Modello dinamico di iniettore di gas per motore ad accensione comandata

Dynamic model of a S.I. engine gas injector

M. Cammalleri^{1, a}, E. Pipitone^{1,b}, S. Beccari^{1 c}, G. Genchi^{1,d}

¹Dipartimento di Meccanica, Università degli Studi di Palermo, Viale delle scienze - 90128 Palermo, Italia

 $\ ^{a} cammalleri @dima.unipa.it, \ ^{b} pipitone @dima.unipa.it, \ ^{c} s. beccari @dima.unipa.it, \ ^{d} genchi @dima.unip$

Sommario

Nel presente lavoro si studia la complessa dinamica dell'otturatore di un iniettore di gas a solenoide per motori ad accensione comandata; come è noto, esso è sottoposto a spinte di diversa natura ed il suo moto ha un influenza determinante nei confronti della massa di combustibile erogata, la quale viene di norma modulata intervenendo sulla durata dell'intervallo di eccitazione del solenoide, chiamato "tempo di iniezione". Ad otturatore completamente aperto, la massa di gas che attraversa la sezione di uscita dell'iniettore dipende esclusivamente dalle condizioni del fluido a monte dell'iniettore e dalla durata del tempo di iniezione: ciò rende lineare la caratteristica di funzionamento dell'iniettore, intesa come relazione tra la massa iniettata ed il tempo di iniezione. Gli autori hanno però sperimentalmente osservato che, a causa di fenomeni transitori, per tempi di iniezione bassi, la caratteristica dell'iniettore si scosta notevolmente dalla linearità, rendendo meno accurato il controllo della massa di combustibile iniettato e dunque della dosatura di funzionamento. Ciò influisce negativamente sia sul consumo di combustibile sia sul contenimento delle emissioni inquinanti ai minimi carichi, poiché l'efficienza del sistema di abbattimento degli inquinanti, basato su catalizzatore trivalente, è bassa per dosature di funzionamento diverse da quella stechiometrica. Per di più, un recente studio sperimentale condotto dagli stessi autori su una innovativa modalità di alimentazione dei motori bi-fuel, chiamata Double Fuel [1], ha mostrato che la combustione simultanea di benzina e metano comporta notevoli vantaggi in termini di abbattimento sia degli inquinanti sia del consumo di combustibile, in quanto permette di alimentare il motore con miscela globalmente stechiometrica anche in condizioni di pieno carico; tale terza modalità di alimentazione dei motori bi-fuel, richiedendo quantità più ridotte di entrambi i combustibili, comporta naturalmente l'impiego degli iniettori nella zona della caratteristica con tempi di iniezione bassi, con ovvi svantaggi sul controllo della dosatura di funzionamento.

Sulla base di tali premesse, gli autori hanno deciso di studiare nel dettaglio il funzionamento di un iniettore di gas per motore ad accensione comandata allo scopo di migliorarne la risposta per i tempi di iniezione più bassi. Lo studio si compone di una parte teorica, volta allo sviluppo di un modello matematico per la previsione del moto dell'otturatore, e di una parte sperimentale, condotta nel laboratorio di motori del Dipartimento di Meccanica dell'Università di Palermo allo scopo di fornire i dati necessari alla taratura ed alla verifica del modello realizzato.

Abstract

In this paper the solenoid gas injector of a spark ignition engine is studied with particular reference to the complex needle motion during the opening and closing phases. As is known, the needle is subject to several forces and its motion is responsible of the injected mass. The amount of fuel to be injected, for each engine cycle, is controlled by changing the "injection time" (i.e. the period during which the injector solenoid is energized), because, when the injector nozzle is fully open, the mass flow depends only on the fluid pressure and temperature upstream the injector. The relationship between the injected mass and the injection time hence results to be linear, apart from the lower injection times range, where the authors observed a non linear behaviour because of transient phenomena. This non linearity produces a less accurate control over the injected mass (e.g. when the engine is operating at partial load), causing, in turn, higher pollutant emissions because the catalytic converter efficiency is lower when the air-fuel mixture is not stoichiometric. Moreover, in a recent work [1], the authors showed that the simultaneous combustion of natural gas and gasoline

improves the engine efficiency and reduces the pollutant emissions; in this new engine operating mode, called *Double Fuel* combustion, the injectors must operate in the low injection time zone, causing then a bad control over the air-fuel ratio.

