

**Università degli Studi di Padova**

Laurea Magistrale in  
Ingegneria Elettronica

## **Accumulatori flywheel ad alta velocità**

**Laureando: Zogno Nicolò**

**Relatore: Prof. Tenti Paolo**

11 Marzo 2013 – A.A. 2012/2013

## Indice

### Introduzione

#### Generalità sui sistemi flywheel

- 1.1 - Concetto accumulo cinetico
- 1.2 - Caratteristiche
- 1.3 - Impieghi

#### Teoria generale della levitazione magnetica

- 2.1 - Generalità sulla levitazione
- 2.2 - Teorema Earnshaw
- 2.3 - Materiali diamagnetici e levitazione

#### Cuscinetti magnetici

- 3.1 - Introduzione
  - 3.1.1 *Classificazione*
  - 3.1.2 *Figure di merito*
- 3.2 - Cuscinetti basati su ferromagneti
  - 3.2.1 *PMB, cuscinetti a magneti permanenti*
  - 3.2.2 *AMB, cuscinetti magnetici attivi*
- 3.3 - Cuscinetti a superconduttori
  - 3.3.1 *Superconduttori: proprietà*
  - 3.3.2 *Materiali superconduttori*
  - 3.3.3 *Struttura cuscinetti*
  - 3.3.4 *Sul problema della caduta del rotore*
  - 3.3.5 *Sul problema della perdita di velocità*
- 3.4 - Cuscinetti elettrodinamici
  - 3.4.1 *Principio di funzionamento*
  - 3.4.2 *Il problema delle perdite*
  - 3.4.3 *Implementazione dei cuscinetti*

#### Sistemi flywheel

- 4.1 - Introduzione
- 4.2 - Materiali
- 4.3 - Accumulatori
  - 4.3.1 *Soluzione ibrida SMB,PMB*
  - 4.3.2 *Soluzioni con design integrato*
- 4.4 - Applicazioni
  - 4.4.1 *Power quality*
  - 4.4.2 *Trasporti*
  - 4.4.3 *Industria aerospaziale*

#### Conclusioni

#### Bibliografia

## **Introduzione**

Lo scopo di questo documento è quello di offrire una visione più chiara sul tema degli accumulatori cinetici a volano, approfondendo il loro funzionamento sotto il profilo tecnico, ma senza mai perdere di vista le implicazioni commerciali.

Nonostante questi prodotti non costituiscano di per sé una tecnologia innovativa, l'interesse nei loro confronti ha subito di recente una forte rivalutazione.

Questo è da attribuirsi al miglioramento coincidente di tre fattori tecnologici distinti: lo sviluppo dei cuscinetti a levitazione, la produzione di materiali compositi particolarmente resistenti e leggeri, i progressi dell'elettronica di potenza.

Come si vedrà nel corso della trattazione, questi progressi combinati hanno aperto nuovi orizzonti per gli accumulatori a volano, consentendo di raggiungere livelli di prestazioni ed efficienza molto elevati, e rendendoli dunque estremamente attraenti in numerose applicazioni relative al tema dell'energy storage.

Nel presente studio sono state considerate le principali pubblicazioni accademiche internazionali sull'argomento, a partire circa dall'anno 2001, allo scopo di fornire una panoramica completa sullo stato dell'arte, cercando di capire quale sia il terreno comune tra le varie applicazioni coinvolte e quali siano le motivazioni tipiche che spingono ad utilizzare sistemi di accumulo energetico di tipo flywheel.

È stato trattato con particolare dettaglio il tema dei cuscinetti magnetici, essendo la ragione principale del successo di questi prodotti: anche qui, ricorrendo ad un'analisi ad ampio spettro della letteratura scientifica, si sono valutati pro e contro di ciascuna famiglia di cuscinetti, sottolineando quali siano gli obiettivi che deve soddisfare il progettista, e riportando le difficoltà tipiche che sono emerse nei vari studi considerati.

## 1 - Generalità sui sistemi flywheel

### 1.1 – Concetto di accumulo cinetico

Gli accumulatori di energia a volano si basano su un principio di funzionamento concettualmente semplice: l'idea di base, infatti, è quella di un sistema in grado di immagazzinare energia cinetica, attraverso un elemento posto in rapida rotazione.

Dal punto di vista funzionale, questi dispositivi utilizzano un volano che, se posto in rotazione in condizione ideale di dissipazione nulla, permette di conservare per un tempo indefinito una quantità di energia pari alla propria energia cinetica.

Tra questo elemento rotante e la rete elettrica, viene posta un'unità bidirezionale che funziona in un verso da motore e nell'altro da generatore, permettendo dunque la conversione tra le due forme di energia (elettrica e cinetica).

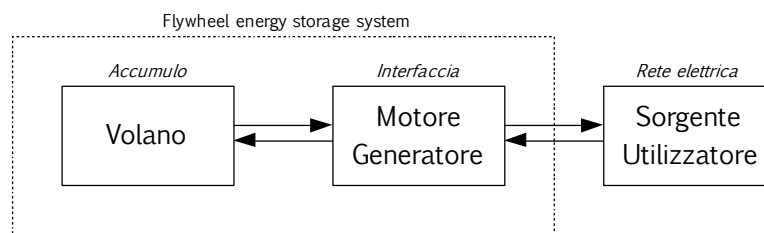


Figura 1 – Schema a blocchi di un sistema FESS

Ipoteticamente, quindi, un sistema di questo tipo consente di accumulare un quantitativo massimo di energia cinetica pari a:

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

dove  $\omega$  è la velocità angolare di rotazione, mentre  $I$  è il momento d'inerzia del volano, il cui valore è dipendente dalla geometria dell'oggetto, nonché dalla sua massa. La massima energia accumulabile è dunque proporzionale a:

- Velocità di rotazione del volano,
- Diametro del volano,
- Massa del volano.

Il fattore su cui si punta maggiormente è comunque il primo, ovvero l'alta velocità di rotazione: questo perché, come visibile dall'espressione precedente, l'energia accumulata cresce proporzionalmente al suo quadrato, mentre rispetto alla massa del volano la crescita è solo lineare. D'altro canto, in quanto a diametro del volano, è preferibile mantenerlo di dimensioni contenute: il binomio velocità angolare elevata e diametro elevato darebbe luogo infatti a velocità periferiche importanti, e conseguentemente a stress meccanici che potrebbero indurre rotture nel volano.

L'energia massima accumulabile sopra citata è naturalmente un valore puramente teorico, soggetto alle limitazioni delle non idealità introdotte sia dal sistema di conversione, sia dalle dissipazioni presenti a livello meccanico e non completamente eliminabili.

La componente che riveste maggiore importanza ai fini di ridurre le dissipazioni è sicuramente il sistema di sospensione del volano, vale a dire i cuscinetti: nelle ipotetiche condizioni in cui il volano ruotasse nel vuoto completo e su cuscinetti perfetti, ovvero privi di attrito, si potrebbe affermare che una volta raggiunta la massima velocità di rotazione, il

volano continuerebbe a ruotare indefinitamente senza mai estinguersi e mantenendo quindi l'accumulatore cinetico carico.

Questo scenario è chiaramente solo ideale, ma permette di evidenziare il ruolo cruciale che rivestono i cuscinetti nel determinare l'efficienza del sistema complessivo. Per questo motivo, gli sforzi di ricerca in ambito flywheel energy storage si concentrano in buona parte su queste componenti.

Nella presente tesi ci si concentrerà in particolare modo sui cuscinetti a tecnologia magnetica, che rappresentano la soluzione più attraente in ambito flywheel storage, dato che consentono una eliminazione quasi totale delle dissipazioni per attrito, e dunque un funzionamento estremamente efficiente e vicino all'idealità: con le tecnologie attualmente disponibili, si è riusciti ad abbassare le perdite fino a raggiungere valori di efficienza molto prossimi all'unità.

Va comunque precisato che la crescita dell'interesse verso questo tipo di accumulatori è da attribuirsi non soltanto al progresso dei cuscinetti magnetici, ma anche a quello dell'elettronica di potenza: infatti, se da un lato le caratteristiche fisiche del volano e la sua velocità di punta determinano la quantità massima di energia immagazzinabile, d'altra parte l'insieme del convertitore e dell'elettronica vanno a porre un limite sulla massima potenza erogabile.

Con i più recenti dispositivi IGBT e FET, è possibile operare con potenze molto elevate pur mantenendo ridotte dimensioni del blocco elettronico.

Lo stato dell'arte dei convertitori di potenza non rientra tuttavia negli scopi di questo documento.

Un ulteriore apporto, determinante per la diffusione degli accumulatori cinetici, è dato dalle scoperte della scienza dei materiali: i materiali compositi di ultima generazione, infatti, hanno permesso di realizzare volani in grado di sopportare elevate sollecitazioni meccaniche, che si vengono necessariamente a creare in presenza delle forti accelerazioni e decelerazioni tipiche di questi sistemi.

## 1.2 – Caratteristiche

Prima di iniziare una trattazione dettagliata di questi dispositivi, è utile inquadrarne le caratteristiche salienti, per avere un'idea più chiara di quali siano gli ambiti applicativi nei quali si prestano ad essere inseriti efficacemente.

I vantaggi più apprezzati di questi dispositivi si possono così riassumere:

- Elevata densità di potenza
- Basso degrado nel tempo
- Supporto di cariche e scariche veloci
- Stato di carica ben determinabile
- Scalabilità
- Impatto ambientale

Se effettuiamo un confronto con sistemi di accumulo tradizionali, in particolar modo le batterie elettrochimiche, la superiorità specifica delle caratteristiche sopraelencate risulta subito chiara.

Prima fra tutte le figure di merito è la *densità di potenza* raggiungibile, vero punto forte degli accumulatori cinetici: sono in grado di erogare potenze nell'ordine di diversi kilowatt per kg di massa.

I sistemi flywheel sono caratterizzati poi da un *degrado nel tempo quasi trascurabile*, fatto particolarmente apprezzato dato che permette di ridurre drasticamente interventi di manutenzione, che richiederebbero lo smontaggio completo degli accumulatori, con evidente dispendio economico e di tempo.

Si tratta di un vantaggio molto forte se paragonati alle tradizionali batterie elettrochimiche, le quali, indipendentemente dalla composizione, hanno una vita limitata e vanno necessariamente sostituite a intervalli periodici.

L'unico fattore che potrebbe pregiudicare la durata nel tempo degli accumulatori cinetici è dato dall'usura per sfregamento meccanico del volano, essendo questo in costante rotazione: in questo senso la durata dipende in modo critico dai cuscinetti.

D'altro canto, il trend tecnologico sta privilegiando sempre più i cuscinetti a levitazione magnetica, con i quali tali sfregamenti verranno praticamente eliminati, e con essi i problemi di usura meccanica ad essi associati.

Inoltre, gli accumulatori cinetici possono subire decine di migliaia di *cicli di carica e scarica* senza risentirne a livello prestazionale, mentre come è noto il numero di cicli di utilizzo rappresenta una delle specifiche più limitanti delle celle elettrochimiche classiche.

Tali cariche e scariche possono essere anche molto rapide, e così pure di elevata intensità, dato che l'accumulazione avviene per via meccanica ed è dunque più robusta a fronte di forti sollecitazioni: l'unico eventuale collo di bottiglia in questo senso è costituito dalle specifiche proprie dell'elettronica di potenza che interfaccia l'accumulatore cinetico con la rete elettrica.

Anche dal punto di vista del monitoraggio dello stato di carica gli accumulatori a volano risultano molto versatili: in qualsiasi momento si può effettuare una rilevazione della capacità residua con grande precisione, semplicemente misurando la velocità angolare di rotazione del volano; il tipico problema del livello di carica sovra o sottostimato non è dunque riscontrabile con questa tecnologia.

Volendo considerare le conseguenze ambientali dovute ai vari tipi di accumulatori, i sistemi flywheel rientrano nella categoria a basso impatto ecologico, essendo privi di materiali altamente inquinanti.

Nelle batterie elettrochimiche, invece, questo è un problema rilevante, dato che contengono sostanze fortemente inquinanti che per di più vanno periodicamente smaltite, per il tipico degrado che caratterizza questa categoria di accumulatori.

I sistemi flywheel non sono tuttavia esenti da alcuni svantaggi, che restringono il loro campo di utilizzo vincolandoli a settori ben precisi. Tipicamente sono:

- Ridotta autonomia
- Costo iniziale di fabbricazione
- Rottura potenzialmente distruttiva
- Effetto giroscopico

In primo luogo, la loro *ridotta autonomia* li rende inadatti qualora il carico richieda una fornitura di energia prolungata nel tempo: per la loro struttura, si rivelano più adatti a sopperire assenze di energia per brevi lassi di tempo (in termini pratici, da qualche decina di secondi fino a circa un'ora).

La fabbricazione ed installazione di un accumulatore flywheel è spesso un'operazione onerosa dal punto di vista *economico*, perciò il loro impiego è vantaggioso soltanto nei sistemi in cui si preveda uno sfruttamento a lungo termine, permettendo dunque un'ammortizzazione del costo iniziale.

Nel breve periodo, infatti, non si è in grado di sfruttare la reale convenienza di questi dispositivi, che si esprime invece a lungo termine per il loro bassissimo costo di manutenzione e per il ridotto degrado di prestazioni nel tempo.

Una questione che interessa soprattutto i volani più grandi è quella relativa alla *sicurezza*: trattandosi di oggetti creati appositamente per accumulare quanta più energetica possibile, si può intuire l'effetto distruttivo che si potrebbe verificare in caso di cedimento meccanico di qualche componente.

Proprio per questo motivo è necessario effettuare test di sicurezza, e prevedere sistemi di contenimento di emergenza, che hanno come effetto collaterale quella di aumentare notevolmente le dimensioni del dispositivo. Anche per la realizzazione dell'involucro di contenimento assume importanza critica il materiale utilizzato.

Un'ulteriore complicazione si può verificare quando tali accumulatori vengano installati, anziché in una postazione fissa, in una piattaforma in movimento.

Nel caso in cui il sistema complessivo sia soggetto a rotazioni intorno ad un asse non coincidente con quello del rotore del volano, vengono ad originarsi forze indesiderate di tipo giroscopico, che contribuiscono ad abbassare l'efficienza dell'accumulatore, e dunque rendono necessarie una serie di contromisure allo scopo di contrastarne l'insorgere.

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

Figura 2 - Tipologie di accumulatori a confronto [24]

Come visibile nella precedente tabella, si è soliti distinguere i sistemi di flywheel energy storage in due grandi gruppi:

*Low-speed FESS*. Caratterizzati da una velocità di rotazione del volano che può raggiungere i 10.000 rpm, a seconda delle dimensioni dell'unità.

Sono sistemi di immagazzinamento per applicazioni a prestazioni ridotte: garantiscono un costo molto contenuto sia in fase di installazione che in fase di manutenzione, poiché utilizzano materiali e tecnologie convenzionali; i cuscinetti sono tipicamente a sfere, mentre il volano rotore è in acciaio. Per questo motivo si tratta di dispositivi ingombranti, pesanti e relativamente inefficienti, con un limite di velocità di rotazione dettato principalmente dagli attriti presenti nei cuscinetti meccanici. Tuttavia, sono ancora prodotti interessanti in quelle applicazioni dove si richieda l'immagazzinamento di energia per lunghi periodi, in virtù dell'elevata inerzia che caratterizza il rotore.

*High-speed FESS*. Questi dispositivi funzionano con velocità di rotazione estremamente elevate, che possono toccare i 100.000 rpm.

Rappresentano lo stato dell'arte di questa tecnologia: si distinguono per l'impiego dei cuscinetti magnetici precedentemente trattati, così come di volani in materiale composito, allo scopo di sopportare le elevate forze centrifughe per le quali sono progettati. L'impiego dei cuscinetti a levitazione consente di minimizzare le perdite, mentre l'elevata velocità di rotazione consente l'immagazzinamento di una notevole quantità di energia, secondo (1).

Nel seguito, ci si concentrerà nei sistemi flywheel di questo tipo, analizzando gli aspetti tecnologici ad essi collegati, in particolar modo i cuscinetti a levitazione magnetica.

	Low speed FESS	High speed FESS
<b>Materiale volano</b>	Acciaio	Compositi
<b>Atmosfera interna</b>	Vuoto parziale o gas leggeri	Vuoto assoluto
<b>Peso involucro</b>	2 × volano	1/2 × volano
<b>Sospensione</b>	Meccanica o mista	Magnetica
<b>Utilizzi</b>	Power quality	Trasporti, industria aerospaziale
<b>Fattore costo</b>	1	5

Tabella 1 - Confronto tipologie FESS (basato su [22])



### **1.3 – Impieghi**

A causa della loro struttura e delle loro proprietà salienti, gli accumulatori cinetici non si prestano particolarmente per tutte quelle applicazioni dove occorrono consistenti riserve energetiche in grado di tamponare lunghi lassi di tempo.

D'altro canto, venono impiegati con successo dovunque serva un buffer in grado di compensare brevi ma intense variazioni di potenza, e soprattutto di intervenire con tempi di risposta ridotti.

Il settore che accoglie meglio questi dispositivi è probabilmente quello della *power quality*, dove ci si occupa di mantenere l'erogazione di energia elettrica conforme a delle specifiche prestabilite.

Questa infatti può subire diverse distorsioni come variazioni di tensione, frequenza, potenza. Problemi di questo tipo si originano molto spesso per il fatto che esiste un disequilibrio tra la rete di distribuzione e l'assorbimento del carico, che segue un andamento aleatorio.

L'impiego di batterie a volano costituisce una forma molto comoda per limitare questi inconvenienti: queste sono infatti in grado di compensare importanti picchi di potenza, indipendentemente che siano essi di assorbimento o di produzione.

A favore delle batterie a volano c'è inoltre il tempo di risposta molto basso, che permette di adattare velocemente l'erogazione al carico istantaneo che si presenta.

