

Veicoli a trazione ibrida: modellistica dinamica e controllo

1. La tecnica modellistica POG

Nei veicoli ibridi si combinano ambiti energetici diversi: meccanico, elettrico, idraulico. A questa natura multidisciplinare del problema di modellazione si accompagna una complessità molto elevata dovuta al fatto che i vari sottosistemi interagiscono tra loro, coinvolgono vari ambiti energetici e richiedono tecniche di controllo avanzate per ottimizzarne l'interazione. Per gestire al meglio la complessità del sistema è necessario avere competenze multidisciplinari e adottare tecniche modellistiche che consentano di gestire in modo preciso ed efficace anche sistemi dinamici molto complessi.

A tal proposito presso il laboratorio AUTOLAB-ELECOM del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione di Modena è stata sviluppata una nuova tecnica modellistica denominata Power-Oriented Graphs (POG) che utilizza il concetto di “potenza” come elemento chiave per ottenere in modo semplice e diretto il modello dinamico di sistemi fisici anche complessi.

La tecnica modellistica POG ha comunque un carattere trasversale che per la sua semplicità e chiarezza la rende utile non solo in ambito automotive, ma anche per la modellistica e il controllo di tutti i sistemi fisici che tipicamente si incontrano in ambito industriale: sistemi elettromeccanici, controllo di motori elettrici, sistemi idraulici, sistemi robotici, conversioni elettronici di potenza, sistemi complessi di natura ibrida, ecc.

Si tratta di una tecnica di tipo grafico che utilizza normali schemi a blocchi per descrivere le equazioni dinamiche del sistema e per mettere in evidenza i flussi di potenza che scorrono all'interno del sistema. Gli schemi POG sono composti essenzialmente dai due blocchi elementari (a) e (b) illustrati in Fig. 1:

- a) “blocco di elaborazione”: viene utilizzato per descrivere tutti gli elementi fisici che accumulano o dissipano energia (masse, molle e smorzatori in ambito meccanico; capacità, induttanze e resistenze in ambito elettrico, ecc.);
- b) “blocco di connessione”: serve per convertire o ridistribuire la potenza all'interno dei vari ambiti energetici e viene utilizzato per descrivere tutti gli elementi fisici che non accumulano né dissipano energia (leve, riduttori meccanici, trasformatori elettrici, ecc).

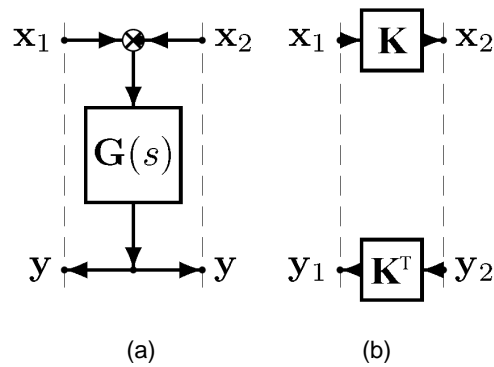


Figura 1- Blocchi POG: a) blocco di elaborazione, b) blocco di connessione

Le linee tratteggiate che delimitano i blocchi POG in Fig. 1 hanno il significato di tenere accoppiate le variabili x e y il cui prodotto rappresenta un flusso di potenza che attraversa una reale sezione fisica del sistema. Come esempio di modellistica POG si consideri il sistema elettroidraulico mostrato in Fig. 2 composto da un motore elettrico in corrente continua collegato rigidamente ad una pompa ad ingranaggi e ad un accumulatore idraulico. Questo sistema coinvolge tre ambiti energetici diversi (elettrico, meccanico e idraulico) e interagisce con il mondo esterno tramite le due sezioni di potenza indicate con i numeri 1 e 9 in Fig. 2. La sezione 1 è caratterizzata da una potenza elettrica $V_a I_a$ che entra nel sistema, mentre la sezione 9 è attraversata da un flusso di potenza idraulica $P_0 Q_0$ che esce dal sistema.

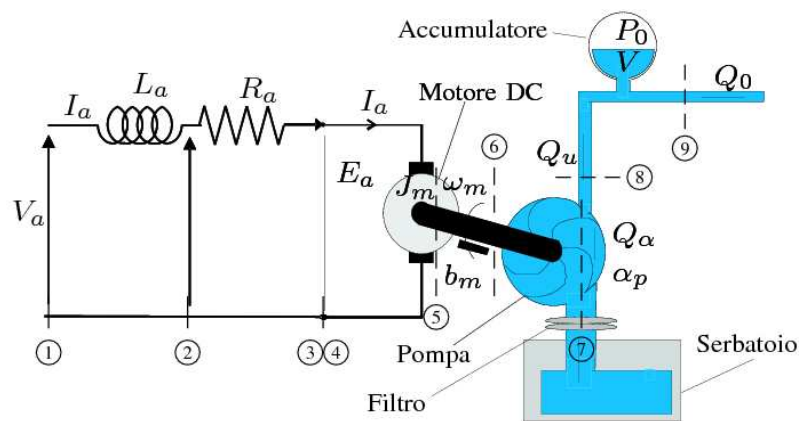


Figura 2 - Motore elettrico in CC collegato ad una pompa idraulica ad ingranaggi.

