

2.4 Prove su macchine a corrente continua

Le macchine a corrente continua sono attualmente meno diffuse che in passato, per l'evoluzione di sistemi di controllo direttamente applicabili agli asincroni. Sono macchine che hanno limitazioni di tipo elettromeccanico, legate soprattutto alla pratica impossibilità di lavorare a tensioni elevate per la presenza del collettore su cui è applicata l'intera tensione: trattandosi di un organo costituito da lamelle metalliche isolate tra loro sulla cui superficie si verificano condizioni non ottimali per la tenuta alla tensione (tracce di polverino metallico dovuto alle spazzole, temperature elevate e possibili scintillamenti) non è prevedibile che la tensione possa salire oltre i valori attualmente in uso (qualche kV).

Ai livelli bassi (frazioni di kW), si trovano soluzioni convenienti anche rispetto agli stessi asincroni ottenute mediante l'impiego di magneti permanenti e quindi con una semplificazione drastica della costruzione.

2.41 Messa a punto di una macchina a c.c.

Prima di procedere alle prove di una macchina a corrente continua è necessario assicurarsi del suo corretto funzionamento, al fine di evitare risultati non soddisfacenti, che potrebbero richiedere la ripetizione delle prove stesse.

I controlli più comuni sono i seguenti:

- a) senso di rotazione: esso in generale unico ed imposto all'inclinazione dell'asse delle spazzole rispetto alla normale del collettore; convenzionalmente, si indica rispetto ad un osservatore che guardi la macchina dal lato della sporgenza dell'albero⁽¹⁾; quando non è specificato, si intende generalmente il senso orario per le dinamo e antiorario per i motori;
- b) controllo del traferro, sotto i poli principali e sotto quelli ausiliari: si esegue con spessori calibrati che assicurino una precisione di almeno 0,1 mm;
- c) magnetizzazione dei poli: se la macchina non possiede un magnetismo residuo, essa non può autoeccitarsi; si provvede in tal caso a fornire una magnetizzazione preliminare con una sorgente separata;
- d) ordine corretto dei poli induttori: esso viene controllato mediante l'ago di una bussola o, più semplicemente, osservando l'attrazione di una sbarretta di ferro dolce fra due poli consecutivi; in alcuni casi, può risultare più semplice seguire direttamente il senso di percorrenza degli avvolgimenti. In analogo modo si può controllare la successione degli eventuali poli ausiliari e la loro corrispondenza al senso prefissato di rotazione;
- e) uniformità dei poli, per evitare la presenza di spire in cortocircuito; se si misura la caduta di tensione nei diversi tratti del circuito induttore, percorsi in serie dalla stessa corrente continua, è sufficiente una differenza dell'ordine di qualche percento, fra due poli, per sospettare la presenza di un cortocircuito; un miglior controllo può eseguirsi sulle macchine a induttore laminato, con un'alimentazione in corrente alternata poiché in tal caso la presenza di un cortocircuito su un polo produce una notevole riduzione della sua caduta di tensione.

⁽¹⁾ Nel caso di doppia sporgenza dell'albero, dalla parte dell'albero di maggior diametro o da quella opposta al collettore, se gli alberi hanno ugual diametro.

La regolazione più importante, e che può maggiormente influire sulle caratteristiche di funzionamento, tuttavia quella delle posizione spazzole; quando non sia diversamente disposto, si tratta di ricercare la posizione dell'asse neutro, ricerca che può avvenire in base a principi e procedimenti diversi.

Il sistema più semplice si basa sul rilievo della f.e.m. transitoria, indotta, a macchina ferma, da una variazione del flusso induttore; il segno di questa f.e.m. che si determina con un voltmetro (o millivoltmetro), collegato alle lamelle del commutatore sotto una coppia di spazzole, si inverte quando le spazzole oltrepassano l'asse neutro.

Un altro metodo consiste nell'alimentare in corrente continua il solo indotto; la macchina tende a funzionare da motore serie, con il campo longitudinale fornito dalla reazione d'indotto; spostando le spazzole in direzione contraria al moto, l'asse neutro si determina come il punto limite fra posizioni che danno opposti versi di rotazione. Questa prova conveniente per macchine nuove, che non possiedano ancora un magnetismo residuo; in caso diverso esso va annullato attraverso cicli successivi di magnetizzazione ad ampiezze decrescenti, di segno alterno.

Quando non sia prescritto che le spazzole debbano stare sull'asse neutro, la loro posizione viene determinata in modo da non avere scintillamenti al collettore, nel passaggio da vuoto a carico. Alcune norme prevedono delle prove di commutazione, con carichi del 150% rispetto al nominale e con brusche variazioni di carico.

2.42 Misura delle resistenze

In una macchina a corrente continua può essere necessario rilevare separatamente i valori delle resistenze dell'indotto, dei vari circuiti di eccitazione - serie, derivato ecc. - e dei circuiti ausiliari: poli ausiliari, spire di compensazione: si tratta infatti di circuiti che possono avere caratteristiche molto diverse per i diversi valori di corrente che devono portare. In generale, tuttavia, trattandosi di circuiti stazionari, non vi sono problemi particolari che li diversifichino da quelli delle macchine già considerate (valori ohmici spesso molto piccoli ed induttanze elevate).

La resistenza di contatto fra spazzole e collettore deve sempre essere esclusa dalla misura per le sue caratteristiche di dipendenza dalla corrente.

La misura della resistenza di indotto può farsi, indipendentemente dal tipo di avvolgimento, inviando nell'indotto una corrente continua I e misurando la caduta di tensione a valle di una coppia di spazzole di opposto segno (fig. 2.421); ciò presuppone però che la corrente si ripartisca uniformemente nelle vie interne, il che può non essere vero se esistono altre coppie di spazzole; nel caso in cui non sia possibile fare diversamente, si cura che il contatto di dette spazzole sia il migliore possibile e si assume come caduta di tensione la media dei valori misurati per coppie di lamelle, distanti fra loro un passo polare, poste sull'asse delle spazzole (fig. 2.422).