In maniera molto simile i sistemi flywheel vengono adoperati quando ad essere incostante è la fonte anziché il carico, ad esempio nello sfruttamento delle energie rinnovabili. Dato che spesso le fonti naturali offrono energia con andamento irregolare (e.g. fotovoltaico, eolico, idroelettrico..), si possono utilizzare batterie a volano come tamponi per livellare queste differenze, molto similmente a quanto avviene nelle applicazioni di power quality.

La diffusione dei sistemi flywheel si sta dirigendo anche verso il settore UPS, essendo insieme alle precedenti una delle applicazioni più naturali e calzanti per questa tipologia di accumulatori: considerando che la maggior parte delle interruzioni di energia a cui si deve far fronte sono spesso di qualche secondo, è spontaneo considerare i sistemi flywheel per compensarle, dal momento che sono perfettamente idonei a sopportare innumerevoli cicli di carica e scarica senza degradarsi. La vantaggiosità rispetto alle batterie elettrochimiche in quest'ambito è subito evidente: queste ultime infatti, sono soggette ad usura nel tempo qualora subiscano molteplici cicli di utilizzo, senza contare che sono molto sensibili alla modalità di carica e scarica. Una buona soluzione è quella di complementare una batteria chimica con una a volano, in modo che quest'ultima faccia fronte alle brevi discontinuità di energia elettrica, e solo nel caso in cui queste si prolunghino si passa alla copertura della batteria chimica: in questa maniera le qualità di ciascuna batteria vengono sfruttate al meglio.

Altro settore molto promettente per le batterie ad accumulo cinetico è quello dei *trasporti*, dato che le loro caratteristiche si prestano particolarmente bene per il recupero dell'energia in frenata, sia essa di un'automobile o di un treno.

Anche qui, come in tutte le applicazioni di eccellenza, le caratteristiche richieste sono: cicli di carica/scarica irregolari e molto rapidi, elevati picchi di potenza sia generata che assorbita e poca manutenzione nel tempo.

## 2 - Teoria generale della levitazione magnetica

### 2.1 – Generalità sulla levitazione

Anche se da un punto di vista intuitivo l'idea di un corpo in levitazione è chiara, è opportuno inquadrare con più precisione il fenomeno descritto da questo termine.

Contrariamente a quello che si può pensare, la levitazione non identifica il semplice distaccamento di un corpo dal suolo contro la forza di gravità: questa è solamente una condizione necessaria.

A rigore, il concetto di levitazione si distingue da altre forme di sospensione a causa delle specifiche forze in gioco: si parlerà dunque di levitazione solo in presenza di forze elettriche oppure magnetiche, mentre per altre forme di sospensione il sollevamento può essere provocato anche dalla pressione dell'aria.

Per poter parlare realmente di levitazione, è necessario aggiungervi la nozione di stabilità: un corpo è considerato in condizione di levitazione stabile qualora riesca a mantenersi sospeso in una posizione fissa annullando l'effetto di eventuali piccole perturbazioni della posizione di equilibrio.

Il tema della stabilità è stato affrontato in forma rigorosa nel 1839 da Samuel Earnshaw, dimostrando l'omonimo teorema.

Bisogna puntualizzare che il concetto di levitazione stabile applicato ad un corpo reale presenta complessità aggiuntive rispetto a quanto non si faccia in uno studio matematico ideale.

La prima distinzione è dovuta al fatto che non è possibile limitarsi a considerare il centro di massa del corpo da levitare: in un oggetto reale, e dunque non puntiforme, devono essere tenute in considerazione anche la geometria e la distribuzione di massa dell'oggetto, poiché l'angolazione di quest'ultimo potrebbe giocare un ruolo fondamentale. Anche le proprietà meccaniche, quali la rigidità, sono variabili da includere nello studio.

Una seconda distinzione è dovuta alla difficoltà di definire quale sia il potenziale da minimizzare: nel classico esempio della sfera appoggiata sulla sommità di un pendio o sul fondo di una concavità, il potenziale cercato si riduce a quello gravitazionale.

Tuttavia, nel caso in cui intervengano forze magnetiche ed elettriche, va considerato che le sorgenti di queste ultime sono sensibili ai cambi di posizione ed orientamento del corpo levitato: non è possibile dunque assumere la presenza di sorgenti fisse.

### 2.2 – Teorema di Earnshaw

Per capire meglio il fenomeno, bisogna ricorrere al teorema di Earnshaw: non si tratta di un teorema specifico per i sistemi a levitazione magnetica, bensì riguarda in generale il concetto di equilibrio stabile. Ad ogni modo, le conclusioni a cui conduce dal punto di vista analitico sono facilmente particolarizzabili al caso della levitazione magnetica di nostro interesse.

In sintesi, il teorema afferma che *un sistema di particelle governate da forze statiche di tipo quadratico inverso ( $1/r^2$ ) non può trovarsi in equilibrio stabile nello spazio libero.*

Buona parte delle forze con cui si è soliti trattare appartengono a questa categoria, comprese la forza elettrostatica, magnetostatica e la forza di gravità.

Ad un primo impatto sembrerebbe dunque impossibile levitare stabilmente un corpo utilizzando forze magnetostatiche, e senza apporti ulteriori di energia.

Consideriamo appunto come esempio un sistema in cui si trovino solamente sorgenti magnetiche fissate nello spazio e nel tempo.

Per un dipolo magnetico governato dalle suddette forze, il potenziale viene definito come il prodotto scalare tra il vettore magnetizzazione e il vettore del campo magnetico in cui si trova immerso:

$$U = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} \quad \text{con} \quad \mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z) \quad \mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z) \quad (2)$$

Le posizioni di equilibrio, alle quali il dipolo non è soggetto all'azione di forze magnetiche, si ottengono imponendo:

$$\text{Equilibrio} \Leftrightarrow \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Tenendo in considerazione, al momento di derivare, che trattandosi di forze magnetostatiche il vettore magnetizzazione è costante nelle tre componenti.

Fissando questa prima condizione, otteniamo dunque le coordinate dei punti di equilibrio, siano essi massimi (instabili) oppure minimi (stabili).

La stabilità è garantita invece qualora il laplaciano risulti positivo, vale a dire:

$$\text{Stabilità} \Leftrightarrow \nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} > 0 \quad (4)$$

Dalla precedente espressione si evince che risulta impossibile ottenere la stabilità completa nelle condizioni prefissate: al più possono risultare stabili due direzioni, ma la terza è necessariamente instabile. Graficamente, si ottiene una sella:

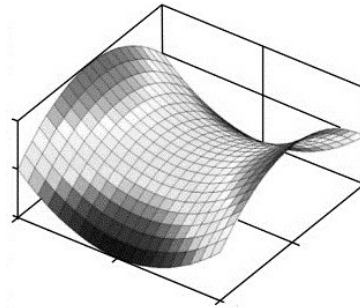


Figura 3 - Potenziale a sella

Ai fini pratici, il teorema di Earnshaw rende irrealizzabili alcune soluzioni, che invece ad un approccio puramente intuitivo sembrerebbero poter generare una levitazione stabile.

Si consideri a titolo di esempio la levitazione basata su magneti permanenti, che risulta sempre instabile in almeno una direzione.

Per poter dunque realizzare una configurazione stabile, è necessario operare in condizioni che non rientrino tra le ipotesi del teorema di Earnshaw, introducendo qualche elemento che le violi. I modi più comuni di aggirare le ipotesi fissate sono:

- Impiegare campi non stazionari
- Aggiungere controlli attivi a retroazione
- Introdurre materiali diamagnetici

Una prima scappatoia è quella di fuoriuscire dall'ipotesi precedentemente fatta di trovarsi sotto l'effetto di campi statici.

Esistono diversi modi per raggiungere questo scopo: il più logico e spontaneo è quello di introdurre sorgenti di campo magnetico variabili nel tempo.

Questo fatto è equivalente a porre l'oggetto da levitare in moto relativo rispetto alla sorgente: è il principio alla base del celebre *Levitron*<sup>®</sup>, giocattolo in cui si trovano un primo magnete permanente ad anello fissato su una base, e un secondo ancorato ad una trottola che viene fatta ruotare dall'utente.

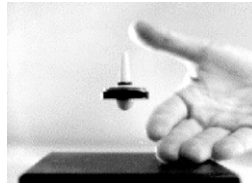


Figura 4 – Il giocattolo *Levitron*<sup>®</sup>

Come si può constatare, tale giocattolo sfugge delle ipotesi del teorema di Earnshaw, il quale precisa che un corpo non può essere levitato stabilmente in una posizione *fissata* dello spazio, mentre qui il corpo si trova in movimento.

La stabilizzazione del rotore in questo dispositivo avviene per mezzo della forza di gravità, abbinata alle forze giroscopiche che si instaurano durante la rotazione innescata dall'utente.

Un sistema di questo tipo tuttavia non trova alcun impiego pratico se non a scopo dimostrativo: la levitazione infatti può avvenire solo all'interno di un ristretto range di velocità di rotazione (tipicamente 20 – 30 rpm). Nel caso in cui questa scenda troppo, le forze giroscopiche non sono sufficienti a stabilizzare il rotore; all'opposto, quando la velocità è eccessiva, il rotore diventa troppo rigido e vengono a mancare le piccole oscillazioni necessarie per bilanciarlo.

Nella realtà, il campo magnetico variabile richiesto si può generare impiegando un controllo di stabilità attivo a retroazione, come avviene nei cuscinetti attivi.

Seppur il sistema non sia intrinsecamente stabile, con un accorgimento di questo tipo è possibile forzare l'oggetto a mantenersi in una posizione di equilibrio stabile mediante continui aggiustamenti del campo magnetico.

Un semplice sistema di questo tipo è riportato in [4] e così formato: un solenoide percorso da corrente produce il campo magnetico, secondo il feedback ricevuto da un sensore ad effetto Hall, che controlla la posizione di un corpo dotato di un piccolo magnete al neodimio, come riportato in figura.

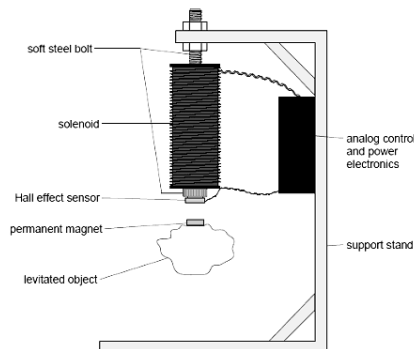


Figura 5 - Semplice levitatore magnetico basato su controllo a feedback [4]

A seconda che il sensore rilevi un avvicinamento o un allontanamento del magnete levitato, viene rispettivamente attenuato od intensificato il campo magnetico prodotto dal solenoide.

Il primo svantaggio di questa soluzione è la complessità aggiunta dovuta alla progettazione di un sistema di controllo dedicato; in secondo luogo, un sistema di questo tipo richiede un continuo apporto energetico per monitorare e correggere la posizione del corpo.

Nell'ottica di realizzare cuscinetti a levitazione per sistemi flywheel, la stabilità può essere ottenuta anche attraverso una terza scappatoia, ovvero quella che prevede l'introduzione nel sistema di materiali diamagnetici.

### **2.3 – Materiali diamagnetici e levitazione**

Quando si introducono questi materiali nel sistema levitante, è necessario fare un passo indietro e rivedere la forma che assume il potenziale in gioco.

I diamagneti, quando immersi in un campo magnetico, si comportano in maniera opposta rispetto a quanto non facciano i materiali ferromagnetici e paramagnetici: questi ultimi vengono infatti attratti verso il massimo del campo magnetico, mentre i diamagneti tendono a muoversi verso il minimo. Dal momento che il massimo di un campo magnetico è collocato nella sorgente che lo genera, si conclude che la levitazione magnetica per i ferromagneti e paramagneti nello spazio libero non è possibile.

Di contro, può esistere un minimo locale del campo magnetico nello spazio libero, fatto che rende i materiali diamagnetici gli unici candidati ad essere levitati magneticamente.

Un comportamento analogo, ma in logica inversa, avviene per i materiali dielettrici immersi in un campo elettrico: essendo attratti verso la sorgente del campo stesso, non possono essere levitati elettricamente.

Come provato nel paragrafo precedente, il campo magnetico non può presentare contemporaneamente un minimo locale per ciascuna componente vettoriale.

Tuttavia, poco dopo la pubblicazione del teorema di Earnshaw, Lord Kelvin dimostrò [25] che per i materiali diamagnetici l'energia potenziale magnetica dipende dal modulo quadro del campo magnetico,  $B^2 = \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}$ , e dunque il suo Laplaciano può essere positivo, ovvero:

$$\nabla^2 B^2 \geq 0. \quad (5)$$

L'energia potenziale che vogliamo minimizzare, dunque, non dipende più dalle singole componenti del campo magnetico  $\mathbf{B}$ , bensì semplicemente dal modulo  $B$ , scalare. Di conseguenza, mentre nella trattazione originale del teorema di Earnshaw gli eventuali punti di equilibrio potevano essere al più selle (parzialmente stabili), con l'introduzione dei diamagneti l'energia potenziale magnetica si riduce ad una funzione scalare dell'intensità di campo, e di conseguenza possono esistere minimi locali, ovvero posizioni nello spazio libero in cui il diamagnete riesce ad essere levitato in modo stabile.

Studi successivi effettuati da Braunbek [26] sul problema della levitazione magnetostatica hanno confermato che questa è fattibile solo per materiali aventi permeabilità magnetica relativa  $\mu_r < 1$ , ovvero i diamagneti.

In questa categoria rientrano buona parte dei materiali che percepiamo intuitivamente come non magnetici, ad esempio acqua e sostanze organiche, le plastiche, alcuni metalli (oro, argento, rame, bismuto, piombo) nonché il carbonio.

Allo scopo di progettare sistemi ad alte prestazioni basati sulla levitazione magnetica, come ad esempio i cuscinetti per accumulatori a volano, la soluzione più performante sono

senza dubbio i materiali superconduttori, che si stanno rivelando tra i migliori candidati per questi impieghi.

I superconduttori, infatti, appartengono a tutti gli effetti alla categoria dei materiali diamagnetici, essendo caratterizzati da una permeabilità magnetica  $\mu_r \approx 0$ , e approssimabili quindi a diamagneti perfetti.

Material	Susceptibility	Permeability	Relative permeability
Vacuum	0	$1.256\ 6371 \times 10^{-6}$ ( $\mu_0$ )	1
Hydrogen	$-2.2 \times 10^{-9}$	$1.256\ 6371 \times 10^{-6}$	1.000 0000
Teflon		$1.2567 \times 10^{-6}$	1.0000
Sapphire	$-2.1 \times 10^{-7}$	$1.256\ 6368 \times 10^{-6}$	0.999 999 76
Copper	$-6.4 \times 10^{-6}$ or $-9.2 \times 10^{-6}$	$1.256\ 6290 \times 10^{-6}$	0.999 994
Water	$-8.0 \times 10^{-6}$	$1.256\ 6270 \times 10^{-6}$	0.999 992
Bismuth	$-1.66 \times 10^{-4}$		0.999 834
Superconductors	-1	0	0

Figura 6 - Proprietà magnetiche di alcuni diamagneti [[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)]

### **3 – Cuscinetti magnetici**

#### **3.1 – Introduzione**

Il termine cuscinetti magnetici raccoglie una classe molto ampia di prodotti, tutti accomunati dal fatto di sfruttare fenomeni magnetici come forma di sospensione; dentro a questa famiglia vengono tuttavia raggruppati prodotti anche molto differenti tra loro, dato che esistono vari modi di sfruttare i campi magnetici per lo scopo desiderato. Concettualmente, i cuscinetti magnetici possono essere considerati una forma più evoluta dei tradizionali cuscinetti meccanici, con i quali condividono le stesse finalità:

- Ridurre l'attrito tra le parti in moto relativo
- Supportare il rotore
- Mantenere in sede il rotore

Ai fini pratici, questi innovativi cuscinetti permettono di ottenere miglioramenti sensibili rispetto ai modelli meccanici tradizionali, poiché offrono:

- Attrito minimo,
- Basso surriscaldamento,
- Poca usura e manutenzione,
- Silenziosità.

##### **3.1.1 - Classificazione**

Si possono suddividere i cuscinetti secondo diverse caratteristiche, come ad esempio il tipo di movimento supportato (lineare o rotatorio) oppure la necessità di una fonte di alimentazione (attivi o passivi).

Complessivamente, il criterio più chiaro per suddividere le tipologie di cuscinetti magnetici è quello basato sulla causa fisica delle forze coinvolte.

Tra i prodotti attualmente disponibili si possono individuare due grandi gruppi: (a) i cuscinetti a forza di riluttanza e (b) i cuscinetti elettrodinamici a forza di Lorentz.

*Riluttanza.* Nel primo gruppo rientrano i cuscinetti a magneti permanenti, quelli attivi e quelli a superconduttori: nei capitoli a seguire verrà analizzato il funzionamento specifico di ciascuno, ma in linea generale il principio fisico di base li accomuna tutti. La loro struttura prevede infatti la presenza di due parti mobili l'una rispetto all'altra (statore e rotore), delle quali una opera da sorgente di campo magnetico, mentre l'altra è formata da un materiale che risponde in diversi modi a tale campo.

La sorgente del campo magnetico può essere costituita da:

- Un avvolgimento percorso da corrente
- Magnet permanenti ferromagnetici
- Magnet permanenti a superconduttore

La parte che risponde a tale sorgente invece è solitamente:

- Un elemento ferromagnetico
- Superconduttori passivi
- Un conduttore normale

Il requisito fondamentale è che ciascuno di questi materiali possieda delle proprietà magnetiche ben precise, per poter dare luogo alle forze che permettono la levitazione di un

elemento rispetto all'altro: nello specifico è necessario che il materiale possieda un'elevata riluttanza magnetica oppure un'elevata permeanza magnetica, a seconda che si tratti di instaurare una levitazione basata su forze repulsive oppure attrattive.

