



Università degli Studi di Padova

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE  
Laurea in Ingegneria dell'Informazione

Tesi di laurea triennale

# Batterie a volano a levitazione magnetica

Magnetically levitated flywheel energy storage systems

*Relatore:*  
Prof. Paolo TENTI

*Candidato:*  
Andrea ZECCHINI

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Analisi della struttura</b>	<b>3</b>
2.1	Principi di funzionamento . . . . .	3
2.2	Rotore . . . . .	4
2.3	Cuscinetti . . . . .	7
2.3.1	Cuscinetti a magneti permanenti (PMB) . . . . .	7
2.3.2	Cuscinetti a superconduttori (SMB) . . . . .	9
2.3.3	Cuscinetti magnetici attivi (AMB) . . . . .	10
2.4	Involucro esterno . . . . .	12
2.5	Motore/generatore . . . . .	14
2.6	Convertitore . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Analisi delle prestazioni</b>	<b>20</b>
3.1	Vantaggi . . . . .	20
3.2	Svantaggi e limitazioni . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Applicazioni</b>	<b>24</b>
4.1	Power quality . . . . .	24
4.1.1	Regolazione di frequenza . . . . .	25
4.1.2	Riserva energetica . . . . .	27
4.1.3	Controllo dell'instabilità angolare . . . . .	27
4.1.4	Supporto potenza reattiva . . . . .	28
4.1.5	UPS . . . . .	28
4.2	Supporto per sistemi ferroviari . . . . .	29
4.3	Veicoli ibridi ed elettrici . . . . .	30
4.4	Compensazione potenza da energie rinnovabili . . . . .	32
4.5	Supporto per alte potenze impulsive . . . . .	33
4.6	Satelliti e stazioni spaziali . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Considerazioni finali</b>	<b>35</b>
	<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>36</b>

# 1 Introduzione

Con il continuo aumento della domanda energetica sono emerse diverse problematiche legate allo sviluppo di un efficiente sistema di generazione e distribuzione dell'energia. In particolare diventa sempre più indispensabile poter contare su adeguati sistemi di immagazzinamento dell'energia (*energy storage systems*). Questi possono essere considerati degli elementi chiave che permettono di aumentare il valore dell'energia prodotta, migliorandone la qualità e la disponibilità nel tempo. Infatti vengono spesso definiti come dei *buffer* che disaccoppiano generazione e consumo di energia elettrica.

Ci sono molti sistemi per accumulare energia elettrica, tra i quali ricordiamo la conversione in energia chimica (batterie chimiche), potenziale (pompaggio idrico) e cinetica (volani). Quest'ultima può essere effettuata da sistemi basati su batterie a volano (o FES, *flywheel energy storage systems*), i quali immagazzinano energia cinetica grazie all'inerzia di rotazione di un volano.

I volani vengono utilizzati già da molto tempo per regolarizzare il funzionamento delle macchine con parti in rotazione, come nei motori a combustione interna ed esterna. Opponendosi alle rapide variazioni di velocità, possono immagazzinare e rilasciare energia attraverso un accoppiamento meccanico, secondo le necessità della macchina a loro collegata. Nel caso delle batterie a volano, invece, si accumula energia aumentando la velocità di un volano accoppiato magneticamente con un motore elettrico. Quest'energia può essere recuperata in seguito da un generatore elettrico collegato allo stesso modo (spesso coincide con il motore).

I primi esemplari impiegavano volani metallici molto pesanti a forma di disco, cuscinetti meccanici o idraulici e presentavano velocità di rotazione e densità energetiche piuttosto basse [1]. Non ebbero grande diffusione e vennero impiegati solo in alcune applicazioni dove erano richieste elevate potenze. Le potenzialità di tali dispositivi sono state riscoperte solo di recente. Infatti, grazie al progresso nell'ingegneria dei materiali, è diventato possibile realizzare volani sempre più leggeri e resistenti, che hanno permesso di ottenere densità di energia molto più elevate che in passato. Inoltre, lo sviluppo di magneti permanenti ad alta densità di flusso e di cuscinetti magnetici più performanti ha consentito di diminuire notevolmente le perdite energetiche dovute alla rotazione. Infine, la recente evoluzione dei dispositivi a semiconduttore ha consentito la realizzazione di interfacce di potenza molto efficienti ed economiche, che permettono un'integrazione ottimale delle batterie a volano con la rete elettrica a cui sono collegate. Proprio per questi motivi i sistemi a volano di nuova generazione vengono spesso definiti *supervolani*, per sottolineare le loro prestazioni decisamente superiori [1].

In queste pagine verranno illustrati i principi di funzionamento e i componenti principali delle batterie a volano, in modo da poter comprendere le scelte tecniche impiegate nella loro realizzazione. Queste porteranno poi ad un'analisi dei vantaggi, degli svantaggi e delle possibili applicazioni che caratterizzano questa promettente tecnologia.

Questo elaborato non vuole essere una trattazione dettagliata sull'analisi e la progettazione di un sistema a volano, ma intende introdurre l'argomento presentandone gli aspetti generali e alcune peculiarità poco note.

## 2 Analisi della struttura

### 2.1 Principi di funzionamento

Ci sono svariati modi per accumulare energia in forma meccanica e tutti sfruttano principi fisici elementari ben noti. Nel nostro caso, l'idea di base è accumulare energia cinetica ponendo in rapida rotazione un volano, realizzando in questo modo una batteria inerziale. Il sistema è generalmente composto da un volano, un motore/generatore e dall'elettronica di controllo per la connessione ad una rete elettrica esterna. In particolare, i sistemi che tratteremo in seguito sono caratterizzati dalla sospensione magnetica del volano e dal suo alloggiamento in una camera a vuoto.

In pratica, una batteria a volano assorbe energia da una sorgente elettrica per caricarsi, la immagazzina sotto forma di energia cinetica rotazionale e quando serve la fornisce al carico nella forma richiesta dal carico stesso. È importante notare che la potenza elettrica in ingresso può differire da quella in uscita nel suo profilo temporale, frequenza o altri attributi. Questa viene convertita dall'elettronica di ingresso in un segnale appropriato per comandare efficientemente un motore a velocità variabile. Il motore fa girare il volano, che immagazzina energia in forma meccanica, accelerandolo quando accumula energia e rallentandolo quando fornisce energia al carico. La diminuzione di energia meccanica è quindi convertita in forma elettrica dal generatore. L'elettronica di uscita converte il segnale a frequenza variabile in uscita dal generatore in una forma più adatta al carico da pilotare. Dato che spesso input e output di energia sono separati nel tempo, molti design combinano motore e generatore in un unico dispositivo e l'elettronica di ingresso e uscita in un unico modulo, per ridurre costo e peso.

Più in dettaglio, l'energia rotazionale accumulata in un volano è data da:

$$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1)$$

dove  $\omega$  è la velocità angolare e  $I$  è il momento di inerzia della massa riferito all'asse di rotazione. In particolare, nel caso di un cilindro cavo di raggio  $r$ , con tutta la massa concentrata sulla parete esterna, si ha:

$$I = mr^2 \quad (2)$$

dalla quale risulta evidente come sia più importante aumentare la velocità, piuttosto che la massa per ottenere alti livelli di energia immagazzinata.

L'energia che può essere immagazzinata in sicurezza dipende dal punto in cui il rotore comincia a deformarsi o frantumarsi. La resistenza alla trazione del materiale determina la velocità massima alla quale si può operare. La tensione che si sviluppa nel bordo del cilindro risulta essere:

$$\sigma = \rho r^2 \omega^2 \quad (3)$$

dove  $\rho$  è la densità del materiale. La massima energia immagazzinabile è quindi:

$$E_k = \frac{1}{2}m \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (4)$$

che mostra come la massima energia che può essere immagazzinata per una data massa viene raggiunta da un volano costituito da un materiale che combina un'alta resistenza tensile ad una bassa densità. I materiali compositi, infatti, si prestano molto bene allo scopo (vedi Tab.1).

	Densità [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Resistenza [ $MN \cdot m^{-2}$ ]	Massima energia specifica teorica [ $Wh \cdot kg^{-1}$ ]
Acciaio (AISI 4340)	7800	1800	32
Lega di alluminio (AlMnMg)	2700	600	31
Titanio (TiAl6Zr5)	4500	1200	37
GFRP (glass fiber reinforced polymer) (60% E-glass)	2000	1600	111
CFRP (carbon fiber reinforced polymer) (60% carbonio HT)	1500	2400	222

Tabella 1: Resistenza specifica di alcuni materiali [14]

In realtà non è possibile prelevare efficacemente tutta l'energia immagazzinata. Infatti la maggiore limitazione è data dalla coppia esercitabile dal sistema:

$$P = T\omega \quad (5)$$

dove  $P$  è la potenza e  $T$  la coppia. Quindi se la potenza è mantenuta costante, è necessaria una coppia più elevata quando la velocità viene ridotta. La limitazione sulla coppia e il fatto che il volano immagazzina più energia a velocità elevate, si traducono nell'avere un rapporto tra velocità minima e massima  $s = \omega_{min}/\omega_{max}$  che solitamente non è minore di 0.2 [14]. L'energia utile immagazzinata è quindi:

$$E = E_{max}(1 - s^2) \quad (6)$$

Se  $s = 1/3$ , l'energia utilizzabile è quindi circa il 90% dell'energia massima immagazzinata  $E_{max}$ .

## 2.2 Rotore

Il profilo e il materiale del rotore vengono scelti in base alle specifiche operative della batteria a volano in esame. Questi infatti incidono sul momento di inerzia del rotore, che come descritto dall'eq. (1) stabilisce quanta energia può essere immagazzinata fissata una certa velocità angolare. Dato che l'energia dipende quadraticamente dalla velocità angolare e dalla distanza della massa dall'asse di rotazione, si cerca di favorire questi due parametri cercando di contenere il peso complessivo. Questo perché un aumento della massa del rotore richiede una forza di sostentamento più intensa, cosa che grava pesantemente sui cuscinetti magnetici. Infatti, risulterebbe necessario aumentarne la dimensione e il relativo consumo energetico, senza contare che se la massa è molto concentrata è impossibile farla levitare magneticamente mantenendo delle dimensioni accettabili.

Il momento di inerzia del rotore incide anche sull'effetto giroscopico che si viene a creare quando si cerca di ruotare la batteria attorno ad un asse diverso dal suo asse di rotazione. Il momento giroscopico di un volano che ruota attorno al suo asse di inerzia principale con velocità angolare  $\bar{\omega}$  dove l'asse si sposta con velocità angolare  $\bar{\Omega}$  è:

$$\bar{M} = J\bar{\omega} \times \bar{\Omega} \quad (7)$$

dove  $J$  è il momento di inerzia del volano. Da questa si vede come il momento angolare risultante sia perpendicolare all'asse di rotazione del rotore e all'asse della rotazione impressa dall'esterno, il quale tende a spostare l'intero sistema lungo un moto di precessione. Questo effetto è molto scomodo nel caso si intenda utilizzare la batteria a volano su un mezzo in movimento, come nel campo automobilistico.

D'altra parte il tipo di materiale utilizzato pone un limite alla velocità alla quale si può operare in sicurezza. Le elevate forze centrifughe che si manifestano ad alta velocità provocano delle sollecitazioni molto elevate lungo la circonferenza del volano. Proprio per questo vengono utilizzati acciai ad alta resistenza o materiali composti in fibre di carbonio (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), che hanno una resistenza alla trazione superiore a quella dell'acciaio e un peso inferiore di un ordine di grandezza. Un altro limite sulla velocità è dato dalle specifiche dei cuscinetti magnetici utilizzati. Questi infatti devono essere in grado di smorzare le vibrazioni che aumentano all'aumentare della velocità a causa di minimi sbilanciamenti di massa o del momento di inerzia nel rotore. Inoltre il loro rendimento cala a causa delle correnti parassite (*eddy currents*) indotte nel materiale ferromagnetico di rotore e statore, che possono comunque essere ridotte mediante l'uso di materiali laminati [11].

Il volano può essere teoricamente orientato in qualsiasi direzione, ma per semplicità viene sempre posizionato con l'asse di rotazione verticale od orizzontale, in base all'applicazione. Noi tratteremo solo la configurazione verticale, dato che è la più utilizzata perchè risulta più bilanciata radialmente e quindi permette un'efficace separazione dei problemi di stabilità assiale e radiale, affidate ai relativi cuscinetti. Se orientato orizzontalmente, infatti, la spinta di sollevamento è generata dagli stessi cuscinetti radiali usati per il centramento dell'albero. Inoltre, in ambito automotive, l'orientamento verticale contribuisce ad eliminare il principale effetto giroscopico, dovuto appunto alla rotazione del veicolo attorno al suo asse verticale.



Figura 1: Volano con struttura ad anello [7]

La forma del rotore incide fortemente sulle prestazioni e viene scelta in base al campo applicativo della batteria. Benchè nei volani tradizionali si tenda ad aumentare il momento di inerzia incrementandone il diametro e spostando la massa verso l'esterno, nel nostro caso dobbiamo considerare anche le impensabili velocità tangen-

ziali che si raggiungerebbero con tali strutture. Per questo si preferisce avere un rotore dal diametro contenuto, puntando sull'elevata velocità angolare [1].

Una struttura molto utilizzata fa uso di un mozzo in alluminio che collega l'albero del rotore ad un anello più esterno in CFRP. In questo modo si sposta gran parte della massa verso l'esterno e si mantiene una struttura relativamente leggera e resistente. Degli esempi sono visibili in Fig.1, Fig.9 e Fig.11. Il rotore risulta così piuttosto flessibile e bisogna considerare i modi fondamentali oscillatori che vengono introdotti dal mozzo (la parte più soggetta a flessione) [7]. Inoltre l'alluminio è un materiale con bassa resistenza a trazione, per cui bisogna prestare molta attenzione alla progettazione del volano.

Questa tipologia è piuttosto scalabile e, mediante un'estensione lungo l'asse del volano, consente di raggiungere elevate densità di energia senza incorrere negli effetti negativi appena discussi. Inoltre il particolare profilo del mozzo porta ad avere molto spazio libero nella parte più interna del volano, che può essere sfruttato per alloggiare cuscinetti o il rotore del motore/generatore.

