

Metodologia di Applicazione della Firma Elettrica

M. Macchi, L. Fumagalli,
M. Garetti, S. Ierace,
E. Dovere, S. Cavalieri,
L. Cristaldi, M. Rossi,
R. Zaltieri, M. Vernieri

Non richiede nessun costo per i sensori adeguati al rilievo delle grandezze elettriche

I malfunzionamenti di dispositivi, meccanici ed elettromeccanici, connessi ai motori si traducono in disturbi rilevabili sui segnali elettrici di alimentazione dei motori stessi. Dal momento che tali segnali sono in genere già rilevati per ragioni di monitoraggio energetico, il loro impiego per estrarre anche informazioni per analisi diagnostiche sulle macchine diventa una soluzione tecnica potenzialmente interessante perché *low cost*: il metodo diagnostico – che prende il nome di *analisi di firma* (per l'applicazione che verrà descritta in seguito, essendo i segnali di interesse di tipo elettrico, si parlerà di *firma elettrica*) – non richiede infatti nessun costo per i sensori adeguati al rilievo delle grandezze elettriche (tensione, corrente e potenza) o, tutt'al più, costi limitati per il retrofit volto all'adeguamento della catena ai punti di misura richiesti.

Pensando alla procedura diagnostica da implementare, un primo passo è il rilievo dei parametri necessari per la definizione della firma elettrica della macchina in condizioni di buon funzionamento (i.e. definizione della firma standard). La metodologia di analisi di firma si basa sul confronto tra la firma standard e quelle rilevate nel normale esercizio della macchina: l'opportuna valutazione dell'eventuale scostamento rilevato consente di classificare le condizioni di esercizio in buon funzionamento, funzionamento anomalo, guasto imminente e così via.

La procedura diagnostica è solo il risultato finale dell'ingegneria di manutenzione: bisogna anzitutto individuare i componenti di macchina per i quali il metodo dell'analisi di firma può essere usato con efficacia.

La caratteristica che favorisce l'applicabilità del metodo alle macchine utensili è la ripetitività dei cicli di lavorazione. L'applicazione del metodo a numerosi casi applicativi ha infatti mostrato i migliori risultati quando applicata a processi industriali che prevedono cicli costanti e ripetuti.

Il caso di macchina dedicata ad un solo prodotto è quello che promette la miglior potenzialità applicativa del metodo; qualora la macchina venga usata per più prodotti, si può immaginare una procedura più complessa dove l'accento viene spostato alla ricerca della firma, e quindi del monitoraggio, dei singoli componenti.

Per un pieno sfruttamento delle potenzialità di firma nei diversi casi è necessaria un'ingegneria di manu-

tenzione. Il quesito principale a cui rispondere è il seguente: "quali sono i componenti critici monitorabili con segnali deboli, misurabili con l'analisi di firma elettrica?" Per rispondere a questa domanda è stato proposta e testata, durante il progetto "Sviluppo e applicabilità mecatronica della firma elettrica per innovare la diagnostica predittiva a garanzia dell'efficienza e sicurezza delle macchine"¹, una metodologia a passi, denominata MAFE (Metodologia di Applicazione della Firma Elettrica). Il flow chart di figura 1 riassume il percorso MAFE.

Pianificazione della manutenzione

Il primo passo MAFE altro non è che una FMECA, condotta in accordo allo standard SAEJ1739 originario dell'*automotive*.

La criticità dei componenti è definita con il calcolo dell'indice di rischio in base a scale di severità ed occorrenza; si è invece tralasciato il terzo indice dettato dalla SAE, la rilevabilità, decidendo di demandare questo approfondimento al secondo passo MAFE. Nel secondo passo, si sono caratterizzati i modi di guasto allo scopo di valutare l'applicabilità della firma elettrica.

