

SISTEMA DI ACCUMULO DELL'ENERGIA PER VEICOLO IBRIDO CON SMES RAFFREDDATO MEDIANTE COMBUSTIBILE CRIOGENICO

L. Trevisani, A. Morandi, F. Negrini, P. L. Ribani, M. Fabbri
Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Bologna
Viale Risorgimento, 2 – 40136 Bologna
luca.trevisani@mail.ing.unibo.it

Abstract

Presso il Laboratorio di Ingegneria Magnetofluidodinamica e Superconduttività Applicata (LIMSA) dell'Università di Bologna è stato progettato e brevettato un sistema di accumulo dell'energia basato su uno SMES raffreddato mediante combustibile criogenico. Il dispositivo è ideato in particolare per l'applicazione a bordo di veicoli ibridi alimentati ad idrogeno liquido, ed in prospettiva a metano liquido se i superconduttori in grado di operare al corrispondente livello di temperatura verranno adeguatamente sviluppati. L'articolo descrive il principio di funzionamento e le caratteristiche del dispositivo con riferimento in particolare all'applicazione a bordo di una automobile. Viene inoltre presentato il progetto di un prototipo di laboratorio con conduttore in MgB_2 che si intende realizzare e sperimentare presso il LIMSA.

Introduzione

Una quota rilevante dell'energia complessivamente utilizzata nelle attività dell'uomo è impiegata nel trasporto delle merci e delle persone. Un veicolo per il trasporto su strada è tipicamente dotato di un motore a combustione interna che utilizza idrocarburi derivati dal petrolio, cui sono associati un basso rendimento ed elevate emissioni inquinanti. Al fine di eliminare le emissioni a livello locale e migliorare il rendimento globale si sono sviluppati veicoli dotati di propulsore elettrico alimentato a batteria. Il successo commerciale di tali veicoli è però finora mancato soprattutto a causa dell'autonomia non confrontabile con quella dei veicoli tradizionali e del costo elevato del sistema di accumulo. Recentemente l'interesse delle case automobilistiche si è spostato verso lo sviluppo di veicoli a trazione ibrida dotati di motore a combustione interna associato ad un motore/generatore elettrico. In fase di decelerazione il motore elettrico produce una coppia frenante convertendo così in energia elettrica l'energia cinetica del veicolo che viene convogliata nell'apposito sistema di accumulo. In fase di accelerazione tale energia viene utilizzata per alimentare il motore elettrico e produrre una coppia motrice che può essere utilizzata isolatamente o in combinazione con quella prodotta dal propulsore a combustione interna. Mediante la tecnologia ibrida è possibile ridurre significativamente i consumi di combustibile del veicolo [1]. Un'altra tecnologia in fase di sviluppo è quella dei veicoli a fuel cell, nei quali è presente unicamente un motore elettrico alimentato da uno stack di celle elettrochimiche a combustibile. Anche in questi veicoli è generalmente previsto un sistema di accumulo e gestione dell'energia basato su una batteria atto a recuperare l'energia cinetica del veicolo durante le decelerazioni. Sebbene nel seguito ci si riferisca prevalentemente ad un veicolo ibrido dotato di motore a combustione interna, le stesse considerazioni sono valide anche per un veicolo dotato di fuel-cell e sistema di accumulo dell'energia elettrica.

Nei veicoli a trazione ibrida, la funzione principale del sistema di accumulo dell'energia elettrica è quella di erogare potenza nei momenti di maggiore richiesta

(accelerazioni) e assorbire potenza nei momenti di eccedenza (decelerazioni). Per questo motivo nei veicoli ibridi, a differenza che nei veicoli elettrici alimentati a batteria, le caratteristiche richieste al sistema di accumulo sono quelle di potersi caricare e scaricare in tempi brevi e con elevata efficienza, piuttosto che avere una capacità di accumulo molto elevata. La quasi totalità dei veicoli a trazione ibrida attualmente commercializzati utilizzano come sistema di accumulo dell'energia elettrica una o più batterie [1, 2]. Tuttavia le batterie presentano problemi tecnici (surriscaldamento, degradazione dell'efficienza, riduzione della durata di vita) e di sicurezza quando sono sottoposte a ripetuti cicli di carica e scarica veloce (rischio di esplosione per alcuni tipi di batterie). Gli ultracondensatori presentano ancora caratteristiche di energia specifica per unità di massa insufficienti, oltre che problemi di affidabilità quando sottoposti a forti sollecitazioni e vibrazioni. I volani (flywheel) pongono rilevanti problemi di sicurezza in caso di incidente, e possono indurre problemi di stabilità del veicolo a causa dell'effetto giroscopico del volano stesso.

