AUTOMAZIONE E STRUMENTAZIONE

Elettronica Industriale

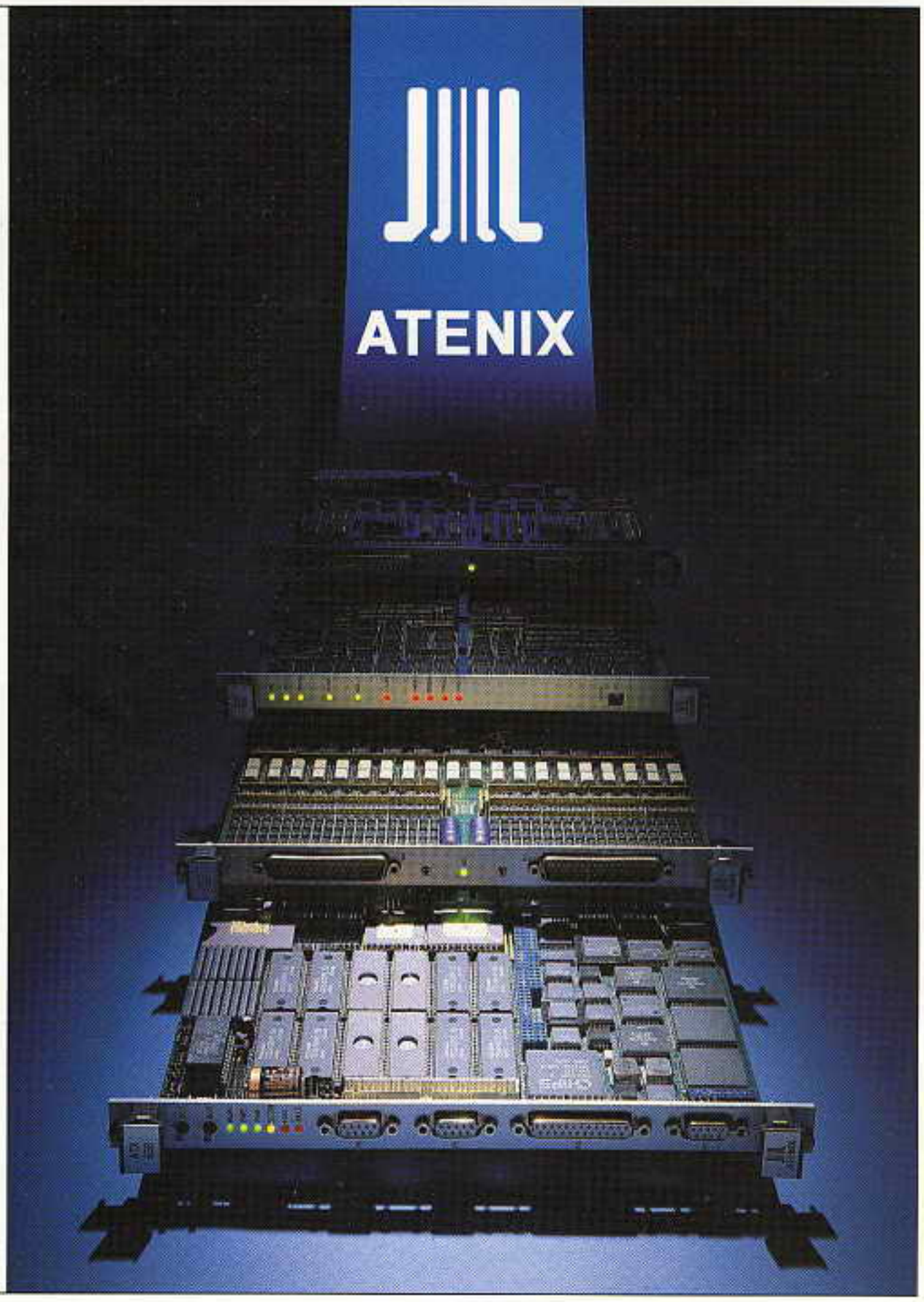
9

Anno XLIII
Settembre 1995

ANIPLA Associazione Nazionale Italiana Per L'Automazione

ATENIX

Atenix Srl. - Via Fleming, 17 - 37135 Verona - Tel. (045) 8201760 - Fax (045) 8200299



sped. in abb. post./50%/BG

Azionamento a microprocessori

con elevato livello di interfacciamento uomo macchina

di Armando Bellini, Danilo Lucherini, Alfredo Accattatis

I dispositivi elettronici, sia di potenza che di segnale, hanno avuto alla fine degli anni Ottanta, un rapido sviluppo. Uno dei settori applicativi che ha subito recepito le innovazioni tecnologiche è stato quello degli azionamenti elettrici, in particolare, con motore asincrono. Descritta una serie di azionamenti con motore asincrono con una scheda di controllo a microprocessori per ottenere prestazioni dinamiche dell'azionamento, oltre che per migliorare il suo interfacciamento con l'operatore.

Già alla fine degli anni Sessanta, l'avvento dei semiconduttori di potenza ha destato un rilevante interesse verso l'impiego dei motori in corrente alternata per la realizzazione di azionamenti caratterizzati da elevate prestazioni dinamiche.
Infatti, rispetto ai tradizionali motori in corrente continua, i motori in corrente alternata, ed in particolare modo i motori asincroni, presentano indubbi vantaggi, specialmente per quanto concerne la manutenzione, l'ingombro e la possibilità di sopportare sovraccarichi di breve durata.
La tecnologia elettronica allora disponibile non si è, però, rivelata sufficientemente evoluta per tale trasformazione. Infatti i convertitori di potenza, necessari per l'alimentazione delle macchine in corrente alternata, risultavano troppo costosi e di insufficiente affidabilità rispetto a quelli impiegati negli azionamenti con motori a corrente continua; inoltre l'elettronica di segnale, basata su dispositivi, analogici o digitali, integrati in piccola scala non permetteva la realizzazione di tecniche di controllo sufficientemente sofisticate per garantire un comportamento dinamico delle macchine in corrente alternata pienamente soddisfacente. Le prospettive sono completamente mu-

Prof. Armando Bellini, Dip. di Ingegneria Elettronica, Università di Roma "Tor Vergata"; Danilo Lucherini Eurolab Srl, Corsico (MI); Alfredo Accattatis, Eurolab Srl, Roma.

