MISURE PER L'AERONAUTICA

Edoardo Fiorucci, Giovanni Bucci, Fabrizio Ciancetta

Test di sistema elettromeccanico *fault-tolerant*

per la movimentazione dei flap di aeromobili

A TESTING SYSTEM FOR THE PERFORMANCE EVALUATION OF FAULT-TOLERANT ELECTROMECHANICAL DRIVES FOR AIRCRAFT APPLICATIONS

A testing system for the performance evaluation of innovative electromechanical drives for aircraft flaps is presented. It has been developed as a cooperation with the Umbra Group Aerospace. The research activity is focused on the design of the measurement system and on the development of the software for the measurement and the monitoring of mechanical, hydraulic and electrical parameters, as well as the managing of the control system for the emulation of the load force opposing to the actuators movement.

RIASSUNTO

In collaborazione con la Umbra Cuscinetti di Foligno è stata sviluppata una stazione di misura per il test di un innovativo sistema di attuazione per flap per apparecchi aeromobili. È stato realizzato il sistema di misura dotato di un software per il monitoraggio dei parametri elettrici, elettronici, meccanici e idraulici del banco prova e per la gestione del sistema di controllo per la simulazione del carico aerodinamico antagonista alla movimentazione degli attuatori.

L'AZIONAMENTO ELETTRICO DEGLI HIGH LIFT SYSTEMS

Le esigenze economiche e ambientali associate al consumo di carburante, unitamente a quelle del miglioramento delle condizioni di sicurezza, spingono le aziende aeronautiche a sviluppare soluzioni innovative per la nuova generazione di aeromobili. Una delle linee guida è quella che prevede la sostituzione degli azionamenti idraulici con quelli elettromeccanici, essendo questi più leggeri e affidabili. I maggiori sforzi vertono nel miglioramento dei dispositivi di azionamento dei cosiddetti *High Lift Systems* (HLSs) [1], le superfici mobili utilizzate per regolare la forma dell'ala in funzione della velocità (Fig. 1). Per queste ragioni è stato sviluppato un innovativo sistema di attuazione che prevede l'impiego di una coppia di motori sincroni a magneti permanenti multi-fase, progettati in modo da garantire le prestazioni minime anche in caso di guasto di una o due fasi [2-4]. La posizione dei due attuatori è controllata in parallelo, in modo da garantire la ridondanza del sistema di controllo e di attuazione. In particolare, questa soluzione consente di evitare complessi sistemi per la gestione dell'errore d'inseguimento, estendendo alla coppia di attuatori, che movimentano il singolo flap, la filosofia *fault-tolerant* del singolo motore multifase.

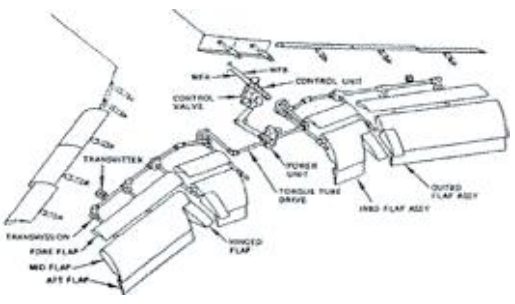


Figura 1 – Gli High Lift Systems

LE CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA DI TEST

Il *set-up* per il test del sistema di attuazione è riportato in Fig. 2 ed è composto da tre elementi: (i) Quadro PC; (ii) Quadro azionamento; (iii) Banco prova. Il Quadro PC presenta al suo interno un PC industriale equipaggiato con un LGA 775 Core 2 Quad Q 6600 @2,4 GHz, 4-GB DDR 3, Hd da 500 GB e una scheda di acquisizione dati NI PCIe-6323. Il Quadro azionamento contiene il sistema di controllo, l'alimentatore del bus DC del sistema di potenza e una coppia d'inverter a cinque fasi *fault-tolerant* per l'azionamento degli attuatori. La scheda di controllo, denominata ECU, è composta da due sezioni: ECU HIGH e ECU LOW. ECU HIGH provvede alla generazione della traiettoria di posizione degli azionamenti, a partire dal profilo di posizione creato dal Quadro PC, mentre ECU LOW provvede a instradare i dati generati da ECU HIGH ai due azionamenti, usando un bus SPI ad alta velocità (6 Mbps).

Figura 2 – Il banco prova

Dipartimento di Ingegneria Industriale, dell'Informazione e di Economia, Università dell'Aquila
edoardo.fiorucci@univaq.it

Il banco prova è composto da: (i) un pistone idraulico per la simulazione della forza aerodinamica antagonista al movimento degli attuatori; (ii) un circuito idraulico che regola/aziona il pistone idraulico; (iii) una riga ottica per la misura della posizione corrente del pistone; (iv) tre celle di carico per la misura della forza sul pistone e sui due attuatori (Fig. 3).

