

# Misura della tensione di uscita degli azionamenti a velocità variabile dei motori con uno ScopeMeter® Fluke Serie 190

Gli azionamenti a velocità variabile dei motori, anche detti “convertitori di frequenza”, sono largamente diffusi nelle installazioni industriali. Durante l'installazione e l'assistenza, le misure delle tensioni di uscita spesso presentano risultati inaspettati. Perché si verifica questo problema, e come è possibile evitarlo?

## Azionamenti a velocità variabile dei motori

I tradizionali macchinari elettrici collegati direttamente a un sistema di alimentazione di tipo singolo o trifase hanno solo un intervallo limitato di controllo della velocità, a volte del tutto assente. Un dispositivo di trasmissione esterno rappresenta una soluzione ma è voluminoso, rumoroso, costoso e soggetto ad usura.

La disponibilità di nuovi dispositivi a semiconduttore che controllano tensioni e correnti elevate ha favorito la progettazione degli azionamenti a velocità variabile dei motori, noti come “convertitori di frequenza”. Tali dispositivi offrono un'ampia flessibilità nel controllo della velocità, bilanciandola con una bassa dispersione elettrica e una coppia costante che possono essere indipendenti dall'effettiva velocità di rotazione della macchina.

Di conseguenza, l'utilizzo di azionamenti a velocità variabile per i motori è largamente diffuso nelle installazioni industriali laddove questi offrono numerosi vantaggi:

- Minore usura, dal momento che vengono impiegate macchine asincrone,
- Controllo efficace, e
- Efficienza ad alta energia.



Tuttavia, durante l'installazione e la manutenzione è possibile effettuare misure su risultati imprevisti. Qui spieghiamo come ciò sia possibile e cosa si può fare per risolvere il problema utilizzando gli strumenti ScopeMeter Fluke Serie 190.

## Generazione di output a frequenza variabile

Per generare un'uscita a frequenza variabile sono disponibili vari metodi. I primi dispositivi progettati erano noti come convertitori di potenza tiristori a controllo automatico o a sincronismo macchina. Oggi è ancora possibile trovarli nei convertitori di frequenza ad elevata potenza ma per le applicazioni a bassa potenza esistono alternative migliori.

I tiristori (raddrizzatori controllati al silicio o SCR) si spengono solo quando la corrente di rete si annulla, perché la loro tensione di uscita non è un'onda sinusoidale continua ma presenta sempre delle discontinuità (come, ad esempio, mostrato nella figura 1).

In questo caso, il cambiamento dello sfasamento della discontinuità controlla efficacemente la potenza in uscita, che può essere utilizzata per modificare la velocità della macchina con una riduzione della potenza meccanica disponibile. Sfortunatamente, questi convertitori non consentono la modulazione della forma d'onda di uscita; i tentativi per risolvere questo inconveniente usando circuiti esterni si sono dimostrati costosi e di scarso successo.

Una volta che i cosiddetti "semiconduttori di potenza a spegnimento controllato" sono diventati disponibili, si è sviluppato un approccio totalmente diverso al controllo dei motori a velocità variabile. Tali semiconduttori possono essere attivati o disattivati, il che li rende adatti alla 'modulazione' in un sistema in corrente continua. La Figura 2 illustra la struttura base di tali dispositivi.

L'ingresso della tensione di rete, trifase o monofase, è collegato ad una serie di raddrizzatori che alimentano in bus CC interno. Qui la tensione CC viene bufferizzata da un condensatore ad elevata capacità, caricato ad una tensione  $U_b$ :

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_{\text{rete}} \approx 1.41 \cdot U_{\text{rete}}$$

La tensione in corrente continua viene quindi applicata ad una serie di doppi interruttori accoppiati che collegano alternativamente ciascuno dei tre collegamenti della macchina alla linea bus positiva o negativa. Inoltre, ciascun ramo di interruttori può essere in modalità inattiva (cioè non conduttiva), isolando in modo efficace il collegamento della macchina a cui è collegato.