Starting from these considerations the authors investigated the fuel injector behaviour with the aim to improve its performance in the low injection time range. The first part of this paper deals with the realization of the mathematic model for the prediction of the needle motion, while the second part presents the model calibration and validation, performed by means of experimental tests carried out on the engine test bed of the Department of Mechanics.

Keywords: modello dinamico, iniettore, motore accensione comandata.

Introduzione

I sistemi di alimentazione dei moderni motori ad accensione comandata alimentati con combustibile gassoso, come per esempio il metano (o CNG, Compressed Natural Gas) o il GPL (Gas di Petrolio Liquefatto) sono costituiti dai seguenti elementi base [3]: un serbatoio di accumulo (11 in Fig. 1), un regolatore di pressione provvisto di filtro (5 e 6 in Fig. 1), un collettore di accumulo del gas (12) dal quale ogni singolo iniettore (8) preleva la quantità di gas necessaria, iniettandola nel condotto di aspirazione (iniezione indiretta multi-point). Il regolatore di pressione ha lo scopo di far diminuire la pressione del combustibile dal valore di stoccaggio (circa 10 bar per il GPL, 200 bar per il CNG) fino alla pressione di iniezione. Durante questa espansione il gas può raffreddare parecchio, il che può causare la formazione di ghiaccio ed il danneggiamento del regolatore stesso, motivo per cui nella maggio parte dei casi parte del refrigerante motore viene convogliato al regolatore di pressione con la funzione di pressione il gas.



Fig. 1 – Schema iniezione indiretta di metano (1 ECU, 4 Sensore MAP, 5 Regolatore di pressione, 6 Valvola Filtro, 7 Corpo Farfallato, 8 Iniettori, 9 Sonda lambda, 10 Ruota fonica, 11 Serbatoio di accumulo)

In alcuni sistemi poi, il regolatore stesso è posto in comunicazione col collettore di aspirazione in modo da mantenere una differenza di pressione costante tra il collettore di accumulo del combustibile ed il collettore di aspirazione. Essendo normalmente critico l'efflusso attraverso l'iniettore, ne risulta che la portata di gas che fuoriesce dipende esclusivamente dalle condizioni totali del fluido nel collettore di accumulo del combustibile, e dunque la massa di combustibile erogata è proporzionale al tempo di apertura dell'iniettore.

In questo modo la centralina elettronica riesce a controllare la massa di combustibile iniettata, e dunque la dosatura di funzionamento (ossia il rapporto tra massa d'aria e di combustibile all'interno della miscela carburata), tramite opportuna mappatura dei tempi di iniezione in funzione del regime di rotazione e del carico (ovvero pressione all'interno del collettore di aspirazione, MAP). La dosatura così ottenuta viene successivamente corretta dal sistema di controllo in loop chiuso tramite la misura effettuata dalla sonda lambda. In Fig. 1 è mostrato lo schema dell'alimentazione mediante iniezione elettronica in un motore ad accensione comandata alimentato a gas naturale.

La Fig. 2 mostra invece lo schema costruttivo di un iniettore. L'otturatore, normalmente tenuto in posizione di chiusura sia dalla pressione del gas che da una molla di contrasto, viene attirato dal campo elettro-magnetico generato da un solenoide alimentato dalla centralina, scoprendo così la sezione di passaggio per il combustibile; trascorso il tempo di iniezione, la centralina interrompe l'alimentazione del solenoide e l'otturatore ritorna in posizione di chiusura spinto dalla pressione del gas e dalla molla. L'alimentazione del solenoide viene controllata dalla centralina mediante appositi transistor di potenza, una volta per ogni ciclo motore.



Fig. 2 – Schema di iniettore[3]: 1) cappuccio, 2) otturatore, 3) cassa, 4) molla, 5) avvolgimenti del solenoide, 6)terminali elettrici, 7) filtro

Come già detto, la caratteristica di funzionamento dell'iniettore di gas, cioè il legame tra la massa di combustibile erogata ed il tempo di apertura, è lineare. Tuttavia, per tempi di iniezione bassi, si nota che la caratteristica si scosta notevolmente dalla linearità, a causa di fenomeni transitori, assumendo un andamento oscillatorio attorno ad un valore medio crescente, come per esempio mostrato in Fig. 3. Ciò rende meno accurato il controllo della massa di combustibile iniettata ed influisce quindi negativamente sul contenimento delle emissioni inquinanti ai minimi carichi, poiché l'efficienza del sistema di abbattimento di tali gas, basato su catalizzatore trivalente, è bassa per dosature di funzionamento diverse da quella stechiometrica.

