

## Sommario

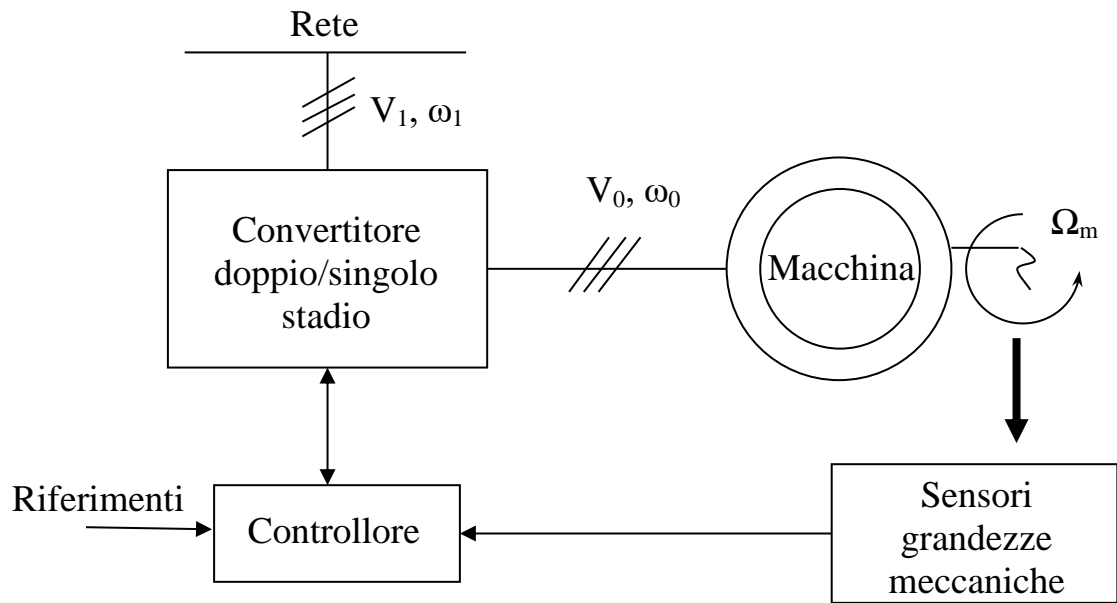
Capitolo 1 .....	2
Azionamenti con macchina in c.c. ....	2
1.1 Definizione di Azionamento Elettrico .....	2
1.2 Procedimento .....	4
1.3 Introduzione .....	6
1.4 Modello dinamico della macchina in corrente continua.....	10
1.5 Modello in regime stazionario ed equazioni fondamentali .....	13
1.6 Motore in c.c. a magneti permanenti .....	13
1.7 Motore a c.c. a eccitazione indipendente (o separata).....	15
1.8 Schema di controllo .....	18
1.9 Regolatore di tensione .....	22
1.10 Progetto dei regolatori di corrente .....	23
1.11 Progetto del regolatore di velocità.....	23

# Capitolo 1

## Azionamenti con macchina in c.c.

### 1.1 Definizione di Azionamento Elettrico

*Un azionamento elettrico è un sistema che converte energia elettrica in meccanica con l'ausilio di apparecchiature elettroniche di potenza in accordo con una funzione di comando. CEI 301-1*



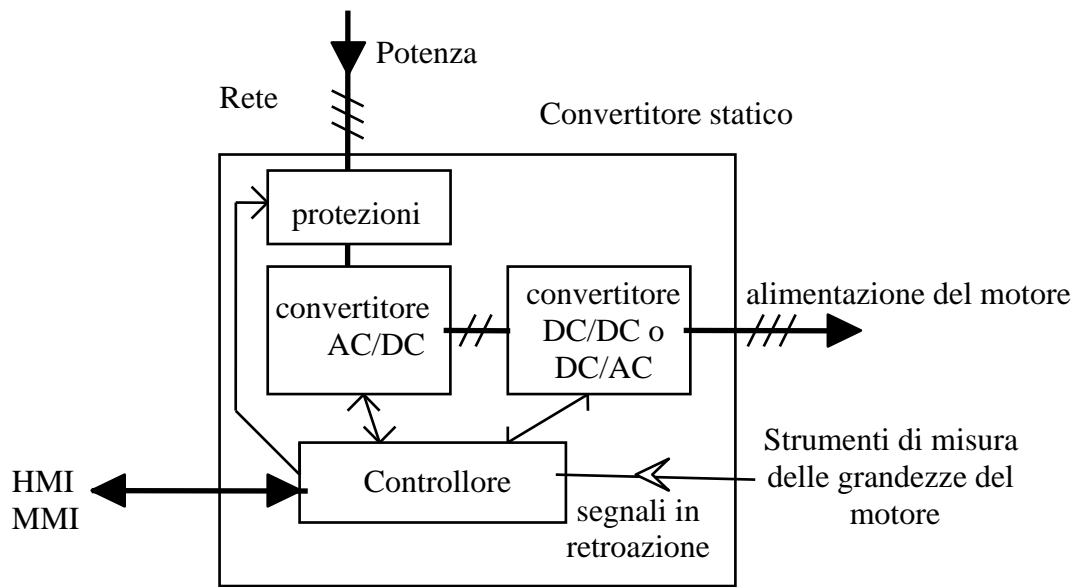


Figura 1-1 Convertitore statico a doppio stadio

## 1.2 Procedimento

Il procedimento da adottare per studiare un azionamento è generalmente caratterizzato dai seguenti passaggi:

Analisi della struttura della macchina

Modellistica:  
legami tensioni/correnti/flussi  
legami flussi/correnti

Scelta del sistema di riferimento

Costanti di tempo

Bilancio energetico:  
espressione della coppia

Schemi di controllo:  
controllo di coppia  
controllo di flusso

Caratteristiche dell'alimentatore

Campo di operatività

Sensori

Stimatori

### 1.3 Introduzione

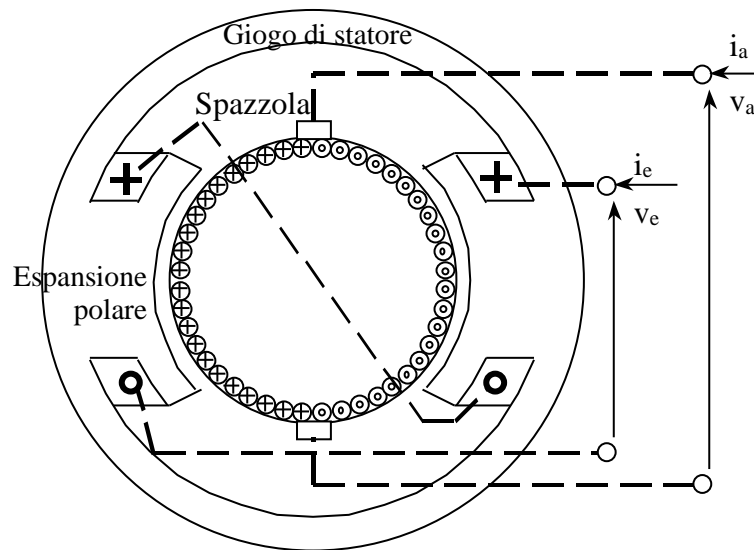


Figura 1-2. Sezione di una macchina in c.c. a due poli, ad eccitazione separata

Strutturalmente una macchina a c.c. è costituita da:

- uno statore esterno dotato di poli salienti che agisce da induttore
- un rotore interno che agisce da indotto.

Intorno al corpo polare si hanno delle bobine percorse, a regime, da corrente continua ( $i_e$ ), collegate tutte in serie fra loro, che costituiscono l'avvolgimento di eccitazione (detto anche di campo).

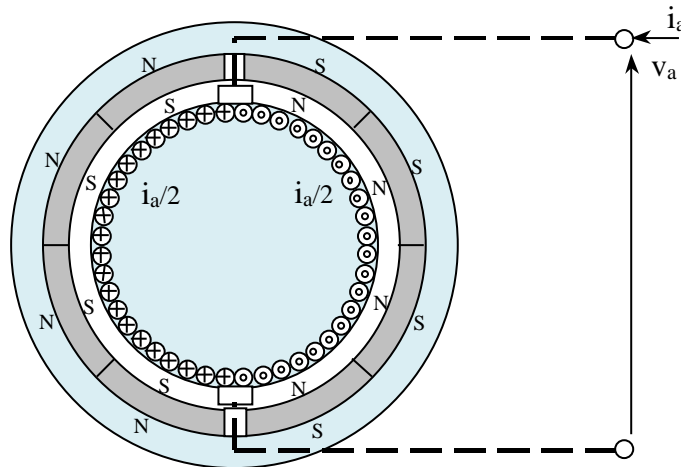


Figura 1-3. Sezione di un motore in c.c. a 2 poli a magneti permanenti

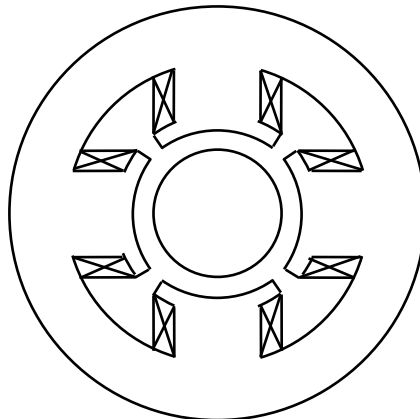


Figura 1-4. Sezione di una macchina in c.c. a quattro poli, ad eccitazione separata

L'indotto è costituito da una corona in materiale ferromagnetico laminato dotato di cave distribuite sulla periferia. In queste cave è alloggiato un avvolgimento chiuso. Sul rotore è inoltre montato un altro dispositivo che prende il nome di collettore a lamelle.