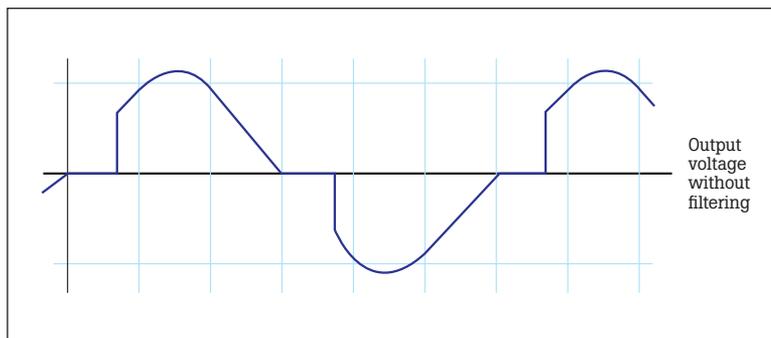


Figura 1: Tensione di uscita di un convertitore di potenza basato su SCR. La tensione di uscita non filtrata mostra chiaramente delle discontinuità.

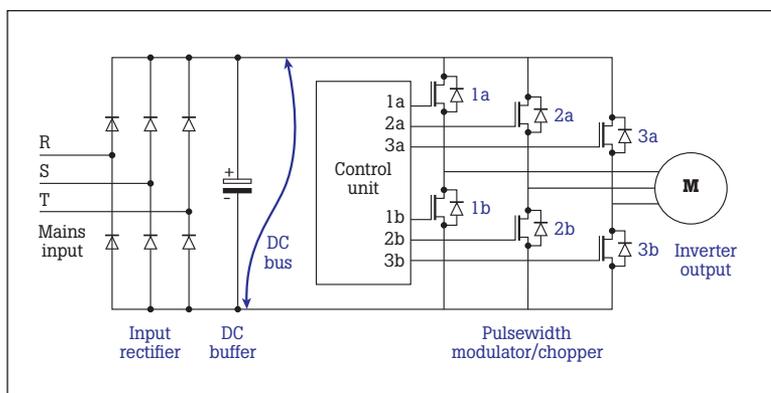


Figura 2: Struttura di base di un azionamento a velocità variabile di un motore.

Tutti gli interruttori sono controllati da un'unità di controllo centrale che genera gli impulsi di comando che attivano al momento giusto ciascuno dei 6 interruttori. La variazione della velocità di commutazione determina la frequenza di uscita. L'ordine in cui le tre uscite sono pilotate determina la direzione di rotazione della macchina.

L'unità di controllo viene impostata in modo che la frequenza di uscita possa variare in un ampio intervallo. Poiché la velocità di rotazione della macchina dipende direttamente dalla frequenza dell'alimentazione, è possibile controllare efficacemente la velocità della macchina.

La Figura 3 mostra le tensioni di uscita risultanti per ciascuna delle linee di uscita. Per ciascuno dei collegamenti della macchina vediamo un impulso positivo, un intervallo durante il quale il collegamento non è alimentato a sinistra, quindi un impulso negativo, seguito da un altro intervallo durante il quale non viene applicata alcuna tensione di comando.

In questo semplice caso, la tensione di uscita a circuito aperto di ciascuna delle uscite assume il valore  $+1/2 U_b$  o zero (fluttuante), o  $-1/2 U_b$ , dove  $U_b$  è la tensione del bus. Notare che, poiché tutte e tre le uscite sono collegate allo stesso modo, il valore medio per ciascuna delle linee in uscita presenta un valore che è la metà della tensione  $CC_{bus}$ .

Se la forma d'onda superiore viene applicata ad un filtro passa basso, l'uscita assomiglia ad un'onda sinusoidale con frequenza fondamentale uguale a quella dell'onda quadra che viene pilotata dal circuito di controllo (vedere la figura 4). Tuttavia, i filtri passa basso che controllano i livelli di energia incontrati nei dispositivi di comando dei motori possono essere voluminosi e costosi, così sono state sviluppate delle soluzioni alternative.

### Alternativa al filtraggio passa basso

Un ulteriore miglioramento nell'elettronica di potenza ha portato allo sviluppo di soluzioni alternative ai filtri passa basso. Nei sistemi reali, gli impulsi positivi e negativi non vengono generalmente creati da un singolo impulso della polarità desiderata. Al contrario, tutti gli impulsi vengono generati accendendo e spegnendo ripetutamente lo stesso interruttore a stato solido ad una frequenza di impulsi più alta, con una variazione on-off del duty cycle (vedere la figura 5).

