



Università degli studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali

Tesi di Laurea di Primo Livello

DALLE FUEL CELLS ALLA POTENZA SU STRADA

Laureando: Bertasi Andrea

Relatori: Prof. Mozzon Mirto

Prof. Rino A. Michelin

Anno accademico: 2011-2012

INDICE

Introduzione.....	3
Capitolo1: L' idrogeno.....	5
Capitolo2: Stoccaggio e trasporto dell' idrogeno.....	7
Capitolo3: Dalle Fuel cells alle ruote in campo automobilistico.....	20
Capitolo 4: Motori elettrici realizzabili per la trazione.....	40
Conclusioni.....	52
Bibliografia.....	54

INTRODUZIONE

Temi attuali quali il progressivo esaurimento delle riserve di combustibili fossili e il contestuale aumento del fabbisogno energetico globale, il “caro petrolio”, l’inquinamento e i cambiamenti climatici del pianeta sono ormai da diversi anni al centro di dibattiti internazionali; in particolare l’aumento incondizionato dei prezzi dei carburanti e la necessità di ridurre le emissioni dei “gas serra” stanno spingendo rapidamente alla ricerca e alla sperimentazione di fonti energetiche alternative rinnovabili, a basso costo e a minor impatto ambientale.

Uno degli ambiti industriali fortemente influenzato dalla questione energetica è il mondo automobilistico, che sta attraversando una fase critica essendo le vendite a livello internazionale attualmente in calo; oggi infatti l’automobile è considerata dal cliente medio un mezzo dispendioso e poco rispettoso dell’ambiente. Vi è inoltre un progressivo cambiamento delle necessità degli utenti, che si traduce in una ricerca di vetture diverse e innovative. A fronte di costi di mantenimento sempre più elevati, la maggioranza degli utenti richiede vetture “pulite” da un punto di vista delle emissioni nocive e “poco assetate di carburante”, senza però fare a meno delle prestazioni e del piacere di guida delle tradizionali automobili.

Di recente quindi sta diventando sempre più importante il concetto di mobilità sostenibile, che si basa sull’uso di veicoli a combustibile alternativo; in tale ottica di sviluppo, da diversi anni le case automobilistiche più avanzate stanno compiendo enormi progressi, proponendo vetture sempre più eco-compatibili. Al giorno d’oggi sono in circolazione le prime automobili alimentate a bioetanolo, biodiesel, combustibili sintetici, oppure veicoli elettrici o ibridi, i quali associano a un motore tradizionale a combustibile fossile uno o più motori elettrici per regolarizzare il funzionamento del veicolo e ridurre il consumo di carburante. Tali soluzioni sono alternative interessanti alle vetture tradizionali, ma non risolvono il problema della dipendenza dalle fonti non rinnovabili (combustibili fossili) e delle elevate emissioni di gas inquinanti; inoltre il loro utilizzo comporta alcuni svantaggi, tra i quali si può citare, ad esempio, il problema del disboscamento delle foreste equatoriali per ricavare canna da zucchero, materia prima per la produzione del bioetanolo. In tale contesto, negli ultimi anni l’idrogeno ha

suscitato un notevole interesse come risorsa energetica del futuro e fonte di energia pulita, e ha stimolato fortemente la ricerca e la sperimentazione di tecnologie adatte al suo utilizzo. Questa sostanza è infatti un vettore energetico notevole, avendo una densità energetica superiore a qualsiasi altro combustibile noto; è quindi il miglior sistema di accumulo attualmente disponibile sul mercato. Il primo obiettivo quindi da raggiungere è lo sviluppo e l'applicazione di tali metodi alternativi di produzione, che possano generare idrogeno pulito e non inquinante, e competitivi da un punto di vista economico. Un altro problema non secondario da tener presente è la difficoltà dell'immagazzinamento e del trasporto dell'idrogeno, ostacolo che finora ne ha limitato notevolmente l'utilizzo; la messa a punto di tecniche innovative di stoccaggio fanno però intravedere una soluzione non molto remota a tali problemi. Per l'impiego dell'idrogeno nel settore automobilistico, si sono prospettate due alternative di utilizzo come propellente: nei motori a combustione interna o nelle celle a combustibile. Il motore a combustione interna di idrogeno è la soluzione più semplicemente realizzabile, poiché le tecnologie necessarie per la realizzazione di una vettura funzionante con tale principio sono già consolidate e disponibili. Anche se questa alternativa ha il pregio di liberare la città dalla maggioranza delle sostanze nocive prodotte dalle vetture tradizionali, e quindi di migliorare la qualità dell'ambiente urbano, non si riesce ancora a sfruttare pienamente l'efficienza di tale risorsa. Essendo infatti la combustione, come noto, un processo termodinamicamente irreversibile, si ha comunque un basso rendimento energetico di conversione e del motore nel suo complesso.

La seconda possibilità è utilizzare l'idrogeno nelle celle a combustibile, dispositivi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (tipicamente idrogeno o metano) in energia elettrica, acqua e calore, senza l'ausilio di un ciclo intermedio e dei relativi sistemi meccanici di funzionamento (es. frizione e rapporti); come conseguenza i rendimenti di conversione di tali sistemi energetici sono molto alti, ovvero l'efficienza energetica è elevata, oltre a garantire una notevole silenziosità dovuta essenzialmente all'assenza di organi rotanti. Anche questa tecnologia non è però pienamente sviluppata e necessita di ulteriori studi per risolvere aspetti quali la durata delle celle, lo smaltimento del calore di processo e il costo non indifferente di tali dispositivi.

Tematiche discusse in questa tesi:

- Problematiche relative allo stoccaggio, trasporto e distribuzione dell' idrogeno come vettore energetico.
- L' utilizzo di idrogeno come propellente automobilistico nei motori a combustione interna e nelle celle a combustibile.
- Metodi e tecnologie per passare dall' energia elettrica prodotta dalle fuel cells alla potenza meccanica trasmessa su strada dagli autoveicoli.

CAPITOLO 1

L' idrogeno

L' idrogeno è il più diffuso fra tutti gli elementi presenti sul pianeta, ma esso è quasi sempre legato ad altri elementi. La sua molecola (H_2) è formata da due atomi di idrogeno. Non si deve cadere nell' errore di considerare l' idrogeno come una fonte energetica. In realtà l' idrogeno si ottiene da altre fonti mediante particolari processi, quindi la sua funzione è più propriamente quella di “vettore energetico”.

Quando si produce l' energia elettrica in modo tradizionale, essa deve essere utilizzata immediatamente oppure può servire per ricaricare accumulatori (batterie) che però sarebbero troppo ingombranti nel caso se ne volesse immagazzinare molta. Il problema fondamentale delle centrali elettriche è quello di adeguare continuamente il loro regime di funzionamento al carico di potenza elettrica richiesta a valle, che corrisponde alla sommatoria di tutti gli utilizzi. L' idrogeno avrebbe una funzione fondamentale come volano energetico. L' energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili potrebbe essere facilmente conservata nell' idrogeno in forma di energia chimica quando serve, per poi essere consumata nel momento di necessità.

Questo gas, attraverso le celle a combustibile, può infatti restituire energia in forma “elettrica” ove e quando essa è necessaria, perché può essere trasportato. Impiegare l' idrogeno come combustibile sarebbe importantissimo sia per la sua enorme disponibilità (lo si può ottenere dall' acqua), sia considerando le esigenze ambientali. La sua caratteristica più evidente, in relazione all' ambiente, consiste nel fatto che la sua composizione chimica non contiene nessun atomo di carbonio. Con l' idrogeno, l' umanità, per la prima volta nella sua storia, potrebbe impiegare un combustibile in

grado di fornire energia senza rilasciare né l'ossido di carbonio (CO) né l'anidride carbonica (CO₂).

L'idrogeno è presente nel sole per il 90% e lo spettro della luce emessa dalle stelle ci dice che esso è l'elemento più presente nell'universo. Esso costituisce il 75% della biosfera terrestre ma sul nostro pianeta non è diffuso allo stato puro perché la forza gravitazionale non trattiene le sue molecole che sono molto leggere. L'idrogeno si può reperire isolato solo nelle zone vulcaniche, in alcuni siti petroliferi, anche se in piccole quantità, e ad una altezza di 100km. Altrimenti è sempre combinato con l'ossigeno nell'acqua (11.2% in peso) oppure lo si trova legato con il carbonio e con alcuni altri elementi.

È un buon conduttore del calore e dell'elettricità e presenta la tendenza ad essere "adsorbito" da alcuni metalli ("adsorbimento" significa che un gas può diffondersi nel reticolo cristallino di alcuni metalli e reagire reversibilmente con i loro atomi formando idruri metallici). L'idrogeno, rispetto a tutti gli altri combustibili, ha il più alto contenuto energetico, in relazione alla massa. Per produrre l'energia ottenibile da 1 kg di idrogeno occorrono 2,8 kg di benzina oppure 2,1 kg di gas naturale.

Nella seguente tabella sono messi a confronto i valori di energia dei principali combustibili impiegati nei trasporti:

	Idrogeno	Metano	Benzina	Gasolio	GPL	Metanolo
Contenuto di energia per unità di massa (MJ/kg)	119,90	49,89	44,48	42,6	46,44	19,85
Contenuto di energia per unità di volume (MJ/l)	8,47(liq.)	20,88(liq.)	31,15	35,7	25,50	15,88

Tabella 1. Valori energetici dei principali combustibili impiegabili nei trasporti.

Il processo più comune per la produzione di idrogeno è l'elettrolisi, che divide l'acqua nei due componenti idrogeno ed ossigeno.

CAPITOLO 2

Stoccaggio dell' idrogeno

Dopo aver prodotto l' idrogeno con l' elettrolisi, o uno degli altri processi possibili, deve essere reso disponibile sul territorio che ne richiede l' utilizzo. E' quindi necessario risolvere il problema del suo trasporto, del suo stoccaggio e della sua erogazione. Queste sono problematiche di rilevante importanza, di studio e di sperimentazione attuale. Forse non tutti sanno che già oggi esiste una rete di distribuzione molto capillare di idrogeno per impieghi industriali e civili.

Le aziende produttrici di gas tecnici sono presenti in quasi tutte le città europee con propri uffici commerciali e grandi depositi di gas fra cui l' idrogeno. La consegna al cliente avviene mediante le classiche bombole in acciaio di forma allungata.

In questo capitolo saranno presi in considerazione sia sistemi di accumulo per lo spostamento di grandi quantità di idrogeno sia quelli necessari per stoccare questo gas sui veicoli (automobili, autobus, scooter, biciclette, minibus..).



Figura 1. Prototipo ad idrogeno realizzato dalla casa costruttrice BMW.

In generale i metodi per accumulare l' idrogeno sono completamente diversi se le distanze da percorrere per movimentarlo sono dell' ordine di migliaia di chilometri con le navi oppure se si deve coprire al massimo qualche centinaio di chilometri con i camion. Nel caso di grandi trasporti prevale la necessità di stoccare la massima quantità possibile. Invece per i serbatoi della auto a idrogeno diventano importanti alcuni tipici fattori come l' ingombro, la leggerezza, i costi e ovviamente la sicurezza.

L' idrogeno può essere immagazzinato nelle seguenti forme:

1. Allo stato gassoso compresso;
2. Allo stato liquido;
3. Idruri metallici;
4. Nanostrutture di carbonio;
5. All' interno di microsfele di cristallo;
6. Altri metodi;

Le prime tre soluzioni sono adatte sia per gli impianti stazionari destinati alla produzione di energia elettrica che per gli autoveicoli. La fase di stoccaggio richiede sempre l' impiego di compressori per portare l' idrogeno al valore di pressione più adatto per un certo sistema di accumulo. Gli altri sistemi indicati (idruri chimici, nanostrutture di carbonio e microsfele) sono invece preferibili nel caso in cui si debba mantenere l' idrogeno accumulato in un determinato luogo per molto tempo. In linea generale essi non sono quindi da considerare molto interessanti per i veicoli, fatta eccezione per le nano strutture di carbonio che però sono oggetto di ricerche troppo recenti per poter pensare ad un loro impiego pratico oggi.

1.Idrogeno allo stato gassoso compresso

L' idrogeno può essere immagazzinato allo stato gassoso compresso all' interno di bombole che vengono poste all' aperto in zone protette oppure raccolte in magazzini, a livello del terreno o interrati. Il gas viene portato in pressione mediante un compressore e immesso in bombole del tipo speciale di forma cilindrica, molto resistenti. Dopo la fase di compressione la pressione dell' idrogeno è normalmente 200-250 bar.

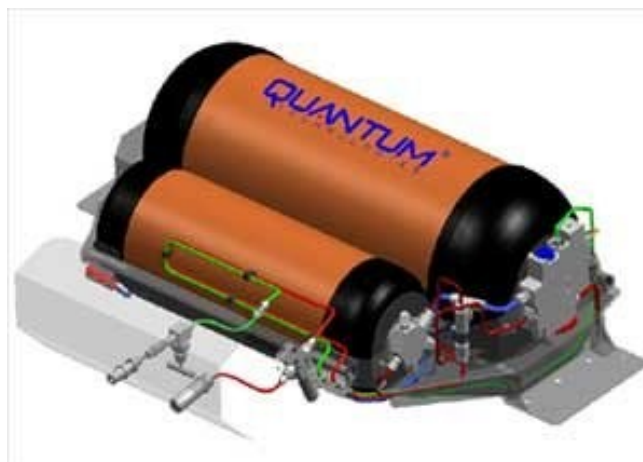


Figura 2. Prototipo di serbatoio (bambola) contenente idrogeno allo stato gassoso compresso.

Il lavoro teorico di compressione per un processo isoterma è:

$$L_t = R_{H_2} T Z \ln(p_2/p_1)$$

dove R_{H_2} è la costante del gas, T la temperatura assoluta, Z il fattore di comprimibilità, p_2 e p_1 la pressione finale e iniziale rispettivamente. La relazione logaritmica mostra come sia necessario lo stesso lavoro per portare il gas da 0,1 a 1 MPa e da 1 a 10 MPa; quindi è il livello iniziale di pressione che influisce sull'energia necessaria e quindi sui costi di compressione.

Per la compressione si utilizzano compressori alternativi a pistoni, rotativi e turbomacchine (centrifughe e assiali), la cui tecnologia è simile a quella impiegata per la compressione del metano, anche se con le peculiarità dell'idrogeno (necessità di pressioni maggiori di compressione a causa della minore densità energetica volumetrica dell'idrogeno).

I serbatoi usati per lo stoccaggio sono normalmente in alluminio o in fibra di vetro o polimeri con fibra di carbonio (o kevlar), per garantire una resistenza molto elevata alla pressione.