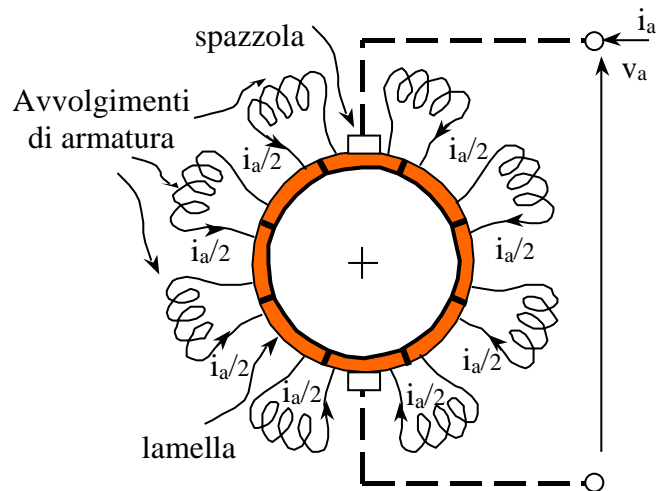


Figura 1-5. Collettore costituito da 8 lamelle e 2 spazzole

Per comprendere il funzionamento della macchina è opportuno riferirsi ad un circuito di armatura semplificato, costituito da una singola spira ed in grado di ruotare su se stesso, immerso in un campo magnetico uniforme.

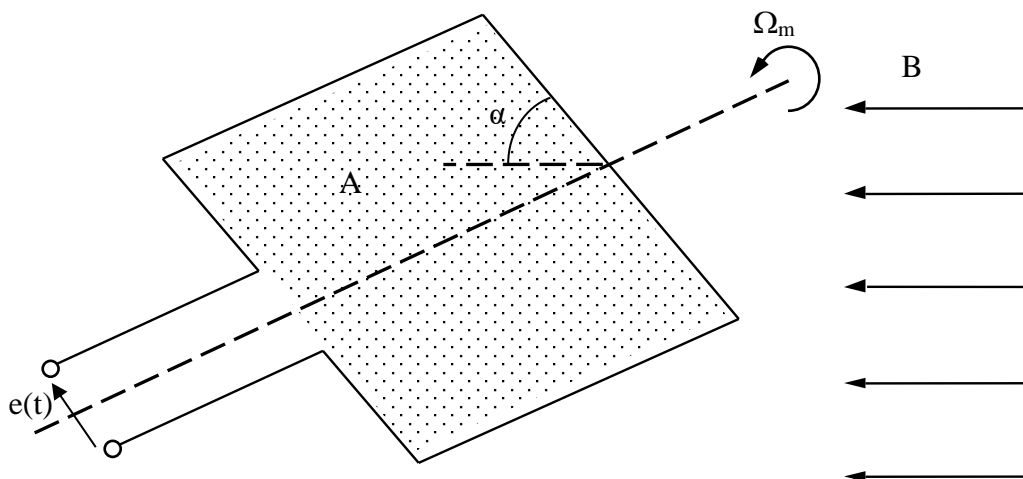


Figura 1-6. avvolgimento di armatura costituito da una singola spira

Se si suppone che il piano della spira formi, in ogni istante, un angolo  $\alpha$  con la direzione del vettore induzione magnetica  $B$ , si ha che il flusso magnetico concatenato con tale avvolgimento è ( $A$  si riferisce alla superficie definita dalla spira stessa):

$$\psi = B \cdot A \cdot \sin \alpha$$

Se si suppone ora che l'avvolgimento ruoti a velocità costante  $\Omega_m$ , si ha che, ai suoi morsetti, è misurabile una forza elettromotrice indotta, il cui valore è:

$$e(t) = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(B \cdot A \cdot \sin(\Omega_m t)) = -\Omega_m \cdot B \cdot A \cdot \cos(\Omega_m t)$$

dove  $\alpha$  è stato sostituito con  $\Omega_m t$ , poiché la velocità angolare è considerata costante.

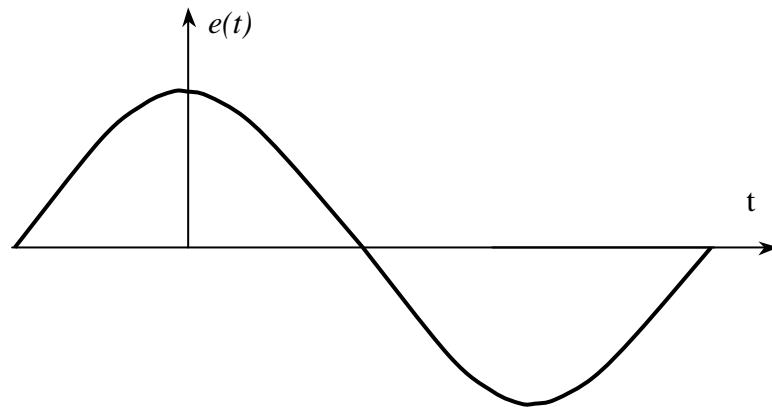


Figura 1-7. andamento della forza elettromotrice

Se ora si suppone di sostituire i morsetti con due semianelli e due contatti striscianti fissi (spazzole), la tensione tra i contatti risulta raddrizzata e costituita da due semionde positive.

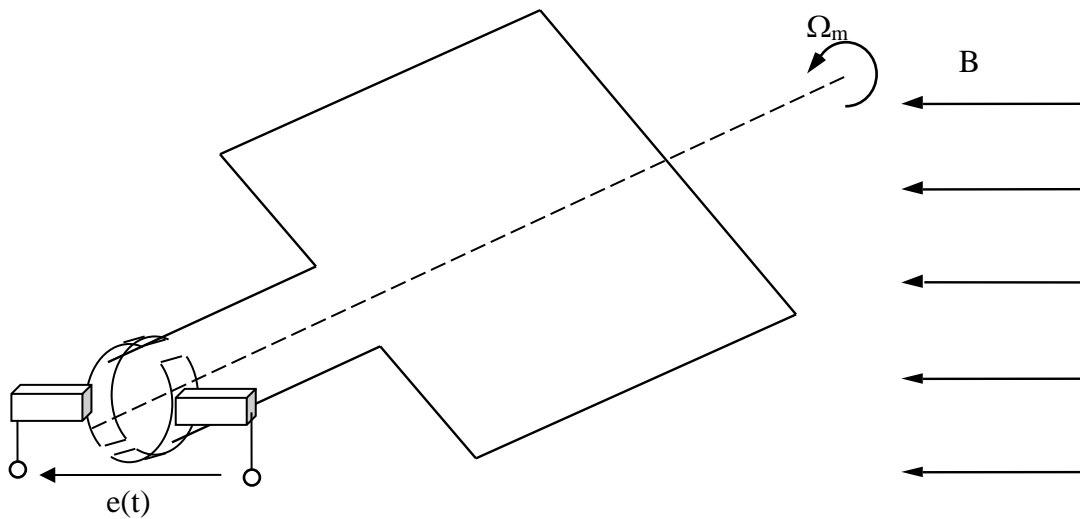


Figura 1-8. introduzione di due semianelli

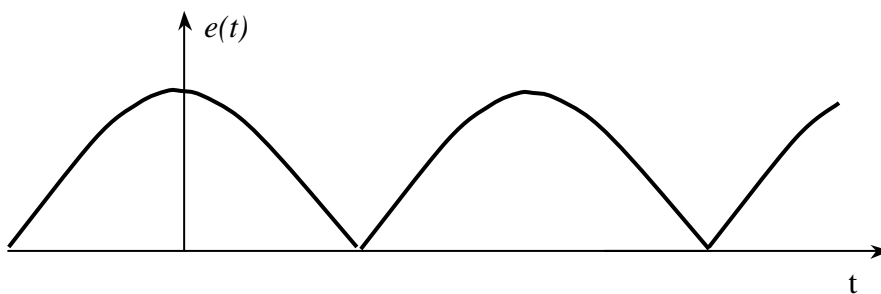


Figura 1-9. andamento della forza elettromotrice con due semianelli e due spazzole

Inserendo un ulteriore avvolgimento, solidale al precedente ma disposto ortogonalmente, la tensione misurata ai suoi capi sarà identica per forma e ampiezza a quella dell'altro avvolgimento, ma sfasata nel tempo di un quarto di periodo.