Si stanno sperimentando anche altri design orientati alla semplificazione dei cuscinetti e/o al miglioramento della stabilità durante la rotazione. Una soluzione tecnica per migliorare la stabilità è quella di mantenere il centro di massa del volano più basso del punto di applicazione della forza di sostentamento. Questo si può ottenere posizionando i cuscinetti di spinta nella parte alta del rotore. Nel caso si vogliono utilizzare cuscinetti a superconduttori (vedi sez. 2.5.2), però, è meglio posizionare il cuscinetto alla base del rotore, per migliorare l'efficienza del criostato e semplificarne la struttura, riducendo i costi di raffreddamento. In questo caso è possibile utilizzare strutture del tipo riportato in (Fig.2), progettate per spostare il centro di massa sotto (o vicino) all'estremo inferiore del perno del rotore [12]. In questo caso è richiesta solo una leggera stabilizzazione radiale nella parte superiore.

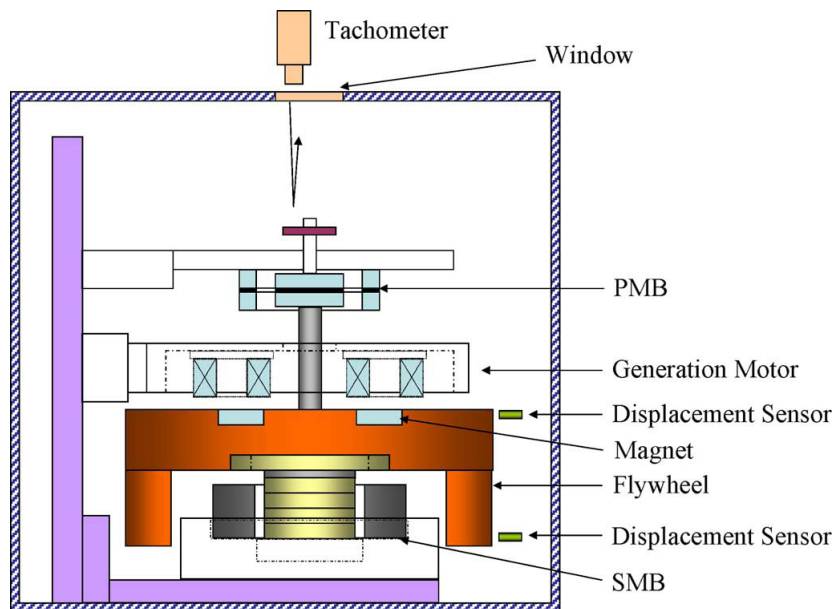


Figura 2: Batteria a volano con baricentro del rotore spostato verso il basso [12]

## 2.3 Cuscinetti

Il successo delle batterie a volano dipende per la maggior parte dai cuscinetti utilizzati per il supporto del rotore. Questi infatti sono responsabili dell'affidabilità a lungo termine del dispositivo e delle prestazioni ottenibili in un ciclo di carica.

Un cuscinetto deve garantire attrito minimo tra rotore e statore al fine di avere meno perdite possibili e conseguentemente migliore efficienza e maggiore durata dell'energia immagazzinata. Inoltre deve poter sopportare le molteplici forze generate dalla combinazione di rotazione del rotore, gravità e possibile traslazione/rotazione dell'involucro esterno.

Nel corso degli anni questi componenti hanno subito una grande evoluzione, passando dai classici cuscinetti meccanici ai cuscinetti magnetici di ultima concezione. Questi ultimi hanno molteplici vantaggi:

- attrito quasi nullo
- elevata affidabilità
- assenza di lubrificante
- possono operare a velocità molto elevate

In particolare, non richiedendo lubrificazione, è possibile utilizzarli anche in ambienti critici, come ad esempio in una camera a vuoto di una batteria a volano. In questo modo non si presenta il problema dell'evaporazione del lubrificante e non sono necessarie le relative operazioni di manutenzione [13].

Analizziamo di seguito le principali tipologie di cuscinetti magnetici, essendo i più promettenti per le applicazioni ove sono richieste elevate potenze, densità di energia ed efficienza.

### 2.3.1 Cuscinetti a magneti permanenti (PMB)

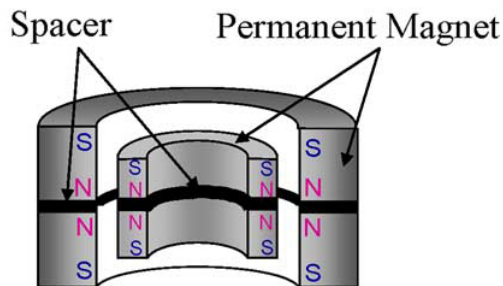


Figura 3: PMB di tipo radiale repulsivo [12]

I cuscinetti a **magneti permanenti** o **PMB** (*Permanent Magnet Bearing*) sono composti essenzialmente da materiali magnetizzati in modo permanente che tendono a respingersi o ad attrarsi, disposti in modo da garantire stabilità radiale o assiale al rotore. Infatti, secondo il teorema di Earnshaw, entrambe le stabilità non possono essere garantite dal solo utilizzo di magneti permanenti, dato che equivarrebbe ad una levitazione ottenuta mediante l'interazione di campi magnetici statici. Per questo motivo questo tipo di cuscinetto viene sempre utilizzato in configurazione ibrida con AMB o SMB. Hanno però alcuni importanti vantaggi, infatti sono molto economici,



non consumano energia, non richiedono un sistema di controllo attivo e sono quindi facilmente miniaturizzabili anche per piccoli dispositivi [12].

É molto comune l'utilizzo di PMB di tipo radiale repulsivo (Fig.3) essendo facilmente accoppiabili ad un SMB che garantisca la forza di sollevamento e la stabilità assiale. In ogni caso, sono stati proposti anche altri design che prevedono l'utilizzo di PMB attrattivi che forniscono sia la forza di sostentamento (o gran parte di essa), sia la stabilità radiale (ma non quella assiale) ed evitano i fenomeni di smagnetizzazione dovuta alla repulsione [3]. Analizziamo più in dettaglio quest'ultima tipologia.

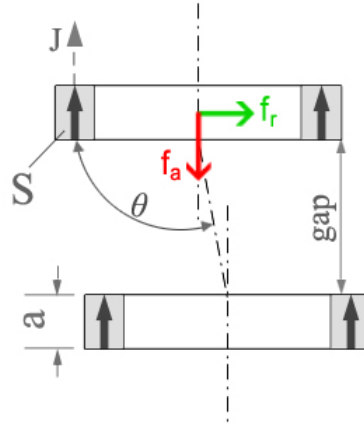


Figura 4: Sezione laterale di un PMB di tipo attrattivo [3]

Come si può vedere in Fig.4, il PMB preso in esame è composto da due anelli ferromagnetici allineati e magnetizzati assialmente. Manteniamo fisso il magnete inferiore, ipotizzando che costituisca lo statore del cuscinetto. Se l'allineamento è perfetto ( $\theta = \pi/2$ ) la forza  $f$  ha solo una componente verticale che comporta la sopracitata instabilità assiale. Se  $\theta \neq \pi/2$  la forza  $f$  ha anche una componente radiale che tende a riallineare i due magneti sull'asse verticale. Se vengono utilizzati due PMB di questo tipo, uno alloggiato sull'estremità superiore del rotore e uno su quella inferiore, si può garantire anche la spinta verticale sbilanciando le forze a favore del PMB superiore, riducendo il gap tra i due magneti.

$$f_r = -2B\cos(3\theta)/\sigma^3 \quad f_a = 2B\sin(3\theta)/\sigma^3 \quad (8)$$

$$k_r = 6B\cos(4\theta)/\sigma^4 \quad k_a = -2k_r \quad (9)$$

dove:

$$B = J^2 S^2 p / 2\pi\mu_0 \quad \sigma = gap + a \quad (10)$$

dove  $J$  è la magnetizzazione del magnete permanente,  $S$ ,  $p$  ed  $a$  sono rispettivamente l'area della sezione, il perimetro e lo spessore e  $\theta$  è lo scostamento angolare [3].

In ogni caso, per utilizzare cuscinetti di questo tipo bisogna per forza introdurre un ulteriore vincolo dato, ad esempio, da un cuscinetto magnetico attivo che garantisca stabilità assiale (Fig.5).

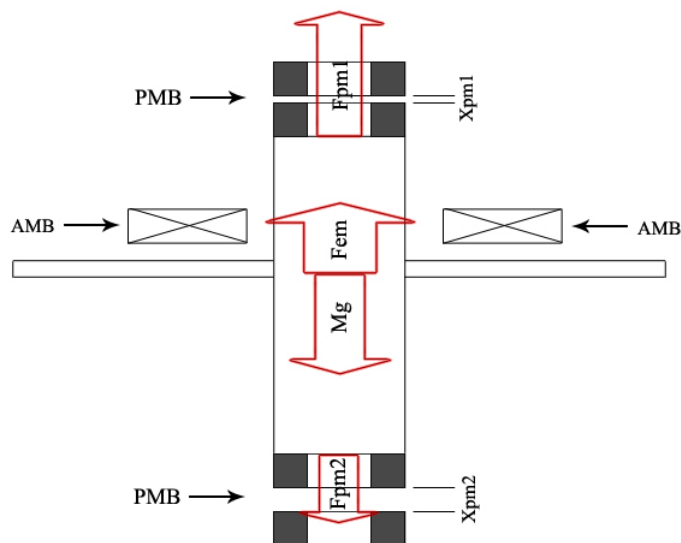


Figura 5: Schema di una configurazione stabile che fa uso di due PMB per la stabilità radiale e un AMB per quella assiale [3]

### 2.3.2 Cuscinetti a superconduttori (SMB)

I cuscinetti a **superconduttori** o **SMB** (*Superconducting Magnetic Bearing*) non utilizzano elettromagneti per la generazione di un campo magnetico, ma sfruttano l'effetto Meissner-Ochsenfeld che caratterizza i superconduttori: quando un superconduttore viene posto in un campo magnetico esterno e raffreddato sotto la sua temperatura di transizione, il campo magnetico viene 'espulso' dal materiale (in realtà penetra molto poco, nell'ordine dei 100nm). Questo fenomeno causa una deviazione forzata delle linee del campo attorno al superconduttore e quindi una repulsione tra quest'ultimo e la fonte generatrice del campo magnetico, che nel nostro caso è un magnete permanente. Le forze generate garantiscono sia stabilità assiale che radiale e permettono il sollevamento di carichi notevoli [2]. Per questo vengono utilizzati sempre più spesso, soprattutto in sistemi di medie/grandi dimensioni.

Nella pratica vengono utilizzati esclusivamente superconduttori ad alta temperatura o HTS (*High Temperature Superconductor*), ovvero particolari composti che passano allo stato di superconduttore a temperature relativamente alte, sopra i 30 K. In genere si preferisce avere un sistema funzionante a circa 77 K, la temperatura di ebollizione dell'azoto liquido. Questo comporta una semplificazione del criostato utilizzato per il raffreddamento, il quale risulta essere più economico, efficiente e meno dispendioso in termini di potenza elettrica richiesta. Il composto più utilizzato è l'YBCO ( $YBa_2Cu_3O_7$ , ossido di ittrio, bario e rame), che ha una temperatura critica di 93 K, in accordo con le considerazioni appena fatte [2][6].

Una delle due configurazioni più utilizzate prevede l'alloggiamento dell'HTS sotto al rotore e, appena sopra, il relativo magnete permanente, fissato all'estremità inferiore del rotore (che chiameremo 'assiale', Fig.6). Nell'altra, invece, l'HTS è posizionato in un cilindro cavo solidale allo statore attorno al quale ruota il rotore con i relativi magneti permanenti (che chiameremo 'radiale', Fig.7). Quest'ultima tipologia è molto efficace per rotori pesanti in quanto per ottenere una maggiore forza di sostentamento è sufficiente aumentare la lunghezza del cuscinetto lungo il suo asse di rotazione.

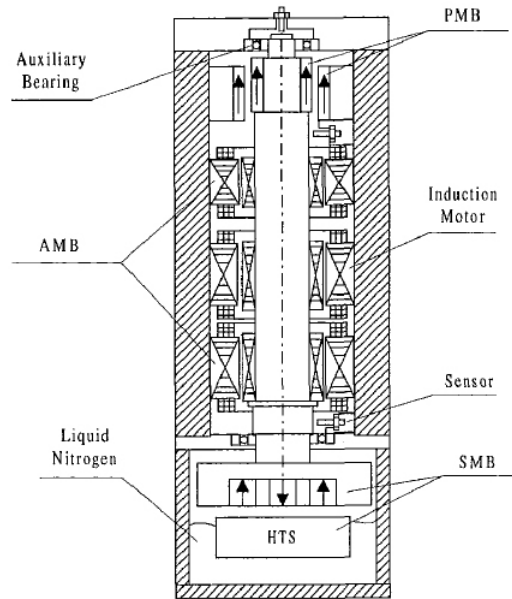


Figura 6: Batteria a volano che utilizza un SMB di tipo 'assiale' [2]

In entrambi i casi l'HTS costituisce la parte statorica del cuscinetto, mentre uno o più magneti permanenti sono fissati al rotore. Questa scelta semplifica molto la progettazione del criostato (e della sua alimentazione) che è quindi immobile e fissato allo statore.

### 2.3.3 Cuscinetti magnetici attivi (AMB)

I cuscinetti magnetici **attivi** o **AMB** (*Active Magnetic Bearing*) sono composti da uno o più elettromagneti, una parte ferromagnetica solidale al rotore, sensori di spostamento e un circuito di controllo. Gli elettromagneti posizionati su lati opposti attraggono il rotore e si ottiene una forza totale agente su di esso uguale alla somma delle forze esercitate dai singoli elettromagneti. Dato che l'interazione tra il rotore ferromagnetico e gli elettromagneti è instabile, la posizione del rotore deve essere misurata con dei sensori. In base alle misure ottenute, il circuito di controllo fa scorrere una corrente adeguata nelle bobine degli elettromagneti in modo da mantenere la stabilità assiale o radiale del rotore. In particolare, il mantenere una delle due stabilità non pregiudica l'altra, a differenza dei PMB.

L'AMB è un attuatore non lineare. Può essere linearizzato fornendo una corrente di bias ad entrambe le bobine sui lati opposti del rotore [2]. Questo ovviamente aumenta il consumo energetico, ma permette una grande semplificazione dell'hardware richiesto per un controllore non lineare altrettanto efficace. Inoltre, l'utilizzo di correnti di bias aumenta anche la rigidità del cuscinetto e la rapidità di risposta del sistema.