Per garantire buone prestazioni ai veicoli occorre quindi concentrare una grande quantità di gas in volumi ridotti anche perché sulle vetture il problema dello spazio è sempre critico. Nello stesso tempo i serbatoi devono garantire la massima sicurezza. Le prestazioni e l'autonomia dei veicoli richiedono di poter accumulare a bordo da 2 a 4 kg di idrogeno. La robustezza dei serbatoi, l'introduzione di fusibili antiscoppio in caso di incendio e l'adozione di valvole di interruzione del circuito in caso di urto rendono ormai molto sicuro lo stoccaggio dell'idrogeno compresso a bordo veicolo.

2. Idrogeno allo stato liquido

L'idrogeno allo stato liquido è stabile alla temperatura di $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per poter essere mantenuto in questo stato fisico deve essere contenuto in serbatoi particolari di tipo speciale. Essi si definiscono criogeni (generatori di freddo) e presentano una zona a doppia parete all'interno della quale viene fatto il vuoto.



Figura 3. Contenitore criogeno.

Accumulare l' idrogeno allo stato liquido permette, a parità di ingombro geometrico del serbatoio, di trasportare un quantitativo di energia nettamente superiore rispetto allo stato gassoso. Questa soluzione potrebbe soddisfare al meglio le esigenze di autonomia dell' autotrazione a idrogeno. Finora però tale tecnica non è ancora molto diffusa, perché esistono alcuni ostacoli peraltro in via di superamento. Innanzitutto la complessità tecnologica della gestione dell' idrogeno liquido, non solo per quanto riguarda gli impianti necessari per il raffreddamento a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, ma anche per le fasi di distribuzione e rifornimento che rimangono molto delicate dal punto di vista della sicurezza. Inoltre i costi complessivi per portare e mantenere il gas allo stato liquido che sono superiori rispetto alla soluzione "a idrogeno compresso". In aggiunta il costo energetico della liquefazione, occorre anche disporre di speciali attrezzature per il mantenimento della temperatura al valore necessario. La spesa di energia per la liquefazione dell' idrogeno corrisponde a quasi il 30% del contenuto energetico del combustibile, valore molto superiore al 6-8% che rappresenta il costo energetico per comprimere l' idrogeno ad una pressione di 350 bar. La ricerca va nella direzione di ridurre ulteriormente i costi della liquefazione del gas e di contenere quella piccola percentuale di perdita per evaporazione che si ha. Il problema delle perdite nello stoccaggio dell' idrogeno liquido è dovuto al fatto che il gas viene immagazzinato alla temperatura di $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, che corrisponde al suo punto di ebollizione. Qualsiasi causa di innalzamento, anche minimo, della temperatura provoca l' evaporazione di una piccola parte dell' idrogeno. In questa precaria condizione di equilibrio termico, una fonte di

calore responsabile dell' evaporazione potrebbe essere anche un semplice riscaldamento dovuto all' azione di pompaggio durante il processo di liquefazione. Oppure anche un apporto di calore, anche molto lieve, per conduzione, convezione o irraggiamento diretto sulla bombola. Recentemente l' architettura di nuovi speciali contenitori criogeni isolati termicamente ha risolto quasi del tutto questo problema. Per prevenire l' irraggiamento diretto di calore tra la parete interna e quella esterna del serbatoio, la superficie del serbatoio viene coibentata (isolata termicamente) con superfici a base di plastica speciale e alluminio. Lo stoccaggio a bordo dell' idrogeno allo stato liquido potrebbe sembrare uno dei metodi più adatti per i veicoli. In questo caso è fondamentale anche la sfera della sicurezza che è assicurata da speciali sensori a fibra ottica e valvole che sono in grado di controllare e annullare ogni tipo di rischio.

3.Idruri metallici

Un sistema di stoccaggio, molto interessante per gli impieghi veicolare, è quello basato sull' attitudine dell' idrogeno a legarsi chimicamente con diversi metalli e leghe metalliche, formando idruri. Gli idruri di metallo sono dei composti solidi che si formano quando l' idrogeno si diffonde nello spazio interatomico di un metallo.

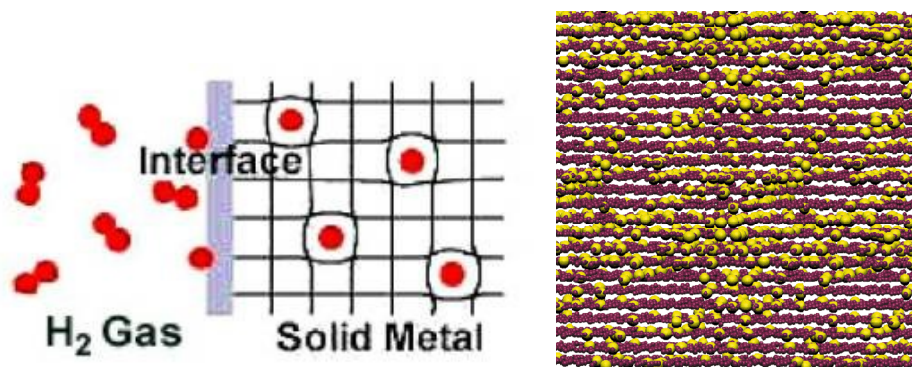


Figura 4. Esempio di diffusione dell' idrogeno nel reticolo cristallino.

Per ottenere questi composti occorre inviare l' idrogeno in pressione all' interno del reticolo cristallino in modo che esso vada ad occupare gli spazi interstiziali. L' operazione è possibile a pressioni relativamente basse. Gli idruri si formano per reazione chimica dopo l' adsorbimento dell' idrogeno nel metallo. Il gas verrà poi restituito nella fase di rilascio. La formazione dell' idruro (fase di idrogenazione) avviene con produzione di calore, quindi richiede un raffreddamento. Il successivo

rilascio di idrogeno, che è indispensabile per utilizzare il gas così stoccato (fase di deidrogenazione) richiede calore. Durante il caricamento l' idrogeno si diffonde nel metallo e comincia a legarsi chimicamente con esso. In questa fase, la pressione operativa (abbastanza bassa) può rimanere costante fino a che il serbatoio raggiunge il 90% della sua capacità di immagazzinamento. Per raggiungere il 100% dell' assorbimento di idrogeno nel metallo è necessario aumentare la pressione. Durante la fase di formazione dell' idruro l' asportazione del calore prodotto dalla reazione deve essere assicurata in modo continuo per evitare che il sistema aumenti eccessivamente la sua temperatura e possa infiammarsi. Nella successiva fase di deidrogenazione, il legame formatosi tra il metallo e l' idrogeno si rompe e viene rilasciato idrogeno puro. Ciò si ottiene semplicemente fornendo calore. Anche in questa fase però la temperatura deve essere sempre mantenuta sotto controllo. In seguito, quando il livello di idrogeno rimasto nel serbatoio è di circa il 10%, la temperatura può essere stabilizzata fino ad essere ridotta del tutto. L' ultima frazione residua del gas è molto difficile da liberare. Nel normale ciclo di carico e scarico di solito essa non viene recuperata. I valori di temperatura e di pressione ai quali avvengono queste reazioni dipendono dalla composizione dell' idruro.

La durata delle fasi di rifornimento è di qualche minuto e avviene fra i 25 e i 100 bar di pressione (quindi con spesa energetica di compressione più contenuta di quella dell' accumulo gassoso).

La costruzione dei serbatoi di idrogeno ad idruri metallici richiede alcuni accorgimenti. L' idruro deve avere una superficie abbastanza grande per favorire gli scambi termici in modo che le fasi di idrogenazione e deidrogenazione avvengano ad una velocità accettabile. La quantità di calore richiesta dal processo dipende dal tipo di metallo che costituisce l' idruro ma deve essere assicurata in tutte le fasi. Nel caso dei veicoli ad idrogeno e fuel cells, il calore necessario per le operazioni di scarico degli idruri può essere ricavato, almeno in parte, dalle stesse celle a combustibile che durante il loro funzionamento vanno sempre raffreddate. L' impiego di questo calore permette di gestire alcuni tipi di serbatoi ad idruri recuperando l' energia che altrimenti andrebbe sprecata.

I valori di densità energetica (energia disponibile per unità di volume occupato dal serbatoio) sono nettamente migliori rispetto all' accumulo gassoso a 700 bar e sono paragonabili a quelli dell' idrogeno liquido. A parità di energia disponibile, il volume di stoccaggio può ridursi fino a circa un terzo rispetto a quello del gas in forma compressa. Questa opportunità di disporre di un elevata quantità di idrogeno per unità

di volume è molto importante ai fini dell'impiego di tali serbatoi a bordo delle autovetture. Oltre al problema del contenuto del volume occupato dai serbatoi, in un'auto è molto importante limitarne il peso che, nel caso dei serbatoi a idruri metallici, dipende dal metallo che viene scelto per adsorbire il gas e per generare l'idruro.

Per citare una applicazione pratica, gli scooter a idrogeno e fuel cells dotati di serbatoio a idruri metallici sono in avanzato stato di sperimentazione presso l'Università di Padova.

I vantaggi generali di questa tecnologia sono: convenienza economica, ingombro ridotto, stabilità dello stoccaggio e, fattore molto importante, sicurezza dovuta alle basse pressioni dell'idrogeno.

4.Idruri chimici

Si tratta di sistema valido soprattutto per tempi di stoccaggio molto lunghi (>100 giorni), in quanto sfrutta una reazione reversibile di idrogenazione usando composti liquidi a temperatura e pressione ambientale e quindi facilmente trasportabili e immagazzinabili. I rischi connessi con l'uso di questi vettori non sono diversi da quelli dei normali carburanti come la benzina o il metano.

5.Sfere speciali a reazione chimica

Tra gli altri metodi chimici, si stanno studiando sistemi basati sulla possibilità di trattenere l'idrogeno in piccole sfere di plastica che contengono idruro di sodio (NaH) allo stato di polvere. Se queste sfere vengono rotte nell'acqua in modo che la polvere di idruro di sodio reagisca chimicamente con essa, viene rilasciato idrogeno mentre il sodio viene recuperato sottoforma di idrossido di sodio.

Per produrre 1 kg di idrogeno sono necessari 12 kg di polvere di idruro di sodio.

6.Microsfere di cristallo

Un'ulteriore possibilità di stoccaggio potrebbe essere quella delle microsfere di cristallo. Si tratta di piccole sfere di cristallo vuote con diametro variabile da 30 a 500 micron con spessore della cresta di 1 micron. Le sfere possono essere agevolmente trasportate perché hanno la consistenza della polvere. Vengono poi messe in opera fissandole su supporti, e possono immagazzinare idrogeno se sottoposte ad alta pressione. L'idrogeno viene adsorbito nelle microsfere vuote in un ambiente a temperature elevata attraverso la superficie di cristallo che diventa permeabile al gas

per effetto termico (in questa fase la temperatura varia da 200 °C a 400 °C). Quando la pressione all' interno delle microsfele ha lo stesso valore di quella esterna, la fase di caricamento delle sfere è conclusa. A questo punto le microsfele raffreddano a temperatura ambiente, trattenendo l' idrogeno e così possono essere trasportate sui veicoli per assicurare il combustibile. Nella fase dell' utilizzo dell' idrogeno, esse vengono riscaldate e il gas viene liberato. Le microsfele possono essere riutilizzate più volte. Per il processo occorre energia termica, quindi bisogna tenere conto di un piccolo costo energetico. Anche questa metodologia, per ora allo stadio sperimentale, un giorno potrà essere conveniente per immagazzinare l' idrogeno sui veicoli. La spesa energetica è più contenuta rispetto agli idruri di metallo, la tecnologia è molto sicura e non esistono rischi di perdite di idrogeno, anche nel caso in cui le microsfele vengano esposte all' aria.

7. Le nano strutture di carbonio

A partire dagli anni '90 un crescente interesse è stato rivolto allo studio e all' applicazione in vari settori di nano strutture di carbonio, particolari forme allotropiche di tale elemento, somiglianti a fogli di grafite ripiegati su se stessi e dotati di notevoli caratteristiche meccaniche, chimiche e fisiche.

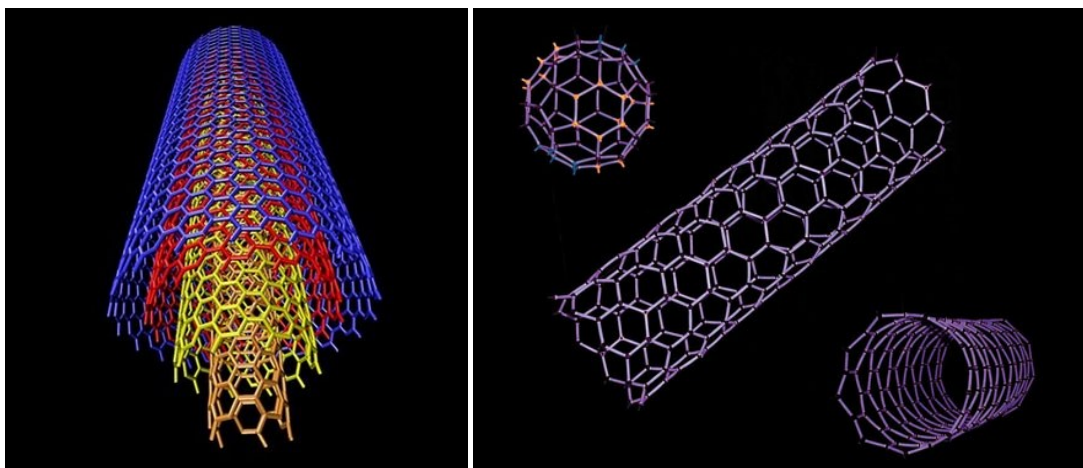


Figura 5. Esempio di nano strutture di carbonio.

In particolare, secondo certi gruppi di ricerca alcune nano strutture di carbonio quali nanofibre, nano tubi e strutture poliedriche caratterizzate da un' area superficiale molto ampia, mostrano una elevata capacità di adsorbire idrogeno. Il processo di immagazzinamento di questi materiali è simile a quello degli idruri metallici. Le molecole gassose di H_2 vengono assorbite nei pori microscopici presenti sulla superficie dei grani di carbonio. L' idrogeno rimane intrappolato nelle cavità del

materiale e viene rilasciato solo quando viene incrementata la temperatura. Inizialmente la ricerca si è rivolta ai fullereni, mentre oggi la maggiore attenzione è rivolta allo sviluppo dei nanotubi.

7.1.Fullereni

Sono molecole ad altissimo peso molecolare dotate di enorme simmetria e stabilità e capaci di generare cristalli molecolari nei quali, al posto di ogni atomo, c'è un'intera molecola.