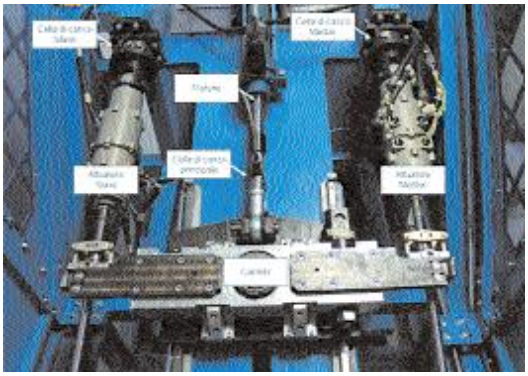


Figura 3 – Particolare del sistema di movimentazione

Il banco prova simula la spinta aerodinamica sui flap, e quindi fornisce un carico (o meglio una forza antagonista) al movimento degli attuatori. Tale spinta è simulata da un pistone idraulico, messo in movimento da un circuito idraulico a olio. Nel circuito idraulico sono state installate opportune valvole che regolano il flusso dell'olio, e quindi il movimento stesso del pistone.

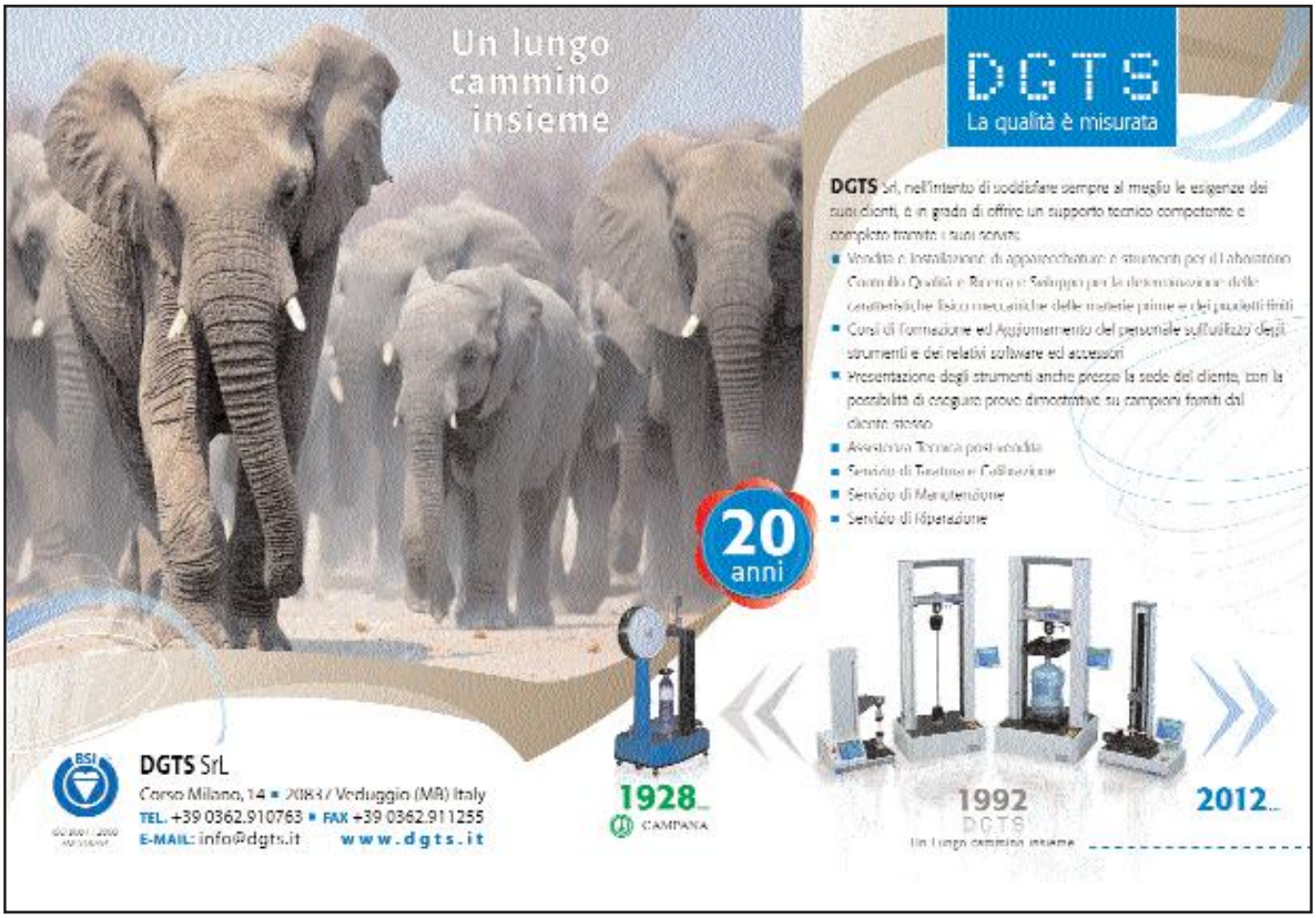
Sono presenti quattro tipologie di valvole (Fig. 4):