Il trucco consiste nel fatto che il duty cycle viene variato in modo che la corrente (ma non la tensione) che scorre attraverso l'avvolgimento della macchina abbia una forma d'onda sinusoidale. In effetti, l'induzione degli avvolgimenti della macchina ha la stessa funzione del filtro passa basso nel quale fluisce una corrente sinusoidale, risultato di una tensione ad ampiezza d'impulso modulata.

Nella figura 5, la curva superiore rappresenta la tensione di uscita per una linea nella quale è chiaro l'effetto di una variazione del duty cycle; la curva inferiore dà la tensione di uscita, in valore efficace, per un ciclo di clock interno  $T$ , nella relativa scala.

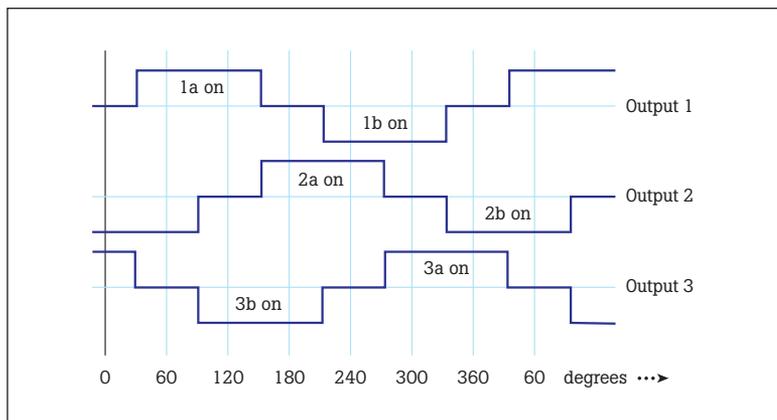


Figura 3: Tensione di uscita per ciascuna delle linee di uscita individuali.

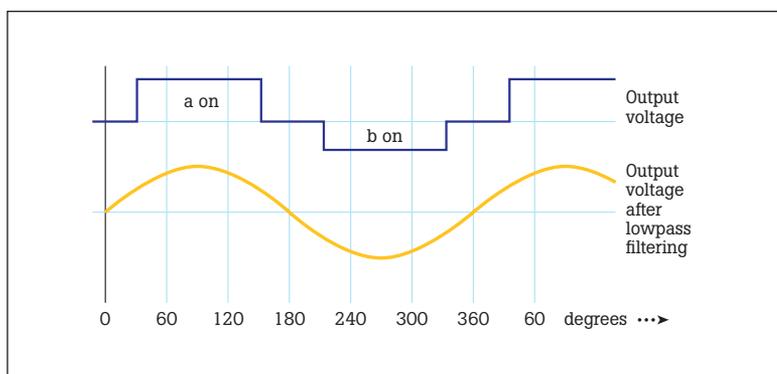


Figura 4: Tensione di uscita diretta e attraverso un filtro passa basso.

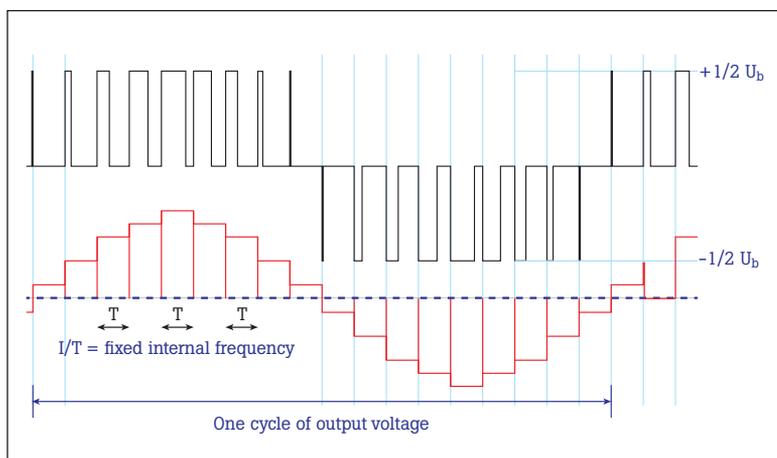


Figura 5: Tensioni di uscita per un dispositivo di avviamento ad ampiezza di impulso modulata (semplificate).