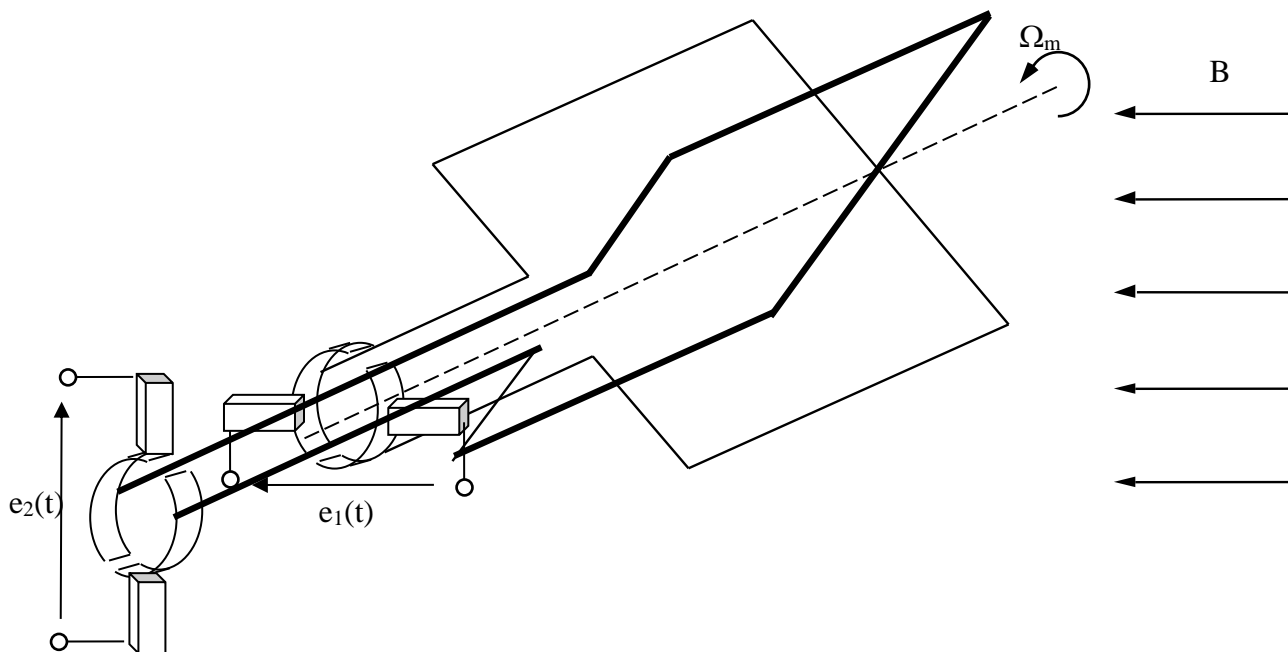


Figura 1-10. introduzione di un secondo avvolgimento, ortogonale al primo

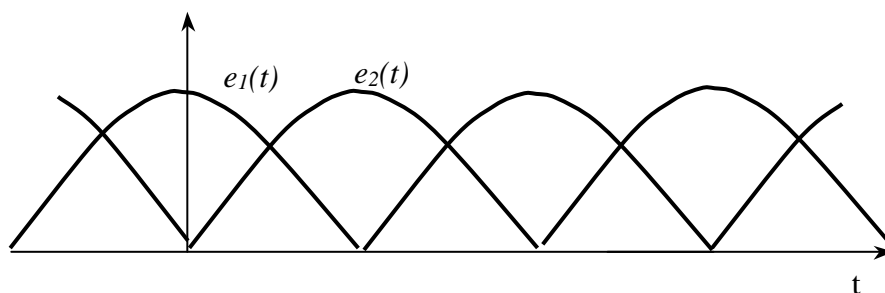


Figura 1-11. andamento delle forze elettromotrici

Ponendo i due avvolgimenti in serie, le tensioni si sommano.

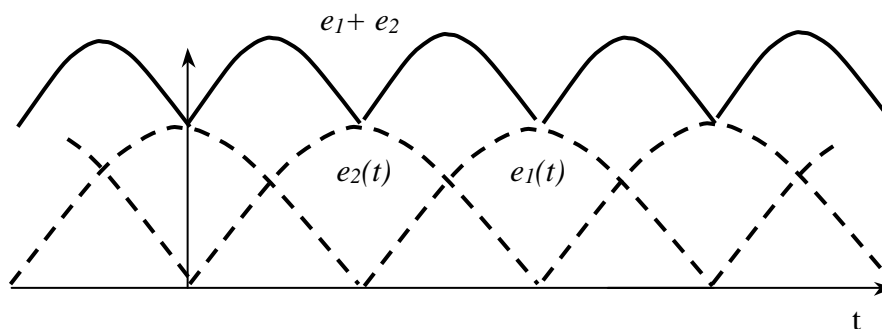


Figura 1-12. andamento della tensione ai capi dei due avvolgimenti in serie forze elettromotrici

Inserendo in serie un numero crescente di spire, si ottiene una tensione raddrizzata che tende ad essere sempre più costante. Occorre però sostituire i due semianelli con un collettore a lamelle.

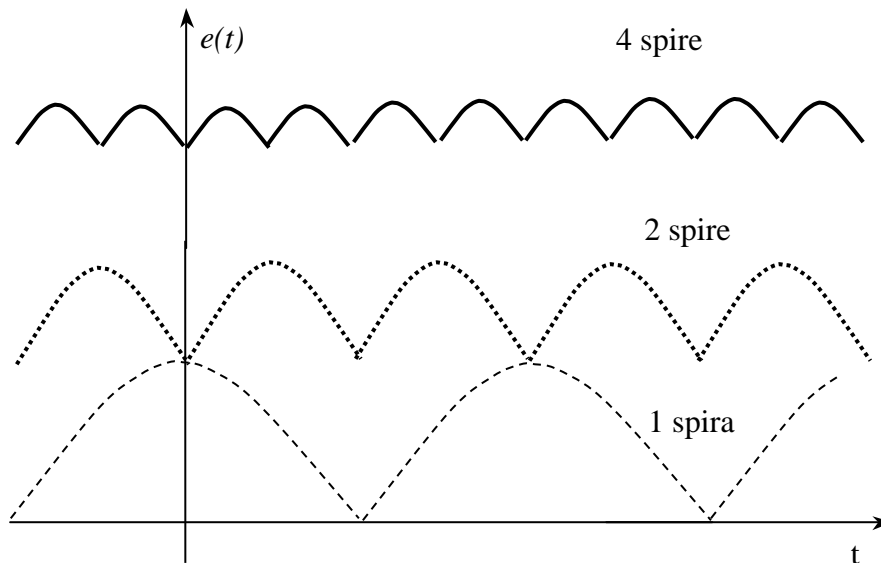


Figura 1-13. andamento della forza elettromotrice con due spazzole ed un collettore a due semianelli (1 spira), 4 lamelle (due spire in serie), 8 lamelle (quattro spire in serie)

Per riassumere: il principio di funzionamento di una macchina in c.c. si basa sui seguenti punti:

- esiste un avvolgimento (di eccitazione), montato sullo statore, che crea un campo magnetico di eccitazione
- vi è, inoltre, un avvolgimento (di armatura), realizzato sul rotore, che, mediante un dispositivo costituito da un collettore a lamelle e da spazzole, fornisce, a vuoto, una tensione raddrizzata (costante), proporzionale alla velocità meccanica e ad un flusso  $\psi_{ae}$ , in qualche modo concatenato con gli avvolgimenti di armatura, ma sostenuto dalla sola corrente  $i_e$ .

#### 1.4 Modello dinamico della macchina in corrente continua

Ai fini della realizzazione di un azionamento ha rilevante importanza lo studio del comportamento, in regime transitorio, della macchina.

Dalla Figura 1-14 si nota che le linee di campo dovute alla sola eccitazione si svolgono principalmente nel ferro, mentre quelle dovute alla corrente di armatura devono attraversare elevati traferri con la conseguenza che la permeanza (inverso della riluttanza) del circuito magnetico di armatura è molto più bassa della permeanza del circuito di eccitazione. Occorre ricordare che le costanti di tempo  $L/R$  non dipendono dal numero di spire: l'induttanza è proporzionale al numero di spire al quadrato, mentre la resistenza è proporzionale alla lunghezza del filo, (proporzionale a sua volta al numero di spire) ed inversamente proporzionale alla sezione del conduttore (che, a parità di area occupata dai conduttori, è inversamente proporzionale al numero di spire), quindi, per questo tipo di costruzione della macchina, la resistenza risulta proporzionale al quadrato del numero di spire. Ne deriva, quindi, che la costante di tempo di armatura  $\tau_a (L_a/R_a)$  è molto più bassa della costante di tempo di eccitazione  $\tau_e (L_e/R_e)$ . Inoltre, poiché il percorso del flusso di eccitazione si svolge principalmente nel materiale ferromagnetico (che presenta caratteristiche magnetiche non lineari), il legame flusso di eccitazione/corrente di eccitazione è non lineare, mentre si può considerare costante l'induttanza di armatura  $L_a$ , in quanto la riluttanza del percorso del flusso di armatura nel ferro è trascurabile rispetto a quella del percorso in aria.

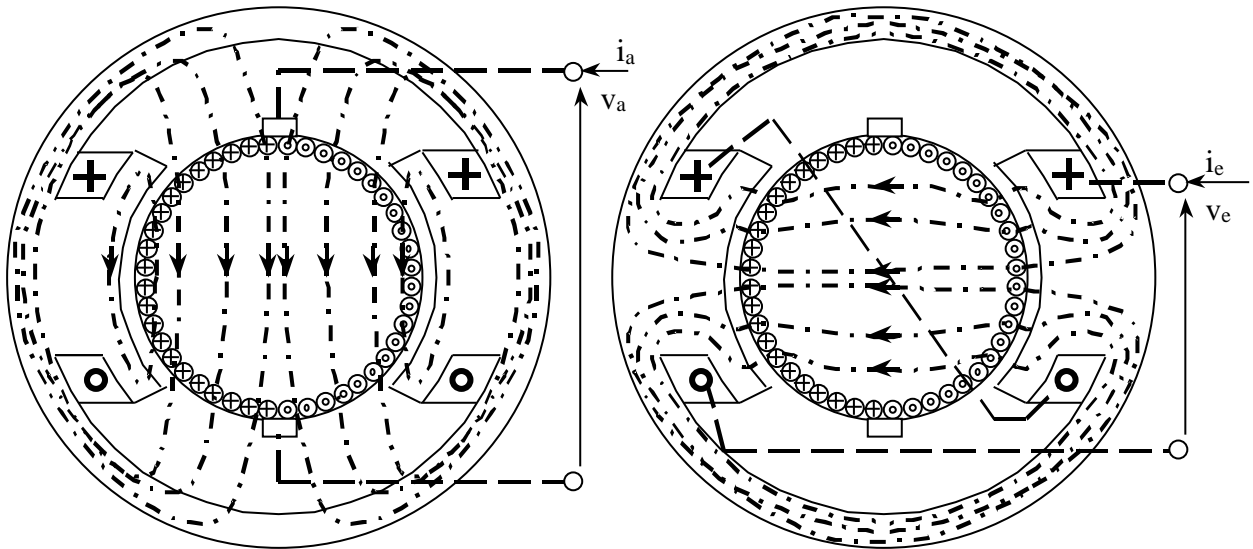


Figura 1-14. Andamento delle linee di campo magnetico all'interno della macchina

Le equazioni dinamiche sono quelle tipiche di ogni avvolgimento e cioè la tensione applicata è pari alla somma di una caduta resistiva e della derivata del flusso concatenato con l'avvolgimento stesso.

Nel caso dell'avvolgimento di armatura, la situazione è anomala in quanto la presenza del collettore a lamelle fa sì che, oltre ai due contributi appena menzionati, esista un termine (fem  $E$ ) dovuto al fatto che i conduttori di armatura si muovono all'interno di un campo magnetico causato dalla corrente di eccitazione.