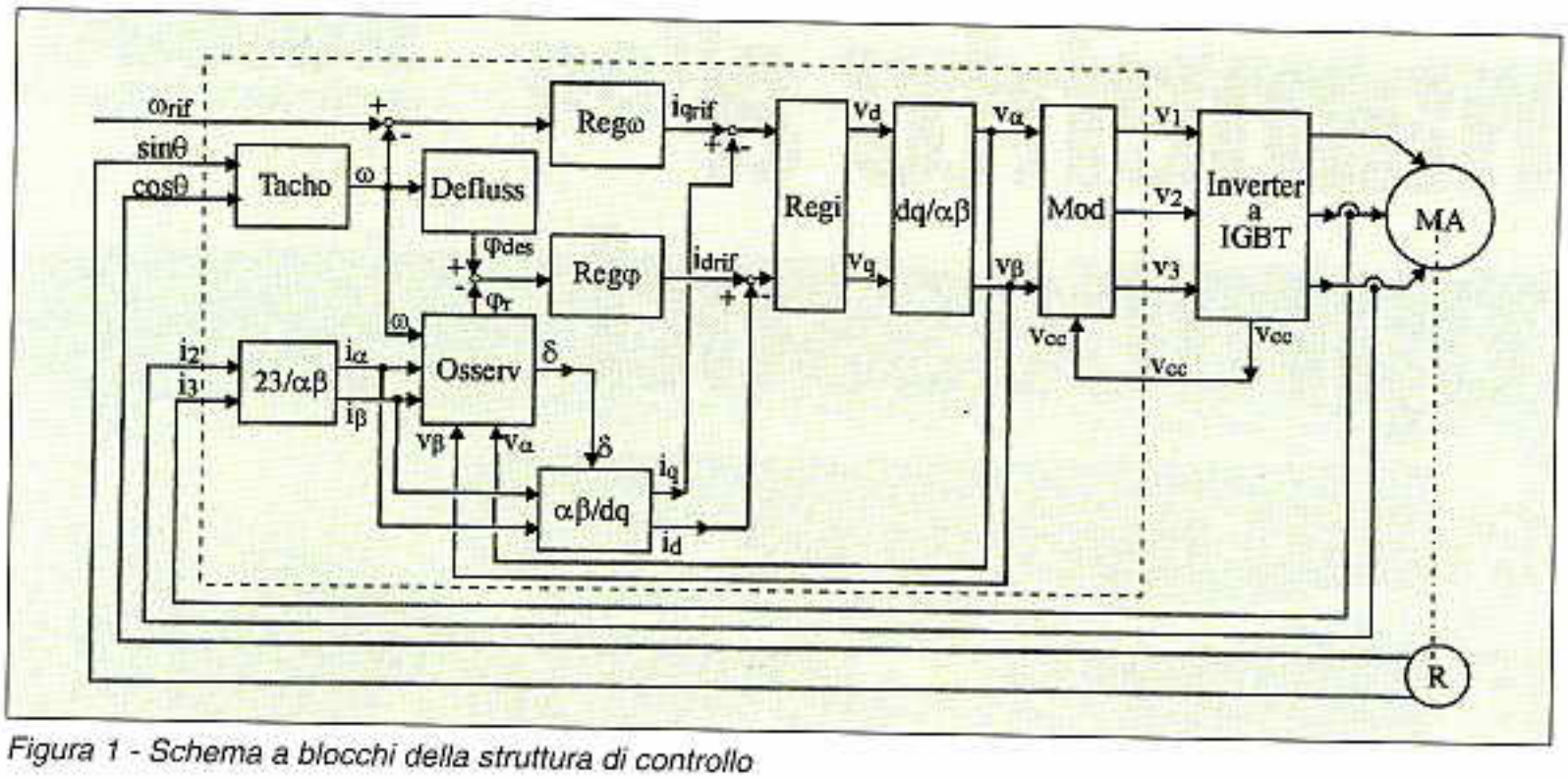


Figura 1 - Schema a blocchi della struttura di controllo

tate durante la seconda meta degli anni Ottanta. In questi anni, infatti, si è assistito ad una rapida trasformazione dell'elettronica di potenza, specialmente per potenze inferiori a qualche centinaio di kW, dovuta allo sviluppo dei transistor di potenza, dapprima bipolari e, successivamente, di tipo MOSFET e IGBT; ciò ha consentito di realizzare convertitori di potenza (inverter) per il pilotaggio dei motori in corrente alternata con un elevato grado di affidabilità ed un costo decisamente contenuto. Infine, il rapido diffondersi dei microprocessori (in particolare microcontrollori e Digital Signal Processor) ha consentito di superare le difficoltà connesse alla realizzazione di tecniche di controllo che richiedono un elevato numero di operazioni matematiche.

L'impiego di dispositivi di controllo a microprocessori permette, attualmente, di realizzare degli azionamenti con motore asincrono caratterizzati da un comportamento dinamico ben superiore a quello dei tradizionali azionamenti con motore in corrente continua. Inoltre, la presenza di uno o più microprocessori consente di migliorare il livello di interfacciamento dell'azionamento verso l'utente.

L'articolo si prefigge di descrivere la recente realizzazione di una serie di azionamenti con motore asincrono; dopo una breve descrizione della modalità di controllo utilizzata, l'interesse verrà focalizzato sulla struttura della scheda a microprocessori e sulle possibilità di interfacciamento con l'utente, sia diretto, mediante un display alfanumerico e una tastierina a 16 tasti, sia tramite personal computer.

Modalità di controllo

Come già messo in evidenza, l'impiego di dispositivi a microprocessore ha reso operative tecniche di controllo del motore asincrono, più sofisticate di quelle tradizionali, che consentono sia di migliorare il comportamento dinamico dell'azionamento sia di ridurre il sovradimensionamento della macchina e/o del convertitore statico causato dai transitori di velocità e di coppia.

La tecnica di controllo attualmente più utilizzata per tale scopo è quella nota come *Controllo ad Orientamento di Campo* o come *Controllo Vettoriale*. Tale tecnica si basa su una opportuna scelta del sistema di riferimento, rispetto al quale considerare le componenti delle tensioni, delle correnti e dei flussi della macchina, in modo tale da ottenere un disaccoppiamento tra gli effetti delle componenti delle correnti applicate allo statore della macchina. Infatti scegliendo, come riferimento, un sistema di assi cartesiani (*d* e *q*) ruotanti ad una velocità tale per cui la direzione di un asse (asse *d*) risulti sempre coincidente con quella del vettore rappresentativo del flusso rotorico, l'andamento dinamico del modulo del flusso rotorico dipende solo da quello della proiezione del vettore rappresentativo della corrente statorica sull'asse *d*, mentre il valore istantaneo della coppia motrice risulta proporzionale, oltre che al modulo del flusso, alla proiezione della corrente sull'asse *q* [1, 5].

Impiegando la schematizzazione descritta, il comportamento del motore asincrono diventa analogo a quello di un motore in corrente continua ad eccitazione indipendente; in tale analogia la componente della corrente secondo l'asse *d* assume il ruolo della corrente di eccitazione mentre la componente secondo l'asse *q* assume il ruolo della corrente di armatura.

Occorre però tenere presente che, mentre nel motore in corrente continua le due correnti, di eccitazione e di armatura, sono applicate a due distinti circuiti, ognuno alimentato da un proprio convertitore, nel motore asincrono le componenti secondo gli assi *d* e *q* rappresentano le proiezioni su due assi ortogonali del vettore rappresentativo delle correnti applicate ad un circuito trifase da un unico convertitore. Inoltre, siccome il sistema di riferimento ruota alla stessa velocità del vettore rappresentativo del flusso rotorico, per poter impiegare il controllo ad orientamento di campo è necessario, ad ogni passo di calcolo, effettuare almeno una trasformazione di variabili che consenta di ricavare le componenti delle grandezze elettriche secondo le tre fasi del motore a partire da quelle secondo gli assi rotanti e/o viceversa; tale trasformazione richiede la conoscenza del seno e del coseno dell'angolo δ (angolo di campo) che il vettore rappresentativo del flusso rotorico forma con un sistema di riferimento fisso con gli avvolgimenti statorici.