I più comuni AMB sono di tipo radiale (Fig.8) e sono molto utilizzati per via della loro elevata stabilità. Infatti è sia possibile progettare sistemi di controllo molto semplici basati su PID, che garantiscono buoni risultati, ma è anche possibile l'utilizzo di circuiti digitali che fanno uso di microcontrollori, ottenendo una maggiore persona-

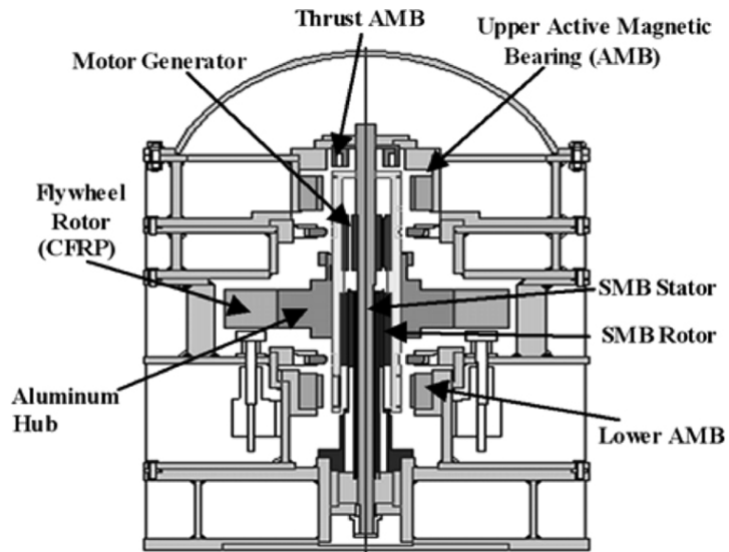


Figura 7: Batteria a volano che utilizza un SMB di tipo 'radiale' [4]

lizzazione della risposta agli ingressi ricevuti dai sensori. È così possibile smorzare in modo efficace le vibrazioni prodotte dal rotore anche quando ruota a velocità molto elevate. Nello specifico, è possibile limitare le oscillazioni del rotore quando la loro frequenza coincide con una frequenza di risonanza del rotore stesso [7]. Quest'ultima operazione non è possibile con altri tipi di cuscinetti, con i quali si preferisce evitare di raggiungere velocità tali da innescare fenomeni di risonanza.

Vengono utilizzati con successo anche AMB assiali, che stabilizzano gli effetti negativi provocati da altri cuscinetti lungo l'asse del rotore. Un esempio è riportato in Fig.5.

Il problema più evidente dell'utilizzo di AMB è il consumo di energia non in-

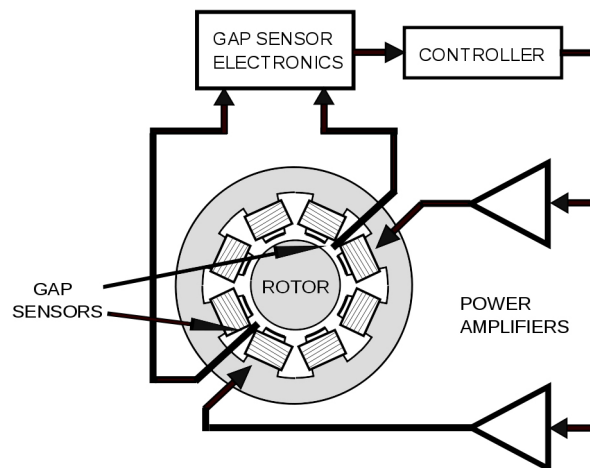


Figura 8: Schema di funzionamento di un AMB radiale

differente. Per questo motivo vengono raramente utilizzati per generare la spinta di sostentamento del rotore, a meno che non sia particolarmente leggero. Un altro svantaggio è la maggiore complessità, considerando che è necessario sviluppare un circuito di controllo che è inoltre limitato ad operare in un certo range di temperatura. Gli AMB sono però preferiti per i sistemi a volano di grandi dimensioni, in quanto hanno delle migliori caratteristiche di attenuazione delle vibrazioni rispetto alle altre tipologie di cuscinetti [29].

## 2.4 Involucro esterno

L'involucro di una batteria a volano deve soddisfare alcuni requisiti fondamentali, necessari al corretto funzionamento e per garantire efficienza e sicurezza:

- mantenere il vuoto spinto al suo interno
- garantire il contenimento di materiale ad elevata energia cinetica in caso di guasto
- resistere all'azione di forze esterne ed effetto giroscopico che tendono a destabilizzare il sistema
- essere il più leggero possibile per mantenere un'elevata energia specifica complessiva

Analizziamo in dettaglio le varie soluzioni tecniche e le problematiche che bisogna affrontare per rispettare questi requisiti (o buona parte di essi), ricordando che in uno scenario reale si cerca sempre un compromesso che minimizzi costi e complessità di progetto.

Volendo operare con velocità di rotazione molto elevate, ci si scontra presto con le perdite energetiche dovute all'attrito del volano con l'aria. Proprio per questo motivo il volano deve avere un profilo aerodinamico e un'ottima finitura superficiale. L'attrito dipende dalla densità dell'aria e dalle caratteristiche del suo flusso. Il tipo di flusso dovuto a un disco che ruota in un mezzo costante come l'aria passa da laminare a turbolento all'aumentare della sua velocità. Questa transizione avviene quando il numero di Reynolds è uguale a  $5 \times 10^4$  [1]. Il numero di Reynolds è un parametro adimensionale che dipende da viscosità dell'aria,  $\eta_g$ , dimensione del disco e velocità. Sotto la velocità di transizione la resistenza dell'aria  $M_a$  è data da:

$$M_a = 3.9\rho_g^{0.5}r^4\eta_g^{0.5}\omega^{1.5} \quad (11)$$

e al sopra di essa da:

$$M_a = 0.14\rho_g^{0.8}r^{4.6}\eta_g^{0.2}\omega^{1.8} \quad (12)$$

dove  $\rho_g$  è la densità dell'aria e  $r$  e  $\omega$  sono rispettivamente il raggio del disco e la velocità angolare [1].

Quindi, all'aumentare della velocità, la resistenza dell'aria comporta una perdita energetica non trascurabile, soprattutto oltre la velocità di transizione. L'unica soluzione è creare artificialmente un fluido a bassissima densità, praticando il vuoto spinto nell'involucro che contiene il volano.

A questo scopo si può utilizzare una pompa a vuoto a funzionamento continuo oppure rendere il contenitore perfettamente sigillato, nel quale viene praticato il vuoto al momento della produzione. In quest'ultimo caso si impiegano materiali che presentano un basso tasso di degassamento. Inoltre si fa uso di particolari tecniche che

evitano l'intrappolamento del gas in micro-camere indesiderate che si formano con l'assemblaggio. La maggiore complessità costruttiva è comunque giustificata dal non richiedere una pompa continua che assorbe energia durante il funzionamento. Con l'utilizzo di moderne pompe turbomolecolari è possibile raggiungere pressioni estremamente basse, ma per l'utilizzo in una batteria a volano si tende a restare nella regione di vuoto intermedio, con pressione che può arrivare intorno agli 0.1 Pa. Scendere ancora non porterebbe grandi benefici ma aumenterebbe costo e complessità del sistema.

Per applicazioni che prevedono un'installazione statica della batteria, vengono impiegati contenitori cilindrici in acciaio spessi anche diversi centimetri, anche perchè nella maggior parte dei casi si tratta di unità ad elevata capacità che possono sprigionare grandi quantità di energia in caso di guasto. Il peso non è generalmente un fattore determinante dato che le suddette unità non devono essere spostate per tutta (o quasi) la durata della loro vita utile. Spesso, questi contenitori vengono posti all'interno di altre strutture in cemento che vengono poi interrate quasi completamente, offrendo un contenimento molto elevato e un significativo incremento della sicurezza del dispositivo.

In ambito automobilistico e aerospaziale, invece, è fondamentale avere un dispositivo leggero e robusto allo stesso tempo (Fig.9). In questo caso si utilizzano materiali e tecniche costruttive di derivazione aeronautica, che però aumentano sensibilmente i costi di produzione e progettazione. Inoltre, vengono predisposti dei cuscinetti meccanici di emergenza nel caso di uno spostamento improvviso dell'asse, dovuto, ad esempio, ad un incidente stradale.

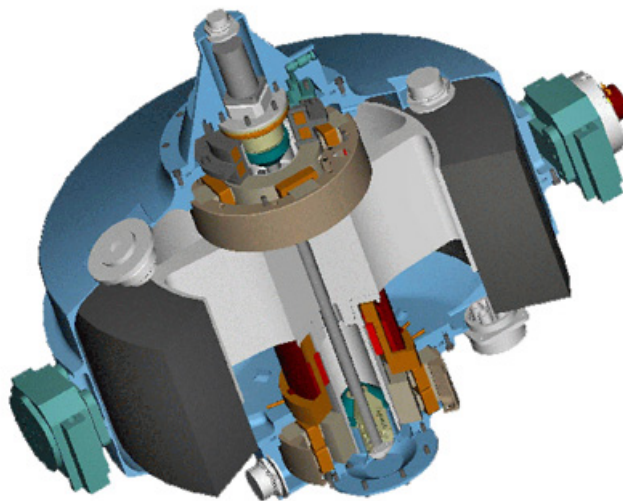


Figura 9: Batteria a volano per applicazioni spaziali [35]

Proprio per aumentare la sicurezza si stanno sviluppando contenitori innovativi che permettono un arresto del rotore non distruttivo. Una delle idee più condivise prevede l'utilizzo di un secondo involucro più interno, la cui superficie è molto vicina al rotore. Nell'intercapedine tra i due contenitori può essere inserito un liquido ad alta viscosità o particolari composti solidi. In caso di contatto con il rotore, il primo involucro verrà trascinato in rotazione, garantendo una maggiore dispersione di energia grazie all'azione frenante dovuta all'attrito generato tra gli involucri e il fluido.

## 2.5 Motore/generatore

La conversione di energia elettrica in energia meccanica e viceversa avviene per mezzo di un motore/generatore. Questo deve essere accuratamente dimensionato per garantire la potenza nominale del sistema assieme ad un'elevata efficienza. Il suo rotore è fissato direttamente sull'albero del volano e attorno ad esso vi è quindi lo statore, posizionato anch'esso nella camera a vuoto. L'elettronica di potenza associata è invece situata all'esterno della camera, in modo da ridurne il costo e l'ingombro.

Il motore/generatore può essere ad accoppiamento radiale (come nei comuni motori elettrici) o assiale. Benchè la grande maggioranza di progetti preveda un accoppiamento radiale, vi sono casi in cui, per mancanza di spazio, si preferisce la configurazione assiale. È il caso, ad esempio, di alcune batterie a volano di ridottissime dimensioni (*micro flywheel energy storage*). In seguito faremo riferimento alla sola configurazione radiale.

Machine	Asynchronous	Variable reluctance	Permanent magnet synchronous
<b>Power</b>	High	Medium and low	Medium and low
<b>Specific power</b>	Medium (0.7 kW/Kg)	Medium (0.7 kW/Kg)	High (12 kW/Kg)
<b>Rotor losses</b>	Copper and iron	Iron	None
<b>Spinning losses</b>	Removable by annulling flux	Removable by annulling flux	Non-removable, static flux,
<b>Efficiency</b>	High (93.4%)	High (93%)	Very High (95.2%)
<b>Control</b>	Vector control	Synchronous: vector control Switched: DSP	Sinusoidal: vector control Trapezoidal: DSP
<b>Size</b>	1.8 1/kW	2.6 1/kW	2.3 1/kW
<b>Maximum/base speed</b>	Medium (>3)	High (>4)	Low(<2)
<b>Demagnetization</b>	No	No	Yes
<b>Cost</b>	Low (22 €/kW)	Low (24 €/kW)	High (38 €/kW)

Tabella 2: Caratteristiche principali di macchine elettriche adatte alle batterie a volano [16]

Dovendosi operare nel vuoto, non è consentito l'utilizzo di spazzole o contatti striscianti. Infatti un ambiente sottoposto a vuoto medio è altamente ionizzabile, il che comporta lo sviluppo di grandi archi elettrici vicino ai contatti. Questo impedisce l'uso di motori in corrente continua con commutatore rotante.

I motori/generatori impiegati operano in corrente alternata, generalmente pilotati da inverter dedicati che permettono il controllo sulla velocità di rotazione variando la loro frequenza di funzionamento. Possono essere realizzati con varie tecnologie, ognuna delle quali presenta vantaggi e difetti che devono essere presi in considerazione a seconda dell'applicazione (Tab.2).

Il motore a induzione (asincrono) viene utilizzato di rado, infatti sebbene sia piuttosto economico, presenta una bassa efficienza, elevate perdite e la necessità di avere degli avvolgimenti sul rotore. Questi ultimi sono ingombranti, devono sopportare le elevate velocità raggiunte dal volano e generano molto calore che non può essere smaltito efficientemente. Proprio per la natura asincrona del dispositivo, è difficile operare a velocità elevate senza utilizzare un sistema di controllo complesso, che all'aumentare della frequenza di funzionamento aumenta anche la tensione di alimentazione ( $V/f$  o

*Volts/Hertz control*). Infatti aumentando solamente la frequenza dell'inverter si ha una riduzione della coppia motrice che tende ad aumentare lo scorrimento (o *slip*, la differenza tra velocità sincrona teorica e velocità reale del rotore). In questo modo aumenta la corrente che scorre nello statore, aumentano le perdite per effetto Joule e l'efficienza cala drasticamente.

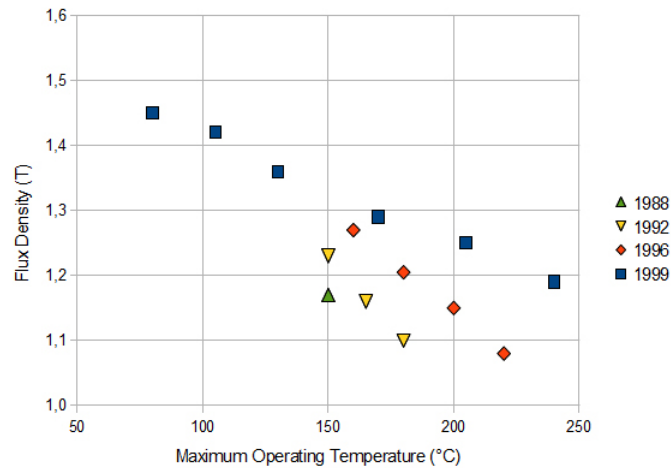


Figura 10: Miglioramento dei magneti permanenti al neodimio nel corso degli anni [24]

Grazie ai miglioramenti apportati ai magneti al neodimio negli ultimi anni (Fig.10), si è rivolta particolare attenzione al motore sincrono a magneti permanenti (o PMSM, *Permanent Magnet Synchronous Motor/Machine*), che viene utilizzato sempre più frequentemente in applicazioni dove è prioritario avere bassissime perdite. È infatti la macchina elettrica più utilizzata nelle batterie a volano sviluppate nell'ultimo decennio [16]. Presenta una struttura piuttosto semplice, rimpiazzando gli avvolgimenti sul rotore con magneti permanenti ad alta densità di flusso, i quali generano il campo magnetico che interagisce con quello prodotto dagli avvolgimenti sullo statore. Proprio per questo motivo le perdite sul rotore sono praticamente nulle, essendo queste dovute alla corrente che scorre negli avvolgimenti e al materiale ferromagnetico delle armature.