Recentemente sta aumentando notevolmente l'interesse per l'utilizzo nel settore dei trasporti di combustibili gassosi quali l'idrogeno e il metano. Ciò è dovuto in particolare alle caratteristiche di basso costo (metano), possibilità di essere prodotto da fonti energetiche rinnovabili (idrogeno) o biomasse (metano, idrogeno), contenuto di carbonio basso (metano) o nullo (idrogeno). Le stime dell'European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP) indicano un mercato di veicoli alimentati ad idrogeno in Europa nel 2020 compreso fra 0.4 e 1.8 milioni di unità vendute all'anno [5]. Lo stoccaggio di combustibili gassosi a bordo di un veicolo può avvenire in forma liquida a temperature criogeniche (20 K per l'idrogeno, 111 K per il metano). Tale soluzione consente elevate densità di stoccaggio e richiede, al posto di bombole ad alta pressione, la realizzazione di un serbatoio con super-isolamento termico per limitare gli ingressi termici dall'ambiente e quindi il boil-off di combustibile (la tecnologia attuale permette di eliminare completamente il boil-off per soste del veicolo di durata tipica di un uso cittadino) [6].

Uno SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) presenta caratteristiche tecniche favorevoli per l'applicazione come sistema di accumulo a bordo di veicoli ibridi, in quanto offre elevata potenza per unità di massa, basse perdite, possibilità di sostenere migliaia di cicli di carica/scarica veloce. Lo svantaggio principale di uno SMES è che richiede, per il suo funzionamento, il raffreddamento a temperatura inferiore alla temperatura critica propria del materiale superconduttore utilizzato. Ciò determina la necessità di realizzare un opportuno sistema criogenico di contenimento e refrigerazione. La potenza termica di refrigerazione si può ottenere con sistema a ciclo chiuso (cryocooler), oppure mediante evaporazione di un opportuno liquido criogenico (tipicamente azoto, neon oppure elio). Nel caso di applicazione a bordo di un veicolo, la prima soluzione non risulta adatta a causa del peso e dell'ingombro rilevanti del cryocooler e della necessità di alimentarlo continuamente, mentre la seconda determina la necessità di periodici rifornimenti di liquido criogenico che limitano l'autonomia di funzionamento e incidono sul costo finale di utilizzo.

Per ovviare a questi problemi, presso il Laboratorio di Ingegneria Magnetofluidodinamica e Superconduttività Applicata (LIMSA) dell'Università di Bologna è stato ideato, progettato e brevettato un sistema di accumulo basato su uno SMES raffreddato mediante combustibile criogenico [3]. La temperatura del combustibile deve essere tale da garantire il funzionamento del materiale superconduttore utilizzato per la realizzazione dello SMES. Allo stato attuale della tecnologia dei materiali superconduttori lo scenario di riferimento è quello dei veicoli che utilizzano idrogeno stoccato in forma liquida alla temperatura di 20 K. Questo livello di temperatura consente

la realizzazione dello SMES con materiale superconduttivo di tipo MgB_2 (temperatura critica di 39 K, attualmente disponibile a basso costo), oppure con materiali HTS per maggiori prestazioni quali YBCO (temperatura critica di 92 K), BSCCO-2212 (temperatura critica di 95 K), BSCCO-2223 (temperatura critica di 107 K). In particolare si ritiene il conduttore in YBCO di seconda generazione particolarmente interessante per questa applicazione nel caso in cui nei prossimi anni vengano rispettate le attuali previsioni di riduzione del costo di produzione [4]. In prospettiva, qualora il progresso della tecnologia portasse allo sviluppo di un superconduttore a più alta temperatura critica, il mercato di riferimento comprenderebbe anche i veicoli a metano stoccato in forma liquida alla temperatura di 111 K. Sono già noti superconduttori la cui temperatura critica è superiore a quella del metano liquido (es. Hg-1223, operante fino a 138 K), tuttavia le loro prestazioni non sono attualmente soddisfacenti per l'impiego nell'applicazione in esame.