Le equazioni dinamiche sono quindi (il simbolo  $p$  è equivalente a  $d/dt$ , derivata rispetto al tempo):

$$v_a = R_a \cdot i_a + p\psi_a + E$$

$$v_e = R_e \cdot i_e + p\psi_e$$

con i seguenti legami flussi/correnti (solo per l'armatura il legame è lineare):

$$\psi_a = L_a \cdot i_a$$

$$\psi_e = f(i_e) = L_e(i_e) \cdot i_e$$

$$\psi_{ae} = g(i_e) = L_{ae}(i_e) \cdot i_e$$

dove il flusso  $\psi_a$  rappresenta il flusso magnetico, concatenato con l'avvolgimento di armatura, sostenuto dalla corrente di armatura; il flusso  $\psi_e$  rappresenta il flusso magnetico, concatenato con l'avvolgimento di eccitazione, sostenuto dalla corrente di eccitazione; il flusso  $\psi_{ae}$  rappresenta il flusso magnetico, concatenato in qualche modo con l'avvolgimento di armatura, sostenuto dalla corrente di eccitazione ("in qualche modo" in quanto i due avvolgimenti hanno assi magnetici ortogonali tra loro, quindi non vi è mutuo accoppiamento tra i due avvolgimenti, ma i conduttori dell'avvolgimento di armatura, avvolgimento che possiede un asse magnetico fisso nello spazio per effetto del collettore a lamelle ed alle spazzole, si muovono all'interno di un campo magnetico generato dalla corrente di eccitazione).

I circuiti equivalenti dinamici di armatura e di eccitazione sono rappresentati in Figura 1-15.

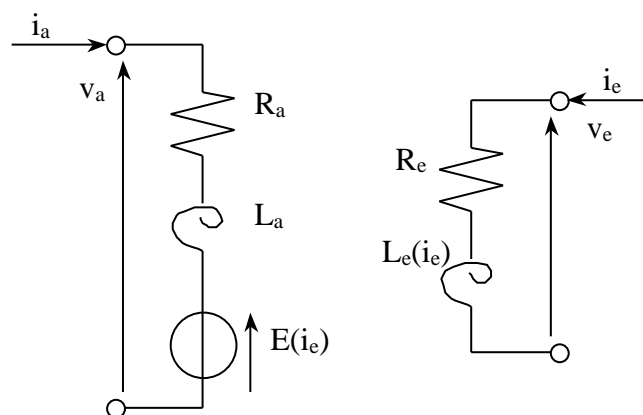


Figura 1-15. Circuito equivalente dinamico della macchina in c.c. a eccitazione indipendente

La forza elettromotrice  $E$  è proporzionale al flusso  $\psi_{ae}$  e alla velocità meccanica della macchina  $\Omega_m$ ; il legame con la corrente di eccitazione non è lineare, perché non è lineare la relazione tra  $\psi_{ae}$  e  $i_e$ :

$$E = k_e \cdot \psi_{ae}(i_e) \cdot \Omega_m$$

L'espressione della coppia può essere ottenuta da un bilancio energetico. Per quanto riguarda il circuito di eccitazione si ha:

$$v_e \cdot i_e = R_e \cdot i_e^2 + i_e p \psi_e$$

Il termine a sinistra rappresenta la potenza elettrica entrante, che, a regime e con forzanti costanti (tensioni), è costante. Il primo termine a destra rappresenta le perdite per effetto Joule, mentre il secondo termine è la variazione dell'energia magnetica interna (nulla a regime, con forzanti costanti) immagazzinata nel circuito magnetico di eccitazione.

Per quanto riguarda, invece, il circuito di armatura si ha:

$$v_a \cdot i_a = R_a \cdot i_a^2 + i_a p \psi_a + E \cdot i_a$$

Il termine a sinistra rappresenta la potenza elettrica entrante dai morsetti di armatura, che, a regime e con forzanti costanti (tensioni), è costante. Il primo termine a destra rappresenta le perdite per effetto Joule (nella resistenza di armatura), mentre il secondo termine è la variazione dell'energia magnetica interna (nulla a regime), immagazzinata nell'induttanza di armatura. Il terzo termine rappresenta la potenza scambiata (o trasmessa) tra statore e rotore.

$$P_e = E \cdot i_a = k_e \cdot \psi_{ae} \cdot \Omega_m \cdot i_a$$

Grazie al principio di conservazione dell'energia e trascurando eventuali attriti meccanici si può dire che la potenza trasmessa coincide con la potenza meccanica, per cui si ottiene:

$$P_m = T_e \cdot \Omega_m = P_e = k_e \cdot \psi_{ae} \cdot \Omega_m \cdot i_a$$

$$T_e = k_e \cdot \psi_{ae} \cdot i_a$$

che è l'espressione della coppia in una macchina in corrente continua.

In generale è:

$$E = k_e \cdot \psi_{ae} \cdot \Omega_m$$

$$T_e = k_c \cdot \psi_{ae} \cdot i_a$$

dove  $k_c$ , teoricamente, ha lo stesso valore di  $k_e$ .

Il sistema meccanico è rappresentabile mediante un sistema di equazioni algebriche e differenziali il cui ingresso è la coppia elettromagnetica  $T_e$  e la cui uscita è la velocità meccanica  $\Omega_m$ .

## 1.5 Modello in regime stazionario ed equazioni fondamentali

In regime stazionario e con forzanti (tensioni) costanti, agli effetti esterni la macchina si presenta, quindi, come una forza elettromotrice a cui è collegata in serie una resistenza che tiene conto della potenza persa per effetto Joule nei conduttori dell'avvolgimento di armatura.

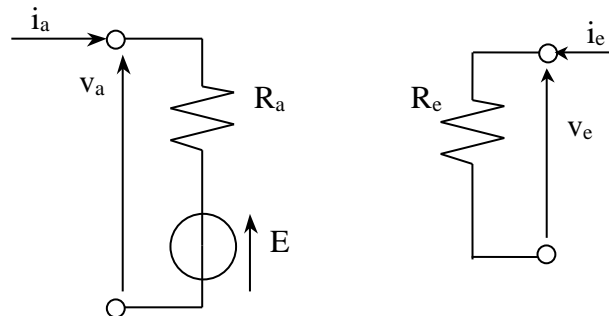


Figura 1-16. Circuito equivalente della macchina in c.c. in regime stazionario

I circuiti equivalenti di armatura e di eccitazione, in regime stazionario, sono mostrati in Figura 1-16. Le equazioni a regime sono:

$$v_a = R_a \cdot i_a + E$$

$$v_e = R_e \cdot i_e$$

con le seguenti relazioni flussi/correnti:

$$\psi_a = L_a \cdot i_a$$

$$\psi_e = f(i_e) = L_e(i_e) \cdot i_e$$

$$\psi_{ae} = g(i_e) = L_{ae}(i_e) \cdot i_e$$

La forza elettromotrice  $E$ , secondo quanto determinato in precedenza, è proporzionale al flusso  $\psi_{ae}$ , concatenato con gli avvolgimenti di armatura e sostenuto dalla corrente di eccitazione, ed alla velocità di rotazione della macchina  $\Omega_m$ :

$$E = k_e \cdot \psi_{ae} \cdot \Omega_m$$

La coppia vale:

$$T_e = k_c \cdot \psi_{ae} \cdot i_a$$

A seconda di come viene realizzato il campo di eccitazione e a seconda di come questo è connesso rispetto all'avvolgimento di indotto (armatura) si hanno diversi tipi di macchina in c.c.:

- motori in c.c. a magneti permanenti
- motori in c.c. a eccitazione serie
- motori in c.c. a eccitazione derivata
- motori in c.c. a eccitazione indipendente.

Nell'ambito delle applicazioni per gli azionamenti elettrici ha importanza studiare soprattutto due tipi di macchine e cioè quella a magneti permanenti e quella a eccitazione indipendente.

## 1.6 Motore in c.c. a magneti permanenti

Caratteristica fondamentale di questa macchina è la presenza di magneti permanenti sullo statore che danno vita ad un flusso di eccitazione costante (si può quindi ritenere costante anche il flusso  $\Psi_{apm}$  sostenuto dai magneti permanenti e concatenato con gli avvolgimenti di armatura). La coppia meccanica risulta così essere funzione della sola corrente di armatura. Si può scrivere:

$$T_e = k_c \cdot \Psi_{apm} \cdot i_a = K_{cPM} \cdot i_a$$

Analogamente la forza elettromotrice è funzione della sola velocità:

$$E = k_e \cdot \Psi_{apm} \cdot \Omega_m = K_{ePM} \cdot \Omega_m$$

Partendo da queste due equazioni si può ottenere facilmente l'andamento della caratteristica meccanica statica (di regime) per questo tipo di motore.

Considerando infatti il legame elettrico:

$$v_a = R_a \cdot i_a + E$$

$$i_a = \frac{v_a - E}{R_a}$$

si ha:

$$T_e = K_{cPM} \cdot \frac{v_a - E}{R_a} = K_{cPM} \cdot \frac{v_a - K_{ePM} \Omega_m}{R_a}$$

Questa equazione mostra che il legame tra coppia e velocità è lineare (a parità di tensione) ed è quindi possibile ottenere una famiglia di curve di uguale pendenza al variare della tensione di alimentazione. La pendenza di tali curve, in conseguenza dei tipici valori delle variabili in gioco (in particolare per il valore molto basso della resistenza di armatura), è molto elevata.