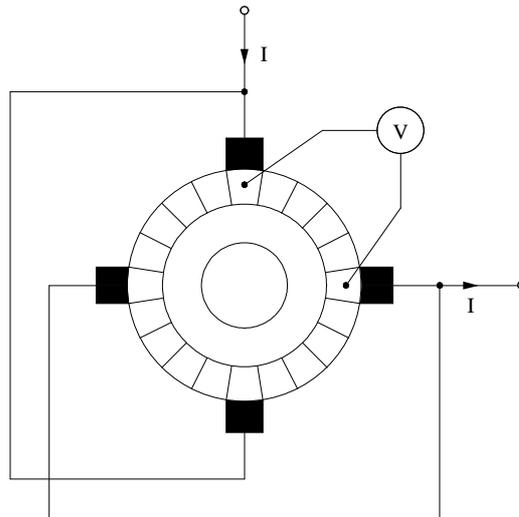


fig.2.421

Il metodo invece pienamente valido se esiste una sola coppia di spazzole (avvolgimento ondulato o embriato a due poli).

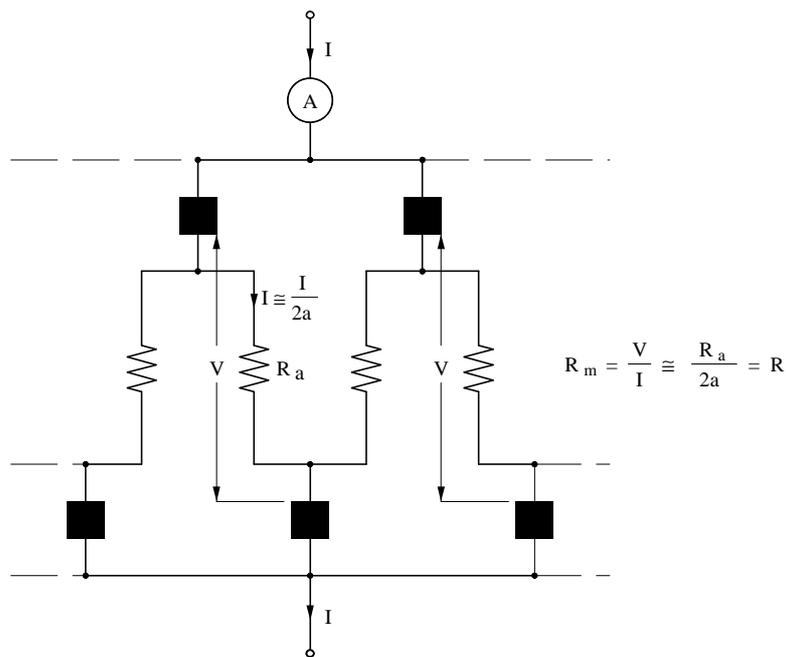


Fig. 2.422

Per un avvolgimento embriato (con $2p > 2$), sprovvisto di collegamenti equipotenziali, lo stesso procedimento di misura può essere adottato eseguendo la misura fra due punti diametrali del collettore, sollevando tutte le spazzole (fig. 2.423); il valore della resistenza d'indotto R, in funzionamento normale, è pari al valore misurato diviso per il quadrato del numero p di coppie di poli (che è uguale al numero delle file di spazzole).

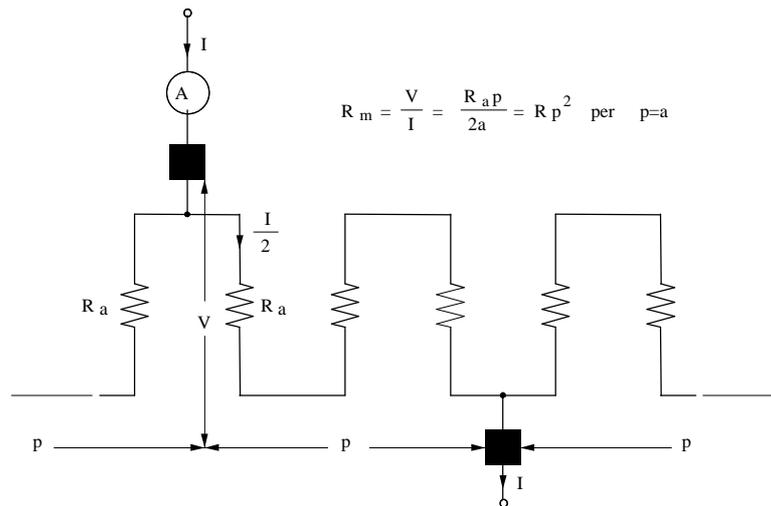


fig. 2.423

Con ciò si ha anche il vantaggio di misurare un valore p^2 volte maggiore di R , il che è conveniente, dato il basso valore che ha usualmente tale resistenza.

Per un avvolgimento embriacato, con collegamenti equipotenziali, il valore della resistenza equivalente di indotto può essere assunto pari al valore misurato (fig. 2.424).

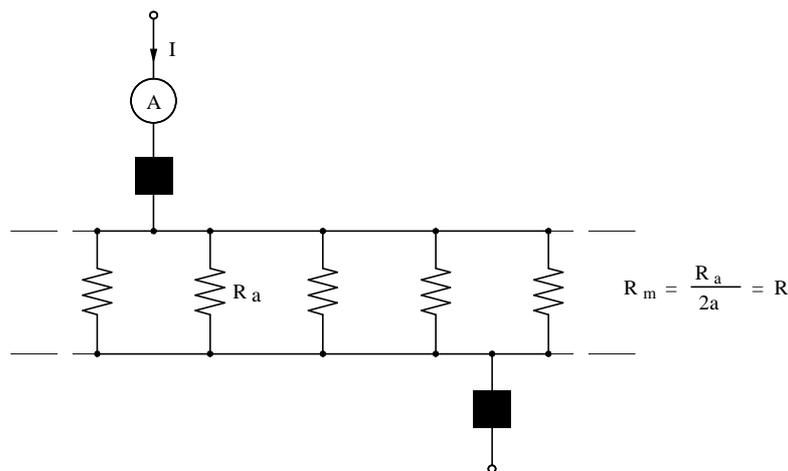


fig. 2.424

Per controllare l'esistenza dei collegamenti equipotenziali, basta verificare se la resistenza misurata fra due lamelle distanti un semipasso polare risulta uguale a quella misurata fra due punti diametrali. Talvolta la resistenza da misurare ha un valore tanto piccolo, da essere difficilmente misurabile: alcune Norme consentono, in questo caso, di impiegare i valori dati in progetto dal costruttore.

2.43 Rilievo della curva a vuoto

La prova a vuoto, ossia il rilievo della caratteristica che lega il valore della f.e.m. indotta al valore della corrente di eccitazione, serve sia per il tracciamento delle altre curve caratteristiche del funzionamento della macchina, sia per la determinazione delle sue perdite a vuoto (nel ferro e meccaniche).