In particolare il PMSM è caratterizzato da elevate densità di potenza e di coppia, altissima efficienza e perdite ridotte [24]. Inoltre, non avendo sul rotore avvolgimenti che devono essere energizzati dall'esterno, il suo funzionamento da generatore è perfettamente simmetrico a quello da motore, garantendo un'ottima qualità della potenza in uscita. Anche per questo il controllo di velocità risulta essere particolarmente semplice, dato che il campo magnetico del rotore è costante al variare di coppia, velocità e posizione rispetto allo statore, a differenza del motore a induzione.

Tuttavia, l'utilizzo di magneti permanenti aumenta sensibilmente il costo dei materiali e gli stessi magneti possono essere soggetti a fenomeni di smagnetizzazione parziale in caso di alte temperature di esercizio o campi elettromagnetici molto intensi. È quindi necessario un buon sistema di raffreddamento e circuiti ausiliari per la prevenzione di sovracorrenti e cortocircuiti, dato che per effetto Joule comporterebbero un aumento di temperatura nello statore e quindi, per irraggiamento e convezione (minima), nei magneti permanenti del rotore.



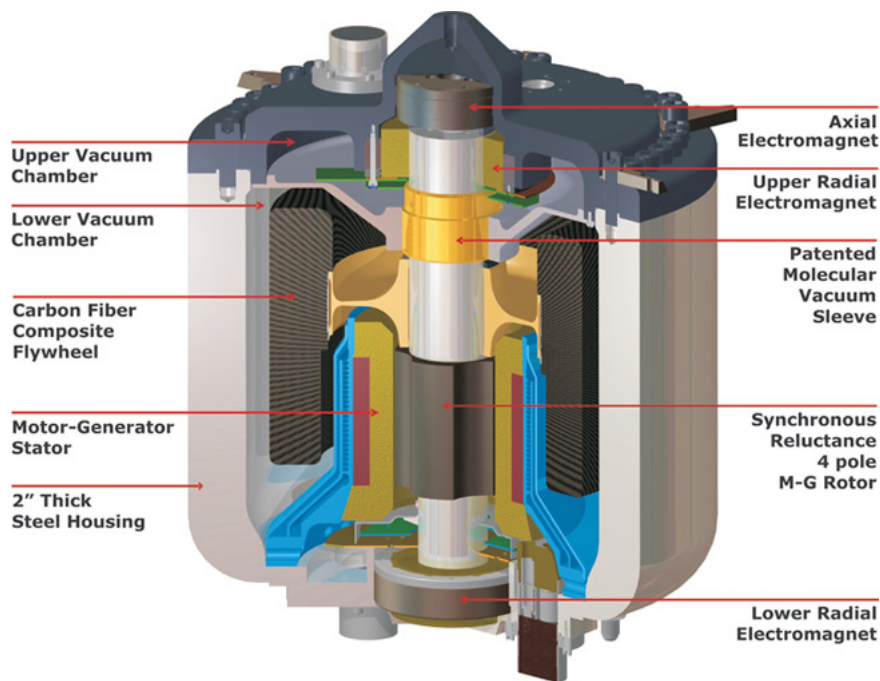


Figura 11: Batteria a volano per UPS con motore/generatore a riluttanza variabile raffreddato a liquido [http://www.power-thru.com]

Sempre più impiegato è il motore a riluttanza variabile (o VRM, Variable Reluctance Motor/Machine, Fig.11), una variante del ben più noto motore passo-passo (*stepper*). A differenza di quest'ultimo ha un numero inferiore di poli sul rotore (generalmente 4) ed è ottimizzato per funzionare a velocità più elevate con un ripple di coppia inferiore. È il più semplice motore in corrente alternata utilizzabile visto che il rotore è costituito solamente da un blocco di materiale ferromagnetico. Questo elimina i problemi di smagnetizzazione del motore sincrono e garantisce un'elevata affidabilità. Inoltre ha un'elevata efficienza (oltre il 90%) in un ampio range di velocità e condizioni di carico. L'assenza di magneti permanenti, però, presenta degli svantaggi quando il VRM viene utilizzato come generatore. Infatti bisogna eccitare gli avvolgimenti dello statore per creare un campo magnetico che interagisca con la riluttanza variabile del rotore, comportando una maggiore complessità dell'elettronica di controllo. Il VRM presenta inoltre un discreto ripple di coppia alle basse velocità, che si ripercuote in un ripple di corrente sull'alimentazione, sebbene questo possa essere attenuato mediante l'impiego di un sistema di controllo adeguato (ma più costoso).

In alcuni casi, i motori/generatori per elevate potenze necessitano di un sistema di raffreddamento adeguato, soprattutto in presenza di magneti permanenti. Operando nel vuoto non è possibile sfruttare efficacemente la convezione dell'aria e bisogna impiegare sistemi di raffreddamento a liquido. È anche possibile portare il calore all'esterno della camera a vuoto per mezzo del contatto con un elemento conduttore, oppure attraverso l'uso di heat pipe.

## 2.6 Convertitore

Il motore/generatore è collegato ad un bus in corrente continua mediante un convertitore statico di potenza bidirezionale (Fig.12), spesso costituito da un ponte trifase di interruttori a semiconduttore. Questo è generalmente composto da un inverter VSI (*Voltage Source Inverter*) controllato mediante modulazione di larghezza di impulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) [16]. Un filtro LC addizionale può essere necessario per connettere l'inverter alla macchina elettrica. In questo modo si può fornire al motore una corrente quasi sinusoidale con ripple ridotto, riducendo le perdite, la deteriorazione degli avvolgimenti e le emissioni elettromagnetiche [16]. L'inverter è gestito da un circuito di controllo che permette di ottenere il funzionamento della macchina elettrica come motore o come generatore, in base alle necessità.

Se l'alimentazione esterna coincide con il bus sopracitato, non sono richiesti ulteriori dispositivi. Se invece si tratta di un sistema in corrente alternata, ad esempio una rete elettrica trifase, occorre utilizzare un'altro convertitore di potenza bidirezionale, che funzioni da rettificatore quand'è necessario. Nella maggior parte dei casi questo è costituito da un altro ponte trifase di interruttori di potenza, con un condensatore che funge da stabilizzatore del bus in corrente continua, comune con l'inverter sopracitato [16]. Si realizza in questo modo un VSR (*Voltage Source Rectifier*). Questo rettificatore è pilotato da un altro circuito di controllo, generalmente a modulazione PWM, che prevede algoritmi specifici per la gestione della qualità della potenza prelevata/fornita. Infatti il rettificatore permette di prelevare/fornire potenza attiva e reattiva da/alla rete esterna a cui è collegata la batteria a volano, mantenendo un profilo sinusoidale delle correnti [16]. Questo assicura in particolare il prelievo di energia con un fattore di potenza unitario.

In seguito tratteremo solamente inverter VSI e rettificatori VSR, essendo i più diffusi e facili da comprendere. Si tenga comunque presente che i rispettivi convertitori in corrente sono del tutto duali sia nei componenti che nel funzionamento.

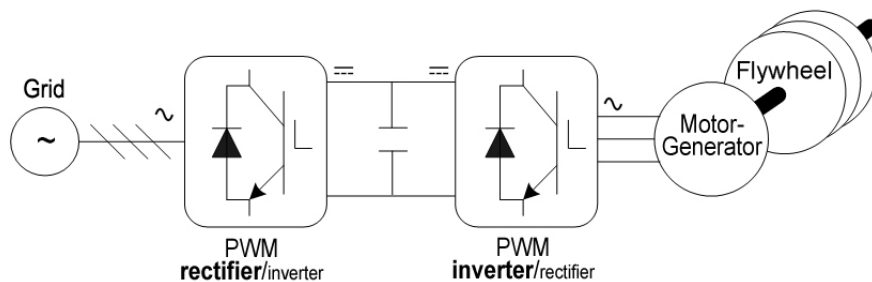


Figura 12: Schema a blocchi dell'elettronica di potenza

I circuiti di controllo dei due convertitori sono differenti tra loro, essendone differenti vincoli e requisiti. L'inverter deve poter operare un controllo di velocità sul motore, variando la corrente negli avvolgimenti dello statore per permettere la generazione della coppia motrice desiderata. Questo viene effettuato attraverso un controllo in retroazione, rilevando le correnti statoriche, la velocità del volano e la sua posizione e di conseguenza generando dei segnali che controllano gli interruttori di potenza. È quindi un inverter a frequenza variabile, alimentato dalla tensione continua presente sul condensatore del bus, che genera una terna di tensioni alternate che induce le correnti negli avvolgimenti del motore. Il controllo riguarda anche la velocità massima a cui può operare in sicurezza il volano, la velocità minima che garantisce la potenza

nominale in uscita e, spesso, un sistema di scarica rapida del volano che viene attivato in caso di malfunzionamento. In quest'ipotesi, il generatore viene disconnesso dal convertitore tramite un teleruttore e collegato ad un resistore di potenza che si occupa di dissipare l'energia immagazzinata in modo non distruttivo [17].

Il rettificatore, invece, opera a frequenza fissa e in fase con la rete in ingresso. Nello specifico, un VSR può lavorare in quattro modalità distinte evidenziate in Fig.13. Oltre a funzionare come rettificatore e inverter è anche in grado di mantenere sfasamenti tra tensioni e correnti arbitrari, simulando, ad esempio, il comportamento di condensatori e induttori [15]. E' quindi evidente come sia possibile prelevare/erogare potenza attiva o reattiva da/verso la rete. Durante il funzionamento da rettificatore, il circuito di un VSR opera in modo simile ad un convertitore boost (step-up), mentre durante il funzionamento da inverter opera come un convertitore buck (step-down). È quindi necessario sfruttare questa caratteristica per fare in modo che sul bus in continua si ottenga un livello di tensione sufficientemente elevato per poter produrre, durante le operazioni di inversione (flusso di potenza verso la rete esterna), una corrente positiva verso la rete [18][19][20]. Se le tensioni alternate prodotte non avessero un modulo sufficientemente elevato, non si avrebbe il funzionamento di inverter, ma quello di rettificatore.

Quando opera da rettificatore, il circuito di controllo del VSR misura la tensione  $V_o$  ai capi della capacità del bus e lo confronta con la tensione di riferimento  $V_{oREF}$ , che corrisponde alla tensione in uscita desiderata. Il segnale  $e$  di errore prodotto dalla differenza di queste due tensioni viene utilizzato per generare i segnali PWM che pilotano gli interruttori di potenza, realizzando in questo modo un controllo in retroazione che tende ad annullare l'errore [15].

Sia nell'inverter che nel rettificatore, la scelta degli interruttori di potenza influisce significativamente sull'efficienza e sulle prestazioni del sistema. È sempre preferibile utilizzare dispositivi veloci che permettono di operare a frequenze più elevate mantenendo accettabili le perdite di commutazione. Infatti un'alta frequenza di commutazione riduce il ripple di corrente e di coppia nel motore/generatore, riduce il ripple di corrente assorbita/ceduta alla rete, semplifica il design del filtro in ingresso e aumenta la larghezza di banda di controllo disponibile [16]. In ogni caso ricordiamo che le perdite di commutazione sono quelle che incidono maggiormente sull'efficienza totale del sistema, è quindi opportuno trovare il giusto compromesso che massimizzi affidabilità, qualità della potenza fornita/assorbita ed efficienza. Per questo motivo la scelta ricade quasi esclusivamente sugli IGBT, che nei modelli più recenti assicurano commutazioni veloci, perdite di conduzione minime e supportano correnti e tensioni abbastanza elevate. Quest'ultime sono inferiori a quelle di altri dispositivi per elevate potenze come GTO o GCT, ma possono raggiungere valori dell'ordine di 6500 V/600 A o 1700 V/3600 A, più che sufficienti per applicazioni che difficilmente superano i 500kW, come nel nostro caso [22]. Inoltre un IGBT non richiede circuiti snubber esterni per gestire rapidi sbalzi di tensione ( $dv/dt$ ) e corrente ( $di/dt$ ). È poi importante notare che l'IGBT opera in regione attiva. È quindi possibile controllare direttamente la corrente di collettore, fornendo un mezzo efficace per la realizzazione di una protezione affidabile contro i cortocircuiti ed un controllo attivo di sovratensioni ( $dv/dt$ ) che si generano in fase di spegnimento del dispositivo [22].

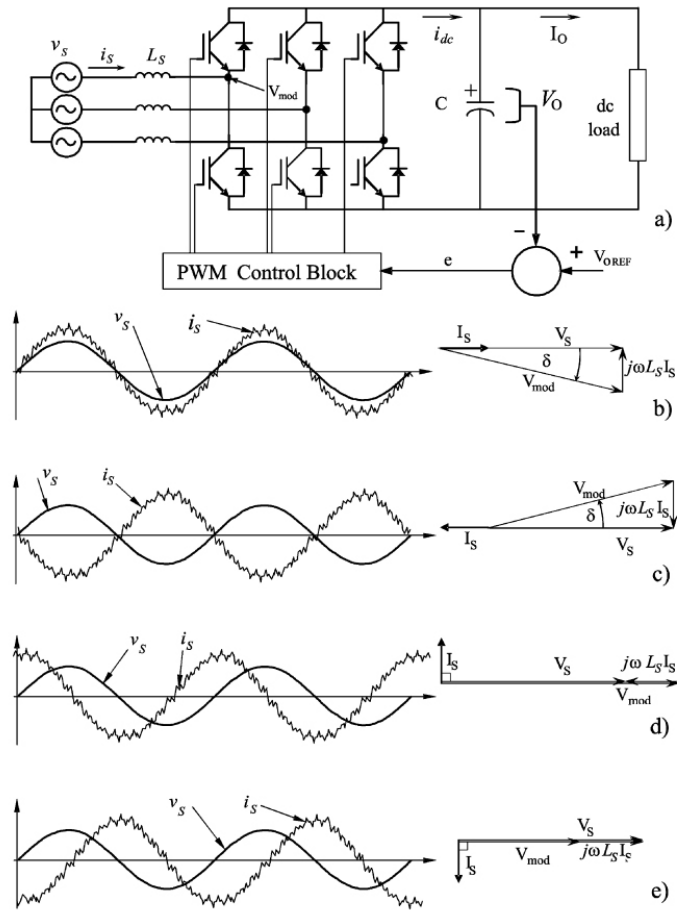


Figura 13: Quattro modi di funzionamento di un VSR. (a) Rettificatore PWM. (b) Funzionamento da rettificatore con fattore di potenza unitario. (c) Funzionamento da inverter con fattore di potenza unitario. (d) Funzionamento da condensatore con fattore di potenza zero. (e) Funzionamento da induttore con fattore di potenza zero. [15]

### 3 Analisi delle prestazioni

Potendo raggiungere elevate densità di potenza, nella maggior parte delle applicazioni l'energia immagazzinata viene erogata in lassi di tempo piuttosto brevi. Si va da alcuni minuti per batterie usate in sistemi UPS e nel settore della *power quality*, a svariate decine di minuti per applicazioni satellitari. In Fig.14 è possibile apprezzare un collocamento indicativo in base a densità di potenza ed energia rispetto ad altre tecnologie di immagazzinamento.