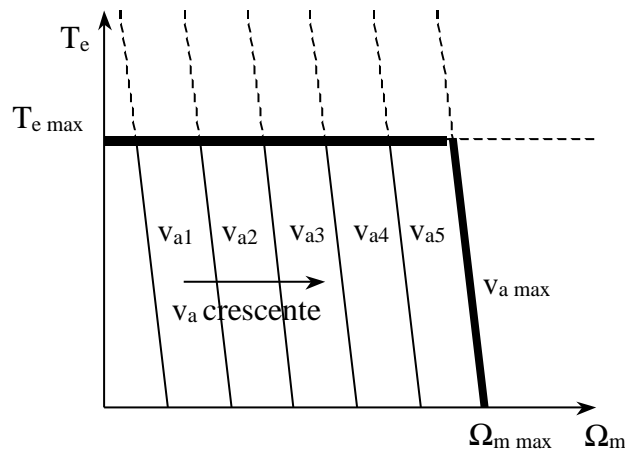


Figura 1-17. Caratteristiche meccaniche al variare della tensione di armatura e campo di operatività

Il campo di operatività della macchina (cioè il luogo dei punti di funzionamento accettabile per il tipo di servizio richiesto) è delimitato (come anche si deduce dalla Figura 1-17) dai seguenti fattori:

- la massima tensione ammissibile imposta dalla massima tensione in grado di fornire il convertitore statico o/e dalla massima tensione di isolamento degli avvolgimenti di armatura: in questo caso determina la massima velocità meccanica.
- la massima temperatura ammissibile dagli avvolgimenti: poiché la temperatura raggiunta dagli avvolgimenti durante il funzionamento dipende dalle perdite per effetto Joule (funzione della corrente di armatura), dal tipo di servizio richiesto (servizio continuativo, intermittente,...) e dal sistema di raffreddamento (aria ventilazione naturale, aria ventilazione forzata, acqua, olio,...), a parità di servizio e di sistema di raffreddamento, il limite di massima temperatura determina la massima corrente di armatura e, di conseguenza, la massima coppia.

### Intermittent duty

The following increases in output can be assumed with reference to the rated outputs listed in the "Selection and ordering data" for separately ventilated motors in S3 mode (intermittent duty):

S3 operating mode	Increase in output from $P_N$ in S1 operating mode
-60%	1.15
-40%	1.3
-25%	1.5

Figura 1-18 Incremento della potenza disponibile al variare del tipo di servizio

Nel caso della macchina a magneti permanenti, quindi, la massima velocità coincide con la velocità a vuoto (a coppia nulla) ottenibile in corrispondenza della tensione massima di alimentazione e senza carico meccanico (coppia resistente nulla).

## 1.7 Motore a c.c. a eccitazione indipendente (o separata)

Il punto di forza di questa macchina è costituito dalla possibilità di poter controllare, indipendentemente, la corrente di armatura e la corrente di eccitazione (e quindi il flusso  $\psi_{ae}$ ).

Le equazioni della caratteristica meccanica sono del tutto simili al caso precedente, ma vi è in gioco, in questo caso, anche la variabile flusso  $\psi_{ae}$ :

$$T_e = k_c \cdot \psi_{ae} \cdot \frac{v_a - E}{R_a} = k_c \cdot \psi_{ae} \cdot \frac{v_a - k_e \cdot \psi_{ae} \cdot \Omega_m}{R_a}$$

Si definisce ora la tensione nominale  $v_{an}$  come la massima tensione ottenibile dall'alimentatore, fatto salvo l'isolamento degli avvolgimenti di armatura e mantenendo un certo margine di tensione che permetta alla corrente di armatura di variare in regime dinamico.

Per sfruttare bene il materiale ferromagnetico con cui è realizzata la macchina e tenendo conto che il valore della costante di tempo del circuito di eccitazione è molto più alto di quello di eccitazione, è opportuno operare a flusso  $\psi_{ae}$  nominale (generalmente il punto di funzionamento corrisponde al ginocchio della caratteristica flusso/corrente di eccitazione) a cui corrisponde la corrente nominale di eccitazione  $i_{en}$ . Una corrente di eccitazione maggiore produrrebbe un incremento poco significativo del flusso mentre una corrente minore non giustificherebbe la presenza di tutto il materiale ferromagnetico (si potrebbe realizzare lo stesso sfruttamento del materiale in una macchina più piccola e leggera).

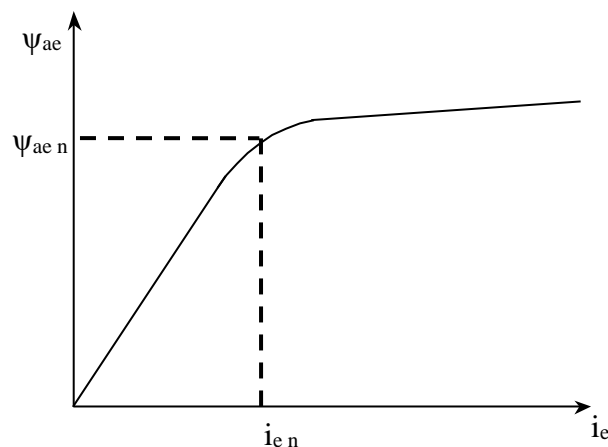


Figura 1-19. Legame non lineare tra flusso  $\psi_{ae}$  e corrente di eccitazione

Al crescere della velocità, però, la forza elettromotrice  $E$ , in queste condizioni, cresce. Di conseguenza deve crescere la tensione di armatura in quanto differisce da  $E$  solo per la caduta sulla resistenza di armatura (a regime). E' evidente, quindi, che esiste una velocità per cui la tensione di armatura raggiunge la tensione nominale. Tale velocità è indicata come velocità base  $\Omega_b$ . Oltre tale velocità, poiché la tensione non può crescere, la  $E$  deve rimanere costante. Per poter oltrepassare tale velocità è quindi necessario far decrescere il valore del flusso  $\psi_{ae}$ . ( $E = k_e \cdot \psi_{ae} \cdot \Omega_m$ )

Convien quindi suddividere il campo di operatività in due zone:

- velocità minore della velocità base e cioè tensione applicata minore della nominale
- velocità maggiore della velocità base e cioè tensione applicata uguale alla nominale

Per quanto riguarda la prima parte del campo non si ha nulla da aggiungere rispetto a quanto osservato per la macchina a magneti permanenti dato che si opera mantenendo il flusso  $\psi_{ae}$  costante e pari al suo valore nominale.

Per quanto riguarda la seconda zona del campo di operatività si tratta di regolare il flusso in modo tale che, al crescere della velocità, la tensione di armatura resti costante e pari alla nominale. In questo caso, operando a corrente di armatura costante la forza elettromotrice  $E$  rimane costante ( $E = v_a - R_a i_a$ ). L'andamento del flusso  $\psi_{ae}$  risulta quindi di tipo iperbolico.

Non potendo superare i limiti in termini di corrente di armatura (problemi termici), anche la coppia deve di conseguenza diminuire seguendo lo stesso andamento. Si determina, così, una zona di funzionamento a potenza costante (tensione e corrente costanti).

Il limite massimo di velocità è fondamentalmente imposto dai limiti derivanti da problemi meccanici e di funzionamento del collettore a lamelle alle alte velocità.

Da un punto di vista grafico, la modifica del valore di flusso, a pari tensione di alimentazione, determina una rotazione della curva meccanica caratteristica: l'intersezione con l'asse verticale (coppia di avviamento) è proporzionale al flusso  $T_{e\_st} = k_c \cdot \psi_{ae} \cdot \frac{v_a}{R_a}$  mentre l'intersezione con l'asse

orizzontale (velocità a vuoto) lo è in modo inverso  $\Omega_{m0} = \frac{v_a}{k_e \cdot \psi_{ae}}$ .

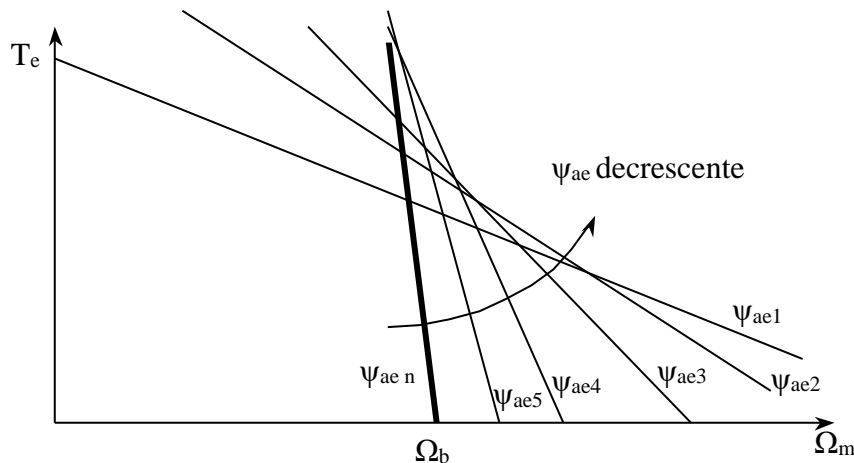


Figura 1-20. Caratteristiche meccaniche al diminuire del flusso  $\psi_{ae}$  (operazione di deflussaggio della macchina)

Per quanto riguarda il campo di operatività si può, viceversa, far riferimento al diagramma di Figura 1-21



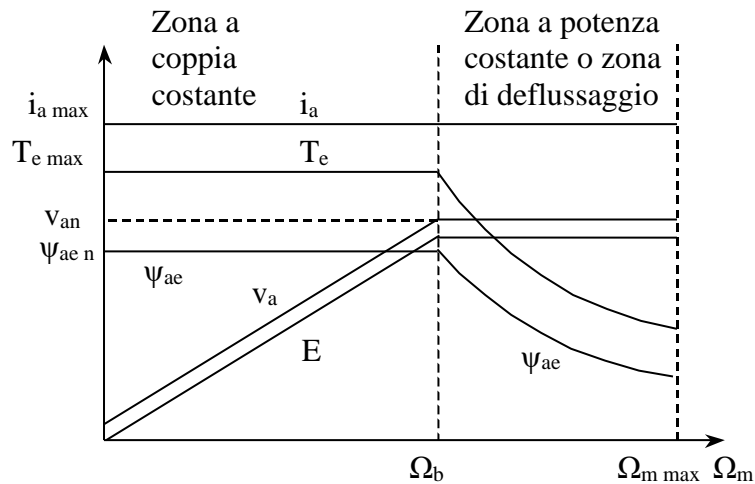


Figura 1-21. Campo di operatività

La corrente di armatura viene considerata costante e pari al valore massimo consentito dal sistema di raffreddamento e del tipo di servizio. Se l'efficacia del sistema di raffreddamento non fosse indipendente dalla velocità meccanica (come nel caso di ventola solidale con l'albero meccanico) la corrente massima di armatura deve diminuire con il decrescere della velocità (vedi Figura 1-22). In azionamenti, però, in cui si vuole operare con la coppia massima fino a velocità nulla e per lungo tempo, viene in generale previsto un sistema di ventilazione indipendente dalla velocità.

