

I veicoli ibridi :
stato dell'arte
e motivazioni
ambientali ed energetiche

G.Pede

Introduzione	3
Gli ibridi della Toyota e della Honda	4
Ibridi serie, parallelo, “dual mode” ed ibridi minimi	5
Ibridi serie	5
Ibridi parallelo	7
Ibridi dual mode.....	7
Ibrido minimo o “mild hybrid”	8
Risparmio energetico ed ibridi.....	8
Recupero di energia in frenata.....	8
Ottimizzazione del rendimento del motore primo.....	9
Strategie di gestione.....	10
Conclusioni	10
Riferimenti nel testo	11

Introduzione

Nel 2003, in Italia, il settore dei trasporti ha contribuito per 33,3% ai consumi di energia primaria (Ministero Attività Produttive) e la maggior parte dell'energia, l'88,6%, viene utilizzata nel settore stradale.

Correlato al consumo di energia è il rilascio delle sostanze inquinanti generate nei processi di combustione, principalmente ossidi di azoto e di carbonio ed idrocarburi incombusti, con effetto locale e globale. A questo riguardo, la percentuale (sul totale delle emissioni climalteranti dovute al trasporto, 135,3 MtCO₂eq) di anidride carbonica in atmosfera dovuta al trasporto su strada è del 94,4%.

Tale rilascio è diffuso lungo tutta la rete stradale ma, per effetto della concentrazione dei mezzi e dei rallentamenti causati dal traffico, il consumo specifico e le concentrazioni di inquinanti nell'atmosfera assumono livelli non accettabili specialmente nelle grandi città.

In effetti, la riduzione dei consumi energetici e delle emissioni si è imposta ormai da tempo come fattore guida per l'evoluzione della tecnologia automobilistica, fin dalla prima crisi energetica dell'età moderna nei primi anni Settanta. Le evoluzioni e gli sviluppi propri della tecnologia sono stati fortemente condizionati da quelli del quadro legislativo e normativo di riferimento, che da più di trent'anni tende ad introdurre vincoli sempre più stringenti per la qualità dell'aria e quindi per il controllo delle emissioni e della qualità dei combustibili (direttive e norme europee e nazionali, Fig. 1¹

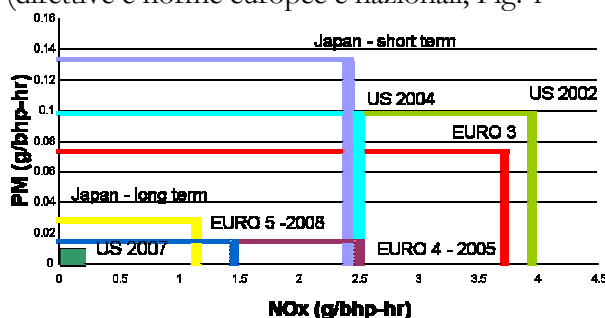


Fig. 1 Limiti per le emissioni in Europa/Giappone/ USA [1]

¹ In figura è illustrata la riduzione delle emissioni nel passaggio da Euro I ad Euro IV, per i veicoli "heavy duty". Riduzioni analoghe, espresse in g/km per effetto delle diverse modalità di misura delle emissioni (direttamente su banco a rulli, non al freno motore), si sono avute per le autovetture:

Le preoccupazioni di carattere globale (Conferenza di Kyoto) richiedono poi anche una riduzione dei consumi e l'impegno assunto volontariamente dall'industria europea nel 1998 ha in effetti dato risultati di rilievo, come evidenziato in figura [2]:

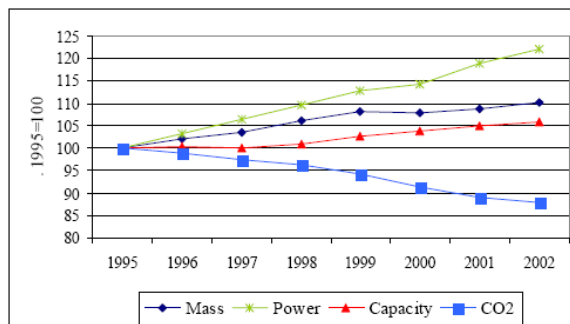


Fig. 2 Valori medi per le vetture di nuova produzione in Europa (ACEA, 2003)

Alla riduzione dei consumi specifici, evidenziata nel grafico dalla riduzione delle emissioni di CO₂ ed in buona parte dovuta allo spostamento della domanda dalla benzina al diesel, si è accompagnato però un contemporaneo aumento della massa delle autovetture e delle potenze installate. Queste tendenze in atto ostacolano seriamente il raggiungimento degli obiettivi, fissati per il 2008 ed il 2012, di 140 e 120 g CO₂ per km² ed impongono quindi un ripensamento delle strategie di mercato, imposto peraltro dal forte incremento dei consumi mondiali di idrocarburi con conseguente rialzo dei prezzi.

