

## INTRODUZIONE

**Generalità sulle macchine ed azionamenti elettrici****I.1 - Macchine elettriche**

Un sistema fisico può essere sede di *energia accumulata*, con ciò intendendo che esso ha la possibilità di compiere del *lavoro* o di fornire del *calore*. All'energia accumulata si dà diversa denominazione a seconda della fenomenologia a cui essa è associata. Così si parla di energia potenziale *gravitazionale* di un bacino idroelettrico e di quella *cinetica* di un volano in moto, di quella *elettrostatica* di un condensatore carico e di quella *magnetica* di un solenoide percorso da corrente oppure, ancora, di quella *termica* di un corpo caldo e di quella *elastica* di una molla tesa.

Un sistema può anche scambiare energia con altri sistemi fisici interagenti con esso. All'energia scambiata si dà il nome di *lavoro* o, se essa è in forma termica, di *calore*. Si parla allora di *lavoro (calore) assorbito o ricevuto* da un sistema quando si valuta il flusso di energia entrante in esso. Viceversa, se si fa riferimento al flusso uscente, si parla di *lavoro (calore) fornito o reso*.

In molti casi gli scambi energetici tra due sistemi avvengono in modo naturale ed incontrollato. In altri casi, un terzo sistema viene interposto fra i primi due al fine di produrre e governare un determinato scambio energetico; questo terzo sistema prende il nome di *macchina*. Essa può eseguire allo scopo una trasformazione di forma fra l'energia ricevuta da un sistema e quella fornita all'altro oppure, senza tale trasformazione, può agire sulle grandezze fisiche che determinano il flusso energetico.

Così sono macchine le turbine idrauliche che trasformano l'energia cinetica di un fluido in movimento in lavoro meccanico reso al loro asse; le leve che ricevono energia sotto forma di lavoro meccanico con determinati valori dei fattori forza e spostamento e restituiscono ancora lavoro meccanico con fattori forza e spostamento modificati.

Le *macchine elettriche*, nella comune terminologia corrente, sono quelle in cui almeno uno degli scambi energetici è di natura elettrica, l'altro essendo, se non elettrico, un lavoro meccanico. Una prima fondamentale distinzione fra le macchine elettriche va quindi fatta secondo che in esse si attui solo una *trasformazione delle grandezze elettriche ai loro morsetti di ingresso e di uscita* (trasformazione della tensione, corrente, frequenza o del numero di fasi ecc.) o che in esse si esegua una *conversione elettromeccanica dell'energia*.

Le macchine del primo tipo si chiamano in generale *convertitori elettrici* e sono, nella maggior parte dei casi, *macchine elettriche statiche* cioè prive di organi in movimento. Esse comprendono i *trasformatori elettrici*, il cui funzionamento è basato sul fenomeno della mutua induzione e i *convertitori elettronici di potenza* detti anche *convertitori statici*, che per attuare la loro funzione impiegano interruttori elettronici.

Quelle del secondo tipo sono invece necessariamente *macchine elettriche dinamiche* con organi in movimento rotatorio o lineare. Vengono distinte fra *generatori elettrici*, se il lavoro che forniscono è di natura elettrica mentre quello assorbito è meccanico, e *motori elettrici*, se invece forniscono lavoro meccanico ricevendone di elettrico.

Questo testo è dedicato alle tecniche di controllo delle macchine elettriche dinamiche, in particolare nel loro funzionamento da motori alimentati da convertitori statici.

**I.2 - Azionamento elettrico**

Si definisce *azionamento* un sistema capace di produrre e controllare il moto di un organo (carico) meccanico. Le grandezze che si controllano possono essere sia statiche (posizione) che cinematiche (velocità) sia dinamiche (accelerazione, coppia o forza).

Ogni azionamento comprende un organo di potenza, detto *attuatore* capace di produrre il lavoro meccanico connesso al moto. Tale attuatore può essere idraulico, pneumatico o elettrico.

Si definisce *azionamento elettrico* un azionamento che fa uso di un attuatore elettrico, ossia di una macchina elettrica, solitamente in funzionamento da motore, nella quale avviene una conversione di energia da elettrica a meccanica (conversione elettromeccanica di energia).