Questo fatto indica che la tensione di uscita, in valore efficace, è una forma d'onda sinusoidale. Tuttavia, la tensione di uscita reale dei dispositivi di azionamento dei motori ha un aspetto più somigliante alla curva superiore! A differenza dei circuiti SCR menzionati precedentemente, è possibile utilizzare i circuiti di azionamento in modalità di commutazione per tutto il tempo. In tal caso le perdite di energia negli interruttori a semiconduttore sono minime, con un'alta efficienza energetica e una bassa generazione di calore nel modulo di comando.

## Misure di tensione

Sebbene i miglioramenti nell'efficienza e la libertà nel controllo della velocità con questi dispositivi di comando siano evidenti, sorgono delle complicazioni per i tecnici che li installano o utilizzano.

La tensione di uscita del dispositivo di comando viene generata allo scopo di riprodurre una corrente con una forma d'onda sinusoidale mediante un carico induttivo, tuttavia la tensione applicata ha una forma d'onda completamente differente. Misurando la tensione di uscita si possono quindi ottenere risultati inattesi poiché, diversamente dai circuiti elettrici, il voltmetro sarà sensibile alla tensione di uscita non filtrata.

Questo fatto è dovuto sia alla forma d'onda della tensione sia alle caratteristiche di progettazione dei multimetri digitali. Tali dispositivi vengono generalmente progettati per misurare l'ampiezza di un'onda sinusoidale alla frequenza di rete, cioè 50 o 60 Hz. Al contrario, la tensione di uscita dell'azionamento a velocità variabile è un'onda quadra ad alta frequenza e il suo duty cycle cambia continuamente. D'altro canto, il picco di ampiezza dell'onda quadra è fisso. Infine, sono in gioco due polarità.

La maggior parte dei multimetri vengono progettati per rispondere alla tensione applicata media, picco o picco-picco, di conseguenza vengono calibrati per leggere l'ampiezza efficace dell'onda sinusoidale. Inoltre, per la misura della tensione in corrente alternata, la maggior parte dei multimetri è dotata di un rettificatore a doppia fase posto in entrata, per garantire che le tensioni di entrambe le polarità contribuiscano alla lettura in egual modo.

Se osserviamo la tensione di uscita mostrata in figura 5, la tensione media per ciclo T (dopo la rettificazione) è direttamente proporzionale al duty cycle della forma d'onda e alla tensione del bus DC, quindi varia costantemente a causa della variazione del duty cycle. A metà del ciclo della corrente risultante, la tensione media assume il valore:

$$U_{media} = d * U_{picco} = d * ( 1/2 U_b )$$

dove: d = duty cycle, variabile da 0 a 100% e viceversa.

Il risultato è una lettura dello strumento in volt che si discosta significativamente dal valore atteso sui terminali della macchina (ad esempio un display incorporato allo stesso motore sul quale si legge la tensione efficace di uscita calcolata dai dispositivi elettronici di controllo situati all'interno).

Per illustrare quanto affermato sopra, sono stati effettuati dei test su multimetri di differente fabbricazione e modello, esattamente sotto le stesse condizioni, utilizzando dispositivi di azionamento con le stesse impostazioni. I risultati misurati, riportati in tabella 1, variano da 143 V a 1000 V!

Modello di multimetro digitale	Letture (Vac)
1	1001 V
2	154,2 V
3	157,6 V
4	170,1 V
5	187,1 V
6	193,6 V
7	204,3 V
8	215,3 V
9	237,93 V
10	254 V
Fluke 41B	143V
Fluke 43B	143,3 V
Serie 190 Fluke	144 V

Tabella 1: Lettura di tensione CA utilizzando diversi multimetri digitali

## Esecuzione di misure corrette

In questa particolare situazione, il modo corretto per misurare la tensione di uscita è quello di considerare la particolare applicazione del dispositivo di avviamento.

L'alimentazione per i dispositivi elettrici viene fornita dalla corrente che circola negli avvolgimenti della macchina, mentre la tensione applicata è fondamentalmente necessaria solo al flusso della corrente. Gli azionamenti a velocità variabile dei motori utilizzano questo fatto applicando una tensione discontinua ad alta frequenza che produce una corrente con una forma d'onda sinusoidale. Tale segnale circola negli avvolgimenti della macchina ed ha la frequenza che dipende dall'unità di controllo e la polarità della tensione commutata.