Per di più, un recente studio sperimentale condotto dagli stessi autori su una innovativa modalità di alimentazione dei motori bi-fuel, chiamata *Double Fuel* [1], ha mostrato che la combustione simultanea di benzina e metano comporta notevoli vantaggi in termini di abbattimento sia degli inquinanti sia del consumo di combustibile, in quanto permette di alimentare il motore con miscela globalmente stechiometrica anche in condizioni di pieno carico; tale terza modalità di alimentazione dei motori bi-fuel, richiedendo quantità più ridotte di entrambi i combustibili, comporta naturalmente l'impiego degli iniettori nella zona della caratteristica con tempi di iniezione bassi , con ovvi svantaggi sul controllo della dosatura di funzionamento.

É per questi motivi che gli autori si propongono, in questo lavoro, di elaborare un modello matematico che sia in grado di prevedere il moto dell'otturatore durante i transitori di apertura e chiusura in modo da riprodurre l'andamento oscillatorio della caratteristica di funzionamento di un iniettore di gas e di migliorarne la risposta alle minime portate.

Il modello verrà tarato e validato mediante dati sperimentali raccolti dagli stessi autori.

1. Modello matematico

L'iniettore è costituito da una parte meccanica, l'otturatore, e da una elettrica, il solenoide, che, durante il funzionamento, si influenzano reciprocamente tramite il campo elettro-magnetico generato dal solenoide. L'otturatore, attratto dal campo magnetico generato dal solenoide, scopre la sezione di passaggio per il fluido, urta in apertura contro una superficie di fondo corsa, viene poi spinto a richiudersi dalla pressione del gas ed infine urta in chiusura contro un'altra superficie di battuta. Gli urti in apertura ed in chiusura causano dei rimbalzi ripetuti dell'otturatore che, quando i tempi di iniezione sono bassi, producono effetti notevoli sulla massa erogata in quanto la sezione di passaggio del fluido risulta fortemente variabile nell'ambito del tempo totale di iniezione. Più aumenta il tempo di iniezione meno questi fenomeni transitori influenzano la massa complessivamente erogata e quindi la caratteristica si linearizza.

Si riporta, a titolo di esempio, in Fig. 3 la caratteristica di funzionamento di un iniettore per gas naturale alimentato con aria alla pressione di 9 bar; è chiaramente visibile, fino a tempi di iniezione di circa 4 ms, un andamento oscillante.



Fig. 3 – Caratteristica dell'iniettore in prova alimentato con aria a 9 bar



Fig. 4 - Corrente di avvolgimento e vibrazioni sulla cassa durante l'apertura dell'iniettore



Fig. 5 – Corrente di avvolgimento e vibrazioni sulla cassa durante la chiusura dell'iniettore

In Fig. 4 e Fig. 5 si riporta, a titolo di esempio, l'andamento della corrente che attraversa il solenoide assieme al segnale dell'accelerometro piazzato sulla cassa dell'iniettore; dall'analisi di questi due segnali si evince chiaramente che vi sono dei rimbalzi ripetuti tra otturatore e cassa, sia in apertura che in chiusura, e che il moto dell'otturatore influenza la corrente.

1.1 Circuito elettro-magnetico

Il ferro del circuito elettro-magnetico schematizzato in Fig. 6, a seguito della corrente i che circola nel solenoide, è sede di un'induzione magnetica B a cui corrisponde un campo magnetico H; le due grandezze sono legate dalla nota legge:

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

dove μ_0 è la permeabilità magnetica nel vuoto mentre μ_r è quella relativa del ferro rispetto al vuoto.



Fig. 6 – Schema del circuito magnetico (sezione assiale)

Si schematizza, per semplificazione, la curva di magnetizzazione del ferro con due tratti rettilinei, come visibile in Fig. 7, dove *m* è il coefficiente angolare e B_r l'intercetta (magnetizzazione residua) mentre con gli apici – e + si fa riferimento alle grandezze prima e dopo il "ginocchio" *G* rispettivamente. Il percorso chiuso, concatenato con le spire della bobina, ha una lunghezza, supposta costante, pari a l+d, dove l è la lunghezza relativa al corpo centrale e all'otturatore mentre d è quella relativa al traferro.