La necessità di conoscere il modulo e la direzione del flusso rotorico costituisce il principale problema connesso alla realizzazione del controllo ad orientamento di campo. Infatti la misura del flusso richiede di inserire nella macchina appositi sensori (quali sonde di Hall o avvolgimenti ausiliari sullo statore della macchina) e, in ogni caso, di effettuare opportune manipolazioni dei segnali acquisiti.

Si preferisce, pertanto, cercare di determinare il modulo e la direzione del flusso rotorico sulla base dell'andamento di grandezze (tensioni e/o correnti) direttamente misurabili ai morsetti della macchina. La soluzione più

semplice, e quindi maggiormente utilizzata, è quella usualmente definita come *controllo ad orientamento di campo di tipo indiretto* e consiste nel determinare il modulo e la direzione del flusso rotorico in base all'andamento delle sole correnti statoriche.
Tale soluzione, che dal punto di vista concettuale equivale all'integrazione delle equazioni differenziali che costituiscono il modello dei circuiti rotorici della macchina, presenta però l'inconveniente di una elevata sensibilità alle variazioni dei parametri (resistivi e induttivi) dei circuiti rotorici stessi e, di conseguenza, consistenti errori di valutazione al variare delle condizioni operative del motore (temperatura degli avvolgimenti rotorici, saturazione dei circuiti magnetici). Una diversa soluzione consiste nel determinare le componenti del flusso rotorico mediante un osservatore dello stato che tiene conto dell'andamento, oltre che delle correnti, anche delle tensioni applicate al circuito di statore della macchina. L'impiego di un osservatore dello stato comporta un numero di operazioni matematiche nettamente superiore, ma consente di ridurre le imprecisioni sulla stima del modulo del flusso e, specialmente, dell'angolo di campo. La tecnica di controllo adottata nella serie di azionamenti in esame, impiega un controllo ad orientamento di campo di tipo diretto e la determinazione del modulo e della direzione del vettore rappresentativo del flusso rotorico è effettuata impiegando l'osservatore descritto in [2] e [4].
Lo schema a blocchi della struttura di controllo adottata è quello riportato in Figura 1. Tutte le operazioni connesse ai blocchi di controllo (nella figura compresi entro il rettangolo tratteggiato) sono effettuate, a livello digitale, dalla scheda di controllo a microprocessori, che riceve e converte in forma digitale i seguenti sei segnali analogici:
- riferimento di velocità (ω_{rif});
- due segnali ($\sin\theta$ e $\cos\theta$) forniti da un resolver la cui alimentazione, sincrona con il campionamento delle grandezze analogiche, viene generata dalla scheda di controllo;
- misure delle correnti in due fasi del motore (i_2 e i_3);
- misura della tensione continua di alimentazione dell'inverter (v_{cc}).