Ottenere ulteriori riduzione di consumi ed emissioni comporta così non solo strategie di miglioramento, ma anche il superamento di alcune barriere tecnologiche, in vari settori, e quindi un grande impegno di ricerca ed ingenti investimenti. A questo riguardo, tra le principali novità tecnologiche dell'ultimo decennio abbiamo avuto:

1. Un'estesa elettrificazione dei sistemi di bordo (drive by wire, brake by wire, parzializzazione del motore, comando elettromagnetico valvole, ibridizzazione del sistema di trazione ecc.)
2. L'impiego di nuovi materiali e lo sviluppo di nuove proprietà dei materiali

² emissione media per le autovetture prodotte

classici (nanosensori, nanocatalizzatori, nanofibre, nanomagnetismo)

Nel seguito si illustreranno i concetti di base dei veicoli elettrici ibridi, proposti agli inizi del Novecento [3], e che, dopo una lunghissimo abbandono ed una fase di sviluppo durata una ventina di anni, sono da alcuni anni entrati nella fase di produzione di massa.

Gli ibridi della Toyota e della Honda

Il 25 marzo 1997 la Toyota presentò alla stampa la “Prius”, una berlina con le stesse prestazioni delle vetture tradizionali, ma con emissioni e consumi estremamente ridotti, grazie all’ibridazione del motore termico con una trasmissione elettromeccanica che comprende due macchine elettriche, un motore ed un generatore.

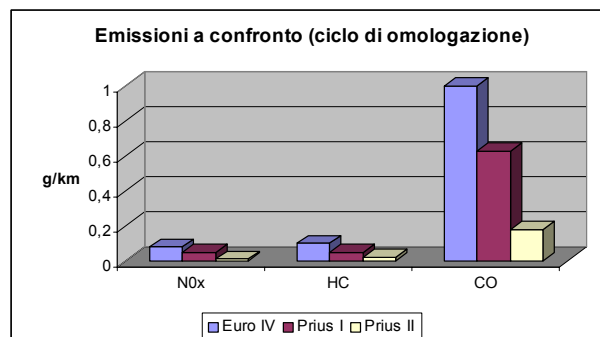


Fig. 3 Toyota Prius II

Ad oggi, sono in circolazione in tutto il mondo oltre 300.000 di queste vetture, in Fig. 3 il nuovo modello lanciato nel 2003, che offrono prestazioni di assoluto rilievo in termini di emissioni, vedi Fig.3, e di consumi. I 4.3 litri/100 km ottenuti secondo il ciclo urbano³ in effetti corrispondono già oggi a meno di 120 g/km di CO₂, che sono l’obiettivo europeo al 2012.

Alle Prius la Toyota ha poi fatto seguire altri modelli, come la Crown, l’Estima e le Lexus RX, GS ed LS Hybrid, ai vertici della loro categoria, oltre che a vendere la sua tecnologia a Ford, per l’Escape, un SUV da 4 L, ed a Nissan, per l’Altima, una berlina da 2.5 L, appena presentata sul mercato nord-americano. Come si vede, si tratta di vetture di classe superiore, ed in effetti è in questo settore che, contrariamente alle

aspettative iniziali, che si stanno affermando le autovetture ibride, grazie ai vantaggi offerti da loro offerti in termini di silenziosità, spunto, guidabilità, piuttosto che di riduzione dei consumi.



Tab. 1. Emissioni della Toyota Prius sul ciclo di omologazione europeo e corrispondenti limiti (ECE 4)

Dopo una lunga sperimentazione, anche la Honda nel Novembre 1999 avviò la produzione di serie della Insight, un coupé per il quale sono state adottate tutte le soluzioni più avanzate in termini veicolistici e motoristici, ma anche l’ibridazione del propulsore. L’IMA (Integrated Motor Assist), una macchina a magneti permanenti integrata nel volante, Fig.4 riquadro a sinistra, svolge la funzione di motorino d’avviamento, alternatore, recupero in frenata ed integratore di coppia in accelerazione. Grazie a questo complesso di soluzioni la percorrenza dichiarata per il ciclo urbano giapponese è di ben 35 km/litro [4]. Successivamente, lo stesso sistema è stato introdotto anche su berline come la Civic, che nel ciclo misto ha un consumo di 4.6 litri/100 km e la Accord, una 3 L presentata nel dicembre 2004.



Fig. 4 Civic IMA

³ SpecialAutoTechnology, FISITA Magazine, volume 5, 2005

Il lancio sul mercato di questi prodotti è stato reso possibile, oltre che dai progressi che si sono avuti nel campo degli azionamenti ed in generale dell'elettronica di potenza, soprattutto dalla disponibilità di avanzati sistemi di accumulo, in entrambi i casi batterie al nichel-idruri metallici, ad elevata potenza specifica. Infatti nel caso della Prius il peso del pacco batterie è di una trentina di kg, per le Honda, che non hanno capacità di marcia in solo elettrico, ancor meno. L'uso di sistemi di accumulo così ridotti è naturalmente possibile anche grazie all'adozione di sistemi di controllo e gestione molto sofisticati, che consentono di sfruttarne al meglio le possibilità.