Fig. 7 – Curva di magnetizzazione del ferro

Il teorema di Ampère [4], riferito al suddetto percorso chiuso, afferma che:

$$\phi H ds = Ni \quad \Rightarrow \quad Hl + H_0 d = Ni \tag{1}$$

dove *s* rappresenta l'ascissa curvilinea lungo il percorso concatenato con le spire (curva tratteggiata in Fig. 6), *i* è la corrente istantanea che attraversa le spire della bobina, H_0 è il campo magnetico nel traferro ed *N* il numero di spire concatenate col percorso.

Il flusso ϕ_B del vettore *B* concatenato con le spire è dato da: $\phi_B = N \cdot S \cdot B$ dove *S* è l'area racchiusa dalle spire della bobina.

Per la costanza del flusso concatenato risulta che l'induzione magnetica sia uguale nel ferro e nel traferro, pertanto $B=B_0$ e dunque si ha:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B_r + mH}{\mu_0}$$

quindi si ricava il legame tra *B* ed *i*:

$$B(i) = \frac{B_r \mu_0 l + m \mu_0 N i}{\mu_0 l + m d}$$
⁽²⁾

inoltre, per quanto riguarda le derivate di l e d, essendo costante la somma l+d, si ha:

$$d = -\dot{x}$$
$$\dot{l} = -\dot{d} = \dot{x}$$

dove x è la posizione dell'otturatore (x=0 ad otturatore chiuso, come rappresentato in Fig. 6). La derivata del flusso ϕ_B del vettore *B* concatenato con le spire risulta

$$\frac{d\phi_B}{dt} = L\frac{di}{dt} + \left[L\frac{B_r}{Nm} \cdot \frac{m(d+l)}{\mu_0 l + md}\right] \dot{x} + \left[L\frac{m-\mu_0}{\mu_0 l + md}\right] i \dot{x}$$
(3)

avendo indicato con *L* l'induttanza del circuito:

$$L = \frac{N^2}{\left(\frac{l}{mS}\right) + \left(\frac{d}{\mu_0 S}\right)}$$

1.2 Calcolo della forza elettromagnetica

L'energia elettromagnetica per unità di volume, nel traferro, è pari a:

$$\int_0^H H \, dB = \frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

Dato uno spostamento virtuale dx dell'otturatore, uguagliando il lavoro della forza di attrazione tra solenoide ed otturatore (F_{em}) alla variazione di energia nel traferro, si ottiene:

$$F_{em} \cdot dx = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S \, dx \quad \Longrightarrow \quad F_{em} = \frac{SB_0^2}{2\mu_0} = \frac{SB^2}{2\mu_0}$$

Ricordando l'Eq. (2) ed accorpando opportunamente le costanti si ottiene:

$$F_{em} = \left(c_1 + c_2 i\right)^2 \tag{4}$$

dove:

$$c_{1} = \frac{\sqrt{\frac{S}{2\mu_{0}}} \cdot \frac{B_{r}l}{mS}}{\left(\frac{l}{mS} + \frac{d}{\mu_{0}S}\right)} \qquad \qquad c_{2} = \frac{\sqrt{\frac{S}{2\mu_{0}}} \cdot \frac{N}{S}}{\left(\frac{l}{mS} + \frac{d}{\mu_{0}S}\right)}$$
(5)

1.3 Equazione di equilibrio dinamico

L'otturatore è soggetto alle seguenti azioni:

- 1) forza della molla pari a $k(x+\delta)$, dove δ è la deformazione di precarico e k la costante elastica della molla
- 2) forza dovuta alla pressione del gas, che tende a chiudere l'otturatore, pari a $S^* \Delta p$, dove Δp è la differenza di pressione tra monte e valle dell'iniettore ed S^* è l'area netta su cui tale differenza di pressione agisce
- **3**) forza elettromagnetica F_{em} .

Trascurando l'azione dell'attrito meccanico e di quello viscoso dovuto alla presenza del gas, l'equilibrio alla traslazione dell'otturatore si scrive:

$$M \ddot{x} + kx = F_{em} - k\delta - S^* \Delta p \tag{6}$$

dove M è la massa dell'otturatore.

