

# Una tecnica per la misura della velocità angolare

Francesco Cupertino, Daniele Santese

Negli azionamenti elettrici con controllo a microprocessore, la misura diretta della velocità del motore avviene con l'impiego di encoder ottici incrementali oppure resolver elettromagnetici. Nell'articolo si presenteranno sommariamente dapprima due tecniche classiche per la misura della velocità angolare per mezzo di un encoder ottico incrementale e successivamente quella proposta. Saranno infine presentati alcuni risultati sperimentali ottenuti con l'implementazione di queste tre tecniche su un microcontrollore commerciale.

Negli azionamenti elettrici con controllo a microprocessore, la misura diretta della velocità del motore avviene con l'impiego di encoder ottici incrementali oppure resolver elettromagnetici. I primi, forniscono in uscita un segnale digitale la cui frequenza è proporzionale alla velocità di rotazione, i secondi invece, forniscono un segnale analogico. Gli encoder possono quindi interfacciarsi ad un sistema digitale in modo diretto a differenza dei resolver che richiedono l'uso di convertitori analogico-digitale.

Le caratteristiche che deve avere la misura della velocità dipendono dall'applicazione cui questa è diretta. Nelle applicazioni di controllo, in particolare nelle condizioni di regime, sono richieste prestazioni in termini di precisione e accuratezza adeguate a soddisfarne i requisiti; in regime transitorio assume particolare importanza il ritardo introdotto dal sistema di misura, che deve essere il più possibile contenuto.

Con riferimento ad un sistema di controllo digitale, scelto il periodo di campionamento in base alle caratteristiche dinamiche del sistema, è necessario che la misura sia disponibile al termine di ogni intervallo di campionamento. Questo determina il tempo massimo a disposizione del sistema di misura per svolgere le sue funzioni. Molti studi sull'argomento sono stati presentati in letteratura, mostrando una varietà di metodi per la misura della velocità angolare [1-9]. Il metodo classico per ricavare la velocità angolare con l'utilizzo di un encoder consiste nel contare il numero di impulsi che questo fornisce in un certo intervallo di tempo; conoscendo l'ampiezza di questo intervallo e il numero di impulsi che l'encoder fornisce per ogni giro del suo asse è possibile ricavare la velocità di rotazione. Tale metodo, descritto nel seguito dell'articolo, non permette di raggiungere elevate prestazioni e di avere informazioni sul ripple di velocità presente in condizioni di regime, in quanto l'incertezza di misura è maggiore dell'ampiezza

delle oscillazioni della velocità stessa. La tecnica di misura proposta in questo lavoro, di facile implementazione su un sistema a microprocessore, pur utilizzando un encoder commerciale senza alcuna particolare caratteristica, consente di raggiungere prestazioni evidentemente migliori sia durante il transitorio di velocità che durante le condizioni di regime.

## Due tecniche fondamentali per la misura della velocità angolare

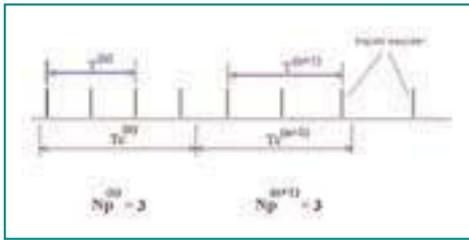
Il primo metodo che viene descritto [1, 2] consiste nel contare, attraverso un contatore digitale, gli impulsi provenienti dall'encoder in un prefissato intervallo di tempo. Noto che sia il numero degli impulsi forniti dall'encoder per un giro completo del suo asse, è possibile risalire alla velocità media di rotazione nel periodo suddetto. Infatti, supponendo che l'encoder fornisca  $N$  impulsi per giro (ppr: pulses per revolution) e che il numero di impulsi contati, in un periodo di tempo  $T$  (in secondi), sia pari a  $N_p$ , l'angolo percorso dal disco dell'encoder sarà  $\beta$  e la velocità sarà data dal valore del numero di giri effettuati ( $\beta/2\pi$ ) diviso il tempo impiegato a percorrerli:

$$\beta = \frac{2\pi \cdot N_p}{N} \quad [\text{rad}] \quad ; \quad \omega_m = \frac{\beta/2\pi}{T} = \frac{N_p}{N \cdot T} \quad [\text{giri/s}] \quad (1)$$