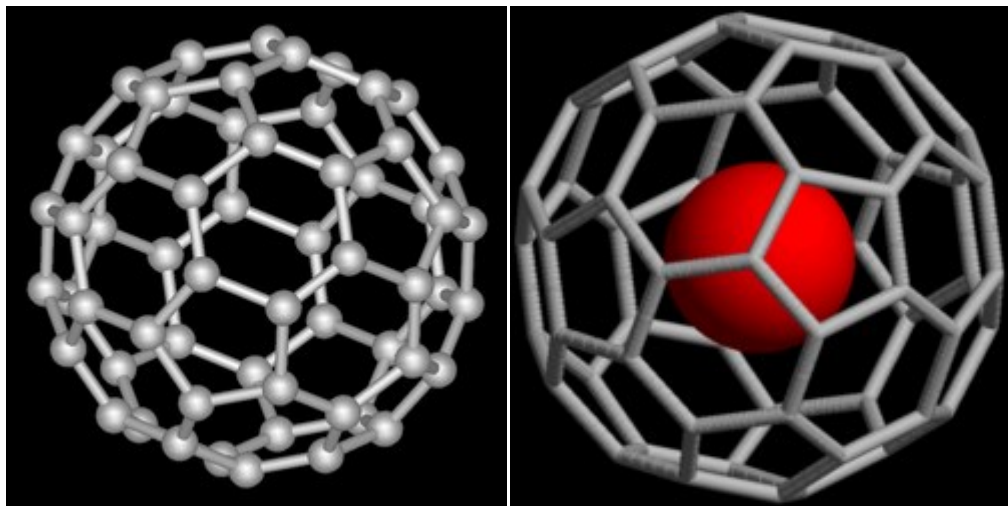


Figura 6. Esempio di fullereni.

Queste strutture hanno mostrato una grande capacità di catturare idrogeno a temperature e pressioni non eccessivamente elevate (200 °C e 3,5 MPa) con risultati, in termini di peso specifico, notevoli. La ricerca sta spingendo verso lo sviluppo di catalizzatori in grado di abbassare la temperatura di deidrogenazione a 100-150 °C.

7.2.Nanotubi

Sono minuscoli tubi di carbonio (circonferenza dell'ordine di pochi atomi, lunghezza di decine di migliaia di atomi), che si possono pensare come fogli di grafite arrotolati su se stessi e terminanti con due semisfere simili ai fullereni. Oltre a eccezionali caratteristiche di resistenza meccanica in rapporto al peso, i nano tubi hanno dimostrato eccellenti capacità di assorbire l'idrogeno a temperature ambiente con pressioni moderate; i risultati raggiunti sono notevoli.

7.3.Nanofibre

Sono strutture estremamente ordinate e dotate di nano pori in grado di immagazzinare notevoli quantità di idrogeno, raggiungendo pesi specifici dell'ordine del 70%. Il

processo complessivo di idrogenazione è però dispendioso: le nano fibre vengono mantenute per 5 ore alla temperatura di 150 °C, successivamente il sistema viene raffreddato per diverse ore a temperatura ambiente e quindi avviene il contatto con l' idrogeno ad alta pressione e temperatura ambiente.

Nonostante il notevole interesse rivolto allo studio e allo sviluppo di tali strutture di carbonio, per la loro applicazione come sistema di immagazzinamento di H₂ è necessario risolvere numerosi problemi inerenti l' abbassamento delle temperature e delle pressioni richieste, la velocizzazione dei processi di idrogenazione e soprattutto il comportamento delle nano strutture se sottoposte a molti cicli di accumulo.

8.SISTEMA DI STOCCAGGIO MIGLIORE

L' individuazione del metodo migliore per immagazzinare l' idrogeno deve tener conto di numerosi aspetti: l' utilizzo che si deve fare del gas, i volumi disponibili, la quantità di energia per volume richiesta da un determinato impiego, la durata dell' immagazzinamento, la vita in esercizio dei sistemi di accumulo, i problemi di sicurezza ed infine i costi. Il parametro fondamentale è la densità di energia. Per esempio, dal punto di vista dell' energia disponibile, la quantità di idrogeno trasportata allo stato liquido da un solo camion indicativamente equivalente a quella contenuta in venti camion dotati di bombole per l' accumulo dell' idrogeno allo stato gassoso compresso. I serbatoi a idruri metallo, come si diceva, per ora non appaiono ancora adatti per le applicazioni veicolari perché richiedono una corretta gestione del calore ed hanno ancora un peso molto elevato in relazioni alla quantità di idrogeno immagazzinabile, mentre sono già indicati per le applicazioni stazionarie.

Essi saranno senz' altro preferibili quando saranno fabbricati con leghe leggere evolute e nei casi in cui si abbia molto calore a disposizione a bordo per la fase di deidrogenazione, come spiegato nella descrizione del sistema. Nel caso si debba trasportare una quantità di idrogeno relativamente bassa oggi si ricorre alla tecnologia di compressione. Quest' ultima costa meno rispetto all' idrogeno liquefatto e non presenta il problema delle perdite per evaporazione del gas. La soluzione "compressione" presenta però i rischi dovuti all' elevata pressione ed alle perdite di gas in caso di cricche o fessure dei contenitori.



Figura 7. Esempio di montaggio serbatoio e componentistica in un prototipo ad idrogeno.

Quando i periodi di immagazzinamento sono lunghi è preferibile stoccare l' idrogeno allo stato liquido, come avviene nei siti della Nasa. Le soluzioni basate sui nano tubi e sulle nano fibre, cui è accennato, appaiono particolarmente attraenti ma ancora poco realistiche. L' orientamento della case automobilistiche oggi è quello di stoccare l' idrogeno a bordo allo stato gassoso in pressione (da 300 a 700 bar).

9.LA SICUREZZA

L' idrogeno è il gas con la migliore conducibilità termica, il più basso peso molecolare, la più bassa densità e viscosità. Queste proprietà fanno sì che esso si diffonda molto in fretta: 2,8 volte più velocemente del metano e 3,3 volte più dell' aria. L' idrogeno è anche altamente volatile e infiammabile, ed in certi casi, in ambienti chiusi, esso può formare una miscela detonante con l' aria. I sistemi di stoccaggio devono essere quindi studiati attentamente e vanno tenuti costantemente sotto controllo. Tuttavia, considerati tutti gli aspetti, l' idrogeno non è più pericoloso dei comuni combustibili in uso.

10.TRASPORTO DELL' IDROGENO

Oltre ai costi di produzione e immagazzinamento dell' idrogeno, un altro punto saliente nello sviluppo e nell' utilizzo di tali tecnologie è la mancanza di infrastrutture consone al trasporto e alla distribuzione sul territorio di tale sostanza.

Nei riguardi dell' autotrazione, i veicoli necessitano di rifornimenti veloci e convenienti, e al giorno d' oggi sono disponibili diverse tecnologie di trasporto che cercano di essere economicamente concorrenziali, sicure e di rapido sviluppo.

10.1.Trasporto su strada

Viene effettuato con autocisterne contenenti bombole di idrogeno compresso a 20 MPa oppure idrogeno liquido (5000 litri).



Figura 8. Serbatoio per il trasporto dell' idrogeno su rotaia.

La seconda soluzione è più vantaggiosa dal punto di vista della capacità energetica del sistema di refrigerazione della cisterna, oltre a notevoli problemi di sicurezza; nel caso infatti di incidente stradale, la rottura delle bombole criogeniche causa gravissimi problemi, legati alla formazione di “bleve” (esplosione dell' H₂ dovuta alla cavitazione del liquido se posto a contatto repentino con l' atmosfera esterna) e “firewall” (palle di idrogeno infuocate, che si creano a causa della combustione improvvisa dell' H₂ per il gradiente di temperatura tra serbatoio ed esterno). Per minimizzare quindi i rischi di tale trasporto (usato preferibilmente su rotaia), è in fase di studio la possibilità di trasportare l' idrogeno con gli idruri metallici all' interno di autocisterne, sistema vantaggioso dal punto di vista degli ingombri e della sicurezza.

10.2.Pipeline

Esistono delle reti di distribuzione dell' idrogeno in tubazioni sia in Europa che negli Stati Uniti e collegano per lo più direttamente il produttore con il consumatore oppure sono interne allo stesso distretto industriale.



Figura 9. Tubazioni per il trasporto di idrogeno.

Se si considera l' idrogeno gassoso, la tecnologia deve tener conto di alcune diversità rispetto a quella usata per il trasporto del gas metano: l' idrogeno possiede un'energia 2,4 volte superiore a quella del metano a parità di massa ma, poiché la velocità nella tubazione è direttamente proporzionale a $(1/M)^{1/2}$ (dove con M si indica la massa molecolare), si ha che l' idrogeno risulta 2,8 volte più veloce del metano: nell' unità di tempo i due gas trasportano quasi la stessa quantità di energia. Inoltre occorre ricordare il problema dell' infragilimento dei materiali (tubazioni in acciaio e guarnizioni) a contatto con l' idrogeno: si ha un aumento delle perdite lungo il condotto attraverso le tenute, le giunzioni e per assorbimento all' interno dei materiali. Il processo avviene di preferenza su superfici metalliche nuove ed induce dei difetti superficiali che possono degenerare in deformazioni plastiche locali; la tendenza all' infragilimento può essere ridotta se si adottano dei procedimenti di lavorazione dei metalli che tendono a minimizzare le tensioni residue interne al materiale e se si utilizzano acciai austenitici inossidabili.

L' utilizzo di pipeline di idrogeno liquido aumenta notevolmente la capacità di trasporto della linea, a fronte però di maggiori costi di investimento, legati alla necessità di realizzare impianti di pompaggio e raffreddamento e tubazioni termicamente isolate. Un serio problema di tale tipologia di trasporto è la sicurezza, in quanto, in caso di falle nelle tubazioni e quindi di fughe, vi sarebbe un profondo raffreddamento di tutti i materiali a contatto con l' idrogeno, con possibilità di ustioni per il personale; se inoltre l' isolamento termico non fosse perfetto in un punto, lì vi sarebbe la condensazione

dell' aria circostante, con un contenuto di ossigeno del 50% e dunque estremamente infiammabile.

Per dare un esempio pratico di ricerca che si sta svolgendo, Honda sta sviluppando una stazione di produzione e rifornimento di idrogeno "at home"; tali "Honda energy station" possono estrarre l' idrogeno dal gas naturale e provvedere al rifornimento della vettura oltre all' uso domestico; un altro sistema prevede una cogenerazione energetica, con una produzione di idrogeno mediante elettrolisi dell' acqua. L' energia elettrica necessaria per tale reazione può essere fornita da pannelli fotovoltaici, che provvedono anche alla necessità dell' utenza casalinga, e il calore di reazione può essere utilizzato per riscaldare la casa e per la produzione di acqua calda.

CAPITOLO 3

Dalle fuel cells alle ruote in campo automobilistico

I veicoli ad idrogeno sono mossi dall' elettricità prodotta dalle fuel cells, ma normalmente la loro architettura di trazione è ibrida, il che significa che a bordo può essere presente anche un certo numero di batterie. La potenza viene gestita da un controllo elettronico interfacciato da un motore elettrico che trasforma la corrente in energia meccanica che muove le ruote. Il guidatore dosa la velocità del veicolo interagendo con il sistema di controllo mediante il pedale dell' acceleratore, come nelle automobili normali.

Le Case automobilistiche stanno realizzando vetture a idrogeno con prestazioni molto simili a quelle delle nostre attuali berline. L' impiego cittadino di queste auto sarebbe risolutivo per l' inquinamento urbano e la loro diffusione potrebbe essere in parte incentivata da soluzioni di car sharing (condivisione di auto a tempo) gestite dalle municipalità e dalle aziende di mobilità cittadine. Si può pensare anche a veicoli a idrogeno e a fuel cells per il trasporto di merci o comitive di persone nelle città (pacchi postali, consegne a domicilio, veicoli di servizio, bus panoramici, bus navetta). Ma il vero mercato dei veicoli a idrogeno, quello che porterà ai grandi numeri, sarà costituito dalle spaziose e robuste berline che potranno essere impiegate indifferentemente in città, nelle strade periferiche a scorrimento veloce (tangenziali e bretelle) e nei percorsi stradali. Quasi tutte le aziende puntano a modelli dotati di prestazioni medio-elevate: velocità massima intorno ai 160 Km/h e autonomia di 400-500 km.

Le auto elettriche a idrogeno e fuel cells sono nate come una evoluzione di quelle a batterie. La trazione automobilistica è nota da oltre un secolo. Questi veicoli non si sono mai diffusi in modo massiccio a causa dell'ingombro del pacco di batterie e del problema costituito dai tempi di ricarica. Il sistema di trazione a idrogeno con fuel cells elimina entrambi i problemi. Se fosse disponibile una rete di distribuzione dell'idrogeno, già oggi potremmo viaggiare su automobili silenziose, mosse da un propulsore completamente pulito e poco ingombrante. Il rifornimento di idrogeno avverrebbe in tempi uguali a quello che impieghiamo adesso per fare il pieno di benzina o di gasolio. L'impostazione dell'architettura di trazione (powertrain) di un veicolo a idrogeno dipende dall'uso prevalente che si vuol fare del mezzo e dal numero di batterie che si tollerano a bordo.

Il traffico urbano non permette grandi velocità di punta e in tal caso è sufficiente garantire al veicolo una buona autonomia giornaliera e la possibilità di far fronte ai transitori di funzionamento (accelerazioni, decelerazioni, frenate) che in città sono molto frequenti. Una city-car mossa esclusivamente dalle batterie classiche ha un'autonomia di circa un 50-70 km, molto modesta rispetto ai 120-140 km e oltre raggiungibili dalla stessa vettura mossa da un sistema ad idrogeno e fuel cells. I valori potenzialmente raggiungibili dipendono dal peso e dalle caratteristiche del mezzo e dalle scelte tecniche del costruttore. Per una city-car la velocità massima non è molto importante. In questo caso si può adottare un'architettura ibrida costituita da un piccolo insieme di batterie speciali a basso ingombro coadiuvante da uno stock di fuel cells di dimensioni contenute e da un supercondensatore (trattato nei capitoli successivi).

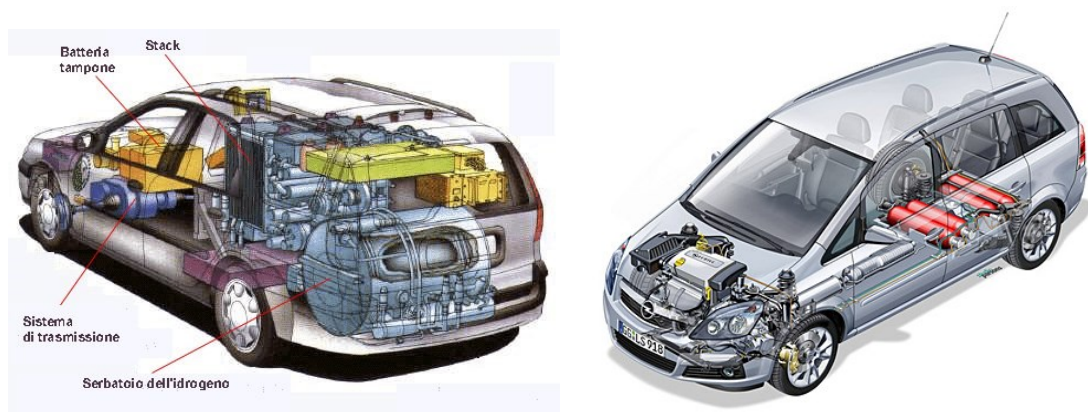


Figura 10. Rappresentazione schematica del layout della componentistica in un'automobile ad idrogeno (a combustione interna).