Un istante prima che l'otturatore cominci a muoversi, in fase di apertura, nella bobina circola la corrente i_0 (detta corrente di distacco) e l'equazione di equilibrio diventa:

$$F_{em}(i_0) = k\delta + S^* \Delta p \tag{7}$$

Indicando con x_{max} la corsa dell'otturatore, con i_g la corrente in corrispondenza del ginocchio *G* di Fig. 7e facendo le seguenti posizioni per adimensionare le variabili spostamento, corrente e tempo:

$$X = \frac{x}{x_{max}}$$

$$I = \frac{i}{V/R}; \quad I_0 = \frac{i_0}{V/R}; \quad I_g = \frac{i_g}{V/R}$$

$$d\vartheta = \omega_n dt \qquad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

$$X' = \frac{dX}{d\vartheta} \qquad I' = \frac{dI}{d\vartheta}$$

$$(8)$$

l'Eq. (6) diventa:

$$X'' + X = (\gamma_1 + \gamma_2 I)^2 - (\gamma_1^- + \gamma_2^- I_0)^2$$
(9)

dove si è posto:
$$\gamma_1 = \frac{c_1}{\sqrt{k x_{max}}}$$
 $\gamma_2 = \frac{c_2 \frac{V}{R}}{\sqrt{k x_{max}}}$

indicando col pedice – le grandezze prima del ginocchio. L'eq. (9) è valida per $I > I_0$

L'eq. (9) è valida per $I > I_0$.

1.4 Schematizzazione degli urti

Si definisce coefficiente di restituzione dell'urto ξ il rapporto tra l'energia cinetica posseduta dall'otturatore dopo l'urto e quella prima dell'urto.

Nel modello matematico l'urto si traduce nelle seguenti relazioni:

$$se X = 1 \Longrightarrow X'_{du} = -\sqrt{\xi} \cdot abs(X'_{pu})$$

$$se X = 0 \Longrightarrow X'_{du} = \sqrt{\xi} \cdot abs(X'_{pu})$$
(10)

dove X'_{pu} e X'_{du} sono le velocità adimensionali, prima e dopo l'urto rispettivamente.

1.5 Circuito elettro-magnetico

La corrente *i* che transita nella bobina dipende dalla tensione di alimentazione *V* e dalla tensione che si genera a causa della variazione del flusso ϕ_B . Si ha dunque:

$$Ri = V - \frac{d\phi_B}{dt}$$

dove R è la resistenza della bobina. Dalla eq. (3), effettuando il cambio di variabili riportato in (8) e ponendo:

 $\Theta = \frac{L}{R}\omega_n = \text{costante di tempo adimensionale}$

$$\lambda_1 = \frac{B_r}{\mu_0 N + mN\frac{d}{l}} \frac{L}{V} \omega_n x_{max} \qquad \qquad \lambda_2 = \frac{\frac{1}{\mu_0 S} - \frac{1}{mS}}{\frac{1}{mS} + \frac{d}{\mu_0 S}} \Theta \cdot x_{max}$$

si ottiene:

$$I' = \frac{I - I - (\lambda_1 + \lambda_2 I)X'}{\Theta} \tag{11}$$

1

1

1.6 Equazioni differenziali del sistema

Il moto dell'otturatore si determina risolvendo il set di equazioni differenziali (9), (10) e (11). Le variabili di taratura del modello sono: Θ , ξ , λ_1 , λ_2 , γ_1 , γ_2 ; tutte queste variabili, tranne il coefficiente di restituzione ξ , cambiano valore attraversando il "ginocchio" nella curva di magnetizzazione (vedi Fig. 6) quindi il numero di incognite aumenta.

Nell'ipotesi $B_r^{-}=0$ (vedi più avanti) e considerando che $m^+=\mu_0$ (giusta la schematizzazione adottata in Fig. 7) si ottiene:

$$\frac{\Theta^{+}}{\Theta^{-}} = \frac{\gamma_{2}^{+}}{\gamma_{2}^{-}} = \frac{L^{+}}{L^{-}} \qquad \qquad \lambda_{1}^{-} = \lambda_{2}^{+} = \gamma_{1}^{-} = 0$$

$$\frac{\lambda_{1}^{+}}{\lambda_{2}^{-}} = I_{g} \frac{L^{+}}{L^{-}} \qquad \qquad \frac{\gamma_{1}^{+}}{\gamma_{2}^{-}} = \left(1 - \frac{L^{+}}{L^{-}}\right) I_{g} \qquad (12)$$