1) Valvole di sicurezza on/off VEI che aprono o chiudono il circuito idraulico. Queste valvole vengono comandate dal software di misura, e azionate se si rileva un'anomalia durante la movimentazione per un eccesso di spinta o se il sistema di controllo degli azionamenti è in errore. Sono inoltre azionate dal fungo di emergenza.

2) Valvola WRTE: è una valvola di massima che regola la massima pressione presente nel circuito idraulico; è gestita dal software e regolata in base alla risposta dinamica del sistema idraulico.

3) Le valvole DBEE di parzializzazione: durante una variazione improvvisa della pressione del sistema idraulico, dovuta a un cambio di andatura o a una simulazione di un gradino di carico, si comportano da cuscinetti idraulici che smorzano o irrigidiscono il comportamento del sistema.

4) La valvola WREE è una valvola proporzionale che, in base al segnale di controllo analogico in ingresso, crea uno squilibrio di pressione alle estremità del pistone idraulico. La differenza di pressione permette la movimentazione del pistone.



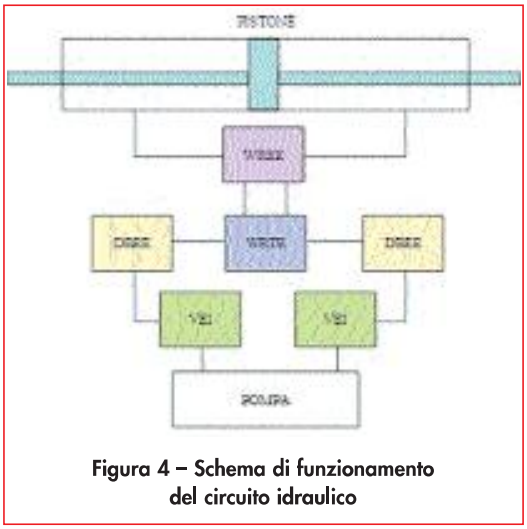


Figura 4 – Schema di funzionamento del circuito idraulico

IL SISTEMA DI MISURA SVILUPPATO

Per la caratterizzazione delle prestazioni del sistema è stata implementata una stazione di misura che, connessa al banco prova, provvede: (i) al monitoraggio dei parametri meccanici, elettrici ed elettronici dell'intero sistema; (ii) alla configurazione del test con la creazione del profilo di movimentazione e la configurazione/monitoraggio dei parametri del controllo dei singoli attuatori; (iii) alla generazione della forza resistente alla movimentazione con l'applicazione del carico aerodinamico al flap tramite il pistone idraulico.
Inoltre, il sistema di misura utilizza: (i) un Fluke Hydra per la misura della temperatura da 6 termocoppie per il monitoraggio del sistema in condizione di stress termico; (ii) un alimentatore Regatron (400 V, 32 kW) che fornisce la potenza elettrica in DC agli azionamenti; (iii) un convertitore SPI-USB per il monitoraggio dei parametri di ECU HIGH, ECU LOW e dei due sistemi di controllo.
Infine, il banco prova utilizza i seguenti trasduttori: (i) due celle di carico, una per ogni attuatore, modello CL da 20 kN; (ii) una cella di carico, sul pistone, modello 3124 da 50 kN; (iii) tre amplificatori, uno per ogni cella di carico, modello TA4/2; (iv) un trasduttore magnetostrittivo di posizione rettilinea senza contatto (riga ottica) Gefran modello MK4-A.
Il software di misura è stato sviluppato usando il pacchetto LabWindows™ CVI di National Instruments. A differenza di altri pacchetti software per lo sviluppo di applicativi ad alto livello (LabView, C#, VB.NET, DELPHI, ecc.), il CVI fornisce: (i) la possibilità di realizzare interfacce utente utilizzando un linguaggio di sviluppo che permette il controllo dell'hardware che si sta utilizzando senza strati software intermedi; (ii) la possibilità di gestire e implementare sistemi con la tecnologia del *multithreading*. Inoltre è basato su eventi, e quindi su *interrupt* software e hardware, s'interfaccia con schede di acquisizione dati con librerie già fornite, s'interfaccia con qualsiasi dispositivo esterno con le librerie *.lib* e *.dll* fornite dal produttore del dispositivo. Infine è dotato di un insieme di oggetti visuali e di oggetti specifici, quali ad esempio i grafici, che consentono lo sviluppo d'interfacce utente *user friendly*.
