0$, nel rimanente tratto della caratteristica di eccitazione: in quest'ultimo caso l'esponenziale ha esponente negativo ed in conseguenza il fenomeno va smorzandosi col tempo.

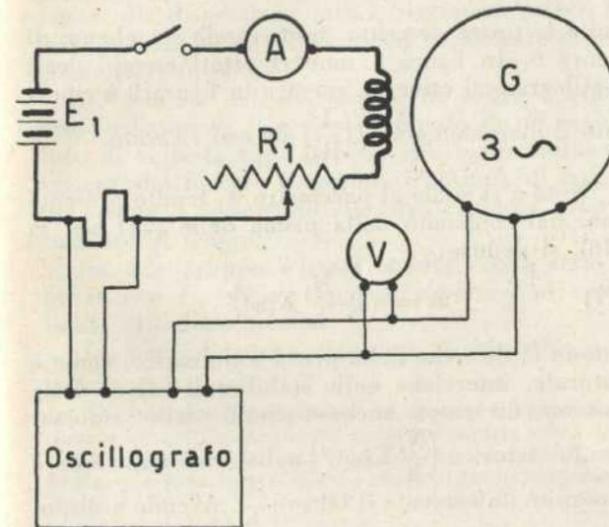


Fig. 6. - Schema per il rilievo del parametro "a".

Nel punto di separazione $B=0$, per il quale la (13) è indeterminata, ricercando il limite a cui essa tende per B tendente a zero, si ha:

$$e_2 = e_{20} + \frac{E^*}{\rho A} (t - t_i),$$

espressione che mostra la variazione lineare col tempo annunciata in precedenza.

Premesso quanto sopra, per ricavare la funzione $e_2 = e_2(t)$, basterà fissare un intervallo di tempo $(t-t_i)$ sufficientemente piccolo e ricercare il valore che assume la e_2 alla fine di tale intervallo mediante l'espressione (13) impiegando in essa i valori di ρ , B e E^* spettanti al valore di e_2 raggiunto alla fine dell'intervallo precedente e che coincide adesso con e_{20} ; e ciò iniziando dalla f.e.m. dovuta al magnetismo residuo.

Il diagramma della funzione $e_2 = e_2(t)$ così ottenuto, il cui andamento generico è riportato in fi-

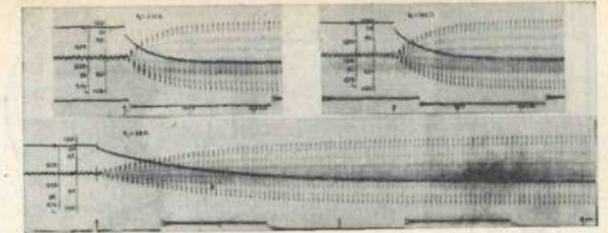


Fig. 7. - Alcuni oscillogrammi forniti dalle prove per il rilievo del parametro "a".

gura 4, risulterà formato da due rami: l'uno, per i valori più bassi di e_2 , concavo verso l'alto, l'altro invece concavo verso il basso; i due rami si raccordano fra di loro con un tratto praticamente rettilineo nell'intorno del valore $B=0$.

Nel caso che interessi conoscere l'andamento della corrente i_1 nell'avvolgimento di eccitazione, la legge con cui essa varia in funzione del tempo può essere facilmente ricavata dalle espressioni sopra riportate. Infatti la prima delle (6), tenuto

presente che è $\varphi = \frac{e_2}{h} e$ che la (13) fornisce:

$$\frac{de_2}{dt} = -\frac{B}{\rho A} \left(\frac{E^*}{B} - e_{20} \right) \varepsilon^{-\frac{B}{\rho A}(t-t_i)}$$

diviene:

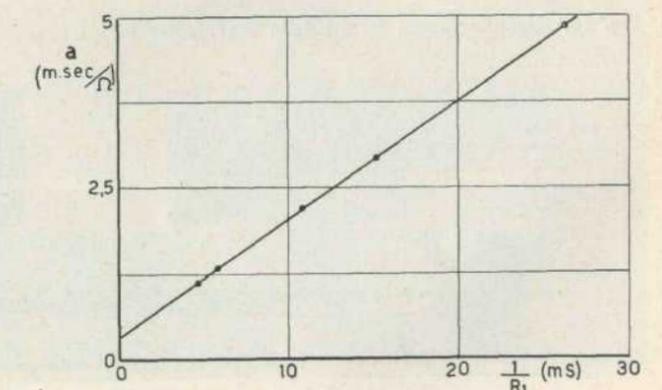
$$(14) \quad i_1 = \frac{E_1}{R_1} + \frac{N_1}{R_1 h} \cdot \frac{B}{\rho A} \left(\frac{E^*}{B} - e_{20} \right) \varepsilon^{-\frac{B}{\rho A}(t-t_i)}$$

3. - Determinazione dei parametri.

I parametri che, entro un determinato intervallo di tempo, regolano il funzionamento della macchina sincrona autoeccitantesi sono essenzialmente ρ ed A .

Ricordando la definizione di ρ , dalla caratteristica di eccitazione si può ricavare mediante derivazione grafica tale quantità in funzione della f.e.m. e_2 ; dalla medesima caratteristica è opportuno ricavare anche la quantità e'_2 in funzione della stessa e_2 e riunire i due diagrammi in un unico grafico. In figura 5 sono riportati tali diagrammi relativi alla macchina, su cui è stato spe-

Fig. 8. - Diagramma sperimentale della funzione $a = f\left(\frac{1}{R_1}\right)$ per la macchina su cui è stato sperimentato.



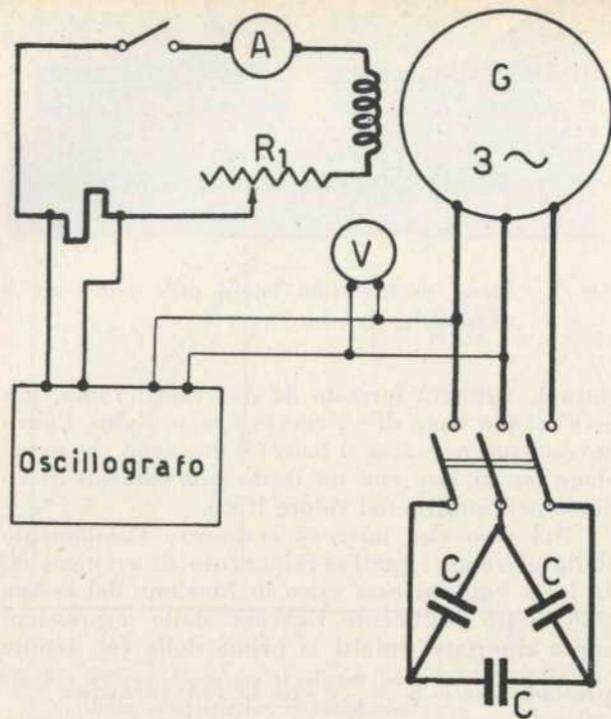


Fig. 9. - Schema per le prove sperimentali sotto carico.

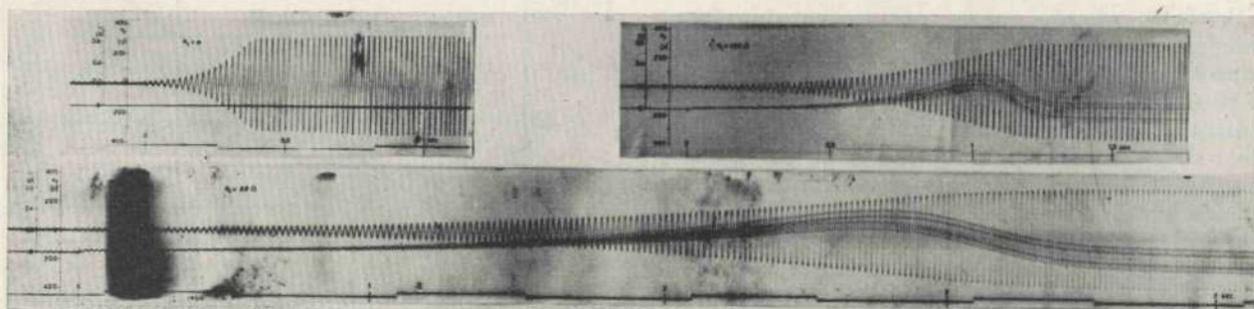
rimeritato. Noto ρ e fissato C , risulta subito determinata per ogni valore della f.e.m. e_2 anche la quantità B tenendo presente che il coefficiente K_2 e la reattanza di dispersione ωL_d possono essere determinati preliminarmente con la nota prova a carico totalmente reattivo.