Di seguito analizziamo vantaggi e svantaggi delle batterie a volano. Verranno confrontate spesso con le batterie chimiche, dato che in alcuni settori potrebbero sostituirle nel prossimo futuro.

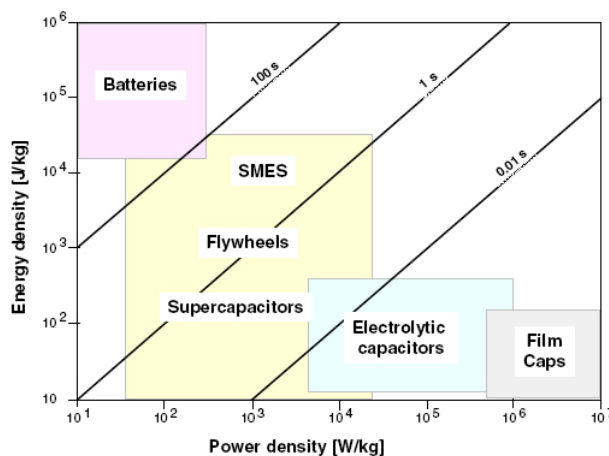


Figura 14: Potenza, energia e tempo di risposta associate a varie tecnologie [23]

#### 3.1 Vantaggi

Le batterie a volano hanno diversi vantaggi rispetto ad altre tecnologie di immagazzinamento dell'energia (vedi Tab.3). Hanno un'efficienza energetica di carica/scarica molto alta, che può arrivare attorno al 95% per i modelli sviluppati di recente [14][23][25][37]. Questa, infatti, dipende in gran parte dalla macchina elettrica impiegata e dal relativo convertitore di potenza con cui è interfacciata, i quali vengono impiegati estensivamente nell'industria moderna e che quindi hanno subito un continuo perfezionamento nel corso degli anni. Entrambi possono raggiungere singolarmente un'efficienza del 97/98% a pieno carico.

Sono dotate di potenza specifica e potenza massima molto elevate, essendo limitate praticamente solo dal convertitore di potenza [26]. Inoltre l'assenza di cuscinetti meccanici e di reazioni chimiche (vedi batterie elettrochimiche) consente di avere una degradazione nel tempo praticamente nulla, permettendo di effettuare un numero virtualmente infinito di cicli di carica e scarica. Queste caratteristiche le rendono particolarmente adatte ad applicazioni in cui si prevedano frequenti cicli di carica/scarica con un elevato output di potenza, come nel controllo della qualità della potenza della rete elettrica (*power quality*). Per lo stesso motivo, le batterie a volano possono essere considerate quasi esenti da operazioni di manutenzione, le quali riguardano solo eventuali guasti nei circuiti elettronici o, molto raramente, correzioni della pressione all'interno della camera a vuoto. Tutto questo si traduce in un tempo di vita utile

Type	Energy Efficiency (%)	Energy Density (Wh/kg)	Power Density (W/kg)	Cycle Life (cycles)	Self Discharge
Pb-Acid	70-80	20-35	25	200-2000	Low
Ni-Cd	60-90	40-60	140-180	500-2000	Low
Ni-MH	50-80	60-80	220	< 3000	High
Li-Ion	70-85	100-200	360	500-2000	Med
Li-polymer	70	200	250-1000	> 1200	Med
NaS	70	120	120	2000	-
VRB	80	25	80-150	> 16000	Negligible
EDLC	95	< 50	4000	> 50000	Very High
Pumped hydro	65-80	0.3	-	> 20 years	Negligible
CAES	40-50	10-30	-	> 20 years	-
Flywheel (steel)	95	5-30	1000	> 20000	Very High
Flywheel (composite)	95	> 50	5000	> 20000	Very High

Tabella 3: Vari sistemi di immagazzinamento dell'energia [21]

che supera i 20 anni [14][23][25].

I vantaggi principali rispetto le batterie elettrochimiche possono riassumersi nell'invariabilità dei parametri che influiscono sullo stato di salute della batteria. Non si hanno variazioni di resistenza interna, impedenza e capacità, di tensione, di tempi di autoscarica e dell'abilità di accettare una certa carica. Inoltre una batteria a volano non ha limitazioni sulle condizioni di carica necessarie a preservarne resa e durata nel tempo [27]. Può essere caricata e scaricata molto rapidamente, potendo sfruttare tutta la potenza sostenibile dall'inverter e dal motore. In media, fornendole piena potenza, sono sufficienti pochi minuti per caricare completamente una batteria a volano di medie/grandi dimensioni.

Dato che le batterie a volano sono sempre interfacciate verso la rete tramite un convertitore di potenza e che il motore/generatore può essere progettato con delle specifiche arbitrarie, non sussistono problemi di incompatibilità di tensione. E' quindi possibile costruire un sistema su misura per l'applicazione prevista, che lavori esattamente alla tensione prevista dalla rete esterna.

Un problema particolarmente sentito dalle batterie classiche è la difficoltà nel determinarne con precisione lo stato di carica. In una batteria a volano quest'informazione può essere ricavata direttamente misurando la velocità di rotazione del volano. Inoltre, proprio per la natura deterministica della quantità di energia immagazzinata, si evitano alla radice i problemi dovuti ad un'eccessiva carica o scarica della batteria, semplicemente programmando il circuito di controllo del convertitore in modo adeguato, il quale provvede a limitare le velocità massima e minima.

Un'altra conseguenza è la facilità di bilanciamento di carica e scarica di un array di batterie a volano. Questo viene effettuato attraverso un circuito di controllo centralizzato che monitora lo stato di ogni batteria e gestisce di conseguenza la quantità di energia da prelevare/fornire da/a ognuna di esse.

Sebbene sia batterie chimiche sia a volano operino con delle limitazioni termiche, il range di temperatura delle batterie a volano è più ampio. Questo è limitato generalmente dalla presenza di magneti permanenti, sistemi di raffreddamento del motore o criostati e dai dispositivi a semiconduttore [14]. Molti produttori dichiarano un range

di temperatura che va da  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$  [14].

La natura meccanica di questi dispositivi assicura un impatto ambientale minimo. Infatti non vengono impiegate sostanze tossiche o pericolose, ma esclusivamente materiali inerti o comunque non nocivi per l'uomo e l'ambiente. Questi consistono principalmente in acciaio, alluminio, rame, fibra di vetro e carbonio, resina epossidica, silicio e terre rare (NdFeB nei magneti). La resina utilizzata nel materiale composito del rotore richiede particolari procedure di smaltimento ma non risulta pericolosa dopo essere stata opportunamente trattata [14].

### 3.2 Svantaggi e limitazioni

Il fattore che limita maggiormente la diffusione delle batterie a volano è il loro elevato costo iniziale rispetto ad altre tecnologie. Va comunque ricordato che non richiedendo manutenzione il loro prezzo diventa decisamente competitivo, soprattutto se vengono utilizzate per applicazioni che degradano in fretta le concorrenti batterie chimiche (frequenti cicli di carica/scarica).

L'efficienza tende però a calare se i cicli di utilizzo non sono continui e risultano quindi più separati nel tempo. In questo caso, infatti, l'alto tasso di autoscarica incide negativamente sull'efficienza totale sul lungo periodo. Sebbene venga limitato da alcune soluzioni tecniche analizzate in precedenza, come l'operare nel vuoto e l'utilizzo di cuscinetti magnetici, resta comunque uno dei più elevati tra i vari sistemi di immagazzinamento dell'energia. Le perdite che causano l'autoscarica possono essere analizzate in due modi: a circuito aperto, ovvero disconnettendo l'elettronica di potenza dalla batteria, oppure in standby, dove l'elettronica di potenza rimane collegata al motore ed opera in modo discontinuo per mantenere il volano a velocità costante. Generalmente i costruttori indicano solamente le perdite medie in modalità standby. È stato osservato che il tasso di autoscarica in standby per un'ora varia generalmente da 0.18 a 2.0 volte la capacità immagazzinata [14]. È comunque un parametro che varia molto in base alle specifiche tecniche della batteria in esame e dalla rispettiva applicazione. Ci sono infatti alcune fonti che riportano tempi di autoscarica molto più lunghi, arrivando anche ad alcune settimane o addirittura mesi [9].

Una conseguenza indesiderata che deriva dalla rotazione del volano è l'elevato effetto giroscopico che si manifesta quando si tende a ruotare il suo asse di rotazione. Questo risulta essere molto scomodo quando la batteria è installata su un mezzo in movimento, come un'automobile o un satellite. È però possibile limitare l'effetto orientando opportunamente l'asse di rotazione in modo che coincida il più possibile con gli assi delle possibili rotazioni impresse dall'esterno. Altre soluzioni prevedono l'installazione di due volani controrotanti che operano alla stessa velocità, in modo da annullare il momento d'inerzia totale del sistema, oppure il montaggio attraverso specifici supporti che permettono la rotazione libera sui tre assi (Fig.15).

È stato anche provato che parte delle perdite dei cuscinetti è dovuta al momento giroscopico che il volano sviluppa in reazione alla rotazione terrestre.

In generale un sistema d'immagazzinamento a batterie a volano risulta più complesso da progettare e realizzare rispetto ad uno basato su batterie chimiche, anche perchè spesso viene pensato specificatamente per una determinata applicazione o cliente. La fabbricazione del volano e dell'involucro richiede grande precisione e un'attenta analisi post produzione per assicurare degli standard di sicurezza sufficienti.

Un difetto di fabbricazione o un danno dovuto a fattori esterni possono portare a guasti con potenziali effetti distruttivi. Soprattutto nei grandi dispositivi ad alta densità di energia, è necessario provvedere a sistemi di sicurezza che limitino i danni nel caso il volano entri in contatto con l'involucro, cercando di rallentarlo e dissiparne l'energia più lentamente. L'interramento della batteria si è rivelato una soluzione efficace, anche perchè permette di ridurre il costo dei materiali impiegati nell'involucro di contenimento.

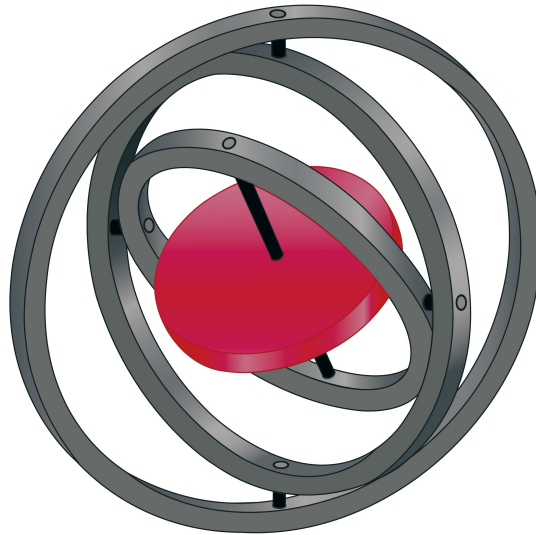


Figura 15: Supporto che consente al volano fissato al centro di ruotare in ogni direzione senza produrre forze sul telaio più esterno



## 4 Applicazioni

Le varie tecnologie che permettono la realizzazione di batterie a volano sono tutt'ora in via di ricerca e sviluppo, per questo sarà necessario attendere ancora qualche anno perchè comincino ad essere considerate ed impiegate su larga scala. Inoltre è da notare come i vari parametri che caratterizzano una batteria a volano possano variare parecchio in base all'applicazione per cui è stata progettata. I dati riportati in Tab.4 mettono in luce delle differenze marcate tra le tecnologie impiegate per soddisfare i diversi requisiti di alcune applicazioni. Questo comporta degli sviluppi disomogenei da parte delle aziende che si occupano della loro produzione e commercializzazione, dato che ognuna tende a concentrarsi su di un particolare settore di mercato.

In ogni caso esistono già dei modelli commerciali disponibili, commissionati prevalentemente da istituzioni governative o militari che hanno finanziato gran parte della ricerca delle relative aziende.

	Peak power	Stored energy, MJ (kWh)	Maximum velocity, rpm	Rim speed, m/s	Rotor material	Rotor mass, kg
Satellite	2 kW	1.4 (0.4)	53 000	900	Composite	30
Power quality	400 kW	4.7 (1.3)	10 000	400	Steel	1400
Hybrid bus	150 kW	7 (2)	40 000	900	Composite	60
Space station	3.6 kW	13 (3.7)	53 000	900	Composite	75
Hybrid combat vehicle	11 MW pulse; 350 kW cont.	25 (14)	18 000	540	Composite/ metallic	280
Electromagnetic launcher	5-10 GW	50-150 (14-42)	10 000	450	Composite	4000
Train	2 MW	470 (130)	15 000	950	Composite	2500

Tabella 4: Specifiche tecniche di batterie a volano per alcune applicazioni [40]

### 4.1 Power quality

Il principale campo applicativo delle batterie a volano è il cosiddetto settore che si occupa della *power quality*, ovvero l'implementazione di vari sistemi di monitoraggio e intervento che permettono di mantenere un'adeguata qualità della potenza fornita dalla rete elettrica. Idealmente la rete elettrica dovrebbe fornire una tensione alternata sinusoidale la cui ampiezza e frequenza sono costanti nel tempo secondo gli standard nazionali o comunque le specifiche del sistema (nel caso quest'ultimo non sia direttamente collegato alla rete principale), con un'impedenza nulla a tutte le frequenze. In realtà nessuna sorgente di potenza è reale e potenzialmente può deviare dalle specifiche nei seguenti modi:

- variazioni nella tensione di picco o RMS
- fluttuazioni della tensione più o meno brevi, casuali o ripetitive
- variazioni della frequenza
- variazioni nella forma d'onda
- fattore di potenza non unitario
- impedenza della rete non nulla a basse ed alte frequenze

Ognuno di questi effetti indesiderati ha cause differenti, spesso derivanti dalla condivisione delle infrastrutture per la distribuzione dell'energia elettrica. Non è infatti

possibile prevedere con precisione l'assorbimento energetico dei vari carichi collegati alla rete. Inoltre è difficile correggere questi problemi in modo efficiente, dato che la gestione di elevate potenze richiede interventi lenti e costosi. Di seguito analizziamo le principali applicazioni delle batterie a volano orientate ad un miglioramento dell'efficienza di tali interventi.