2. Raccolta dati sperimentali e taratura modello

La raccolta dei dati sperimentali è stata effettuata impiegando un iniettore di gas naturale BOSCH montato di serie sul motore bi-fuel FIAT 8V 1242cc. L'iniettore è stato alimentato con aria a diverse pressioni (9, 6 e 4 bar). Per il controllo dell'apertura dell'iniettore è stato utilizzato un transistor IGBT attivato da una scheda contatori National Instruments PCI 6602 programmata in ambiente Labview. In questo modo è stato possibile impostare sia la frequenza sia il tempo di apertura dell'iniettore. Un accelerometro è stato piazzato sulla cassa dell'iniettore in modo da rilevare le accelerazioni cui è soggetto l'otturatore: in particolar modo è stato così possibile individuare gli istanti in cui si sono verificati urti tra otturatore e cassa.

Una pinza amperometrica LEM PR20 (fondo scala 20 ampere, precisione 1% del valore letto, risposta in frequenza 20 KHz) è stata impiegata per la misura della corrente istantanea che attraversa il solenoide, mentre la misura della portata di gas smaltita dall'iniettore è stata effettuata mediante misuratore di portata massica ad effetto Coriolis Endress+Hauser PROMASS 80A.

Oltre alla corrente di avvolgimento, alla portata massica ed al segnale in uscita dall'accelerometro, sono state acquisite anche la tensione di alimentazione, la pressione e la temperatura dell'aria a monte dell'iniettore. L'acquisizione è stata effettuata mediante una scheda National Instruments PCI-6133 con frequenza di campionamento impostata pari a 400 kHz.

È stato così possibile tracciare la caratteristica di funzionamento dell'iniettore relativa ad una tensione di alimentazione di 13 Volt, per ognuna delle pressioni investigate facendo variare il tempo di iniezione da un valore minimo di 1 ms (insufficiente a consentire l'apertura dell'otturatore) fino ad un valore massimo di 8 ms con step di 0.05 ms.

2.1 Determinazione delle costanti di taratura

Per la taratura del modello è necessario determinare alcune costanti proporzionali a grandezze fisiche connesse al funzionamento dell'iniettore; alcune di queste, come per esempio la resistenza elettrica R o le induttanze L' ed L^+ , possono essere identificate mediante misure dirette sull'iniettore; in particolare, bloccando l'otturatore ed alimentando la bobina con una tensione V nota (nel nostro caso 13.1 Volt), si possono valutare le tre variabili dall'andamento della corrente durante il transitorio elettrico (in tal caso infatti si tratta di un semplice circuito R-L).

La corsa dell'otturatore (x_{max}) è stata misurata con un micrometro. In Tabella 1 sono riportati i valori delle grandezze appena descritte.

R [Ohm]	L ⁻ [mH]	L^{+} [mH]	x _{max} [mm]
6.55	11	2.9	0.27

Tabella 1 – Alcune grandezze relative all'iniettore

Per valutare l'influenza della forza esercitata dal gas bisogna determinare la relazione tra Δp ed i_0 . A tal proposito sono state effettuate alcune prove con diverse pressioni di iniezione (comprese tra 1 e 8 bar) mantenendo costante il tempo di apertura dell'iniettore e registrando l'andamento della corrente assieme al segnale in uscita dell'accelerometro montato sulla cassa: tale segnale rivela . Quando l'otturatore si mette in movimento viene rilevata un'accelerazione della cassa quindi, dall'istante del distacco, è possibile risalire alla corrente i_0 .

Dalla eq. (4) assieme alla eq. (7) e considerando che nel caso in esame si è sempre ottenuto $i_0 < i_g$ si ottiene:

$$\dot{i}_{0} = \sqrt{\frac{k\delta}{\left(c_{2}^{-}\right)^{2}} + \frac{S^{*}}{\left(c_{2}^{-}\right)^{2}}\Delta p} - \frac{c_{1}^{-}}{c_{2}^{-}}$$

dall'interpolazione dei punti sperimentali ($i_{0[A]}$ in funzione di $\Delta p_{[MPa]}$, vedi Fig. 8) si determinano i rapporti:



 $\frac{k\delta}{\left(c_{2}^{-}\right)^{2}}; \quad \frac{S^{*}}{\left(c_{2}^{-}\right)^{2}}; \quad \frac{c_{1}^{-}}{c_{2}^{-}}$

Fig. 8 – Dati sperimentali di i_0 in funzione di Δp

In Tabella 2 sono visibili i risultati dell'interpolazione.