La determinazione della quantità A è invece più laboriosa. A meno che non si conoscano esattamente per la macchina in esame le grandezze di cui A è funzione secondo la prima delle (11) (ciò che è assai raro), per determinare A occorre procedere in maniera combinata sperimentale e analitica. Si osservi a tale scopo che qualora si esegua la ricerca della $e_2 = e_2(t)$ per la macchina funzionante a vuoto, cioè con circuito esterno aperto, si perviene alla seguente espressione per tale funzione:

$$(15) \quad e_2 = E^* - (E^* - e_{20}) \varepsilon^{-\frac{1}{\rho a}(t-t_1)}$$

come immediatamente si deduce dalla (13), notando che a vuoto si ha $C = C' = 0$ e quindi $B = 1$.

Fig. 10. - Oscillogrammi forniti dalle prove sotto carico.



Il coefficiente a della (15) vale:

$$(16) \quad a = \frac{N_1}{h} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{K_g^2}{R_g} \right)$$

ed è determinabile sperimentalmente, rilevando con oscillogramma la tensione ai morsetti della macchina sincrona funzionante a vuoto ed eccitata bruscamente con una corrente di eccitazione che interessi il tratto iniziale rettilineo della caratteristica, per il quale ρ è praticamente costante.

Scegliendo da tale oscillogramma due opportuni valori di e_2 , $e_{2t'}$ ed $e_{2t''}$, corrispondenti agli istanti t' e t'' , si può ricavare a mediante la seguente relazione dedotta dalla (15):

$$a = \frac{t'' - t'}{\rho \ln \left(\frac{E^* - e_{2t'}}{E^* - e_{2t''}} \right)}$$

Per quanto verrà detto fra poco è necessario eseguire varie prove con valori di R_1 diversi e compendiare i risultati in un unico diagramma $a = f\left(\frac{1}{R_1}\right)$. Per la macchina in esame sono state eseguite le prove descritte, impiegando lo schema di figura 6. In figura 7 sono riportati esempi degli oscillogrammi ottenuti, mentre in figura 8 è riportato il diagramma $a = f\left(\frac{1}{R_1}\right)$ da essi ricavato.

Noto a si risale al parametro A , tenuto presente che, dal confronto della prima delle (11) con la (16), si deduce:

$$(17) \quad A = a + \frac{N_1}{h} K_g^2 \omega C'$$

Questo ci dice che nella prova sotto carico, come è naturale, interviene nello stabilire il valore della costante di tempo anche l'effetto dello smorzamento statorico $\left(\frac{N_1}{h} K_g^2 \omega C'\right)$ nella cui espressione è incognito unicamente il fattore $\frac{N_1}{h}$. Avendo a disposizione il diagramma di figura 8, stabiliti due diversi valori R_1' ed R_1'' della resistenza rotorica, la (16) ci fornisce due distinte relazioni:

$$(18) \quad \begin{cases} a' = \frac{N_1}{h} \left(\frac{1}{R_1'} + \frac{K_g^2}{R_g} \right) \\ a'' = \frac{N_1}{h} \left(\frac{1}{R_1''} + \frac{K_g^2}{R_g} \right) \end{cases}$$

dalle quali è possibile ricavare sia la quantità $\frac{N_1}{h}$ utile per determinare l'effetto dello smorzamento statorico (e con questo resta determinata A dalla (17)), sia la quantità $\frac{K_g^2}{R_g}$, che rappresenta l'inverso della resistenza del circuito smorzatore riportata al circuito induttore.