Ibridi serie, parallelo, “dual mode” ed ibridi minimi

Il veicolo ibrido è così detto perché caratterizzato dalla presenza a bordo di due (o più) sorgenti di energia, in genere un convertitore di energia primaria (motore a combustione interna, turbogas, cella a combustibile) ed uno (o più) sistemi di accumulo⁴, la cui contemporanea presenza assolve a varie funzioni.

Prima di tutto, la presenza dell'accumulo offre la possibilità di recuperare l'energia dissipata durante le frenate, con risparmi dell'ordine del 20%, almeno per un uso prevalentemente urbano caratterizzato da frequenti stop-and-go, che è quello predominante per alcune tipologie di veicoli (Citycar, furgoni per consegna a domicilio, autobus, camion della nettezza urbana etc.)

Inoltre l'accumulo permette di separare le funzioni di conversione dell'energia da quelle di generazione di potenza alle ruote (funzioni che in un veicolo tradizionale devono essere soddisfatte contemporaneamente dal motore termico, che lavora a regime variabile seguendo la variabilità dei carichi imposti dalla guida). Si ottiene, in questo modo, un miglior funzionamento sia della parte conversione ottimizzata in una regione di funzionamento ristretta, sia della propulsione, che può essere gestita in modalità solo elettrica, o termica o accoppiata, in funzione della configurazione del veicolo e delle necessità di marcia.

Infine, se le batterie non sono troppo piccole, danno al mezzo la possibilità di percorrere tratte limitate in solo elettrico, con una flessibilità d'impiego maggiore sia rispetto al veicolo convenzionale che a quello “elettrico puro”, che è fortemente limitato nella maggior parte degli usi per la sua ridotta nell'autonomia

La tipologia di questi veicoli va dall'accoppiamento diretto motore termico di trazione-macchina elettrica, il cosiddetto ibrido “parallelo”, all'ibrido “serie”, con un motogeneratore distinto dal motore di trazione, generalmente applicato negli autobus e nei veicoli pesanti. La classificazione generalmente adottata comprende tre tipi di ibridi, quelli serie, quelli parallelo e quelli di tipo “split” o “dual mode”, secondo le modalità di accoppiamento del motore termico e del motore elettrico di trazione con la trasmissione alle ruote. Un particolare tipo di ibrido parallelo è poi l'ibrido “minimo”, che può essere considerato il frutto della naturale evoluzione del motore a combustione interna.

Ibridi serie

Negli ibridi serie la coppia alle ruote è fornita dal solo motore elettrico, come nei veicoli elettrici a batteria. Nella marcia a potenza ridotta il sistema di generazione alimenta il motore elettrico e, se c'è un margine, ricarica contemporaneamente le batterie, presenti in numero ridotto rispetto ad un veicolo solo elettrico; le batterie restituiscono questa energia, integrando la potenza del generatore, quando sono richiesti spunti di potenza.

In questo modo il generatore può essere dimensionato in base alla potenza media richiesta dal veicolo, che nell'uso urbano va da un quarto ad un quinto della potenza massima richiesta potenza sulla quale va invece dimensionato il motore elettrico di trazione. Anche le batterie sono dimensionate per alimentare il motore durante gli spunti di potenza e non in base all'autonomia richiesta al veicolo, come nei veicoli elettrici “puri”.

Il funzionamento a regime ottimale del gruppo di generazione consente così un livello molto ridotto di emissioni nocive, che si annullano poi quando il veicolo marcia con la sola energia accumulata dalle batterie. Con questa modalità di utilizzo l'autonomia è però ridotta, in genere 20-

⁴ In genere elettricochimico, batterie, o elettrostatico, supercondensatori, o elettromagnetico, volani.

30 km, a causa del ridotto numero di batterie installate. Poiché i primi ibridi sono stati sviluppati, a partire dai primi anni 70, ibridizzando veicoli elettrici con l'aggiunta di un motogeneratore, la prima configurazione adottata è stata proprio quella "serie", e questo ha comportato inizialmente lo sviluppo di drive-train pesanti, ingombranti e costosi, stante le caratteristiche dei motori elettrici di trazione disponibili allora e fino a una decina di anni fa. Nonostante i progressi fatti in questo campo, l'applicazione tipica di questa configurazione rimangono comunque i veicoli con disponibilità di spazio a bordo e margini di peso per l'installazione di generatore e pacco batterie, come autobus e furgoni.

