

## CONTROLLO DEI VEICOLI IBRIDI CON LOGICA FUZZY

Francesco Giuffrè  
STMicroelectronics

*La logica Fuzzy (o logica sfumata) consente di realizzare sistemi di controllo flessibili e potenti utilizzando formulazioni di regole vicine al linguaggio umano, molto efficaci per stabilire le condizioni di funzionamento ottimali in qualsiasi situazione operativa, anche per sistemi complessi*

Le ricerche nel campo automotive cercano oggi di raggiungere l'ambizioso obiettivo di diminuire le emissioni inquinanti prodotte dai veicoli, abbattendo di pari passo anche i consumi di carburante. Una grande promessa a questo proposito è costituita dai veicoli elettrici ibridi (Hybrid Electric Vehicles, HEV). I sistemi di propulsione di tali veicoli comprendono spesso componenti con caratteristiche dinamiche particolarmente complesse e non lineari, per i quali si rende necessario implementare un'architettura di controllo altrettanto potente e sofisticata. Tale sistema di controllo dovrà, infatti, sovrintendere alla gestione delle differenti forme di energia presenti (chimica, meccanica, elettrica), del loro immagazzinamento e alla loro conversione tra una forma e l'altra.

La metodologia di controllo presentata di seguito indica quali sono i passi principali da seguire per implementare un sistema di controllo "model based" per i sistemi ibridi.

Negli ultimi anni, i due problemi planetari del graduale esaurimento delle risorse di petrolio e del progressivo aumento del livello d'inquinamento globale sono divenuti sempre più minacciosi. Perciò,

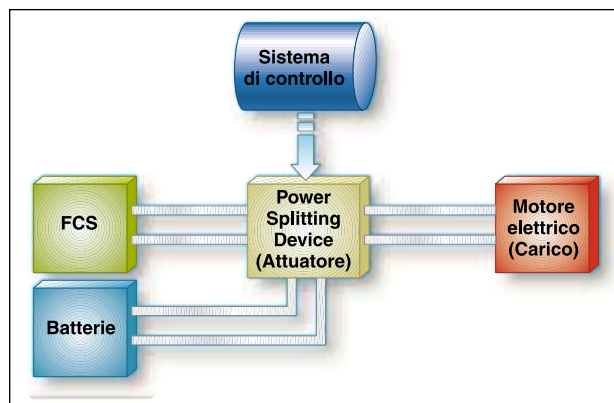


Fig. 1 - Schema di massima di un sistema di propulsione ibrido parallelo

di pari passo è cresciuta la richiesta di sviluppare soluzioni alternative ai tradizionali sistemi di propulsione esistenti, quali i motori a combustione interna (Internal Combustion Engine, ICE). Una soluzione potrebbe essere costituita dai

motori elettrici (Electric Motor, EM) alimentati da una consistente dotazione di batterie, ma ci sono ancora notevoli ostacoli pratici a quest'approccio quali un difficile compromesso tra autonomia energetica, ingombro e peso delle batterie e,

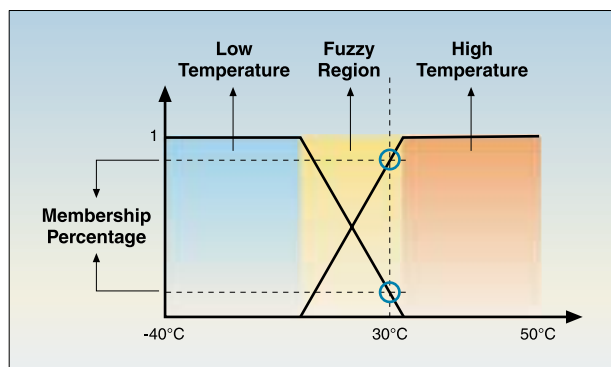
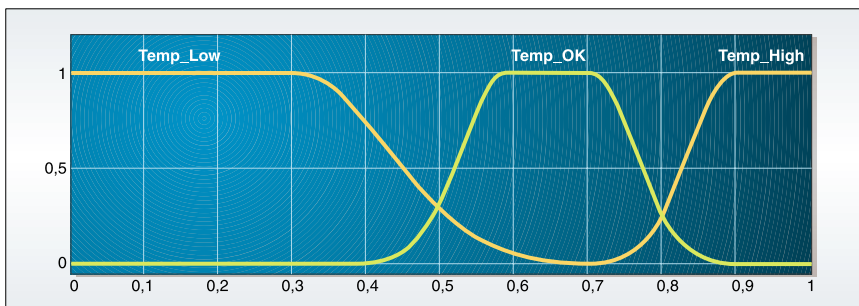


Fig. 2 - Classificazione di un parametro con logica fuzzy e booleana

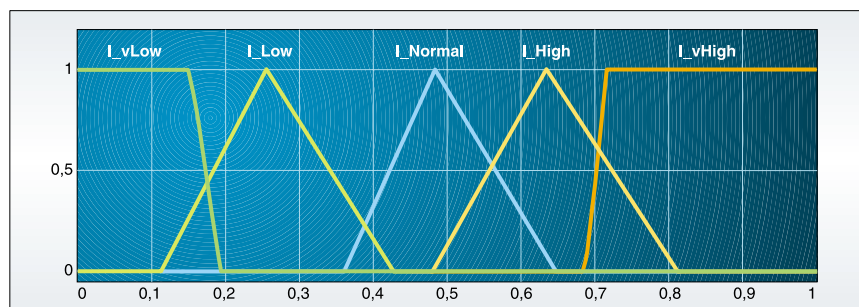


**Fig. 3 – Funzioni di appartenenza per la temperatura delle celle a combustibile e delle batterie**

in più, la lentezza del loro processo di ricarica. Più recentemente si sono evolute le soluzioni basate su celle a combustibile (Fuel Cells, FC), capaci di convertire chimicamente e senza inquinare, il combustibile (idrogeno, metanolo) ed ottenere energia sufficiente per alimentare un motore elettrico. Purtroppo, anche questi sistemi soffrono ancora di qualche problema tecnico, sebbene riservino sicuramente migliori prospettive di sviluppo nei prossimi anni.