Nel caso di elevata riluttanza, il materiale ha la tendenza a respingere il campo magnetico schermando il proprio interno dal flusso magnetico: tale comportamento prende il nome di *flux-shaping* ed è caratteristico dei materiali diamagnetici.

Nel caso invece di un materiale con elevata permeanza (*i.e.* inverso della riluttanza), la tendenza sarà quella di intrappolare il campo magnetico al suo interno, dando luogo ad un fenomeno detto *flux-pinning*, tipico dei materiali fortemente ferromagnetici.

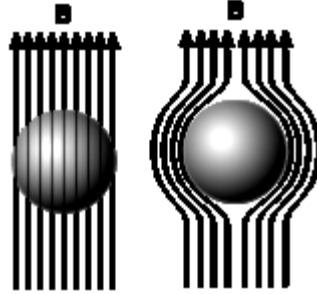


Figura 7 - Flux pinning, flux shaping

*Elettrodinamici.* I cuscinetti elettrodinamici o a forza di Lorentz, pur sfruttando anch'essi un fenomeno magnetico per instaurare la levitazione, sono concepiti con un punto di vista differente: le stesse correnti parassite (eddy currents) che in molti casi rappresentano un fenomeno indesiderato, vengono qui sfruttate per la stabilizzazione del rotore, sulla base del principio di reazione affermato dalla legge di Lenz.

### 3.1.2 – Figure di merito

*Rigidezza magnetica.* La rigidezza di un cuscinetto magnetico (*stiffness*) è un parametro primario per caratterizzare il comportamento dinamico del sistema: quantifica la capacità di compensare eventuali scostamenti del rotore, ovvero di mantenerlo in posizione stabile. Per certi versi, dunque, tramite questo parametro si paragona la risposta meccanica del cuscinetto a quella di una tradizionale molla: effettivamente, la rigidezza magnetica viene quantificata con un parametro dimensionalmente identico alla costante elastica della molla, ed espressa dunque in [N/m].

Matematicamente si definisce come il rapporto tra il carico supportato rispetto allo spostamento provocato: viene qui di seguito derivata analiticamente.

Detto  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  il vettore posizione nello spazio ed  $\mathbf{r}_0$  la posizione alla quale la forza magnetica bilancia la forza di gravità, si può scrivere:

$$F(\mathbf{r}) = F(\mathbf{r}_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_0 (x - x_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_0 (y - y_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_0 (z - z_0) \quad (6)$$

Definita la terna di spostamenti  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z) = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0$  si può dunque scrivere la rigidezza associata a ciascuna direzione come:

$$\kappa_x = - \left. \frac{\partial F(\mathbf{u})}{\partial x} \right|_0 \quad (7)$$

Un valore positivo della precedente rigidezza magnetica esprime l'attitudine del cuscinetto a cancellare l'effetto dello spostamento ripristinando la posizione di equilibrio: si associa dunque un valore positivo alla stabilità nella medesima direzione.



In completa analogia con l'esempio della molla, che presenta appunto costante elastica positiva, il comportamento in risposta ad una compressione oppure ad un'estensione è sempre quello di riportare la stessa allo stato di partenza.

Al contrario, una rigidità negativa corrisponde ad un sistema instabile in quella direzione, essendo  $\partial F/\partial x > 0$ : ciò significa, ad esempio, che al crescere della distanza tra rotore e statore, la forza, anziché diminuire, cresce amplificando questa distanza e allontanando dunque il rotore dalla posizione di equilibrio.

Il concetto di rigidità magnetica è equivalente alla rigidità con cui si caratterizzano i tradizionali cuscinetti meccanici, e in quel caso dipendente da fattori come la viscosità dell'olio lubrificante oppure dalla deformabilità delle sfere in acciaio.

*Smorzamento magnetico.* Questa figura di merito caratterizza il comportamento oscillatorio del sistema in seguito ad una perturbazione della posizione di equilibrio. La forza di smorzamento associata al sistema dipende in maniera lineare dalla velocità dello stesso,  $F_c = -c \cdot dx/dt$ , dove il coefficiente  $c$  è detto appunto smorzamento e assume le dimensioni di  $[N \cdot s/m]$ .

Analogamente a quanto fatto per la rigidità, il paragone meccanico che meglio esprime il concetto di smorzamento è quello di un ammortizzatore: mentre la rigidità esprime la capacità del sistema di reagire ad una perturbazione ripristinando l'equilibrio, lo smorzamento indica se tale ritorno assuma comportamento oscillatorio, e ne quantifica l'entità.

Generalmente, nelle applicazioni dei cuscinetti magnetici e in particolar modo nel campo degli accumulatori a volano, sono preferibili valori più alti di smorzamento, che si traducono nella pratica in una migliore soppressione delle vibrazioni.

In termini generali, si può affermare che il segno della rigidità magnetica fa mutare la levitazione da instabile a stabile, mentre l'aggiunta del termine di smorzamento converte la stabilità semplice in stabilità asintotica.

### **3.2 – Cuscinetti basati su ferromagneti**

Si tratta della più diffusa e consolidata tecnologia di cuscinetti a levitazione magnetica sviluppata: sono basati appunto sull'impiego di materiali ferromagnetici, ovvero aventi permeabilità relativa  $\mu_r \gg 1$ .

Il pregio più apprezzato in sistemi di questo tipo è l'elevata forza massima che permettono di sviluppare, requisito essenziale per trovare impiego in ambito industriale, dove è previsto il supporto di carichi importanti.

Del resto, lo stesso teorema di Earnshaw afferma che i materiali ferromagnetici non permettono di raggiungere una configurazione di levitazione stabile: come discusso al capitolo 2, i ferromagneti sono attratti verso la posizione coincidente alla massima intensità del campo magnetico; essendo questa situata alla sorgente del campo medesimo, la stabilità completa non è quindi ottenibile.

Sostanzialmente questa famiglia di cuscinetti presenta due implementazioni.

#### **3.2.1 - Cuscinetti a magneti permanenti**

La configurazione a magneti permanenti (*permanent magnetic bearings, PMB*) si ottiene accoppiando uno statore ed un rotore realizzati mediante materiali previamente magnetizzati: come noto, infatti, la caratteristica saliente dei ferromagneti è quella di

magnetizzarsi molto intensamente sotto l'azione di un campo esterno, mantenendo poi tale carattere a lungo nel tempo.

Disponendo opportunamente le polarità di tali magneti, è possibile instaurare un insieme di forze che, se bilanciate, permettono di far levitare un elemento rispetto all'altro. Le forze magnetostatiche in gioco vengono comunemente impiegate in configurazione repulsiva, anche se si sono realizzate soluzioni di tipo attrattivo.

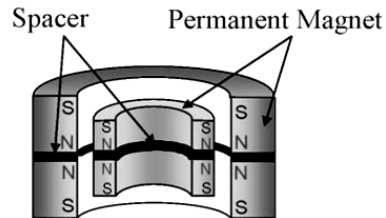


Figura 8 - Cuscinetto PMB in configurazione repulsiva

I cuscinetti PMB sono in assoluto i più semplici da realizzare e da miniaturizzare; oltretutto sono molto economici sia in fase di produzione che in fase di utilizzo, non necessitando alimentazione alcuna: si tratta infatti di cuscinetti *passivi*.

Hanno però un limite non trascurabile in fatto di stabilità: come già accennato, secondo il teorema di Earnshaw non possono essere stabili in tutte e tre le direzioni dello spazio, ma tutt'al più in due: questo fatto chiaramente ne limita l'utilizzo dato che non consentono la levitazione magnetica propriamente detta, vale a dire la sospensione stabile di un corpo nello spazio libero senza nessun contatto fisico.

Questo spiega perché i PMB non vengano normalmente utilizzati singolarmente in applicazioni ad alte prestazioni, se non in configurazione ibrida, complementati ad altre tipologie di cuscinetti, come verrà in seguito discusso.

È da evidenziare comunque come questi cuscinetti restino un'ottima soluzione qualora si richieda un cuscinetto per supportare un carico in una sola direzione.

Dal punto di vista dinamico, i cuscinetti a magneti permanenti hanno prestazioni basse relativamente alle altre tipologie di cuscinetti, essendo caratterizzati da valori inferiori sia della rigidità che dello smorzamento magnetico.

Un altro limite da tenere in considerazione al momento di utilizzare questi dispositivi è dovuto al fatto che la magnetizzazione dei materiali non può essere considerata costante nel tempo: in primo luogo, questi tendono a perdere la loro magnetizzazione per invecchiamento, seppur il processo non sia molto marcato.

Il secondo fattore che aggrava questo fenomeno si ha quando i magneti permanenti vengono posti in configurazione repulsiva, causando una distribuzione non uniforme del campo sulla superficie del magnete e di conseguenza un degrado delle prestazioni.

**PREGI:** semplicità, facilmente miniaturizzabili, economici, passivi

**DIFETTI:** prestazioni ridotte, stabilità parziale

### 3.2.2 - Cuscinetti magnetici attivi

I cuscinetti magnetici attivi (AMB) si possono considerare un perfetto esempio di prodotto meccatronico, poiché consistono in un prodotto puramente meccanico cui viene integrata un'elettronica di controllo allo scopo di migliorarne le prestazioni.

Rappresentano attualmente la soluzione più diffusa, anche se la prospettiva futura è che vengano gradualmente soppiantati dai cuscinetti superconduttori o dai cuscinetti elettrodinamici, la cui tecnologia non è ancora pienamente matura.

In aggiunta ai più semplici PMB, i cuscinetti attivi includono un sistema a feedback negativo per la compensazione delle direzioni instabili, previste dal teorema di Earnshaw nel caso di sistemi a ferromagneti permanenti.

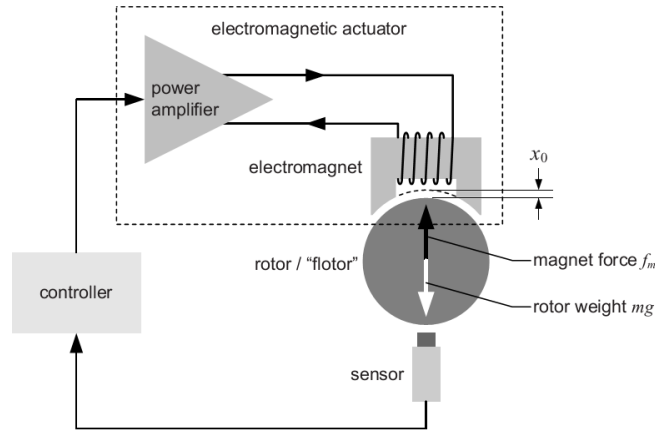


Figura 9 - Schema di principio di un cuscinetto AMB [5]

Un tipico cuscinetto attivo è costituito dalle seguenti parti:

- Rotore in materiale ferromagnetico passivo
- Statore attivo contenente uno o più elettromagneti (funzionanti da sorgenti di campo magnetico variabile)
- Sensori di posizione del rotore
- Elettronica di controllo
- Alimentazione

Nel caso dei più semplici cuscinetti a magneti permanenti, la sorgente del campo magnetico era prefissata e stazionaria, poiché dovuta alla magnetizzazione imposta al materiale stesso. In questa differenza fondamentale di funzionamento sta il motivo principale di successo dei cuscinetti AMB rispetto ai PMB: la risposta dinamica del cuscinetto (rigidità, smorzamento,..) è completamente *controllabile*, nei limiti fisici consentiti dalla tecnologia impiegata. Molto spesso, questo limite coincide con la resistenza del rotore agli stress meccanici cui viene sottoposto per le elevate accelerazioni e decelerazioni, nonché per le velocità di punta.

Prendendo come esempio il parametro della rigidità magnetica, determinante ai fini della stabilità del sistema, è chiaro come i cuscinetti AMB offrano una risposta migliorata rispetto agli analoghi passivi: nel sistema a magneti permanenti, infatti, la rigidità è una proprietà fissa e caratterizzabile a priori.

Al contrario, un cuscinetto attivo dispone di un controllo a retroazione configurabile che permette di programmare una risposta personalizzata agli spostamenti.

In termini numerici, i cuscinetti attivi riescono a rispondere agli spostamenti con una rigidità tipicamente oltre ai  $10^6$  N/m, mentre nella versione passiva questo valore si attesta intorno ai  $10^3$ - $10^4$  N/m, differenza significativa trattandosi di alcuni ordini di grandezza.

Gli svantaggi intrinseci dei cuscinetti AMB sono il costo elevato e la maggiore complessità, dovuti ovviamente all'aggiunta delle componenti per il controllo attivo, quali sensori di scostamento, attuatori elettromagnetici, alimentazione.

Un altro svantaggio legato all'aggiunta di tali componenti è dato dalle maggiori dimensioni del sistema complessivo: tuttavia, in questo senso sono stati fatti molti progressi grazie alla miniaturizzazione di tali componenti, al punto da non costituire più un grosso limite.

In definitiva, è molto probabile che questa tipologia di cuscinetti continuerà ad essere utilizzata in alcuni settori di mercato, limitatamente a dove il fattore costo non costituisca un vincolo primario.

**PREGI:** risposta dinamica, stabilità

**DIFETTI:** costo, dimensioni

### 3.3 – Cuscinetti a superconduttori

#### 3.3.1 - Superconduttori: proprietà

Il fenomeno della superconduttività è molto ampio e meriterebbe una trattazione a sé stante per essere approfondito in forma esaustiva.

Nell'ottica di applicarlo alla produzione di cuscinetti a levitazione, tuttavia, ci si può limitare a mettere in risalto le due proprietà salienti che si utilizzano:

##### *i. Resistenza nulla ad un flusso di corrente stazionario*

La caratteristica primaria di questi materiali è chiaramente quella di comportarsi come conduttori pressochè perfetti, previo verificarsi di opportune circostanze operative. I superconduttori infatti manifestano le loro peculiari proprietà soltanto quando vengono rispettati dei vincoli dati da una terna di temperatura, intensità di campo magnetico e densità di corrente.

Questa condizione viene descritta graficamente da una curva chiusa nello spazio  $(T, B, J)$ , analogamente ai due materiali riportati di esempio in seguito.

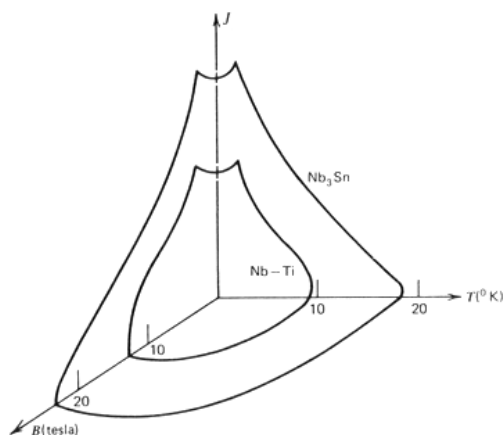


Figura 10 - Esempi di caratteristiche  $(B, J, T)$  [3]

La curva sopra riportata è caratteristica di ciascun materiale superconduttore, in questo caso Nb-Ti e Nb<sub>3</sub>Sn, e delimita il confine tra la zona superconduttiva (interno della curva) e la zona resistiva (esterno), dove il materiale si comporta come un normale conduttore. Ai fini della progettazione di un cuscinetto a superconduttore, sarà dunque necessario assicurarsi che il punto di lavoro del materiale sia sempre nella zona interna.

ii. Effetto Meissner

I materiali superconduttori sono caratterizzati dalla capacità di schermare il loro interno dal flusso di campo magnetico: anche questa proprietà si verifica soltanto sotto opportune condizioni, in questo caso dipendenti dalla temperatura e dal campo magnetico.

In pratica, per ogni superconduttore, esiste una temperatura critica  $T_c$  al di sopra della quale il materiale lascia passare al suo interno il flusso di campo magnetico; al di sotto di tale temperatura, e al di sotto del campo magnetico critico  $B_c$  (anch'esso un valore caratteristico del materiale) il superconduttore esclude completamente il flusso del campo magnetico dal suo interno, confinandolo alla superficie. Questo comportamento è illustrato in figura:

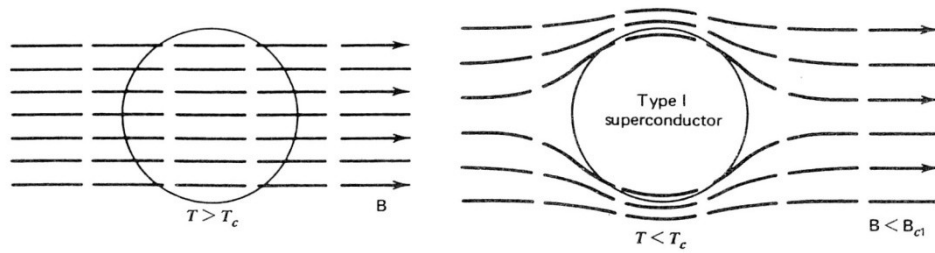


Figura 11 - Effetto Meissner nei superconduttori [3]

Coerentemente con la teoria della levitazione magnetica esposta al capitolo 2, si evidenzia che tale comportamento è il responsabile dell'esclusione di questi materiali dalle ipotesi del teorema di Earnshaw.

L'attitudine ad escludere le linee di flusso magnetico è infatti un fenomeno tipico dei materiali diamagnetici, che funzionano da stabilizzatori della levitazione, e tra i quali possono essere inclusi i superconduttori in qualità di diamagneti 'perfetti'.

Un'efficace spiegazione dell'effetto Meissner viene proposta in [6], tramite un esempio di un magnete permanente posizionato al di sopra di un piano superconduttore in condizioni di esclusione di flusso: il sistema proposto può essere pensato equivalente ad un sistema formato da un secondo magnete permanente immaginario, posto al di sotto del piano in maniera speculare a quello superiore.

Nel caso il magnete reale subisca uno spostamento orizzontale, la risposta del piano superconduttore è di fatto equivalente ad un pari spostamento del magnete immaginario, così come se lo seguisse.