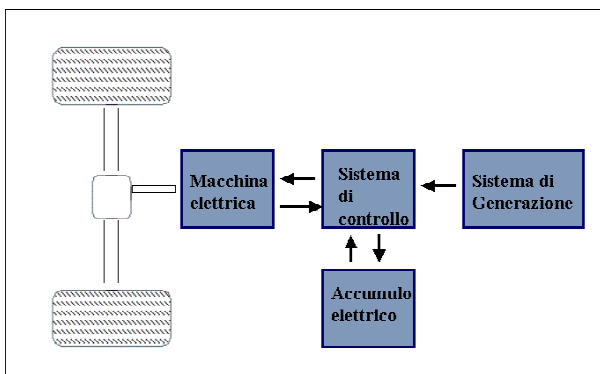


Fig. 5 Schema funzionale ibrido serie

Tra gli ibridi serie prodotti in serie, ricordiamo gli autobus ibridi realizzati dall'ALTRA (IVECO-ANSALDO) (Altrobus 12m, Altrobus da 6 m., Europolis da 7.3 m), i 7 m. di Autodromo, gli Horus di EPT, i piccoli Tecnobus.

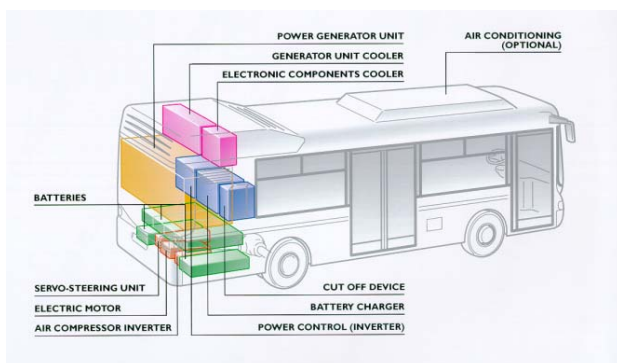


Fig. 6 Altrobus Europolis

Il monitoraggio delle emissioni dei primi mezzi di questo tipo, effettuato dall'ENEA nella seconda metà degli '90 [5], evidenziò un

dimezzamento delle emissioni rispetto all'alternativa convenzionale, a fronte di consumi all'incirca uguali, che scontavano però l'assenza, di un sistema automatico di gestione e controllo, successivamente introdotto.

Un'analoga sperimentazione condotta a New York prima dell'introduzione di una flotta di circa 300 autobus ibridi ha dato gli stessi risultati, evidenziando però costi di manutenzione superiori del 30-40% [6]. In effetti, uno dei problemi riscontrati nell'uso di questi mezzi è la loro maggiore complessità sia rispetto ai veicoli convenzionali che a quelli a batteria, complessità che si riflette nell'affidabilità e nei costi di manutenzione. Peraltro, gli autobus ibridi sono gli unici mezzi sul mercato che, quando non sia possibile ricorrere a sistemi a guida vincolata come i filobus, offrono le stesse prestazioni dei mezzi convenzionali ed in più la possibilità di marcia in solo elettrico.

L'ibrido serie, infine, anticipa una delle configurazioni possibili del veicolo con cella a combustibile e stoccaggio dell'idrogeno a bordo, in forma liquida o gassosa, con il quale le emissioni in futuro si annulleranno. Con una Fuel-Cell al posto del motogeneratore, sostituendo alla combustione un processo di ossidazione controllata dell'idrogeno ed operando a bassa temperatura, non si emettono inquinanti ma solo vapor d'acqua, e si produce energia elettrica con un rendimento superiore al 50%. Un autobus ibrido di questo tipo è stato realizzato dell'IVECO e sperimentato lungamente sul campo a Torino.



Fig. 7. Il CityClass Fuel Cell a Torino

Ibridi parallelo

Negli ibridi parallelo, sono previste due distinte motorizzazioni alle ruote, una termica e l'altra elettrica. Il motore termico è collegato alle trasmissioni mediante una frizione elettromagnetica e consente quindi la propulsione diretta del veicolo, con un migliore rendimento energetico rispetto all'ibrido serie (la catena di rendimenti è più corta). In aggiunta, una o più macchine elettriche, anch'esse inseribili e disinseribili in vari modi nella trasmissione, svolgono le funzioni di propulsione e/o di generazione. Nel funzionamento in ibrido, quindi, c'è un parallelo meccanico tra i due motori, le cui coppie si sommano in una coppia risultante alle ruote pari a quella richiesta dal guidatore. E' in genere possibile anche la marcia con il solo motore elettrico (a potenza ridotta) oppure la ricarica delle batterie, con il motore termico che, trascinando il motore elettrico oppure una seconda macchina elettrica, funziona contemporaneamente da motore di trazione e da motogeneratore. I livelli di emissione sono superiori rispetto all'ibrido serie, ma rimangono comunque ridotti in virtù del funzionamento del motore termico a regime quasi ottimale. La configurazione "parallelo", cui è sufficiente un motore elettrico di potenza ridotta al 30-40% della potenza complessiva richiesta perchè la restante potenza è fornita direttamente dal motore termico, è stata sviluppata per l'ibridizzazione di autovetture, per le quali la configurazione serie era, per così dire, meno "automobilistica".