Al momento, in pratica, solo i sistemi di propulsione ibridi possono essere considerati una soluzione ragionevole e tecnologicamente raggiungibile a breve/medio termine. Per definizione un veicolo ibrido (Hybrid Vehicle, HV), è tale se, innanzi tutto, utilizza più di un tipo di convertitore/sorgente di energia (batterie, celle a combustibile, super condensatori, volani) per alimentare uno o più motori elettrici. Attualmente si conoscono più tipi di sistemi ibridi, tra i più noti quello che accoppia una sorgente primaria (FC o ICE), per erogare il livello di energia medio richiesto, a un dispositivo di conservazione dell'energia, capace di rilasciarla velocemente quando richiesto, per fornire i picchi di potenza più elevati.

Nel confronto con i veicoli convenzionali (Conventional Vehicles, CV) i sistemi ibridi offrono molti vantaggi, soprattutto in merito alla possibilità di recuperare una parte dell'energia della frenata che altrimenti risulterebbe persa e, inoltre, perché riducono notevolmente le emissioni inquinanti prodotte dal veicolo. Purtroppo, hanno anche lo svantaggio di costare di più e, inoltre, almeno



**Fig. 4 – Funzioni di appartenenza per la corrente erogata dalle celle a combustibile e dalle batterie**

fino a oggi, hanno un'autonomia di guida un po' limitata.

Nel prosieguo si presenterà una metodologia di progetto per realizzare il sistema di controllo per una classe particolarmente interessante di veicoli elettrici ibridi, il cui sistema di propulsione, si basa su una pila di celle a combustibile (che coadiuvata da alcuni dispositivi ausiliari costituisce il Fuel Cell System o FCS) e una di batterie (Battery Stack).

### Architettura di sistema proposta

Un tradizionale sistema di controllo della propulsione gestisce il motore a combustione interna in modo tale da assicurare la fornitura di potenza necessaria al veicolo, in accordo con i comandi impartiti dal guidatore. Nel contempo, il sistema si occupa anche delle procedure di diagnostica indispensabili per garantire la sicurezza operativa del motore. Il sistema di controllo di un HEV svolge esattamente lo stesso compito, ma in questo caso la presenza di due o più sorgenti di energia suggerisce l'utilizzo di un opportuno attuatore, detto Power Splitting Device, visibile nello schema di figura 1, per partizionare l'erogazione dell'energia richiesta, fra le sorgenti presenti, seguendo

criteri di ottimizzazione dell'efficienza energetica.

Ci soffermeremo adesso su alcuni aspetti particolari del sistema ibrido in considerazione, legati ai componenti e alla sicurezza in genere ma, prima ancora, si desiderano fornire alcuni concetti basilari riguardanti la logica fuzzy.

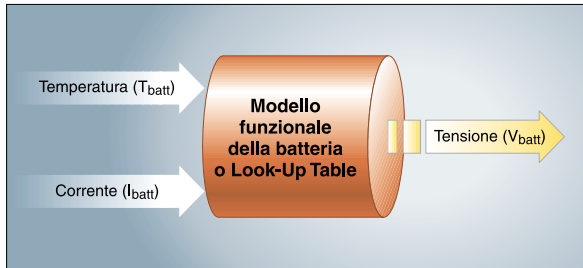
### Logica Fuzzy

La logica booleana opera esclusivamente con 2 classi, l'“1” e lo “0”, mutuamente esclusive, per cui, una qualunque asserzione può essere unicamente o “vera” o “falsa”.

Ovviamente lo stato dell'asserzione può variare, passando da “vera” a “falsa”, e viceversa, ma solo in modo repentino, con discontinuità.

La classificazione di una variabile secondo la teoria delle logiche sfumate prevede, invece, un approccio differente, più qualitativo che quantitativo, nel senso che tale tecnica, consente passaggi tra una classe e le adiacenti, non netti ma, appunto, sfumati, sicuramente in modo molto più simile al linguaggio umano.