Data la complessità del sistema da monitorare e da controllare, l'intero software è stato progettato utilizzando la tecnica del *multithreading*. In particolare i *threads* che sono stati sviluppati si occupano (i) del controllo PID della forza da imporre; (ii) dell'acquisizione dei dati provenienti dal supervisore del sistema di controllo degli attuatori (ECU HIGH e ECU LOW) tramite un convertitore SPI-USB (Cheetah SPI Host Adapter della TotalPhase) operante alla frequenza di 2 MHz; (iii) dell'acquisizione dei dati analogici dei parametri meccanici e idraulici; (iv) del controllo e monitoraggio del regolatore di potenza sul bus DC; (v) dell'acquisizione dei dati dal Fluke Hydra; (vi) della comunicazione via RS232 con i DSPs presenti nel sistema di attuazione; (vii) della sincronizzazione dei dati raccolti dai singoli *threads*; (viii) del salvataggio dei dati; (ix) della visualizzazione dei dati sull'interfaccia utente; (x) della gestione della diagnostica del sistema; (xi) del controllo degli errori; (xii) del *main thread*.
I *threads* comunicano fra loro con un sistema di *Threads Save Queues*: code circolari di dati, protetti e gestiti dal sistema operativo, che consentono l'interscambio dei dati fra differenti *threads* eliminando il problema dei *locks* per l'accesso ai dati.

L'INTERFACCIA UTENTE

Il software per il monitoraggio/controllo del banco prova è stato suddiviso in due programmi: il primo configura i sistemi elettrico, elettronico e di controllo, mentre il secondo imposta i test da eseguire, controlla il valore della forza e memorizza i dati acquisiti.
Il primo programma fornisce una procedura guidata per l'accensione del banco prova. In particolare, le azioni da seguire saranno nell'ordine:
1. scelta del numero di azionamenti da utilizzare (1 o 2);
2. selezione del file di configurazione nel quale sono presenti sia i files che contengono le variabili dei DSPs sia le variabili che vengono inizializzate nella fase di configurazione iniziale;
3. accensione dell'alimentazione della logica del banco prova;
4. accensione della pompa del circuito idraulico;
5. accensione dell'alimentazione del quadro azionamento;
6. configurazione dei DSPs con il *download* dei parametri di configurazione iniziale. Il secondo programma è organizzato in *tabs*.

Ogni *tab* è organizzato in modo da consentire un corretto utilizzo all'utente finale. Nel *tab* principale (Fig. 5) l'operatore può impostare i parametri del profilo di posizione e di forza della movimentazione, salvare e visualizzare i dati, e visualizzare i *faults* che si possono presentare nei blocchi funzionali del sistema di test. I parametri del *target* di posizione e il profilo di forza da imporre al pistone idraulico possono essere salvati in file di configurazione, in modo da riutilizzare le impostazioni per diverse prove.
Gli altri *tabs* consentono di visualizzare e configurare gli andamenti degli attuatori provenienti dal SPI in differenti grafici; avere informazioni sugli andamenti meccanici (posizione-