Il modello dinamico POG di questo sistema elettroidraulico è mostrato in Fig. 3. Si noti la perfetta corrispondenza tra le sezioni tratteggiate dello schema POG, numerate da 1 a 9, e le sezioni fisiche evidenziate all'interno del sistema elettroidraulico. Ognuna di queste sezioni è attraversata da un flusso di potenza che è dato dal prodotto delle due variabili fisiche che caratterizzano quella particolare sezione. Ogni elemento fisico è chiaramente delimitato, a monte e a valle, da due sezioni di potenza e ad esso corrisponde una parte ben precisa dello schema a blocchi POG. I blocchi di connessione presenti all'interno dello schema POG di Fig. 3 tra le sezioni 3-4 e le sezioni 6-7 rappresentano, rispettivamente, la conversione di potenza elettrica in potenza meccanica e la conversione di potenza meccanica in potenza idraulica. Tali conversioni di potenza avvengono senza accumulare né dissipare energia.

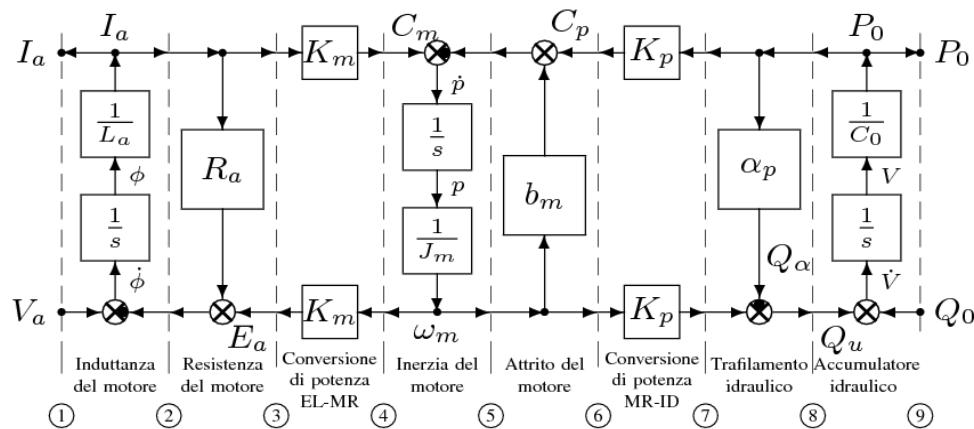


Figura 3 - Modellistica POG del motore elettrico collegato alla pompa idraulica .

Risulta chiaro che lo schema a blocchi POG di Fig. 3 è una descrizione grafica completa del modello dinamico del sistema elettroidraulico preso in considerazione. Un ulteriore vantaggio degli schemi a blocchi POG è dato dal fatto che essi possono essere direttamente utilizzati all'interno dei più diffusi strumenti di simulazione e pacchetti software CACSD (Computer Aided Control System Design) come ad esempio Simulink in ambiente Matlab. Questa possibilità è molto importante da un punto di vista pratico perché permette di progettare e verificare in ambito simulativo l'efficacia di nuove tecniche di controllo dei sistemi fisici in oggetto (anche non lineari) prima di passare alla reale implementazione degli stessi. Dal punto di vista della simulazione e del controllo, occorre inoltre sottolineare che dallo schema a blocchi POG è anche possibile ricavare "in modo automatico" la rappresentazione dinamica del sistema nello spazio degli stati, si veda la Fig.4.

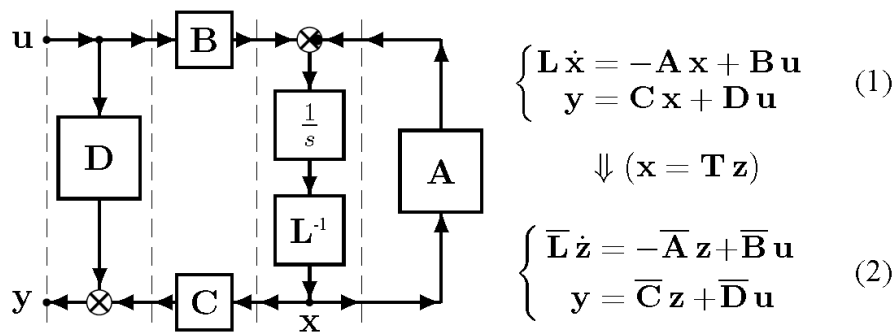


Figura 4 - Schema POG di un generico sistema dinamico e relativo modello nello spazio degli stati.