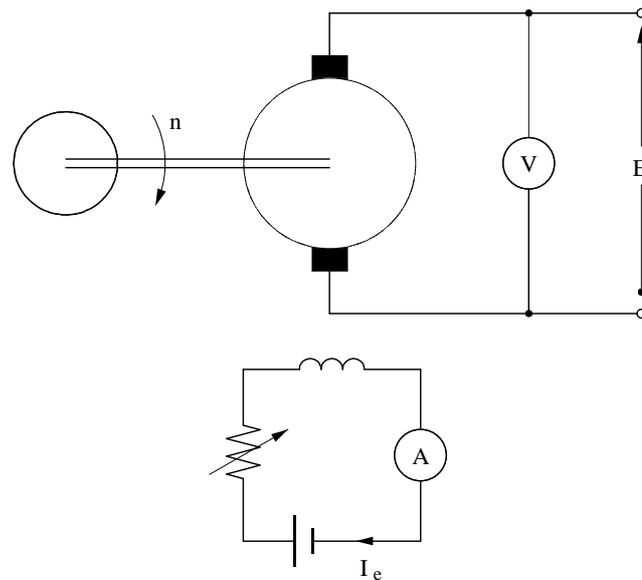


fig. 2.431

Qualunque sia lo schema di eccitazione, la prova viene condotta alimentando separatamente i circuiti di eccitazione, mediante una sorgente di tensione continua ausiliaria, regolabile. La misura viene condotta secondo lo schema di fig. 2.431; il motore di trascinamento fa ruotare la macchina in prova, preferibilmente alla sua velocità nominale n ; in caso di misure a velocità di rotazione n' , diversa da n , i valori della f.e.m. misurata vanno corretti moltiplicandoli per il rapporto n/n' .

Partendo da valori sufficientemente bassi della corrente di eccitazione, la caratteristica E, I_e viene tracciata per valori prima gradualmente crescenti, fino al 120-150% del valore nominale, e poi gradualmente decrescenti; le due curve possono differire fra loro per l'isteresi del circuito magnetico; normalmente si fa la media fra le due curve (fig. 2.432).

Il motore di trascinamento fornisce le perdite meccaniche - per attrito e per ventilazione - a cui si aggiungono le perdite nel ferro, variabili con il valore della f.e.m. indotta. E' perciò possibile procedere alla separazione diretta dei due tipi di perdita, con misure di potenza assorbita sull'albero con e senza eccitazione.

Quando non sia disponibile un motore di trascinamento, o non si sia in grado di misurare la potenza meccanica da esso fornita, le determinazioni precedenti possono essere eseguite facendo funzionare

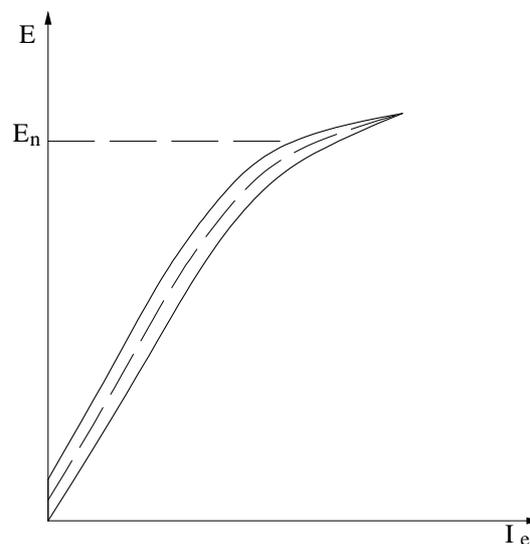


fig. 2.432

la macchina come motore a vuoto (fig. 2.433), alimentato da una sorgente di tensione regolabile, in modo da mantenere, per ogni valore della corrente di eccitazione, il numero di giri nominale.

La procedura deve essere condotta con regolarità e possibilmente in modo monotono, per evitare di passare da un ramo all'altro della caratteristica di magnetizzazione.

La potenza assorbita in tali condizioni dalla sorgente di alimentazione rappresenta le perdite nella macchina; generalmente le perdite nel circuito d'indotto e nelle spazzole, se la corrente assorbita è notevolmente inferiore alla nominale, risultano trascurabili; in ogni caso se ne può tener conto come sarà indicato in seguito. La separazione delle perdite avviene in modo analogo a quello descritto per i motori asincroni.

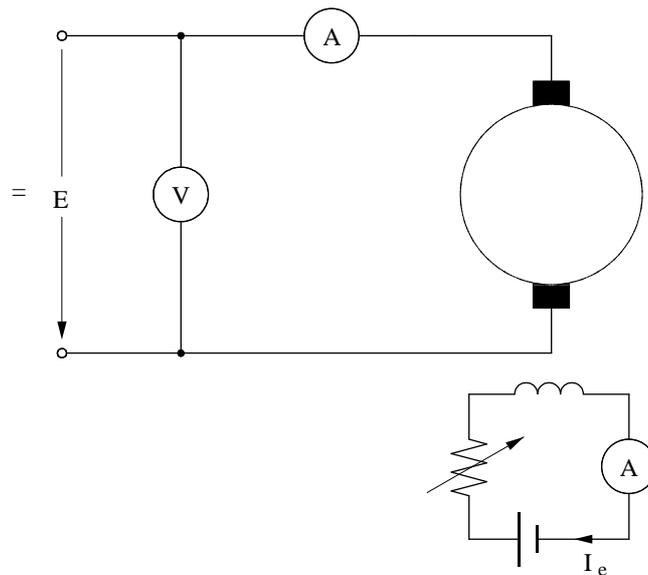


fig. 2.433

2.44 Curve caratteristiche

Le curve caratteristiche di una macchina a corrente continua esprimono le relazioni che intercorrono fra le varie grandezze elettriche (tensione V , corrente d'indotto I , corrente d'eccitazione I_e) e meccaniche (numero di giri al minuto n , e coppia C).

Per i generatori, si assume generalmente n come costante e non interessa l'andamento della coppia; si hanno perciò le seguenti curve caratteristiche :

- caratteristica di carico (V, I_e) con corrente d'indotto costante;
- caratteristica esterna (V, I) a eccitazione costante;
- caratteristica di regolazione (I, I_e) a tensione costante.

Viceversa, per i motori si assume generalmente costante la tensione applicata e si considerano le seguenti curve, tutte ad eccitazione costante:

- caratteristica elettromeccanica della velocità (n, I);
- caratteristica elettromeccanica della coppia (C, I);
- caratteristica meccanica (n, C).