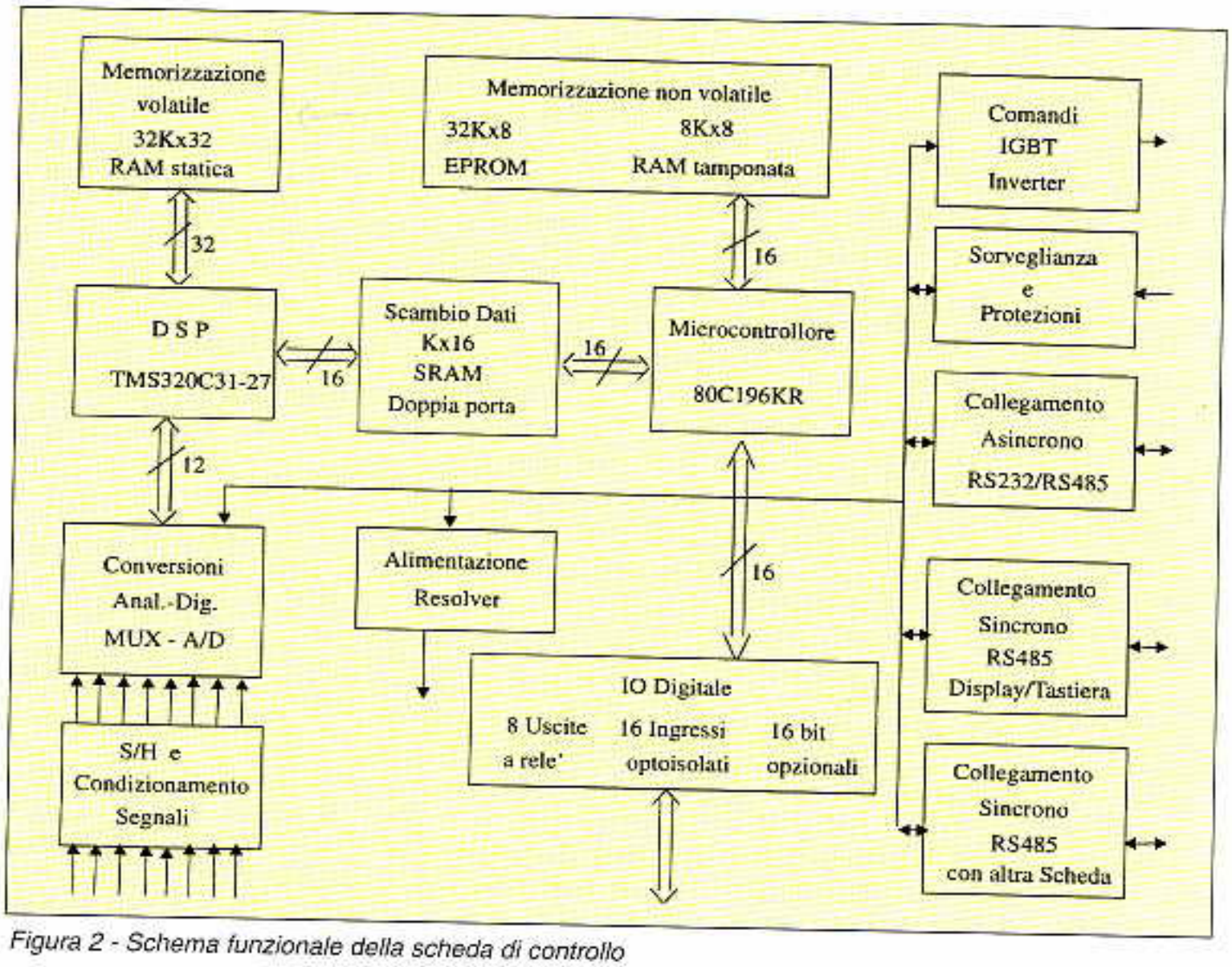


Figura 2 - Schema funzionale della scheda di controllo

Sulla base di $\sin\theta$ e $\cos\theta$, il blocco logico *Tacho* determina la velocità ω, tale velocità viene quindi confrontata con il valore di riferimento per ottenere, attraverso il blocco *Reg*ω, il valore desiderato i_{qrif} per la componente in quadratura della corrente statorica.
In funzione del valore di ω, inoltre, il blocco *Defluss* determina il valore desiderato φ_{des} per il modulo del flusso rotorico.
Il blocco *23/*$\alpha\ \beta$ fornisce i valori delle componenti i_α e i_β della corrente statorica secondo due assi ortogonali fissi con lo statore; sulla base di questi valori e dell'angolo di campo δ, il blocco $\alpha\ \beta/dq$ determina le componenti i_d ed i_q della corrente statorica secondo gli assi rotanti. Il valore dell'angolo di campo δ è fornito dal blocco *Osserv* che determina anche il modulo φ_r del flusso rotorico; quest'ultimo viene confrontato con il valore desiderato e il segnale di errore viene inviato al blocco *Reg*φ che calcola il valore desiderato i_{drif} per la componente diretta della corrente statorica.
Sulla base delle differenze tra i valori stimati e quelli effettivi delle componenti della corrente statorica il blocco *Regi* fornisce i valori desiderati per le componenti diretta e in quadratura della tensione che l'inverter deve applicare al motore; tali componenti vengono, quindi, trasformate secondo gli assi fissi dal blocco $dq/\alpha\ \beta$.
I valori desiderati, v_α e v_β, vengono utilizzati, assieme ai valori della velocità e delle componenti i_α e i_β della corrente statorica, dal blocco *Osserv*; sulla base di tali valori, inoltre, il blocco *Mod* fornisce tre segnali logici, v_1, v_2 e v_3, che determinano lo stato di chiusura degli interruttori (realizzati mediante IGBT) di ciascuna fase dell'inverter.
La modulazione viene effettuata impiegando la tecnica descritta in [3] e tenendo anche conto, ad ogni passo di campionamento, del valore medio della tensione continua di alimentazione.
Tutte le operazioni, comprese quelle connesse al collegamento verso la tastiera, il display e il personal computer e quelle necessarie per ricavare la legge di modulazione, sono effettuate

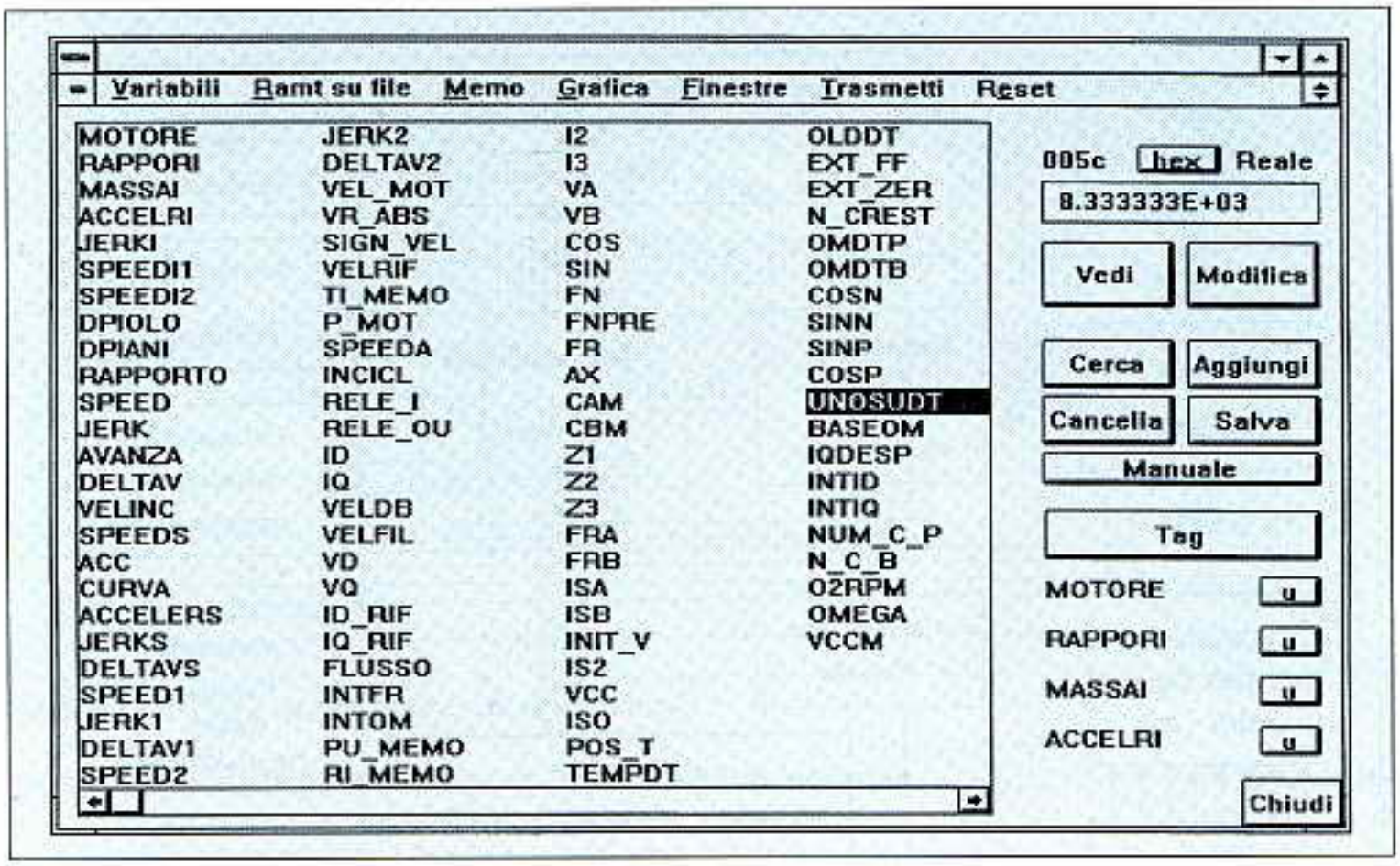


Figura 3 - Finestra di visualizzazione delle variabili TMS

all'interno di un passo di campionamento di durata pari a 120 µs; tale durata è stata scelta con un notevole margine in modo tale da permettere futuri ampliamenti del programma di controllo, ad esempio, per adeguarlo a particolari situazioni operative.

Struttura della scheda a microprocessori

La scheda che effettua il controllo dell'azionamento è essenzialmente composta dai seguenti elementi:

- un DSP (Digital Signal Processor) a 32 bit, con unità aritmetica in virgola mobile, che effettua tutti i calcoli richiesti dai blocchi di controllo;
- un microcontrollore a 16 bit che, oltre alla modulazione delle tensioni applicate alle tre fasi del motore in modo che, durante ciascun intervallo di campionamento, ad ogni fase sia applicato un valore medio di tensione pari a quello richiesto dalla strategia di controllo, effettua tutte le operazioni periferiche connesse alle temporizzazioni e alle comunicazioni verso un eventuale personal computer, il display e la tastiera;
- una RAM tamponata che contiene i valori dei parametri relativi ad uno o più azionamenti;
- una RAM a doppia porta che consente il trasferimento dei dati tra i due processori;
- un sottosistema di conversione A/D composto da amplificatori operazionali, campionamento e tenuta, un multiplexer e un convertitore A/D a 12 bit;
- un sottosistema di interfaccia che consente di ricevere segnali logici mediante fotoaccoppiatori e di trasmettere segnali logici mediante relè;
- un sottosistema di interfaccia per le comunicazioni che realizza due collegamenti seriali, uno asincrono (RS 232) ed uno sincrono (RS 485).