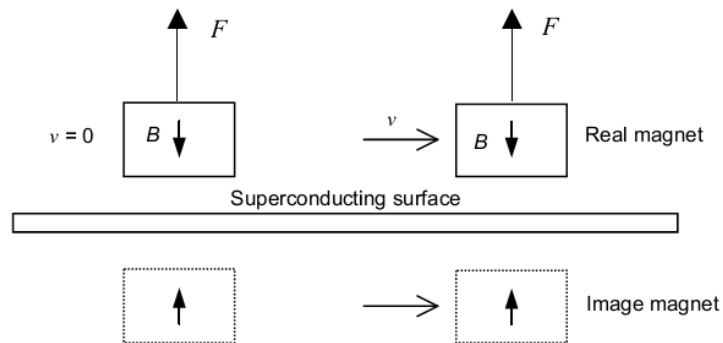


Figura 12 - Sistema equivalente per la spiegazione dell'effetto Meissner [6]

Il precedente esempio descrive il comportamento equivalente di un sistema levitante basato su un superconduttore di Tipo I, e tratta dunque la forma di levitazione repulsiva dovuta all'effetto Meissner. Come si vedrà nel seguente paragrafo, esiste una seconda tipologia di superconduttori dal comportamento differente rispetto a quello trattato.

### 3.3.2 – Materiali superconduttori

All'interno della famiglia dei superconduttori si possono individuare due tipologie a seconda del modo di levitazione stabile che presentano.

#### i. Tipo I

Si tratta molto spesso di metalli puri. Sono caratterizzati da valori bassi del campo magnetico critico e della densità di corrente critica.

All'interno della loro zona superconduttiva, esibiscono la proprietà di esclusione completa del flusso magnetico, come nell'esempio di figura 13.

Materiali di questo tipo consentono la realizzazione di levitatori basati su forze repulsive.

#### ii. Tipo II

Sono solitamente leghe oppure composti metallici, ad eccezione di vanadio (V), tecnezio (Tc), niobio (Nb). Costituiscono la scelta migliore per applicazioni quali i cuscinetti, poichè grado di mantenersi all'interno della zona superconduttiva anche per valori elevati di densità di corrente, campo magnetico e temperatura.

Tuttavia, si possono approssimare a diamagneti perfetti solo per valori di campo magnetico molto bassi.

Differentemente dai superconduttori di tipo I, sono caratterizzati dalla presenza di due valori di campo magnetico critico,  $B_{c1} < B_{c2}$ , che delimitano precisamente tre zone di funzionamento con differenti proprietà elettriche e magnetiche.

(1) Al di sotto del valore  $B_{c1}$ , il materiale si comporta come un superconduttore di tipo I, caratterizzato dunque dalla proprietà di esclusione di flusso completa oltre che naturalmente dalla resistenza nulla; (2) al di sopra del valore  $B_{c2}$ , il materiale diventa un comune conduttore senza nessuna delle due proprietà tipiche dei superconduttori.

(3) Tuttavia, nel range  $[B_{c1}; B_{c2}]$  il materiale assume un interessante carattere ibrido: al suo interno esistono delle regioni permeabili al flusso magnetico, che può qui trapassare il materiale in direzione normale alla superficie, dando luogo a caratteristici vortici di corrente nelle prossimità dell'attraversamento.

Un'analisi approfondita di questo fenomeno richiederebbe l'impiego della meccanica quantistica; è comunque utile sottolineare che il flusso di campo magnetico riesce ad attraversare queste regioni soltanto in un numero discreto di fasci, detti *flussoidi*, il cui valore è multiplo intero del quanto di flusso magnetico.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Il quanto del flusso magnetico è definito come il rapporto tra la costante di Planck e la carica dell'elettrone,  $\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \cdot 10^{-15} Wb$ .

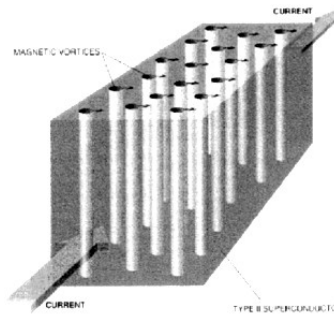


Figura 14 - Strutture a vortice nei superconduttori tipo II  
[D.J. Bishop, Scientific American, 48 (Feb. 1993)]

L'esistenza di queste regioni si attribuisce perlopiù ad impurità o difetti tipici dei superconduttori di tipo II.

La conseguenza di questo fenomeno è che il materiale, in questo range operativo, si comporta come superconduttore e parzialmente come un normale conduttore: da qui la capacità di instaurare contemporaneamente forze repulsive ed attrattive nei confronti di un magnete permanente in prossimità.

Sotto le precedenti condizioni dunque, un semiconduttore di tipo II è in grado di instaurare una levitazione stabile rispetto ad un magnete permanente, anche nel caso in cui quest'ultimo venga posto sfavorevolmente rispetto alla forza di gravità: se il materiale fosse un semiconduttore di tipo I, il magnete permanente precipiterebbe secondo la forza di gravità.

Con riferimento all'esempio di figura 12, si può affermare che un superconduttore di tipo II aggiungerebbe stabilità anche rispetto agli spostamenti orizzontali, mentre, come visibile dal sistema equivalente, il piano formato da un superconduttore di tipo I garantisce la stabilità in direzione verticale, mentre è indifferente rispetto agli spostamenti orizzontali.

Come si vedrà più avanti, nella produzione dei cuscinetti magnetici è privilegiato l'utilizzo dei superconduttori di tipo II, in primo luogo per la stabilità che offrono, e in secondo luogo per le maggiori temperature operative a cui possono funzionare restando in zona superconduttiva. A tal proposito va precisato che i cuscinetti a superconduttori integrano necessariamente un'unità di refrigeramento, con lo scopo di mantenere la temperatura sufficientemente bassa per poter godere delle proprietà di questi materiali: l'energia impiegata dall'unità di raffreddamento per svolgere questa funzione va conteggiata come perdita per dissipazione, pertanto è auspicabile impiegare superconduttori con la più alta temperatura critica possibile.

È proprio per questo motivo che gli sforzi di ricerca sul tema della superconduttività sono costantemente rivolti alla scoperta di nuovi materiali con temperature critiche relativamente alte. I materiali che rispondono a quest'esigenza sono detti HTS oppure HTSC (*High Temperature Superconductors*) e si tratta di superconduttori di tipo II; solitamente con questa sigla si identificano tutti quei superconduttori la cui temperatura critica sia al di sopra dei 30 K.

### 3.3.3 – *Struttura cuscinetti*

Esistono vari modi di sfruttare i superconduttori per la produzione di cuscinetti magnetici, ma la soluzione più semplice e ampiamente diffusa è senz'altro quella formata

dall'accoppiata di un elemento a superconduttore passivo ed un elemento a magnete permanente, oltre naturalmente alla consueta unità di refrigeramento.

La presenza di quest'unità aggiuntiva comporta un vincolo strutturale, vale a dire che è buona norma far coincidere l'elemento a superconduttore con lo statore, mentre il magnete permanente costituirà il rotore. Sarebbe infatti meno agevole, nella pratica, progettare un cuscinetto in cui il sistema refrigerante si trovasse solidale al rotore.

Un pregio molto apprezzato di questi cuscinetti, è la capacità di mantenere passivamente il rotore PM in una posizione stabile, semplicemente grazie al campo magnetico intrappolato nel semiconduttore, che corregge gli eventuali scostamenti dell'asse di rotazione dalla posizione originale.

Da un punto di vista funzionale e strutturale, è tipico distinguere i cuscinetti magnetici in due tipologie: cuscinetti di spinta e cuscinetti radiali.

I cuscinetti di spinta (*"thrust bearings"*) sono progettati per supportare carichi assiali, ovvero gravanti in direzione dell'asse di rotazione, che molto spesso coincide anche con la direzione della forza di gravità. I cuscinetti radiali (*"journal bearings"*) invece supportano carichi in direzione perpendicolare all'asse di rotazione.

Le due tipologie possono anche essere combinate in forma ibrida per poter sostenere carichi sia assiali che radiali.

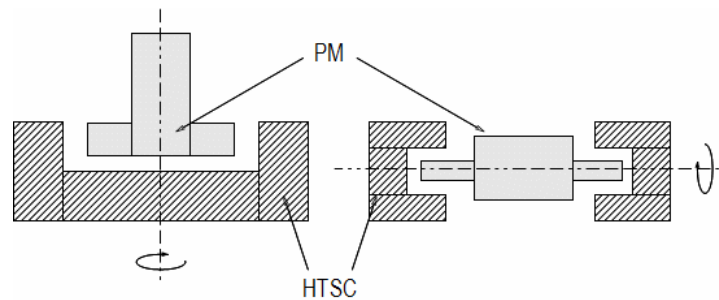


Figura 15 - Cuscinetti SMB in configurazione assiale e radiale

In entrambe le tipologie di base, va notato come statore e rotore vengano disposti di modo che la sorgente generi un campo magnetico simmetrico rispetto all'asse di rotazione; in questo modo si garantisce un funzionamento bilanciato e stabile.

In alcune applicazioni flywheel energy storage, si preferisce usare cuscinetti di tipo radiale; questo perché comportano un importante vantaggio in fatto di scalabilità.

Infatti, nell'ottica di future espansioni del sistema, non è necessario aumentare il diametro del volano, operazione critica dove si abbiano elevate velocità di rotazione: la stress meccanico cui è sottoposto il volano per l'elevata velocità periferica aumenterebbe il rischio di rottura dello stesso, con conseguenze potenzialmente molto pericolose.

Nelle applicazioni ad alte prestazioni dei cuscinetti magnetici il trend si sta orientando verso la predilezione delle soluzioni basate su SMB, anziché sugli AMB, nonostante gli AMB vantino una maggiore maturità sotto il profilo commerciale dato il loro impiego consolidato in numerose applicazioni.

Per avere un'idea più chiara del ruolo di ciascuna tecnologia, si riporta di seguito una comparativa delle stesse:

#### *Vantaggi AMB*

- Elevata rigidità magnetica
- Bassa dispersione di campo



- Maturità tecnologica

*Svantaggi AMB*

- Costo elevato
- Bassa affidabilità a causa della loro complessità
- Gap operativo ridotto
- Ingombro e peso

*Vantaggi SMB*

- Passivi, assenza di elettronica o alimentazione
- Semplicità strutturale quindi maggiore affidabilità
- Dimensioni e peso ridotti
- Costo inferiore

*Svantaggi SMB*

- Richiede refrigeramento o comunque bassissime temperature
- Rigidezza magnetica inferiore
- Elevata dispersione del campo
- Tecnologia non ancora matura

### **3.3.5 – Sul problema della caduta graduale del rotore**

*Origine del fenomeno*

I cuscinetti SMB attuali sono basati su materiali HTSC, che esibiscono superconduttività di tipo II: a quest'ultima è associata una perdita denominata *flux creep*, che costituisce uno dei punti deboli di questa tecnologia.

Per capire il problema è necessario richiamare le caratteristiche dei superconduttori di tipo II: come spiegato al paragrafo 3.3.2, la proprietà tipica di questi materiali è quella di non essere completamente impermeabili al flusso magnetico, bensì di possedere alcune zone che permettono il suo passaggio, seppur in modo distinto a quanto non facciano i ferromagneti.

Si è poi sottolineato come questo particolare comportamento rappresenti l'origine della stabilità di levitazione ad essi associata: infatti, rispetto ad un magnete permanente, si instaurano forze sia attrattive che repulsive.

Il fenomeno del *flux creep* consiste nel lento espandersi delle zone permeabili al campo magnetico con il tempo: questo problema ha il grosso svantaggio di provocare una progressiva diminuzione della forza di levitazione repulsiva, dovuto alla riduzione delle regioni propriamente superconduttive.

*Soluzioni*

In letteratura, numerose fonti riportano due metodi, risultati sempre soddisfacenti, per ridurre questo problema [35][36][37]: si tratta di metodi ottenuti per via empirica, e successivamente provati sperimentalmente. Essi consistono nel sottoporre il cuscinetto ad un marcato precarico e preraffreddamento. Ad esempio, in [36], il cuscinetto è studiato per funzionare ad una temperatura di 81K, con un carico di 700N. Al fine di evitare il problema della caduta del rotore, lo stesso è stato trattato con le suddette tecniche di preraffreddamento e precarico, sottoponendolo prima dell'uso ad ulteriori 11K di raffreddamento e ad ulteriori 350N di carico (T=70K, F=1050N); dai grafici ottenuti a

distanza di tre ore dal trattamento, si può constatare la sua efficacia nel contrastare gli scostamenti del rotore.

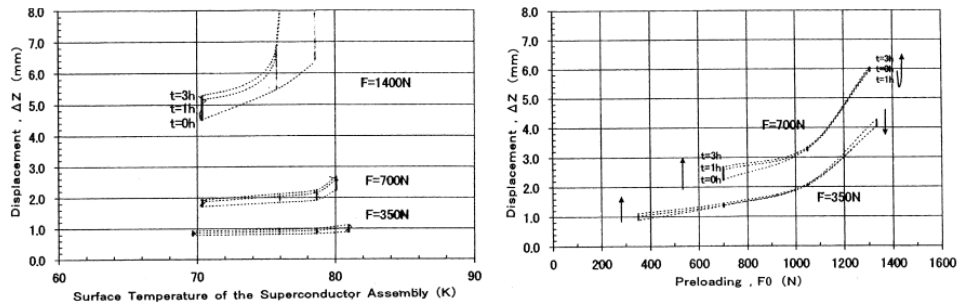


Figura 16 - Tecniche di preraffreddamento e precarico contro il flux creep [36]

### 3.3.6 – Sul problema della perdita di velocità

La scelta dei cuscinetti magnetici, come già discusso, ha tra i vantaggi principali quello di un funzionamento molto efficiente grazie alle bassissime perdite per attrito meccanico.

In questa affermazione non si considerano però altre forme di dissipazione, diverse da quelle meccaniche, che possono influenzare le prestazioni del cuscinetto.

Nel caso dei cuscinetti a superconduttore si devono analizzare le perdite di natura elettromagnetica, classificate come frizione magnetica, che si originano in diversi modi instaurando forze che tendono a frenare il rotore.

Nel caso di un accumulatore cinetico a volano, queste perdite sono critiche dato che una diminuzione di velocità del rotore equivale ad una perdita dell'energia immagazzinata.

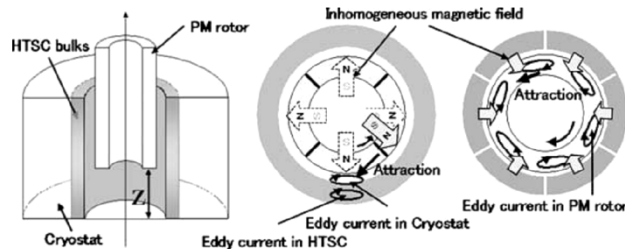


Figura 17 - Meccanismi della frizione elettromagnetica [27]

#### 1° Causa – Campo magnetico disomogeneo del rotore

La prima causa di tali perdite va imputata al rotore, costituito da un magnete permanente. Come precisato in precedenza, i cuscinetti SMB più utilizzati sono quelli in cui la fonte del campo magnetico è costituita da un magnete permanente, mentre il superconduttore presente nello statore risponde modellando tale campo magnetico e dando dunque origine alle forze elettromagnetiche che inducono la levitazione cercata.

Il magnete permanente, nella sua condizione di funzionamento ideale, dovrebbe dar luogo ad un campo magnetico completamente uniforme.

Tuttavia, nella pratica, si riscontra sempre che la distribuzione della densità di flusso magnetico è disomogenea: il problema legato a questa caratteristica si manifesta quando tale magnete permanente si muova. Dal momento infatti che esso coincide con il rotore del cuscinetto, quello che si verifica è che, osservando il sistema dal punto di vista dello statore, il campo magnetico non risulta stazionario ma si comporta a tutti gli effetti come

un campo alternato. Naturalmente, tale componente alternata è tanto più marcata quanto più è accentuata la disomogeneità del campo emesso dal magnete permanente.

La presenza di un campo magnetico variabile è fonte di attriti elettromagnetici dato che induce correnti indesiderate sia nello statore HTSC, sia nel criostato, come in figura 17. Le correnti parassite in questione (*eddy currents*) si presentano come moti vorticosi di elettroni, e la loro origine si deve al campo magnetico variabile del rotore, che agisce sulla superficie conduttrice dello statore e del criostato.

Il risultato è che tali correnti parassite interagiscono con il campo stesso che le ha generate dando luogo ad una forza attrattiva del tipo di Lorentz tra rotore e statore, così come tra rotore e criostato: tutto ciò, ai fini pratici, si traduce in una dissipazione dell'energia cinetica posseduta dal rotore, con il conseguente rallentamento indesiderato.

È opportuno sottolineare quanto una perdita di questo tipo possa rivelarsi critica in applicazioni quali appunto il flywheel energy storage.

Le suddette correnti parassite sono inoltre responsabili di un effetto indesiderato secondario, ovvero l'aumento di temperatura per effetto Joule: questo fenomeno ha diverse ripercussioni nel semiconduttore dello statore, poiché provoca un aumento della densità di corrente critica, un aumento della disomogeneità del campo magnetico e di conseguenza un ulteriore peggioramento delle perdite di rotazione.

#### *2° Causa – Campo magnetico disomogeneo dello statore*

Esiste un secondo meccanismo, simile al precedente, che contribuisce a degradare la velocità del rotore: la causa di base è sempre un campo magnetico disomogeneo.

In questo caso però, il campo magnetico in questione è quello dello statore HTSC.

Quest'ultimo, infatti, non viene realizzato come blocco unico, bensì dall'unione di diversi pezzi di materiale superconduttore (*bulks*), tipicamente intorno ad una decina. Il rotore, durante il movimento, vede un campo magnetico discontinuo che si comporta come se fosse variabile nel tempo. In questo caso la distribuzione del campo magnetico risulta periodica di periodo  $360^\circ/n$ , dove  $n$  rappresenta il numero di bulks del rotore.