Questa architettura di trazione, ibrida fuel cells/batterie, garantisce una buona autonomia, spazi sufficienti a bordo vettura e ottimi spunti di accelerazione.

L' energia elettrica delle batterie viene utilizzata quando sono necessarie buone coppie di spunto come nei transitori di avviamento del veicolo, nelle fasi di accelerazione oppure in salita. Per avere un ingombro generale più contenuto, si cerca di adottare batterie molto compatte ad alta energia specifica (litio-ioni, nichel-idruri metallici, nichel-cloruro di sodio, batterie polimeriche etc..). Spesso si fa in modo che le fuel cells vengano interfacciate alle batterie per assicurarne la ricarica. In tali casi saranno le batterie a fornire in prevalenza la corrente per la trazione.

In linea generale, nei veicoli a idrogeno, si cerca di evitare il collegamento diretto tra le fuel cells e il controllo del motore elettrico. Le celle a combustibile rendono al meglio quando funzionano in condizioni stazionarie, cioè senza brusche variazioni di regime. Interporre le batterie fra le fuel cells e il controllo del motore elettrico permette di allungare la vita dello stack.

Infine, per l' impiego del veicolo fuori città, ove la velocità media è più elevata, è preferibile una configurazione a fuel cells "diretta" detta anche "full power". In questo caso sono le fuel cells che provvedono a fornire tutta (o quasi tutta) la potenza elettrica al veicolo.

Un funzionamento extraurbano basato in prevalenza sulle batterie tenderebbe a scaricarle troppo in fretta, quindi è meglio che sia lo stack di fuel cells a soddisfare in modo continuativo la richiesta di potenza.

L' orientamento dei costruttori è in prevalenza verso la configurazione "full power" perché si prevede che il mercato più vasto dell' auto a idrogeno sarà quello delle vetture stradali e tutti preferiscono investire risorse in questa direzione. In questo caso il gruppo-batteria ha una semplice funzione "di servizio" (ausiliari, accensione, emergenza) e serve per permettere il recupero di energia elettrica delle frenate.

Per i veicoli destinati al trasporto di persone o cose la logica è un po' diversa. Qui il pacco di batterie può essere voluminoso perché lo spazio disponibile a bordo è maggiore. Nel caso di veicoli commerciali, è particolarmente importante l' affidabilità nel tempo perché quando si acquistano si punta ad una buona durata dell' investimento.

Allora per proteggere lo stack in modo che esso duri nel tempo, si ricorre ad una soluzione ibrida nella quale le batterie erogheranno la potenza preferibilmente durante i

transitori mentre le fuel cells interverranno soprattutto durante i funzionamenti a regime pressoché costante.

1. La parte elettrica del veicolo a fuel cells

Vista dall' esterno un' auto a idrogeno e fuel cells non è molto diversa dai normali veicoli a benzina o gasolio.

I prototipi costruiti dalle Case automobilistiche si basano quasi tutti su un modello della loro gamma nel quale il sistema di trazione a benzina è stato sostituito da quello a fuel cells. Solo da qualche anno c' è la tendenza a realizzare veicoli progettati ex novo, concepiti propriamente per ospitare sistemi di trazione a idrogeno. Si tratta di "concept car" molto innovative che nascono con la giusta impostazione strutturale per sfruttare appieno le opportunità derivanti dalla libertà di disposizione dei componenti (lay-out) consentita dal sistema fuel-cells motore elettrico.

Quando si guida un veicolo elettrico a fuel cells la prima cosa che si nota è l' assoluta silenziosità.



Figura 11. Esempio di un prototipo ad idrogeno visto dall' esterno.

Dentro al suo cofano troviamo:

- il *sistema a fuel cells* (lo "stack" con i relativi controlli elettronici: il sistema di compressione dell' aria, gli impianti di collegamento fra le fuel cells ed il serbatoio del combustibile e infine i circuiti elettrici che portano la corrente prodotta dalle fuel cells alle batterie e al sistema di controllo del motore elettrico);

- un *motore elettrico*;

-il *controllo* del motore elettrico;

-un determinato numero di batterie che possono essere ricaricate direttamente dall fuel cells e in parte dalle frenate di recupero;

-uno o più *serbatoi di idrogeno* oppure di un altro combustibile (in tal caso è presente anche un sistema “fuel processor” miniaturizzato che permette la produzione dell’ idrogeno a bordo);

Il cuore di un veicolo a idrogeno a fuel cells consiste quindi di un impianto elettrochimico accoppiato, attraverso collegamenti elettrici, ad un impianto elettromeccanico che comprende un motore elettrico. In questo si differenzia profondamente dal sistema di trazione a combustione interna (a benzina o gasolio) che consiste invece in una macchina termo meccanica (il motore endotermico) dotata di impianti (sistema di alimentazione del carburante, tubi di scarico, tubi flessibili del refrigerante, pompe acqua e olio..) che trasmette la potenza alle ruote tramite un sistema meccanico complesso (frizione, cambio, differenziale, semiassi).

La sezione più propriamente “elettromeccanica” di un veicolo a idrogeno, quella che sfrutta la potenza erogata dallo stack, è costituita da:

-Motore elettrico;

-Controllo-Regolatore del motore elettrico;

-Batterie (il cui numero è legato alle scelte del costruttore).

2.Tipologie di motori elettrici utili per la trazione

I veicoli a fuel cells ed in generale tutti quelli elettrici possono utilizzare principalmente due tipi di motori elettrici: quelli a corrente continua (CC) oppure DC(Direct Corrent), e quelli a corrente alternata (CA) oppure AC (Alternate Current). Oramai nella maggioranza dei casi sono adottati quelli a corrente alternata.

Il valore della velocità di rotazione raggiungibile da un motore elettrico è direttamente proporzionale alla tensione applicata ai suoi morsetti. Una volta fissata la tensione massima disponibile a bordo, la velocità del motore (e quindi quella del veicolo) può essere modificata a piacimento variando la tensione dal valore minimo a quello massimo. I valori della corrente elettrica determinano invece la coppia che il motore è in grado di fornire alle ruote. Ovviamente un veicolo dotato di coppia elevata possiede una buona accelerazione.

Un motore a *corrente continua* per impiego veicolare può funzionare a valori della tensione compresi fra 48 e 192 Volt. Fra il voltaggio delle batterie e il valore della tensione di alimentazione del motore elettrico esiste un legame molto stretto. Un valore elevato della tensione disponibile a bordo permette di adottare motori elettrici più veloci. Un motore elettrico gira grazie alla commutazione continua del suo campo magnetico. Questa commutazione è possibile per la presenza di un collettore costituito da lamelle molto vicine fra loro e allo strisciamento del commutatore a lamelle sulle “spazzole” del motore. Questo processo avviene in modo ottimale solo se le lamelle sono poste ad una certa distanza fra loro. Fino a tensioni di funzionamento di 96-110 Volt le lamelle del motore elettrico possono lavorare correttamente. Nel caso si desideri superare questo valore, il collettore deve essere sovradimensionato perché bisogna disporre le lamelle a maggiore distanza fra loro. Se lo spazio fra le lamelle fosse insufficiente, il funzionamento ad alta velocità del motore potrebbe creare archi elettrici e dissipazione fra lamella e lamella. Per questi motivi nei motori elettrici a corrente continua il massimo della tensione è di 192 Volt. Se si vuole superare questo limite allo scopo di far girare il motore molto più velocemente, l’ unica possibilità è quella di ricorrere ai motori elettrici “brushless” (senza spazzole).

Il motore a *corrente alternata* è invece alimentato da una tensione trifase (a tre fasi , sfasate tra loro di 120°) il cui valore è compreso fra i 48 e 240 Volt. I vantaggi principali dei motori a corrente alternata sono la migliore possibilità di controllo ed il recupero diretto dell’ energia che altrimenti sarebbe dissipata nelle fasi di frenata e di rallentamento. Grazie a questo recupero è possibile ricaricare parzialmente le batterie. Il controllo dei motori a corrente alternata può essere effettuato solo mediante sistemi elettronici (per esempio, in certi casi, variando la frequenza di alimentazione).

La scelta di adottare un motore elettrico a corrente continua oppure una a corrente alternata dipende da diversi fattori tra i quali il costo, le prestazioni richieste al veicolo e il tipo di impiego in cui esso è destinato. Dal punto di vista dell’ architettura interna e del sistema di controllo, il motore a corrente continua è più semplice e meno costoso rispetto al motore a corrente alternata.

L’ impiego di motori a corrente continua è più diffuso nei veicoli come i carrelli elevatori che hanno minori prestazioni e ridotte necessità di controllo. I motori a corrente continua hanno l’ interessante caratteristica di poter essere sovrautilizzati per brevi periodi di tempo, durante i quali erogano una potenza superiore a quella indicata dal costruttore. Si ricorda che la potenza di un motore è il prodotto della coppia per la sua velocità angolare. Un motore da 15kW all’ occorrenza può erogare una coppia anche

trippla, qualora la velocità di rotazione venga ridotta (il che si ottiene riducendo la tensione di alimentazione). Per esempio, a partire dai 15 kW nominali, un motore può raggiungere, per un certo lasso di tempo, picchi di potenza anche fino a 20-25 kW. Questo può essere utile per permettere al veicolo buoni spunti di accelerazione. Però, se il picco dura troppo tempo, il motore potrebbe riscaldarsi eccessivamente, fino alla rottura. La scelta del tipo di motore dipende anche dal rapporto fra i costi e le prestazioni. Si accennava al fatto che i motori elettrici possono essere fatti funzionare alla rovescia (come generatori) per recuperare l'energia. Durante la frenata e durante le fasi di decelerazione del veicolo il motore può caricare le batterie di bordo, anche se solo in parte. Mentre i controlli dei motori a corrente alternata sono sempre provvisti di sistemi per il recupero di energia, nel caso dei motori a corrente continua l'inversione deve essere attivata da un apposito apparato che va previsto a bordo. Invece dal punto di vista di guida del veicolo, non ci sono particolari differenze fra un motore a corrente continua ed uno a corrente alternata.

3.1 motori elettrici “in wheel” (dentro le ruote)

Se un veicolo nasce già concepito per la trazione elettrica si può prevedere di inserire un motore in ogni ruota. La particolare architettura dei motori elettrici permette al progettista di accoppiarli direttamente al cerchione.



Figura 12. Rappresentazione di motori elettrici “in wheel”.

E' allora possibile muovere l'intero veicolo senza la necessità di una riduzione meccanica. Il controllo della velocità di rotazione delle ruote e l'adeguamento del valore della coppia di trazione alle esigenze di moto del veicolo sono assicurati da un

sistema di controllo elettronico gestito da un software che assicura l'aderenza costante delle ruote, la tenuta laterale in curva, il monitoraggio continuo della velocità di ogni ruota e la stabilità generale del veicolo.

Questi prototipi di auto ad idrogeno che sono dotati di motori dentro le ruote ("in wheel") prevedono quasi sempre l'innovativa soluzione di guida denominata "drive by wire" (guida mediante fili), cui si è accennato. Il vantaggio principale di questo sistema di guida, diretto e molto versatile, è quello di agire dal posto di guida direttamente sulle ruote, e di aumentare la capacità di controllo del veicolo da parte del guidatore.



Figura 13. Componentistica di motori "in wheel".

Ciascuna ruota, con il motore elettrico al proprio interno "in wheel", può anche effettuare un giro completo sul proprio asse e ciò permette al veicolo movimenti inusuali come ad esempio gli spostamenti laterali o in diagonale, molto utili nei parcheggi cittadini o in altre particolari situazioni.

L'altro importante vantaggio, come si accennava, è la eliminazione quasi totale delle perdite dovute alla trasmissione meccanica, dato che i riduttori classici sono completamente assenti. La soluzione "in wheel", oltre a massimizzare i rendimenti "veicolo", permette anche di recuperare spazio utile a bordo. Infatti rimane disponibile quel volume che, nel veicolo classico, è occupato dalla catena di trasmissione e dal differenziale. Grazie a queste soluzioni, i prototipi a idrogeno concepiti ex novo

presentano di solito un design originale che prevede ampi spazi interni e una disposizione del sistema di guida decisamente avveniristica. Al posto del volante si trova talvolta una “console” con joy-stick mediante in quale è possibile controllare totalmente il veicolo.

4. Il sistema di controllo/regolazione del motore elettrico

Un controllo elettronico deve assolvere alle seguenti funzioni fondamentali:

- Adeguare* la potenza del motore elettrico alle esigenze della guida fornendo la giusta coppia alle ruote e la velocità più adatta per l'impiego ottimale del veicolo;
- Commutare* la tensione di alimentazione dei motori elettrici (a corrente continua o alternata) secondo la logica necessaria per assicurare il corretto funzionamento del motore in ogni condizione.
- Controllare* la corretta trasformazione dell'energia elettrica in energia meccanica;
- Interfacciarsi con il sistema di guida del veicolo;
- Gestire* il recupero di energia meccanica resa disponibile alle frenate ed accelerazioni per trasformarla in energia elettrica per la ricarica delle batterie.

5. I sistemi di controllo dei motori elettrici

Il sistema di controllo è l'apparato che condiziona la potenza elettrica prodotta dalle fuel cells e l'energia accumulata nelle batterie per far funzionare adeguatamente un motore elettrico. Il guidatore del veicolo, grazie al controllo, può agire sul motore per gestire la trazione nelle diverse condizioni di esercizio.

La soluzione più semplice per controllare un motore sarebbe rappresentata da un insieme di contatti elettrici in grado di inserire via via le sezioni di tensione-batteria disponibili a bordo per ottenere ai morsetti del motore il valore totale di tensione che si desidera. Questo metodo sarebbe molto semplice dal punto di vista costruttivo ma offrirebbe una guida “a gradini” (discontinua).

Invece il sistema “chopper” agisce in modo che si possa variare con gradualità il valore medio di tensione della corrente in uscita.



Pannelli a Chopper. Si tratta di azionamenti per il controllo di motori DC costruiti con moduli di potenza. Il chopper realizza separatamente il controllo dei motori di trazione e del motore di sollevamento con un unico microprocessore a 16 Bit (80C196 INTEL). Completamente statico e realizzato con transistor Mosfet, stato ideato per operare anche in condizioni ambientali molto ostili. Tutti gli allarmi vengono elaborati dal microprocessore e rimangono memorizzati anche dopo lo spegnimento. Gli algoritmi di regolazione completamente realizzati via software, sono adattabili a diversi tipi di motori, mantenendo l'hardware esistente. Un cruscotto fornito di display permette, tramite pulsantiera, la programmazione e la visualizzazione dei parametri di funzionamento.

Figura 14. Esempio di Chopper disponibile sul mercato.

Se i motori sono a corrente alternata il controllo si comporta in modo analogo. In questo caso però esso, oltre ad adattare la tensione e la corrente disponibili a bordo alle esigenze del motore elettrico, dovrà anche provvedere a trasformare in alternata la corrente continua erogata dal sistema fuel cells-batterie. In questo caso il controllo viene definito "inverter".