4. - Rilevi sperimentali.

La macchina sincrona anisotropa, su cui è stato sperimentato ⁽²⁾, ha le seguenti caratteristiche:

Potenza	4 kVA
Tensione nominale	220 V
Corrente nominale	11,5 A
Numero dei poli	4
Frequenza	50 Hz
Collegamento	Δ

La sua caratteristica di eccitazione è riportata in figura 1; dalla prova con carico completamente reattivo sono stati dedotti il valore della sua reattanza di dispersione alla frequenza di 50 Hz ($\omega L_d = 1,125 \Omega$) ed il valore del coefficiente di reazione ($K_2 = 0,0666$).

Lo schema dell'istallazione di prova è riportato in figura 9; il grappo è dotato di un regolatore di velocità tipo Dornig, che agisce sull'eccitazione del motore a corrente continua di traino, ma, come è opportuno rilevare, con una propria costante di tempo.

Su tale gruppo è stata condotta una serie di prove con $E_1 = 0$, e capacità superiori al valore limite di autoeccitazione.

La serie di prove compiute è consistita nella

⁽²⁾ Tale macchina, insieme col motore a corrente continua e coi relativi accessori, è stata acquistata con i fondi forniti dalla Associazione Nazionale Imprese Distributrici di Energia Elettrica (ANIDEL) che gli Autori ringraziano.

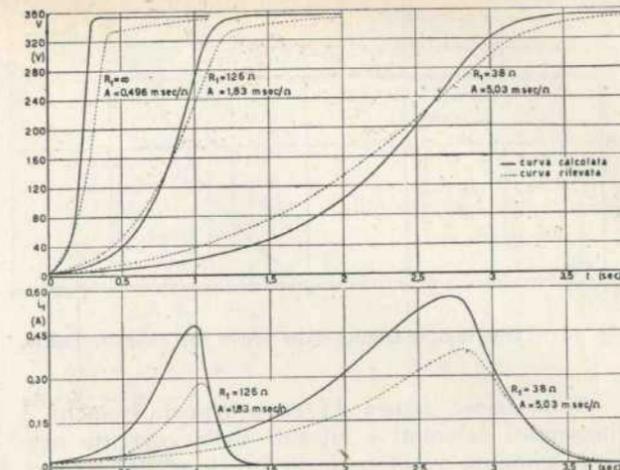
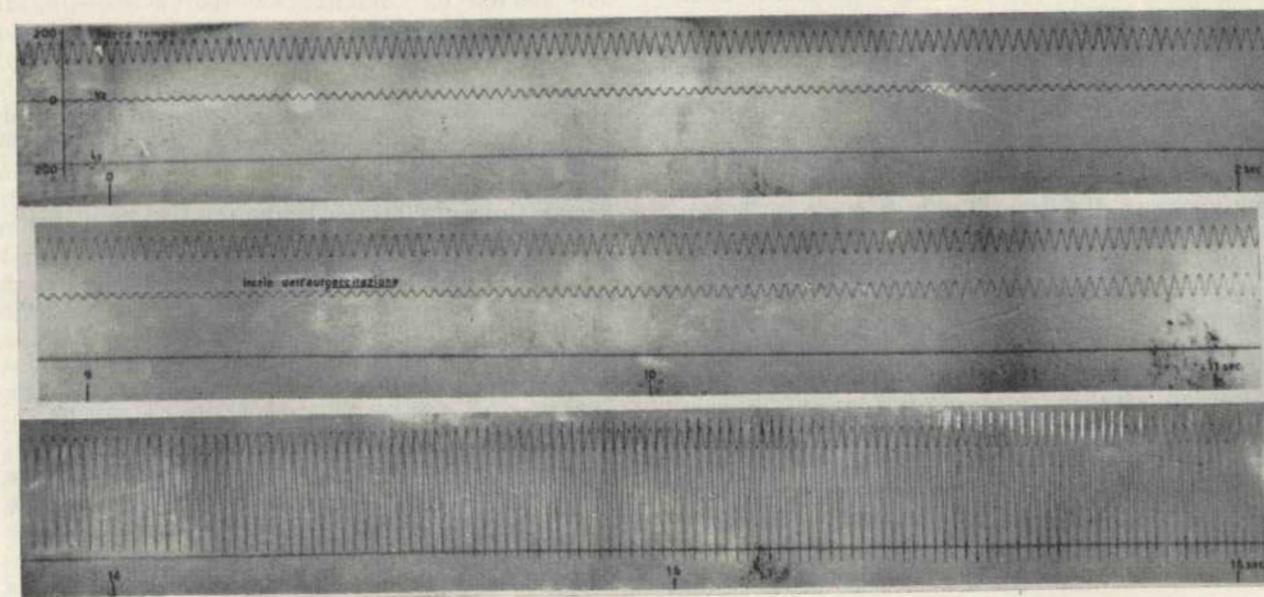