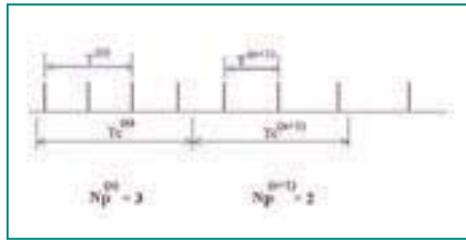
Per realizzare questo tipo di funzionamento è necessario inviare al contatore gli impulsi durante una finestra di tempo di durata  $T$ ; questo si può ottenere pilotando, attraverso un clock, una "gate" tra l'encoder e il contatore. Finestrando gli impulsi dell'encoder, il numero di impulsi all'interno dell'intervallo  $T$  può variare di una unità, in dipendenza della posizione reciproca tra finestra e treno di impulsi.

Questo implica che a parità di velocità angolare (stiamo supponendo che sia costante e che quindi gli impulsi dell'encoder siano equispaziati; in tal caso la velocità media coincide con la velocità istantanea), la misura potrà portare a due valori diversi della velocità. Ad esempio, con un encoder che fornisce

Francesco Cupertino, Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica, Politecnico di Bari, cupertino@ieeo.org; Daniele Santese, Ingegnere Elettronico libero professionista, daniele.santese@tiscali.it



**Figura 1 - Riduzione della velocità tra due periodi di campionamento; la misura viene eseguita sempre con Np=3**



**Figura 2 - Riduzione della velocità tra due periodi di campionamento; la misura nel secondo periodo viene eseguita con Np=2**

N=2500 ppr si hanno i valori qui sotto riportati. Essendo  $\Delta\omega$  indipendente dalla reale velocità di rotazione  $\omega_r$ , il valore relativo  $\Delta\omega/\omega_r$  sarà tanto minore quanto più questa è elevata.

T	$\Delta$
5 ms	4,8 rpm
1 ms	24 rpm
100 $\mu$ s	240 rpm

Pertanto questo metodo ben si presta alla misura di velocità medio-alte poiché la risoluzione, la precisione e l'accuratezza, assumono valori sempre migliori quanto maggiore è il numero degli impulsi contati Np. Al fine di aumentare il numero degli impulsi nel tempo T, alle basse velocità, è necessario aumentare tale tempo ma questo non è sempre possibile, in quanto ciò comporterebbe un ritardo tra il momento in cui la velocità assume un determinato valore e quando il sistema di misura lo rileva. Tale ritardo potrebbe essere incompatibile con i requisiti di stabilità di un sistema di controllo digitale (con questa tecnica il tempo T di misura coincide con il periodo di campionamento Tc), oppure, trattandosi di un sistema di sola misurazione, l'aumento di T vorrebbe dire avere la velocità media su un periodo di tempo molto esteso e quindi con scarsa informazione sul profilo di velocità istantanea seguita dal motore.

L'altra tecnica di base [1, 2] a cui si vuole accennare si realizza, a differenza della precedente, non contando gli impulsi provenienti dall'encoder, ma usando questi ultimi per far partire e terminare una finestra temporale sugli impulsi provenienti da un generatore di clock ad alta frequenza. Questi impulsi, una volta finestrati, andranno in un contatore digitale, il quale fornirà quindi una misura del tempo trascorso ("elapsed time" da cui il nome in letteratura) tra due impulsi consecutivi dell'encoder. Dalla conoscenza di tale tempo e del numero di impulsi che l'encoder fornisce per ogni giro è possibile risalire alla velocità di rotazione. Detta fc la frequenza degli impulsi del clock, Nc il numero di impulsi contati dal contatore e N il numero di impulsi per giro forniti dall'encoder, si ha che la velocità di rotazione è data da:

$$\omega_m = \frac{fc}{N \cdot Nc} \quad [\text{giri/s}] \quad (2)$$

Analogamente a quanto osservato per il metodo precedente, anche in questo caso, a parità di velocità angolare, e quindi di distanza tra gli impulsi dell'encoder, si potranno avere due misure differenti. Con questa tecnica, della misura del tempo tra due impulsi consecutivi dell'encoder, la bontà

della misura aumenta alle basse velocità, quando si conta un numero elevato di impulsi del generatore di clock, e si riduce con l'aumentare della velocità. Tale tipo di funzionamento implica che sarà necessario stimare la velocità più elevata raggiungibile, in modo da soddisfare i requisiti di controllo in tali condizioni. Il tempo di campionamento Tc, insieme al numero di impulsi dell'encoder, determina la minima velocità misurabile, in quanto per ogni periodo Tc sarà necessario che vi siano almeno due impulsi dell'encoder per effettuare la misura.