Fig. 8 Daily MicroVett Bimodale

E' stata quindi inizialmente applicata a berline come la Civic e la Prius, potenziate da motori di cilindrata ridotta rispetto all'originale, integrati da un motore elettrico in parallelo e da un pacco batterie, ma in seguito anche ad autobus (GM) e furgoni per la consegna merci in ambito urbano come lo Sprinter della Mercedes ed il Daily, in quest'ultimo caso sia da Altra che da MicroVett. I vantaggi dell'ibrido parallelo sono la maggiore potenza specifica e la maggiore compattezza rispetto al serie, oltre ad un rendimento migliore nell'uso autostradale, dove è possibile la marcia a regime ottimale con il solo motore termico.

Ibridi dual mode

Gli ibridi di tipo "dual mode" sono veicoli a quattro ruote motrici, con due sistemi di trazione indipendenti, uno termico ed uno elettrico, utilizzati separatamente o contemporaneamente. Tale configurazione è scarsamente seguita dalle case automobilistiche perchè a fronte di una grande elasticità di funzionamento è fortemente penalizzata dai pesi e dagli ingombri di due motorizzazioni indipendenti e da un impatto ambientale che nel caso di funzionamento del solo motore termico è pari a quello di un veicolo convenzionale. Applicazioni in questo senso sono state sviluppate solo a livello prototipale dalle case automobilistiche, come la GM Precept di cui si riporta in Fig. 7 il lay-out del sistema di trazione, mentre in Italia è stata realizzata un'auto da città nell'ambito del PFT 2, con la partecipazione di Pininfarina e Piaggio per la parte veicolare e motoristica tradizionale, e dell'Università di Roma per il sistema di trazione elettrico, dell'ENEA per la caratterizzazione del sistema di accumulo.

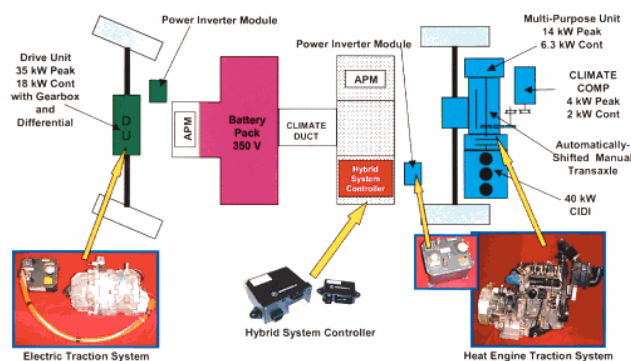


Fig. 9. Schema della GM Precept [7]

Ibrido minimo o “mild hybrid”

Oggi si sta diffondendo, come abbiamo visto, l'ibrido “minimo”, che è un ibrido parallelo concettualmente molto semplice, motorizzato da un “power pack” costituito da una motore a combustione interna accoppiato, direttamente oppure tramite una frizione elettromagnetica, con una macchina elettrica abbastanza piccola (circa 10 kW per una vettura media). Questa lavora come motore sostituendo il motorino di avviamento e per l'integrazione di coppia durante le fasi di accelerazione e come generatore sostituendo l'alternatore per ricaricare le batterie e durante il recupero in frenata. Il sistema garantisce contemporaneamente un'elevata autonomia e consumi ridotti in autostrada, grazie al motore a combustione interna (MCI), e consumi ed emissioni ridotti anche in città grazie al sistema di recupero in frenata ed alla funzione di integrazione di coppia, che permette una migliore gestione del MCI. Tutti i maggiori costruttori automobilistici hanno presentato autovetture di questo tipo, con sistemi molto compatti entrati poi in produzione come l'IMA (Integrated Motor Assist) delle Honda oppure non ancora sul mercato (Ecodrider della FIAT, Fig. 10, analoghi sistemi sviluppati per Citroen e DaimlerChrysler, per restare in ambito europeo). Alcuni sistemi come l'IMA sono integrati nel volano del motore termico, e non consentono quindi il disaccoppiamento delle due macchine, altri sistemi prevedono, invece, una frizione elettromagnetica che consentono la marcia in solo elettrico

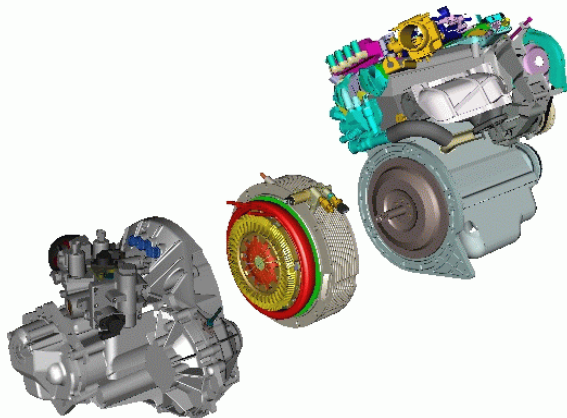


Fig. 10. Fiat Ecodrider [8]

Gli ibridi di questo tipo sono perciò una naturale evoluzione delle motorizzazioni tradizionali e sono quindi caratterizzati, rispetto a quelli serie, da una migliore adattabilità del sistema a veicoli già in produzione, di cui costituiscono versioni speciali.