Così se si vuole conoscere la tensione di uscita efficace del dispositivo di avviamento, è necessario prendere in esame solo la componente a frequenza fondamentale della tensione applicata.

Per ottenere questo, si devono prendere un grande numero di campioni della tensione applicata e costruire un'immagine dettagliata della forma d'onda all'interno della memoria digitale dello strumento. Utilizzando tale immagine, viene calcolata e visualizzata l'ampiezza della componente a frequenza fondamentale.

Negli ultimi tre strumenti di test elencati in tabella 1 si è seguito tale procedimento. La tabella comprende gli strumenti ScopeMeter Fluke della serie 190B e 190C nei quali tutte le tensioni entranti vengono digitalizzate ad un'alta velocità di campionamento e l'immagine digitale della forma d'onda viene memorizzata per un'ulteriore analisi.

Gli strumenti ScopeMeter della serie 190 sono dotati di una funzione riservata alla misura di tensione, detta "misura-Vpwm", dedicata a queste applicazioni. Con questa funzione, gli strumenti della serie 190 sono in grado di analizzare il segnale digitale e calcolare la frequenza fondamentale. Il segnale presenta la stessa forma d'onda della corrente di uscita del dispositivo di avviamento. Dalla forma d'onda viene calcolato il valore efficace, poi visualizzato come lettura Vpwm.

Si osservi l'immagine dello schermo in figura 6, dove l'ampiezza picco-picco e la tensione di uscita, in valore efficace, di un dispositivo di avviamento sono entrambe riportate nelle piccole caselle sulla parte superiore dello schermo.

La frequenza di uscita, in valore efficace, della forma d'onda visualizzata può essere qui facilmente determinata: un ciclo singolo ha un'ampiezza di circa 6,3 divisioni, l'unità di misura sull'asse dei tempi è 5 ms, quindi un ciclo singolo ha una durata di circa 31,5 ms. La frequenza di uscita è quindi  $1 / 31,5 \text{ ms} = 32 \text{ Hz}$ .

In alternativa, è possibile utilizzare i cursori per evidenziare un ciclo della forma d'onda d'uscita.

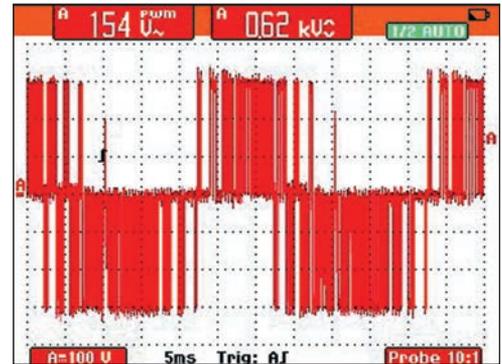


Figura 6: Segnale in uscita dell'azionamento del motore misurato con il Fluke 199C

## Conclusione

Gli azionamenti a velocità variabile dei motori recano molti vantaggi ai costruttori di macchine e a coloro che le utilizzano. Per i tecnici dell'assistenza e gli installatori di dispositivi di avviamento, la misura delle tensioni di uscita è un'operazione complessa. La lettura affidabile delle tensioni di uscita può essere realizzata utilizzando un apparato di test appositamente realizzato, in linea con la lettura (calcolata) sul dispositivo di avviamento.

Lo ScopeMeter Fluke della Serie 190 è particolarmente adatto durante l'installazione e l'assistenza relative a questi azionamenti a velocità variabile ed è fornito di tutte le funzioni di test necessarie.

**Fluke.** *Keeping your world up and running.*®

**Fluke Italia S.r.l.**  
Viale Lombardia 218  
20861 Brugherio (MB)  
Tel: (39) 02 3600 2000  
Fax: (39) 02 3600 2001  
E-mail: fluke.it.cs@fluke.com  
Web: www.fluke.it

**Fluke (Switzerland) GmbH**  
Industrial Division  
Hardstrasse 20  
CH-8303 Bassersdorf  
Telefon: 044 580 75 00

Telefax: 044 580 75 01  
E-Mail: info@ch.fluke.nl  
Web: www.fluke.ch

©2005, 2016 Fluke Corporation. Tutti i diritti riservati. Dati passibili di modifiche senza preavviso.  
11/2016 2543358b-ita

**Non sono ammesse modifiche al presente documento senza autorizzazione scritta da parte di Fluke Corporation.**