Il problema e le conseguenze sono del tutto simmetriche a quelle presentate nel paragrafo precedente, dato che tale campo variabile induce correnti parassite nel rotore, le quali daranno luogo ad effetti di frizione magnetica causati dalla forza di Lorentz.

In questo caso secondo caso, però, si è provato sperimentalmente che tale fenomeno può essere limitato o addirittura eliminato con opportune contromisure, atte a rendere omogeneo il campo magnetico che causa il problema.

Una soluzione soddisfacente è quella basata sulla modifica della geometria dei blocchi di superconduttore e sul loro riposizionamento.

Nel 2005, l'Università di Tokyo ha effettuato una serie di prove in questo senso [28], dimostrando che effettivamente si riesce a rendere il campo magnetico proveniente dallo statore più omogeneo mediante impilamento e ridisposizione dei bulk di superconduttore.

Nello studio condotto si sono realizzati diversi campioni di bulk a doppio strato mediante unione di pezzi a parallelepipedo semplice oppure con profilo pentagonale. In entrambi i casi si è poi considerato l'impiego misto di due materiali: il tradizionale ossido di ittrio-bario-rame, e l'ossido di gadolinio-bario-rame (rispettivamente YBCO e GdBCO).

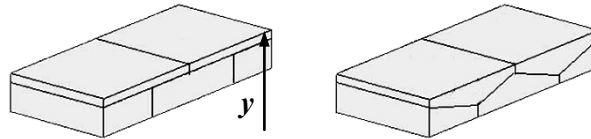


Figura 18 - Configurazioni rettangolare e pentagonale [28]

Sono state effettuate in via previa delle simulazioni numeriche, con lo scopo di trovare i fattori di forma ottimi per minimizzare la disomogeneità di campo.

In fase sperimentale, sono stati testati i seguenti quattro tipi di bulk:

- Tipo A configurazione monostrato originale in YBCO, a titolo di confronto
- Tipo B configurazione rettangolare, entrambi gli strati in YBCO
- Tipo C configurazione pentagonale, entrambi gli strati in YBCO
- Tipo D configurazione pentagonale, strato superiore YBCO, inferiore in GdBCO

A ciascuno di pezzi è stato applicato un campo magnetico di 1.5 T secondo l'asse  $y$  indicato in figura, successivamente si è abbassata la temperatura fino a 77 K, e infine si è rimossa la sorgente di campo magnetico esterna. A questo punto, una sonda di Hall ha scansionato la superficie dei vari campioni rilevandone il campo magnetico intrappolato. I risultati acquisiti sono i seguenti:

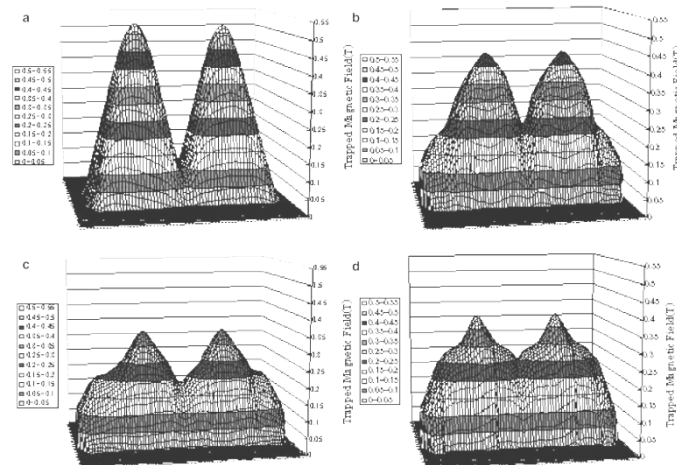


Figura 19 - Campo magnetico intrappolato nelle 4 configurazioni in prova [28]

Dai quali si evince che la migliore soluzione è data dalla tipologia D, permettendo un buon livellamento del campo magnetico intrappolato nel semiconduttore rispetto al pezzo originale A. La conclusione che si è tratta sperimentalmente è che dove lo strato superiore si assottiglia, ovvero ai lati, la penetrazione del campo magnetico migliora. La soluzione D, inoltre, ha dato risultati paragonabili alla C in termini di omogeneità, ma sensibilmente migliori in termini di valore medio dell'intensità di campo intrappolata: questo è da attribuirsi all'introduzione del secondo materiale (GdBCO) nello strato inferiore.

### 3.4 – Cuscinetti elettrodinamici

Questa tipologia di cuscinetti si trova in una posizione a sé stante rispetto a quelle precedentemente trattate: alla base del loro funzionamento non vi è infatti la forza di riluttanza magnetica, bensì la forza di Lorentz. Modi equivalenti di indicare questa famiglia di cuscinetti sono: cuscinetti *elettrodinamici*, cuscinetti ad *induzione*, cuscinetti a *correnti parassite*.

Allo stesso modo dei cuscinetti a superconduttore, quelli elettrodinamici sono prodotti relativamente recenti, sui quali vale la pena investire sforzi di ricerca per diversi motivi. L'interesse nei loro confronti è dovuto al fatto che, come principale prerogativa, questa categoria di cuscinetti intende offrire una soluzione alternativa ai cuscinetti attivi ed a superconduttore, ma con una struttura molto più semplice. Il loro funzionamento infatti non prevede l'aggiunta di nessuna unità ausiliaria, che, come si è visto, era costituita dalla fonte di alimentazione nei cuscinetti AMB, oppure dal criostato nel caso dei cuscinetti SMB.

#### 3.4.1 – Principio di funzionamento

I cuscinetti elettrodinamici sono in grado di instaurare e mantenere la levitazione magnetica sfruttando il principio di reazione descritto dalla legge di Lenz.

Come noto, questa asserisce che un flusso magnetico variabile, interagendo con un conduttore, provoca in esso una variazione di tensione e, se chiuso, la circolazione di correnti tali da contrastare la variazione del flusso magnetico che l'ha provocata.

Le correnti che si vengono a creare sono dette correnti *parassite*, oppure in inglese *eddy currents*, nome derivante dalla loro caratteristica circolazione vorticoso: questo è dovuto al fatto che, essendo correnti indotte da una variazione di flusso magnetico, il loro moto viene continuamente deviato in direzione perpendicolare a causa dell'azione della forza di Lorentz,  $\mathbf{f} = Q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ .

Grazie al campo magnetico secondario prodotto da queste correnti, vengono a crearsi forze repulsive tra il conduttore stesso e la sorgente del campo magnetico primario, consentendo dunque la levitazione. Si può dire che il conduttore agisce da specchio nei confronti del campo magnetico primario.

Volendo, questa configurazione è paragonabile a quella descritta in fig. 12 per la levitazione repulsiva basata su effetto Meissner, seppur la causa fisica che produce la repulsione abbia origini distinte. Questo si traduce in alcune sostanziali differenze tra le due configurazioni, come evidenziate di seguito:

1. A riposo (magnete permanente fermo rispetto alla superficie conduttrice), non si instaura nessuna forza di repulsione tra i due oggetti, dato che viene a mancare la variazione del flusso magnetico.
2. In condizione di moto relativo, il campo magnetico visto dalla superficie conduttrice è variabile, e dunque si instaurano in essa correnti e forze repulsive, secondo la dinamica della legge di Lenz. Succede però che, non essendo il piano perfettamente conduttore, l'effetto 'specchio' non è ideale, e dunque la forza di repulsione, anziché essere puramente levitante, introduce anche una componente frenante.

La variazione di flusso magnetico cercata, come già menzionato in precedenza, può essere ottenuta, oltre che tramite un magnete permanente in movimento, anche attraverso una bobina percorsa da corrente: questa soluzione, però, oltre ad essere poco efficiente a causa delle perdite resistive che comporta, comporterebbe la necessità di un'alimentazione

esterna annullando di fatto il principale vantaggio dei cuscinetti elettrodinamici rispetto ai tradizionali cuscinetti AMB. Nonostante ciò, sono stati sviluppati cuscinetti elettrodinamici di tipo attivo, principalmente per applicazioni a basse prestazioni, anche se la configurazione passiva basata su magneti permanenti resta la più apprezzata.

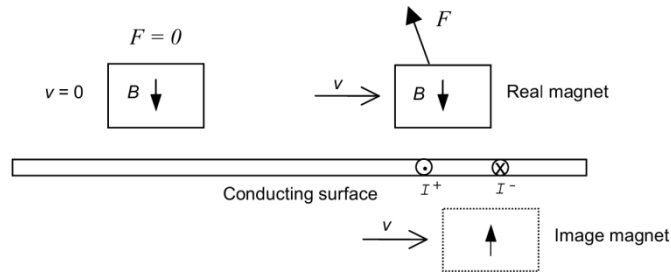


Figura 20 - Concetto di repulsione elettrodinamica [6]

### 3.4.2 – Il problema delle perdite

L'idea di levitazione magnetica per via elettrodinamica appena esposta è molto semplice e lineare da un punto di vista teorico. Nel momento in cui si voglia passare all'implementazione pratica di un cuscinetto basato su di essa, si devono però considerare gli effetti dissipativi necessariamente legati a questa tecnologia.

Se da un lato il fenomeno della riflessione di campo magnetico sul conduttore costituisce la fonte stessa della forza di levitazione richiesta, d'altro canto, le correnti indotte nel conduttore per la legge di Lenz, causano perdite per effetto Joule con conseguente abbassamento dell'efficienza di questi dispositivi.

La riduzione di questo problema rappresenta il principale ostacolo da superare per l'implementazione concreta di un cuscinetto elettrodinamico.

Bisogna però chiarire, innanzitutto, a cosa mirino le tecniche di riduzione delle correnti parassite; come esposto nel precedente paragrafo, tali correnti non sono di per sé un fenomeno da evitare in modo universale, dal momento che costituiscono il cardine stesso della levitazione magnetica su base elettrodinamica. Le perdite a loro associate, pertanto, sono in un certo modo inevitabili in presenza di conduttori reali. Ciò che in realtà si vuole eliminare, sono quelle correnti parassite che non contribuiscono attivamente a instaurare e mantenere la levitazione stabile: come si vedrà più avanti, la presenza di tali correnti è del tutto superflua fintanto che il rotore del cuscinetto stia operando in sede, ovvero ruotando in maniera concentrica rispetto allo statore. La loro comparsa è necessaria soltanto se e quando il rotore subisca uno scostamento, e si desiderino delle forze in grado di ripristinare spontaneamente l'equilibrio. Questo è illustrato nella figura seguente:

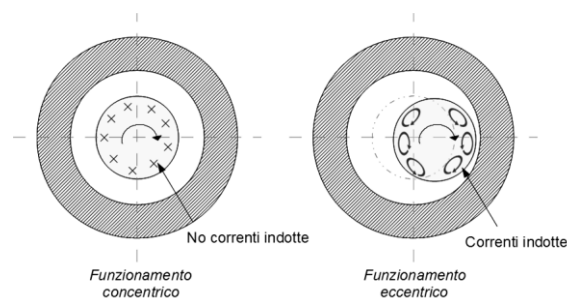


Figura 21 - Rotazione concentrica, eccentrica e correnti parassite

*Schema null flux.* A livello concettuale, senza specifici riferimenti alla realizzazione dei cuscinetti, una soluzione proposta per attenuare queste perdite è il cosiddetto schema null-flux, rappresentato nella figura sottostante.

Questa configurazione prevede il posizionamento di un secondo magnete in posizione simmetrica all'originale rispetto al conduttore, e vincolato in maniera tale da inseguirne i movimenti: l'effetto immediato di questa soluzione è la comparsa all'interno del conduttore di ulteriori correnti, indotte dalla variazione di campo magnetico prodotta dal secondo magnete in movimento.

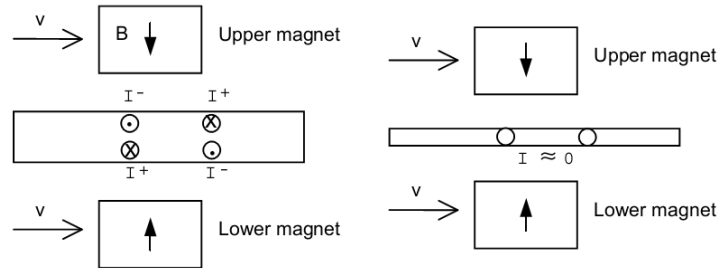


Figura 22 - Schema 'null flux' [6]

Queste correnti, nell'ipotesi realistica di un conduttore con spessore ben definito, tenderanno a distribuirsi sulla superficie dello stesso per effetto pelle: si può pensare, tuttavia, che in presenza di un conduttore con spessore ipoteticamente infinitesimo, queste correnti si sovrappongano compensandosi perfettamente. In questo caso le perdite legate alle correnti indotte risulterebbero completamente annullate. L'effetto di cancellazione si verifica però solamente qualora i due magneti siano posizionati in maniera perfettamente simmetrica rispetto al piano conduttore: un minimo scostamento di questi provoca la ricomparsa di tali correnti parassite, e secondo la legge di Lenz il corrispondente flusso magnetico tenderà a respingere lo scostamento ripristinando la posizione di equilibrio.

In questo modo, rispetto alla configurazione a singolo magnete, adottando lo schema null-flux le correnti parassite appaiono soltanto quando effettivamente sono necessarie.

La necessità di impiegare conduttori di spessore finito rende però, di fatto, questa soluzione priva di fattibilità concreta.

### 3.4.3 – Implementazione dei cuscinetti

Nei precedenti paragrafi si è presentata una panoramica generale sulla levitazione magnetica per via elettrodinamica, evidenziando quali siano le difficoltà pratiche per la realizzazione di tali sistemi. Per semplicità la trattazione è stata riferita al caso piano: il passo seguente, per poter applicare tali principi alla produzione dei cuscinetti, è quello di estenderli ad un sistema di magneti e conduttore circolari.

In passato, sono state studiate e sviluppate differenti soluzioni, con lo scopo di ottenere cuscinetti elettrodinamici a basse perdite per correnti parassite. Tuttavia, buona parte di queste soluzioni si basavano sull'impiego di avvolgimenti conduttori, con conseguente complicazione della struttura. Ad oggi, si prediligono i cuscinetti nelle cosiddette configurazioni *eteropolari* ed *omopolari*, grazie alla loro funzionalità, unitamente alla loro semplicità strutturale.

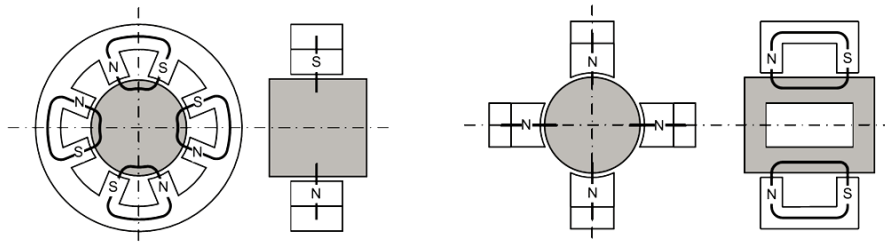


Figura 23 - Cuscinetti in configurazione eteropolare ed omopolare [5]

La configurazione di sinistra viene detta *eteropolare*, e prevede l'alternanza delle polarità magnetiche all'interno di una medesima sezione di piano, perpendicolare all'asse di rotazione. In presenza di questa configurazione, per minimizzare le correnti parassite indotte durante la rotazione, è indispensabile praticare la *laminazione* del rotore: tramite questa procedura il rotore, anziché essere costituito da un blocco conduttore unico, viene formato dall'impacchettamento di sottilissimi dischi, separati tra loro da un velo di materiale isolante. Con questo accorgimento, è possibile ridurre notevolmente le perdite, poichè la superficie conduttrice a disposizione delle correnti parassite viene drasticamente ridimensionata.

In configurazione *omopolare*, invece, l'alternanza tra poli magnetici è riscontrabile solo in direzione longitudinale rispetto all'asse di rotazione. Nonostante ciascuna delle due configurazioni abbia i propri pregi, apprezzabili in applicazioni specifiche, tipicamente si considerano più efficienti i cuscinetti in configurazione omopolare; questo perchè, grazie alla stessa disposizione dei magneti, il rotore in movimento risente molto meno delle variazioni del flusso magnetico e conseguentemente le perdite durante la normale rotazione risultano molto limitate.

Del resto, i cuscinetti eteropolari hanno a loro favore una maggiore semplicità in fase di realizzazione, nonché un costo sensibilmente inferiore.

In linea teorica, si potrebbe affermare che il principio alla base dei cuscinetti omopolari consentirebbe un funzionamento privo di perdite, beninteso che questo è possibile solo fintantochè persiste la condizione di rotazione concentrica.

Nella realtà, è impossibile evitare alcune perdite che, per quanto minimizzabili, non si possono evitare completamente; tra queste, va menzionato l'attrito meccanico dovuto all'aria presente nell'intercapedine tra il rotore e lo statore: le pompe a vuoto, infatti, non sono in grado di eliminare completamente tutta l'aria qui presente, pertanto in qualche misura si viene a creare dell'attrito. Alle perdite contribuiscono inoltre le forze giroscopiche, imposte inevitabilmente dai moti terrestri, le imperfezioni e disomogeneità dei materiali, che possono alterare le simmetrie dei campi magnetici previste.

I cuscinetti elettrodinamici, inoltre, richiedono la presenza di uno *starter*, ovvero un meccanismo di sospensione ausiliario che intervenga alle basse velocità, ossia quando la forza di levitazione magnetica è ancora troppo bassa.