Ad esempio, quando si prevede la capacità di rilevare, in anticipo, il modo di guasto del dispositivo perché questo impatta sul funzionamento di altri *item* che a loro volta generano, a cascata, la variazione della firma elettrica di un motore, il modo di guasto è rilevabile in modo *indiretto*. È il caso dell'allentamento di una cinghia che causa la variazione nel rendimento della trasmissione di potenza

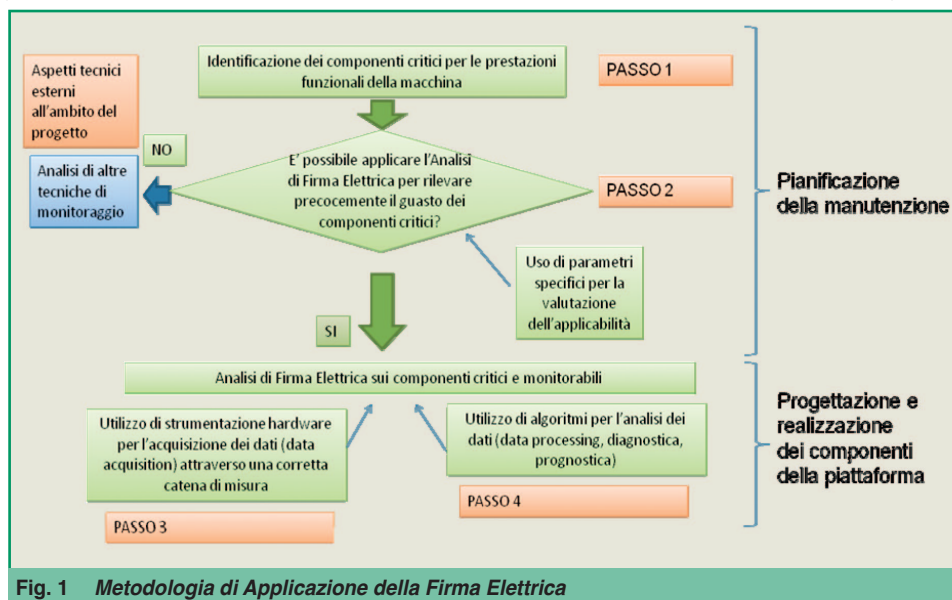


Fig. 1 Metodologia di Applicazione della Firma Elettrica

e, quindi, un maggior consumo del motore. Altre casistiche di rilevanza a mezzo di firma sono state individuate (dalla *non prevedibilità* alla *rilevabilità diretta*), arrivando a stabilire una scala condivisa di progetto (figura 2). Questa scala è stata la base per chiedere ad un team di esperti di tecnologie di macchina di esprimere un giudizio di applicabilità, fondandosi sulla comprensione dei meccanismi di guasto e dei sintomi monitorabili da firma elettrica.

Applicabilità della Firma Elettrica (FE) (indice A_{FE})		
1	Non prevedibile	L'analisi di Firma Elettrica non è applicabile, bisogna utilizzare altre tecniche per poter implementare un sistema di manutenzione su condizione.
2	Non rilevabile tecnicamente dall'analisi di firma elettrica	
3	Difficilmente rilevabile dall'analisi di firma elettrica	La definizione della catena di misura rappresenta un aspetto chiave per l'uso della Firma Elettrica; inoltre, i costi di implementazione dell'hardware rappresentano un fattore da non trascurare.
4	Rilevabile in maniera indiretta	La definizione degli algoritmi di firma rappresenta un aspetto chiave per l'uso della Firma Elettrica; inoltre, i costi di implementazione degli algoritmi rappresentano un fattore da non trascurare.
5	Rilevabile in maniera diretta	L'analisi di Firma Elettrica può essere applicata in maniera più rapida rispetto ai casi precedenti, con costi di implementazione che si possono ipotizzare più contenuti rispetto alle soluzioni associate ad altri indici di Applicabilità FE.

Fig. 2 Analisi dell'applicabilità di Firma Elettrica

Risultato del secondo passo MAFE è l'identificazione dei modi di guasto per cui non è applicabile la firma elettrica (A_{FE} 1, 2), è applicabile con maggior costo e cura nella costruzione della catena di misura (A_{FE} 3), è applicabile con costi di sviluppo e addestramento degli algoritmi di firma elettrica (A_{FE} 4, 5). A quest'ultimo riguardo bisogna sottolineare che è stata scelta una strategia di analisi *black box* per lo sviluppo degli algoritmi di firma.

La strategia si fonda sull'interpretazione dei dati generati dalla macchina, per ottenere informazioni diagnostiche utili, senza la necessità di conoscere il modello fisico di funzionamento della macchina stessa: come effetto della scelta, non si possono evitare i costi di addestramento, necessari per predisporre gli algoritmi di firma all'esercizio².