Descrizione del sistema SMES raffreddato mediante combustibile criogenico

Il sistema di accumulo dell'energia progettato e brevettato presso il LIMSA è costituito da uno magnete superconduttivo toroidale inserito all'interno di un serbatoio per combustibile criogenico. Ciò determina il fondamentale vantaggio di eliminare i costi aggiuntivi relativi alla realizzazione "ad hoc" del criostato dello SMES e ai rifornimenti del criogeno specifico dello SMES. Dal punto di vista della sicurezza, il dispositivo presenta essenzialmente le stesse problematiche determinate dallo stoccaggio di combustibile criogenico a bordo di veicoli, le quali sono già state affrontate e risolte dalle case automobilistiche [7]. Un eventuale guasto dello SMES non può in alcun modo determinare l'innesto della combustione, non essendo presente ossigeno all'interno del serbatoio.

In un veicolo a trazione ibrida, il funzionamento combinato del motore a combustione interna e del motore/generatore elettrico concorrono al funzionamento ottimale del dispositivo serbatoio/SMES. L'alimentazione del motore a combustione interna richiede l'evaporazione continua di parte del combustibile. Negli attuali veicoli a combustibile criogenico parte del calore necessario all'evaporazione (la quota richiesta eccedente rispetto all'ingresso termico dall'ambiente) è fornito mediante un riscaldatore elettrico. Nel dispositivo in oggetto, il calore latente di evaporazione assorbito dal combustibile prelevato è utilizzato per il raffreddamento dello SMES. Durante le rampe di salita e discesa della corrente nello SMES (rispettivamente nei periodi di carica e di scarica dello stesso), si verificano piccole dissipazioni di potenza (perdite AC). Tale potenza termica è utilizzata proficuamente ai fini dell'evaporazione del combustibile. Nel caso in cui la dissipazione all'interno dello SMES non sia sufficiente per produrre il flusso di combustibile gassoso richiesto è possibile utilizzare un riscaldatore elettrico posto nel serbatoio del veicolo, il quale ha la funzione di immettere nel serbatoio la potenza in difetto. Si noti che l'immissione di un Watt termico determina l'evaporazione di 8 g/ora di idrogeno liquido a pressione ambiente. Il flusso di combustibile mediamente richiesto da un motore a combustione interna o da una fuel-cell determina quindi l'assorbimento di un flusso di calore rilevante, in grado di raffreddare lo SMES.

A titolo indicativo si riporta un possibile dimensionamento del sistema per applicazione a bordo di un veicolo ibrido automobilistico. Assumendo una massa del veicolo di 1200 kg, il motore a combustione interna può essere dimensionato in funzione della velocità massima sostenibile in modo continuativo in piano, ovvero in salita con determinata pendenza. Ad esempio, per un veicolo con sezione frontale tipica di un'automobile media, un motore a combustione interna da 40 kW è sufficiente a garantire una velocità massima in piano di 150 km/h. La potenza del motore/generatore elettrico

può essere scelta in base alle prestazioni richieste durante i transitori di accelerazione, e alla potenza frenante fornita dal sistema elettrico durante le decelerazioni. Tale flusso di potenza determina la conversione dell'energia cinetica del veicolo in energia elettromagnetica accumulata nello SMES, e quindi disponibile per le accelerazioni successive (frenata rigenerativa). Ad esempio una potenza elettrica di 40 kW determina una frenata da 60 km/h a 0 km/h in circa 4 s. Qualora il guidatore richieda una potenza frenante superiore a quella ottenibile dal sistema elettrico compatibilmente con le sue caratteristiche e con lo stato di carica dello SMES, il sistema di controllo aziona i freni meccanici in modo che essi forniscano la potenza frenante aggiuntiva (dissipata in calore). La capacità di accumulo del dispositivo SMES può essere scelta con riferimento all'autonomia richiesta al sistema elettrico durante le accelerazioni e all'energia accumulabile durante le decelerazioni. Ad esempio occorre una capacità effettiva di accumulo di 200 kJ per immagazzinare l'energia cinetica del veicolo che si muove con velocità di 66 km/h, ovvero 100 kJ con velocità di 46 km/h.