Dal punto di vista pratico e progettuale, sono stati effettuati studi approfonditi per dimostrare le potenzialità applicative che possono offrire i cuscinetti elettrodinamici, e nello specifico quelli omopolari: una parte consistente di questo lavoro è contenuto negli scritti di Lembke [6] e Filatov [7], che hanno effettivamente provato la bontà di questa tecnologia in diversi campi, tra i quali spiccano gli accumulatori flywheel. Nonostante ciò, i cuscinetti elettrodinamici sono ancora da considerarsi una tecnologia in fase di



maturazione. Come evidenziato nei precedenti test, però, le prospettive di sviluppo sono favorevoli, grazie ad alcuni vantaggi che presentano rispetto ad altre tipologie di cuscinetti. In primo luogo questi dispositivi, una volta posti in rotazione al di sopra della velocità critica, sono in grado di mantenersi in funzionamento passivamente, senza essere dipendenti da unità ausiliarie: i cuscinetti attivi, così come quelli a superconduttore, sono invece caratterizzati dal bisogno di alimentazione, sia esso per gli elettromagneti oppure ancora per il criostato.

Tale fabbisogno di energia esterna, va inglobato a tutti gli effetti tra le perdite del sistema, al pari di altre forme di dissipazione, contribuendo ad abbassare l'efficienza. I cuscinetti elettrodinamici, d'altra parte, dissipano energia a causa delle correnti parassite, ma soltanto periodicamente, quando intervengano fattori perturbanti che spostino il rotore dalla posizione di rotazione corretta.

Nel caso specifico dell'applicazione negli accumulatori flywheel, i cuscinetti elettrodinamici omopolari hanno un ulteriore punto di forza: è infatti possibile progettare l'intero sistema in maniera completamente integrata, senza una reale separazione tra gli elementi di sospensione, accumulo e conversione (*self-bearing*).

Così facendo, il medesimo rotore impiegato per la funzione di accumulo energetico viene a coincidere con il rotore del convertitore bidirezionale. Questa notevole semplificazione strutturale consente di realizzare accumulatori molto ottimizzati in termini di ingombro, e inoltre la riduzione delle componenti utilizzate aumenta l'affidabilità complessiva del prodotto.

Altri punti di forza tipici dei cuscinetti elettrodinamici sono: l'ampio range di temperature operative, l'elevata efficienza, il basso costo di fabbricazione e manutenzione, e la ridotta precisione richiesta in fase di fabbricazione.

## 4 – Sistemi flywheel

### 4.1 – Introduzione

Nei precedenti capitoli, si è partiti da un'introduzione generale sullo scopo ed i benefici derivanti dall'impiego degli accumulatori cinetici, in particolar modo quelli ad alta velocità, inquadrandone il profilo dal punto di vista tecnico e delle potenzialità commerciali. Successivamente, si è effettuata una recensione delle tecnologie di cuscinetti magnetici disponibili, a causa del ruolo critico che rivestono nel funzionamento efficiente di questi dispositivi. La trattazione, tuttavia, ha considerato le differenti soluzioni in maniera individuale, analizzando i cuscinetti come sistemi stand-alone.

Di seguito verranno trattati i sistemi flywheel nel loro complesso, presentando le configurazioni più tipiche con cui si integrano in essi i cuscinetti magnetici precedentemente visti. Come risulterà ben chiaro dai prodotti e prototipi considerati, molto spesso viene privilegiato l'impiego combinato di più tipi di cuscinetti magnetici, a seconda della specifica che ciascuna tecnologia è in grado di soddisfare meglio.

### 4.2 – Materiali

Quando si trattano gli accumulatori flywheel più moderni, che operano ad elevatissime velocità, è necessario tenere in conto anche un altro problema, oltre al fattore delle perdite per attrito: gli accumulatori flywheel di tipo high-speed, infatti, puntano ad offrire una maggiore capacità energetica incentivando l'aumento del fattore  $\omega$ , che richiamando l'espressione (1), appare in forma quadratica. Le sollecitazioni meccaniche conseguenti impongono dunque la necessità di adoperare, per il volano, un materiale sufficientemente resistente da poterle sopportare. La resistenza del materiale diventa sempre più critica con il crescere della velocità angolare, senza contare il problema della sicurezza ad essa collegato e spesso indicato come uno degli svantaggi principali dei dispositivi FESS HIGH-SPEED. Va però precisato che, scegliendo opportuni materiali e procedure di fabbricazione, si riesce comunque ad ottenere un funzionamento affidabile, o quantomeno sicuro per l'utenza. Le due principali caratteristiche che deve possedere il volano sono sintetizzabili come:

1. Resistenza: soglia di rottura quanto più elevata possibile
2. Sicurezza: rottura non distruttiva al di sopra di tale soglia

In termini di sollecitazioni meccaniche, considerando un semplice volano cilindrico come nella figura seguente, si possono individuare due tipi di stress: uno lungo la componente radiale (*radial stress*,  $\sigma_r$ ), ed uno lungo quella tangenziale (*hoop stress*,  $\sigma_\theta$ ), entrambi espressi in [Pa].

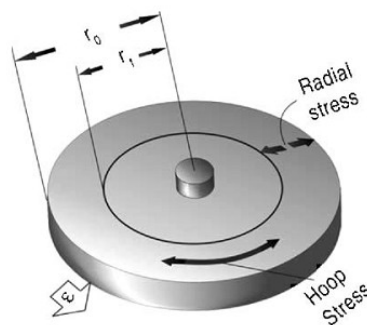


Figura 24 - Stress radiale e circolare in un rotore cilindrico [29]

In fase di progettazione del rotore, si deve tenere in conto che lo stress di tipo radiale è molto più pericoloso: un cedimento strutturale in questa direzione, infatti, può provocare la formazione di frammenti anche appuntiti e proiettati direttamente verso l'esterno. In una situazione analoga si può verificare la perforazione dell'involucro con i rischi conseguenti. Proprio per questa ragione, è pratica comune realizzare i volani con fibre composite di carbonio o vetro, avvolte opportunamente in maniera circolare con crescita in direzione diametrale.

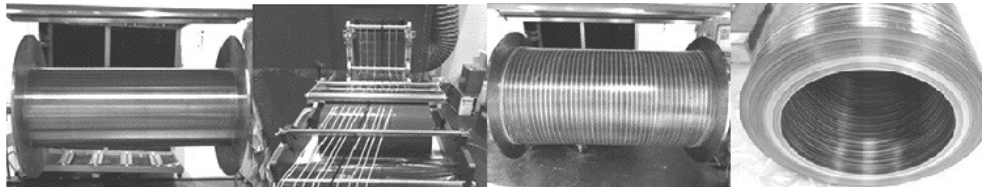


Figura 25 - Fabbricazione del rotore mediante avvolgimento di fibre composite [34]

La scelta del materiale varia a seconda dell'applicazione, e in generale è indotta dalla considerazione di tre specifiche: la resistenza meccanica, la densità energetica e il costo del materiale prescelto. Nella tabella seguente vengono confrontati alcuni dei materiali più utilizzati per la produzione di volani (incluso l'acciaio per i volani low-speed, a titolo di paragone).

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)	Max energy density (for 1 kg)	Cost (\$/kg)
Monolithic material 4340 Steel	7700	1520	0.19 MJ/kg = 0.05 kWh/kg	1
<i>Composites</i>				
E-glass	2000	100	0.05 MJ/kg = 0.014 kWh/kg	11.0
S2-glass	1920	1470	0.76 MJ/kg = 0.21 kWh/kg	24.6
Carbon T1000	1520	1950	1.28 MJ/kg = 0.35 kWh/kg	101.8
Carbon AS4C	1510	1650	1.1 MJ/kg = 0.30 kWh/kg	31.3

Figura 26 - Specifiche tecniche ed economiche dei principali materiali per volani [29]

Va precisato che al momento del calcolo della densità di energia, sia essa per unità di volume o di massa, diventa rilevante anche la considerazione del profilo geometrico del volano stesso, per effetto di una costante moltiplicativa  $K$  detta appunto fattore di forma. Infatti, le due densità risultano:

$$e_v = K \cdot \sigma_{\theta,r} \quad (8)$$

$$e_m = K \cdot \frac{\sigma_{\theta,r}}{\rho} \quad (9)$$

Tale fattore  $K$  dipende strettamente dalla distribuzione della massa nel volano, e in generale dipende di per sé dal materiale: nel caso semplificato di un volano realizzato con materiale omogeneo ed isotropo, però, è possibile trovare i valori tabulati per alcune delle geometrie più comuni.




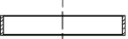


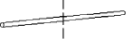
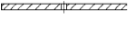
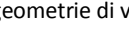
Fly wheel geometry	Cross section	Shape factor K
Disc		1.000
Modified constant stress disc		0.931
Conical disc		0.806
Flat unpierced disc		0.606
Thin firm		0.500
Shaped bar		0.500
Rim with web		0.400
Single bar		0.333
Flat pierced bar		0.305

Figura 27 - Fattori di forma K per le geometrie di volano più comuni [29]

L'impiego di materiali compositi per la fabbricazione dei volani è molto vantaggiosa in termini di prestazioni, dal momento che permette, rispetto ai materiali tradizionali, di accumulare pari quantità di energia ma con una massa complessiva sostanzialmente minore: questo significa che si può ottenere una densità energetica per unità di massa molto elevata, essendo quest'ultimo l'indice per eccellenza delle prestazioni assolute di un sistema FESS.

Si sottolinea però, ancora una volta, come questi materiali non possano essere impiegati con la stessa facilità dell'acciaio, sia per i problemi di sicurezza che per il loro ristretto range operativo nei confronti della temperatura.

### 4.3 – Accumulatori

#### 4.3.1 – Soluzione ibrida SMB,PMB

Nell'ultima decade, buona parte degli sforzi di ricerca per gli accumulatori flywheel ad alta velocità si sono concentrati sull'impiego dei cuscinetti basati su superconduttori. La loro stabilità, unita all'efficienza, sono senza dubbio caratteristiche molto attraenti in questo ambito: esistono però alcune difficoltà che limitano l'impiego esclusivo di questa tecnologia in fase di progettazione e realizzazione. Primo fattore fra tutti da tenere in considerazione è il costo: essendo i materiali superconduttori non facilmente reperibili e dunque cari, ai fini pratici è opportuno limitarne quanto più possibile la quantità utilizzata. Molte delle soluzioni proposte in letteratura, seguono proprio questo principio: per questo motivo, come si vedrà di seguito, quasi nessun sistema FESS considerato usa esclusivamente cuscinetti SMB, ma si serve, come appoggio, di cuscinetti ausiliari più economici quali gli AMB, o meglio ancora i PMB.

Ne è un esempio il prototipo realizzato da Mitsuda [15], la cui sezione schematica è riportata in figura: questa topologia di FESS è stata ripresa e ottimizzata in più studi, pur mantenendo inalterata la struttura di base sottostante.

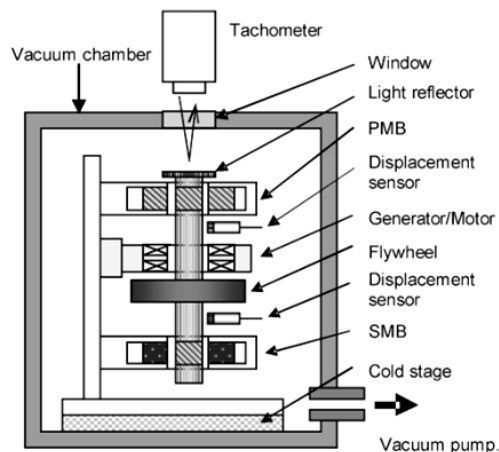


Figura 28 - Accumulatore flywheel basico a sospensione mista SMB e PMB [15]

Questo schema fa uso di due tipologie di cuscinetti: uno all'estremità inferiore del rotore, a superconduttore, ed uno all'estremità superiore, costituito da magneti permanenti ed impiegato come supporto radiale.

In linea di massima un sistema flywheel così progettato opera nella seguente maniera: il cuscinetto SMB fornisce la forza di sostentamento necessaria per mantenere sospeso il rotore, ed allo stesso tempo, in virtù della stabilità intrinseca dei superconduttori di tipo II, permette di sopprimere le eventuali vibrazioni a cui è sottoposto lo stesso. Lo scopo del cuscinetto a magneti permanenti, invece, è quello di controllare passivamente la posizione del rotore.

Il sistema complessivo è racchiuso all'interno di un involucro, mantenuto a vuoto attraverso un'apposita pompa collocata esternamente: in questo modo si limitano le perdite per attrito meccanico tra l'aria e le parti rotanti, che possono diventare sensibili a causa delle velocità ragguardevoli raggiunte in questa tipologia di sistemi flywheel.

Come già menzionato, questa particolare configurazione ibrida è una delle più utilizzate, grazie al buon livello di ottimizzazione che possiede: il cuscinetto a superconduttore, infatti, essendo costoso, viene posto solo dove strettamente necessario, anche a causa dell'ingombro aggiunto dovuto alla presenza dell'unità di refrigeramento. La funzione di bilanciamento radiale, che non può essere offerta dall'SMB a causa del suo posizionamento ribassato, viene dunque assegnata ad un semplice ed economico PMB: secondo il teorema di Earnshaw, infatti, un cuscinetto a forze magnetostatiche è in grado di offrire stabilità radiale, purchè appunto in direzione assiale esista già un vincolo (*i.e.* il cuscinetto a superconduttore).

#### **Prototipo 1** [Murakami, Mitsuda]

La forma più semplice di realizzare un sistema flywheel ibrido SMB e PMB è quella descritta in [15] e [19], e viene presentata in seguito.

*Progettazione SMB.* Per quanto riguarda il cuscinetto a superconduttore, esso consiste nell'accoppiamento di uno statore costituito di  $YBa_2Cu_3O_x$ , con quattro anelli magnetici permanenti in  $SmCo^2$ , concentrici e solidali all'asse del volano.

Le dimensioni delle componenti sono le seguenti:

<sup>2</sup> SmCo = Samario-Cobalto

1. Statore  $\varnothing_{est} = 45\text{mm} \times \varnothing_{int} = 25.6\text{mm} \times h = 16\text{mm}$
2. Rotore  $4 \times (\varnothing_{est} = 24\text{mm} \times \varnothing_{int} = 8\text{mm} \times h = 4.3\text{mm})$

La disposizione dei quattro magneti permanenti è tale da mettere in contatto tra loro i poli magnetici in maniera repulsiva: con la procedura appena descritta, si massimizza il flusso magnetico uscente dai magneti permanenti, il quale, venendo intrappolato dal superconduttore, contribuisce ad accrescere la forza di levitazione.

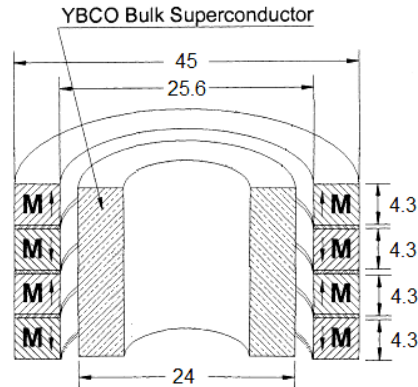


Figura 29 - Cuscinetto SMB dei sistemi [15],[19]

Il rotore dell'accumulatore è inizialmente sospeso da un meccanismo di posizionamento: successivamente, quando il criostato abbia raggiunto la temperatura di 70 K, tale meccanismo ausiliario viene rimosso dato che la forza di levitazione generata dal cuscinetto è sufficiente a sostenere autonomamente il peso.

*Progettazione PMB.* Per quanto riguarda il cuscinetto PMB, sono state analizzate due differenti soluzioni; in un primo prototipo presentato nel 2007 in Murakami [19], tale cuscinetto è stato realizzato con un anello solidale al rotore, più altri due sovrapposti e separati da una lamina diamagnetica; tale configurazione è rappresentata nella figura seguente:

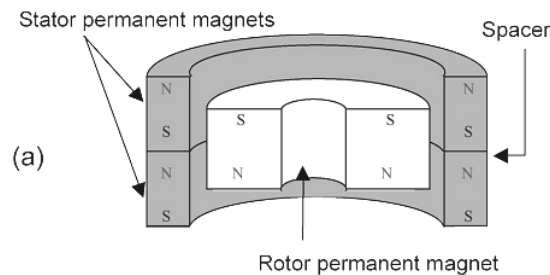


Figura 30 - PMB, prima versione [15]

1. Statore  $2 \times (\varnothing_{est} = 37\text{mm} \times \varnothing_{int} = 28\text{mm} \times h = 4.5\text{mm})$
2. Rotore  $\varnothing_{est} = 18\text{mm} \times \varnothing_{int} = 6\text{mm} \times h = 8\text{mm}$

Questa configurazione però non si è rivelata molto efficace, in termini di rigidità magnetica, quando il sistema è stato testato: in questa fase, il volano del sistema flywheel è stato sottoposto a perturbazioni sia assiali che radiali, per caratterizzare la risposta dei cuscinetti. I grafici seguenti mostrano le forze repulsive misurate sul precedente cuscinetto a magneti permanenti, in funzione dell'entità degli scostamenti.

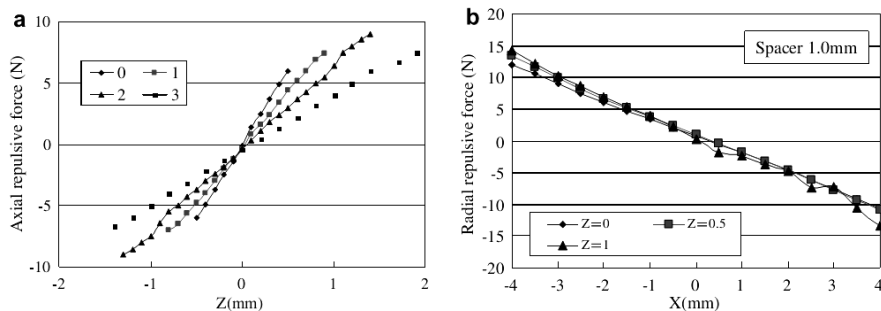


Figura 31 - Caratterizzazione delle forze repulsive per il PMB, Murakami [19]

Nella precedente caratterizzazione si erano testati altri cuscinetti PMB di dimensioni più ridotte, tuttavia in questi altri casi si era riscontrato [19] che le forze repulsive erano insufficienti oppure diventavano soddisfacenti solo per grandi scostamenti, rivelandosi dunque inadeguate per stabilizzare le piccole vibrazioni (*i.e.* nel range di 1mm di scostamento dalla posizione di equilibrio assiale e radiale).