Per chiarire questi concetti si riporta il seguente esempio: si supponga di voler valutare un parametro quale la temperatura ambiente, utilizzando entrambe le



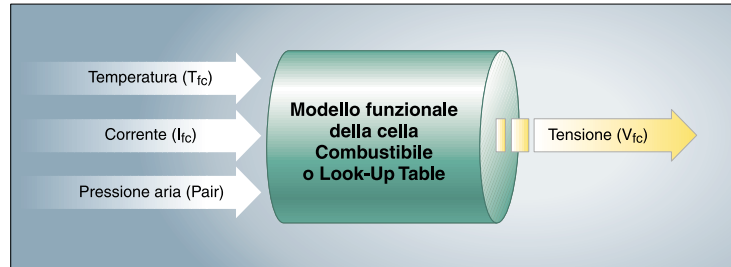
**Fig. 5 – Modello semplificato del sistema “batterie” (considerando la tensione come uscita)**

logiche. In entrambi i casi si considerano per semplicità due insiemi che verranno chiamati “bassa” e “alta”. Per la logica booleana, una volta definiti gli estremi dei due insiemi, un qualunque valore di temperatura può ricadere in uno solo di essi, passando eventualmente da un insieme all’altro in modo brusco. Questo implica che, se per esempio, si è scelto il valore di  $30^{\circ}\text{C}$  come

limite superiore della classe “bassa” e quindi anche come limite inferiore della classe “alta”, una temperatura di  $29,99^{\circ}\text{C}$  è considerata appunto “bassa”, mentre una di  $30,01^{\circ}\text{C}$  è classificata come “alta”. Tale procedimento come è facile verificare è alquanto distante dal senso comune che praticamente considera praticamente uguali i due valori di temperatura.

Per la logica fuzzy la stessa temperatura può appartenere alle singole classi in modo esclusivo ma anche contemporaneamente, ed il passaggio tra una classe e l’adiacente è appunto sfumato, nel senso che partendo per esempio da una temperatura classificata come “bassa” (con percentuale di appartenenza quindi uguale al 100%) e procedendo nel verso delle temperature crescenti, si passerà da un intervallo in cui lo specifico valore di temperatura sarà contemporaneamente “bassa” e “alta”, con rispettive percentuali di appartenenza. All’aumentare ancora della temperatura la percentuale di appartenenza alla classe “bassa” sarà sempre meno, mentre quella della classe “alta” sarà sempre più alta, fino a essere esclusivamente

“alta” (con percentuale di appartenenza uguale al 100%). Per maggiore chiarezza ci si può riferire alla figura 2, dove sull’asse X c’è l’intero intervallo dei valori significativi, noto come “Universo del Discorso” o, più accademicamente, come “spazio dei segnali”, che possono essere assunti dal parametro, mentre, sull’asse Y è indicato il grado di appartenenza dello stesso parametro a una specifica condizione. Dunque, con riferimento alle funzioni di appartenenza fuzzy scelte, una temperatura di 10°C appartiene esclusivamente alla classe “bassa” e una di 30°C alle classi “bassa” e “alta” contemporaneamente, con due



**Fig. 6 – Modello semplificato del sistema “celle a combustibile” (considerando la tensione come uscita)**

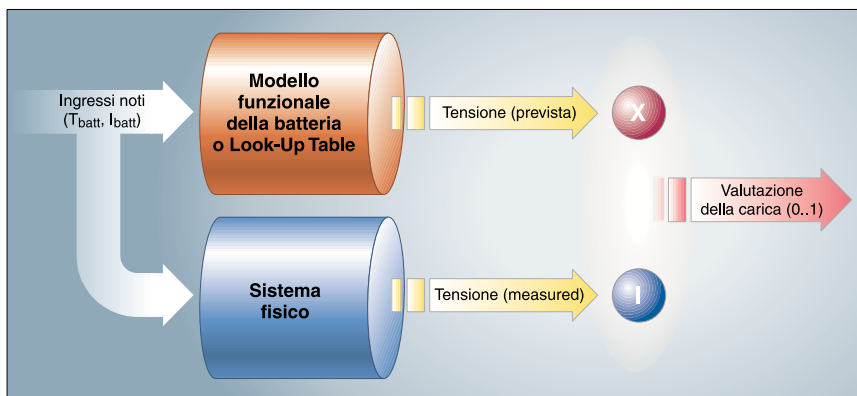
diverse percentuali di appartenenza. Tali percentuali sono date dalle intersezioni delle rispettive funzioni d’appartenenza con la perpendicolare all’asse X corrispondente alla temperatura di 30°C, in altre parole, i valori che si leggono nelle rispettive due intersezioni rappresentano il “grado di verità” delle asserzioni “la temperatura di 30°C è bassa” e “la tem-

peratura di 30°C è alta”. Nella trattazione che seguirà l’universo del discorso sarà sempre normalizzato tra 0 e 1.

peratura di 30°C è alta”. Nella trattazione che seguirà l’universo del discorso sarà sempre normalizzato tra 0 e 1.

### **Sicurezza generale e sistemi diagnostici**

I veicoli HEV possiedono alcune caratteristiche potenzialmente pericolose per l’uomo, prevalentemente costituite dagli



**Fig. 7 – Schema per la valutazione dello stato di carica delle batterie in funzione della loro tensione d'uscita**

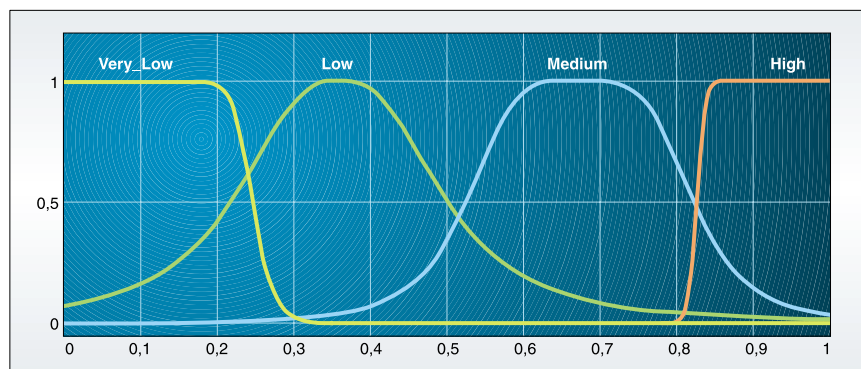
**Fig. 8 – Funzioni di appartenenza per la valutazione dello stato di carica della batteria**