Fig. 11. - Confronto fra i risultati sperimentali e i risultati teorici per le V_2 ed i_1 in funzione del tempo.

esecuzione di tre oscillogrammi (fig. 10); la macchina è stata ogni volta collegata ad una stessa terna di capacità ($188,4 \mu F$, con collegamento a triangolo) ma con valori diversi della resistenza R_1 del circuito di rotore.

Si è proceduto inoltre al calcolo della $v_2 = e_2(t)$, seguendo i concetti illustrati nel paragrafo 2, per il valore di C stabilito e per gli stessi valori di R_1 : sono stati così dedotti mediante il calcolo tre diagrammi che, messi a raffronto con gli analoghi diagrammi sperimentali (fig. 11), provano l'attendibilità del metodo. Le discrepanze sono da attribuire fra l'altro all'entità delle tensioni e correnti raggiunte, di parecchie volte superiori ai valori nominali; esse hanno fatto sì che le perdite nell'alternatore fossero una frazione considerevole della potenza di targa, e che, conseguentemente, per l'improvviso carico, il motore rallentasse riprendendo poi con relativa lentezza la velocità normale.

Fig. 12. - Tratti dell'oscillogramma relativo alla prova con capacità limite.



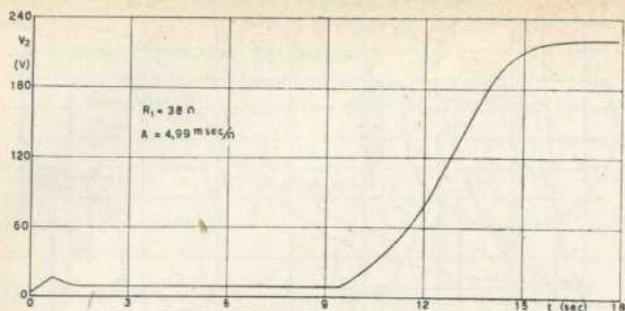


Fig. 13. - Diagramma fornito dalla prova con capacità limite.

Nella stessa figura 11 sono riportati anche i diagrammi calcolati e rilevati della corrente nell'avvolgimento rotorico i_1 in funzione del tempo.

L'oscillogramma di figura 12 si riferisce invece ad una prova eseguita con capacità pari al valore limite calcolato ($141 \mu\text{F}$ con collegamento a triangolo); di tale oscillogramma per ragioni pratiche sono stati riportati solamente tre tratti ma i dati da esso forniti sono stati riassunti nel diagramma di figura 13. È interessante notare come nei primi istanti si sia avuto un inizio di autoeccitazione che è successivamente cessato, probabilmente per la diminuita velocità della macchina, stabilizzandosi la tensione ai morsetti ad un valore di poco superiore alla f.e.m. dovuta al magnetismo residuo.

In seguito per qualche causa accidentale è aumentata, sia pure di poco, la velocità del gruppo e il fenomeno ha avuto inizio di nuovo, svolgendosi secondo l'andamento previsto.