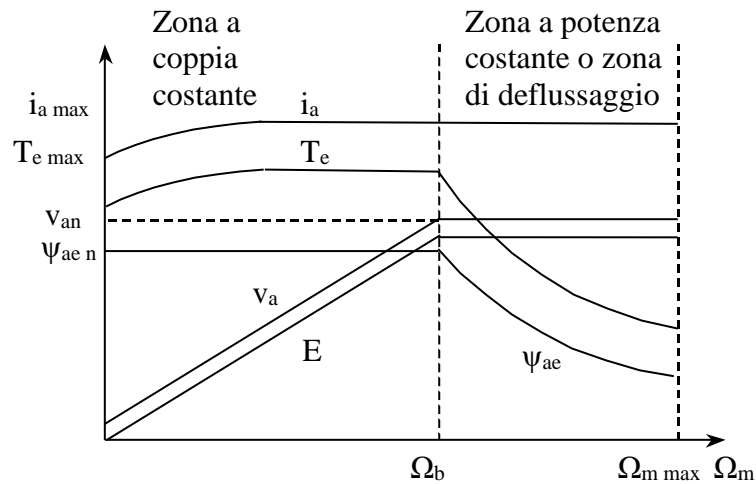


Figura 1-22. Campo di operatività con sistema di raffreddamento dipendente dalla velocità

La tensione di armatura non è nulla a velocità nulla in quanto è necessaria una tensione per far circolare nella resistenza di armatura la corrente richiesta.

L'andamento della potenza è simile all'andamento della tensione di armatura (se la corrente è costante). La zona di deflussaggio è detta anche "zona a potenza costante". La zona caratterizzata da velocità minori della velocità base è detta "zona a coppia costante".

Il campo di operatività viene limitato dalla massima velocità permessa dal sistema meccanico (principalmente dal collettore a lamelle).

La sequenza con cui disegnare le curve nel campo di operatività è indicata in Figura 1-23.

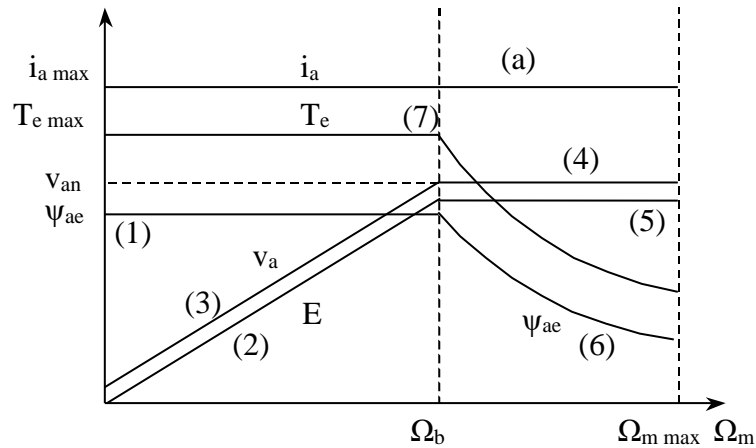


Figura 1-23. Sequenza

Da una parte esiste il limite termico sulla corrente (curva (a)), dall'altra il buon utilizzo del materiale ferromagnetico presente nella macchina definisce il valore del flusso  $\psi_{ae}$  (1). Si prosegue nel disegnare la  $E$  (2) (proporzionale alla velocità meccanica se il flusso è costante) e la tensione  $v_a$  (3) (leggermente maggiore a  $E$  per la caduta resistiva) fino al valore delle tensione nominale. Tale punto definisce la velocità base. Si prosegue con  $v_a$  limitata alla tensione nominale (4), per cui occorre mantenere costante  $E$  (5), deflussando la macchina (6). La coppia risulta proporzionale al prodotto della corrente di armatura ed al flusso  $\psi_{ae}$ .

Per quanto riguarda la corrente di armatura, la linea (a) rappresenta il limite superiore: quindi la corrente di armatura può assumere un valore all'interno dell'intera area delimitata da tale linea. Il flusso, la tensione di armatura, la  $E$  sono invece linee che rappresentano i possibili punti di funzionamento a regime di tali grandezze (non sono aree). La coppia è un'area (come la corrente di armatura).

## 1.8 Schema di controllo

Poiché l'obiettivo di un azionamento elettrico è quello di realizzare una determinata coppia (o, al più, di inseguire un determinato riferimento di velocità), il controllo dell'alimentatore potrà operare sia sulla corrente di armatura che sul flusso  $\psi_{ae}$  (e, quindi, sulla corrente di eccitazione  $i_e$ ). Vista la elevata differenza tra le costanti di tempo di armatura e di eccitazione, il controllo della coppia viene quasi sempre realizzato mediante il controllo della corrente di armatura in quanto ha una bassa costante di tempo, facendo seguire al flusso  $\psi_{ae}$  la caratteristica dettata dal campo di operatività (in modo da sfruttare, al meglio, il materiale ferromagnetico). Nel caso di macchina a magneti permanenti il problema non si pone in quanto il flusso  $\psi_{ae}$  può essere considerato costante e non controllabile.

Avendo a disposizione un alimentatore in grado di fornire "istantaneamente" la corrente richiesta (non sempre realizzabile), lo schema di controllo è semplice ed è descritto nella Figura 1-24 in cui è stata inserita la funzione di trasferimento  $F(s)$  del carico meccanico linearizzato ed è stato chiuso l'anello esterno di controllo della velocità meccanica.

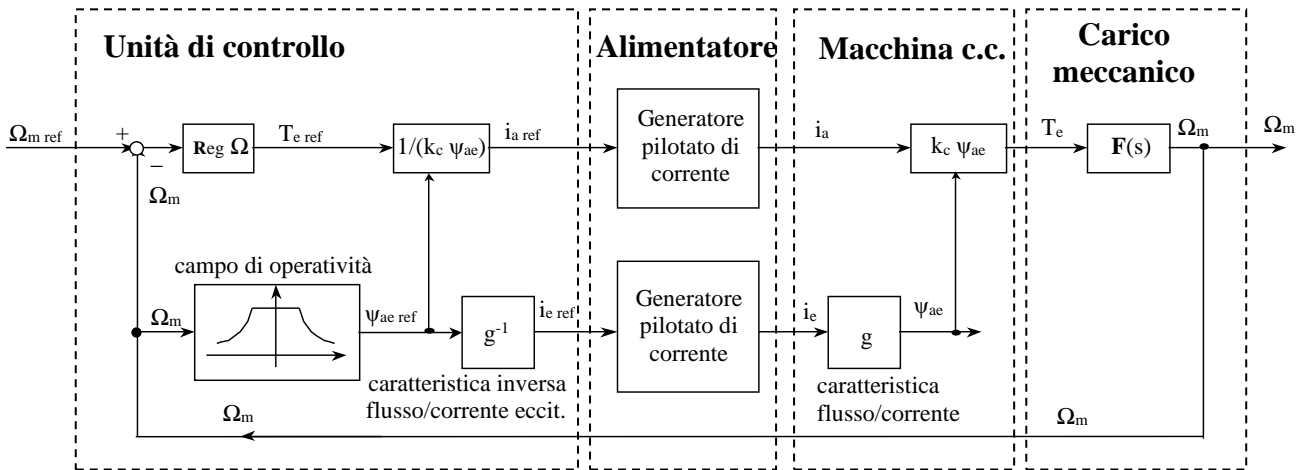


Figura 1-24. Schema di controllo di una macchina in c.c. a eccitazione indipendente (alimentatore in corrente) (Reg  $\Omega$ : regolatore di velocità)

Nella Figura 1-25 viene mostrato il corrispondente schema nel caso di eccitazione dovuta a magneti permanenti. Il coefficiente  $1/K_{cPM}$  può essere inglobato nel guadagno del regolatore di velocità.

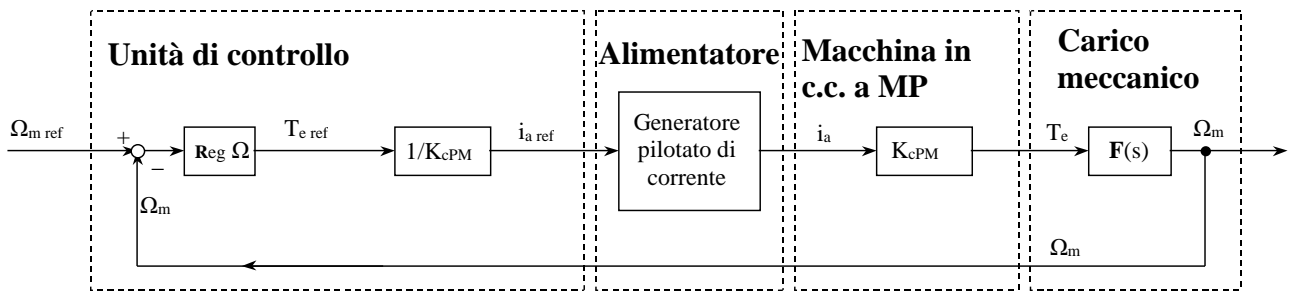


Figura 1-25. Schema di controllo di una macchina in c.c. a magneti permanenti (alimentatore in corrente)

Nella Figura 1-24 e Figura 1-25 si è rappresentato l'alimentatore come un dispositivo dotato di un veloce controllo di corrente tale da permettere alle correnti della macchina di inseguire fedelmente e istantaneamente i valori di riferimento; in effetti utilizzando inverter a transistori (o IGBT) con modulazione PWM ad elevata frequenza di commutazione (tipicamente  $>10$  kHz) si può ottenere che le correnti assorbite ricopino (a parte l'inevitabile ripple prodotto dalla modulazione a larghezza di impulso) i rispettivi riferimenti. Nel caso in cui fosse necessario tenere in considerazione la dinamica di statore (come avviene nella maggioranza dei casi), lo schema di controllo cambia, come mostrato in Figura 1-26 e Figura 1-27. In questo caso l'alimentatore ha il compito di realizzare un riferimento di tensione, mentre la regolazione della corrente viene ora effettuata dall'unità di controllo.