La Figura 2 mostra uno schema funzionale della scheda. I programmi, sia del DSP sia del microcontrollore, risiedono nella EPROM interna di quest'ultimo che, all'avviamento, compie una serie di verifiche sulla compatibilità tra il programma ed i dati contenuti nella RAM tamponata e, quindi, procede a caricare sul DSP il codice relativo all'algoritmo di controllo. Finito questo caricamento iniziale i due processori eseguono i propri task in maniera autonoma uno dall'altro.

La necessaria sincronizzazione nel tempo avviene attraverso il sottoinsieme di conversione analogico/digitale che viene triggerato dal microcontrollore ed i cui risultati vengono letti dal DSP. A tale scopo il DSP utilizza il canale DMA (Direct Memory Access) in modo tale da poter avere disponibili in memoria i risultati delle otto conversioni A/D con un dispendio di tempo, che, nel peggiore dei casi, è inferiore a 1,2 µs. Nella fase iniziale, immediatamente successiva al boot, il DSP ottimizza sia l'istante di campionamento sia il guadagno dei segnali provenienti dal resolver. Questo permette di compensare eventuali ritardi dovuti a tipi di resolver diversi e/o diverse lunghezze dei cavi di collegamento. Una volta effettuata questa scelta, inizia l'esecuzione del ciclo di calcolo in cui sono compresi, oltre all'algoritmo di controllo vero e proprio:

- il monitoraggio della tensione continua ed eventuale comando di inserimento della resistenza di dissipazione;
- il tracking del segnale di riferimento attraverso un sistema di "finestre" che permette di acquisire tale segnale con una risoluzione apparente di 16 bit;
- il monitoraggio termico, attraverso l'immagine termica (I^2t), dell'energia dissipata nella resistenza di frenatura, negli IGBT e nel motore.

Per facilitare la diagnostica, nel ciclo complessivo sono incluse funzioni di memorizzazione ad ogni passo di campionamento di quattro grandezze istantanee, selezionate dall'utente fra quelle disponibili sul DSP.

Dopo il trasferimento del programma al DSP, il microcontrollore si assicura che l'apparecchiatura, nel suo insieme, sia pronta all'uso. Parti di questo controllo sono:

- l'esame, già menzionato, dell'integrità dei parametri;
- l'avvenuto "acknowledgement" di un eventuale precedente scatto di una protezione;
- stato di disabilitazione dell'azionamento;
- corretta alimentazione trifase, nel caso di presenza del modulo opzionale di recupero dell'energia di frenatura verso rete.

A seguito di questi controlli viene inizializzato il display e si entra nel loop di esecuzione vero e proprio. All'interno di questo loop esiste un nucleo di operazioni, fondamentale per il corret-

to controllo del motore, che viene svolto interamente in ciascun ciclo. In questa categoria rientrano:
- il comando degli IGBT dell'inverter;
- il monitoraggio di protezioni hardware (sovraccarico IGBT, sovratensione, distacco di una fase di alimentazione, protezione termica del radiatore, protezione del modulo recupero in rete);
- il monitoraggio dei segnali digitali provenienti dall'esterno.

Esiste, inoltre, una serie di funzioni accessorie quali scansione della tastiera, visualizzazione sul display di grandezze statiche, interfacciamento verso PC, memorizzazione allarmi che non sono eseguite interamente ciascun ciclo di calcolo, bensì vengono svolte nell'arco di più cicli. Questo accorgimento permette di non avere praticamente limiti al numero di funzioni accessorie implementabili, senza per questo allungare in maniera significativa il tempo di ciclo.