### Nuova tecnica a numero di impulsi precalcolato

Il metodo proposto consiste nel misurare, in ogni intervallo di campionamento, Tc, il tempo trascorso tra il primo impulso dell'encoder e l'Np-esimo; dove il numero Np è determinato nell'intervallo di campionamento precedente, in base all'ultima misura di velocità.

Ovviamente è necessario considerare il caso più sfavorevole, cioè quello in cui durante il periodo di campionamento il motore decrementi la sua velocità con la massima accelerazione. Questo consente di stimare il numero di impulsi che sicuramente si troveranno nel periodo successivo e quindi di impostare correttamente la misura di tempo.

Nella Figura 1 è schematizzata una situazione corrispondente ad una riduzione della velocità di rotazione. Nel periodo n-esimo si è effettuata la misura con Np=3 impulsi e nel successivo si è valutato di poter ancora realizzare la misura utilizzando il valore Np=3. Il terzo impulso nel periodo (n+1)-esimo è prossimo a trovarsi fuori dal tempo Tc^(n+1). Una stima diversa del valore da assegnare a Np potrebbe portare alla situazione

**Tabella I - Encoder con 2500 ppr**

Velocità al passo n [rpm] $\omega^{(n)}$	Min. velocità al passo n+1 [rpm] $\omega^{(n+1)}$	Intervalli al passo n $T_c^{(n)}$	Min. numero di intervalli al passo n+1 $T_c^{(n+1)}$
220,0	205,0	9,2	8,5
380,0	365,0	15,8	15,2
540,0	525,0	22,5	21,9
700,0	685,0	29,2	28,5
860,0	845,0	35,8	35,2
1020,0	1005,0	42,5	41,9
1180,0	1165,0	49,2	48,5
1340,0	1325,0	55,8	55,2
1500,0	1485,0	62,5	61,9
1660,0	1645,0	69,2	68,5
1820,0	1805,0	75,8	75,2
1980,0	1965,0	82,5	81,9
2140,0	2125,0	89,2	88,5
2300,0	2285,0	95,8	95,2
2460,0	2445,0	102,5	101,9
2620,0	2605,0	109,2	108,5
2780,0	2765,0	115,8	115,2
2940,0	2925,0	122,5	121,9
3100,0	3085,0	129,2	128,5
3260,0	3245,0	135,8	135,2
3420,0	3405,0	142,5	141,9
3580,0	3565,0	149,2	148,5

schematizzata in Figura 2, in cui pur avendo sempre tre impulsi dell'encoder nel  $T_c^{(n+1)}$ , si decide di effettuare la misura con  $N_p^{(n+1)}=2$ . Il fatto di essere nell'una o nell'altra situazione dipende dalla stima, nell'intervallo  $T_c^{(n)}$ , della velocità minima raggiungibile nel  $T_c^{(n+1)}$ , valore questo che dipende dalla decelerazione massima e dal valore di  $T_c$ . Con riferimento alle Figura 1 e 2, le misure di velocità per i due intervalli n e n+1 sono:

$$\omega^{(n)} = \frac{N_p^{(n)} - 1}{N \cdot T^{(n)}} \quad [\text{giri/s}] \quad (3)$$

$$\omega^{(n+1)} = \frac{N_p^{(n+1)} - 1}{N \cdot T^{(n+1)}} \quad [\text{giri/s}]$$