Le fuel cells di un veicolo a idrogeno forniscono sempre la potenza elettrica in corrente continua. Il sistema di trazione (*powertrain*) di un veicolo elettrico a idrogeno richiede che la tensione erogata dallo stack abbia lo stesso valore di quella a cui lavora il sistema controllo-motore elettrico. Nelle esperienze prototipali si tende a inserire fra le fuel cells e il controllo-motore un convertitore CC/CC (corrente continua/corrente continua). Questo apparato ha il compito di portare la tensione della corrente elettrica continua proveniente dalle fuel cells al livello a cui lavora il sistema di controllo del motore elettrico.

6. Il sistema di guida e di controllo di un motore a corrente continua (CC)

Vediamo come funziona il sistema di controllo di un motore elettrico a corrente continua (CC). Se il guidatore spinge il pedale dell' acceleratore del veicolo fino al limite, il controllo rende disponibile al motore la massima tensione elettrica di bordo. Per tutti gli altri valori, il controllo, sempre pilotato dal guidatore, può variare la tensione da 0 al valore massimo. Per capire come questo sia possibile supponiamo per esempio che il sistema fuel cells/batterie assicuri a bordo un valore massimo di tensione di 108 Volt. Nell' istante iniziale, quando il guidatore non ha ancora azionato l' acceleratore, il regolatore non fornisce nessuna tensione al motore e quindi il veicolo rimane fermo. Per ognuna delle posizioni intermedie dell' acceleratore, il controllo-regolatore provvede a "tagliare" la tensione di 108 Volt in piccolissimi impulsi (migliaia di periodi al secondo), in modo da generare un onda quadra con una tensione media compresa fra 0 e 108 Volt. Questa trasformazione della tensione è gestita da un sistema denominato "chopper" (in inglese: "tagliatore"). Per dare un' idea della frequenza di commutazione dei regolatori fra il valore minimo e quello massimo della tensione, va evidenziato che i "chopper" sono in grado di commutare oltre 12000 volte al secondo.

Per permettere al guidatore del veicolo di controllare il moto, si fa in modo che il pedale dell' acceleratore sia collegato ad un potenziometro (un sistema di resistori). Il potenziometro serve a trasformare l' informazione di posizione dell' acceleratore a pedale in una variabile elettrica corrispondente al valore della tensione di alimentazione che il controllo deve fornire al motore elettrico in quel momento. Il valore di tensione è zero quando l' automobile deve stare ferma ed è massimo quando il guidatore spinge il pedale dell' acceleratore completamente per raggiungere la massima velocità. L' accelerazione dei veicoli elettrici è bruciante perché il motore elettrico eroga una coppia elevata anche a basso numero di giri.

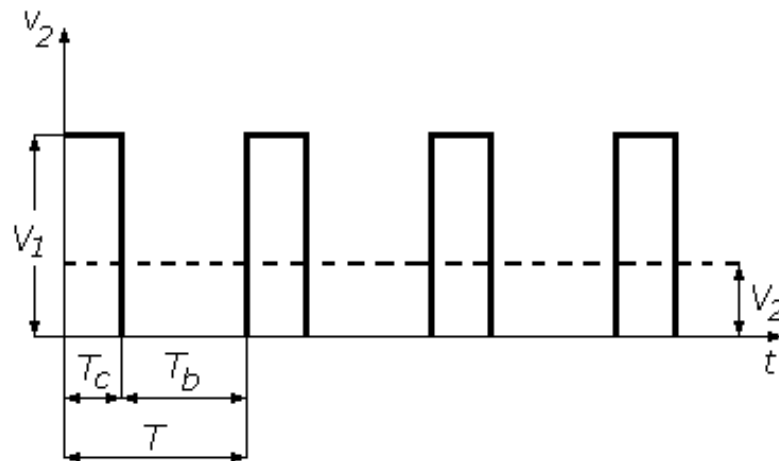


Figura 15. Andamento della tensione di uscita del chopper.

Come si nota nel grafico la tensione passa da un valore nullo a un valore massimo V_1 , rimanendoci per un intervallo di tempo T_c tornando poi a un valore nullo per un tempo T_b . La sommatoria dei due tempi è il periodo T . Il valore medio di tensione in questo periodo è il valore V_2 , sicuramente inferiore al valore V_1 . Facendo variare a nostro piacimento questi diversi intervalli di tempo possiamo ottenere diversi valore di tensione media V_2 , variando di conseguenza la tensione ai morsetti del motore e quindi variando la velocità finale del veicolo.

Quando si programma il controllo del motore elettrico occorre provvedere anche alla taratura del pedale dell' acceleratore. Il pedale lavora a una tensione molto più bassa rispetto a quella del controllo perché in quella zona c' è il pedale del guidatore che naturalmente non va esposto al rischio di scariche elettriche. Fra i due valori minimo e massimo della tensione corrispondenti alle posizioni estreme del pedale, viene fissata una proporzionalità.

Per motivi di sicurezza, i potenziometri sono due. Uno solo potrebbe bloccarsi nella posizione di massima velocità del veicolo. Il controllo li legge entrambi e si assicura che i loro segnali siano uguali. Se non lo sono, l' erogazione della potenza elettrica al motore viene interrotta ed il veicolo si ferma. Per fare un esempio pratico supponiamo il caso di un veicolo a idrogeno ibrido fuel cells/batteria dotato di un motore elettrico a corrente continua. Il controllo riceve l' energia elettrica in corrente continua prodotta da un sistema a fuel cells. Nel contempo leggerà la posizione del pedale dell' acceleratore sui potenziometri e regolerà di conseguenza l' alimentazione al motore elettrico. Ciò avviene mediante una commutazione molto veloce degli stati on/off in modo che la

media dell' onda quadra prodotta dal controllore-regolatore si attesti al valore della tensione richiesto. Se il pedale viene spinto poco, il motore girerà a valori bassi, mentre in caso di pressione maggiore, la velocità di rotazione aumenterà proporzionalmente. Quando, per esempio, il pedale dell' acceleratore è spinto per circa il 30%, il regolatore pulsa l' alimentazione in modo che la alimentazione on/off sia "on" per il 30% del tempo ed "off" per il 70% del tempo. Il veicolo allora si muove al 30% della sua velocità massima. Analogamente accade per tutte le altre posizioni dell' acceleratore.

7. Il sistema di guida e controllo di un motore a corrente continua (AC)

Vediamo ora il funzionamento dei controlli-regolatori per i motori elettrici a corrente alternata (AC). Questa volta supponiamo che su un veicolo a idrogeno e fuel cells/batterie sia disponibile una tensione di 300 Volt in corrente continua e che il veicolo sia dotato di un motore elettrico trifase di potenza 50 kW che funziona a corrente alternata (AC) alla tensione di 240 Volt. Il controllo innanzitutto converte la corrente continua in corrente alternata a tre fasi. A questa trasformazione provvede l' inverter del controllo che è dotato di un certo numero di transistor. Essi commutano rapidamente la tensione delle batterie secondo una logica on/off e generano un' onda che in questo caso è di tipo sinusoidale.

Per la trasformazione della corrente continua in alternata trifase sono necessari sei insiemi di transistor di alimentazione. Il funzionamento del controllo-regolatore a corrente alternata ha delle analogie con quello del motore a corrente continua descritto prima, anche se è un po' più complicato. Il generatore deve infatti generare tre onde di tipo sinusoidale facendo pulsare la tensione fra una posizione massima e zero. Inoltre deve invertire la polarità per un numero di volte che deve essere compreso fra 0 e 300 al secondo (frequenza in Hertz). Un regolatore di corrente alternata si basa quindi su un gruppo di transistori che devono pulsare e fornire la corretta polarità. In particolare c' è bisogno di due transistor per ognuna delle tre fasi (totale 6 transistor) mentre in un regolatore di corrente continua ne sono sufficienti due: uno per il valore massimo ed uno per il valore minimo della tensione.

Il regolatore di un motore a corrente alternata è anche dotato di un sistema che gestisce il recupero della potenza elettrica di frenata, che altrimenti andrebbe sprecata. Durante il funzionamento del veicolo si ottiene la ricarica parziale delle batterie perché il motore agisce al contrario, come generatore. In questa fase si attiva anche un

sistema per riconvertire la corrente da alternata a continua perché le batterie possono essere ricaricate solo con corrente continua. Il sistema di recupero delle frenate e delle decelerazioni costituisce un'opportunità che viene quasi sempre sfruttata nei veicoli ibridi fuel cells/batterie, ma non si deve pensare a grandi recuperi. Con questo sistema di solito le batterie di trazione si ricaricano solo in parte: l'entità del recupero si aggira intorno al 7-10%. Il recupero di energia è utile anche per le batterie a 12 Volt che alimentano i sistemi ausiliari di bordo. Oggi alcuni costruttori optano per la struttura ibrida fuel cells/batterie anche se le batterie non sarebbero strettamente necessarie alla trazione. Lo fanno al solo scopo di recuperare dalle frenate un'aliquota di energia che altrimenti andrebbe perduta. Va evidenziato che le city-car elettriche/idrogeno (soggette a frequenti decelerazioni e frenate) offrono sempre buone opportunità di recupero mentre le berline elettriche/idrogeno, concepite per tragitti in prevalenza extraurbani che vengono percorsi a velocità pressoché costante, non possono sfruttare appieno queste opportunità.

8. Le batterie

I veicoli a idrogeno e fuel cells sono stati concepiti per assicurare maggiore autonomia al veicolo elettrico classico riducendo gli ingombri dei pacchi-batterie tradizionali. Se consideriamo le diverse architetture di trazione descritte, è evidente che le batterie mantengono un ruolo importante anche nei veicoli a idrogeno. Esse possono essere di vario tipo, secondo i materiali che vengono impiegati per la loro costruzione.



Figura 16. Classica batteria al piombo.



Figura 17. Batteria a Ioni di litio.

Attualmente quelle più diffuse per la trazione veicolare sono al piombo-gel. Gli svantaggi di questo tipo di batteria sono i seguenti:

- 1) *Capacità limitata.* Un pacco di batterie composto da circa 20 moduli (peso totale di circa 500 kg) garantisce 15 kWh di energia offrendo ad un automobile medio-piccola un'autonomia in ciclo urbano di 60-80 Km circa;

- 2) *Peso elevato*. Se si desidera un' autonomia maggiore è necessario aumentare proporzionalmente il numero di batterie. Indicativamente l' energia accumulata da un pacco di batterie pesa però circa 1000 Kg (22 Kg per ogni modulo);
- 3) *Ingombro*. Per avere un' idea del volume occupato da un pacco di 40 batterie su un' automobile berlina, occorre ricordare che un modulo-batteria media ha una dimensione di 15x19x15 cm.
- 4) *Ricarica lenta*. La tipica durata della ricarica completa di un pacco di batterie varia fra le 4 e le 10 ore, in base alla tecnologia del sistema di ricarica. Il tempo di ricarica non può essere più breve per motivi tecnologici, pena la distruzione della batteria;
- 5) *Durata*. Le batterie hanno una vita breve (3-4 anni oppure circa 400 cicli completi di carica/scarica);
- 6) *Costo*. Si è detto che un pacco di 20 batterie è in grado di erogare circa 15 kWh. Con questa disponibilità di energia una city car può percorrere circa 80 Km in ciclo urbano. Il costo della batteria raddoppia (circa 4500 euro) per garantire la stessa autonomia ad un furgone adibito al trasporto di merci o di persone, il cui motore elettrico richiede circa 32 kW di potenza.

9.L' idrogeno e i motori a combustione interna

Questa soluzione è la più semplice e quella più facilmente realizzabile per l' utilizzo su larga scala dell' idrogeno. Attualmente esistono tutte le tecnologie necessarie per una diffusione capillare delle vetture a idrogeno di questo tipo, quali ad esempio, come già visto, le tecnologie per la realizzazione di serbatoi ad alta pressione o criogenici. La combustione dell' idrogeno non comporta alcuna variazione sostanziale nel propulsore, essendo essa assimilabile ad una trasformazione a gas metano di ultima generazione.

Da un punto di vista storico il primo motore venne fatto funzionare mediante il principio del vuoto: creando il vuoto all' interno del pistone, esso si muove dal PMS (punto morto superiore) al PMI (punto morto inferiore) per la differenza di pressione all' interno del cilindro; il vuoto era creato dal raffreddamento di una miscela espansa dopo la combustione di idrogeno e aria. Sebbene il motore funzionasse bene, l' idea non ebbe successo negli anni a seguire.

Successivamente Otto usò una miscela sintetica di gas, contenente il 50% di idrogeno, per l' alimentazione del suo motore a combustione comandata; i problemi

dovuto all' esplosività della miscela e quindi alla sicurezza del motore non permisero la diffusione di tale progetto, e il secolo scorso vide la grande influenza dei motori a ciclo Otto e Diesel.

Recentemente, per i già citati problemi di impatto ambientale e dell' esaurimento dei combustibili fossili, lo studio dell' idrogeno come propellente per i motori a combustione interna è stato notevolmente rivalutato, considerando che le proprietà di questo elemento sono molto favorevoli a un utilizzo in ambito motoristico.

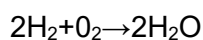
L' idrogeno ha infatti un vasto range di infiammabilità se confrontato con gli altri combustibili, per cui possono essere bruciate miscele stechiometriche (34:1) ma anche miscele magre (fino a 180:1), circostanza che garantisce un notevole risparmio di carburante, una combustione più completa e a temperatura più bassa, con conseguente riduzione delle emissioni nocive. L' idrogeno ha inoltre una bassa energia di accensione (di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla benzina); ciò permette l' iniezione di miscele magre e l' accensione rapida del combustibile. Può dare però problemi di accensione prematura della miscela e ritorno di fiamma. La temperatura di autoaccensione di tale sostanza è inoltre elevata; ciò ha importanti conseguenze nella scelta del rapporto di compressione. Durante la compressione di un gas infatti la temperatura aumenta secondo la legge:

$$T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{\gamma-1}$$

Con V_2/V_1 rapporto di compressione, T_1 temperatura assoluta iniziale, T_2 temperatura assoluta finale, γ rapporto tra i calori specifici; una temperatura elevata di autoaccensione implica il poter scegliere rapporti di compressione molto elevati, con notevoli miglioramenti dell' efficienza del sistema.

La velocità di fiamma nella combustione dell' idrogeno è inoltre molto elevata, quindi il ciclo del motore si avvicina quanto più possibile al ciclo termodinamico ideale, avente il rendimento massimo; l' idrogeno inoltre ha un' elevata diffusività, e ciò facilita una miscelazione omogenea di tale combustibile con l' aria comburente.

La combustione stechiometrica teorica dell' idrogeno con l' ossigeno è data dalla reazione:



Quindi per la combustione completa sono necessarie 2 moli di H_2 e 1 mole di O_2 .