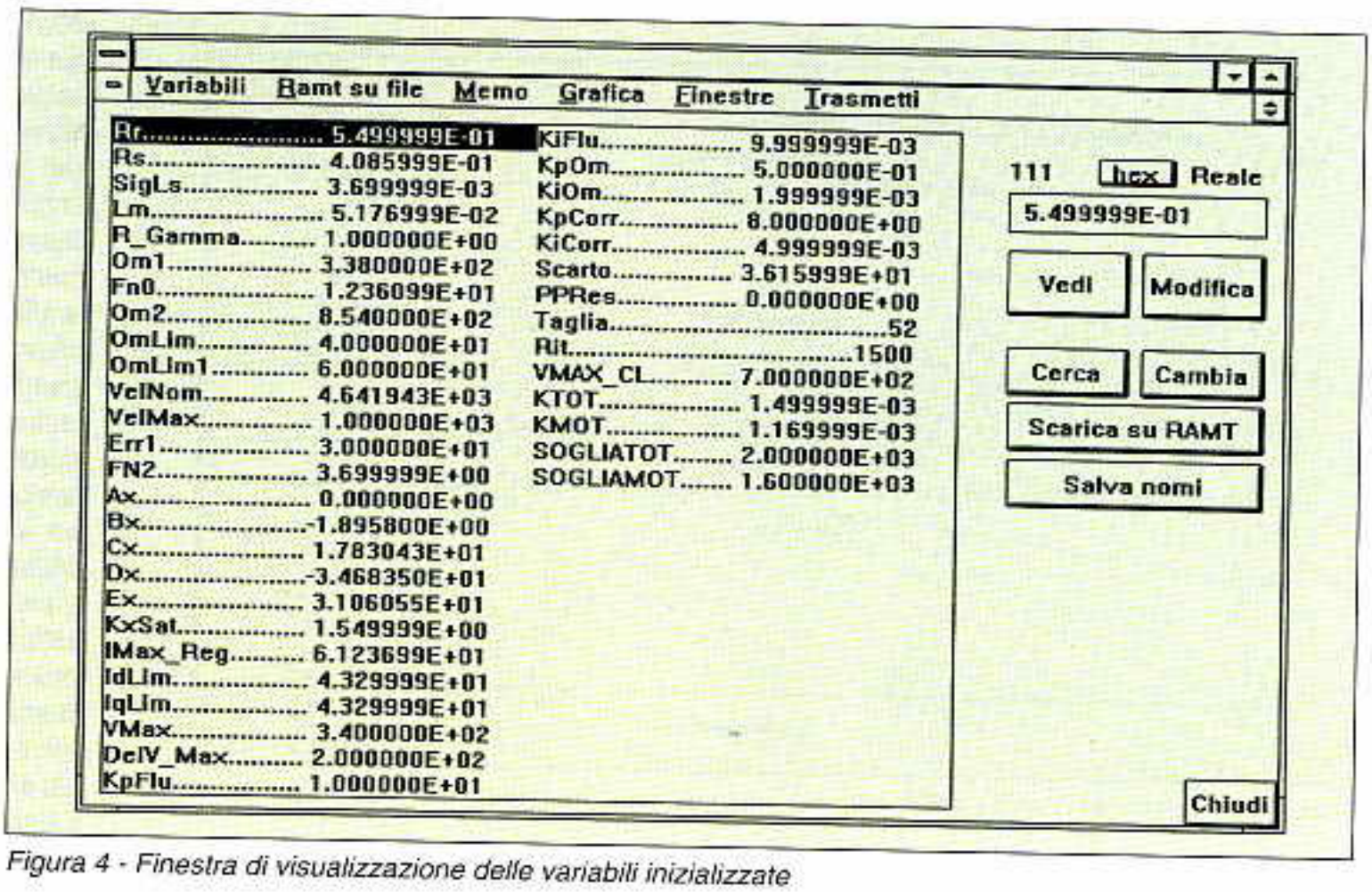


Figura 4 - Finestra di visualizzazione delle variabili inizializzate

Interfaccia con l'utente

La scheda comunica con l'utente, oltre che tramite fotoaccoppiatori e relè, mediante un collegamento seriale sincrono che la connette ad un display alfanumerico (composto da due righe da 20 caratteri) ed una tastierina a 16 tasti. La scelta di impiegare un collegamento seriale sincrono è legata alla necessità che spesso si verifica, di effettuare un collegamento a distanza, ad esempio, con una sala controllo; inoltre, anche se attualmente non previsto, l'interfaccia RS 485 potrebbe permettere il collegamento ad un controllore remoto (computer, controllo numerico, PLC).
La tastiera permette di:
- selezionare il tipo di azionamento, tra quelli previsti nella RAM tamponata;
- immettere vari parametri relativi al funzionamento dell'azionamento, quali valori di soglia per i relè di sorveglianza e segnalazione;
- comandare localmente l'azionamento;
- impostare e selezionare valori del riferimento di velocità indipendenti dal segnale analogico di ingresso;
- impostare e selezionare eventuali rampe di velocità;
- scegliere le grandezze da fare apparire sul visore.

Tutte le funzioni elencate, esclusa la selezione del tipo di azionamento, possono essere effettuate durante il normale funzionamento dell'azionamento; la tastiera può inoltre essere utilizzata, quando l'azionamento non è abilitato, per predisporre alcune specifiche operazioni in versioni dell'azionamento specializzate per particolari applicazioni.
Il display visualizza quanto richiesto dalla tastiera ed in particolare:
- una terna di grandezze elettriche o meccaniche quali, ad esempio, velocità, potenza, coppia, flusso, componenti della corrente statorica secondo assi fissi o rotanti ecc.;
- il valore corrente del riferimento di velocità o di coppia;
- i valori massimi ammissibili per la velocità e la coppia;
- il numero di ore di funzionamento dell'azionamento;
- lo scatto di protezioni (quali sovravelocità del motore, distacco di un collegamento al resolver, sovraccarico istantaneo di un IGBT, valore troppo alto o troppo basso della tensione continua, mancanza di una fase dell'alimentazione, distacco del collegamento ad una protezione, presenza di una sovratemperatura ecc.) con indicazione della data e dell'ora.

Interfacciamento con personal computer

Le comunicazioni mediante tastierino e display sono destinate principalmente ad una supervisione del funzionamento dell'azionamento, alla modifica di alcuni parametri funzionali e alla segnalazione di eventuali disfunzioni.
Il collegamento ad un personal computer, mediante interfaccia seriale RS 232, permette ulteriori possibilità, specialmente utili in sede di installazione, messa a punto e collaudo dell'azionamento. È inoltre previsto che tale connessione possa servire anche per trasmettere, mediante modem, un certo numero di informazioni utili per un servizio di assistenza tecnica a distanza. Il collegamento tra l'azionamento e il personal computer è gestito da un apposito programma, sviluppato inizialmente in ambiente MS-Dos e, successivamente, in ambiente Microsoft Windows.
Le operazioni attualmente previste da tale programma possono essere suddivise in tre gruppi:
- operazioni che possono essere effettuate durante il normale funzionamento dell'azionamento;