Attraverso l' A_{FE} è stato quindi possibile identificare i componenti di macchina monitorabili con la firma elettrica. Si è anche calcolato un indice di copertura della firma, per esprimere una misura della quota parte di componenti con degrado rilevabile (con A_{FE} pari a 3, 4 e 5). Dalla macchina studiata nel progetto – una macchina bilanciata nel portafoglio prodotti dell'azienda capofila – è risultata una copertura di circa il 17% dei guasti critici. Tra i componenti sono risultati monitorabili con firma la cinghia di movimentazione del mandrino, il sistema pneumatico e la pinza di presa nel gruppo di bloccaggio pezzo, le cinghie di movimentazione lungo gli assi X, Y, Z e le guide degli assi di movimentazione.

Progettazione e realizzazione della piattaforma diagnostica

In un terzo e quarto passo MAFE si è proceduto alla progettazione e realizzazione della piattaforma diagnostica. Per questo è stato necessario studiare la tecnologia di produzione della macchina. La macchina in esame è un sistema di lavorazione per asportazione di truciolo su più prodotti (dischi freno, dischi tamburo, volani). Le lavorazioni, anche se effettuate su lotti uniformi per materiale e di-

mensione, sono caratterizzate da carichi variabili: questo complica la prima fase della procedura diagnostica, quella di definizione della firma standard. Per questo si è deciso di progettare un ciclo macchina di test con il quale azionare in modo controllato i componenti critici coperti dalla firma (i.e. con A_{FE} maggiore o uguale a 3).

La progettazione del ciclo macchina è risultata dalla collaborazione dell'ingegneria di produzione e di manutenzione. L'ingegneria di

produzione ha predisposto il ciclo con un piano di azionamenti sequenziali dei componenti sotto esame. Con l'ingegneria di manutenzione si sono definiti i modi di guasto dei componenti azionati, da monitorare con firma: con la definizione dei modi di guasto è stato così possibile predisporre la raccolta delle firme standard e l'addestramento degli algoritmi per definire gli indicatori del degrado sino ad imminenza del guasto.

Ad es., si sono raccolte le firme della movimentazione dell'asse X (con sequenze di azionamento destra, sinistra, destra), allentando progressivamente la cinghia di trasmissione e riscontrando l'effettiva capacità di monitoraggio del degrado inizialmente prevista dall' A_{FE} .

Conclusioni

L'ingegnerizzazione della piattaforma diagnostica ha richiesto di studiare l'applicabilità della firma elettrica per i componenti critici. Per questo si è proposta una variante della FMECA dello standard SAE, introducendo l'indice di applicabilità di firma elettrica AFE. Per la macchina esaminata l'AFE ha evidenziato l'interessante potenzialità della firma con circa il 17 % di copertura dei componenti critici. Questo indice permette di prevenire (i) la riduzione dei costi dei piani di manutenzione su condizione, grazie allo sfruttamento della firma in sostituzione di altre tecniche più costose, ed (ii) il contenimento dei costi di implementazione se si intende monitorare item non ancora controllati.

¹ Progetto co-finanziato dalla Regione Lombardia, con partner Balance Systems, come capofila, Politecnico di Milano, Università degli Studi di Bergamo, Provincia di Bergamo, Confindustria Bergamo, ZD Mechatronics e Kilometro Rosso.

² Nel numero del Marzo scorso si è fatto cenno alla tecnica delle reti neurali, come algoritmo per realizzare questa strategia *black box*.

M. Macchi, Ricercatore del Politecnico di Milano DIG

L. Fumagalli, Assegnista di ricerca del Politecnico di Milano DIG

M. Garetti, Professore ordinario del Politecnico di Milano DIG

S. Ierace, coordinatore dell'Area Trasferimento Tecnologico del Consorzio Intellimech e collaboratore del CELS dell'Università degli Studi di Bergamo

E. Dovere, Collaboratore del CELS dell'Università degli Studi di Bergamo

S. Cavalieri, Professore ordinario del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Bergamo

L. Cristaldi, Professore associato del Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano

M. Rossi, Dottorando in Ingegneria Elettrica del Politecnico di Milano

R. Zaltieri, R & D manager della Balance Systems

gli Autori