Risparmio energetico ed ibridi

Vediamo più da vicino le principali ragioni della maggiore efficienza dei sistemi ibridi rispetto a quelli convenzionali.

Recupero di energia in frenata

In un veicolo la richiesta di energia durante le fasi di marcia a velocità costante (predominanti nell'uso extraurbano) dipende dalle resistenze aerodinamiche e da quella di rotolamento degli pneumatici, mentre durante le fasi di accelerazione (predominanti nell'uso urbano) dipende anche dall'inerzia del veicolo. La ripartizione dell'energia che arriva alle ruote dipende poi dal valore relativo delle diverse resistenze in gioco, funzione delle caratteristiche del veicolo e nella particolare missione considerata, ed è rappresentata in Fig. 11 con riferimento ad una autovettura di classe media, a benzina, per il ciclo urbano utilizzato dalla procedura europea di omologazione. Nella figura sono riportate anche le perdite di conversione, nel motore e nella trasmissione alle ruote, e quelle di funzionamento al minimo del motore.

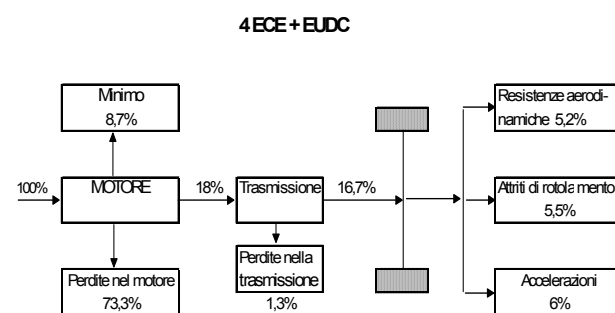


Fig. 11 Ripartizione delle perdite e degli utilizzi finali di energia per una vettura

L'energia necessaria per accelerare (6% di quella del combustibile) è pari al 35% dell'energia che arriva alle ruote (a sua volta pari a solo il 16.7% di quella del combustibile), e questo nonostante la presenza di un lungo tratto in extraurbano.

Considerando invece un ciclo composto dalla sola parte urbana, quasi la metà dell'energia che arriva alle ruote è necessaria per accelerare, ed in un veicolo tradizionale viene quindi dissipata completamente durante le frenature meccaniche. In un ibrido, invece, con un rendimento di generazione durante il recupero del 70% ed un rendimento di carica e scarica delle batterie ugualmente del 70%, l'energia restituita al motore in fase di accelerazione è, a meno delle perdite dovute alla necessità di una frenatura meccanica residua, la metà di quella resa disponibile dalla frenata, 1/4 circa dell'energia necessaria alla marcia; questo valore risulta confermato dalle prove al banco a rulli dell'ENEA di un Altrobus da 6 m, dove si è calcolato un recupero di energia pari al 15% di quella totale generata, energia restituita dalle batterie al motore elettrico [9]. Misurazioni effettuate a bordo degli autobus urbani ibridi hanno dato risultati anche migliori, perché, a fronte di un fabbisogno energetico medio, al lordo dei recuperi di energia, pari a 1.8 kWh/km, il fabbisogno effettivo, al netto dei recuperi, si riduce a 1.4 kWh/km, il 22 % in meno [5].

Ottimizzazione del rendimento del motore primo

Durante i cicli urbani la variabilità del regime del motore è massima, con rendimenti ridotti ed emissioni rilevanti. Infatti il consumo specifico di un motore varia al variare della coppia e del numero di giri, ed in città è molto frequente la marcia a potenza ridotta, con consumi specifici molto elevati. I frequenti transitori, poi, se non influiscono più di tanto sui consumi, pesano molto dal punto di vista delle emissioni, specialmente quando il motore è freddo ed è quindi necessario arricchire la miscela.