#### 4.1.1 Regolazione di frequenza

Per mantenere una rete funzionale ed affidabile gli enti fornitori di energia elettrica devono operare un continuo controllo sulla frequenza di rete. Questa deve essere mantenuta il più possibile vicino alla frequenza nominale (50 o 60 Hz) in modo da garantire il corretto funzionamento degli apparati collegati. Variazioni significative della frequenza possono portare a cali di efficienza, malfunzionamenti e incidere negativamente sulla sicurezza degli utilizzatori.

La frequenza di rete subisce continue variazioni a causa della differenza non nulla tra potenza attiva generata dalle centrali e potenza attiva assorbita dagli utilizzatori. Per questo motivo vengono effettuate delle previsioni a lungo termine sull'ipotetico fabbisogno energetico, in modo da intervenire preventivamente sui generatori per regolare la potenza erogata. E' però impossibile prevedere le fluttuazioni della domanda energetica a breve termine, essendo queste del tutto casuali. Viene quindi effettuato un monitoraggio continuo della frequenza di rete per poter aumentare/diminuire la produzione di energia in funzione della sua variazione.

Variare la potenza generata dalle centrali elettriche è un procedimento relativamente lungo che può richiedere svariate decine di secondi, minuti o addirittura ore. Si considerino ad esempio l'inerzia delle turbine a vapore, il tempo necessario a fornire più combustibile ad una centrale termoelettrica o ancora i tempi tecnici e di sicurezza necessari ad aumentare la produzione di energia in una centrale nucleare. Tutte queste variazioni portano inoltre ad elevati consumi di combustibili ed emissioni di CO<sub>2</sub>.

Proprio per queste ragioni si sta rivolgendo sempre più attenzione ai sistemi di immagazzinamento dell'energia. Questi permettono di riciclare l'energia generata, assorbendola quando in eccesso e rilasciandola quando in difetto, in modo da compensare gli sbalzi di assorbimento della rete. Tra le varie tecnologie di immagazzinamento dell'energia, le batterie a volano si stanno rivelando molto promettenti. Infatti la regolazione continua della frequenza richiede piccole/medie capacità di energia, potenze elevate, un alto numero di cicli di carica/scarica e possibilmente poca manutenzione.

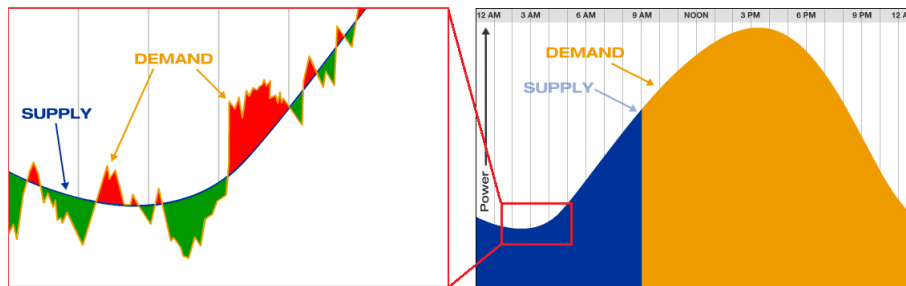


Figura 16: Esempio di andamento della potenza richiesta e fornita dalla rete elettrica [32]

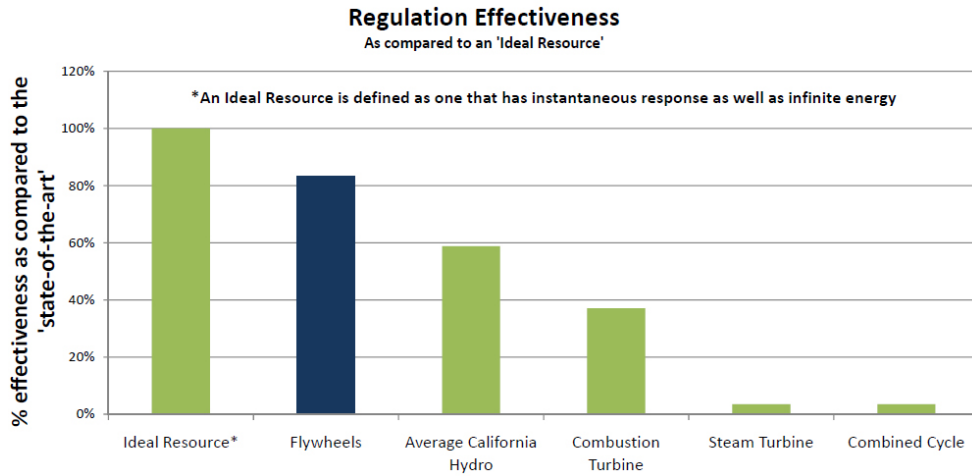


Figura 17: Efficacia della regolazione della potenza di rete in relazione ad una risorsa ideale di regolazione della frequenza (ovvero con risposta istantanea ed energia infinita) [34][33]

In Fig.16 possiamo vedere un tipico andamento della potenza richiesta e fornita durante la giornata. Quando la potenza richiesta è inferiore a quella generata si sfrutta l'energia prodotta in eccesso per caricare degli array di batterie a volano. Viceversa, quando la potenza richiesta è superiore a quella generata, le batterie a volano rilasciano energia per fornire il surplus di potenza desiderato. Dato che la media delle fluttuazioni della potenza richiesta è zero, questo sistema può funzionare in modo continuo, grazie anche ai rapidi tempi di carica e scarica delle batterie a volano.

Utilizzando sistemi basati su batterie a volano si ottiene un'elevata efficacia della regolazione della frequenza, riducendo significativamente i consumi e le emissioni. Questi possono contare su un'alta velocità di risposta, dell'ordine di qualche secondo, garantendo un ottimo inseguimento della domanda di potenza. In particolare si possono ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> del 50% rispetto a sistemi di regolazione con generatori a gas e dell'85% rispetto a quelli basati su generatori a carbone [31].

In Fig.17 si può apprezzare l'efficacia di regolazione di impianti che utilizzano risorse energetiche convenzionali e di impianti basati su batterie a volano. L'efficacia  $E$  è definita come il rapporto tra le capacità energetiche di regolazione della risorsa analizzata e di un'ipotetica risorsa ideale, necessarie a bilanciare la differenza tra la generazione di energia elettrica attuale e quella pianificata [33]:

$$E = \frac{\text{Capacità richiesta alla risorsa reale [MW]}}{\text{Capacità richiesta ad una risorsa ideale [MW]}} \quad (13)$$

I risultati sono stati ottenuti utilizzando i dati rilevati nel 2006 sulla rete elettrica della California durante un periodo di 36 giorni [33].

Un esempio di impianto di regolazione che utilizza batterie a volano è riportato in Fig.18. Questo tipo di impianto è inoltre eco-compatibile e può essere installato anche nei pressi di centri abitati, dato che non genera emissioni di alcun tipo ed è molto silenzioso.



Figura 18: Impianto per la regolazione della frequenza da 20MW che utilizza 200 batterie a volano interrate da 100kW/25kWh [32]

#### 4.1.2 Riserva energetica

Gli stessi impianti utilizzati per la regolazione della frequenza possono essere utilizzati come riserva energetica di emergenza (FRR - *Frequency Response Reserve*) per rispondere con efficacia ad eventi straordinari. Tipici esempi sono il guasto ad una centrale elettrica o l'interruzione di una linea di distribuzione. In questi casi si ha infatti una rapida caduta della frequenza di rete che è necessario colmare per il tempo necessario ad aumentare la produzione di altri sistemi di generazione. Anche in questo caso sono richiesti tempi di risposta molto brevi e potenze elevate, caratteristiche salienti delle batterie a volano.

#### 4.1.3 Controllo dell'instabilità angolare

Una griglia di distribuzione sicura, affidabile, efficiente e moderna deve essere in grado di rilevare e mitigare automaticamente gli eventi globali che possono portare a blackout su larga scala. Nonostante il continuo impegno dell'ingegneria in questo campo, le infrastrutture moderne rimangono vulnerabili al cosiddetto fenomeno dell'instabilità angolare. Questa è essenzialmente una fluttuazione di potenza a bassa frequenza (solitamente minore di 1Hz) non smorzata, che rimbalza da un capo all'altro della griglia elettrica. Questo tipo d'onda è difficile da bloccare o smorzare e può occupare una porzione significativa della capacità della linea di trasmissione. Se l'oscillazione a bassa frequenza venisse smorzata, potrebbe essere ripristinata la capacità di trasmissione, alleggerendo le linee congestionate ed evitando possibili instabilità della griglia. In passato questo tipo di instabilità è stato collegato a blackout su larga scala costati miliardi di dollari in perdita di produttività, beni e servizi [32].

Lo smorzamento di queste oscillazioni può essere effettuato con una rapida iniezione di potenza attiva e reattiva nella rete ad una frequenza simile a quella di tali oscillazioni. Anche in questo caso è possibile impiegare efficacemente matrici di bat-

terie a volano specifiche per lo scopo, oppure utilizzare gli stessi impianti adibiti alla regolazione di frequenza. I motivi della loro efficacia risiedono sempre nei brevi tempi di risposta, alte potenze ed elevato numero di cicli di carica/scarica.

#### 4.1.4 Supporto potenza reattiva

Il supporto di potenza reattiva può essere effettuato sia su piccola scala, ad esempio nell'ambito di un sistema industriale, sia su larga scala, con impianti che possono fornire/assorbire decine di MW di potenza reattiva. L'implementazione con sistemi a volano permette un'elevata scalabilità e la possibilità di decentralizzare questo tipo di impianti. E' così possibile compensare la potenza reattiva in modo mirato, senza sovraccaricare le linee di trasmissione principali. Questo si traduce in un risparmio notevole sui costi di realizzazione e ampliamento delle linee di distribuzione principali e secondarie.

Un insieme di unità di piccole/medie dimensioni dislocate nelle zone critiche della rete è in grado di aumentare le potenzialità di una smart grid già presente. Le batterie a volano consentono infatti una compensazione della potenza reattiva molto più efficace dei tradizionali sistemi basati su condensatori. E' possibile ottenere un fattore di potenza quasi unitario, adattando la quantità di potenza reattiva assorbita/fornita in base alle condizioni istantanee della rete. Quindi non è più necessario un dimensionamento conservativo del sistema come per i condensatori, in quanto l'elettronica di controllo dei sistemi a volano è in grado di rilevare e compensare l'esatta quantità di potenza reattiva che varia continuamente nel tempo.

L'impiego di questi sistemi su scala unitaria, per la correzione del fattore di potenza di macchinari industriali, permette agli utenti finali di evitare i costi aggiuntivi praticati dalle compagnie di fornitura elettrica per gli eccessi di potenza reattiva. Inoltre consente di avere una migliore qualità della potenza per applicazioni industriali e commerciali particolarmente sensibili.

#### 4.1.5 UPS

I sistemi UPS (gruppi di continuità) costituiscono un'altra applicazione di successo delle batterie a volano. Questo perché il 97% degli eventi di interruzione dell'energia elettrica di rete dura meno di 3 secondi [16], gestibili senza problemi anche da sistemi a volano di piccola capacità. Inoltre questi sono molto più affidabili e durevoli rispetto alle batterie piombo-acido sigillate utilizzate normalmente negli UPS.

I sistemi UPS a volano di ultima generazione possono contare su unità molto compatte, meno ingombranti e più leggere rispetto alle alternative a batterie piombo-acido. Sono poi ottimizzate per avere il minor consumo possibile in standby, molto simile a quello della carica di mantenimento delle batterie tradizionali, e un tempo di risposta relativamente breve, inferiore a 10 ms [36]. I vari moduli a volano che compongono il sistema possono essere connessi in parallelo, dato che sono in grado di erogare singolarmente la tensione richiesta dalla rete, per aumentare potenza e ridondanza del sistema. Se un modulo dovesse subire un malfunzionamento, l'UPS potrebbe entrare in funzione ugualmente, anche se per un tempo inferiore.

Anche in questo caso l'assenza di manutenzione rende le batterie a volano molto convenienti per questo tipo di applicazione, dato che ad un alto costo iniziale non vanno poi aggiunti i costi di manutenzione e sostituzione degli UPS tradizionali. In aggiunta ricordiamo che l'elevata efficienza e l'assenza di inquinamento ambientale di questo tipo di sistemi costituisce un ulteriore incentivo alla loro installazione o all'upgrade di impianti già esistenti. L'incremento del prezzo del piombo è un altro fattore

che può portare a considerare questo tipo di soluzione [36].