Sono state inoltre sviluppate tecniche di riduzione degli schemi a blocchi POG (utilizzando trasformazioni di congruenza $\mathbf{x} = \mathbf{T}\mathbf{z}$ nello spazio degli stati come mostrato in Fig. 4) che consentono di ricavare in modo automatico anche i modelli dinamici di ordine ridotto che si ottengono eliminando dal sistema gli elementi fisici meno importanti e più trascurabili. Queste tecniche di riduzione consentono di ottenere tipologie differenziate di modelli dinamici utili a seconda degli scopi: da un lato modelli con un elevato grado di dettaglio capaci di descrivere in modo preciso tutti i fenomeni fisici che caratterizzano il sistema e che possono essere utili nelle fasi di analisi e di ottimizzazione, e dall'altro modelli sufficientemente semplici da poter essere utilizzati per la sintesi del regolatore o per la simulazione in tempo reale del sistema stesso.

2. Modellistica e controllo di un veicolo a trazione ibrida

La tecnica modellistica POG è stata applicata ad una struttura di propulsione ibrida di tipo “Power-split” (Fig. 5). La struttura è composta da un motore a combustione interna (ICE), un motore elettrico polifase sincrono a magneti permanenti (PMSM), dalla dinamica tridimensionale del corpo macchina e un rotismo epicicloidale che funge da elemento elastico che ridistribuisce la potenza tra i vari sottosistemi. L’elemento epicicloidale è costituito essenzialmente da tre parti: la parte centrale Sun (S), i rotismi interni Carrier (C) e l’anello esterno Ring (R). La connessione tra i vari sottosistemi è la seguente: l’ICE è rigidamente connesso al Carrier, il PMSM è rigidamente connesso al Sun e l’assale anteriore dell’auto è rigidamente connesso al Ring.

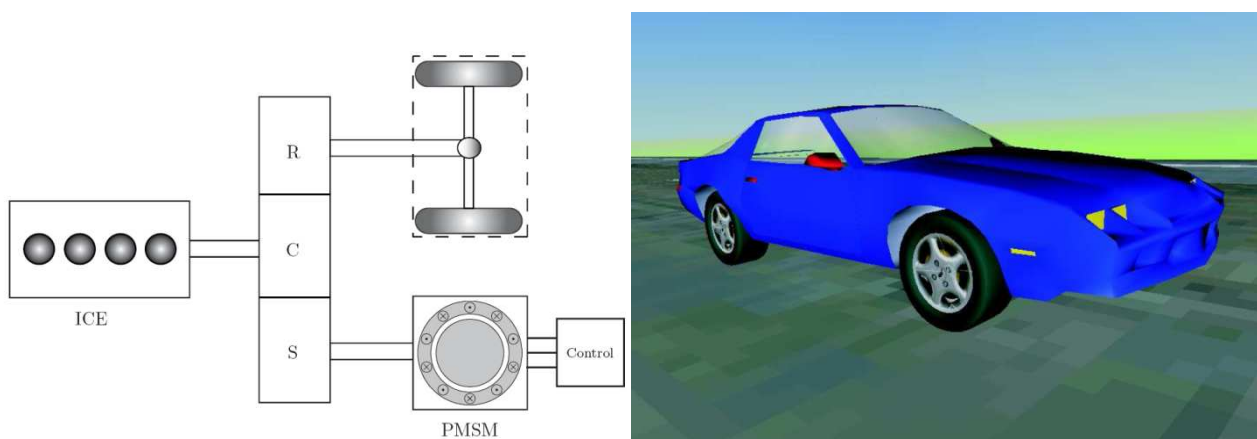


Figura 5 - Architettura Power-split del veicolo a trazione ibrida e immagine dell’auto nella Realtà Virtuale.

Ciascuno dei sottosistemi considerati è stato modellato con la tecnica POG e ogni schema POG è stato implementato “direttamente” in ambiente Simulink. Sono state inoltre create in Simulink delle librerie di superblocchi per i motori elettrici polifase, l’epicicloidale (con la possibilità di scegliere modelli completi o ridotti), la dinamica semplificata del veicolo (moto del veicolo nell’ambiente e interazione pneumatici-strada) e il motore a combustione interna. Ogni superblocco è mascherato e ha un’interfaccia grafica attraverso la quale l’utente può inserire i parametri del modello. Lo schema Simulink del sistema completo, ottenuto componendo opportunamente i sottosistemi, è riportato in Fig.6, mentre in Fig.7 è mostrato lo schema POG del solo motore elettrico polifase.