La Fig. 1 mostra uno schema di principio dell'applicazione del dispositivo a bordo di un veicolo ibrido dotato di motore a combustione interna, con sistema ibrido di tipo parallelo. In figura sono rappresentati i collegamenti principali fra le varie unità (linee tratteggiate per i collegamenti di segnale, linee continue per quelli di potenza). Nel semplice schema di trazione ibrida rappresentato, il propulsore a combustione interna e il motore/generatore elettrico concorrono nel fornire la coppia motrice/frenante all'albero di trasmissione. Lo SMES è interfacciato col motore/generatore attraverso un convertitore gestito dall'unità di controllo. La Fig. 2 mostra uno schema di principio dell'applicazione del dispositivo a bordo di un veicolo ibrido dotato di fuel-cell stack.

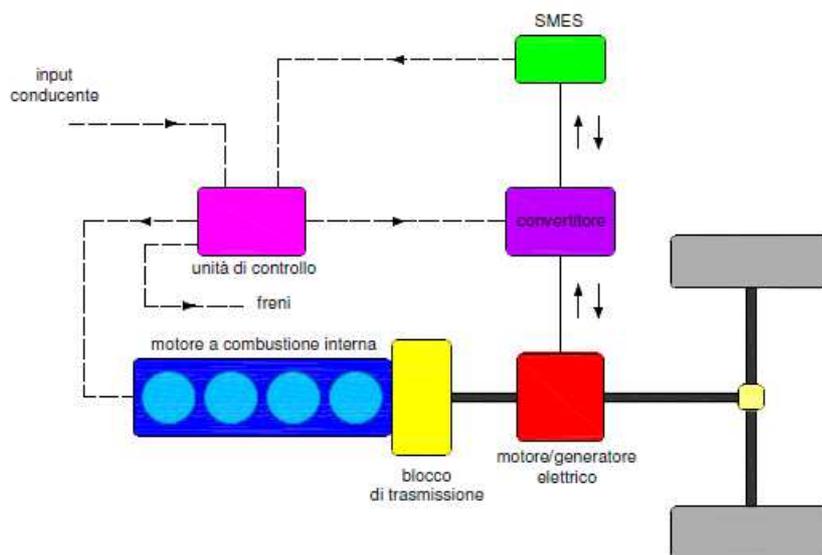


Figura 1: Schema di principio dell'applicazione del dispositivo SMES a bordo di un veicolo ibrido dotato di motore a combustione interna

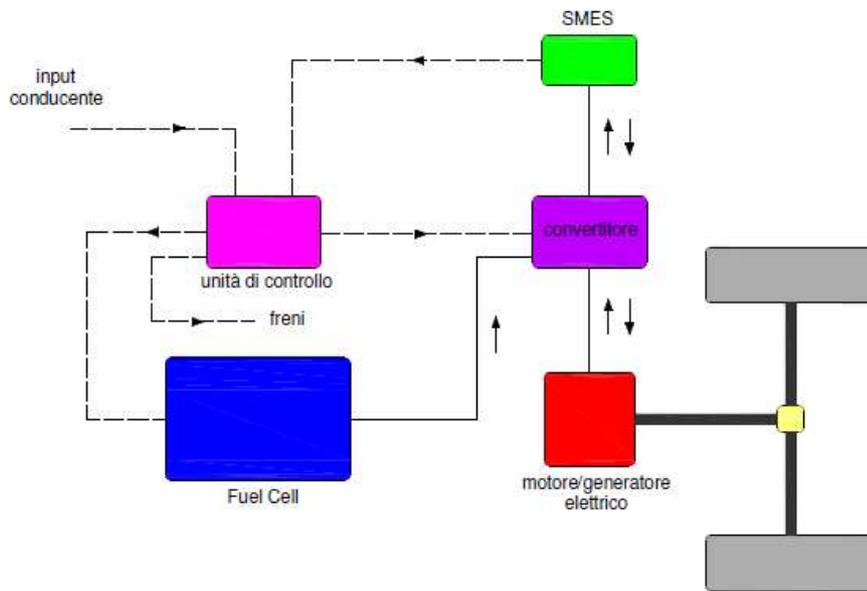


Figura 2: *Schema di principio dell'applicazione del dispositivo SMES a bordo di un veicolo ibrido dotato di fuel-cell stack*