La combustione dell' idrogeno in un motore ad accensione comandata non avviene però con ossigeno bensì con aria atmosferica prelevata dall' ambiente circostante, che contiene anche azoto; come prodotto di scarto sono generati perciò non solo vapore acqueo ma anche una piccola percentuale di ossidi di azoto, prodotti dalle alte temperature nella camera di combustione, che fanno sì che parte dell' azoto reagisca con l' ossigeno per formare gli ossidi di azoto.

La percentuale di tali ossidi dipende dal rapporto stechiometrico (34:1), dal rapporto di compressione, dal regime di rotazione del motore e dalla durata dell' accensione. In aggiunta agli ossidi di azoto, a causa di una eventuale combustione dell' olio presente nel cilindro, vi possono essere tracce di monossido e diossido di carbonio nei gas di scarico.

Per garantire il funzionamento ottimale al motore a combustione interna a idrogeno, non si può prescindere da alcune regole di progettazione. L' idrogeno è un fluido gassoso alle condizioni ambientali, quindi occupa più spazio rispetto a un combustibile liquido (benzina); ne consegue che lo spazio nella camera di combustione riservato all' aria è inferiore; quindi il sistema di iniezione del carburante deve essere opportunamente modificato per garantire il miglior riempimento e la migliore miscelazione possibile nel cilindro. Tra le soluzioni possibili vi è l' iniezione centrale, o laterale mediante luce d' immissione o diretta; le prime due modalità prevedono l' iniezione della miscela aria-idrogeno durante la corsa di aspirazione del pistone, mentre l' iniezione diretta prevede una miscelazione direttamente all' interno del cilindro. Per evitare inoltre il problema dell' accensione spontanea e del ritorno di fiamma, il motore deve avere un design appropriato, in modo da ridurre la turbolenza in aspirazione e in camera di combustione, mentre per contenere le temperature bisogna prevedere un apposito sistema di raffreddamento della testata e di ventilazione della manovella per espellere i fluidi incombusti, che possono provocare l' esplosione del motore.

Il rendimento termico di un motore Otto è:

$$\eta_t = 1 - 1/(V_1/V_2)^{\gamma-1}$$

quindi maggiore è il rapporto di compressione e maggiore è il rendimento del ciclo termodinamico; il motore a idrogeno permette, come visto, l' adozione di rapporti di compressione più elevati di quelli normali; il rapporto tra i calori specifici per l' idrogeno è più elevato di quello per la benzina ($\gamma=1,4$ contro 1,1), quindi a maggior

ragione il rendimento di tale motore risulta più elevato di quello di un motore convenzionalmente a benzina.

L'unico limite nello sviluppo della motorizzazione ad idrogeno risiede nelle normative di omologazione, nella mancanza attuale di officine specializzate nella riparazione delle vetture e nella rete distributiva esistente, con il relativo costo proibitivo del carburante.

Durante il funzionamento ad idrogeno il veicolo è a emissione zero di CO_2 , in quanto la combustione di idrogeno produce solamente vapor acqueo, oltre alla percentuale esigua di NO_x ; l'alimentazione può avvenire anche mediante benzina, con passaggio automatico a manuale (mediante un selettore posizionato sul volante) da una modalità di funzionamento all'altra, con vettura in moto. Una caratteristica peculiare di tale motore è che potenza e coppia rimangono costanti al variare del combustibile adoperato, per cui non vi sono percussioni sul comportamento di guida e sulle prestazioni della vettura.

10.Fuel cells

Le fuel cells, o celle a combustibile, sono dispositivi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (tipicamente idrogeno o metano) in energia elettrica, acqua e calore, senza l'intervento di un ciclo termico intermedio. Una prima conseguenza di tale sistema di conversione energetica è la possibilità di conseguire rendimenti di conversione molto più elevati (circa 75%) rispetto a quelli di tradizionali macchine termiche (circa 35%), non essendovi parti meccaniche in movimento, che comportano notevoli perdite energetiche per attrito.

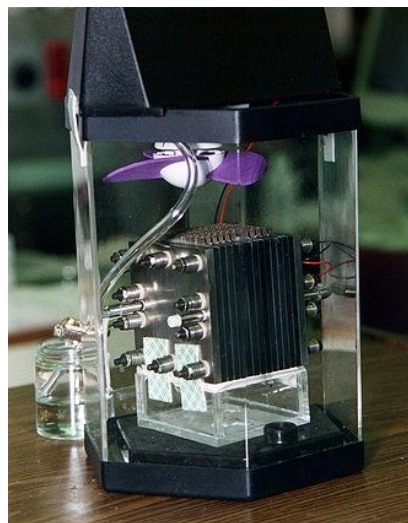


Figura 18. Pila a combustibile dimostrativa costituita da 12 celle (NASA).

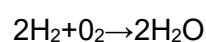
A causa dell' elevata efficienza e del basso impatto ambientale, le celle a combustibile si propongono come convertitori di energia molto importanti, ma la loro applicazione è limitata dalla difficoltà di trovare combinazioni opportune combustibile-elettrodo-elettrolita, che permettono una ossidazione rapida del combustibile.

Le prime celle a combustibile furono utilizzate in ambito aereo spaziale sin dalla fine degli anni '70 e oggi trovano larga applicazione anche in ambito militare: l' acqua bevuta dagli astronauti sullo Shuttle è il prodotto di scarto delle fuel cells, e i sottomarini utilizzano generatori a fuel cells perché essi contribuiscono a ridurre la visibilità degli stessi ai rilevatori a infrarossi.

La differenza sostanziale tra una cella a combustibile e una batteria è che, pur essendo entrambi dispositivi elettrochimici, la prima ha la possibilità di funzionare ininterrottamente fino a quando è alimentata con sostanze provenienti dall' esterno, mentre la seconda funziona finché ha esaurito le sostanze presenti al suo interno.

10.1. La conversione elettrochimica

Il funzionamento di una fuel cell si basa sul fatto che la combustione è un processo di ossido-riduzione: le celle più sperimentate utilizzano idrogeno come combustibile ed ossigeno come comburente, ma la combustione tra tali sostanze è legata a una reazione solamente chimica, senza la reazione termica caratteristica dei motori a combustione interna. La cella a combustibile produce elettricità, prelevata da un apposito conduttore collegato agli elettrodi, dalla reazione elettrochimica dell' idrogeno con l' ossigeno per formare acqua:



come riportato nella seguente figura.

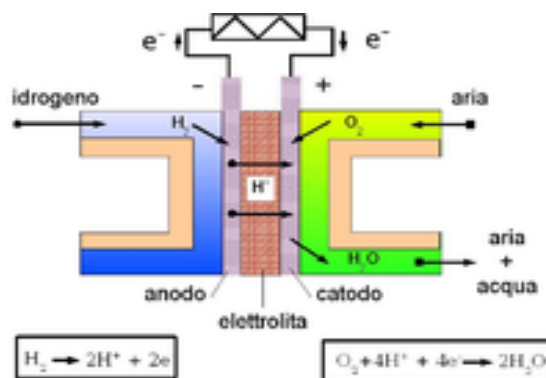


Figura 19. Rappresentazione schematica del processo all' interno della cella a combustibile.

La reazione elettrochimica si basa, appunto, sull'idea di spezzare le molecole del combustibile o del comburente (di solito ossigeno atmosferico) in ioni positivi ed elettroni; questi ultimi, passando da un circuito esterno, forniscono una corrente elettrica proporzionale alla velocità della reazione chimica, e utilizzabile per qualsiasi scopo.

In pratica, la scelta dei combustibili è molto limitata, perché ionizzare molte molecole è difficile, e la reazione risulta spesso bisognosa di una grande energia di attivazione, che a sua volta rallenta la reazione e rende l'uso pratico impossibile. L'idrogeno è un gas in grado di essere ionizzato facilmente, perché la sua molecola è costituita da due atomi legati da un legame relativamente debole (H-H); molto più debole, per esempio, di quello tra atomi di idrogeno e carbonio nella molecola del metano (CH₄). Il comburente più tipicamente usato è l'ossigeno dell'aria: non solo reagisce con l'idrogeno dando un prodotto innocuo come l'acqua, ma è anche disponibile in abbondanza e gratuitamente dall'atmosfera. Tuttavia, il doppio legame (O=O) tra gli atomi nella molecola dell'ossigeno è più forte che nel caso della molecola di idrogeno, e l'ossigeno rappresenta spesso un ostacolo maggiore nella catalisi delle reazioni elettrochimiche; si parla in gergo tecnico di sovratensione catodica, visto che l'ossigeno viene consumato al catodo della cella, e che una parte della tensione generata dalla cella viene assorbita per promuovere la reazione dell'ossigeno.

10.2.L'efficienza in termini termodinamici

L'efficienza delle pile a combustibile indica il rapporto tra l'energia elettrica prodotta dalla pila a combustibile e l'energia fornita alla pila stessa. Questo rapporto è calcolato come il lavoro W ottenuto diviso l'energia libera di Gibbs della reazione:

$$\eta = \frac{W}{-\Delta G_r^*}$$

dove lo stato * indica lo stato in cui i reagenti sono disponibili (idrogeno in pressione nei cilindri, ossigeno atmosferico alla pressione parziale di 20 kPa).

Valori tipici di η per una pila ad idrogeno sono tra il 40% e il 60%.

Il valore esatto di ΔG_r^* varia con la temperatura, il che porta a una riduzione del massimo lavoro teoricamente estraibile dalla reazione con la temperatura. Allo stesso

tempo, l'efficienza η solitamente aumenta con la temperatura, il che può rendere comunque vantaggiosa l'operazione ad alte temperature, a seconda del tipo di pila.

CAPITOLO 4

Motori elettrici realizzabili per la trazione

1.Descrizione del principio

Un motore elettrico è composto da cinque parti fondamentali:

- *armatura o rotore* (comprendente l'albero motore);
- *commutatore*;
- *spazzole*;
- *statore* (esso coincide con un magnete permanente che genera un campo magnetico);
- *alimentazione elettrica*.

E' noto dalla fisica che i magneti di carica opposta si attraggono e quelli di carica uguale si respingono. L'estremità nord di un magnete attrae il sud dell'altro e ne respinge il nord (invece l'estremità sud respinge il sud dell'altro ad attrarre il nord). Il motore viene realizzato in modo che le forze che tendono ad attrarsi e a respingersi generino un movimento di rotazione di una parte mobile (rotore). Il rotore è collegato ad un albero che gira solidale con esso. L'albero può trasmettere il moto di rotazione alle ruote di un veicolo oppure a qualsiasi altro apparato azionabile dal motore elettrico.

Nello schema di figura la parte fissa del motore (statore) è un magnete permanente: un tipo di ferro che genera continuamente un campo magnetico.

Ma di solito il campo magnetico dello statore viene prodotto artificialmente mediante una spira di rame, avvolta su di esso, attraverso la quale viene fatta passare la corrente elettrica. Dalla fisica sappiamo che una spira di rame attraversata da corrente elettrica genera un campo magnetico. Più propriamente i motori elettrici hanno due avvolgimenti: uno al rotore ed uno allo statore. Quando anche il campo magnetico dello statore viene generato mediante corrente elettrica si parla di "elettromagnete".

2. Il funzionamento

Quando la batteria viene collegata alla spira avvolta intorno alla barra verticale quest'ultima diventa un elettromagnete. Secondo la legge del magnetismo, il suo polo nord sarà respinto dal polo nord del magnete permanente mentre sarà attratto dal suo polo sud. I due poli che si attraggono tendono ad avvicinarsi tra di loro mentre quelli che si respingono tendono ad allontanarsi. Ora, se in un istante iniziale il magnete ottenuto avvolgendo la spira di rame sul ferro, è posizionato in modo che il suo polo sud risulta di fronte al polo sud del magnete permanente, i due poli si respingeranno. Si genera una mezza rotazione e l'albero si arresterà nella posizione in cui i poli invece si attraggono. Dopo questo mezzo giro la configurazione sarebbe stabile, dato che i due poli invece si attraggono. Allora si provvede semplicemente ad invertire il campo magnetico. L'inversione avviene automaticamente grazie ad una particolare geometria dei contatti elettrici. Si tratta di un'architettura che, durante il movimento, inverte il collegamento fra l'estremità dell'avvolgimento dell'elettromagnete e i poli della batteria. Il polo nord si commuta allora in polo sud e quello che era polo sud diventa polo nord. A causa di questa inversione l'elettromagnete viene respinto e si genera un altro mezzo giro. Poiché ogni mezzo giro l'inversione è automatica il rotore del motore elettrico entrerà in rotazione continua.

L'inversione del campo magnetico dell'elettromagnete è ottenuta grazie all'interazione fra commutatore e spazzole. I contatti del commutatore sono fissati all'asse dell'elettromagnete e ruotano in modo solidale con esso. I due piatti verticali provvedono, mediante strisciamento, a trasferire la corrente ai contatti del commutatore.

3. L'azione del commutatore

Grazie al commutatore, quando l'armatura durante la sua rotazione raggiunge la posizione orizzontale, le spazzole vengono collegate ai poli opposti dell'armatura. A causa dell'inversione del flusso della corrente, il polo nord dell'elettromagnete diventa polo sud e il motore gira. Mentre il polo nord, poco prima, era in corrispondenza del polo sud del magnete permanente da cui era attratto, ora (dopo la commutazione) ne viene respinto.

4. Il motore reale

Esso è costituito da una struttura di ferro (carcassa esterna) che contiene completamente il motore. Inoltre, si nota un albero che esce dalla parte centrale, un coperchio di chiusura del motore e i cavi che servono per il suo collegamento con la batteria.

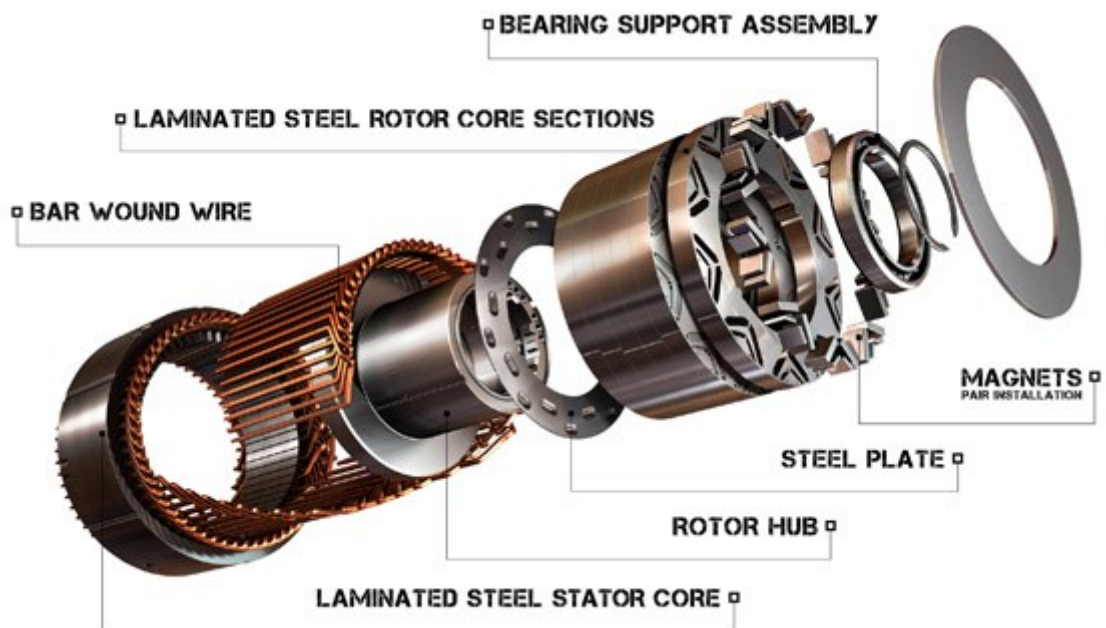


Figura 20. Esplosione di un motore elettrico reale.