Il controllo del moto si attua attraverso le grandezze di alimentazione del motore (tensioni, correnti, frequenza). Allo scopo fra il motore e la sorgente di alimentazione dell'energia elettrica (come per esempio la rete pubblica di distribuzione dell'energia elettrica) è interposto un dispositivo di potenza capace di fornire al motore le desiderate ampiezze della tensione, corrente e frequenza. Escludendo le soluzioni con convertitori rotanti, tale dispositivo sarà in generale un *convertitore statico* costituito da un eventuale trasformatore, per adeguare il livello di tensione e/o il numero di fasi, e da una struttura elettronica di potenza che impiega diodi, tiristori, transistori ecc.

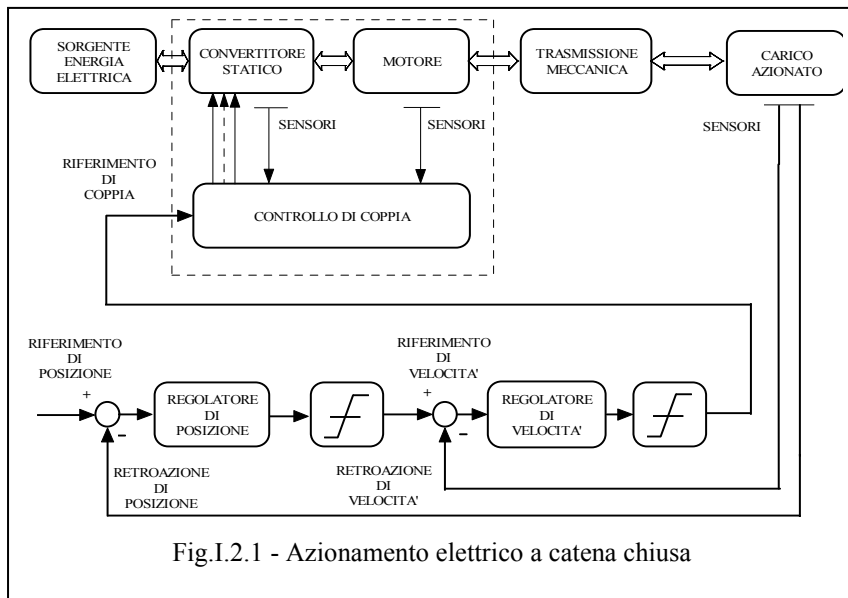


Fig.I.2.1 - Azionamento elettrico a catena chiusa

Lo schema di principio di un generico azionamento elettrico è mostrato in Fig. I.2.1.

Nel caso illustrato si ha un controllo a catena chiusa della posizione e della velocità (non sempre entrambi presenti). E' possibile avere anche azionamenti a catena aperta secondo lo schema di Fig. I.2.2.

Questi azionamenti hanno condizioni di lavoro (velocità, posizione) poco affette dalle caratteristiche del

carico azionato (almeno entro certi limiti) e definibili unicamente dalle condizioni di alimentazione del motore. Sono soluzioni in genere più economiche di quelle di Fig.I.2.1, ma anche meno precise e con più scarse prestazioni dinamiche. Sono rappresentati dalla Fig. I.2.1 anche gli *azionamenti sensorless* cosiddetti perché privi (per esigenze tecnico-economiche) dei trasduttori elettromeccanici di

velocità e posizione, pur essendo la conoscenza di queste grandezze essenziale per il loro corretto funzionamento. Negli azionamenti sensorless le grandezze non misurate vengono calcolate o stimate con tecniche diverse a partire

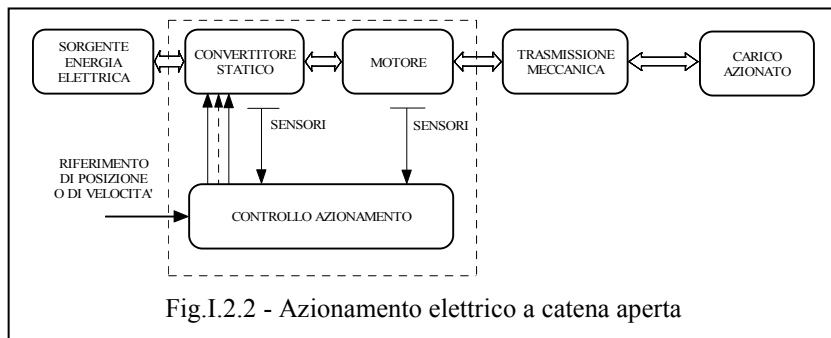


Fig.I.2.2 - Azionamento elettrico a catena aperta

dalle sole grandezze elettriche misurate. La complessità della soluzione adottata per ricostruire le grandezze non misurate determina le prestazioni dell'azionamento, che però in genere rimangono inferiori a quelle degli azionamenti di Fig. I.1.1, ma anche il loro costo.