elevati voltaggi necessari per alimentare il motore elettrico e dalla presenza dell'idrogeno come combustibile. È chiaro che, in caso d'incidente, l'eventualità d'insorgenza di forti correnti elettriche o di fuoriuscita di gas impone che opportune procedure di protezione debbano prontamente avviarsi. Dunque, è indispensabile che vi sia una corretta gestione delle informazioni diagnostiche, come il valore istantaneo di parametri particolarmente significativi (concentrazione di  $H_2$ , tensioni e correnti elettriche, temperature, e così via).

Nel prosieguo, per la valutazione del funzionamento delle FC e delle batterie, saranno presi in considerazione come parametri solo le loro temperature e le correnti erogate, indicate rispettivamente  $T_{fc}$ ,  $I_{fc}$ ,  $T_{batt}$  e  $I_{batt}$ . In genere tali parametri sono descritti da funzioni di appartenenza fuzzy, differenti tra loro. Nel caso specifico, senza ledere la generalità della trattazione si possono considerare  $T_{fc}$  e  $T_{batt}$  descritti dalle stesse funzioni di appartenenza e così pure  $I_{fc}$  e  $I_{batt}$ . Tali funzioni sono illustrate nei grafici delle figure 3 e 4.

### Valutazione dello stato di salute e dello stato di carica

Per il sistema di controllo considerato nella descrizione è indispensabile valutare in tempo reale sia lo stato di salute (State of Health, SOH) della pila di FC, sia lo stato di carica (State of Charge,

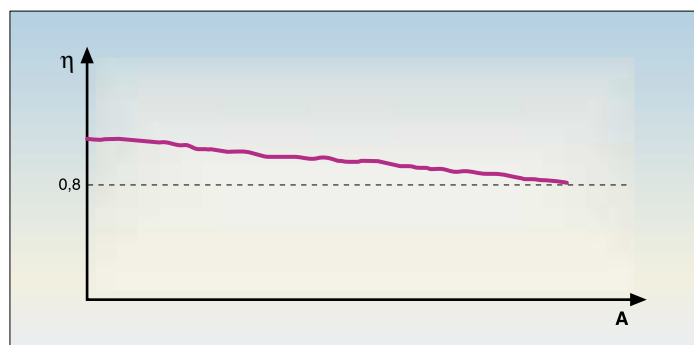


SOC) delle batterie. Sfortunatamente questi parametri non sono direttamente misurabili, ma, in opportune condizioni, è possibile effettuarne una valutazione considerando parametri correlati più facilmente e accuratamente misurabili. Per far ciò occorre, innanzi tutto, realizzare un modello funzionale del sistema, considerando come uscite proprio i parametri correlati. Un modello semplificato del sistema costituito dalle batterie è quello schematizzato nella figura 5, mentre per le celle combustibile si può fare riferimento alla figura 6.

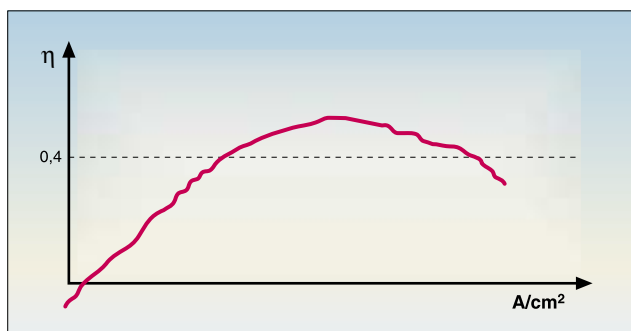
A questo punto, dal confronto tra l'uscita

ta attesa del modello così costituito, con i valori reali letti, a parità di ingressi, si può dare una valutazione della grandezza d'interesse (nel caso specifico SOC e SOH). La figura 7 fornisce uno schema di massima per la valutazione del SOC delle batterie, il tutto si può ugualmente riportare anche alle celle a combustibile per la valutazione del SOH.

Alla fine, per descrivere l'uscita, utilizzando la logica fuzzy, in entrambi i casi (valutazione del SOC delle batterie o del SOH delle celle a combustibile), ci si può riferire alle funzioni d'appartenenza riportate in figura 8.



**Fig. 9 – Curva di efficienza delle batterie in funzione della corrente d'uscita, per un valore prefissato di stato di carica e di temperatura**



**Fig. 10 – Curva di efficienza netta delle celle a combustibile in funzione della corrente d'uscita**

### Efficienza dei componenti e loro descrizione Fuzzy

La curva di efficienza di ciascuna sorgente può essere caratterizzata “off-line” e riassunta in forma grafica, o matematica, come illustrato nelle figure 9 e 10. Per i propositi di quest’analisi, è necessario implementare due modelli, uno per le batterie e uno per la pila di celle a combustibile, in modo tale da riprodurre la relazione funzionale fra l’efficienza di ciascuna sorgente e i rispettivi ingressi, opportunamente scelti.

