



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

X Ciclo N.S. (2008-2011)

*“Optimization of SI and CI engine control strategies via
integrated simulation of combustion and turbocharging”*

ABSTRACT

Ing. Ivan Criscuolo

Il Tutor

Ch.mo Prof. Ivan Arsie

Il Coordinatore

Ch.mo Prof. Vincenzo Sergi

ABSTRACT

Per lungo tempo i motori a combustione interna sono stati il più importante mezzo di propulsione per il trasporto a livello globale. Un motore a combustione è semplice nella sua natura, una miscela di aria e combustibile viene bruciata ed attraverso un ciclo termodinamico è prodotto lavoro. La quantità di aria e carburante combusto controlla la quantità di lavoro prodotta dal motore.

Il lavoro del motore deve superare l'attrito e perdite di pompaggio, ed un motore più piccolo ha minori perdite ed è quindi più efficiente. Un metodo per aumentare l'efficienza del motore viene comunemente indicato come downsizing, ossia il ridimensionamento della cilindrata. Il downsizing ha uno svantaggio importante: un motore più piccolo elabora una portata minore rispetto ad un motore più grande, limitandone quindi la potenza massima e conseguentemente l'appeal verso i clienti.

Aumentando la densità della carica fresca in ingresso al motore, si può far tendere la potenza di un motore piccolo a quella di un motore di cilindrata maggiore. Esistono diverse metodologie per l'aumento della densità per applicazioni automotive, ad esempio sovralimentazione, onde di pressione o turbocompressore. Il turbocompressore è diventato il sistema più utilizzato, poiché è un sistema affidabile e robusto, che utilizza una parte dell'energia dei gas di scarico, altrimenti perduta nell'ambiente circostante.

Ci sono tuttavia alcuni inconvenienti e limiti di un turbocompressore. Il compressore di un sistema a singolo stadio è dimensionato in base alla potenza massima del motore, che è strettamente legata alla massima portata massica elaborabile dal motore. Il range di utilizzo di un compressore è limitato, imponendo limiti alla pressione di sovralimentazione per basse portate quando il motore lavora ad un basso numero di giri. Inoltre, per avere un elevato grado di compressione, il turbo deve necessariamente girare ad una velocità di rotazione elevata: a causa dell'inerzia del sistema, le variazioni di velocità dello stesso possono essere lente e rappresentare un vincolo. Ciò significa che la risposta in termini di coppia di un motore turbocompresso è più lento di un altrettanto potente motore aspirato.

Un sistema con turbo a doppio stadio combina due unità turbo di diverse dimensioni, in cui l'unità più piccola interviene a basso numero di giri quando la portata massica è relativamente bassa mentre quando la portata massica aumenta interviene il turbocompressore maggiore. Inoltre, a causa della minore inerzia dell'unità più piccola, può essere accelerato più velocemente e quindi la risposta in coppia del motore migliora. L'unità più piccola può quindi essere bypassato in presenza di portate massiche elevate, dove invece l'unità turbo più grande è usata per comprimere la carica necessaria.

Nella tesi è stato discusso il valore dei modelli di simulazione del gruppo motore-turbocompressore. È stato dimostrato come la modellazione dei processi che avvengono all'interno del cilindro e del turbocompressore possono aiutare lo sviluppo delle strategie di controllo permettendo di risparmiare tempo e denaro. Tutti i modelli sono stati sviluppati e validati sperimentalmente ed applicati per l'ottimizzazione od il controllo in tempo reale.

In particolare, nella prima parte, è stata presentata l'ottimizzazione delle variabili di controllo applicata ad un motore automobilistico diesel sovralimentato. La struttura del modello è basata su un approccio ibrido, con un modello multi-zona predittivo per la simulazione dei processi all'interno dei cilindri (cioè combustione e formazione di emissioni) integrato con un modello di turbocompressore orientato al controllo per prevedere simulare i processi di aspirazione e scarico. La precisione del modello è stata testata mediante confronto tra il ciclo di pressione misurato e simulato e la temperatura di scarico del motore su un ampio insieme di dati sperimentali, rilevati al banco di prova. I risultati della validazione mostrano un indice correlazione R^2 pari a 0,995 e 0,996 per IMEP e temperatura di scarico, rispettivamente. Il target dell'ottimizzazione era volto a ridurre al minimo le emissioni di NO in quattro condizioni di funzionamento steady-state, selezionati tra quelli di interesse per i cicli di omologazione ECE / EUDC. Sono stati introdotti dei vincoli per

evitare l'aumento delle emissioni di particolato ed evitare una riduzione della temperatura di scarico che avrebbe un impatto negativo sulla efficienza dei dispositivi di post-trattamento. I risultati evidenziano una significativa riduzione delle emissioni di NO attraverso l'aumento della percentuale di EGR ed un anticipo dell'iniezione principale.