dove N è il numero di impulsi per giro dell'encoder;  $N_p^{(n)} - 1$  e  $N_p^{(n+1)} - 1$  rappresentano il numero di intervalli di tempo, delimitati dagli impulsi dell'encoder, contenuti rispettivamente in  $T^{(n)}$  e  $T^{(n+1)}$ , indicati nel seguito con  $I^{(n)}$  e  $I^{(n+1)}$ . Si osservi che il tempo  $T_c$  è costante e il suo apice posto al di sopra ha il solo scopo di creare un ordine temporale tra i periodi, mentre il tempo T è variabile e dipende dalla velocità e da  $N_p$ . Per ricavare il valore da assegnare a  $N_p$  si assuma che il motore di cui si sta misurando la velocità sia in grado di avere una accelerazione massima  $a_{max}$ , ad esempio:  $a_{max} = \pm 15000$  rpm/s. Si supponga inoltre che il periodo di campionamento sia  $T_c=1$  ms e che  $N=2500$  ppr. Assumendo ad esempio che nel periodo n-esimo si abbia una velocità media  $\omega^{(n)}=700$  rpm, il numero di intervalli di tempo  $I_{T_c}^{(n)}$  nel periodo  $T_c^{(n)}$  sarà

$$I_{T_c}^{(n)} = \frac{\omega^{(n)}}{60} \cdot T_c \cdot N = \frac{700}{60} \cdot 10^{-3} \cdot 2500 = 29,2$$

il che assicura un numero di impulsi, in tale intervallo, pari a  $N_p^{(n)}=29$  (in alcuni periodi ce ne saranno 30, ma è necessario considerare il numero minimo garantito).

Supponendo che il motore acceleri con l'accelerazione massima negativa (-15000 rpm/s), la velocità nel successivo intervallo  $T_c$  sarà

$$\omega^{(n+1)} = \omega^{(n)} - a \cdot T_c = 700 - 15000 \cdot 10^{-3} = 685 \text{ [rpm]}$$

a cui corrisponde un numero di intervallini, nel tempo  $T_c$ , dato da

$$I_{T_c}^{(n+1)} = \frac{\omega^{(n+1)}}{60} \cdot T_c \cdot N = \frac{685}{60} \cdot 10^{-3} \cdot 2500 = 28,5$$

ovvero, questo, che assicura la presenza di un numero di impulsi  $N_p^{(n+1)}=28$ . Questa conclusione si può generalizzare per velocità diverse; nella Tabella I si riportano i valori di  $I_{T_c}^{(n)}$  e  $I_{T_c}^{(n+1)}$  per velocità comprese tra i 220 rpm e 3600 rpm

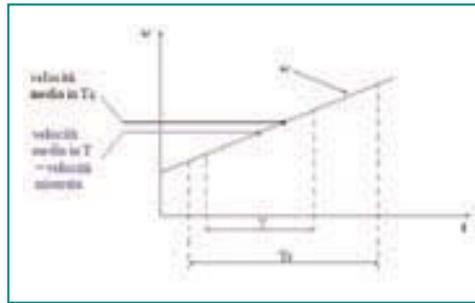


Figura 3 - Velocità media nel periodo di campionamento  $T_c$  e nel periodo di misura T

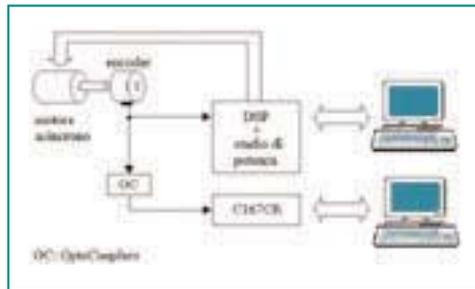


Figura 4 - Il sistema sperimentale di misura

circa, con riferimento ai valori di  $T_c$  e N utilizzati per l'esempio sopra riportato. La Tabella II fa riferimento invece agli stessi dati ma con un encoder che fornisce 4000 ppr. Ha fondamento pertanto ipotizzare che il numero di impulsi possa ridursi al più di una unità, rispetto al numero minimo garantito, tra un periodo di campionamento e il successivo; questa condizione, inoltre, è ovviamente verificata quando si utilizza un periodo di campionamento minore di 1ms, essendo minore la variazione di velocità in tale periodo a parità di accelerazione. In definitiva, il numero di impulsi  $N_p^{(n+1)}$  si può calcolare utilizzando l'espressione

$$N_p^{(n+1)} = \text{int}(I_{T_c}^{(n)} - 1) = \text{int}\left(\frac{\omega^{(n)} \cdot N \cdot T_c}{60} - 1\right) \quad (4)$$

dove con  $\text{int}()$  si è indicata l'operazione che restituisce il valore intero ottenuto con il troncamento delle cifre decimali.