Se si collegano i cavi alla batteria l' albero ruota. Se si invertono le posizioni di collegamento dei cavi, l' albero ruoterà nel senso opposto. Nelle condizioni effettive di funzionamento, il coperchio del motore viene collegato alla carcassa e il tutto viene chiuso all' interno. Sulla superficie interna della protezione-coperchio, sono posizionate le spazzole del motore che trasferiscono la corrente elettrica dalla batteria. Quando il collegamento è attivato il motore inizia a girare. L' armatura è formata da un insieme di avvolgimenti (matasse) costituite da rame sottile arrotolato intorno a ciascuno dei poli.



Figura 21. Esempio di uno statore con i suoi avvolgimenti di rame.

Le estremità di ogni avvolgimento finiscono su un terminale nei pressi della zona ove sono collocati i contatti-commutatore. Ciascuno dei terminali è collegato ad una precisa zona del commutatore. Quando la corrente passa attraverso il rame della matassa, si genera un campo magnetico sui poli dell' armatura.

5.L' armatura e il rotore

Il motore elettrico reale ha quasi sempre tre poli. Tre poli garantiscono al motore un funzionamento più regolare ed affidabile. Se il motore fosse a due poli, all' avviamento l' armatura tenderebbe a rimanere ferma nella sua posizione perché l' elettromagnete è in equilibrio. Questo fenomeno non succede mai nel caso di un motore *tripolo* (a tre poli). Infatti in questo caso, quando si dà corrente al motore esiste sempre una forza di repulsione che prevale (cioè non esiste mai una posizione di perfetto equilibrio). Inoltre quando si inverte il campo in un motore a due soli poli, tutte le volte in cui il commutatore tocca il punto in cui si inverte il campo, per un istante tende a mettere in corto circuito la batteria perché collega direttamente fra loro il polo positivo e negativo. Questo provoca scintille, perdite di energia e sollecita inutilmente le batterie. Un motore con tre poli risolve anche questo problema. Ovviamente è possibile avere un numero di poli a piacere, secondo il formato del motore e della potenza che si richiede.

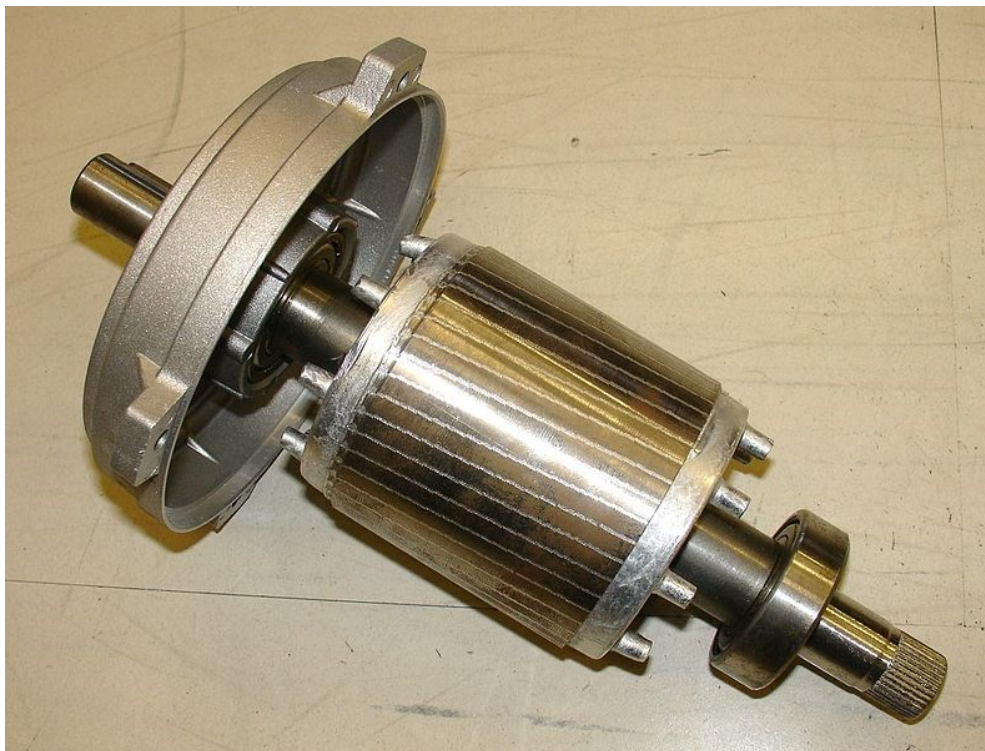


Figura 22. Rotore montato sull' albero motore tramite cuscinetti.

6. Tipologie di motori elettrici

I motori elettrici, come già visto in precedenza, possono essere divisi in due categorie fondamentali: i motori a *corrente continua* e quelli a *corrente alternata*.

In entrambi i casi, le due parti principali da cui sono caratterizzati sono il rotore e lo statore. Il rotore può essere immaginato come una ruota dentata sui denti della quale sono disposti altrettanti magneti. Di fatto si tratta di elettromagneti realizzati avvolgendo bobine di filo di rame intorno a nuclei di metallo. I diversi elettromagneti (i poli) sono caratterizzati ognuno da un campo magnetico che deve essere di polarità diversa da quella del polo più vicino. Il rotore è sostenuto da cuscinetti a basso attrito perché deve poter ruotare liberamente sul proprio asse. La parte fissa del motore elettrico si chiama statore e genera anch'essa un campo magnetico.

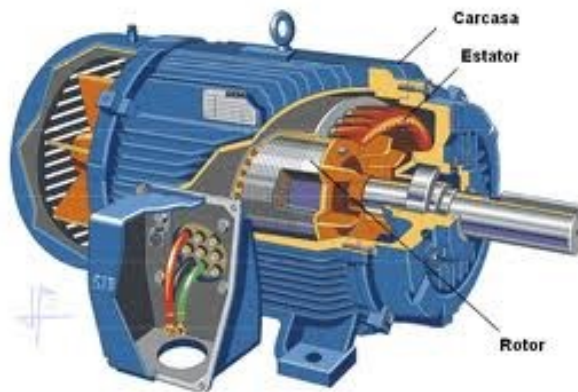


Figura 23. Sezione completa di un motore elettrico.

Anche gli elettromagneti dello statore sono realizzati avvolgendo bobine di filo di rame intorno a nuclei di metallo, come quelli "rotorici".

Quando un polo del rotore si posiziona in prossimità di un polo dello stesso segno appartenente allo statore essi si respingono ed il rotore comincia il suo movimento. La forza che si viene a generare si chiama, appunto, forza elettromotrice.

7.1 motori brushless e loro vantaggi

Uno dei problemi dei motori elettrici è costituito dal fatto che le spazzole che strisciano sul collettore dell'albero rotante e che trasmettono la corrente elettrica ai suoi avvolgimenti, non sono adatte per velocità di rotazione elevate. Per ovviare a questo inconveniente esistono i motori *brushless* (senza spazzole). Essi, a differenza di quanto visto fin'ora, sono caratterizzati dalla presenza di magneti permanenti. In questo tipo di motori elettrici la commutazione avviene senza contatti striscianti e

quindi la loro durata è maggiore. Il controllo di questi motori si effettua elettronicamente. L'eliminazione delle spazzole riduce anche il rischio di mal funzionamento rispetto ai motori elettrici visti precedentemente, perché in questo caso non ci sono più parti in movimento a contatto fra loro. L'assenza di avvolgimenti sul rotore permette poi a questi motori di raggiungere una maggiore velocità angolare perché non risentono delle elevate forze centrifughe che si generano durante il moto. La fase di commutazione viene gestita a livello elettronico e non più meccanico.

L'affidabilità di questi motori è molto elevata ed essi offrono ottimi rendimenti elettrici.

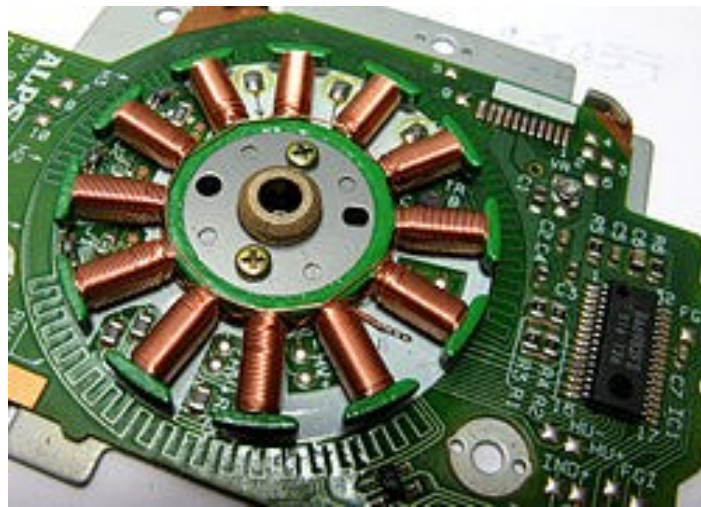


Figura 24. Circuito di alimentazione del motore brushless.

In questi motori il circuito di alimentazione deve essere più sofisticato, dato che le funzioni del collettore meccanico sono svolte tramite un controllo elettronico di potenza. Ultimamente sono molto utilizzati in campo industriale e impiegati nelle macchine automatiche che necessitano di movimenti precisi e veloci con ingombri decisamente contenuti e grande versatilità, offerta anche da apparecchiature di controllo programmabili molto sofisticate che danno un completo controllo e diagnostica del motore.



Figura 25. Esempi di motori Brushless presenti sul mercato.

Il principale svantaggio di questo tipo di motori sta nel maggiore costo. Al contrario dei motori a spazzole, infatti, il controllo viene effettuato elettronicamente da un controller, un dispositivo elettronico fornito dal costruttore del motore o da terze parti; per questo non è solitamente possibile utilizzare un potenziometro o un reostato (inefficiente ma estremamente economico) per la regolazione della velocità.

8. Il motore a corrente alternata AC asincrono

L'invenzione del motore asincrono (denominato anche "motore a campo rotante") si deve a G. Ferraris. È il motore maggiormente adottato sui veicoli elettrici. La parte fissa di questo motore (lo statore) prevede tre avvolgimenti disposti su altrettanti piani posti a 120° . Ogni avvolgimento genera un campo magnetico. Alimentando i tre avvolgimenti in corrente alternata, con onda di ampiezza uguale, ma con sfasatura di un terzo di periodo, è possibile ottenere un campo magnetico risultante dai tre campi che vengono generati.

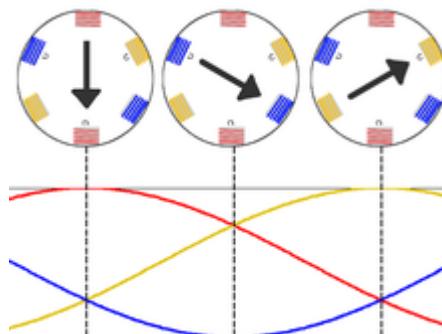


Figura 26. Grafico del campo magnetico rotante in un motore asincrono.

Tale campo magnetico risultante ha modulo costante e ruota con una certa velocità di rotazione. Il rotore può essere realizzato costruttivamente in un modo chiamato a “gabbia di scoiattolo” oppure con i classici avvolgimenti di rame realizzati in modo simile a quelli dello statore. Il campo magnetico rotante prodotto dalla corrente alternata che circola negli avvolgimenti dello statore trascina in rotazione il rotore che a sua volta è interessato da una corrente indotta.



Figura 27. Sezione di un M.A.T.

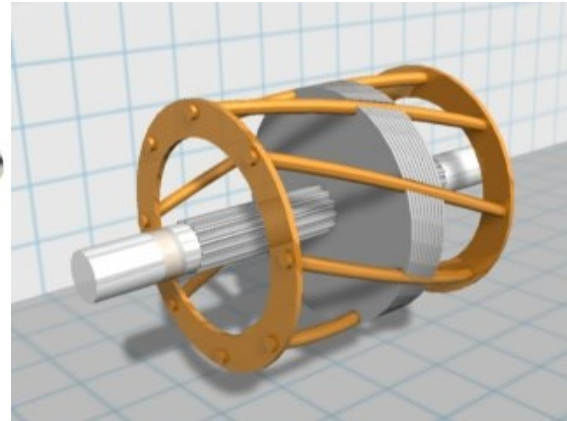


Figura 28. Rotore a “Gabbia di scoiattolo”

La rotazione del campo magnetico di statore avviene ad una velocità fissa n_s legata alla frequenza di alimentazione f , detta velocità di sincronismo. La velocità di rotazione del rotore n_r sarà sempre minore di quella di sincronismo. Questa differenza fa sì che sul rotore agisca un campo magnetico che ruota ad una velocità $n_s - n_r$, pertanto esso sarà sede di forze elettromotrici e quindi correnti indotte (per questo motivo si parla di motore ad induzione).

Per questo motivo il motore elettrico a corrente alternata “asincrono” viene chiamato anche “motore a induzione”. La velocità di rotazione del rotore di un motore “asincrono” dipende dal numero dei suoi poli (gli avvolgimenti dello statore) e dalla tensione di alimentazione. La frequenza della corrente alternata è fissata a 50 Hz. Il funzionamento di questi motori elettrici viene gestito da controlli elettronici che agiscono direttamente sulla polarità di ogni fase e sulla commutazione. Un altro vantaggio di questi motori è che non richiedono nessuna manutenzione. Il fatto che possano raggiungere velocità angolari di oltre 16000 giri/min, rispetto a 6-7000 giri/min del motore a corrente continua li rende particolarmente adatti per i veicoli elettrici.