In entrambe le figure è evidenziata a tratteggio la parte più interna di ciascuna azionamento che sarà oggetto principale di questo testo. In altre parole si esporranno soprattutto quegli aspetti che sono in larga misura indipendenti dalle caratteristiche meccaniche del carico.

### I.3 - Quadranti, limiti e regioni di funzionamento

Le prestazioni degli azionamenti al loro asse (prestazioni meccaniche) possono essere esaminate e classificate in differenti modi che portano a definire i quadranti di funzionamento e i limiti e le regioni di funzionamento.

**I.3.1 - Quadranti di funzionamento.** Gli azionamenti si possono classificare in base ai quadranti del piano velocità angolare-coppia nei quali sono in grado di operare, Fig. I.3.1. *La capacità di funzionamento in uno o più quadranti dipende dal tipo di motore e, specialmente, dal tipo di convertitore statico.* Si definiscono così gli azionamenti ad uno, due o quattro quadranti. Per una più precisa definizione si deve anche specificare se si fa riferimento al funzionamento a regime continuativo (come generalmente è, salvo avviso contrario) o a quello transitorio o intermittente ed, inoltre, quando l'azionamento non sia a quattro quadranti, a quali di essi ci si riferisca.

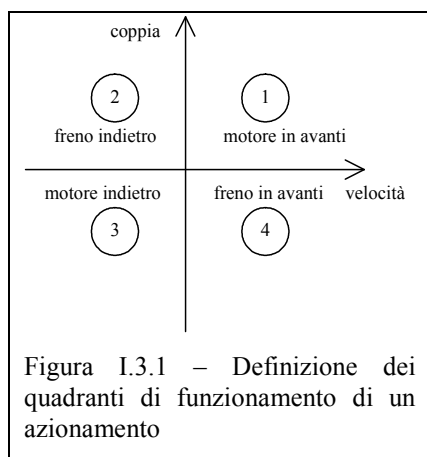


Figura I.3.1 – Definizione dei quadranti di funzionamento di un azionamento

Con la convenzione di segno dei motori, nel *primo quadrante* sia la velocità che la coppia sono positive e positiva è anche la potenza meccanica erogata dal motore, che è il prodotto delle prime due grandezze. Per questa ragione il funzionamento nel primo quadrante è detto *funzionamento da motore (in avanti)*.

Nel *secondo quadrante* la coppia è ancora positiva, mentre la velocità è negativa, come la potenza meccanica erogata. Il motore esprime pertanto una coppia contraria al moto (coppia frenante), il moto essendo impresso dal carico meccanico che, per un funzionamento continuativo in questo quadrante, deve essere un carico attivo, cioè capace di produrre potenza meccanica. Quest'ultima è assorbita dal motore e, a parte le perdite nel motore stesso, restituita ai suoi morsetti elettrici, ove viene dissipata o trasferita alla rete di alimentazione a monte del convertitore (*convertitori reversibili*). Con riferimento alle grandezze meccaniche, per il funzionamento in questo quadrante si usa la dizione di *funzionamento da freno (indietro)*. Facendo riferimento alle grandezze elettriche ai morsetti della macchina elettrica si parla anche di *funzionamento da generatore*.

Il funzionamento nel *terzo quadrante* vede sia la coppia che la velocità negative cosicché la potenza erogata, prodotto delle due, risulta positiva, come per il primo quadrante. Si parla pertanto in questo caso ancora di *funzionamento da motore (indietro)*.

Infine, nel *quarto quadrante*, copia e velocità sono ancora discordi come nel secondo, ma in questo caso è la coppia ad essere negativa, come la potenza meccanica erogata. Ci si riferisce al funzionamento in questo quadrante con il termine di *funzionamento da freno (in avanti)*. Dal punto di vista elettrico la macchina funziona ancora *da generatore* e si hanno condizioni operative analoghe a quelle del secondo quadrante.

A parità di tipologia di motore e convertitore, un azionamento capace di funzionare su più quadranti è in generale più costoso di uno che operi su un minor numero di quadranti. Il numero di

quadranti di funzionamento di un azionamento destinato ad un dato carico sarà quindi commisurato alle esigenze del carico stesso. Alcuni esempi possono aiutare a capire quest'affermazione.