*Variante PMB.* Il sistema flywheel proposto nel 2009 da Mitsuda [15], è analogo al precedente in tutte le specifiche, fatta eccezione per il cuscinetto PMB, per il quale viene proposta una variazione nella struttura allo scopo di incrementare ulteriormente la rigidità magnetica e dunque la capacità di contrastare le perturbazioni assiali e radiali. La nuova configurazione proposta è rappresentata in figura:

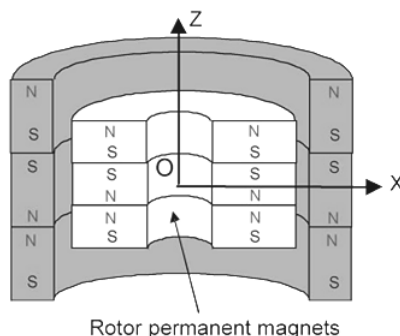


Figura 32 - PMB versione migliorata [15]

In questo caso, sia lo statore che il rotore vengono suddivisi in tre blocchi, distanziati tra loro da un separatore diamagnetico e impacchettati in modo da far coincidere i poli magnetici adiacenti, secondo la sequenza NS-SN-NS.

Dalle prove sperimentali riportate in [15], è emerso che la forza repulsiva, in funzione degli scostamenti radiali e assiali, dipende dallo spessore dei separatori diamagnetici interposti tra i magneti, seppur in maniera non importante.

Dai successivi test, si è effettivamente provato sperimentalmente che l'andamento della forza repulsiva è più che raddoppiato rispetto al PMB adottato nel prototipo precedente, in risposta a perturbazioni sia assiali che radiali.

La caratterizzazione delle suddette forze viene di seguito riportata:

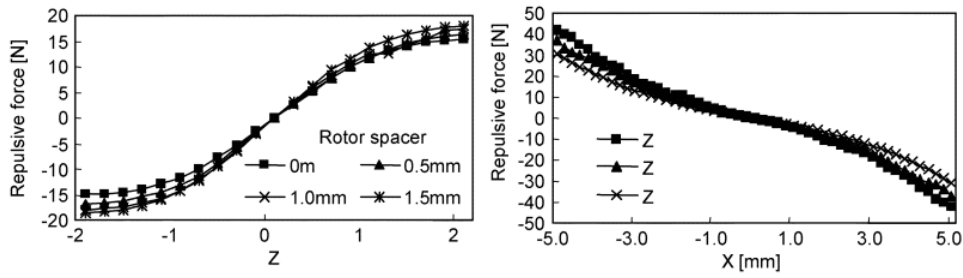


Figura 33 - Caratterizzazione delle forze repulsive per il nuovo PMB [15]

A titolo comparativo, le forze misurate a parità di scostamento provocato sono:

Scostamento	PMB semplice [19]	PMB modificato [15]
<b>Assiale</b>		
Z = 1mm	F ≈ 3N	F ≈ 13N
Z = 2mm	F ≈ 7N	F ≈ 15N
<b>Radiale</b>		
X = 1mm	F ≈ 2N	F ≈ 5N
X = 4mm	F ≈ 14N	F ≈ 30N

Un sistema FESS come quello appena proposto, nella sua versione originale oppure con il cuscinetto PMB modificato, costituisce un prototipo perlopiù a fini sperimentali e dimostrativi, adatto come base per studiare il comportamento dei cuscinetti impiegati e per cercare la configurazione ottimale. Le ridotte dimensioni e massa del volano (7cm, 100g), unite alla velocità relativamente bassa (5000rpm) indicano che il dispositivo considerato non presenta effettiva utilità agli scopi pratici: la massima quantità di energia immagazzinabile è infatti 10,6J.

Storing energy	10.6 J (5000 rpm)
Rotor weight (with flywheel)	0.32 kg
Length of rotor	0.153 m
Turn number of coil	750 T × 4 poles
Flywheel diameter	0.07 m
Flywheel weight	0.10 kg

Figura 34 - Specifiche tecniche FESS, Murakami [15]

### Prototipo 2 [Subkhan, Komori]

Nel 2011 è stato proposto un nuovo prototipo di accumulatore cinetico con tecnologia mista SMB e PMB, apportando alcune migliorie allo scopo di incrementare la capacità energetica del sistema. La struttura della batteria è basicamente la stessa adottata nel precedente prototipo, salvo una modifica nella geometria del volano, nonché nella configurazione del cuscinetto superconduttore.

*Volano.* L'obiettivo del progetto proposto in Subkhan, Komori [16] è quello di modificare la struttura del volano, proponendo una geometria che consente di dislocare il baricentro dello stesso in una posizione ribassata rispetto al vincolo di supporto. La nuova geometria è quella proposta in figura.



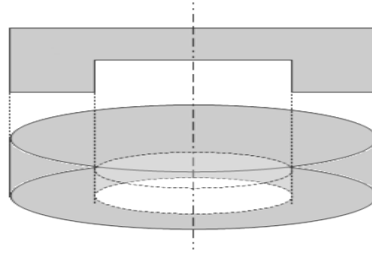


Figura 35 – Geometria del volano, rivista secondo Subkhan-Komori

Con la nuova geometria del volano, si sono ottenuti due miglioramenti: per prima cosa, l'abbassamento del centro di gravità aumenta la stabilità del rotore, sia in regime di rotazione che quando è fermo. Come secondo vantaggio, si ha che il momento d'inerzia aumenta; essendo questo proporzionale a  $m \cdot r$ , la crescita del momento d'inerzia è tanto più marcata quanto più la distribuzione della massa è concentrata all'estremo del raggio, come appunto si è fatto in [16]. L'implicazione pratica di questa modifica è l'aumento dell'energia cinetica di picco, ovvero della capacità energetica dell'accumulatore.

*Cuscinetto SMB.* In quanto al cuscinetto superconduttore, Subkhan e Komori hanno impiegato una configurazione differente che lo rende di fatto una forma ibrida tra un cuscinetto radiale ed uno di spinta. Rispetto al convenzionale cuscinetto proposto in precedenza (fig. 31), quest'ultimo introduce un ulteriore magnete permanente in neodimio, ancorato alla base del volano e posizionato in modo da interagire con il sottostante statore, questa volta realizzato in  $D_{y1}Ba_2Cu_3Ox$ .

Le dimensioni dello statore sono  $\phi_{est} = 49.4mm \times \phi_{int} = 27.2mm \times h = 16mm$ , mentre i quattro anelli al neodimio ancorati all'asse di rotazione misurano  $\phi_{est} = 25mm \times h = 3mm$ .

Con questa soluzione lo statore superconduttore, alla temperatura operativa, genera forze di levitazione stabili sia nei confronti dei magneti permanenti solidali all'asse del volano, in direzione radiale, sia nei confronti del magnete permanente solidale al volano, in direzione assiale. Il risultato è un cuscinetto particolarmente efficace sia in termini di supporto della forza peso del volano, sia in termini di soppressione delle vibrazioni. Una rappresentazione schematica del cuscinetto descritto è presentata in figura:

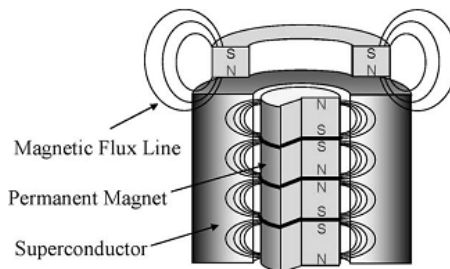


Figura 36 - Cuscinetto SMB in configurazione ibrida

### Test dinamici

Come precedentemente visto, i cuscinetti impiegati vengono sottoposti ad una verifica delle prestazioni statiche, che consiste sostanzialmente nella caratterizzazione della loro rigidità magnetica. Per avere la certezza che l'accumulatore finale sia in grado di mantenersi stabile durante il funzionamento, è opportuno sottoporlo ad una serie di test dinamici. I due test che tipicamente vengono effettuati sono (1) la carica e successiva scarica a vuoto del sistema, e (2) il calo temporaneo di tensione.

*Scarica libera.* Per effettuare questo test, l'unità flywheel completa viene inizialmente raffreddata, al fine di rendere operativi i cuscinetti superconduttori, e successivamente, partendo dalla condizione di accumulatore scarico (*i.e.*  $\omega = 0$ , volano fermo), viene caricato completamente collegando il generatore bidirezionale ad una fonte di alimentazione esterna. Quando si raggiunga la velocità di rotazione di regime, tale alimentazione viene scollegata e viene invertita la direzione di funzionamento del generatore, lasciando che tutta l'energia accumulata si scarichi per effetto delle sole perdite intrinseche dell'accumulatore.

Durante lo svolgimento del test, un primo sensore tachimetrico misura la velocità di rotazione istantanea del rotore; contemporaneamente, altri due sensori di prossimità, tramite la rilevazione delle correnti parassite, misurano eventuali scostamenti in corrispondenza del cuscinetto inferiore (SMB) e superiore (PMB).

Tramite questo test vengono evidenziati alcuni aspetti critici nel funzionamento dell'accumulatore: in primo luogo, banalmente, si ha un'idea di quanto importante sia il fenomeno di autoscarica dovuto alle perdite interne dell'unità. In secondo luogo, dall'andamento dei dati relativi ai sensori di spostamento, si possono determinare le frequenze naturali di risonanza del sistema, e in che misura i cuscinetti siano in grado di smorzarle.

*Calo di tensione.* Questo test è orientato a simulare un effettivo intervento dell'accumulatore, provocando un temporaneo abbassamento di tensione nella rete elettrica, e verificando se il dispositivo è in grado di garantire la continuità dell'alimentazione ad un carico di prova collegato. Un esperimento di questo tipo consente di estrarre numerose informazioni sulla funzionalità e sulle prestazioni del dispositivo: i tempi di risposta al calo di tensione, la qualità e la continuità del segnale fornito, nonché la stabilità del rotore a fronte delle brusche accelerazioni e decelerazioni dello stesso, che si vengono a creare negli istanti di switching tra le modalità di accumulo e generazione. Per lo svolgimento del suddetto test, viene allestito un banco di prova come schematizzato a seguire:

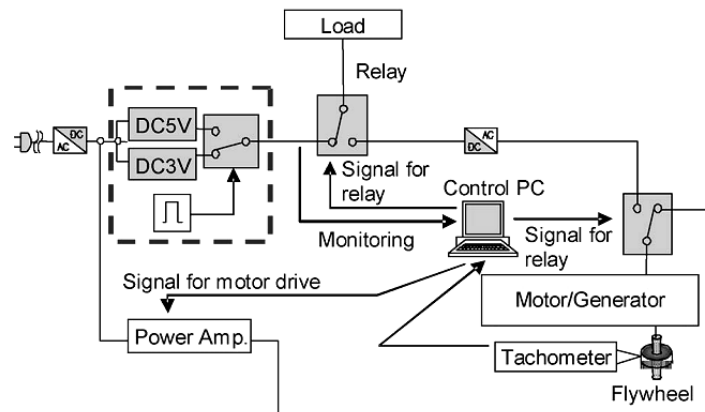


Figura 37 – Test calo di tensione, banco di prova [15]

A titolo di esempio, si riportano i risultati dei test realizzati sull'accumulatore proposto da Mitsuda [15].

*Esempio (Scarica libera).* Per prima cosa il FESS è stato sottoposto alla prova di scarica libera: conformemente alle specifiche, lo si è caricato completamente ( $\omega = 5000rpm$ ), e successivamente si è scollegata l'alimentazione, lasciandolo autoscaricarsi completamente.

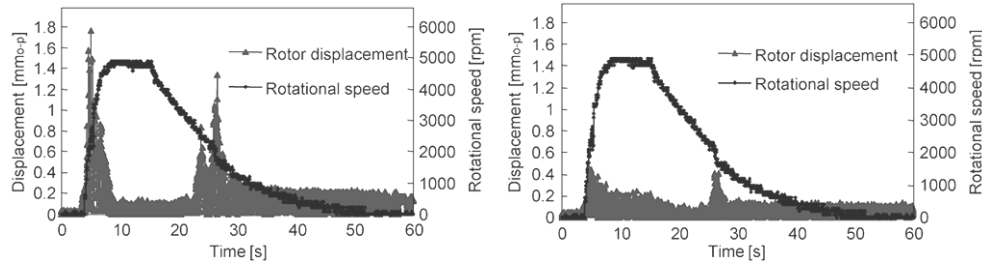


Figura 38 - Test si scarica libera, PMB (Sx) ed SMB (Dx) [15]

I grafici presentati sono formati dalla sovrapposizione dell'andamento della velocità angolare e della misura dello scostamento in prossimità di ciascun cuscinetto. Dai dati rilevati si deduce anzitutto che il sistema entra naturalmente in risonanza ogni volta che velocità di rotazione attraversa il valore di  $\approx 2000$  rpm.

Nel test eseguito, questo avviene due volte: durante la carica, intorno a  $t_1 \approx 5s$ , e durante la scarica, all'istante  $t_2 \approx 27s$ . È da evidenziare come lo smorzamento offerto dal cuscinetto di tipo SMB sia nettamente superiore a quello relativo al cuscinetto PMB collocato nella parte superiore del volano. A fronte del medesimo picco di risonanza, infatti, il cuscinetto inferiore è in grado di contenere le vibrazioni in un  $\Delta x < 0.5mm$ , mentre in prossimità del cuscinetto a magneti permanenti, il rotore riesce a dislocarsi di  $1.6mm$ .

A riprova di quanto premesso nell'introduzione, si noti che, nonostante l'accumulatore impieghi le più moderne tecnologie di sospensione magnetica, e non vi sia contatto fisico tra il rotore e l'involucro del sistema, il fenomeno di autoscarica è fortemente presente: dal momento in cui si interrompe l'alimentazione esterna, l'energia cinetica accumulata viene completamente persa per perdite parassite in un tempo relativamente breve, di circa 45 secondi.

Questo fatto è la dimostrazione di come i sistemi flywheel, seppur eccellenti per compensare le interruzioni momentanee di tensione, non possano attualmente competere con altre tecnologie di accumulo energetico, qualora si richiedano generatori con autonomia prolungata.

*Esempio (Calo di tensione).* Lo svolgimento del test consiste nella brusca riduzione della tensione di alimentazione del sistema flywheel, passando dai 5V nominali ai 3V, tramite la commutazione di uno switch, come indicato nello schema del banco di prova in figura 36. Si sono effettuate due prove distinte, protraendo il calo di tensione in un primo esperimento per 6s, ed in un secondo momento per 100ms.

Per entrambi i casi, si riportano i grafici della tensione di alimentazione, della tensione sul carico resistivo, della velocità di rotazione del volano e delle vibrazioni dello stesso.

Il primo esperimento consente di visualizzare e constatare la capacità dell'accumulatore di compensare effettivamente il calo di tensione: come si nota dal grafico, nell'istante stesso di commutazione dello switch, il numero di giri del volano inizia a decrescere rapidamente e, nel contempo, la tensione sul carico resistivo si mantiene costante, ad indicare che l'unità funziona correttamente.

Confrontando con il test precedente, la decelerazione del volano è ora decisamente più marcata, essendo il numero di giri sceso da  $\approx 4500$  rpm a  $\approx 2000$  rpm in circa 6 secondi, mentre in scarica libera il tempo era più che doppio.

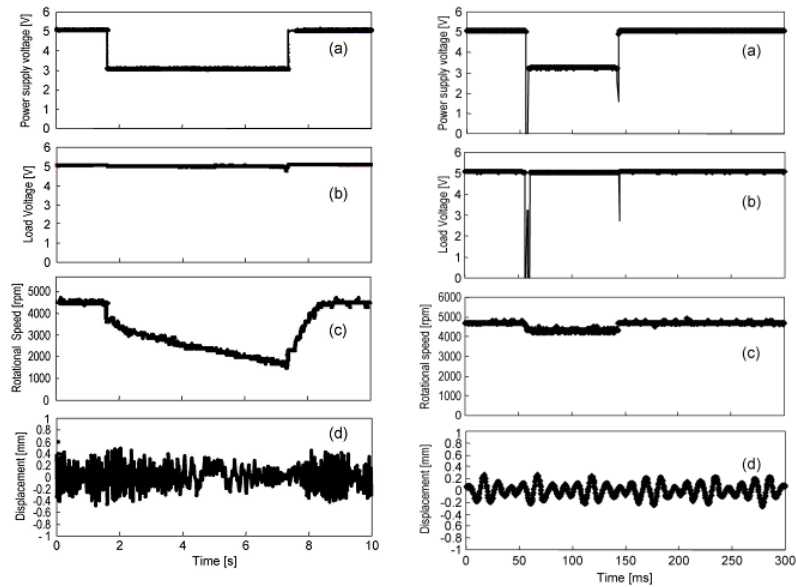


Figura 39 – Calo di tensione,  $\Delta t = 6s$  (sx) e  $\Delta t = 100ms$  (dx) [15]

La seconda prova effettuata permette invece di sollecitare il sistema soprattutto sul piano dei tempi di risposta a fronte delle commutazioni degli switch: la rapidità di risposta è solitamente uno dei principali pregi delle batterie a volano, motivo per cui vengono impiegati con successo in applicazioni dove questa figura di merito ha un'importanza critica, ad esempio negli UPS. Il grafico della tensione sul carico, figura 38.b (dx), mette in evidenza che, a partire dal fronte discendente della tensione di alimentazione esterna, il tempo di risposta dell'accumulatore lascia il carico scoperto da alimentazione per un tempo approssimato di 5ms, prima di riportarlo alla tensione nominale di 5V. Un tempo di risposta simile è paragonabile ad un'unità UPS di fascia low-end, per uso consumer.