Le figure 11 e 12 mostrano i modelli semplificati per le batterie e per le celle a combustibile. La valutazione dell’efficienza, in entrambi i casi, viene effettuata con la logica fuzzy. In figura 13 sono infatti graficate le funzioni d’appartenenza di tale parametro, scelte uguali per le due sorgenti. Da tale elaborazione si ottengono quindi le variabili  $E_{batt}$  e  $E_{fc}$ .

nea di potenza, possono per esempio essere classificate come “basso carico”, Low, “medio carico”, Medium, “alto carico”, High e “frenata rigenerativa”, Regenerative Braking. Inoltre, dall’analisi dinamica della richiesta di potenza possono definirsi delle condizioni di guida (Cycle) che nell’esempio sono indicate come Urban, “in città”, Mixed, “misto” e Highway, “autostrada”.

I parametri Drive\_Load e Cycle sono così descritti e valutati in forma linguistica.

### Definizione dell’algoritmo di controllo

Alcune strategie di controllo tradizionali per veicoli ibridi a celle a combustibile si basano sulla rilevazione della domanda di potenza e sfruttano la logica booleana per tenere conto di alcuni parametri operativi, tutti definiti unicamente con valori di soglia prefissati e

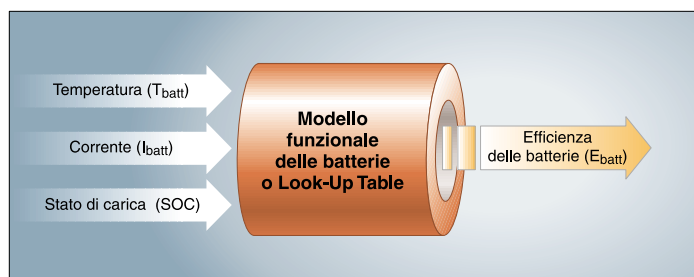
alquanto rigidi. Un’azione tipicamente effettuata da alcuni di tali controlli è molto semplicemente quella di commutare sull’alimentazione a celle a combustibile ogni qual volta la carica (SOC) delle batterie scende sotto un certo valore e ricommutare all’alimentazione a batterie non appena queste tornano in carica (generalmente questa strategia di controllo è chiamata come Charge Depletion Control Strategy).

Un’altra strategia tipicamente utilizzata, consiste nel commutare fra due sorgenti di energia in forma statica, ovvero facendo per esempio in modo che sotto una prima soglia di potenza possano lavorare solamente le batterie (mentre il FCS rimane spento), fra la prima e una seconda soglia di potenza richiesta le batterie si spengono mentre lavora solamente il FCS e, infine, sopra la seconda soglia entrambe le sorgenti sono al lavoro. Il grafico riportato in figura 16 illustra la sequenza di attivazione delle sorgenti al crescere della domanda istantanea di potenza, con quest’ultimo tipo di controllo.

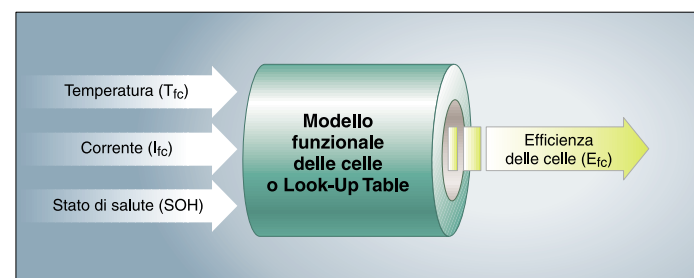
La strategia proposta, basata sulla logica sfumata, tiene conto, invece, oltre che della domanda di potenza, anche di altre

### Analisi delle condizioni statiche e dinamiche di guida

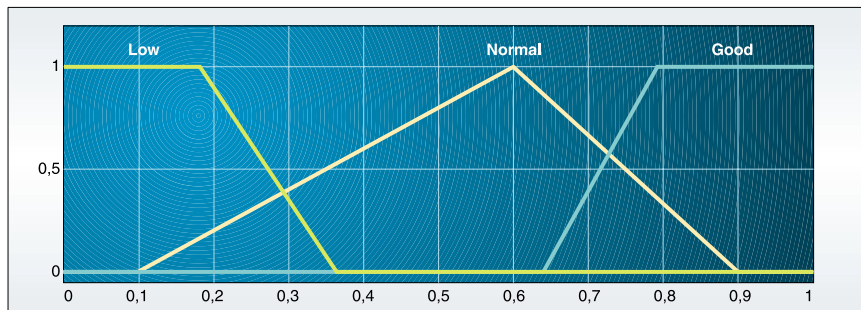
La caratterizzazione “off-line” dei veicoli elettrici ibridi, in termini di domanda di potenza istantanea e dinamica, dev’essere basata su tutte le possibili condizioni operative del veicolo in modo da poter classificare le modalità di funzionamento in categorie ben determinate (Figg. 14 e 15). Le condizioni di guida (Drive\_Load), considerando solo la domanda istanta-



