TRASDUTTORI DI FORZA, DEFORMAZIONE E PRESSIONE BASATI SUGLI ESTENSIMETRI A FOGLIO E SUL PRINCIPIO DI MISURA PIEZOELETTRICO PER L'IMPIEGO IN APPLICAZIONI INDUSTRIALI

André Schäfer
Dr.-Ing.; Hottinger Baldwin Messtechnik, Im Tiefen See 45, 64293 Darmstadt, Germania

Riassunto: Alla sensorica dei processi industriali è sempre maggiormente richiesta sia una più rapida gestione dei dati che misurazioni sempre più accurate e, nel contempo, i costruttori si attendono la costante affidabilità del controllo qualità della propria produzione. Impiegando la più moderna tecnologia, i trasduttori di forza, deformazione e pressione della HBM misurano grandezze statiche e dinamiche e soddisfano i requisiti richiesti dai specifici compiti di misura.

Parole chiave: Trasduttori di Forza, di Deformazione, di Pressione, Estensimetri a Resistenza, ER, Principio di misura Piezoelettrico

INTRODUZIONE

Nei processi industriali si osservano due tendenze apparentemente contrastanti. Una tendenza è presente già da tempo: la richiesta di processi sempre più veloci. In contrasto, la qualità e la conseguente precisione di misura durante la produzione restano più importanti che mai.

Ci sono ragioni molto chiare per queste tendenze. Sia il costo del lavoro che il valore del materiale, soprattutto delle materie prime da cui viene ricavato, crescono continuamente. Ciò proseguirà anche nei prossimi anni, tuttavia ci sono dei limiti alla crescita dei prezzi dei prodotti finiti. La sensibilità di mercato impone ai costruttori di non poter aumentare i prezzi dei propri prodotti per coprire completamente i maggiori costi. Resta loro una sola opzione: l'ulteriore incremento della produttività dei processi industriali. Ciò significa che, al fine di limitare i costi del materiale e del lavoro, le verifiche del prodotto potranno essere effettuate solo al completamento del processo e che la selezione del materiale dovrà avvenire nei primi stadi della produzione. Da ciò scaturisce la necessità della rapida gestione dei dati e, contemporaneamente, dell'elevata precisione delle misurazioni.

BASI DELL'ACQUSIZIONE DEI SEGNALI

Per poterle confrontare l'una con l'altra, è utile considerare le basi delle tecniche di misura.

La HBM ha più di 55 anni di esperienza nella tecnica di misura ed il nostro successo dipende largamente dal principio di funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza (ER). L'applicazione di qualsiasi grandezza di misura – forza, deformazione o pressione – provoca la deformazione del corpo di misura, la quale viene rilevata con gli ER.

Nel campo di deformazione elastica di un materiale, i metodi di calcolo della sollecitazione del materiale stesso si basa sulla misura della deformazione e sulla Legge di Hooke o della Proporzionalità. La forma più semplice della legge di Hooke è espressa da [1]:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

ove σ = sollecitazione del materiale, ε = deformazione ed E = modulo elastico del materiale
Questa variante della legge di Hooke è valida solo per stato di sollecitazione monoassiale**.** Altri stati di sollecitazione richiedono varianti più complesse.

La deformazione può essere rilevata con i noti estensimetri (ER) mostrati nelle figure [2] e [3].

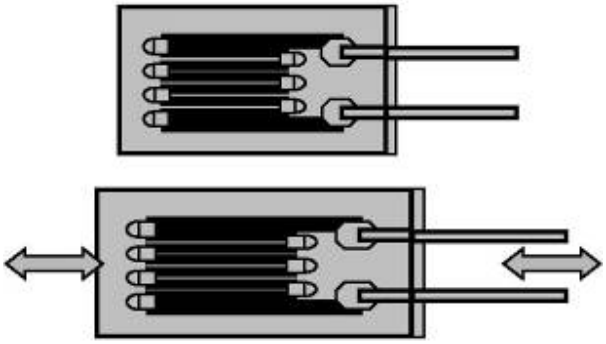


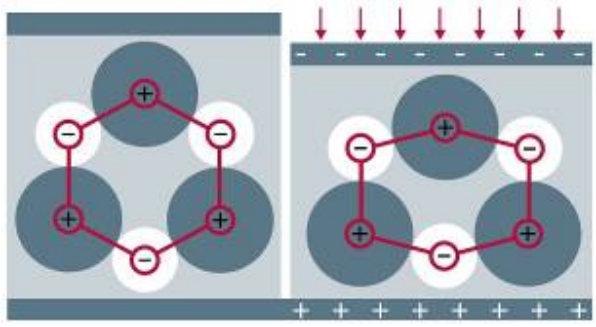
Figura 2: Schizzo schematico di un ER. a) Stato originario, b) Variazione della resistenza sotto l'effetto della forza