La Fig. 3 mostra lo schema di principio del sistema di interfacciamento tra il magnete superconduttore e l'attuatore elettrico. Il motore/generatore è alimentato da un bus DC attraverso un inverter. L'unità di controllo acquisisce quale input dal conducente del veicolo il valore di coppia richiesta (positiva o negativa a seconda che si sia in fase di accelerazione o decelerazione) e lo stato di carica dello SMES, e stabilisce la ripartizione dei flussi di potenza fra le varie unità. Al fine di implementare un'opportuna strategia di controllo della macchina elettrica, la stessa unità acquisisce da appositi sensori le correnti che circolano nelle fasi, la posizione del rotore e la sua velocità. Durante il funzionamento come motore l'inverter assorbe corrente (e quindi energia) dal bus DC, mentre il chopper fa in modo che lo SMES inietti verso il bus DC una corrente (e quindi un'energia) il cui valore medio (all'interno di un intervallo di commutazione opportunamente scelto) coincida con quello della corrente assorbita dall'inverter, mantenendo quindi carico il condensatore C. In tal modo lo SMES si scarica cedendo energia al motore. Durante il funzionamento come generatore le cose procedono in modo analogo: il convertitore eroga corrente al bus DC e il chopper fa in modo che lo SMES assorba dal bus DC una corrente di pari valore medio. In questa fase lo SMES si carica assorbendo l'energia prodotta dal generatore. La funzione del condensatore è quella di livellare la tensione del bus DC durante le fasi di commutazione dei convertitori. Il resistore R in figura rappresenta il riscaldatore posto nel serbatoio, ed è alimentato dal bus DC in modo controllato tramite un interruttore statico per regolare il flusso di combustibile evaporato. La sua presenza, considerate le esigue potenze in gioco, non altera comunque il meccanismo di interazione tra SMES e motore/generatore.

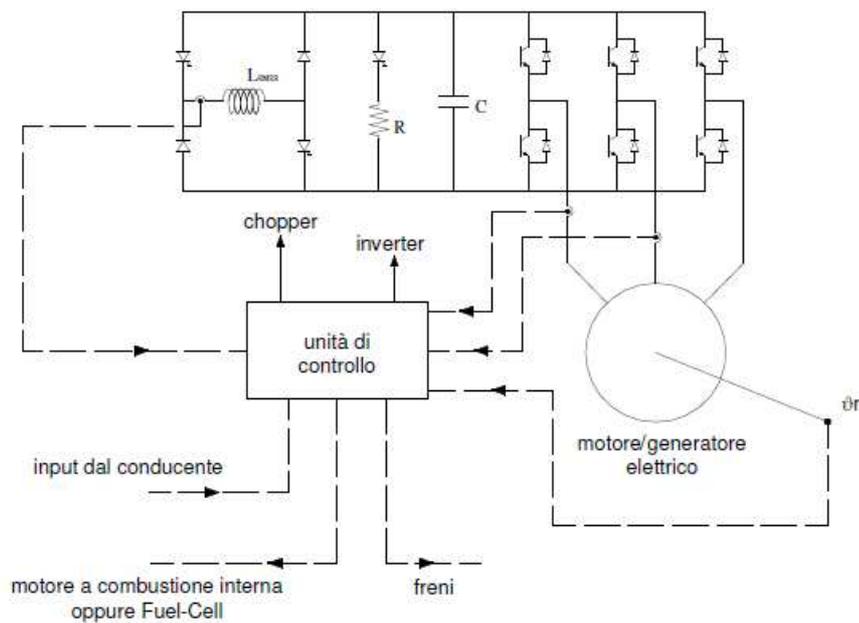


Figura 3: *Schema di principio del sistema di interfacciamento tra magnete superconduttore e motore/generatore elettrico*