- E' chiamato a funzionare solo nel primo quadrante un motore destinato a trascinare un ventilatore o una pompa. (assumendo, per ovvia semplicità, che la normale velocità di funzionamento sia quella definita positiva). Per tale applicazione è quindi sufficiente un azionamento ad un quadrante.
- Nel caso di un veicolo elettrico, si ha il funzionamento nel primo quadrante durante la marcia in piano o in salita, mentre durante la marcia in discesa o meglio durante la frenatura elettrica (cioè esercitata dai motori) il punto di funzionamento cade nel quarto quadrante (si inverte il senso della coppia, ma non della velocità). Servirà allora per questa applicazione un azionamento a due quadranti, con un solo verso di marcia. Molto spesso però un veicolo elettrico, per esempio un tram, deve poter funzionare indifferentemente in entrambi i versi di marcia. In questi casi si farà uso di un azionamento a quattro quadranti: durante un verso di marcia si utilizzano i quadranti primo e quarto, durante l'altro verso i quadranti terzo e secondo.
- L'azionamento per un montacarichi (o ascensore o gru) deve essere in grado di funzionare in due sensi di marcia: uno per la salita (lo si assuma come verso positivo della velocità) e uno per la discesa. In entrambi i casi però la coppia sviluppata ha sempre lo stesso segno, dovendo in ogni caso sostenere il peso della cabina contrastando la forza di gravità. I quadranti nei quali l'azionamento deve poter operare sono pertanto il primo (durante la salita) e il secondo (durante la discesa).

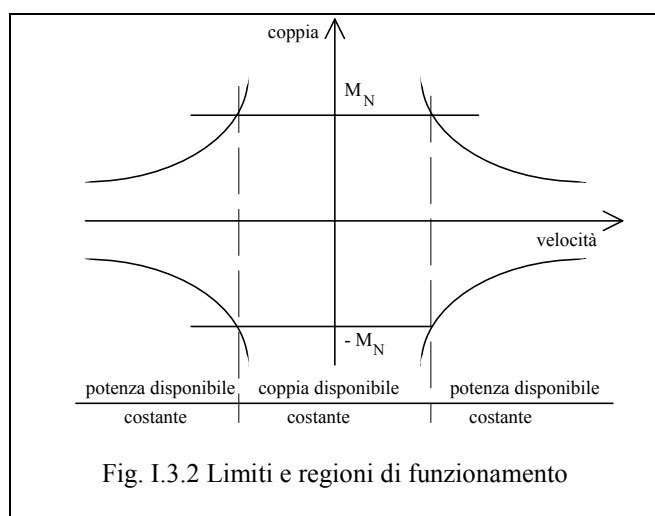
**I.3.2 - Limiti e regioni di funzionamento.** Ogni azionamento elettrico è caratterizzato da determinati limiti delle grandezze coppia e velocità che esso sviluppa. La ragione di tali limiti è di natura fisica, legata alle massime sollecitazioni elettriche, termiche, meccaniche che l'azionamento (o qualche parte di esso) è in grado di sopportare. Queste limitazioni definiscono, nel piano velocità angolare-coppia, delle regioni di funzionamento entro le quali deve cadere il punto di lavoro dell'azionamento stesso. Tipologie diverse di azionamenti sono in genere caratterizzate da regioni di funzionamento con diverse caratteristiche in conseguenza alle diverse modalità e capacità di funzionamento dei loro componenti. Ciò sarà messo in evidenza in altre parti di queste note, mentre qui si farà riferimento ad un azionamento tipico ideale.

La coppia sviluppata da un motore elettromagnetico è dovuta all'azione complessiva di forze elementari del tipo<sup>1</sup>

$$f = Bli \quad (I.3.1)$$

ove  $B$  è l'induzione magnetica che investe i conduttori percorsi dalla corrente  $i$  e  $l$  è la lunghezza di ciascun conduttore. Essendo quindi la coppia legata all'intensità della corrente elettrica nei circuiti del motore (e del convertitore), ragioni principalmente termiche limiteranno la coppia continuativa che un azionamento è in grado di erogare entro un valore che rappresenta la coppia nominale  $M_N$  dell'azionamento, come mostrato in Fig. I.3.2 ove i limiti positivi e negativi sono assunti uguali. Si comprende che, quando possibile, per avere la maggior coppia generata con la massima corrente sopportabile (*corrente nominale*), l'induzione magnetica  $B$ , o come più propriamente si dice il *carico magnetico*, del motore sarà mantenuto al suo valore massimo.