La variazione della sua resistenza è

$\Delta R/R_0 = k \cdot \varepsilon$. (2)

Ove ε = deformazione, k = fattore k, ΔR = variazione di resistenza ed R_0 = resistenza iniziale.

L'altra possibilità consiste nello sfruttare il principio piezoelettrico. La figura sottostante mostra cosa succede al cristallo se esso viene sollecitato da una forza di compressione.



a) *b)*

Figura 3: Schizzo schematico del principio di misura piezoelettrico. a) Stato originario, b) Traslazione della carica sotto l'effetto della forza

Il carico è generato da

$Q = q_{11} \cdot F$. (3)

Ove Q = carica, q_{11} = costante piezoelettrica, F = forza

Fondamentalmente ambedue i principi di misura convertono la forza in un segnale elettrico. L'affidabilità è similare, mentre la sensibilità e la linearità non sono più effettivamente un criterio di scelta determinante (Fig. 4).

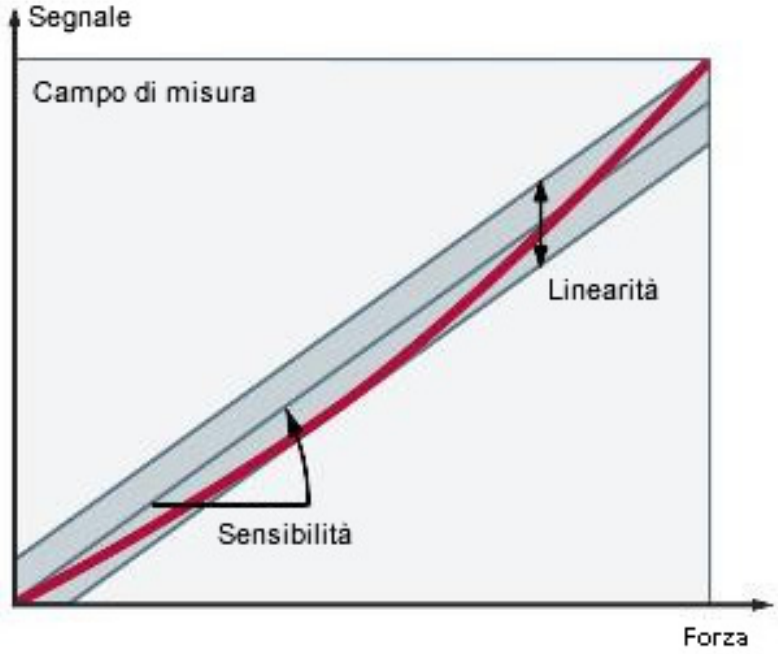


Figura 4: Relazione fra la forza ed il segnale di uscita

MISURAZIONE DI PRESSIONI ULTRA ELEVATE

Le doti del principio di misura ad ER sono dimostrate dai trasduttori di pressione. Cresce l'impiego di trasduttori nel campo delle ultra pressioni per i componenti di iniezione Diesel quali, ad esempio, gli ugelli ed i condotti del carburante, oppure anche semplici tubazioni di particolare interesse. Le prove funzionali possono essere condotte alle pressioni di esercizio od a pressioni di prova più elevate.

Le applicazioni spaziano dall'allungamento della vita operativa dei motori Diesel, passano per il taglio a getto d'acqua abrasiva e proseguono con la pulitura ad alta pressione. Assume sempre maggior importanza la sterilizzazione ad alta pressione quale metodo di conservazione nell'industria alimentare ed il miglioramento della strumentazione e degli impianti richiede costantemente trasduttori con campi di misura più elevati.

La figura 5 mostra lo schema elettrico di un sensore di pressione ad ER inserito in un circuito di misura a ponte di Wheatstone (WB).