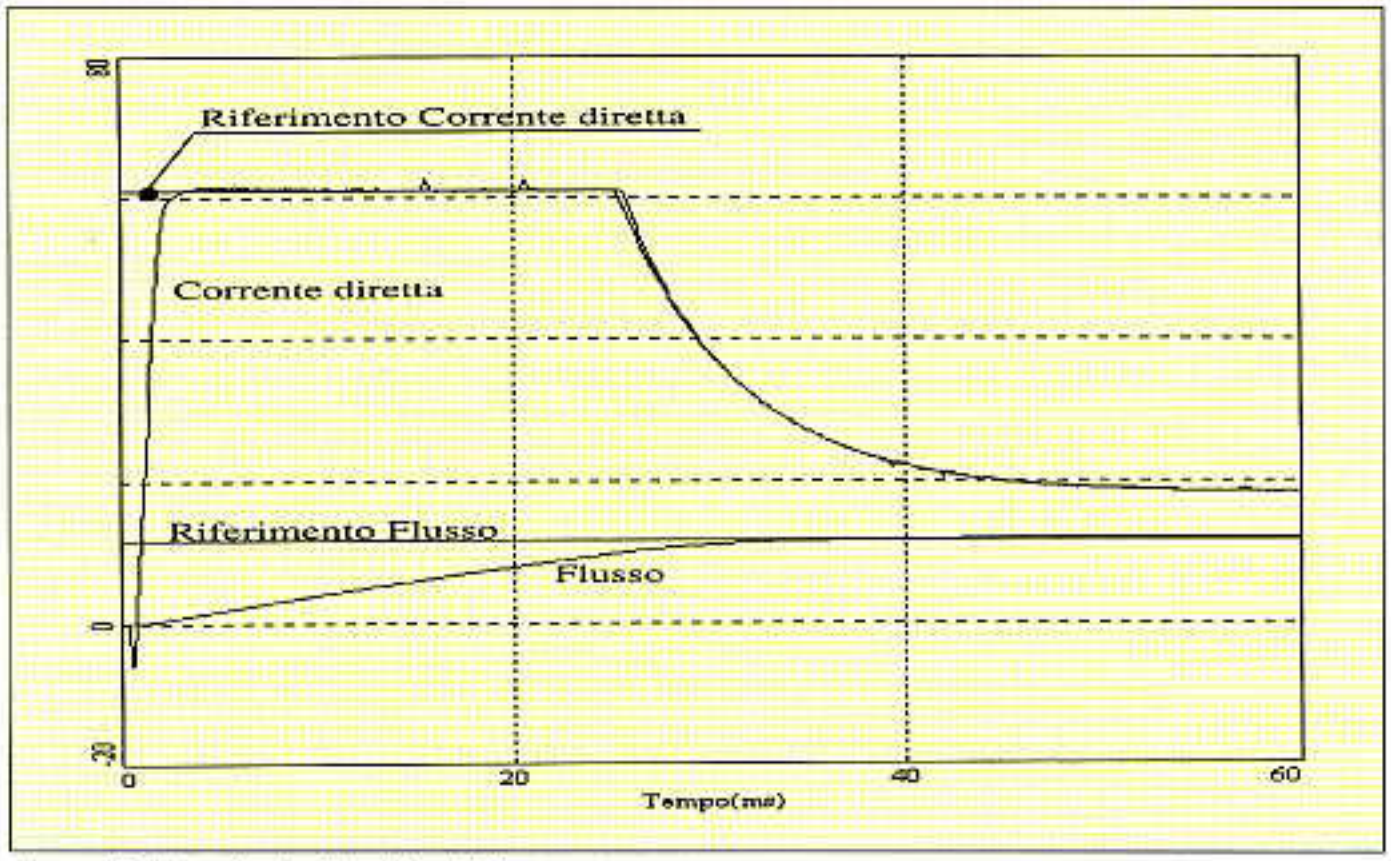


Figura 5 - Transitorio di salita del flusso

- operazioni che richiedono che l'azionamento sia disabilitato;
- manipolazioni di dati da trasmettere all'azionamento o da questo ricevuti, che possono venire effettuate dal PC anche in assenza del collegamento.

Durante il normale funzionamento dell'azionamento è possibile:
- visualizzare, ed eventualmente modificare, il valore di qualsiasi variabile utilizzata dal DSP o dal microcontrollore, compresi i dati trasferiti dalla RAM tamponata alla RAM del DSP durante la fase di inizializzazione (variabili inizializzate);
- trasferire ai dati presenti sulla RAM tamponata le modifiche eventualmente apportate ai valori delle variabili inizializzate;
- trasmettere al DSP gli indirizzi di quattro variabili da memorizzare in un'apposita zona della RAM, l'istante iniziale della memorizzazione e il valore di una variabile che definisce il tipo di memorizzazione (a riempimento o ciclica) da effettuare.

Quando l'azionamento è disabilitato è possibile effettuare ulteriori operazioni che consistono nel:
- caricare sulla RAM del DSP un nuovo programma;
- trasferire i valori dei parametri relativi ai vari azionamenti previsti dalla RAM tamponata al PC e viceversa;
- trasmettere al PC ed eventualmente salvare su file, gli andamenti temporali, precedentemente memorizzati dal DSP, delle quattro variabili selezionate.

Infine prescindendo dal collegamento, è possibile:
- visualizzare gli ultimi andamenti di variabili trasferite dal DSP;
- visualizzare gli andamenti temporali di variabili precedentemente memorizzati su file;
- modificare i valori delle variabili inizializzate memorizzati su file.

Per quanto concerne la presentazione su PC, il programma di comunicazione è composto da un menu a tendina e da una finestra di comunicazione, diversa a seconda della funzione che si sta eseguendo. A titolo di esempio, la Figura 3 mostra una schermata relativa alla visualizzazione delle variabili manipolate dal DSP.

In particolare nella parte superiore della figura compare il menu principale che comprende le seguenti voci: *Variabili, Ramt su file, Memo, Grafica, Finestre e Trasmetti;* nel lato sinistro, sotto al menu principale e all'interno di una finestra con barra di scorrimento, è riportato un elenco dei nomi delle variabili gestite dal DSP mentre nel lato destro sono presenti alcune finestre di visualizzazione ed un certo numero di tasti operativi.

La voce *Variabili* permette di selezionare il tipo di variabili da visualizzare (variabili manipolate dal DSP, variabili inizializzate, variabili manipolate dal microcontrollore) e di modificare un apposito file di configurazione che contiene alcune informazioni relative alla porta seriale da impiegare per le comunicazioni e ai nomi e ai percorsi dei file che contengono i dati necessari per le comunicazioni.

La voce *Ramt su file* consente di modificare i valori, memorizzati su file, delle variabili inizializzate e di trasferire i valori dei parametri relativi ai vari azionamenti da file alla RAM tamponata e viceversa.

La voce *Memo* gestisce le comunicazioni tra PC e DSP in relazione alla memorizzazione da parte del DSP degli andamenti temporali di variabili di interesse e al loro trasferimento dal DSP al PC.

La voce *Grafica* fornisce gli strumenti necessari per la rappresentazione grafica degli andamenti trasmessi dal DSP e la loro eventuale memorizzazione su file.

La voce *Finestre* permette di selezionare quale finestra rendere attiva e il tipo di presentazione nel caso di molte finestre contemporanee.

La voce *Trasmetti* comanda l'inizio della trasmissione di un nuovo programma al DSP.

Per quanto concerne l'elenco delle variabili manipolate dal DSP e di quelle manipolate dal microcontrollore si può osservare che, in genere, non interessa di poter accedere a tutte le variabili ma risulta più comodo disporre di uno o più elenchi parziali.

Le tre finestre presenti nella parte alta del lato destro dello schermo mostrano il tipo (Reale o Intero), l'indirizzo ed il valore numerico della variabile selezionata; nel caso di variabile di tipo intero è possibile scegliere una presentazione di tipo decimale o esadecimale. Il valore della variabile selezionata può venire modificato agendo sulla sua rappresentazione e, quindi, premendo il tasto *Modifica*.

I tasti *Cerca*, *Aggiungi*, *Cancella* e *Salva* permettono di modificare l'elenco dei nomi e gli indirizzi delle variabili mentre il tasto *Manuale* consente di visualizzare, ed eventualmente modificare, il valore di una variabile non inserita nell'elenco, sulla base del suo indirizzo. Infine il tasto *Tag* ed i tasti *u* (untag) effettuano la selezione dei nomi delle variabili da gestire mediante *Memo*.

La Figura 4 mostra una schermata relativa alla visualizzazione delle variabili inizializzate. La presentazione è simile a quella appena descritta; siccome,

però, le variabili inizializzate non subiscono modifiche durante il funzionamento dell'azionamento, accanto al nome di ciascuna variabile è anche riportato il suo valore.
Le Figure 5 e 6, infine, mostrano due finestre di presentazione ottenute mediante la voce di menu Grafica. In particolare la Figura 5 presenta gli andamenti dei valori effettivi e dei riferimenti del modulo del flusso rotorico e della componente diretta della corrente statorica durante la fase di salita del flusso che si verifica all'atto della abilitazione dell'azionamento. Come si può constatare, il valore di riferimento della componente diretta della corrente statorica si porta istantaneamente al valore limite (circa 63 A) mentre il valore effettivo di tale componente raggiunge il suo valore di riferimento in meno di 2 ms. Dopo meno di 40 ms il modulo del flusso ha raggiunto il valore di riferimento ed il transitorio può considerarsi completamente esaurito dopo circa 60 ms. Entrambe le grandezze non presentano sovraelongazioni apprezzabili.
La Figura 6 si riferisce, invece, ad una variazione a gradino del riferimento di velocità tra zero e un valore tale da richiedere un consistente deflussaggio del motore (circa 640 radianti elettrici al secondo) e mostra gli andamenti della velocità, del modulo del flusso rotorico e delle componenti della corrente statorica. Per evitare che alcune grandezze risultassero poco visibili, il modulo del flusso e le componenti della corrente statorica sono state moltiplicate per opportuni fattori di scala; in particolare le componenti della corrente statorica sono state moltiplicate per dieci.
Appena la velocità raggiunge il valore di inizio deflussaggio la componente diretta della corrente statorica si riduce e, quindi, si porta a valori negativi, per fare diminuire rapidamente il modulo del flusso rotorico. Al modificarsi della componente diretta, cambia anche il valore della componente in quadratura della corrente statorica in modo da mantenere limitato il valore della corrente che attraversa gli IGBT dell'inverter. Dopo circa 200 ms la velocità raggiunge il valore del riferimento ed il transitorio può considerarsi completamente esaurito dopo circa 300 ms.