Per questa tecnica la principale fonte di errore deriva dall'assumere la velocità misurata come velocità media in  $T_c$  e non in T. La Figura 3 mostra la velocità misurata, pari alla media nel tempo T, e la velocità media nel tempo  $T_c$ , con riferimento ad un generico andamento lineare della velocità. Tale errore risulta essere molto contenuto grazie al fatto che i tempi T e  $T_c$  sono sempre molto prossimi tra loro.

### Risultati sperimentali

La Figura 4 mostra lo schema del sistema di misura utilizzato per realizzare la tecnica di misura descritta. Il Dsp

Tabella II - Encoder con 4000 ppr			
Velocità al passo n [rpm] $\omega^{(n)}$	Min. velocità al passo n+1 [rpm] $\omega^{(n+1)}$	Intervalli al passo n $I_{T_c}^{(n)}$	Min. numero di intervalli al passo n+1 $I_{T_c}^{(n+1)}$
220,0	205,0	14,7	13,7
380,0	365,0	25,3	24,3
540,0	525,0	36,0	35,0
700,0	685,0	46,7	45,7
860,0	845,0	57,3	56,3
1020,0	1005,0	68,0	67,0
1180,0	1165,0	78,7	77,7
1340,0	1325,0	89,3	88,3
1500,0	1485,0	100,0	99,0
1660,0	1645,0	110,7	109,7
1820,0	1805,0	121,3	120,3
1980,0	1965,0	132,0	131,0
2140,0	2125,0	142,7	141,7
2300,0	2285,0	153,3	152,3
2460,0	2445,0	164,0	163,0
2620,0	2605,0	174,7	173,7
2780,0	2765,0	185,3	184,3
2940,0	2925,0	196,0	195,0
3100,0	3085,0	206,7	205,7
3260,0	3245,0	217,3	216,3
3420,0	3405,0	228,0	227,0
3580,0	3565,0	238,7	237,7

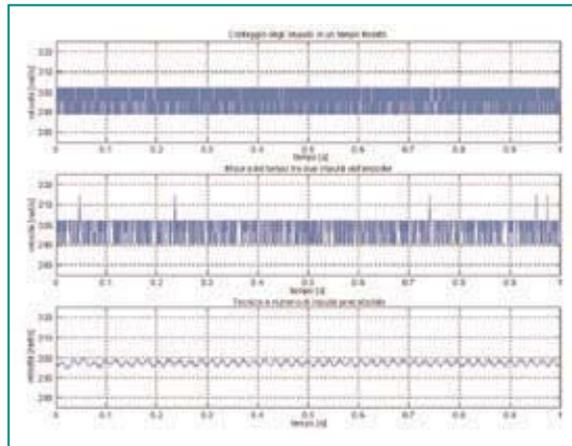
(Digital Signal Processor) è utilizzato per pilotare il motore asincrono mentre sul microcontrollore Infineon C167CR sono state implementate le tre tecniche di misura descritte nell'articolo. Poiché si è impiegato un solo encoder sono stati utilizzati due optoisolatori (OC) per i due canali in quadratura dell'encoder, per tenere separata l'alimentazione dell'azionamento da quella del sistema di misura. Diverse misure della velocità angolare sono state realizzate, controllando il motore con il metodo  $V/Hz$  e con la tecnica del controllo vettoriale al fine di imporre diversi profili di velocità. La Figura 5 riporta i risultati delle misure eseguite in condizioni di regime con un riferimento per la velocità di sincronismo di 314 rad/s mentre nella Figura 6 sono riportati i risultati delle misure ottenute variando la velocità di sincronismo da 0 a 314 rad/s.

Come si può notare, l'informazione ricavabile con la tecnica proposta è notevolmente superiore rispetto a quella fornita dalle altre due in un ampio range di velocità. Con la tecnica a numero di impulsi precalcolato è stato possibile valutare l'ondulazione della velocità, che è risultata di circa 3 rad/s. Tale valore è inferiore all'ampiezza del rumore introdotto dalle altre due tecniche di misura che pertanto non riescono a dare alcuna informazione a riguardo. In Figura 7 sono riportati i risultati delle misurazioni realizzate con l'azionamento a controllo vettoriale con un valore di regime per la velocità di 210 rad/s. Un'analisi teorica dell'errore di misura, sostenuta da risultati della simulazione mediante calcolatore è stata affiancata ai risultati sperimentali fornendo anche una espressione analitica per i parametri di accuratezza, precisione e risoluzione che tuttavia si tralascia in questa esposizione.