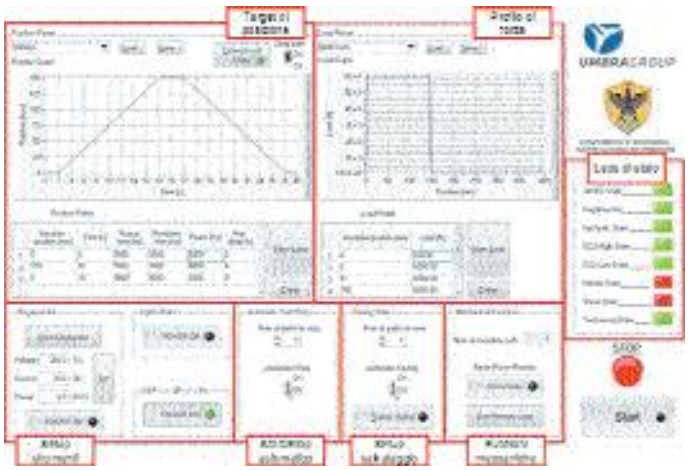


Figura 5 – *Screenshot* del software di monitoraggio

carico e posizione-velocità), elettrici (tensione e corrente fornite dall'alimentatore DC) e idraulici (andamento dei carichi e dei sensori di pressione); avere informazioni sulle temperature (dal Hydra Fluke) e infine i *faults* generati da ogni singolo elemento del sistema sia esso elettrico/elettronico/meccanico, sia idraulico.
Ogni volta che si presenta un errore, il LED di stato generale del sistema che lo ha generato si accende in modo da non perdere mai di vista il sistema nella sua totalità.
I dati acquisiti durante il test sono stati salvati in un file binario nel formato standard della National Instruments TDMS. A titolo di esempio, nella parte superiore di Fig. 6 sono riportati gli andamenti del profilo di posizione dei due attuatori (curve in grigio e rosso), e delle correnti degli attuatori Master e Slave (verde e fucsia); tutti i dati sono espressi in "per unità". Il grafico inferiore mostra i valori acquisiti dalle celle di carico del *Master* e dello *Slave* (verde e blu), e l'andamento della cella di carico presente sul pistone in newton (rosso) durante un gradino di forza resistente.

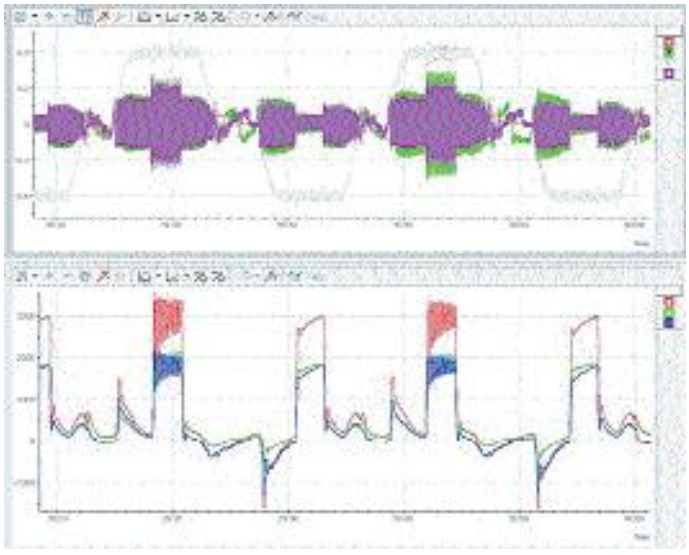


Figura 6 – Dati salvati dal software di misura.
Sopra: profilo di posizione e andamenti delle correnti sui singoli attuatori;
Sotto: andamento delle celle di carico

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. P.K.C. Rudolph, "*High-Lift Systems on Commercial Subsonic Airliners*", NASA, Ames Research Center, NASA contractor report, vol. 4746, 1996.
2. Villani M., Tursini M., Fabri G., Castellini L., "*High Reliability Permanent Magnet Brushless Motor Drive for Aircraft Application*", IEEE Transaction. on Ind. El., vol. 59, pp. 2073-2081, 2012.
3. J.W. Bennett, B.C. Mecrow, A.G. Jack, D.J. Atkinson, "*A Prototype Electrical Actuator for Aircraft Flaps*", IEEE Trans. On Ind. App., Vol. 46, No. 3, 2010.
4. M. Christmann, S. Seemann, P. Jänker "*Innovative Approaches To Electromechanical Flight Control Actuators And Systems*" Int. Conf. on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components, France, 2010.

Edoardo Fiorucci è Professore Aggregato di Misure Elettriche ed Elettroniche presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale, dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila. Si occupa di strumentazione basata su PC, di sistemi di misura per la valutazione della qualità dell'alimentazione elettrica, di sistemi per il test e il collaudo automatico di macchine elettriche, di sensori *smart* per applicazioni di misura distribuita.

Giovanni Bucci è Professore Ordinario di Misure Elettriche ed Elettroniche presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale, dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila. Si occupa di strumentazione basata su PC, misure di potenza in regime deformato, sistemi di misura per la valutazione della qualità dell'alimentazione elettrica, sistemi di misura multiprocessore, algoritmi digitali per strumentazione di misura in *Real-Time*.

Fabrizio Ciancetta è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale, dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila. Si occupa di strumentazione basata su PC, di sensori *smart* per applicazioni di misura distribuita, di sistemi di misura per la valutazione della qualità dell'alimentazione elettrica, di algoritmi digitali per strumentazione di misura in *Real-Time*.