La struttura del regolatore di corrente si basa sulle equazioni differenziali della macchina:

$$v_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot p i_a + k_e \cdot \Omega_m \cdot \psi_{ae}(i_e)$$

$$v_e = R_e \cdot i_e + p \psi_e(i_e) \approx R_e \cdot i_e + L_e \cdot p i_e$$

dove  $L_e$  è l'induttanza differenziale  $L_e = d\psi_e/di_e$ .

Si nota subito che nella espressione della tensione di armatura compaiono due termini:  $R_a i_a + L_a p i_a$  (che verrà indicato con  $u_a$ ) ed il termine  $k_e \Omega_m \psi_{ae}$  che rappresenta la forza elettromotrice  $E$  proporzionale alla velocità meccanica ed al flusso  $\psi_{ae}$ . Tale termine rappresenta una forma di accoppiamento tra il circuito di eccitazione ed il circuito di armatura (non avviene il viceversa). Inoltre è funzione della velocità meccanica. Può essere considerato e trattato come se fosse un disturbo (facilmente compensabile conoscendo la velocità meccanica e i parametri della macchina). Quindi è bene che l'uscita del regolatore di corrente di armatura sia il valore di riferimento della

tensione  $u_a \text{ ref}$ , quella che effettivamente agisce sulla corrente  $i_a$ . Per ottenere il valore di riferimento della tensione di armatura  $v_a \text{ ref}$  basta sommare a  $u_a \text{ ref}$  il termine corrispondente a  $E$ . Per quanto riguarda l'eccitazione, l'equazione differenziale è non lineare. Al fine della sintesi del controllore occorre considerare l'induttanza differenziale calcolata nel punto di funzionamento oppure considerare lineare il legame flusso/corrente.

Se nello schema di controllo venisse a mancare la compensazione di  $E$ , il sistema, a regime, comunque sarebbe in grado di seguire il riferimento di corrente, in quanto l'azione della parte integrale del regolatore sopprimerrebbe alla compensazione del disturbo. Ci potrebbero essere problemi alla partenza del sistema di controllo e con velocità meccanica non nulla (cosiddetta "partenza al volo") e con macchina flussata. La parte integrale sarebbe scarica e l'uscita del regolatore di corrente (dovuta alla sola quota parte proporzionale) potrebbe essere minore di  $E$ . In queste condizioni, la corrente di armatura assumerebbe, nei primi istanti, un valore negativo in quanto la forzante ( $v_a - E$ ) risulta negativa (e quindi una coppia negativa o di frenatura) indipendentemente dal valore della corrente di riferimento. Per una buona partenza al volo è necessario compensare la forza elettromotrice  $E$ .

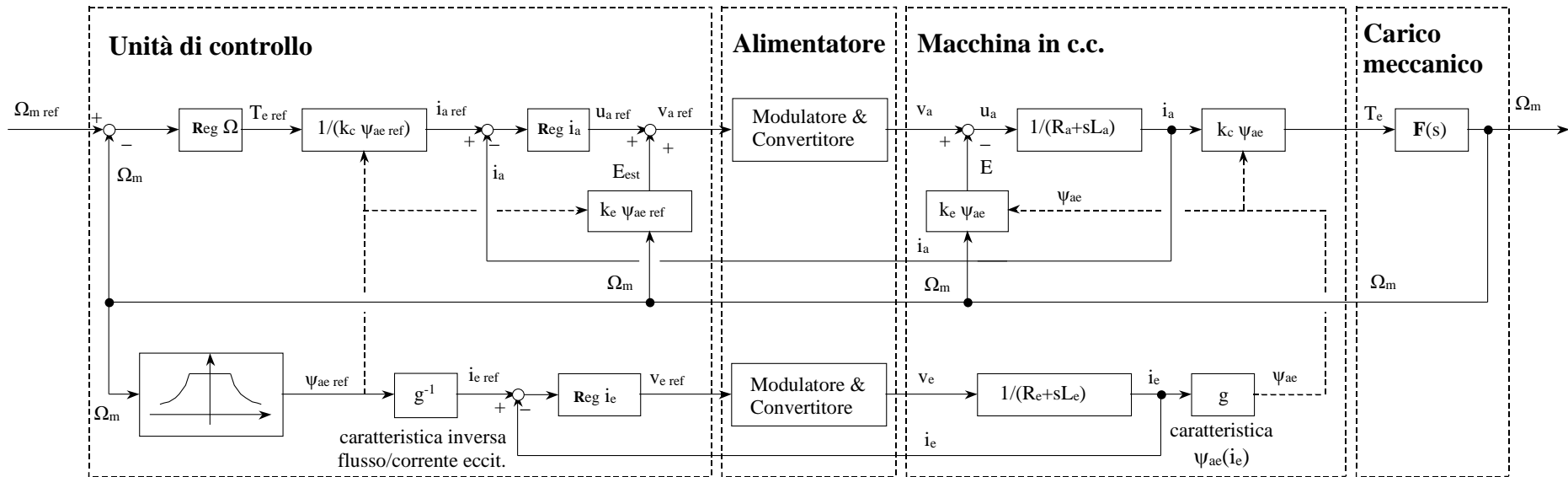


Figura 1-26. Schema di controllo di una macchina in c.c. a eccitazione indipendente (alimentatore in tensione) (Reg  $i_a$ : regolatore di corrente)

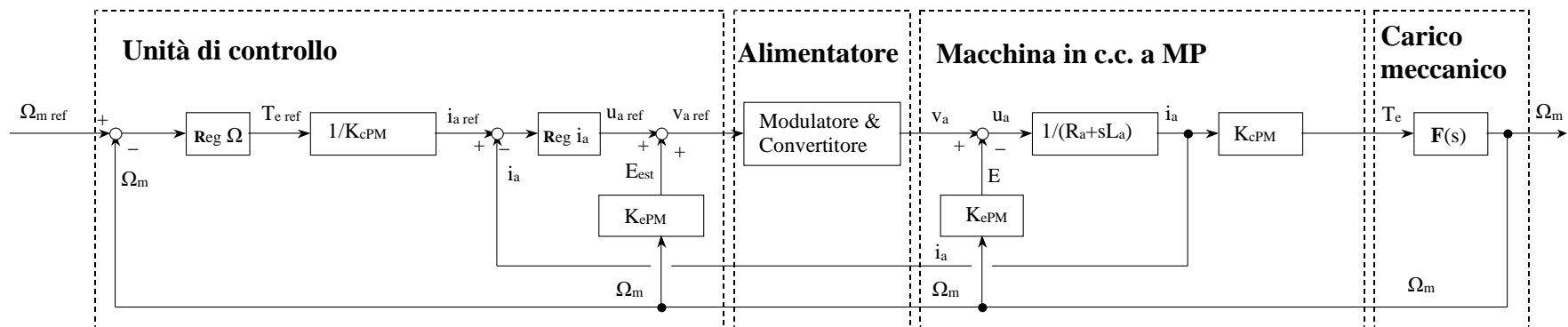


Figura 1-27. Schema di controllo di una macchina in c.c. a magneti permanenti (alimentatore in tensione)

## 1.9 Regolatore di tensione

Per sfruttare al meglio le condizioni di funzionamento della macchina e per rendersi indipendenti da eventuali errori sui parametri della stessa, il valore del flusso di riferimento, anziché essere calcolato con soluzione ad anello aperto, mediante l'utilizzo del campo di operatività e conoscendo la velocità meccanica, può essere ottenuto come uscita di un regolatore della tensione di armatura, opportunamente saturato e dotato di proprietà anti-windup. Partendo dalla fem stimata e sommandole la caduta resistiva, si ottiene la stima della tensione di armatura (considerata a regime, cioè senza caduta sulla induttanza di armatura). Se tale valore risulta minore della massima tensione che l'alimentatore può fornire (compatibilmente con le caratteristiche di isolamento dei conduttori e mantenendo un certo margine per il controllo dinamico della corrente), l'uscita del regolatore satura al valore nominale del flusso  $\psi_{ae}$  (zona a coppia costante). Non appena la tensione stimata raggiunge il valore massimo, il regolatore inizia a lavorare, abbassando opportunamente, all'aumentare della velocità, il flusso  $\psi_{ae}$  in modo da agire sulla fem (e di conseguenza sulla tensione di armatura) (zona di deflussaggio).