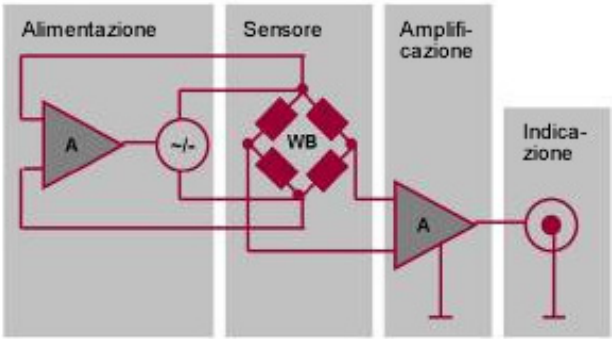


Figura 5: Principio di funzionamento di un amplificatore per ER

L'applicazione degli ER si effettua dopo la costruzione del corpo di misura ed offre il vantaggio di non porre alcun limite alla conformazione delle strutture od alle fasi di lavorazione della tecnologia delle macchine utensili. Ciò significa che il corpo di misura può essere ricavato da un unico pezzo (struttura monolitica), il che allunga notevolmente la vita operativa come non era finora mai stato possibile con i sistemi usuali [4].

La stessa struttura brevettata del trasduttore senza alcun cordone di saldatura, genera eccellenti caratteristiche nei massimi campi di pressione [5]. Il più recente sviluppo di questa tecnologia è costituito dal trasduttore di pressione P3 „TOP Class Blue Line" della HBM. La famiglia Top Class offre una miglior risposta in temperatura con valori documentati individualmente, una miglior classe di precisione ed una più ristretta tolleranza della sensibilità [6].

Nelle nuove applicazioni ad alta pressione, anche la massima precisione possibile della tracciabilità è uno dei requisiti standard per queste pressioni ultra elevate. Numerosi Istituti Normativi Nazionali in tutto il mondo si affidano a questa eccezionale precisione [7].

La tabella 1 illustra i dati tecnici più importanti, la figura 6 mostra la fotografia di un trasduttore per alte pressioni.

Pressione nominale	5 000 bar	10 000 bar	15 000 bar
Sensibilità nominale	1 mV/V	1 mV/V	1 mV/V
Precisione iniziale	0,25%	0,4%	0,6%
Stabilità a lungo termine dei segnali di zero e di fondo scala (dati annuali)	0,2%	0,2%	0,2%

Tabella 1: Dati tecnici salienti del trasduttore P3 „TOP Class Blue Line"

Figura 6: P3 Top Class Blue Line, trasduttore di pressione per pressioni ultra elevate fino a 15 000 bar

MISURAZIONE DI FORZE RAPIDE COL METODO PIEZOELETTRICO

I principali vantaggi della soluzione piezoelettrica sono la forma molto compatta del sensore, la misurazione pressoché senza deflessione e la rilevazione altamente dinamica di tutte le variazioni del segnale.

La figura 7 mostra lo schema di collegamento di un sensore piezoelettrico.

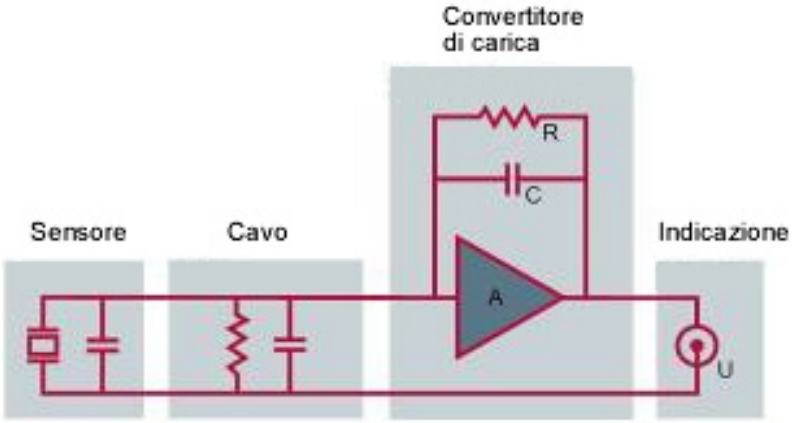


Figura 7: Principio di funzionamento dell'amplificatore di carica

La catena di misura della forza CMC, della famiglia PACEline, costituita da un trasduttore piezoelettrico e da un amplificatore di carica isolato galvanicamente, permette la determinazione senza perdite della forza di rottura direttamente nel flusso della forza. La robustezza e rapidità della tecnologia piezoelettrica qui impiegata, unite all'elevata rigidità del sensore piezo, è perfettamente adatta per le gravose applicazioni industriali.