**Fig. 11 – Modello semplificato del sistema “batterie” (considerando l’efficienza della batteria come uscita)**



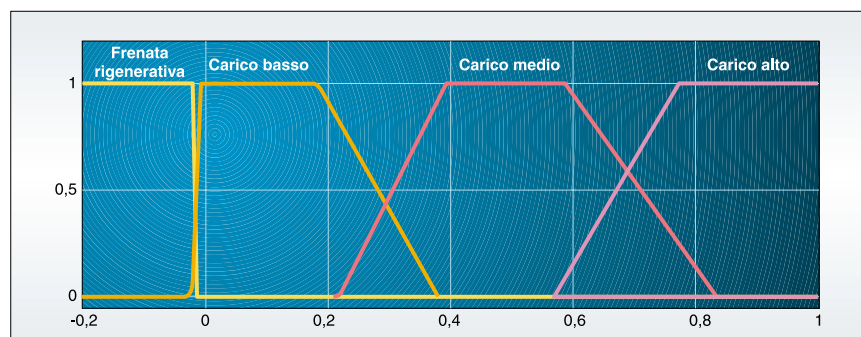
**Fig. 12 – Modello semplificato del sistema “celle a combustibile” (considerando l’efficienza della cella come uscita)**



**Fig. 13 – Funzioni di appartenenza dell'efficienza delle celle a combustibile e delle batterie (Efc e Ebatt)**

informazioni derivanti dall'analisi diagnostica in tempo reale, dalla valutazione sia dello "stato di salute" (SOH) delle celle a combustibile sia dello stato di carica SOC della batteria e, inoltre, anche dall'analisi dei comandi del guidatore e dall'efficienza delle sorgenti nel punto di lavoro. Tenendo conto di queste informazioni supplementari è evidente che si può implementare un sistema di controllo ben più sofisticato e capace di: attivare la procedura più adatta a rispondere al superamento di uno qualsiasi dei diversi parametri dei valori di allerta; fare in modo di mantenere sempre in un intervallo di sicurezza i valori dei parametri SOH e SOC; modulare le diverse soglie d'intervento delle sorgenti in modo tale da ottimizzare il loro utilizzo sia in termini di efficienza energetica, sia nei riguardi della salvaguardia dell'integrità delle componenti vitali del veicolo.

Considerando tutto ciò la rappresentazione iniziale del sistema illustrata nella figura 1 diventa quella nuova riportata



**Fig. 14 – Funzioni di appartenenza per il carico (Drive Load)**

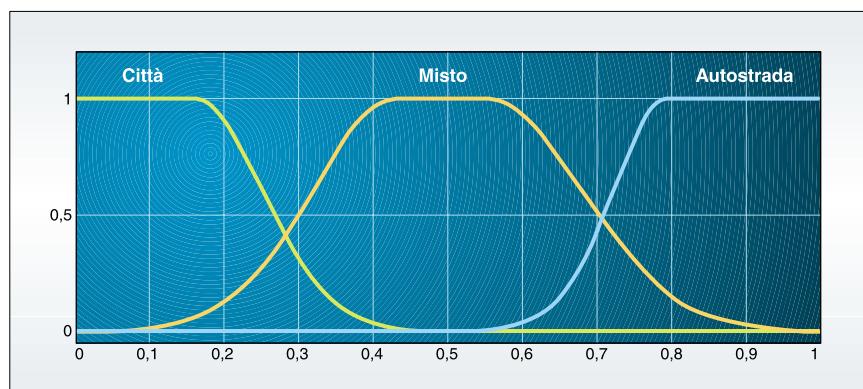
nella figura 17, dove sono evidenziati anche i trasduttori necessari per ottenere le informazioni richieste.

### L'algoritmo di controllo centrale

Tutte le considerazioni finora effettuate consentono di realizzare l'architettura di controllo schematizzata nella figura 18 e capace di gestire il sistema veicolo nella sua complessità. Come segnali di controllo sono ora disponibili molti parametri quali, i segnali diagnostici, la temperatura delle celle a combustibile (Tfc), la temperatura delle batterie

(Tbatt), lo "stato di salute" SOH delle celle a combustibile, la carica SOC delle batterie, l'efficienza delle celle (Efc), l'efficienza delle batterie (Ebatt), le condizioni di guida con riferimento alla potenza istantanea richiesta (Drive Load) e condizioni di guida con riferimento alla potenza media richiesta (Cycle). Le uscite del controllo sono alla fine i seguenti: le procedure di sicurezza, che comprendono le operazioni ad elevata priorità per i parametri che superano, o stanno per superare, le soglie di sicurezza; il segnale di controllo per il dispositivo di partizionamento della potenza richiesta alle sorgenti, in funzione delle condizioni di guida e dei parametri di sistema.

A questo punto non resta che definire le regole linguistiche che permettono di raggiungere gli obiettivi prefissati e,



**Fig. 15 – Funzioni di appartenenza per le condizioni di guida (Cycle)**

dunque, a titolo di esempio, di seguito sono indicate alcune regole di azione in presenza di ben determinate condizioni:

- guasto critico (fuoriuscita di idrogeno, ...): spegnere il FCS e utilizzare le batterie per espletare le procedure d'emergenza;

- corto circuito o surriscaldamento di alcuni componenti: attivare le procedure diagnostiche del caso come accendere i ventilatori di raffreddamento o limitare la corrente erogata;