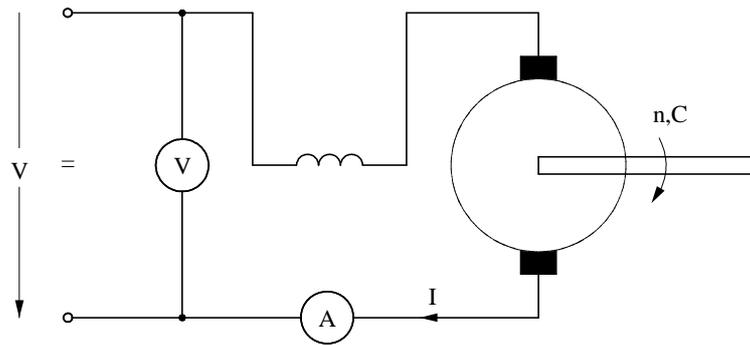


fig. 2.441

Quando la macchina non è eccitata in modo indipendente, la dizione "a eccitazione costante" sta a significare che non si interviene sul circuito di eccitazione durante il tracciamento della caratteristica; le curve risultano perciò molto diverse, a seconda dello schema di eccitazione della macchina.

Tutte le curve caratteristiche sono definite alla temperatura convenzionale di riferimento ovvero in condizioni di regime termico.

Il tracciamento delle caratteristiche più importanti viene, in genere, eseguito attraverso misure dirette, sottoponendo la macchina ad un carico variabile, fino alla sua potenza nominale o ad un sovraccarico specificato. Ciò è possibile in quanto, per le note limitazioni elettromeccaniche, la potenza delle macchine a corrente continua non mai tanto grande da rendere proibitiva tale prova; il metodo diretto fornisce inoltre risultati molto migliori di quelli desunti dalle prove indirette, per la difficoltà di rappresentare correttamente l'effetto della reazione d'indotto. Alcuni schemi di principio sono riportati nelle figg. 2.441 e 2.442. La sorgente di alimentazione elettrica, nel caso di un motore, (meccanica, nel caso di una dinamo) deve essere in grado di poter fornire la potenza richiesta a tensione (numero dei giri) costante; la potenza resa deve essere assorbita da un freno (da un resistore) a velocità (tensione) variabile, secondo le caratteristiche della macchina in prova, consentendo un certo campo di regolazione. Le modalità di realizzazione del carico saranno maggiormente dettagliate nel cap. 3.

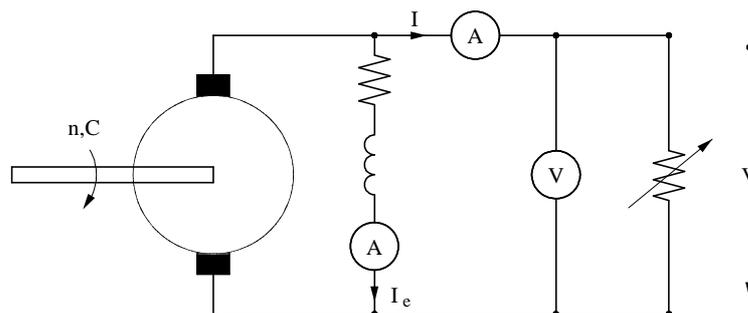


fig. 2.442

Per il tracciamento delle curve caratteristiche a eccitazione costante, si regola il sistema in modo da fornire le condizioni nominali di tensione, corrente, velocità di rotazione; si varia quindi solo il carico, rilevando per ogni punto velocità, coppia e corrente d'indotto per i motori, tensione e corrente per le dinamo.

I valori della velocità a vuoto n_0 e a carico n_c , nel caso dei motori (le tensioni V_0 e V_c per i generatori) ricavati da questa prova, servono a definire la variazione percentuale di velocità (o di tensione):

$$\Delta n\% = 100 \frac{n_0 - n_c}{n_c} \quad ; \quad \Delta V\% = 100 \frac{V_0 - V_c}{V_c}$$

Le variazioni del carico devono essere eseguite dopo che la macchina ha raggiunto le condizioni di regime termico, in modo abbastanza rapido da non modificare apprezzabilmente tali condizioni.

2.45 Tracciamento indiretto delle caratteristiche di una dinamo

Le curve caratteristiche, esterna e di regolazione, di una dinamo, possono anche essere ricavate, con qualche semplificazione, da una prova unica, cioè dalla determinazione di un punto della caratteristica di carico, possibilmente alla corrente nominale.

Si consideri ad esempio una dinamo ad eccitazione indipendente; sia tracciata la curva a vuoto, che può anche pensarsi come facente parte della famiglia delle caratteristiche di carico (a $I = 0$); sia anche noto il punto P, (fig. 2.451) a carico (tensione V_c , corrente I_n).

La f.e.m. che deve essere generata dalla macchina, nelle condizioni di carico è:

$$E = V_c + RI_n \quad ;$$

essa è rappresentata sul diagramma dal segmento OQ, essendo $OP = V_c$ e tracciando il segmento $PQ = RI_n$, si trascura, per il momento, la caduta sulle spazzole, che è un termine costante.

La f.e.m. è generata dalla combinazione delle amperspire dovute alla corrente di eccitazione I_e con quelle dovute alla reazione d'indotto; poiché la relazione fra f.e.m. ed eccitazione è rappresentata dalla curva a vuoto, il segmento QM rappresenta l'effetto delle amperspire di reazione d'indotto (rapportato alle spire dell'eccitazione principale).