Il trasduttore di forza e l'amplificatore analogico vengono forniti quale unità preconfigurata e tarata. Ciò permette anche l'implementazione della esclusiva funzione di Zoom a risoluzione più elevata (20 % del campo di misura nominale), particolarmente utile per il monitoraggio di processi con criticità di sovraccarico. Questa funzione permette ora l'impiego di un solo trasduttore dove prime ne servivano due.

La famiglia PACEline offre molto di più di quanto ci si potrebbe attendere dai sensori piezoelettrici. La catena di misura della forza dispone già di funzioni intelligenti che rendono il monitoraggio di processo più affidabile e confortevole. Essa fornisce la tecnologia che assicura la massima qualità della produzione – perfino per le misurazioni praticamente senza deflessione e per i più ridotti spazi di montaggio disponibili.

La figura 8 mostra un assortimento di trasduttori della famiglia PACEline.

Figura 8: Sensori piezoelettrici di forza CMC della famiglia PACEline

Tipici campi di applicazione industriale sono i banchi prova, ad esempio per misurazioni della forza per il controllo della qualità del materiale, e la tecnologia di automazione, ad esempio per il monitoraggio della qualità nei processi di formatura e giunzione.

VISO A VISO E DUE IN UNO

L'offerta della HBM di soluzioni per la misurazione delle forze si basa, come prima, principalmente sugli estensimetri. La ragione è molto semplice: spesso la stabilità del punto zero e la stabilità a lungo termine

sono più importanti della velocità. La maggioranza dei trasduttori di forza ad ER misurano carichi sia in trazione che in compressione. Inoltre, essi misurano sia forze statiche che dinamiche con la massima precisione [8].

Ecco il perché la HBM offre trasduttori sia ad ER a foglio che piezoelettrici, allargando il campo di impiego per coprire la più ampia gamma di applicazioni industriali [9]. Tutti i trasduttori sono di acciaio inossidabile e sono adatti all'uso in gravosi ambienti industriali con rigorosi requisiti operativi. Essi non necessitano di manutenzione è possono essere installati in luoghi difficilmente accessibili. Ulteriore e significativa caratteristica della tecnologia piezoelettrica è che, data l'elevata precisione, si può evitare il frazionamento, impiegando cioè un solo sensore al posto di due o più sensori con campo di misura diverso.

MISURAZIONE DELLA DEFORMAZIONE

La misurazione della deformazione è impegnativa, dato che per il processo di produzione è necessario il mantenimento della più stretta tolleranza. L'installazione si può effettuare senza problemi alle strutture preesistenti. L'estensometro SLB 700A basato sugli ER può essere direttamente fissato su una superficie piana ad attrito e con quattro viti. Tale metodo permette il trasferimento diretto della deformazione dell'oggetto in prova all'estensometro, rendendolo ideale per impianti in cui, a causa dello spazio o delle condizioni di montaggio, è difficile l'impiego di trasduttori di pressione standard. Le applicazioni correnti comprendono la tecnologia di pesatura ed anche, p.es., misurazioni sulle pale dei generatori eolici, oppure sulle presse impiegate nell'industria automobilistica.

IDENTIFICAZIONE TEDS

Una caratteristica del tutto innovativa è TEDS (acronimo di „Transducer Electronic Data Sheet"), il prospetto dati elettronico dentro il trasduttore. La HBM offre l'identificazione TEDS sia per i trasduttori di pressione ad ER che per i sensori di forza piezoelettrici. Il principio di funzionamento è similare. Le caratteristiche del trasduttore vengono memorizzate su di un chip interno del modulo TEDS integrato, sotto forma di un prospetto dati elettronico. L'amplificatore può leggere questi dati è convertirli automaticamente nelle corrette impostazioni. Ciò significa che senza alcuna ulteriore azione dell'utente si può immediatamente iniziare a misurare. L'utente trae notevoli benefici da questa tecnologia „Plug and Measure" (innesta e misura) con cui è sufficiente collegare il trasduttore per iniziare subito a misurare.