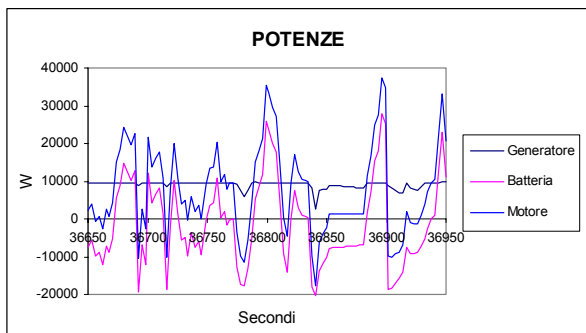


Fig. 12 Andamento dei flussi di potenza in un autobus ibrido, ciclo ECE [11]

Come può vedersi dal diagramma in Fig. 12, la presenza dell'accumulo consente di livellare quasi completamente l'erogazione di potenza del generatore, che nel caso ideale dovrebbe porsi al valor medio della potenza del ciclo, lasciando alle batterie i picchi di potenza positivi (fasi di accelerazione) e negativi (recupero in frenata). E' così possibile adoperare un motore termico di potenza molto ridotta rispetto alla potenza massima alle ruote (in un autobus da 12 m, ad esempio, è sufficiente un motogeneratore da 30 kW rispetto ai 128 kW sulla trazione) con riduzione del peso, dei consumi e delle emissioni, e farlo funzionare nell'intorno dei punti di ottimo rendimento.

Anche nel caso dell'accoppiamento meccanico dei due motori (ibrido parallelo) è possibile adottare un motore termico più piccolo grazie alle caratteristiche di coppia complementari delle macchine termiche (coppia massima ai 2/3 del regime di rotazione massimo) e di quelle elettriche (coppia massima da fermo). In questo modo, con motori molto piccoli sono possibili elevate coppie all'avviamento (130 Nm nella Insight con un motore da 1 litro di cilindrata) Fig. 13, coniugando di nuovo consumi ed emissioni ridotte con le prestazioni che offrirebbe un motore più grande.

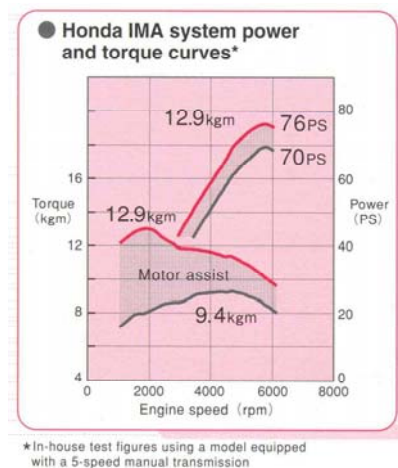


Fig. 13. Curve caratteristiche del motore Honda utilizzato sulla Insight [5]

L'ibridazione consente poi di evitare, in tutte le partenze dell'auto, e quindi anche a freddo, il funzionamento in potenza del motore termico, grazie alla possibilità di marcia a bassa velocità con la macchina elettrica e questo contribuisce a ridurre radicalmente le emissioni.

Strategie di gestione

Circa le modalità di gestione, che sono fondamentali per l'ottenimento dei benefici sopra indicati, nell'ibrido parallelo il motore termico viene collegato direttamente alla trasmissione quando la velocità supera un valore minimo, ad esempio 20-25 km/h.

Nell'ibrido serie, invece, per la gestione del generatore sono seguite due strategie principali, quella on-off e quella ad inseguimento del carico. Nella strategia on-off il livello di potenza è fisso, e l'adattamento della energia generata a quella cumulativamente richiesta avviene spegnendo e riaccendendo il generatore. Nell'altra strategia, la potenza del generatore si adatta alla potenza media assorbita dal veicolo, con un gradiente molto più dolce che in un motore collegato direttamente alla trasmissione, sempre per evitare transitori tali da pregiudicare i profili di emissione. In un ibrido serie con generatore costituito da una pila a combustibile, che non emette, la strategia ad inseguimento del carico è evidentemente quella preferibile,

In tutti i casi è molto importante lo studio di strategie di gestione e la disponibilità di sistemi di controllo ottimizzati alle particolari modalità operative del veicolo, soprattutto per la gestione dei flussi di potenza tra generatore, batterie e motore. Le prove al banco [10] [11] hanno da tempo dimostrato, infatti, come il consumo specifico di un veicolo ibrido può variare del $\pm 20\%$ in funzione del livello di potenza prescelto per il sistema di generazione e del punto di funzionamento del sistema di accumulo. Il perseguimento dei vari obiettivi di gestione dei flussi energetici a bordo dell'ibrido può essere implementato con diversi livelli di complessità e di efficienza. In generale, si cercano oggi di utilizzare tecniche di gestione ad anello chiuso dello stato di carica. Le tecniche di questo tipo si basano su un profilo fisso dello stato di carica, compreso generalmente tra il 60% ed il 90% dello stato di carica iniziale, che non consente di ottimizzare pienamente il consumo energetico al variare delle condizioni ambientali e di carico. Volendo superare questo limite, è possibile variare il profilo dello stato di carica durante la missione su base giornaliera, settimanale, mensile o stagionale per adattarlo alle variazioni delle condizioni ambientali e di carico. Ciò richiede una previsione del fabbisogno energetico, che

può essere ottenuta per via statistica o per mezzo di reti neurali [12].