$\frac{k\delta}{\left(c_2^{-}\right)^2}$	$\frac{S^*}{\left(c_2^-\right)^2}$	$\frac{c_1^-}{c_2^-}$
0.165	0.912	0

Tabella 2 – Coefficienti di proporzionalità tra io e Ap

Poiché c_1 è nullo, è nulla anche l'induzione residua B_r (come si evince dalla Eq. (5)). Questo conferma l'ipotesi alla base delle equazioni (12).

In conclusione le incognite da determinare sono: Θ^- , ξ , λ_2^- , γ_2^- ed hanno il seguente legame con le grandezze fisiche: γ_2^- è la costante di proporzionalità tra la forza con cui il solenoide attrae l'otturatore e la corrente, Θ^- è proporzionale alla frequenza naturale di oscillazione del sistema otturatore-molla, ξ è il coefficiente di restituzione dell'urto tra otturatore e cassa, λ_2^- (e quindi λ_1^+) tiene conto dell'influenza del moto dell'otturatore sulla corrente nel solenoide.

La caratteristica di Fig. 3, come già accennato, è stata utilizzata (normalizzando l'ordinata in funzione del valore massimo) per ricavare le quattro costanti fondamentali del modello matematico. La caratteristica sperimentale, in cui l'ascissa è suddivisa in intervalli di 0.05 ms, è stata confrontata con quella numerica definendo la funzione errore E come segue:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left| m_{i \text{ sp.}} - m_{i \text{ num.}} \right|$$

dove $m_{i sp.}$ è la massa erogata, per dato tempo di apertura, misurata sperimentalmente, $m_{i num.}$ è la corrispondente massa calcolata tramite il modello, n è il numero totale delle acquisizioni sperimentali. L'errore E è funzione dei quattro parametri fondamentali del modello; mediante un algoritmo di ricerca del minimo (metodo di Nelder-Mead o del Simplesso [5]) sono stati determinati i valori dei parametri che minimizzano la funzione errore E. In Fig. 9 è riportato il confronto tra la caratteristica sperimentale e quella numerica a seguito dell'ottimizzazione: l'errore percentuale medio (differenza tra massa calcolata e misurata) risulta del 3.4%, inoltre dall'andamento dell'errore si nota che esso è elevato per le portate di gas minime (tempi di iniezione fino a 2 ms circa) mentre poi si assesta attorno al valore medio.

In Tabella 3 sono riportati i valori numerici delle costanti di taratura.

Θ^{-}	ξ	λ_2^-	γ_2^{-}	ω_n [rad/s]
1.79	0.580	0.200	8.40	1060

Tabella 3 – Valori delle costanti di taratura

Si è quindi effettuato un secondo confronto tra caratteristiche, numerica e sperimentale, ottenute con una pressione di alimentazione dell'iniettore di 6 bar. Nel modello sono state inserite le costanti riportate in Tabella 3 e la nuova pressione di alimentazione. Il risultato ottenuto è visibile in Fig. 10 e l'errore percentuale medio risulta del 4.9%; anche qui l'errore è elevato solo inizialmente e si assesta, questa volta meno rapidamente, attorno al valore medio. Infine sono state confrontate le caratteristiche ottenute con pressione di alimentazione di 4 bar, ancora una volta aggiornando nel modello il valore di pressione del gas, ed il risultato è visibile in Fig. 11: l'errore percentuale medio questa volta è del 6.9%.

Si nota come il modello, una volta tarato sulla base di una caratteristica di funzionamento, sia in grado di prevedere, con sufficiente accuratezza, l'andamento di caratteristiche ottenute a pressioni di alimentazione anche molto diverse.