CONCLUSIONI

L'estensimetro elettrico a resistenza, nella sua classica forma di ER a foglio, è perfettamente idoneo alla misurazione di forze, pressioni, deformazioni o coppie. Dopo aver scelto l'opportuna forma del corpo di misura e trovato un buon compromesso fra stabilità e sensibilità della struttura, non esiste alcuna miglior soluzione. Oggigiorno i trasduttori sono soggetti a condizioni ambientali che prima venivano accuratamente evitate, perciò crescono i requisiti richiesti ai nostri prodotti. Grazie alle nuove tecniche di incapsulamento ed ai progressi nei materiali del supporto e della griglia di misura degli estensimetri, è facile soddisfare tali tipi di condizioni ambientali.

Spesso l'amplificatore deve essere integrato nel trasduttore. All'inizio furono sviluppati i trasduttori di pressione poi, la facilità del montaggio e la richiesta di strumenti stand-alone, portarono allo sviluppo dei trasmettitori, cioè trasduttori di pressione con amplificatore incorporato. Oggi l'utente pretende questa soluzione per quasi tutti i tipi di grandezze di misura. Sia i trasduttori ad ER che quelli piezoelettrici possono integrare l'elettronica al loro interno e generare un segnale di uscita definito con precisione.

Prendendo in considerazione l'amplificatore di carica necessario al funzionamento di un piezocristallo, si nota che esso non costituisce alcun impegno addizionale. Gli amplificatori di carica moderni sono efficienti e generano un segnale di uscita abbastanza stabile per un lungo lasso di tempo. L'utente ne ha certi vantaggi dovuti alla forma molto compatta del trasduttore, alla misurazione pressoché senza deflessione e, naturalmente, all'eccellente risposta dinamica.

Gli istituti metrologici nazionali (come il PTB in Germania) ed i laboratori di taratura accreditati pretendono un'estrema precisione per le misurazioni di forza, carico, coppia e pressione. Pertanto anche nel futuro questo resterà il campo di impiego ottimale degli ER. Grazie alla molteplice e pluriennale esperienza, i trasduttori di precisione HBM per taratura soddisfano queste stringenti norme. Nel 1977 la HBM fu il primo laboratorio accreditato del Servizio di Taratura Tedesco. Oggi vengono coperte tutte le grandezze menzionate: forza, pressione, coppia e rapporto di tensione mV/V, ed il Laboratorio HBM è uno dei più conosciuti ed efficienti laboratori di taratura di questo genere che detenga l'accreditamento DIN EN ISO/IEC 17025.

Il programma di produzione HBM di trasduttori industriali si avvantaggia di questa forza e prevede un probabile futuro in cui in un trasduttore universale siano combinati i due molto diversi principi di misura, offrendo contemporaneamente precisione e dinamica illimitate. Ciò potrebbe essere molto interessante ad esempio per le applicazioni orientate alla sicurezza.

BIBLIOGRAFIA

1 Soloman, S. „Sensors Handbook", McGraw-Hill Education, 1996, S. 13

2 Window, A.L., Holister, G.S; „Strain Gauge Technology", Applied Science Publishers, 1990, S. 18

3 Hoffmann K.; „An introduction to measurements using strain gauges", Herausgeber Hottinger Baldwin Messtechnik, 1889

4 Schäfer A., „Opportunities for water jet cutting using modern pressure-measurement equipment", White paper (Weißbuch), veröffentlicht 2007 auf hbm.com, ID-Nummer 793_en

5 Schäfer, A., Viel, W., Rapp-Hickler, C., Mikulecki, K.; Patent DE 10238163 „Ultra High Pressure Transducer", Patent- und Markenamt, München, Deutschland, veröffentlicht am 26.02.2004

6 Schäfer, A., Viel, W. Rapp-Hickler, C., Mikulecki, K.; „A new type of transducer for accurate and dynamic pressure measurement up to 15000 bar using foil type strain gauges" Proceedings of XVII. IMEKO World Congress, 22. − 27. Juni 2003, Dubrovnik, Kroatien

7 Schäfer, A.; „15000 Bar im Visier - Neuartiger Druckaufnehmer für weiten Anwendungsbereich", Journal „Fluid", Moderne Industrie, Landsberg, Deutschland, Ausgabe Nov./Dez. 2004, Seite 28 ff.

8 Gautschi, Gustav H., „Piezoelectric Sensorics Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers", ISBN 978-3-54042259-4, Springer, Berlin, 2002

9 Hohmann, P.D., Schäfer, A.; „Combined Calibration of Torque and Force in a 3in 1 Calibration unit", Proceedings of the „APMF 2000", Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque, 2000, S. 204