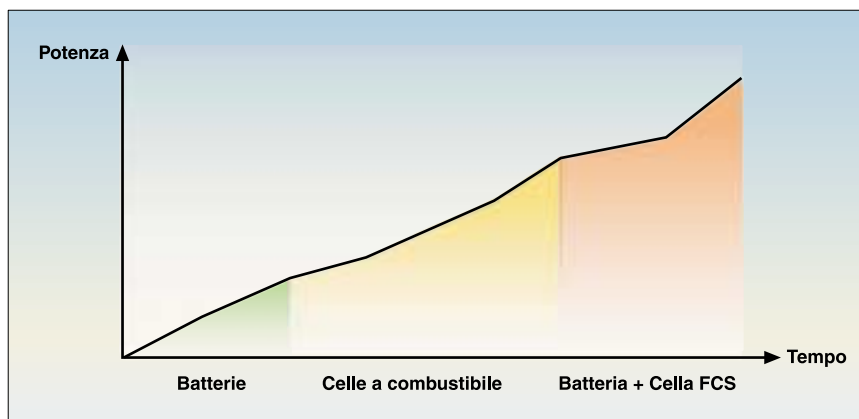
- bassa richiesta di potenza e batterie completamente cariche: spegnere il FCS e usare solo le batterie;

- bassa richiesta di potenza e batterie non abbastanza cariche: fare in modo che il FCS soddisfi la richiesta di potenza e possa anche fornire una corrente sufficiente a ricaricare le batterie;

- durante l'accensione: fintanto che il FC non raggiunge la temperatura operativa ottimale, la maggior parte dell'energia sia fornita dalla batteria e solo in minima parte dal FCS. Così facendo il FC non viene stressato a freddo ma nello stesso tempo si fa in modo che si scaldi fino a raggiungere progressivamente la temperatura ottimale;

- condizioni di guida a medio carico: il solo FCS fornisce energia, le batterie intervengono solo quando necessario (richiesta di picchi di potenza).

Certamente queste regole possono essere molto più numerose e complesse, con l'aggiunta di condizioni specifiche finalizzate a migliorare la sicurezza e/o l'efficienza energetica del veicolo. Tuttavia, la "qualità" dell'algoritmo finale, intesa come il minimo numero di regole capaci di far fronte ad ogni condizione, garantendo un'elevata efficienza globale del veicolo, è conseguenza diretta dell'esperienza dello sviluppatore. L'utilizzo di algoritmi genetici e/o neuronali hanno dato eccellenti risultati in proposito, mostrando di essere in grado di minimizzare notevolmente il numero delle regole di controllo e ottimizzare le funzioni di appartenenza per

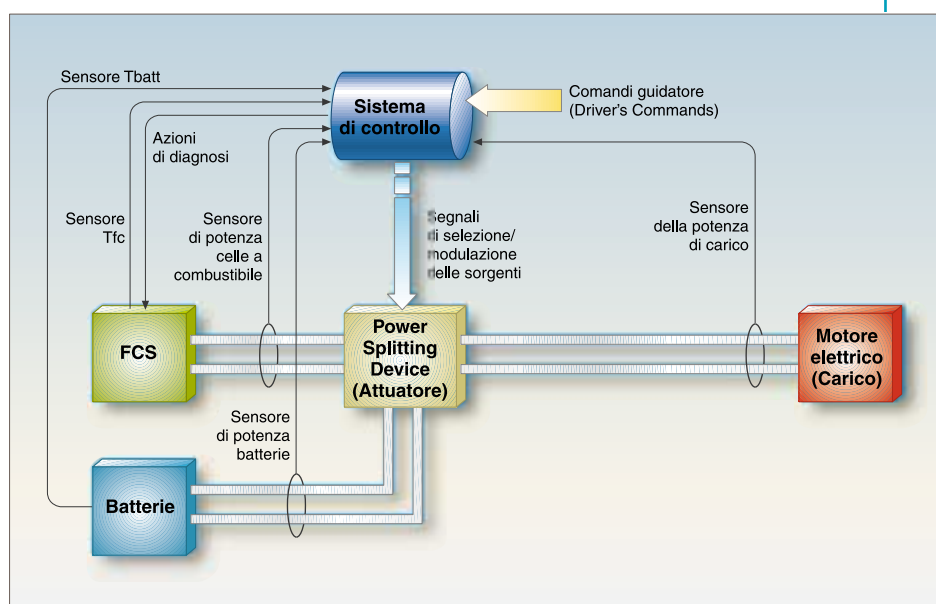


**Fig. 16 – Selezione della sorgente in funzione della potenza richiesta, effettuata con criterio booleano**

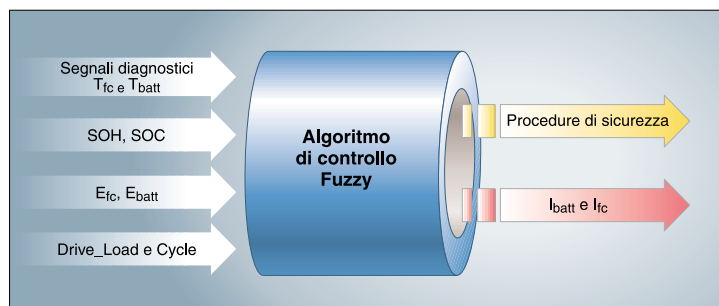
la definizione dei parametri. Partendo dalla descrizione linguistica, a questo punto, il passo successivo è di tradurre tali algoritmi in regole Fuzzy del tipo "if - then", nelle quali ciò che sta prima del "then" è la condizione "antecedente" e ciò che sta dopo il "then" è l'azione "conseguente". Si ricorda inoltre che, la natura stessa delle metodologie Fuzzy è tale che molte delle regole, anche apparentemente discordanti, possono essere vere o parzialmente vere, simultaneamente. Come esempio si riporta un sottoinsieme delle regole utilizzate per il caso trattato:

- if (Tfc is Low) and (SOC is High) and (Efc is Low) and (Drive\_Cond is Urban)

**Fig. 17 – Schema di massima del sistema di propulsione ibrido parallelo comprensivo di sensori/trasduttori**







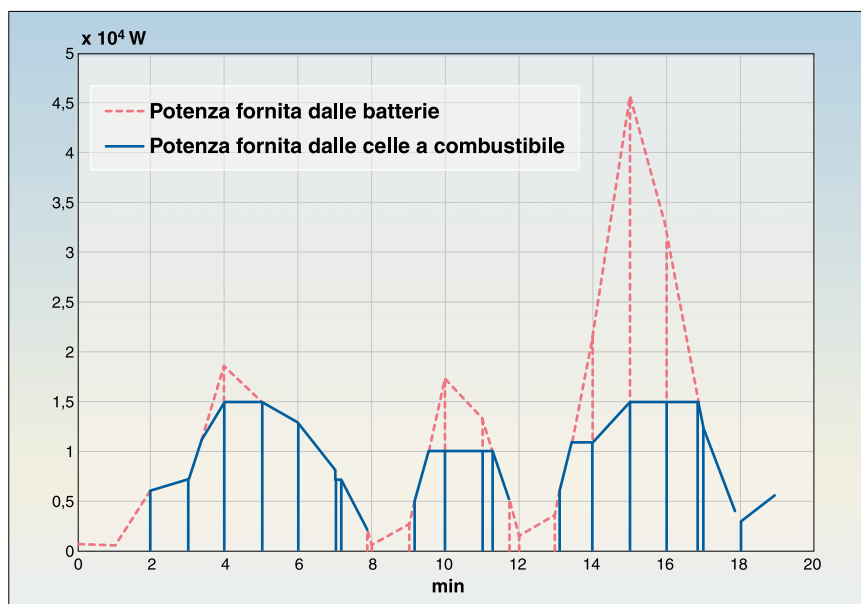
**Fig. 18 – Ingressi e uscite dell’algoritmo di controllo Fuzzy**

and (Drive\_Load is Low) then (Ifc is Low);  
 - if (Tfc is OK) and (SOC is VeryLow) and (Efc is Good) and (Drive\_Cond is Mixed) and (Drive\_Load is Medium) then (Ifc is High);  
 - if (Tfc is High) and (SOC is VeryHigh) and (Efc is Low) and (Drive\_Cond is Urban) and (Drive\_Load is Medium) then (Ifc is VeryLow);  
 - if (Tfc is High) and (SOC is Low) and (Efc is Good) and (Drive\_Cond is Urban) and (Drive\_Load is Low) then (Ifc is High);  
 - if (Tfc is OK) and (SOC is High) and (Efc is Good) and (Drive\_Cond is Highway) and (Drive\_Load is High) then (Ifc is VeryHigh).

Quest’ultima regola potrebbe essere tradotta in forma linguistica nel seguente modo: se la temperatura del FC è nella media, la carica delle batterie è buona, il punto di lavoro del FCS è ad alta efficienza, la guida è di tipo autostradale, con una velocità mediamente elevata, allora il FCS può erogare la sua massima corrente.  
 Le possibili condizioni operative del veicolo e delle sorgenti sono sicuramente più numerose delle condizioni elencate e, in molti casi, possono sussistere condizioni critiche che vanno gestite di volta in volta in modo specifico.

### Defuzzificazione e risultati finali

La fase nota come defuzzificazione serve a convertire le regole Fuzzy in valori d’uscita reali che nel caso specifico diventeranno comandi per l’attuatore, il Power Splitting Device.  
 Il sistema di controllo in questo caso quindi valuta tutti i parametri d’ingresso e decide di conseguenza come ripartire l’erogazione della potenza fra le due sorgenti disponibili, al fine di ottenere la



**Fig. 19 – Caratteristica della potenza erogata dalle due diverse sorgenti in funzione del tempo**

massima efficienza del veicolo. Il risultato della defuzzificazione è la concretizzazione dell’uscita Fuzzy VeryLow, Low, High e VeryHigh che, per la corrente erogata, hanno il chiaro significato di intensità molto bassa, bassa, alta e molto alta. In accordo a questi comandi, l’attuatore modulerà di conseguenza la potenza richiesta alle sorgenti.  
 La figura 19 mostra l’andamento nel tempo della domanda di potenza, lungo un percorso, la relativa corrente erogata dal FCS (linea blu) e dalle batterie (linea rossa). Risulta evidente che le soglie d’intervento delle due sorgenti sono modulate in tempo reale dall’algoritmo di controllo in base al valore di tutti i parametri significativi del sistema, consentendo così di operare in condizioni vicine al punto di lavoro ottimale definito per il sistema.  
 Il caso specifico di studio descritto riguarda un’applicazione di tipo automo-

bilistico ma, poiché tale metodologia è più genericamente finalizzata all’ottimizzazione di condizioni operative, al miglioramento dell’efficienza energetica e della sicurezza globale di un generico sistema ibrido, ecco che essa diventa altresì interessante anche per molti altri contesti applicativi, in particolare dove risulta comodo descrivere condizioni operative e regole di funzionamento anche complesse attraverso semplici e intuitive formulazioni vicine al linguaggio comune.

**STMicroelectronics**  
 readerservice.it n. 1