<sup>1</sup> Per semplicità, in queste considerazioni intuitive, si suppongono verificate le condizioni di ortogonalità e uniformità dei campi magnetici e di corrente che consentono la scrittura della semplice eq. (I.3.1).



Per quanto riguarda la velocità, occorre ricordare che la tensione ai morsetti è con buona approssimazione pari alla f.e.m. indotta negli avvolgimenti la quale risulta dalla somma complessiva di f.e.m. elementari del tipo<sup>2</sup>

$$e = Blv \quad (I.3.2)$$

ove  $v$  è la velocità con cui i conduttori tagliano le linee di campo, proporzionale alla velocità angolare  $\omega$  del motore. Al crescere della velocità di rotazione si ha quindi un aumento della tensione ai morsetti fino al valore limite che il

motore è in grado di sopportare o che il convertitore è in grado di erogare: *tensione nominale*. La velocità alla quale si manifesta la situazione citata definisce la *velocità base* dell'azionamento.

La regione di funzionamento nel piano velocità-coppia delimitata dalla coppia nominale e dalla velocità base prende il nome di *regione di funzionamento a coppia limite (o disponibile) costante* (qualche volta, per brevità, *regione a coppia costante*).

Il funzionamento al di sopra della velocità base (in valore assoluto) fino alla velocità massima imposta da vari fattori fra i quali senz'altro anche quelli meccanici, senza superare la tensione nominale è consentito solo riducendo il carico magnetico con legge inversamente proporzionale alla velocità, come si evince dalla (I.3.2). Di conseguenza essendo la corrente pur sempre limitata al suo valore nominale per le ragioni termiche citate, anche la coppia limite prodotta dal motore risulterà decrescere in maniera inversamente proporzionale alla velocità (cfr. (I.3.1)). Ciò è evidenziato in Fig. I.3.2. È facile convincersi che in condizioni limite si hanno per ogni velocità sia la tensione che la corrente nominali e quindi sempre la stessa potenza: *potenza nominale*.

La regione di funzionamento nel piano velocità-coppia delimitata dalla potenza nominale e che si estende dalla velocità base fino alla velocità massima (sia positive che negative) prende il nome di *regione di funzionamento a potenza limite (o disponibile) costante* (qualche volta, per brevità, *regione a potenza costante*).

Le considerazioni sopra esposte si riferiscono al funzionamento continuativo o comunque di durata molto maggiore delle costanti di tempo termiche che caratterizzano le diverse parti dell'azionamento. Per brevi intervalli di tempo (e tanto più quanto essi sono minori delle costanti di tempo termiche), l'azionamento può sopportare condizioni operative che eccedono i limiti appena definiti, specialmente per quanto riguarda il limite di corrente. Assieme alle regioni di funzionamento a coppia e potenza continuative costanti sopra descritte, possono quindi essere definite le stesse regioni per ogni funzionamento intermittente definito da un preciso rapporto fra tempo di funzionamento e tempo di riposo, il tutto rapportato alla costante di tempo termica del motore o del convertitore. A questo proposito occorre ricordare che mentre un motore può avere una costante di tempo termica dell'ordine di decine di minuti, un convertitore statico ha costanti di tempo notevolmente più brevi, dell'ordine dei secondi (qualche suo componente anche frazioni di secondo). Conseguenza di ciò è che quando si intende sfruttare la costante di tempo termica del motore per un funzionamento intermittente che eccede i valori nominali continuativi della sua corrente, il convertitore deve essere scelto con una adeguata corrente nominale continuativa superiore a quella del motore, spesso pari a quella massima prevista o quasi.

Si deve infine ricordare che, a prescindere da questioni termiche, esistono limiti non superabili, neanche transitoriamente, sia di coppia che di velocità di ogni azionamento dovuti per esempio alla

<sup>2</sup> Come per l'eq. (I.3.1), si assumano le necessarie condizioni semplificative (v. nota 1).

capacità di commutazione del sistema collettore-spazzole del motore in corrente continua, alla smagnetizzazione degli eventuali magneti permanenti del motore, alle sollecitazioni meccaniche ed elettriche massime ammissibili ecc.