Nelle Fig. 4 e 5 si riportano a titolo di esempio gli andamenti delle grandezze di interesse durante una fase di frenata del veicolo. I risultati mostrati sono stati ottenuti mediante simulazione. Si è considerato un magnete superconduttore con corrente nominale pari a 300 A e induttanza pari a 5 H, corrispondenti ad una capacità di accumulo di 225 kJ. Il motore/generatore, le cui caratteristiche sono tratte dalla letteratura tecnica specialistica, è del tipo a magneti permanenti annegati con controllo di coppia e possibilità di deflussaggio per l'esercizio alle alte velocità. La massa del veicolo è pari a 1200 kg. La Fig. 4 mostra l'andamento della coppia frenante prodotta dal generatore durante la decelerazione di un veicolo avente velocità iniziale di 30 km/h, corrispondente ad una velocità di rotazione di 1000 rpm (si è assunto un rapporto tra la velocità del veicolo e la velocità di rotazione della macchina elettrica pari a 0.08 m). La stessa figura mostra anche l'andamento della velocità di rotazione. Si suppone che l'unità di controllo imponga una coppia frenante di 40 Nm e che nello SMES circoli una corrente di 100 A all'inizio della frenata. La Fig. 5 mostra l'andamento della corrente nello SMES e della tensione del bus DC. Si osserva che lo SMES si carica ricevendo energia dalla macchina elettrica ed evitando così l'innalzamento della tensione sul bus DC. Dal confronto fra i valori numerici riportati nelle Fig. 4 e 5 si deduce che l'energia cinetica persa dal veicolo è quasi integralmente convertita in energia magnetica all'interno dello SMES, a meno di una quantità convertita in calore a causa delle dissipazioni che avvengono nei componenti elettrici che nel caso esaminato è nell'ordine del 10% (tali perdite sono comunque presenti in tutti i sistemi di trazione ibrida, e non dipendono in modo specifico dall'utilizzo dello SMES come sistema di accumulo).

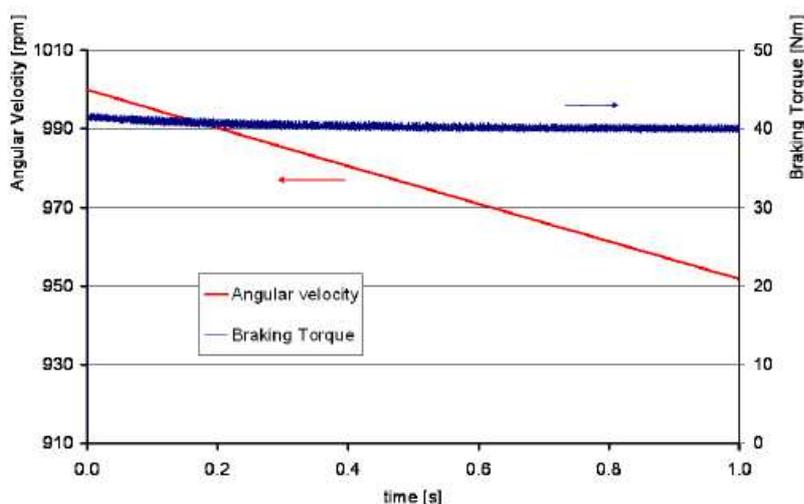


Figura 4: Andamento della coppia frenante e della velocità angolare del motore/generatore elettrico durante la fase di frenata del veicolo

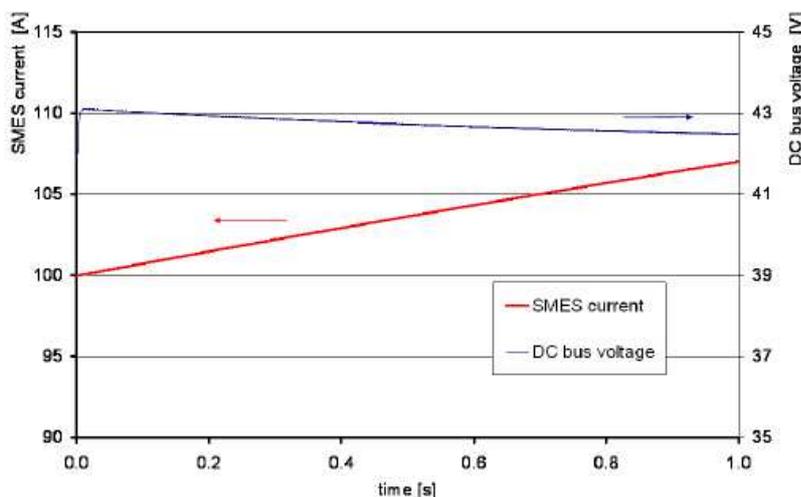


Figura 5 Andamento della tensione del bus DC e della corrente nello SMES durante la fase di frenata del veicolo

Progetto di un prototipo di laboratorio del dispositivo SMES

Un prototipo del dispositivo SMES di capacità ridotta (50-70 kJ, contro i 300-400 kJ previsti per il dispositivo finale) con conduttore in MgB_2 è in fase di progettazione e realizzazione presso il LIMSA. La progettazione e realizzazione del prototipo hanno lo scopo di mettere a punto le tecniche costruttive idonee alla geometria toroidale compatta dello SMES (necessaria a garantire il confinamento del campo magnetico all'interno del dispositivo), e successivamente di verificare sperimentalmente aspetti funzionali quali l'interfacciamento con il motore/generatore elettrico (della stessa tipologia di quello presente negli attuali veicoli ibridi) e la misura delle perdite AC nelle condizioni di funzionamento previste.