L'instabilità riscontrata dimostra che la capacità con cui si è operato era effettivamente quella

limite per l'innescarsi del fenomeno, e coincideva con quella prevista con il calcolo.

La descrizione delle operazioni grafiche ed analitiche eseguite esorbita dai limiti imposti alla presente esposizione.

5. - Conclusione.

Lo studio compiuto ha permesso di individuare i parametri che determinano l'andamento nel tempo del fenomeno di autoeccitazione. Essi possono essere calcolati in sede di progetto oppure essere rilevati in sede di collaudo mediante prove assai semplici, che non richiedono di sottoporre la macchina a carico nè attivo nè reattivo. Conoscendo il valore di tali parametri è possibile stabilire con sufficiente esattezza, almeno per quanto riguarda il fenomeno dell'autoeccitazione, la minima velocità con cui devono intervenire i regolatori di tensione.

Mario Picchi, Alfredo Vallini

Pisa - Istituto di Elettrotecnica dell'Università.

BIBLIOGRAFIA

- C. PALESTRINO e C. CAMINITI, *Tecnica degli Impianti Elettrici*, UTET, Torino, 1934.
- P. WALDVOGEL, *Theorie der Spannungshaltung einer auf eine lange leerlaufende Leitung arbeitenden Drehstrommaschine*, Brown Boveri Miti., 1945, XXXII, pag. 251.
- R. KELLER, *Die Beherrschung der Selbsterregung bei Synchrongeneratoren*, Bulletin de l'Ass. Suisse des Électr., 1949, XL, pag. 173.
- C. LAVANCHY, *La stabilité des génératrices synchrones*, Revue Brown Boveri, 1949, XXXVI, pag. 264.
- J. HERLITZ, *Problèmes relatifs au fonctionnement des réseaux de transport d'énergie a haute tension et a grande distance*, C.I.G.R.E., Parigi 1949, Tomo III, Rapporto n. 406.

a Giancarlo Vallauri

Stato attuale degli studi sulla trasmissione d'energia a corrente continua ad alta tensione

Riassunti gli studi compiuti o in corso di esecuzione sulla trasmissione d'energia a corrente continua ad alta tensione, si accenna a quelli che verranno effettuati presso l'I.E.N.G.F. e si considera la convenienza che esperienze di esercizio vengano compiute in Italia.

1. - Indirizzo generale degli studi.

Le esperienze sulla trasmissione a corrente continua ad alta tensione con sottostazioni di conversione a vapore di mercurio ebbero inizio poco prima dell'ultima guerra. Abbandonato il vecchio concetto di Thury della produzione diretta dell'energia a corrente continua ad alta tensione, si delineò con esse la figura dell'impianto moderno di trasmissione a corrente continua, con produzione mediante generatori trifasi e doppia conversione, da corrente alternata in corrente continua in partenza, da corrente continua in corrente alternata all'arrivo. L'uso dei convertitori a vapore di mercurio per la doppia conversione fu conseguenza del progresso costruttivo dei commutatori corrispondenti, che, soprattutto con l'introduzione delle griglie di comando e di elettrodi ausiliari fra anodo

e catodo, consentivano nella maniera migliore la conversione nei due sensi a tensione elevata: altri commutatori, quelli di Marx, ad arco in aria compressa, pure studiati per le alte tensioni, non riuscivano altrettanto convenienti, così che furono scartati all'atto degli studi, di poco posteriori, per la progettazione e l'esecuzione della linea Elba-Berlino, di cui sarà fatta parola in seguito.

In questo tipo di impianti, il sistema di produzione e quello di trasmissione permettono di unire i vantaggi economici della produzione mediante generatori trifasi e quelli della trasmissione a corrente continua attraverso linee, aeree o in cavo, a due o addirittura a un solo conduttore, con ritorno per il terreno. Per contro la doppia conversione accresce il costo complessivo degli impianti, attenuando e annullando a volte, secondo i valori delle