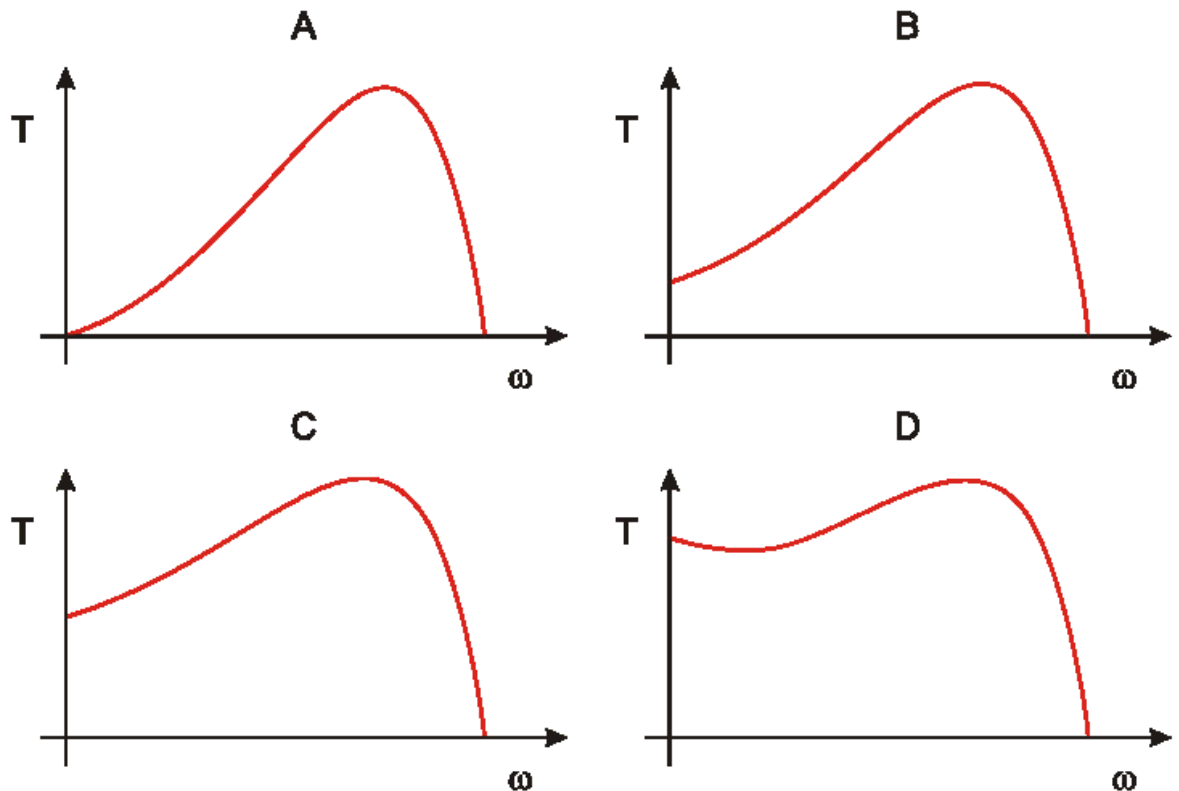


Figura 29. Tipologie di grafici T- ω .

Curva di coppia di 4 differenti motori elettrici asincroni:

- A) Motore monofase;
- B) Motore polifasico a singola gabbia di scoiattolo;
- C) Motore polifasico a singola gabbia di scoiattolo a barre profonde;
- D) Motore polifasico a doppia gabbia di scoiattolo;

Evidentemente le correnti di rotore produrranno a loro volta un campo magnetico che ruota a velocità $n_s - n_r$ rispetto al rotore, il quale ruota a velocità n_r rispetto allo statore; il risultato è che il campo di rotore ruota alla velocità n_s rispetto allo statore ed è dunque sincrono con il campo di statore.

Tale condizione di sincronismo tra le due onde di campo magnetico assicura che il motore produca una coppia costante. La situazione in cui $n_s = n_r$, cioè velocità di rotore uguale a quella di sincronismo, è una condizione limite in cui non vi sono forze elettromotrici (e quindi correnti indotte) e dunque la coppia motrice è zero.

Diversamente, la mutua interazione attraverso i relativi campi magnetici tra le correnti di rotore e quelle di statore produce una coppia risultante netta.

Il legame tra velocità di sincronismo, frequenza f di alimentazione ed il numero di coppie polari p è espresso dalla relazione:

$$n_s = 60 \frac{f}{p}$$

Dove n_s è espressa in rpm (rotazioni per minuto) ed f è espressa in Hertz. Per esempio, un motore con tre coppie polari (6 poli totali), alimentato a 50 Hz ha una velocità angolare di sincronismo di 1000 giri al minuto.

La velocità del rotore in condizioni nominali è sempre minore di un 3-6%; è il fenomeno dello scorrimento (slip) che consente la produzione della coppia. Dalla formula che definisce lo scorrimento è possibile esprimere la velocità di rotazione effettiva del rotore (n_r):

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

dove s è lo scorrimento, n_s è la velocità di sincronismo e n_r è la velocità reale alla quale ruota il rotore.

Il valore effettivo dello scorrimento dipende dal carico effettivo sul rotore. Il carico non è mai nullo perché sono sempre presenti i fenomeni di attrito tra le parti mobili e con l'aria che impediscono al motore di ruotare alla velocità di sincronismo, vincendo questa coppia meccanica.

Gli avvolgimenti statorici sono in genere inglobati in resine che garantiscono un'ottima protezione dall'acqua e dagli agenti atmosferici. Questi motori sono frequentemente alimentati per mezzo di inverter elettronici che possono variarne la velocità variando in modo coordinato la frequenza e la tensione di alimentazione. L'uso di inverter permette di azionare il motore anche a partire da una corrente continua, come avviene nella trazione ferroviaria.

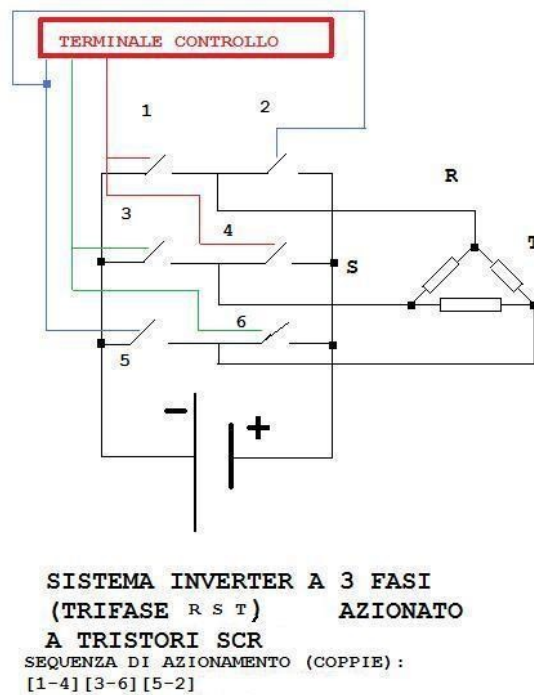


Figura 30. Sistema inverter trifase.

Gli avvolgimenti statorici trifase possono essere collegati a stella oppure a triangolo, permettendo di alimentare lo stesso motore con tensioni trifase di 400 e 230 V. In alcuni grossi motori si preferisce avviare a stella e poi commutare a triangolo, al fine di limitare le correnti di spunto, quando non sono utilizzati gli inverter.

Esistono motori asincroni di potenza usualmente inferiore a 3 kW alimentati anche con tensioni monofase. Tali motori possono essere dotati di ordinari avvolgimenti a due fasi, dove per alimentare la seconda fase si usa il ritardo di tempo introdotto da un condensatore; un tipico esempio è costituito dai motori utilizzati per far girare le pale dei ventilatori o degli asciugacapelli. Per potenze piccolissime si usano i motori in cui la seconda fase è un circuito spazialmente asimmetrico chiuso in corto circuito (motori a "polo shuntato").

I motori asincroni operano normalmente con gli avvolgimenti di rotore chiusi in corto circuito ma il rotore può essere eseguito in costruzioni differenti.

Per quanto riguarda la struttura dei circuiti indotti, il tipo più semplice e robusto di rotore si realizza infilando nei canali altrettante sbarre di rame, ciascuna delle quali riempie completamente un canale. Le testate delle sbarre che sporgono dal pacco lamellare vengono direttamente collegate fra loro, da una parte e dall'altra, mediante un grosso

anello di rame. Il rotore così costruito prende la forma e viene indicato coi nomi di rotore a gabbia di scoiattolo o rotore in corto circuito..

Come già detto, questi motori sono largamente utilizzati nell'industria in quanto affidabili ed economici.

9.La frenata a recupero

Nei motori a corrente alternata asincroni è possibile il recupero di corrente durante le frenate e le decelerazioni del veicolo. Infatti, quando la velocità angolare del rotore (che è collegato alle ruote) diventa inferiore a quella di sincronismo, il motore cessa di generare la potenza meccanica e comincia a comportarsi da generatore. Naturalmente la corrente elettrica che viene prodotta in queste fasi è di tipo alternativo e va opportunamente trasformata in corrente continua dal sistema elettronico di controllo del motore poiché il pacco di batterie può essere caricato solo con corrente continua.



Figura 31. Motore elettrico con meccanismo di trasmissione attaccato al rotore.

Dai dati sperimentali si desume che un veicolo elettrico funzionante secondo un ciclo urbano può recuperare dai rallentamenti e dalle frenate circa il 7-10% della carica della batteria. Questo valore non è trascurabile ed è stato valutato sperimentalmente. Per determinarlo ci si basa sul confronto fra il livello residuo della carica di un pacco di batterie quando il veicolo funziona con il sistema di recupero di frenata attivato e il livello di carica che rimane quando lo stesso veicolo ha effettuato lo stesso percorso dissipando tutta l'energia. Occorre osservare che nei cicli extraurbani non si può contare su grandi recuperi di frenata perché la marcia del veicolo è più costante.

CONCLUSIONI

Nonostante i progressi notevoli e lo sviluppo di tecnologie di avanguardia per la produzione, l'immagazzinamento e l'utilizzo dell'idrogeno compiuti negli ultimi anni, tali tecnologie presentano ancora, come già visto, problemi non trascurabili e difficoltà di applicazione che ne limitano la diffusione immediata di massa.

A livello internazionale è oramai consolidata l'idea che l'idrogeno sarà il combustibile del futuro, ma i problemi legati alla produzione di tale sostanza e alla sicurezza di un suo utilizzo, al costo di tali tecnologie e alla piena integrazione delle reti distributive di idrogeno sul territorio sono ostacoli notevoli, ma non insormontabili. Attualmente le tecnologie ad idrogeno sembrano essere una realtà ancora lontana, e si pensa in generale che prima di un ventennio non sarà possibile una sostituzione delle automobili tradizionali con automobili alimentate mediante tale combustibile innovativo. La forte e crescente spinta alla ricerca e allo sviluppo in tale settore lascia in ogni caso sperare che, quando la disponibilità dei combustibili fossili sarà oramai esaurita, gli autoveicoli alimentati ad idrogeno saranno una realtà consolidata e in grado di sostituire pienamente le vetture oggi presenti sul mercato.

Per far fronte alle esigenze nell'immediato periodo le case automobilistiche stanno comunque riconsiderando le tradizionali soluzioni a combustibile fossile reinterpretate con nuovi miglioramenti e tecnologie rivolte a un abbattimento di consumi e emissioni nocive, quali integrazione con sistemi elettrici o utilizzo di combustibili diversi.

Nel lungo periodo l'utilizzo dell'idrogeno quale fonte combustibile sembra essere però l'unica vera soluzione ai problemi attuali poiché, nell'ottica dell'esaurimento delle fonti non rinnovabili di energia (combustibili fossili), non sembrano esserci altri sistemi di generazione di energia efficaci e versatili tanto quanto i motori a combustione interna ad idrogeno e le celle a combustibile.

Per affrontare e sviluppare i veicoli a idrogeno e le tecnologie della produzione, dello stoccaggio e della rete di distribuzione di questo gas, sul quale si baserà il futuro sistema di veicoli puliti, sono necessarie approfondite competenze in tutti i settori dell'ingegneria (meccanica strutturale, elettrochimica, elettronica, elettrotecnica, dinamica, materiali, fisica, ambiente, chimica, economia aziendale etc.). Invece l'eccessiva specializzazione dei tecnici e la mancanza di dialogo fra i diversi settori tendono a rallentare il processo di integrazione e di ottimizzazione tecnologico-economico necessari allo sviluppo dell'auto a fuel cells.

Nei prossimi anni sarà sempre più importante moltiplicare le occasioni di confronto su questi temi, fra le aziende e il mondo accademico. Il mondo della ricerca istituzionale può fare molto per sostenere l'evoluzione delle tecnologie sulle quali si basa l'auto a idrogeno.

L'evoluzione tecnica delle auto e dei veicoli a idrogeno a fuel cells è solo all'inizio, ma la situazione energetica e ambientale del Pianeta potrebbe facilmente accelerare la introduzione di questi mezzi innovativi. La loro affermazione potrebbe essere più rapida di quanto si possa immaginare.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Global Warming. The complete briefing – J. Houghton – Cambridge University Press (Gran Bretagna).
- 2) Innovazione competitività – Notiziario del Centro Ricerche Fiat (4/2002).
- 3) Idrogeno: verso la sostenibilità dei consumi energetici – Dunn S. – Edizioni Ambiente (2002).
- 4) Progress report for Hydrogen, fuel cells, and Infrastructure Technologies Program – U.S. Department of Energy/ Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies (Novembre 2002).
- 5) Survey of the Economics of Hydrogen Technologies – Padrò C. E. G., Putsche 5 (1999).
- 6) Hydrogen Supply Storage Materials for Mobile Applications – L. Schlapbach, A. Züttel – Nature (Nov. 2001).
- 7) Liquid hydrogen for motor vehicles. The world's first public LH2 filling station, K. Pehr, P. Saurmann, O. Traeger, M. Bracha – International Journal of Hydrogen Energy (2001).
- 8) Fuel cells and their application – Kordesch K., Simader G. VCH – Weinheim.
- 9) Status and prospects of fuel cells as automotive engines – F.R. Kalhammer et.al. Report for the State of California air Resources Board.
- 10) Well-to-Wheel energy use and greenhouse gas emission of advanced fuel/vehicle systems-North American analysis – Executive Summary Report of General Motors and alii (Aprile 2001).
- 11) Comparison of different vehicle powertrains – P. Miszey, E. Newson – Journal of power sources (2001).
- 12) Controllo ed integrazione guidatore-veicolo-strada con sistemi di azionamento "drive by wire" in veicoli elettrici a idrogeno e fuel cells con motori "in wheel" – M.Callegari, G. Rattighieri, E. Rossi HTCES Modena 2005.
- 13) Advances in Real-Time Simulation of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles – Dufour C., Belanger J., Opal-RT Technologies, Canada Ishikawa T., Uemura K. Toyota Motor Corp., Toyota MACS inc., Japan – EVS21 Monaco 2005.
- 14) <http://www.e-cology.it/2010/05/24/bmw-serie-1-ad-idrogeno/971>.
- 15) <http://www.autoblog.it/.../toyota-la-prima-auto-ad-idrogeno>.
- 16) <http://www.omniauto.it/magazine/732/idrogeno-energia-per-il-futuro>.
- 17) http://it.wikipedia.org/wiki/Economia_dell'idrogeno.
- 18) Web sites delle aziende citate e attinenti al settore.