Conclusioni

La storia degli ibridi inizia da lontano, quando, agli inizi del Novecento, la tecnologia automobilistica vedeva molte soluzioni tra di loro radicalmente diverse (vapore, elettricità, motori a combustione interna etc), in concorrenza sul mercato. Lo sviluppo dell'industria automobilistica ci ha poi insegnato che, perchè una soluzione si affermi occorre che siano soddisfatte tre condizioni : facilità e versatilità d'uso, disponibilità di infrastrutture, costi accettabili. Il concorrere di tutte queste condizioni ha determinato il successo del motore a combustione interna alimentato a combustibili liquidi. Anche adesso che i vincoli esterni di carattere ambientale impongono limiti sempre più stretti non solo sulle emissioni ma anche sui consumi, non vengono meno le ragioni alla base delle tre condizioni prima elencate. L'ibrido minimo soddisfa oggi tanto queste condizioni, quanto i vincoli esterni più severi stabiliti per questo primo decennio del secolo. Di conseguenza, anche se a lungo termine la soluzione della pila a combustibile con stoccaggio dell'idrogeno a bordo (in sistemi d'accumulo purtroppo non ancora disponibili per tutte le applicazioni) offrirà ineguagliabili vantaggi in termini non solo ambientali, ma anche di semplicità realizzativa e quindi di costi complessivi, è pensabile che in tutti i casi in cui si imponga una particolare rispetto dell'ambiente sarà la tecnologia dell'ibrido a coprire il gap temporale che ci si prospetta. Dal punto di vista dei componenti principali, del resto, il veicolo con celle a combustibile è comunque un veicolo a trazione elettrica con generazione a bordo dell'energia primaria ed ha così tante parti in comune con l'ibrido che si pone come una tipologia particolare di ibrido, che abbia o no un accumulo a bordo; di conseguenza si avvantaggerà sicuramente di tutti i progressi conseguiti nello sviluppo della tecnologia di ibridazione (azionamenti, elettronica di potenza, sistemi di controllo).

Tra i fattori che ostacolano l'introduzione dell'ibrido, va comunque considerata una naturale tendenza delle aziende a rigettare quanto si allontana dalla sua specifica cultura industriale, come ad esempio nell'America del Nord con il

diesel automobilistico o, appunto, in Europa nei riguardi delle motorizzazioni ibride con alimentazione a benzina.

Nell'uso privato la soluzione innovativa più promettente è l'ibrido minimo, sia per le autovetture che per i veicoli commerciali, trainato in quest'ultimo caso anche dalla necessità di modernizzare il parco circolante in città, che è diventato una delle principali fonti di inquinamento da particolato.. V'è osservato infine che buona parte degli autobus e filobus innovativi disponibili sul mercato europeo sono quelli prodotti dalle aziende italiane, che hanno conquistato una posizione di preminenza nel settore, con veicoli come il Gulliver della Tecnobus e il Cavis dell'IVECO.

Il potenziamento delle attività di ricerca e sviluppo in questo settore è quindi certo, e nel corso dei prossimi anni assisteremo ad un rapidissimo sviluppo di questa tecnologia, sicuramente oggi una attività di frontiera della ricerca in campo automobilistico.

Riferimenti nel testo

[1] "Future Gasoline and Diesel Engines", M.L. Monaghan, Ricardo Consulting, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress

[2] "Monitoring of ACEA's Commitment on CO2 Emission Reductions from Passenger Cars (2002). Final Report", 2003 Joint Report of the European Automobile Manufacturers Association and the Commission Services

[3] "Hybrids: Then and Now", Victor Wouk, IEEE Spectrum, July 1995

[4] Honda Insight, Press Information, September 1999

[5] "La flotta ibrida di Terni : misure e risultati", M.Conti, V. Leonelli, M. Pallacordi, R. Ragona, ENEA

[6] "New York City Transit Diesel Hybrid-Electric Buses: Final Results" DOE/NREL Transit Bus Evaluation Project, 2002

[7] "More details on GM Precept, GM's PNGV", SAE Autom. Magaz., Marzo 2000

[8] "Fuel Economy Technologies in 2000's Vehicles", G.Rovera, CRF, G. Pede, ENEA, ATA Ingegneria Automotoristica, Marzo 1999.

[9] "Control of series Hybrid Electric Vehicles : algorithms and experimental test", M.Ceraolo, E.Rossi, G.Pede, EVS-17, Montreal, 2000

[10] "Vehicle testing in ENEA drive train test facilities", G.Lo Bianco, G.Pede, A.Puccetti, E.Rossi, ENEA, G. Mantovani, ALTRA. SAE Conference, San Diego, 1999

[11] "Control Experiences And Energetic Optimization Studies For A Series Hybrid Electric Vehicle", Manlio Pasquali, Giovanni Pede, Ennio Rossi, ENEA, Massimo Ceraolo, Stefano Barsali, University of Pisa, FISITA 2006, Yokohama

[12] "Gestione energetica del veicolo ibrido", Prof. Alfio Consoli, Un. di Catania Luglio 1997