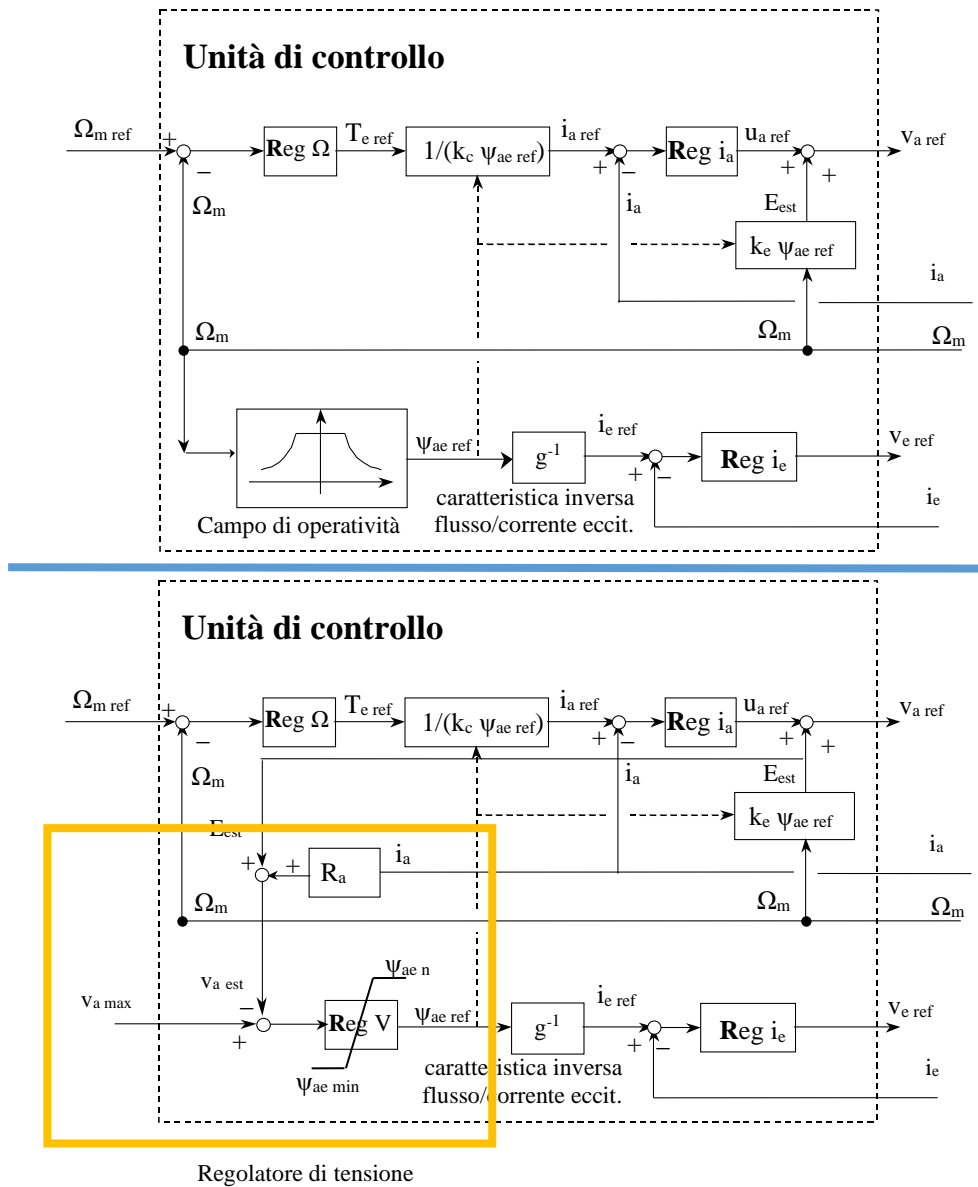


Figura 1-28. Unità di controllo con regolatore di tensione anziché mediante il campo di operatività

## 1.10 Progetto dei regolatori di corrente

Con tutti i termini di compensazione di valore opportuno e, se è lecito considerare l'alimentatore come un puro guadagno unitario, i regolatori di corrente possono essere facilmente progettati in quanto agiscono su una funzione di trasferimento del tipo  $R+sL$  (per l'eccitazione si è considerato il sistema linearizzato intorno al punto di funzionamento).

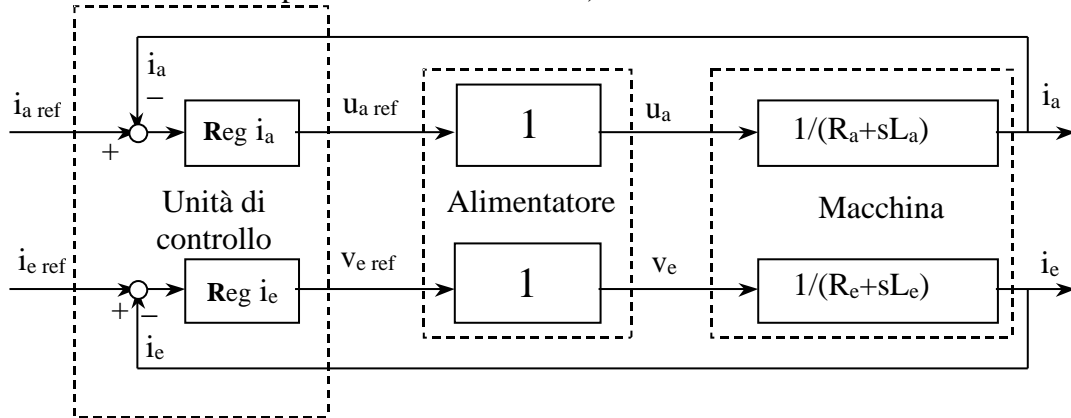


Figura 1-29. Schema per il progetto dei regolatori di corrente

Per una migliore rappresentazione dell'alimentatore si potrebbe sostituire al guadagno unitario un ritardo il cui valore è legato al tempo di commutazione delle valvole del convertitore. Se il modulatore si basa su una tecnica PWM, ad esempio, il ritardo tra l'istante di variazione del riferimento e l'attuazione varia da 0 a tutto il periodo di switching. Mediamente si può ipotizzare un ritardo pari a metà del tempo di switching.

## 1.11 Progetto del regolatore di velocità

Al fine di realizzare il progetto del regolatore di velocità occorre conoscere la funzione di trasferimento del sistema complessivo prima tracciato. L'uscita del regolatore di velocità rappresenta il valore desiderato della coppia elettromagnetica, a cui è legata la corrente di armatura. Lo schema è riportato in Figura 1-30.

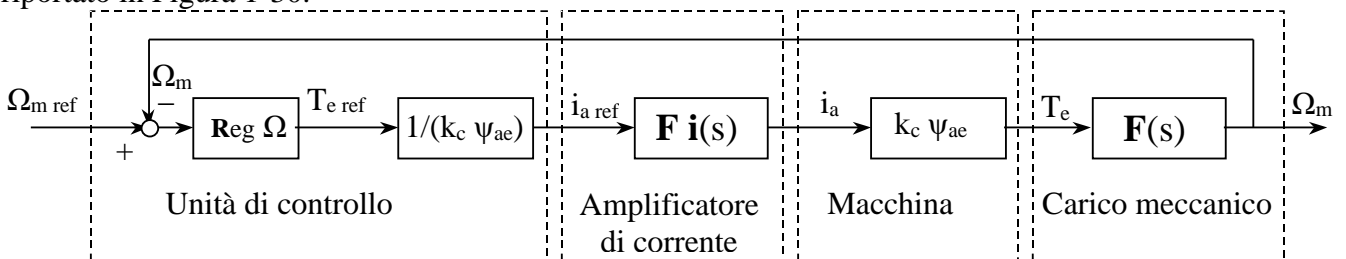


Figura 1-30. Schema per il progetto del regolatore di velocità

Anche in questo caso si possono seguire due strade. Se la banda passante del regolatore di corrente è molto elevata rispetto a quella richiesta al regolatore di velocità, si può considerare ideale l'amplificatore di corrente (guadagno unitario).

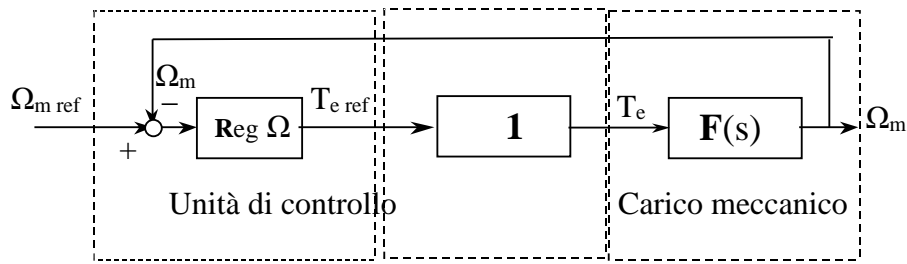


Figura 1-31. Schema per il progetto del regolatore di velocità con amplificatore ideale di corrente

Altrimenti, una volta progettato il regolatore di corrente, è nota la funzione di trasferimento  $\mathbf{F i}(s)$ . Il regolatore di velocità deve, quindi, essere progettato considerando un sistema caratterizzato da una funzione di trasferimento pari al prodotto di  $\mathbf{F i}(s)$  per la funzione di trasferimento del carico meccanico  $\mathbf{F}(s)$ . Nel caso in cui il sistema di controllo non preveda la compensazione delle variazioni del flusso  $\psi_{ae}$  (come in Figura 1-32), le prestazioni del sistema di controllo varierebbero passando dalla zona a coppia costante alla zona di deflussaggio.

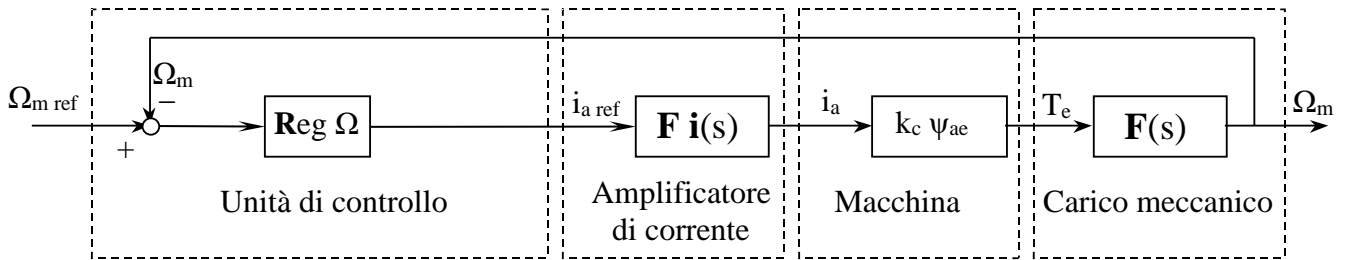


Figura 1-32. Schema di controllo della velocità meccanica senza termine adattativo