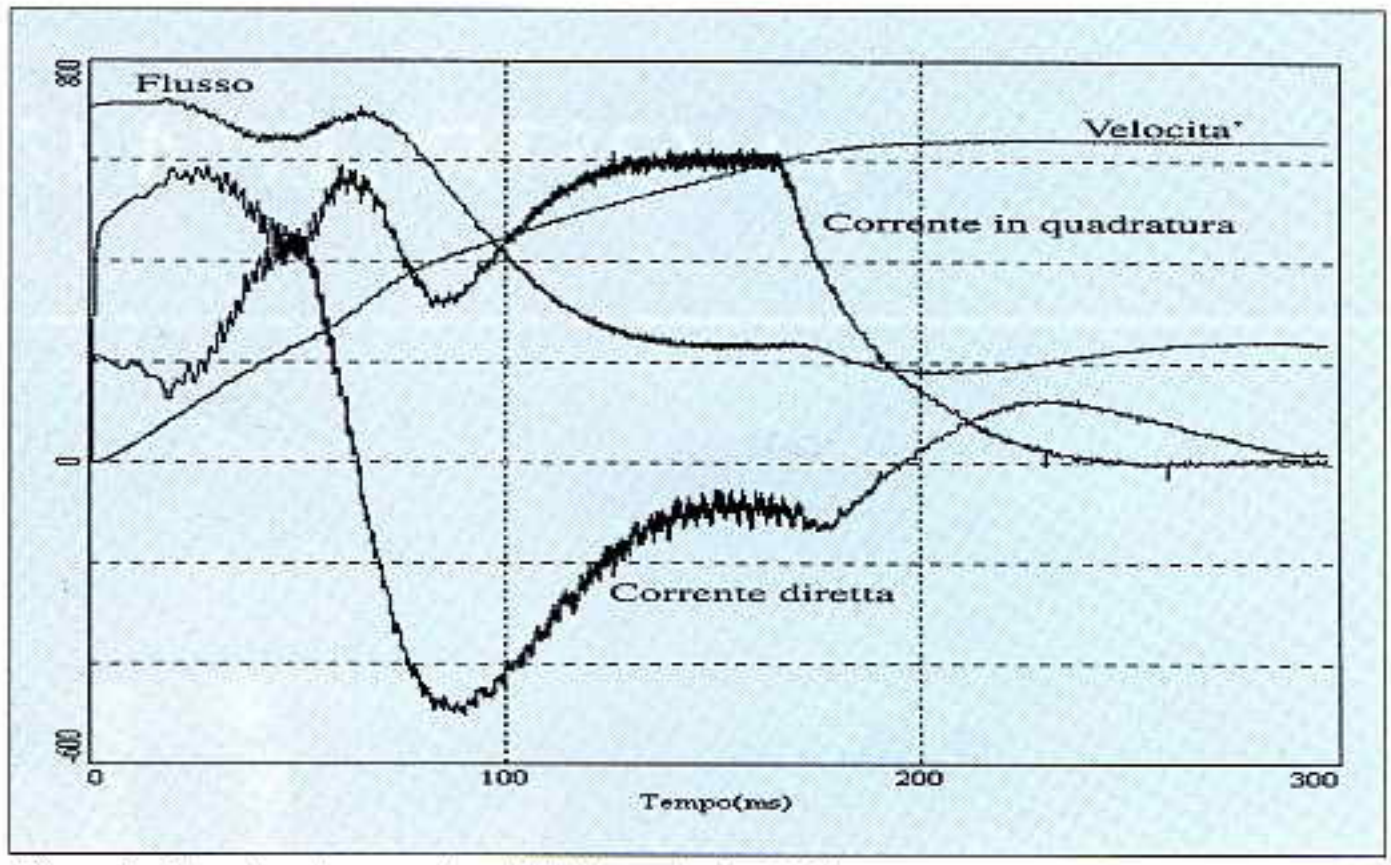


Figura 6 - Risposta ad un gradino del riferimento di velocità

Conclusioni

L'impiego di dispositivi di controllo a microprocessori permette di impiegare tecniche di controllo, molto più sofisticate di quelle tradizionali, che richiedono l'esecuzione di parecchie operazioni matematiche. Ciò ha reso possibile la realizzazione di azionamenti con motore asincrono a controllo vettoriale in cui la determinazione delle componenti del flusso rotorico sono effettuate impiegando un osservatore dello stato. Oltre al miglioramento delle prestazioni dinamiche dell'azionamento, la presenza di uno o più microprocessori consente di ottenere, con modeste aggiunte hardware, un elevato livello di interfacciamento verso l'utente.
La presente memoria descrive la recente realizzazione di una serie di azionamenti con motore asincrono che si prefigge di utilizzare appieno le potenzialità offerte dall'impiego di una scheda di controllo a microprocessori appositamente progettata per il controllo di azionamenti con motore in corrente alternata.
Dopo una breve descrizione della modalità di controllo utilizzata e della struttura della scheda a microprocessori, l'interesse è stato focalizzato sull'interfacciamento con l'utente e, in particolare modo, con quello tramite personal computer.
Come messo in evidenza nell'articolo, i programmi di collegamento sviluppati per il PC permettono di modificare i parametri utilizzati per il controllo dell'azionamento durante il suo normale funzionamento e di graficare gli andamenti di quattro variabili selezionate. Tale possibilità consente sia di effettuare una rapida scelta dei parametri di regolazione più opportuni sia di rendersi rapidamente conto della presenza di eventuali anomalie (come, ad esempio, errata valutazione dei parametri del motore o del livello di saturazione dei circuiti magnetici) che, pur senza renderne inaccettabile il comportamento, riducano le prestazioni dell'azionamento. ▲

Bibliografia

[1] W. Leohnard, *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, Berlin, (1985).
[2] A. Bellini, G. Figalli, G. Ulivi, *Realization of a Bilinear Observer of the Induction Machine, Iee Conference on Electrical Variable-Speed Drives* (1979).
[3] A. Bellini, G. Figalli, G. Ulivi, *A Modulation Technique for Field Controlled Induction Motors Easy to be Implemented on a Microcomputer.* Ieee Int. Conf. on Ind. Electron. and Control Instrum, Iecon, 1984.
[4] A. Bellini, G. Figalli, G. Ulivi, *Analysis and Design of a Microcomputer-based Observer for an Induction Machine*, Automatica 1988.
[5] A. Bellini, G. Figalli, *Il motore asincrono negli azionamenti industriali*, UniTor, Roma, 1990.