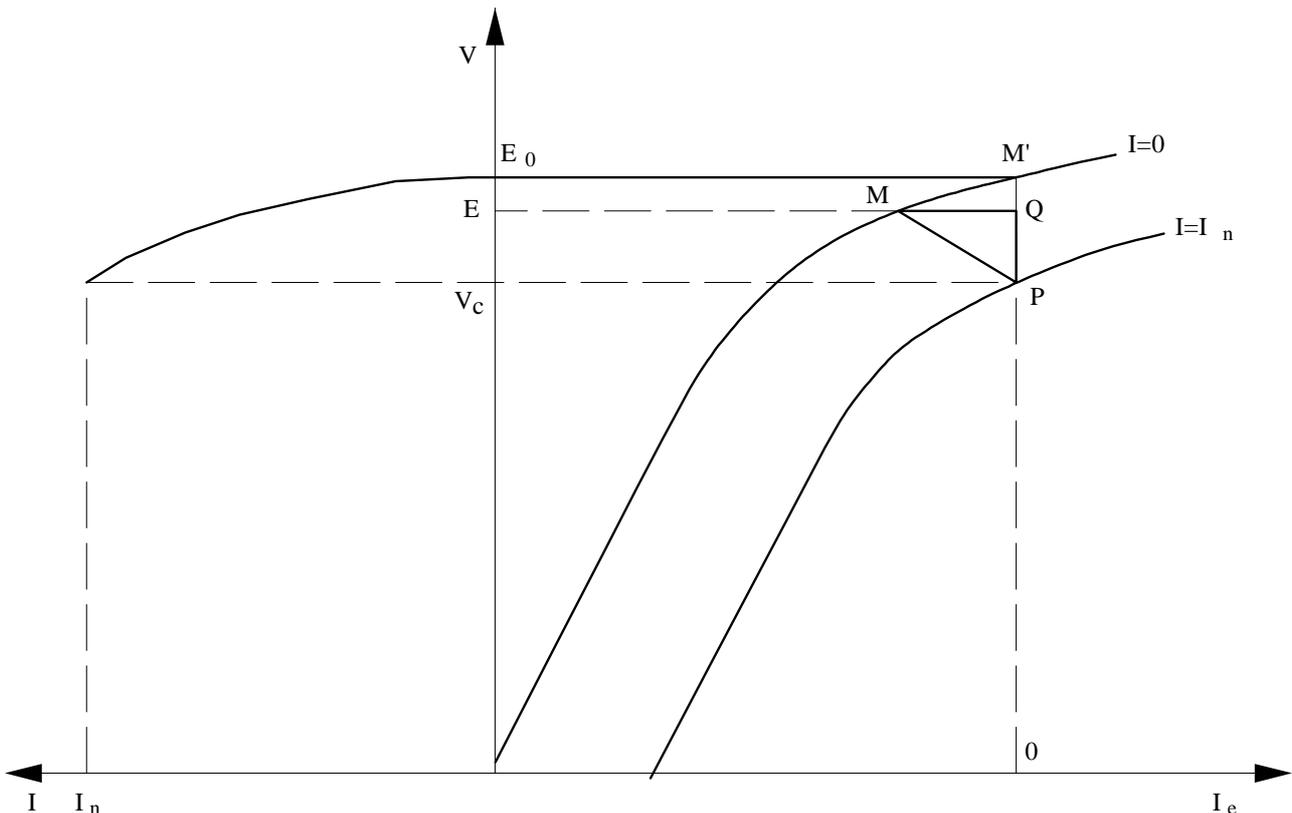


fig. 2.451

I segmenti PQ e QM sono proporzionali al valore della corrente I_n ; tale risulta quindi anche il segmento PM, che risulta quello meglio definito, dal punto di vista operativo, per le condizioni di vincolo sui due estremi.

Per trovare il valore della tensione V che corrisponde ad una frazione specificata della corrente di carico è sufficiente tracciare una parallela a PM tale che la lunghezza del segmento intercettato tra la caratteristica a vuoto e la retta verticale OP sia pari alla frazione voluta di PM; si ottiene così la tensione per quello specifico valore di corrente e se il procedimento viene ripetuto si ottiene l'intera caratteristica di carico, che parte dal punto M', per $I = 0$, e raggiunge il punto P, per $I = I_n$.

Se si ripete il tracciamento per altre condizioni di tensione a carico, il triangolo PQM può modificarsi, in quanto l'effetto di una parte della reazione d'indotto (cioè della sua componente trasversale) dipende dalla saturazione del circuito magnetico principale.

Questo tracciamento, che è immediato per una macchina ad eccitazione indipendente, può essere eseguito anche per macchine con diverso sistema di eccitazione, tenendo conto delle relazioni imposte appunto da tale sistema; la fig. 2.452 mostra ad esempio il caso di una dinamo con eccitazione in derivazione; il triangolo PQM è, come nel caso precedente, ricavato da una prova a carico nominale; la retta OA è la caratteristica del circuito di eccitazione (la sua inclinazione è pari alla resistenza di tale circuito). Al variare della corrente I, il triangolo PQM si sposta, mantenendo il punto P sulla retta OA, il punto M sulla caratteristica a vuoto mentre il segmento MP è proporzionale alla corrente d'indotto.