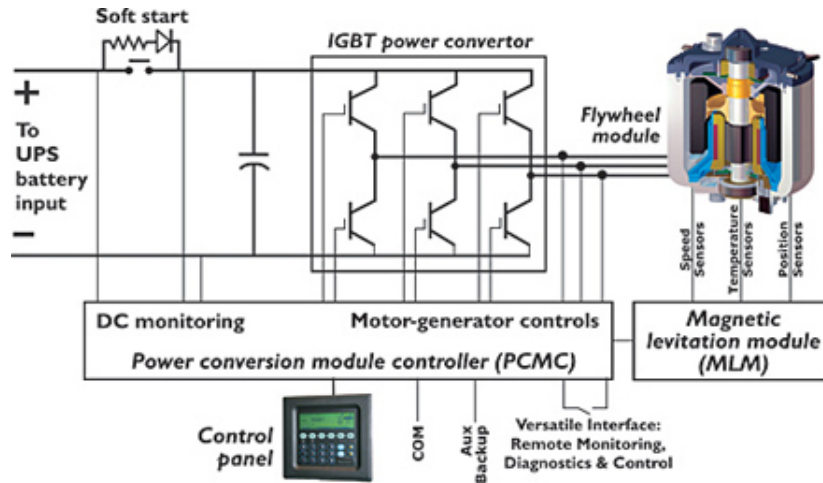


Figura 19: Modulo a volano per UPS con interfaccia di potenza in continua [38]

I produttori forniscono sia batterie a volano singole che possono sostituire direttamente le vecchie batterie di UPS esistenti, sia sistemi UPS completi con la necessaria elettronica di potenza e controllo. Nel primo caso i moduli a volano sono dotati di interfaccia di potenza in continua, dato che devono poter sostituire le vecchie batterie. Beacon Power, ad esempio, fornisce moduli con interfaccia a 36, 48 o 96 Vdc, in modo da garantire la compatibilità con i principali UPS di media/grande potenza [14]. In Fig.19 possiamo vedere lo schema funzionale di uno di questi moduli e in Fig.11 il dettaglio della batteria a volano impiegata.

Allo stato attuale il mercato degli UPS sembra molto promettente, essendo piuttosto vasto e ormai consolidato e visto che i sistemi a volano possono garantire numerosi vantaggi in termini di prestazioni, costi ed ecocompatibilità. Diversi produttori hanno già immesso sul mercato diverse soluzioni che possono coprire le diverse esigenze di potenza e tempo di erogazione richiesti. L'installazione di UPS a volano è comunque raccomandata solo per sistemi da almeno qualche centinaio di kilowatt, in modo da poter beneficiare maggiormente dei vantaggi offerti da questo tipo di tecnologia [37].

## 4.2 Supporto per sistemi ferroviari

Al giorno d'oggi la maggior parte dei treni esistenti è di tipo elettrico ed è dotata di frenata rigenerativa. Il continuo susseguirsi di accelerazioni e decelerazioni dei treni nei pressi delle stazioni causa picchi di assorbimento e generazione (durante la frenata) di potenza molto elevati. Questi comportano un consumo di energia elettrica disomogeneo che costringe a sovradimensionare le strutture di alimentazione delle stazioni. Immagazzinando l'energia prodotta durante la decelerazione di un treno e riutilizzandola per una successiva accelerazione, si evitano i picchi di potenza sopracitati e si riducono i consumi globali di energia elettrica. Le batterie a volano si prestano ottimamente allo scopo dato che sono richiesti numerosi cicli di carica/scarica, potenze molto elevate, alta efficienza e bassa manutenzione. Inoltre, occupando poco spa-

zio, possono essere alloggiate in stazioni e cabine elettriche preesistenti, permettendo l'upgrade del sistema con un minimo impatto sulle strutture ferroviarie [26].

Queste cabine di accumulatori possono essere connesse direttamente alla linea di alimentazione ferroviaria e non richiedono altra strumentazione esterna per poter funzionare. Sono in grado di rilevare i picchi di tensione positivi e negativi dovuti all'eccesso o difetto di potenza disponibile e di intervenire adeguatamente. Solitamente vengono posizionati a livello delle stazioni ferroviarie od in particolari punti critici della rete, dove vengono registrati i maggiori sbalzi di tensione.

Spesso l'energia in eccesso prodotta dalla frenata dinamica dei convogli viene dissipata in opportuni banchi di resistori di potenza, operazione che richiede un ulteriore consumo energetico per i relativi dispositivi di raffreddamento. Recuperando tale energia mediante delle batterie a volano, è possibile eliminare i banchi di resistori, ottenendo un ulteriore aumento dell'efficienza dell'intero sistema [26].

Un'altra soluzione prevede di installare degli accumulatori a volano direttamente sui locomotori dei convogli. Questo si rivela particolarmente utile in caso di sistemi che non hanno la capacità di rimandare verso la rete elettrica l'energia prodotta dalla frenata dinamica. Questo tipo di treni deve quindi avere dei resistori di potenza che dissipino tale energia. Come nel caso dei sistemi a volano installabili sulla linea elettrica, anche qui è possibile eliminare i resistori a favore del recupero energetico e di una migliore efficienza [26].

La stesse soluzioni possono essere applicate anche a tram, metropolitane e ai treni a levitazione magnetica.

### 4.3 Veicoli ibridi ed elettrici

Nel prossimo futuro i veicoli ibridi diventeranno sempre più comuni, dato che permettono di ridurre l'inquinamento atmosferico ed estendere nel tempo l'utilizzo degli idrocarburi. Questo tipo di veicoli utilizza per la propulsione sia un motore a combustione interna sia un motore elettrico. L'idea di base è di produrre con il motore a combustione la potenza media necessaria alla propulsione, che può quindi operare ad una velocità ottimale quasi costante, riducendo il consumo di carburante, l'inquinamento e la manutenzione richiesta, estendendo la vita del motore. I picchi di potenza necessari a percorrere tratti in salita o ad accelerare vengono invece prelevati da un accumulatore di energia elettrica, il quale viene caricato attraverso il motore a combustione o la frenata rigenerativa.

La batteria a volano rappresenta una soluzione molto allettante, dato che presenta un tempo di vita molto esteso, ha elevata efficienza, non richiede manutenzione, può fornire le elevate potenze richieste dal motore elettrico e può essere caricata in pochi secondi. Inoltre può raggiungere densità di energia e potenza elevati senza comportare eccessivo peso od ingombro, caratteristica fondamentale per un veicolo.

A causa dell'attuale costo elevato delle batterie a volano, per il momento vengono installate e testate solo su veicoli di grandi dimensioni, come gli autobus ad esempio [40]. Comunque esistono prototipi o esemplari di macchine da corsa che incorporano già questo tipo di tecnologia, sfruttandola per ottenere maggiore potenza in fase di accelerazione. Ad esempio la *Porsche 911 GT3 R Hybrid* (presentata al Motor Show di Genova nel 2010) è equipaggiata con un sistema a volano (Fig.20) che può fornire 120 kW per 6-8 secondi a due motori elettrici anteriori da 60 kW ognuno, la cui potenza viene sommata a quella del motore posteriore a combustione interna da 480 hp (360 kW) [41]. Questo particolare tipo di macchina è stato concepito appositamente per affrontare gare di lunga durata, dove oltre alla pura potenza è



necessaria un'efficace gestione dei consumi del carburante. Va comunque sottolineato che l'unità installata su questa vettura fa uso di cuscinetti ceramici, non magnetici.

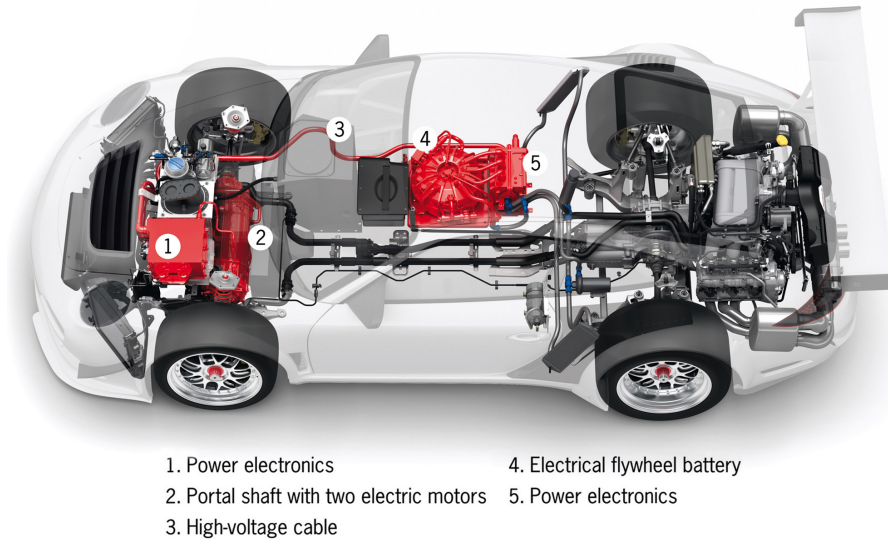


Figura 20: Sistema a volano di recupero energia installato sulla *Porsche 911 GT3 R Hybrid* [41]

Anche i veicoli elettrici puri possono beneficiare dei sistemi a volano per il recupero e riutilizzo dell'energia ottenuta con la frenata rigenerativa. Pur necessitando di batterie o celle a combustibile con densità di energia molto elevate (per avere sufficiente autonomia), è molto utile avere un accumulatore che possa fornire elevate potenze e rapida carica/scarica per il recupero dell'energia. Le batterie convenzionali non sono in grado di assorbire molta energia in poco tempo e di sopportare un elevato numero di cicli di carica/scarica, per questo ci si sta orientando verso soluzioni basate anche su sistemi a volano o supercondensatori. Questi affiancherebbero le batterie tradizionali solo nelle fasi di accelerazione e decelerazione, quando il sistema ha a che fare con elevati input/output di potenza.

Un aspetto molto importante da non sottovalutare riguarda la sicurezza dei sistemi a volano. Nel caso del loro utilizzo sui mezzi di trasporto è fondamentale garantire la sicurezza delle persone all'interno o nelle vicinanze del veicolo in caso di guasto od incidente stradale. Da qualche anno sono stati avviati diversi progetti che si occupano di indagare sulla sicurezza di questo tipo di installazioni. Questi hanno proposto delle linee guida per la realizzazione di batterie a volano intrinsecamente sicure, riassumibili in tre punti chiave. Per prima cosa i volani sono realizzati in modo da non avere cedimenti strutturali. Vengono effettuati numerosi test di velocità a regimi ben superiori di quelli garantiti in modo da valutare ogni possibile causa di malfunzionamento. Secondo, è previsto un continuo monitoraggio delle condizioni del volano, normalmente attraverso il controllore dei cuscinetti magnetici, in modo da garantire un rapido arresto di emergenza nel caso si verifichi un'anomalia. Il terzo e ultimo punto riguarda il contenimento. L'involucro che contiene il volano è progettato per assorbire in sicurezza l'energia sprigionata da un eventuale contatto o distruzione del rotore.



## 4.4 Compensazione potenza da energie rinnovabili

Gli svantaggi principali derivanti dall'uso di energie rinnovabili è la loro discontinuità di produzione dell'energia ed instabilità nella potenza fornita nel breve periodo. L'energia eolica e solare sono tra le più difficili da sfruttare efficientemente, soprattutto su larga scala, dato che un loro collegamento alla rete elettrica comporta una fornitura di energia non costante, che tende ad aggiungere ancora più instabilità nella rete. Per questo motivo è necessario interporre un dispositivo di energy storage che livelli la potenza in uscita e garantisca un funzionamento energetico simile a quello delle classiche turbine a vapore.

Anche gli impianti di produzione isolati, costituiti ad esempio da una turbina eolica accoppiata ad un generatore diesel (Fig.21), traggono grande beneficio dall'utilizzo di batterie tampone intermedie. Queste permettono di ottenere una migliore qualità della potenza in uscita, oltre che accumulare energia da utilizzare successivamente. In questo modo si limita al minimo l'uso dei generatori diesel e le emissioni prodotte.

Le batterie a volano costituiscono un'ottimo supporto per queste fonti di energia, potendo contare su tempi di risposta molto brevi, bassa manutenzione, alta efficienza e minimo impatto ambientale. Come descritto nella sezione 4.1.1, si prestano bene alla regolazione della potenza erogata in modo discontinuo o comunque con continue variazioni nel tempo.

Nel caso si usino delle batterie chimiche è sempre necessario sovradimensionare l'impianto per far fronte a tempi di carica/scarica pregiudizievoli per la vita utile delle batterie. Nel caso dei sistemi a volano non sussiste questo problema, potendo contare su cicli di scarica profonda che permettono di seguire meglio l'andamento variabile della potenza prodotta [25].

In particolare, per questo tipo di applicazione, le batterie a volano rappresentano la soluzione più economica, semplice ed ecologica rispetto ai concorrenti sistemi basati su supercondensatori e SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) [25].

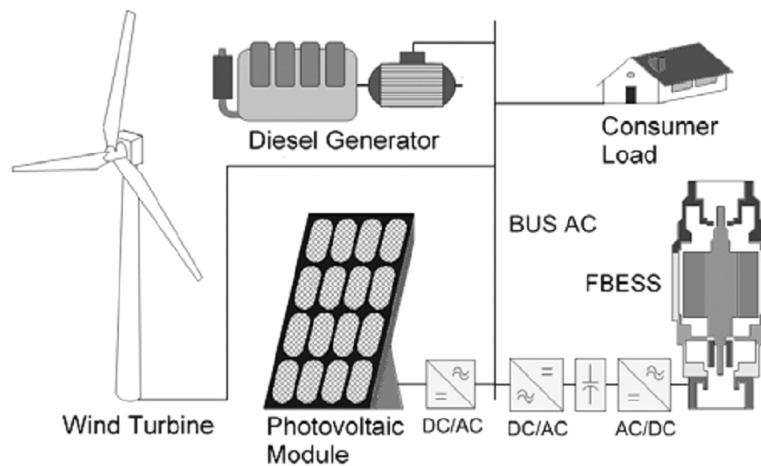


Figura 21: Sistema ibrido che combina fonti di energie rinnovabili con un generatore diesel [16]

## 4.5 Supporto per alte potenze impulsive

Le caratteristiche delle batterie a volano le rendono particolarmente adatte alla fornitura di grandi potenze per brevi periodi di tempo. Diversi processi industriali impiegano macchine di elevata potenza che spesso presentano picchi di assorbimento molto elevati o sono caratterizzati da un consumo irregolare. Alcuni esempi sono la produzione di wafer di silicio, la saldatura ad arco, l'estrazione mineraria, la stampa, la produzione della carta e di tessuti e la lavorazione del legname [17]. L'utilizzo di sistemi a volano che possono fornire tali potenze impulsive permette notevoli risparmi energetici, ridimensionando i volumi di potenza di picco assorbiti dalla rete. Un altro esempio di applicazione di tali sistemi risiede nel lancio degli aerei dalle navi portaerei. Al giorno d'oggi le portaerei utilizzano catapulte di lancio alimentate da sistemi a vapore, i quali utilizzano degli accumulatori di vapore per immagazzinare l'energia necessaria. La marina degli Stati Uniti sta sviluppando dei sistemi di lancio elettromagnetici nei quali delle batterie a volano sostituiscono gli accumulatori di vapore. In questo modo il sistema di generazione dell'energia elettrica non deve essere dimensionato per le elevate potenze di picco richieste [40].