La Fig. 6 mostra la mappa dell'intensità del campo di induzione magnetica del prototipo progettato in MgB_2 sul piano mediano orizzontale e su un semipiano azimutale passante per il centro di una bobina. Il magnete è costituito da 6 soleinoidi di tipo

“racetrack” disposti a formare un toroide. La lunghezza totale di conduttore MgB_2 impiegato è di 4.23 km; l’induttanza del magnete è di 1.4 H; l’energia stoccata è di 62.8 kJ con corrente nominale di 300 A. In Fig. 7 è mostrato lo schema dell’apparato sperimentale che si intende realizzare per le prove di funzionamento del prototipo. Il motore/generatore trifase connesso alla rete elettrica simula il carico meccanico nelle fasi di accelerazione e decelerazione del veicolo ibrido; lo SMES è collegato tramite convertitore ad un motore/generatore a magneti permanenti per fornire o assorbire potenza secondo i comandi della centralina di controllo.

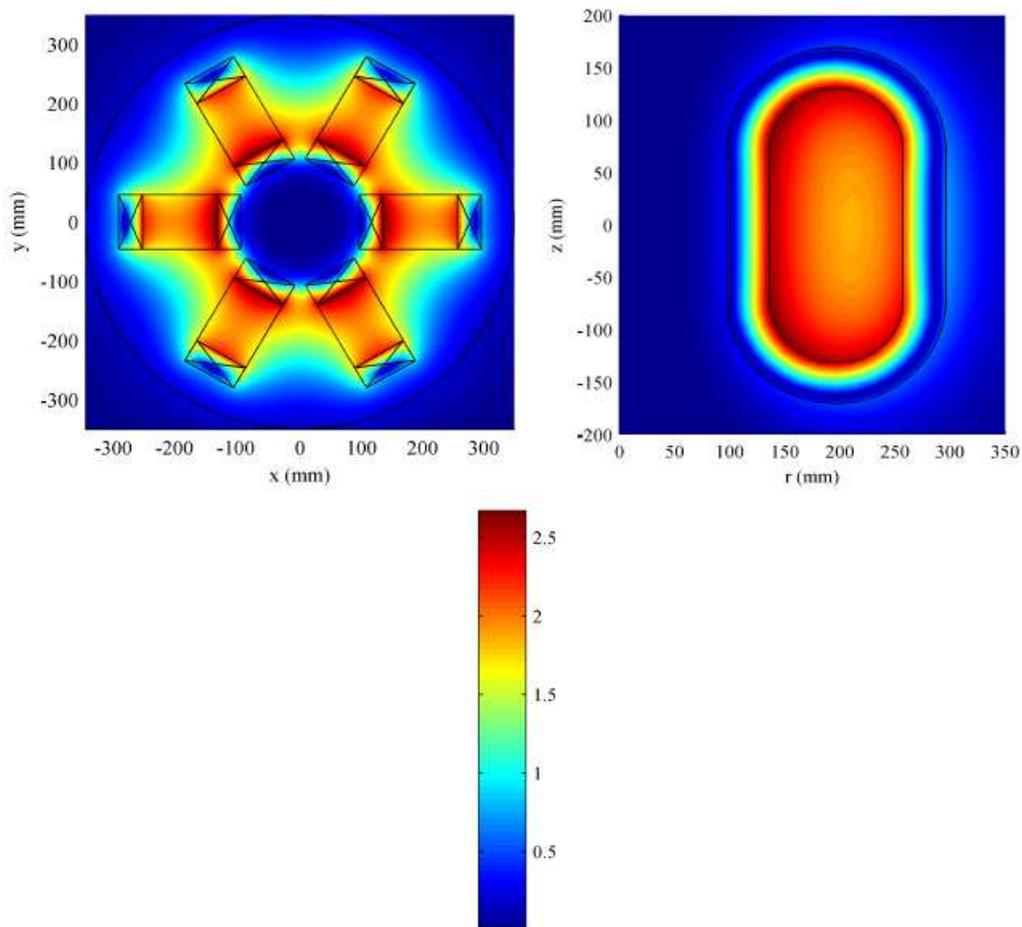


Figura 6: *Mappa dell’intensità del campo di induzione magnetica del prototipo di SMES in MgB_2 sul piano mediano orizzontale e su un semipiano azimutale passante per il centro di una bobina*