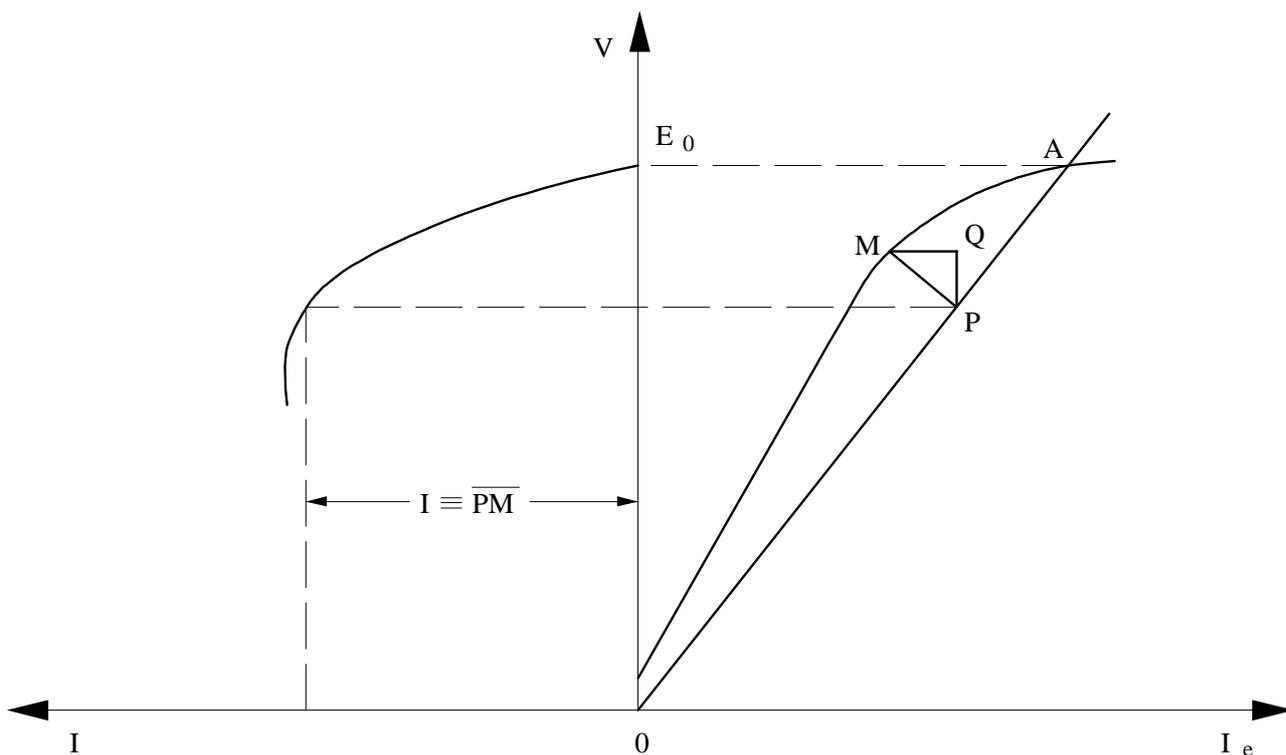


fig. 2.452

2.46 Tracciamento indiretto delle caratteristiche di un motore

Il ragionamento fatto per le dinamo può facilmente estendersi al caso di un motore, alimentato a tensione V costante, del quale si ricerca la variazione di velocità da vuoto a carico. Si consideri ancora una macchina ad eccitazione indipendente (fig. 2.461); partendo dalla caratteristica a vuoto a velocità di rotazione n_0 , dal punto di ordinata V, si traccia il triangolo PQM, ricavato mediante la

conoscenza di un punto della caratteristica a carico della macchina funzionante come dinamo a velocità n_0 ; con questa prova è stato determinato ovviamente anche il coefficiente della reazione di indotto.

La f.e.m. E_c , che il motore fornisce, a carico, allora:

$$E_c = V - RI_n$$

e per fornire tale f.e.m. con l'eccitazione risultante OA , la macchina deve rallentare e passare alla velocità:

$$n_c = \frac{AM}{AB} n_0$$

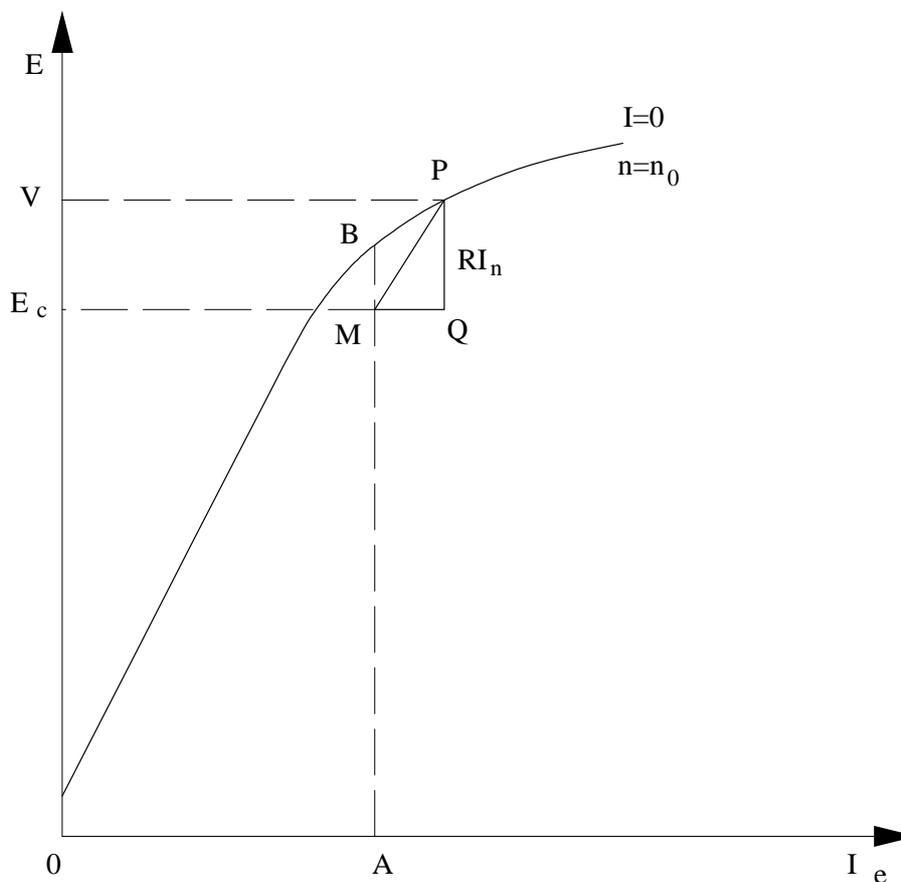


fig. 2.461

Si può così determinare l'andamento della velocità in funzione dei vari valori della corrente I , a cui risulta proporzionale il segmento PM .

Il ragionamento è condotto in modo analogo anche per gli altri tipi di eccitazione; in particolare, per i motori con eccitazione in serie, dove la corrente di carico coincide con quella di eccitazione, si riscontra facilmente che, all'aumentare di I , i punti P e M si spostano su due rette, l'una a $V =$ costante e l'altra dedotta dalla prima per lo spostamento del segmento $PM = I$, partenti dallo stesso punto; anche qui la velocità si desume dal rapporto fra i segmenti AM e AB (fig. 2.462).

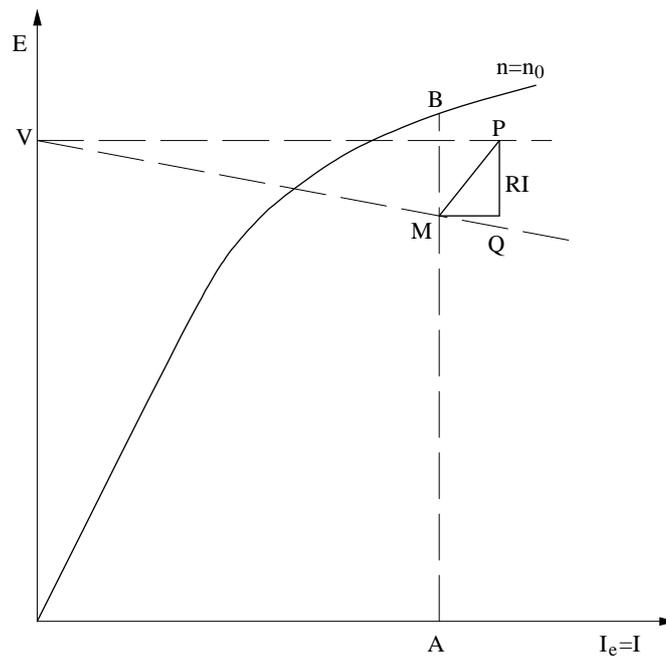


fig. 2.462

2.47 Determinazione del rendimento

Le perdite da considerarsi, per il calcolo del rendimento di una macchina a corrente continua, sono le seguenti:

- a) perdite a vuoto
- b) perdite meccaniche,
- c) perdite per effetto Joule nell'avvolgimento d'indotto
- d) perdite addizionali e nelle spazzole,
- e) perdite degli avvolgimenti di eccitazione e ausiliari (reostato di eccitazione).