Fig. 9 – Confronto tra caratteristiche (pressione di alimentazione 9 bar)



Fig. 10 - Confronto tra caratteristiche (pressione di alimentazione 6 bar)



Fig. 11 - Confronto tra caratteristiche (pressione di alimentazione 4 bar)

Conclusioni

In questo lavoro si è realizzato un modello matematico per la previsione della caratteristica di funzionamento di un iniettore di combustibile per motore ad accensione comandata. Il modello, una volta tarato con dati sperimentali, permette di ottenere la massa erogata in funzione del tempo di apertura dell'iniettore per diverse pressioni del gas che lo alimenta. Il modello ha previsto con accuratezza le oscillazioni presenti nelle varie caratteristiche per tempi di iniezione prossimi al minimo. Per quanto riguarda la caratteristica utilizzata per la taratura, l'errore medio percentuale sulla massa erogata è stato del 3.4% mentre per le caratteristiche ottenute a pressioni diverse l'errore medio si è attestato attorno a valori del 5% – 7%. Questo è un risultato preliminare abbastanza soddisfacente, sebbene il modello sia ancora in fase di sviluppo, poiché si è riusciti a prevedere le oscillazioni nella caratteristica di funzionamento che derivano dalla continua variazione della sezione di passaggio del fluido dovuta ai rimbalzi ripetuti dell'otturatore in fase di apertura e di chiusura. Successivamente si intende utilizzare i dati fin qui acquisiti per studiare una strategia di alimentazione elettrica della bobina tale da ridurre l'entità degli urti e quindi l'irregolarità della massa erogata.

Bibliografia

- E. Pipitone, S. Beccari, "Performances improvement of a S.I. CNG bi-fuel engine by means of double-fuel injection", SAE Paper 2009-24-058 (9th International Conference on Engines & Vehicles (ICE2009), Capri, September 13-18, 2009)
- [2] J. B. Heywood, "Internal Combustion Engines Fundamentals", McGraw-Hill automotive technology series, 1988, ISBN 0-07-100499-8
- [3] Bosch Automotive Handbook (4th edition), Robert Bosch GmbH, 1996, ISBN 1-56091-918-3
- [4] P. Fleury, J. P. Mathieu, "Elettrostatica Corrente continua Magnetismo", Nicola Zanichelli editore, Bologna, 1964
- [5] Nelder J.A. and Mead R., "A simplex method for function minimization", Computer Journal, 1965, vol 7, pp 308-313

Elenco dei simboli e delle abbreviazioni

CNG: Compressed Natural Gas ECU: Electronic Control Unit GPL: Gas di Petrolio Liquefatto LPG: Liquified Petroleum Gas MAP: Manifold Absolute Pressure

B: induzione magnetica

 B_0 : induzione magnetica nel traferro

B_r: intercetta della retta di magnetizzazione (magnetizzazione residua)

d: lunghezza nel vuoto (traferro) del percorso concatenato con le spire

E: funzione errore

 F_{em} : forza elettromagnetica di attrazione tra solenoide ed otturatore

H: campo magnetico

*H*₀: campo magnetico nel traferro

I: corrente adimensionale

i: corrente istantanea che attraversa le spire della bobina

i_g: corrente in corrispondenza del ginocchio

*i*₀: corrente di distacco

- *k*: costante elastica della molla
- *L*: induttanza
- l: lunghezza nel ferro del percorso concatenato con le spire
- *M*: massa dell'otturatore

m: coefficiente angolare della retta di magnetizzazione del ferro

 $m_{i sp.}, m_{i num}$: massa erogata, sperimentale e calcolata col modello rispettivamente

N: numero di spire della bobina

- *n*: numero totale delle acquisizioni sperimentali
- R: resistenza elettrica della bobina
- S: area racchiusa dalle spire della bobina
- S^* : area netta su cui agisce la pressione del gas
- s: ascissa curvilinea lungo il percorso concatenato con le spire
- *X*: posizione adimensionale dell'otturatore
- X'_{pu}, X'_{du}: velocità adimensionali, prima e dopo l'urto rispettivamente
- *x*: posizione dell'otturatore
- x_{max} : corsa dell'otturatore
- V: tensione di alimentazione della bobina

 δ : deformazione di precarico della molla

 Δp : pressione relativa del gas

 ϕ_B : flusso del vettore *B* concatenato con le spire

 γ_2 : costante proporzionale alla forza con cui il solenoide attrae l'otturatore

 λ_1^+, λ_2^- : costanti che tengono conto dell'influenza del moto dell'otturatore sulla corrente *i*

 μ_0 : permeabilità magnetica nel vuoto

 μ_r : permeabilità magnetica relativa rispetto al vuoto

9: tempo adimensionale

 Θ : costante di tempo adimensionale, proporzionale alla frequenza naturale del sistema massa-molla

 ξ : coefficiente di restituzione dell'urto