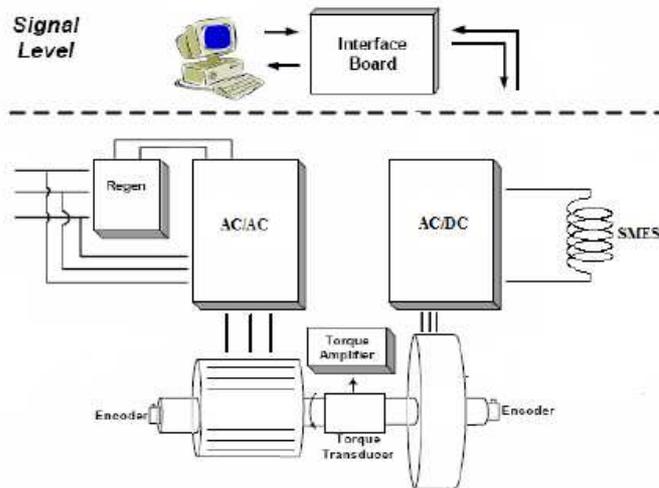


Figura 7: *Schema dell'apparato sperimentale per le prove di funzionamento del prototipo di SMES con simulazione del carico dinamico del veicolo: il motore/generatore a magneti permanenti (in basso a destra) è alimentato dallo SMES*

Conclusioni

Il mercato dei veicoli ibridi è destinato ad espandersi nel prossimo futuro, così come la quota di veicoli alimentati con combustibile gassoso come l'idrogeno o il metano. Tali combustibili possono essere stoccati a bordo del veicolo in forma liquida a temperatura criogenica (20 K per l'idrogeno, 111 K per il metano). Presso il LIMSA dell'Università di Bologna è stato progettato e brevettato un sistema di accumulo dell'energia elettrica costituito da un magnete superconduttore inserito all'interno di un serbatoio di combustibile criogenico. Il dispositivo è ideato in particolare per l'applicazione a bordo di veicoli ibridi alimentati ad idrogeno liquido, e in prospettiva a metano liquido se i superconduttori in grado di operare al corrispondente livello di temperatura verranno adeguatamente sviluppati. Per le elevate caratteristiche prestazionali del sistema SMES, il dispositivo può inoltre essere sviluppato per applicazioni a bordo di vetture da competizione in categorie in cui sia consentita l'implementazione della trazione ibrida (la FIA introdurrà sistemi di frenata rigenerativa nel regolamento di Formula 1 a partire dalla stagione 2009 [8]). Presso il LIMSA si intende realizzare un prototipo di laboratorio di capacità ridotta al fine di mettere a punto le tecniche costruttive idonee alla geometria toroidale compatta dello SMES e di verificare sperimentalmente le caratteristiche del dispositivo nelle condizioni di funzionamento previste.

Bibliografia

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 2004.
- [2] Sito Internet: www.hybridcars.com

- [3] L. Trevisani, A. Morandi, F. Negrini, P. L. Ribani, M. Fabbri. *Sistema di accumulo di energia elettrica e veicolo ibrido comprendente tale sistema*. Brevetto registrato BO 2007 A 516.
- [4] O. Tsukamoto. *Roads for HTS power applications to go into the real world – Cost issues and technical issues*. Cryogenics 45:3–10, 2005.
- [5] European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform. *Implementation plan, status 2006*. Rapporto tecnico disponibile online: www.hfpeurope.org
- [6] T. Brunner, O. Kircher, J. Lutz. *On the way to a new generation of production passenger car: integrated liquid hydrogen storage systems*. Proc. 16th World Hydrogen Energy Conference WHEC, Lione, Francia, 2006.
- [7] J.-M. Vernier, C. Mueller, S. Fuerst. *Safety measures for hydrogen vehicles with liquid storage*. Proc. 16th World Hydrogen Energy Conference WHEC, Lione, Francia, 2006.
- [8] A. Trabesinger. *Formula 1 racing: power games*. Nature 447:900–903, 2007.