Questi vari termini vengono determinati separatamente, per ogni condizione di funzionamento, dai risultati della prova a vuoto (perdite nel ferro e meccaniche) nonché dalla conoscenza delle resistenze delle varie parti (riportate alla temperatura di riferimento) e delle correnti che le percorrono. I valori di queste correnti (d'indotto, di eccitazione) si ricavano dalle curve caratteristiche, per il punto di funzionamento considerato.

Alle perdite per effetto Joule nell'indotto vanno aggiunte: le perdite addizionali, valutate convenzionalmente nello 0,5% della potenza nominale per macchine compensate e 1 % per macchine non compensate (esse variano col quadrato della corrente); le perdite nelle spazzole, valutate, in modo approssimativo, calcolando un volt di caduta per ogni spazzola di carbone o grafite, 0,3 V per ogni spazzola a contenuto metallico.

2.5 Prove di comportamento in transitorio delle macchine a c.c.

2.51 Parametri caratteristici

In molte applicazioni, le macchine a corrente continua sono chiamate a funzionare in transitorio, in particolare quando fanno parte di un sistema di regolazione; basta pensare alle applicazioni delle dinamo come eccitatrici dei generatori sincroni, a un lato, e a quelle dei motori a c.c. come attuatori nei regolatori che richiedono forte potenza a velocità variabile (laminatoi, cartiere, ecc.).

Se si considera una macchina a c.c. durante i suoi transitori, essa può con qualche semplificazione, ricondursi allo schema di fig. 2.511, rappresentato dalle equazioni:

$$v_e = R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt}$$

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega M i_e$$

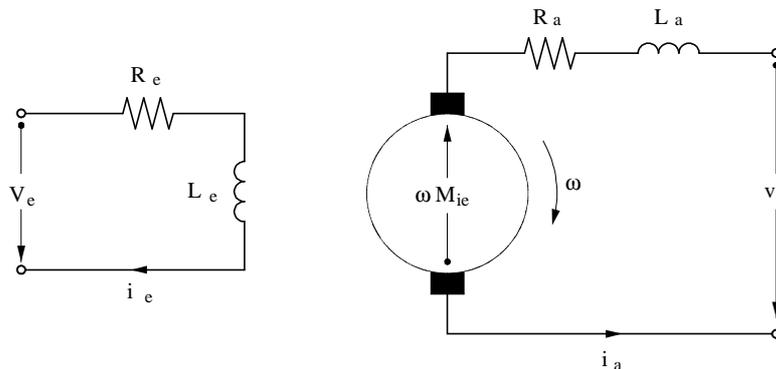


fig. 2.511

Dette equazioni presuppongono un comportamento lineare della macchina, trascurandone la saturazione, non tengono conto degli effetti di eventuali correnti parassite nei materiali ferromagnetici, e ammettono la commutazione lineare semplice, con le spazzole sull'asse neutro; l'induttanza L_a che vi compare perciò quella dell'indotto, in corrispondenza a tale posizione delle spazzole.

Le tensioni v_a e v_e e le relative correnti sono ulteriormente legate fra loro tramite i principi di Kirchhoff, scritti per la particolare connessione delle eccitazioni (in serie, in derivazione, ecc.); per la completa soluzione del transitorio sussistono inoltre due altre relazioni, l'una che lega la coppia motrice ai valori dei flussi e delle correnti nella macchina, l'altra che esprime l'equilibrio delle coppie motrice, resistente e d'inerzia.

Per quanto ci interessa è sufficiente osservare che i parametri elettrici che intervengono nel transitorio sono:

- le resistenze R_e e R_a rispettivamente dei circuiti di induttore e di indotto;
- il coefficiente M che è ricavabile dalla f.e.m. a vuoto della macchina ($E = \omega M I_e$) per una velocità angolare nota, e per una corrente di eccitazione costante;
- l'induttanza L_e propria del circuito di eccitazione;
- l'induttanza L_a propria del circuito di indotto, con le spazzole poste sull'asse neutro.

2.52 Misura dell'induttanza di armatura

La misura dell'induttanza L_a può farsi molto semplicemente a macchina ferma alimentando l'indotto con tensione a frequenza industriale; sia escluse ogni eventuale circuito di eccitazione serie, per evitare che la macchina tenda a girare come motore serie.

Si deve avere particolare cura per evitare il sovrariscaldamento delle spazzole e del collettore; in alcuni casi, conviene sostituire le spazzole con blocchetti di rame della stessa larghezza, o alimentare direttamente l'indotto dalle prese del commutatore, cortocircuitando lo stesso numero di lamelle che cortocircuitato dalle spazzole.

La misura può essere fatta solo con voltmetro e amperometro essendo in generale trascurabile il contributo della resistenza.

La misura può inoltre essere eseguita alimentando il circuito di induttore, in modo da saturare il circuito magnetico principale.

2.53 Misura dell'induttanza del circuito di eccitazione.

L'induttanza del circuito di eccitazione è in genere elevata e variabile con la frequenza, per effetto delle correnti parassite indotte nei materiali ferromagnetici; per la sua determinazione si utilizzano perciò in genere dei transistori relativamente lenti.

Due schemi sono dati in fig. 2.531 ; nel primo l'eccitazione, resa indipendente, viene alimentata bruscamente da una sorgente di resistenza trascurabile; nel secondo si cortocircuita la sorgente di alimentazione; in entrambi i casi il circuito di alimentazione regolato in modo da produrre, a regime, la corrente di eccitazione I_e che si ha a carico nominale.