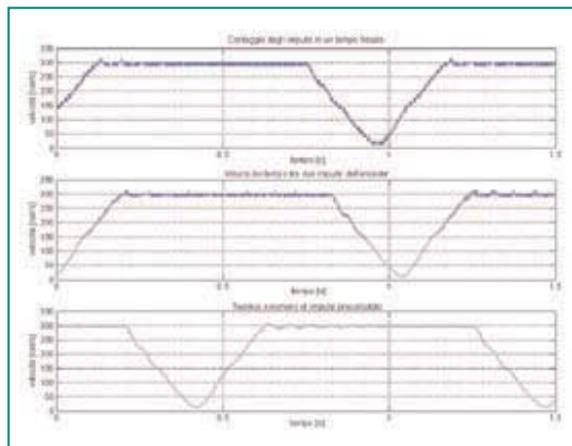
Il presente articolo è un estratto dalla tesi di laurea in "Azionamenti Elettrici per l'Automazione" dal titolo "Controllo a Microprocessore di un Azionamento Elettrico: Misura della Velocità" - Politecnico di Bari - A.A. 2000/2001. Relatori: Prof. Ing. Antonio Dell'Aquila, Dott. Ing. Francesco Cupertino. Laureando: Daniele Santese.

## Bibliografia

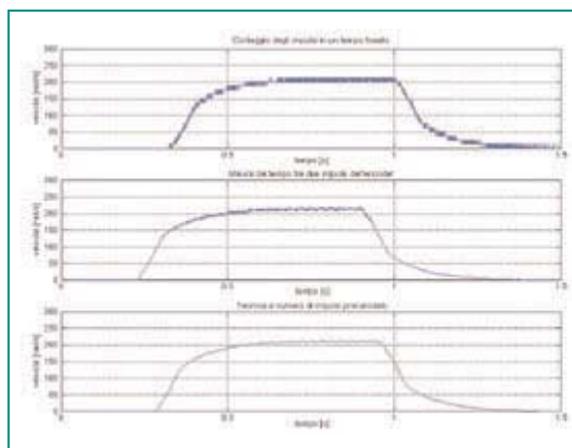
- [1] G.A. Woolvet, *Transducers in Digital Systems*, London, Inst. Elect. Eng., 1977.
- [2] R. Bonert, *Digital tachometer with fast dynamic response im-plemented by a microprocessor*, Ieee Transaction on Industry application, Vol. IA-19, no. 6, Dec. 1983, 1052.
- [3] T. Ohmae, T. Matsuda *et al.*, *A microprocessor controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drive*, Ieee Transaction on Industrial Electronics, Vol. IE-29, no. 3, Aug. 1982, 207.
- [4] R. Bonert, *Design of a high performance digital tachometer with a microcontroller*, Ieee Transaction on Instrumentation and measurement, Vol. 38, no. 6, Dec. 1989, 1104.
- [5] C.D. di Cenzo, B. Szabados, N.K. Sinha, *Digital measurement of angular velocity for instrumentation and control*, Ieee Transaction on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. Ie-ci-23, no. 1, Feb. 1976, 83.
- [6] G.P. Hancke, C.F.T. Viljoen, *The microprocessor measurement of low values of rotational speed and acceleration*, Ieee Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 39, no. 6, Dec. 1990, 1014.
- [7] M. Prokin, *Double buffered wide-range frequency measurement method for digital tachometers*, Ieee Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 40, no. 3, June 1991, 606.
- [8] M. Prokin, *Extremely wide-range speed measurement using a double-buffered method*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 41, no. 5, Oct. 1994, 550.
- [9] C.F. Christiansen, R. Battaiotto *et al.*, *Digital measurement of angular velocity for speed control*, Ieee Transaction on Industrial Electronics, Vol. 36, no. 1, Feb. 1989, 79
- [10] *C167CR Derivatives, 16-bit Single-Chip Microcontroller, User's Manual*, Infineon Technologies, V3.1, Edition Mar. 2000. ■



**Figura 5 - Profili di velocità misurati con le tre tecniche in condizioni di regime**



**Figura 6 - Profili di velocità misurati con le tre tecniche a velocità variabile**



**Figura 7 - Profili di velocità misurati con le tre tecniche a velocità variabile con controllo vettoriale**