La seconda parte della tesi è stata dedicata all'ottimizzazione model-based per un motore heavy-duty alimentato a metano metano, dotato di turbocompressore ed EGR. L'ottimizzazione è stata indirizzata ad individuare i set-point delle variabili di controllo del motore, a seguito della realizzazione di un sistema EGR volto a ridurre la temperatura nel cilindro e prevenire lo stress termico dei componenti del motore (testa e valvole). Una analisi di co-simulazione è stata effettuata accoppiando un modello 1-D del motore realizzato con un codice commerciale con un algoritmo di ottimizzazione vincolata classica. Il modello 1-D è stato impiegato per la simulazione dei fenomeni nei condotti di aspirazione/scarico, nell'impianto di EGR e nel turbocompressore, mentre una formula empirica basata sulla funzione di Wiebe classica è stata implementata per simulare il processo di combustione. Un'estesa analisi è stata eseguita al fine di identificare le correlazioni esistenti fra i parametri del modello Wiebe e le condizioni di funzionamento del motore: la precisione e generalizzazione del modello è stata garantita anche in caso di elevato tasso EGR. Il modello 1-D ed i risultati di identificazione sono stati validati con successo in confronto ad una vasta serie di dati sperimentali, misurata sul banco di prova. I risultati dell'analisi di ottimizzazione, mirata a minimizzare i consumi evitando lo stress termico, hanno mostrato una riduzione del consumo di carburante fino a 4,5% ed una riduzione del carico termico sotto il limite impostato, in riferimento a cinque condizioni di funzionamento del motore selezionate tra le più critiche del ciclo ETC. In particolare, l'efficacia dell'analisi della co-simulazione è evidenziata nel perseguire l'obiettivo contrastante della ottimizzazione del controllo del motore, riducendo il ricorso all'attività sperimentale al banco di prova.

Entrambe le ottimizzazioni presentate hanno evidenziato il ruolo chiave del turbocompressore legato agli aspetti energetici e delle emissioni di un motore a combustione interna. Nell'ultima parte della tesi è evidenziato l'impatto della gestione del turbocompressore attraverso l'utilizzo della valvola wastegate o l'utilizzo del VGT. Infatti, agendo su questi componenti, la quantità di gas di scarico elaborata dalla turbina può essere gestita in modo da regolare il grado di sovralimentazione e la pressione di sovralimentazione. Questo permette di mantenere la valvola a farfalla completamente aperta con significativa riduzione di perdite di pompaggio. La posizione della valvola wastegate è definita da un attuatore pneumatico in cui la pressione è regolata da una valvola a solenoide alimentata da un segnale PWM. L'inconveniente di questo sistema è la dipendenza del segnale PWM, e successivamente della performance, dalla tensione di alimentazione del sistema. Durante la tesi, è stato sviluppato un modello di attuatore della valvola wastegate al fine di rendere il sistema insensibile alle variazioni di tensione per migliorare il controllo della pressione di sovralimentazione. Le equazioni di flusso comprimibile sono risultate essere sufficienti a descrivere il flusso di massa all'interno dell'attuatore ed entrambi il coefficiente di portata e la pressione statica nella camera dell'attuatore sono stati modellati utilizzando polinomi dipendenti dal segnale PWM. Inoltre un semplice modello d'attrito è stato implementato per simulare l'attrito nell'attuatore. Il controllore PID per la pressione di sovralimentazione basato sul compensatore ha dimostrato di dare limitati undershoot e overshoot ed è anche capace di respingere disturbi nella tensione di alimentazione. Il compensatore è stato incorporato in un controllore per la regolazione della pressione di sovralimentazione ed il sistema di controllo completo ha dimostrato di gestire al meglio le variazioni di tensione di sistema ed eseguire un buon controllo della pressione di sovralimentazione sia sul modello del sistema che sul sistema reale al banco di prova motore. Le simulazioni evidenziano la necessità di garantire una bassa pressione nel serbatoio a vuoto per permettere all'attuatore di regolare al meglio le posizioni dal completamente chiuso al completamente aperto. Un controllore di tipo switch si è dimostrato sufficiente per il controllo della pressione di serbatoio vuoto.