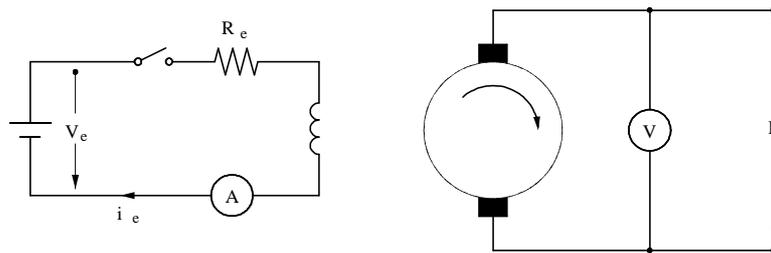


fig. 2.531 a)

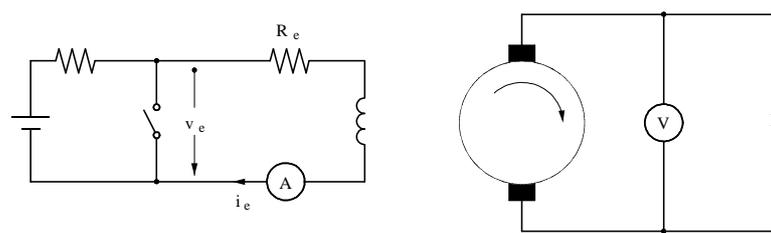


fig. 2.531 b)

La corrente di eccitazione (e corrispondentemente la tensione indotta) variano nel transitorio secondo una legge esponenziale (fig. 2.532) per cui è rispettivamente:

$$\left[\frac{dI_e}{dt} \right]_{t=0} = \frac{V_e}{L_e} \quad \text{con} \quad V_e = \text{tensione di eccitazione a regime}$$

ovvero:

$$\left[\frac{dE}{dt} \right]_{t=0} = \frac{V_e}{L_e} \cdot \frac{E_0}{I_{e0}} \quad \text{con} \quad E_e = \text{f.e.m. indotta a regime}$$

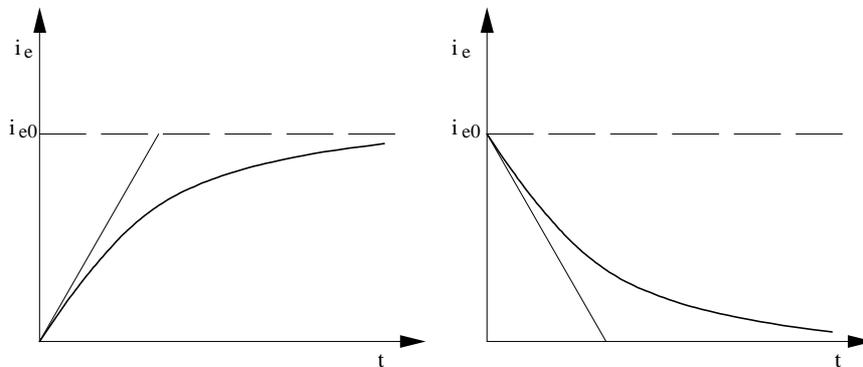


fig. 2.532

La misura della f.e.m. indotta E è più semplice ma può essere falsata dalla presenza del magnetismo residuo. Per la determinazione del transitorio occorre evidentemente procedere ad una registrazione oscillografica con una taratura sia sui valori della grandezza letta (I_e o E) sia sui tempi.

2.54 Risposta di una eccitatrice

Una caratteristica particolarmente importante nei riguardi delle eccitatrici delle macchine sincrone è la rapidità con la quale esse rispondono ad un transitorio; in particolare si vuole caratterizzare la velocità con la quale aumenta la tensione fornita dall'eccitatrice quando viene escluso tutto il reostato di campo R

Poiché il circuito d'indotto è, nel suo funzionamento, chiuso sull'induttore della macchina sincrona, che possiede un'induttanza molto elevata, si può, nella prova, considerare la dinamo a circuito aperto.

In generale, la macchina è regolata per dare, con R inserito, tensione e corrente nominali sulla resistenza di carico R ; corrispondentemente essa raggiunge a regime, con R disinserito, una tensione massima, che viene definita "tensione di ceiling" per il carico considerato.

La prova viene eseguita a velocità nominale, determinando oscillograficamente l'andamento della tensione di uscita V_a che si ottiene cortocircuitando il reostato R_c (fig. 2.541).

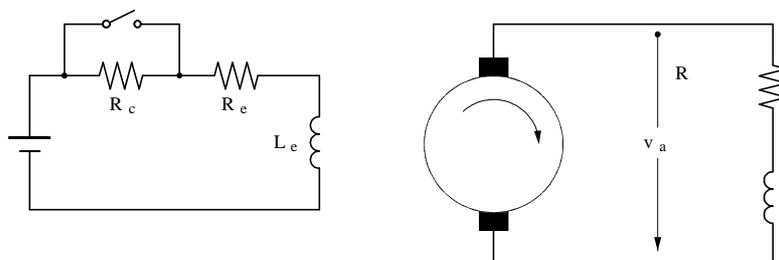


fig. 2.541

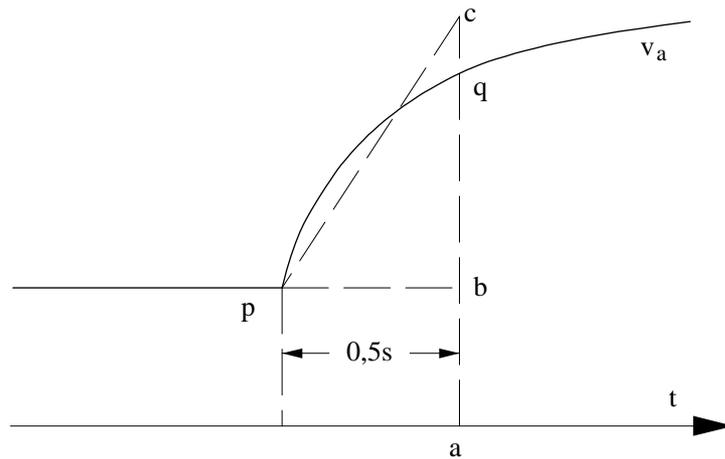


fig. 2.542

Convenzionalmente la variazione di tensione viene valutata dopo 0,5 secondi come quel segmento bc che dà luogo al triangolo pbq di area uguale al triangolo mistilineo pqb (fig. 2.542). La risposta dell'eccitatrice (in V/s) è il doppio di tale variazione; si definisce rapporto di risposta il rapporto fra il valore della risposta e quello del segmento ab (tensione indotta prima del transitorio); esso ha le dimensioni dell'inverso di un tempo, ed è generalmente dell'ordine di $(0,5 - 1) s$.