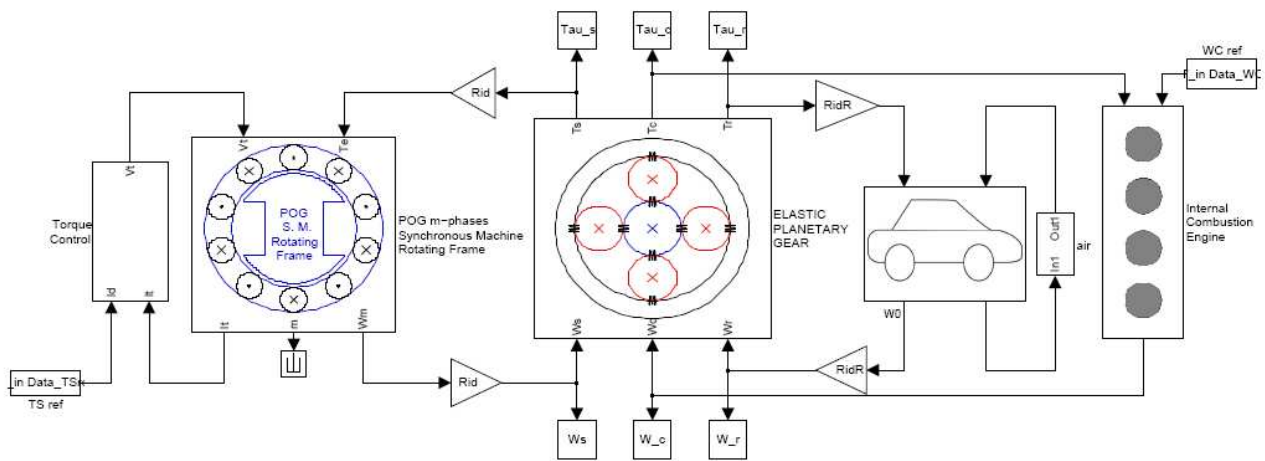


Figura 6 - Schema Simulink del veicolo a trazione ibrida.

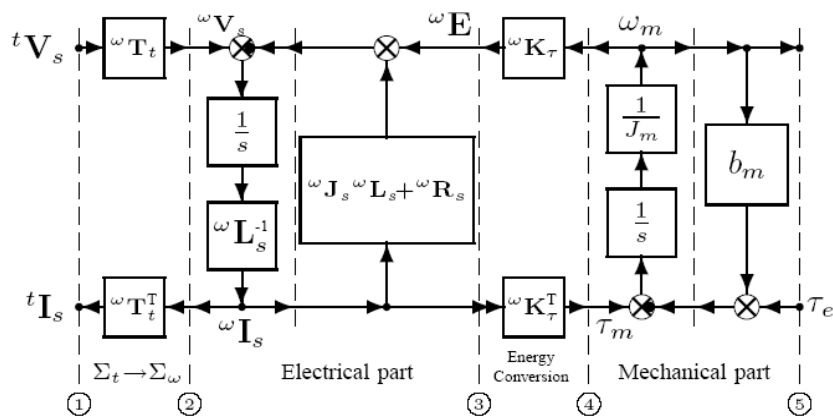


Figura 7 - Schema POG dettagliato di un motore elettrico polifase a magneti permanenti.

Utilizzando la tecnica modellistica POG è stato possibile analizzare in dettaglio il comportamento dinamico dei principali sottosistemi di un veicolo a trazione ibrida e ottenere un modello simulativo preciso, chiaro e affidabile dell'intero sistema ibrido.

La scelta di utilizzare un motore "polifase" sincrono al posto di un normale motore "trifase" è stata fatta per migliorare la sicurezza e la flessibilità di controllo dell'intero sistema. Infatti il motore polifase è in grado di fornire coppia anche nella situazione critica di rottura di una fase (o di più fasi) del motore elettrico e permette inoltre maggiori gradi di libertà nella generazione di coppia sia alla basse che alle alte velocità di rotazione.

Questo modello è stato il punto di partenza per progettare nuove strategie di controllo per i diversi modi di funzionamento del veicolo ibrido (tra cui avviamento, start e stop, trazione ibrida,

ricarica batterie, frenata rigenerativa), ma anche per ottimizzare la cooperazione tra i vari sottosistemi al fine di migliorare le prestazioni, la sicurezza e il comfort del veicolo.

Questa tecnica modellistica POG è stata utilizzata con successo per modellare e simulare tutte le attività di ricerca sviluppate negli ultimi anni presso il laboratorio AUTOLAB-ELECOM del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione di Modena. Un elenco della attività di ricerca svolte è disponibile in rete all'indirizzo <http://lipari.ing.unimo.it/zanasi/ELECOM/AUTOLAB.htm>.

I modelli dinamici POG di un veicolo a propulsione ibrida che sono brevemente descritti in questa presentazione sono stati in gran parte ottenuti dall'Unità Operativa DII di Modena nell'ambito del progetto regionale AER-TECH.