## 4.6 Satelliti e stazioni spaziali

Un campo di notevole interesse per le batterie a volano riguarda le applicazioni spaziali, in particolare quelle satellitari. Soprattutto i satelliti posizionati in orbita bassa possono trarre beneficio dai sistemi a volano. Infatti si trovano ad essere eclissati dalla Terra per una porzione significativa del loro tempo di percorrenza dell'orbita. Questo comporta la necessità di avere batterie efficienti ed affidabili che possano essere caricate e scaricate molte volte e in poco tempo. Di conseguenza i satelliti che percorrono attualmente tali orbite risultano essere molto costosi, essendo costretti ad impiegare batterie la cui vita media si attesta attorno ai 4-6 anni, come per la Stazione Spaziale Internazionale [45]. L'uso di sistemi a volano potrebbe aprire un nuovo mercato per i satelliti orbitanti a bassa quota, soprattutto per quanto riguarda quelli riguardanti le comunicazioni in ambito civile [45].

La NASA sta attualmente sviluppando alcuni prototipi avanzati per un futuro impiego satellitare. Uno di questi, il *G2*, è visibile in Fig.22. Il modulo *G2* opera ad una velocità massima di 41000 giri/min e grazie alle perdite molto ridotte impiega circa 5.5 ore per rallentare fino a 12000 giri/min [42].

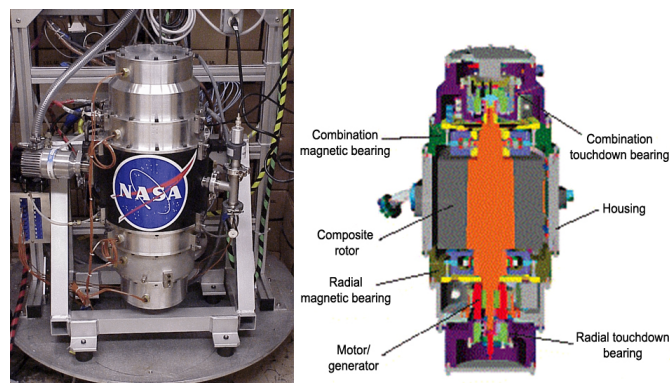


Figura 22: Batteria a volano per applicazioni spaziali sviluppata dalla NASA [42]

Come già accennato, anche la Stazione Spaziale Internazionale soffre dello stesso problema. Le batterie servono a garantire il funzionamento continuo delle apparecchiature di bordo durante 35 su 90 minuti della sua orbita in cui è eclissata dalla Terra. Su di essa sono attualmente installate delle batterie al nichel-idrogeno ( $NiH_2$ ), che possono garantire oltre 37000 cicli di carica/scarica, per un periodo di circa 6.5 anni [43]. I ricercatori della NASA stanno testando delle batterie a volano che molto probabilmente sostituiranno le batterie chimiche nel prossimo futuro. Queste possono fornire energia alla stazione per il doppio del tempo senza ricarica, avendo stesse dimensioni e peso simile alle batterie attualmente installate [40]. Il sistema completo si compone di 48 moduli a volano da 2.8 kWh (energia utilizzabile) che possono operare fino a 53000 giri/min [44]. Questi sono in grado di fornire complessivamente più di 150 kW, con un'efficienza netta del 93.7%. La NASA stima che si risparmierebbero oltre 200 milioni di dollari se la prima generazione di batterie chimiche fosse sostituita con quelle a volano [40].

## 5 Considerazioni finali

I sistemi di immagazzinamento dell'energia stanno diventando sempre più importanti per un efficace sviluppo dei sistemi energetici moderni. L'aumento dell'efficienza apportato ad apparati convenzionali e il miglioramento di qualità e utilità dell'energia prodotta per mezzo di nuove metodologie, si stanno rivelando cruciali per un progresso dell'energia economicamente vantaggioso e a minore impatto ambientale.

In questo elaborato è stata illustrata una tecnologia ancora poco nota e poco sfruttata al giorno d'oggi, ma che nel prossimo futuro sarà sicuramente molto più diffusa. Ricerche e risultati sperimentali dimostrano infatti che le batterie a volano rappresentano un'ottima alternativa agli usuali dispositivi di energy storage in molte applicazioni. In particolare, i vantaggi economici derivanti dal loro impiego sono determinanti per un aumento dell'interesse commerciale verso questi dispositivi. Inoltre, a differenza di altre tecniche di energy storage, l'accumulo in forma cinetica dell'energia elettrica ha portato a risultati notevoli malgrado i relativi settori di ricerca e sviluppo siano piuttosto limitati. Il recente interessamento da parte di enti governativi, militari e aerospaziali è un'ulteriore dimostrazione della validità di tale tecnologia.

Possiamo dire che la batteria a volano rappresenta una delle più importanti tecnologie per il risparmio energetico. Non solo risulta essere una soluzione ecologica al problema dell'energy storage, ma garantisce prestazioni eccellenti, elevata affidabilità e una vita utile tra le più estese. Nonostante questo, c'è ancora del lavoro da svolgere per far cadere la diffidenza verso tale tecnologia. In primis è necessario garantire la sicurezza operativa dei sistemi a volano, soprattutto per le applicazioni che prevedono un'elevata percentuale di rischio di incidenti. Inoltre, deve essere chiaro che l'alto costo iniziale, che spesso frena l'investimento in tali dispositivi, viene ammortizzato abbondantemente grazie alla poca manutenzione richiesta delle batterie a volano. Infatti a causa della loro natura meccanica, al contrario della maggior parte delle batterie tradizionali, vi è un errato pregiudizio sull'affidabilità garantita nel lungo periodo.

Al momento la ricerca è concentrata principalmente sullo sviluppo di nuovi materiali ad alta resistenza e sui sistemi di controllo dinamico di cuscinetti e motore/generatore. L'obiettivo è quello di raggiungere densità di energia più elevate e limitare le perdite dovute alla rotazione, espandendo il campo delle possibili applicazioni delle batterie a volano. Allo stesso tempo si cerca comunque di limitare i costi, procedendo verso una standardizzazione dei design costruttivi ed una produzione in serie più efficace ed economica.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Giancarlo Genta (1985), *Kinetic energy storage: theory and practice of advanced flywheel systems*, Butterworth, Londra.
- [2] J. R. Fang, L. Z. Lin, L. G. Yan, L. Y. Xiao (2001), *A New Flywheel Energy Storage System Using Hybrid Superconducting Magnetic Bearings*, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 1 I, No. I.
- [3] H. Y. Chu, Y. Fan, C. S. Zhang (2005), *A Novel Design for the Flywheel Energy Storage System*, School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing.
- [4] T. Ichihara, K. Matsunaga, M. Kita, I. Hirabayashi, M. Isono, M. Hirose, K. Yoshii, K. Kurihara, O. Saito, S. Saito, M. Murakami, H. Takabayashi, M. Natsumeda, N. Koshizuka (2005), *Application of Superconducting Magnetic Bearings to a 10 kWh-Class Flywheel Energy Storage System*, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2.
- [5] M. Strasik, P. E. Johnson, A. C. Day, J. Mittelider, M. D. Higgins, J. Edwards, J. R. Schindler, K. E. McCrary, C. R. McIver, D. Carlson, J. F. Gonder, J. R. Hull (2007), *Design, Fabrication, and Test of a 5-kWh/100-kW Flywheel Energy Storage Utilizing a High-Temperature Superconducting Bearing*, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp: 2133-2137.
- [6] F.N. Werfel, U. Floegel-Delor, T. Riedel, R. Rothfeld, D. Wippich, B. Goebel, G. Reiner, N. Wehlau (2007), *A Compact HTS 5 kWh/250 kW Flywheel Energy Storage System*, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp: 2138-2141.
- [7] Zhang Kai, Dai Xingjian, Zhang Xiaozhang (2010), *Dynamic Analysis and Control of an Energy Storage Flywheel Rotor with Active Magnetic Bearings*, 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation.
- [8] Alex Kyriakopoulos, Dara O'Sullivan, John G. Hayes, James Griffiths and Michael G. Egan (2007), *Kinetic Energy Storage for High Reliability Power Supply Back-up*, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, pp: 1158-1163.
- [9] Juan Dixon (2010), *Energy storage for electric vehicles*, Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on 2010, pp: 20-26.
- [10] Kuo-Chi, Jihua Gou, Chan Ham, Helkin S., Young Hoon Joo (2010), *Flywheel energy storage system with functionally gradient nanocomposite rotor*, 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp: 611-613.
- [11] L. Bakay, M. Dubois, P. Viarouge, J. Ruel (2010), *Losses in hybrid and active magnetic bearings applied to Long Term Flywheel Energy Storage*, 2010 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), pp: 1-6.
- [12] M. Subkhan, M. Komori (2011), *New Concept for Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB*, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp: 1485-1488.

- [13] Adrien Schouleur, Julien Sapin, Virginie Kluyskens, Francis Labrique, Bruno Dehez (2007), *Study and control of a magnetic bearing for flywheel energy storage system*, POWERENG 2007, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp: 134-139.
- [14] Alan Ruddell (2003), *Storage Technology Report: WP-ST6 Flywheel*, Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies (INVESTIRE - Network).
- [15] José R. Rodríguez, Juan W. Dixon, José R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezana (2005), *PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art*, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 52, No. 1, pp: 5-22.
- [16] R. Peña-Alzola, R. Sebastián, J. Quesada, A. Colmenar (2011), *Review of Flywheel based Energy Storage Systems*, 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp: 1-6.
- [17] Melissa M. Reading (2004), *Flywheel Energy Storage System Consultant Report*, AFS Trinity Power Corporation, California.
- [18] A. Florescu, O. Stocklosa, M. Teodorescu, C. Radoi, D.A. Stoichescu, S. Rosu (2010), *The advantages, limitations and disadvantages of Z-source inverter*, 2010 International Semiconductor Conference (CAS), Vol. 2, pp: 483-486
- [19] Qin Lei, Shuitao Yang, Fang Zheng Peng, Ryosuke Inoshita (2009), *Three Phase Current-Fed Z-Source PWM Rectifier*, 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- [20] Fang Zheng Peng (2003), *Z-Source Inverter*, 2003 IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 2, No. 2, pp: 504-510.
- [21] Sergio Vazquez, Srdjan Lukic, Eduardo Galvan, Leopoldo G. Franquelo, Juan M. Carrasco, Jose I. Leon (2011), *Recent Advances on Energy Storage System*, 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp: 4636-4640.
- [22] Bin Wu (2006), *High-Power Converters and AC Drives*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- [23] M.A. Guerrero, E. Romero, F. Barrero, M. I. Milanés, E. González (2009), *Overview of medium scale energy storage systems*, Compatibility and Power Electronics, 2009, pp: 93-100.
- [24] Thomas A. Lipo (2007), *Introduction to AC Machine Design*, Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin.
- [25] G. O. Suvire, P. E. Mercado, L. J. Ontiveros (2010), *Comparative analysis of energy storage technologies to compensate wind power short-term fluctuations*, 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), pp: 522-528.
- [26] Sergio Vazquez, Srdjan M. Lukic, Eduardo Galvan, Leopoldo G. Franquelo, Juan M. Carrasco (2010), *Energy Storage Systems For Transport And Grid Application*, 2010 IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 12, pp: 3881-3895.

- [27] Sergio Vazquez, Srdjan M. Lukic, Eduardo Galvan, Leopoldo G. Franquelo, Juan M. Carrasco (2010), *Kinetic Energy Storage for High Reliability Power Supply Back-up*, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, pp: 1158-1163.
- [28] Hak-in Lee, Ki-hyun Ji, Eun-Ju Yoo, Young-Woo Park, Myounggyu D. Noh (2009), *Design of a micro flywheel energy storage system including power converter*, TENCON 2009, pp: 1-6.
- [29] Jung-wan Kim, Seong-yeol Yoo, Yong-chaee Bae, Myounggyu D. Noh (2009), *Optimal design of magnetically-levitated flywheel energy storage system considering system stability*, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, pp: 4401-4406.
- [30] Matthew L. Lazarewicz, Alex Rojas (2004), *Grid frequency regulation by recycling electrical energy in flywheels*, 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, pp: 2038-2042.
- [31] Beacon Power (2009), *Frequency Regulation and Flywheels fact sheet*, Report and papers (<http://beaconpower.com>).
- [32] Beacon Power (consultato 08/03/2012), *Beacon Power website* (<http://beaconpower.com>).
- [33] Y.V. Makarov (2008), *Assessing the Value of Regulation Resources Based on Their Time Response Characteristics*, Pacific Northwest National Laboratory, PNNL - 17632.
- [34] Chet Lyons (2009), *California Energy Commission Energy Storage Workshop*, California Energy Commission website (<http://www.energy.ca.gov>).
- [35] John C. Thesken, Cheryl L. Bowman, Steven M. Arnold (2003), *Time-Dependent Material Data Essential for the Durability Analysis of Composite Flywheels Provided by Compressive Experiments*, NASA website (<http://www.grc.nasa.gov>).
- [36] G. Zanei, E. Cevenini, H. Ruff, O. Ulibas (2007), *Integrated systems for UPS: New solutions in the power quality chain*, 29th International Telecommunications Energy Conference, 2007, pp: 582-586.
- [37] Angelo Baghini (2008), *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- [38] POWERTHRU (consultato 09/03/2012), *POWERTHRU website* (<http://www.power-thru.com>).
- [39] POWERTHRU (ex Pentadyne) (consultato 09/03/2012), <http://www.railway-technology.com/contractors/electrification/pentadyne/>, <http://www.railway-technology.com>.
- [40] R. Hebner, J. Beno, A. Walls (2002), *Flywheel batteries come around again*, IEEE Spectrum, Vol. 39, No. 4, pp: 46-51.
- [41] Porsche (consultato 09/03/2012), *Porsche website* (<http://www.porsche.com>).
- [42] Ralph H. Jansen, Kerry L. McLallin (2005), *G2 Flywheel Module Operated at 41000 rpm*, NASA website (<http://www.grc.nasa.gov>).

- [43] Thomas B. Miller (2000), *Nickel-Hydrogen Battery Cell Life Test Program Update for the International Space Station*, NASA.
- [44] Rex A. Delventhal (2002), *Flywheel Energy Storage System Designed for the International Space Station*, NASA website (<http://www.grc.nasa.gov>).
- [45] Carolyn Carter Snare (2003), [http://spaceresearch.nasa.gov/general\\_info/flywheel\\_lite.html](http://spaceresearch.nasa.gov/general_info/flywheel_lite.html), SpaceResearch Editorial Board, NASA.