#### 4.3.2 – Soluzioni con design integrato

Esiste una categoria di accumulatori flywheel che si distingue rispetto a quelli trattati nel paragrafo precedente: si tratta degli accumulatori con design integrato, caratterizzati dal fatto di inglobare nel medesimo elemento rotante sia la funzionalità di immagazzinamento energetico, che la funzionalità di motore e generatore. Un design di questo tipo offre senza dubbio una serie di vantaggi intrinseci: il primo vantaggio è, banalmente, la riduzione dell'ingombro e del peso conseguenti dalla riduzione del numero di componenti, dato che vengono condivise dai due sistemi di accumulo e conversione energetica. Come effetto secondario, la riduzione delle componenti coinvolte rende più economica la fase di produzione (sia come manodopera che come materiali) e più affidabile il funzionamento stesso della macchina complessiva.

Sotto il profilo delle prestazioni, l'operazione di integrazione del design ha il vantaggio di aumentare notevolmente la densità energetica dell'accumulatore, parametro che spesso viene impiegato per esprimere la qualità complessiva del prodotto. Ciò significa che, a parità di massa e volume, generalmente un sistema FESS integrato riesce ad ottenere prestazioni superiori ad uno tradizionale.

La scelta più naturale del sistema di sospensione ricade sui cuscinetti elettrodinamici omopolari: un esempio di sistema flywheel energy storage completamente integrato è quello presentato in Tsao, Senesky [38].

Nel suddetto documento è preso in considerazione un prototipo dimostrativo, operante in un range di 30.000 ÷ 60.000 rpm, e in grado di funzionare con un'efficienza dell'83% alla potenza di circa 10kW (*max 30kW @ 100.000rpm*).

Tramite questo prototipo, si è appunto dimostrato che un accumulatore flywheel integrato, pur essendo basato su un volano in acciaio, è in grado di ottenere prestazioni paragonabili ad un dispositivo di uguale ingombro, ma con volano composito. Quest'ultimo fatto è particolarmente interessante dal momento che è fonte di un'ulteriore semplificazione di progetto: la possibilità di impiegare l'acciaio elimina tutte le problematiche relative alla sicurezza tipiche dei materiali compositi, che obbligano a processi di fabbricazione molto accurati e costosi, nonché a successivi controlli atti a garantire un sufficiente margine di sicurezza. In aggiunta, la scelta dell'acciaio rilassa i vincoli relativi alla temperatura operativa, che in presenza di materiali compositi sono invece stringenti.

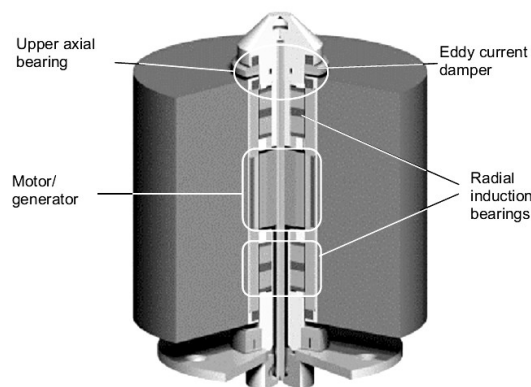


Figura 40 - Accumulatore FESS basato su cuscinetti elettrodinamici con design integrato [6]

Non si deve però trascurare che la reale convenienza nell'adottare un design integrato piuttosto che uno tradizionale va comunque considerata caso per caso, a seconda dell'applicazione specifica. Esistono infatti casi in cui la fase di progetto richiede la possibilità di intervenire singolarmente sulle caratteristiche dell'accumulatore: se si vogliono effettuare aggiustamenti selettivi, ad esempio nel sistema di sospensione oppure nella macchina elettrica di conversione, la via dell'integrazione diventa dunque scomoda se non impraticabile, come in [30].

La realizzazione di un sistema flywheel con design integrato va infatti valutata e pianificata preventivamente, sulla base di specifiche necessariamente fissate prima dell'inizio del progetto.

Esistono tuttavia alcuni svantaggi che caratterizzano i sistemi FESS elettrodinamici integrati [6]. Per prima cosa, non godono di una buona applicabilità nei sistemi di piccola e media dimensione; questo problema va imputato alle correnti indotte sulle quali essi stessi basano il proprio funzionamento, e che possono diventare una notevole fonte di perdita (sotto forma di calore) con il ridimensionamento del sistema. In secondo luogo, le forze di Lorentz che garantiscono il sostentamento e la stabilità del rotore diventano sufficientemente intense soltanto oltre una certa velocità di rotazione minima: per questo motivo, tipicamente questi sistemi richiedono l'aggiunta di cuscinetti ausiliari, spesso tradizionali cuscinetti a sfere d'acciaio, allo scopo di offrire un primo supporto all'avvio e fino al raggiungimento della velocità di regime. Gli stessi cuscinetti ausiliari funzionano anche in caso di emergenza, nel momento in cui un eccessivo rallentamento del rotore ne provocasse la caduta.

#### 4.4 – Applicazioni

In accordo con [22], e come già premesso nel primo capitolo, i campi applicativi di maggiore successo per gli accumulatori a volano, sono identificabili a grandi linee in tre categorie: power quality, trasporti ed industria aerospaziale.

Ciascuno di questi settori presenta esigenze specifiche, pertanto anche le batterie a volano impiegate differiranno di conseguenza per adattarsi al meglio. In linea di massima, la classificazione effettuata dalla University of Texas e proposta nella figura seguente evidenzia quali siano le principali differenze:

	Peak power	Stored energy, MJ (kWh)	Maximum rotational 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			60
Space station	3.6 kW	13 (3.7)	53 000	900	Composite	75
Hybrid combat vehicle	11 MW pulsed; 350 kW continuous	25 (14)	18 000	540	Composite/ metallic	280
Electromagnetic launcher	5-10 GW	50-150 (14-42)	10 000	450		4000
Train	2 MW	470 (130)	15 000	950	Composite	2500

Figura 41 - Specifiche di alcuni sistemi FESS secondo applicazione [33]

##### 4.4.1 - Power quality

*UPS*. All'interno del settore *power quality* esiste un'applicazione, ovvero quella dei gruppi di continuità (UPS, Uninterruptible Power Supply), che vale la pena approfondire dato che rappresenta uno dei principali cavalli di battaglia del settore flywheel energy storage. Attualmente i sistemi UPS rivestono un ruolo d'importanza critica: non soltanto a livello di distribuzione dell'energia elettrica su grande scala, ma ancor di più a livello domestico ed aziendale.

Basti pensare a tutti i sistemi informativi e data centers, all'interno dei quali viaggiano informazioni potenzialmente vitali, e altamente sensibili ad eventuali discontinuità nell'alimentazione.

Dal punto di vista tecnico, come già discusso, i requisiti di un buon gruppo di continuità sono praticamente coincidenti con le caratteristiche tipiche offerte da un accumulatore cinetico a volano.

Si stima che la quasi totalità delle interruzioni di alimentazione (*i.e.* 97%) non superino i 3 secondi di durata, ampiamente colmabili da una batteria cinetica.

Per interruzioni prolungate, è necessario appoggiarsi ad ulteriori sistemi di accumulo, motivo per cui i sistemi flywheel, più che rappresentare soluzioni UPS stand-alone, vengono adoperati come complemento ai sistemi tradizionali, nei quali vengono integrati in diversi modi.

Le due configurazioni più utilizzate, sono quelle riportate in [17]: consistono nell'impiego del FESS come rinforzo ad una batteria elettrochimica oppure in completa sostituzione della stessa.

Nel primo caso si parla di configurazione *battery hardening* e consiste nell'impiego di un accumulatore flywheel in parallelo con una tradizionale batteria elettrochimica.

Così facendo, la batteria cinetica si farà carico di buona parte delle interruzioni, sgravando la batteria elettrochimica dei numerosi cicli di scarica e carica parziali che dovrebbe

soportare, e che come è noto ne accorciano drasticamente la vita. L'ulteriore vantaggio di questa soluzione sono i tempi di risposta molto brevi che caratterizzano gli accumulatori a volano, e che si attestano tipicamente intorno a valori dai 10ms in giù, per i modelli di punta.

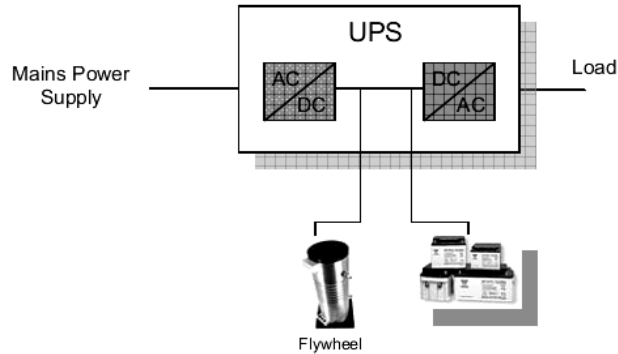


Figura 42 - UPS con FESS tipo "battery hardening" [17]

D'altro canto, questa soluzione non elimina completamente gli svantaggi tipici delle celle elettrochimiche: lo scopo di questa configurazione è soltanto di ridurre quanto più possibile l'intervento, contenendone l'usura.

La seconda soluzione è detta *battery free*: è costituita da un'unità UPS munita della sola unità flywheel, delegando il compito di colmare le interruzioni prolungate ad un generatore di altro tipo, ad esempio un motore diesel.

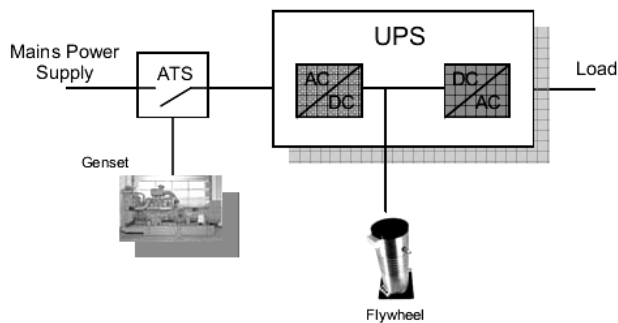


Figura 43 - UPS con FESS tipo "battery free" [17]

Come visibile nello schema sovrastante, tuttavia, il generatore non costituisce parte integrante dell'UPS, dato che questo opera in regime continuo: piuttosto, viene posizionato a monte dello stesso, andando a sostituire completamente l'alimentazione principale nel caso di attivazione dell'apposito switch temporizzato (ATS, *automatic transfer switch*). L'autonomia dell'accumulatore a volano è tale da coprire i tempi di switching e dell'avviamento del generatore diesel, che richiede approssimativamente una decina di secondi per inicializzarsi e portarsi a regime di funzionamento stabile. Questa soluzione è più completa ed affidabile della precedente, dal momento che è in grado di mantenere alimentato il carico anche per lunghi periodi di blackout.

È presente però un problema di affidabilità, dovuto al generatore diesel stesso: eventuali suoi malfunzionamenti potrebbero causare ritardi nell'accensione rendendo inutile il gruppo di continuità. Per questo motivo, lo svantaggio di questo sistema è dato dall'esigenza di controlli regolari (settimanali) sul buon funzionamento del motore [17].

#### 4.4.2 -Trasporti

UPT.<sup>3</sup> Un settore particolarmente compatibile con l'adozione dei sistemi di flywheel energy storage è quello dei trasporti pubblici. Esistono infatti due distinte modalità in cui si possono impiegare con successo gli accumulatori FESS: (1) per livellare il carico sul motore, e (2) per implementare la frenata rigenerativa.

Il concetto di livellamento del carico si basa sul presupposto che il motore principale del mezzo di trasporto passi ad intervalli ragionevolmente regolari da un regime di attività (*i.e.* bus in movimento) ad un regime di riposo (*i.e.* fermata).

Sotto questa premessa, è possibile stimare una determinata potenza media richiesta dal mezzo di trasporto: si può dunque usare il propulsore principale ad un regime costante, corrispondente alla potenza media richiesta, sfruttando il sistema flywheel come accumulatore durante le fermate, e come generatore durante il movimento.

Un andamento verosimile del fabbisogno di potenza in un mezzo di trasporto pubblico è rappresentato in figura sottostante; gli eccessi in positivo corrispondono alla potenza del motore in fase di movimento, quelli in negativo la potenza restituita dal sistema frenante.

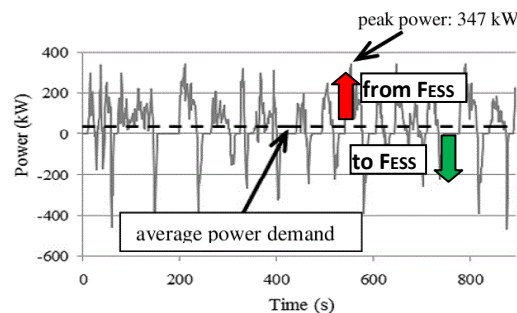


Figura 44 - Livellamento del carico tramite accumulatore flywheel [30]

La modalità di funzionamento appena descritta consente di minimizzare l'usura e il consumo del propulsore principale (*es. Diesel*): l'accumulatore flywheel, invece, in virtù della propria robustezza ed efficienza, si fa carico di gestire le oscillazioni tra assorbimento e generazione di potenza.

Il principio della frenata rigenerativa è analogo: l'idea di base è immagazzinare tale energia cinetica nell'accumulatore flywheel, utilizzando la resistenza meccanica offerta da un generatore come forza frenante per il mezzo di trasporto. È opportuno precisare che l'eventuale forza frenante aggiuntiva richiesta dal mezzo deve comunque essere somministrata da un impianto tradizionale. Allo stesso modo del concetto di livellamento di carico, un sistema di frenata rigenerativa permette di abbassare sensibilmente l'usura meccanica dei freni principali, riducendo i costi di manutenzione. Questo ovviamente in aggiunta al vantaggio di recuperare una porzione dell'energia necessaria alla frenata, che andrebbe altrimenti perduta sotto forma di dissipazione termica.

È da rimarcare che queste due soluzioni sono particolarmente vantaggiose ed efficienti proprio grazie al caratteristico comportamento periodico dell'andamento dei trasporti pubblici: solo sotto questa ipotesi è possibile progettare e dimensionare correttamente l'accumulatore flywheel.

Va poi fatta una distinzione netta tra due diversi campi applicativi: il trasporto su strada e quello su rotaie. Nel primo caso, le specifiche sono molto più restrittive, dal momento che

<sup>3</sup> UPT = Urban Public Transports.



il sistema flywheel va necessariamente trasportato a bordo del mezzo, con le problematiche di ingombro che ne conseguono: in aggiunta, gli effetti giroscopici cui viene sottoposto l'accumulatore per il movimento del mezzo stesso, rendono la fase di progettazione più complessa e delicata. Subentra poi il problema della sicurezza: i progettisti devono sottoporre l'accumulatore a severi test, atti a garantire l'incolumità dei passeggeri, che verosimilmente vengono a trovarsi a stretto contatto con un sistema potenzialmente pericoloso in caso di guasto meccanico.

Il caso del trasporto su rotaie è invece molto più semplificato: le batterie cinetiche possono essere poste in opportune stazioni fisse lungo il tragitto, così facendo i vincoli di dimensione e peso diventano praticamente irrilevanti. D'altra parte, la possibilità di dislocare l'alimentazione a terra annulla le problematiche relative agli effetti giroscopici ed alla sicurezza dei passeggeri.

Applicazioni di questo tipo sono già state impiegate o quantomeno testate con successo in forma di prototipo, anche se allo stato attuale non è possibile affermare che la tecnologia sia matura e ampiamente diffusa.

*Esempio.* Né è un esempio il volano progettato inizialmente da Urenco Power Technologies [31] e perfezionato successivamente con il nome commerciale di Tarrant, per essere impiegato nell'ambito dei trasporti. Si tratta di un accumulatore cinetico ad alta velocità, con punte di 42.000 rpm ed una capacità energetica di 17 MJ. Tali unità flywheel sono state progettate per funzionare in maniera completamente autonoma, ovvero come moduli caratterizzati ciascuno da una potenza erogata di 100kW, permettendo dunque una futura scalabilità del sistema.

Un'installazione modulare di questo tipo, come riportato in Richardson [31], è stata dapprima testata in un tratto della metropolitana di Londra, impiegando tre moduli da 100kW, per un totale di 300kW: pur essendo il sistema sottodimensionato a fronte dei picchi di potenza reale assorbita (nell'ordine dei megawatt), misurando la tensione sulla linea si è effettivamente constatato un contenimento dei picchi, indice che l'accumulatore flywheel interveniva correttamente. A seguito dell'esito positivo di questo test, il primo sistema è stato ufficialmente impiantato in un tratto ferroviario di New York, sotto forma di dieci moduli da 100kW.

Alla luce dei risultati pratici ottenuti [30][31] finora dalle installazioni esistenti si può concludere che l'efficacia di tali sistemi è dimostrata: tuttavia, allo stato attuale della tecnologia, il rapporto costo-benefici è ancora troppo elevato da giustificare una diffusione su larga scala dei sistemi flywheel per UPT, richiedendo numerosi anni di servizio per la sola ammortizzazione del costo di installazione. Senza dubbio, però, il potenziale che possiedono in quest'ambito è tangibile, motivo per cui l'interesse di ricerca in quest'ambito è continuamente in crescita.

Va però sottolineato che l'adozione degli accumulatori cinetici nell'ambito dei trasporti, difficilmente troverà fortuna come sorgente di alimentazione principale: quando si tratta di erogare potenza in maniera costante ed omogenea, i sistemi di accumulo tradizionali, così come i propulsori a carburante, sono di gran lunga più adeguati. Come già ribadito più volte, la natura dei sistemi flywheel li rende estremamente competitivi nella gestione dei transitori intensi, siano essi picchi di assorbimento o erogazione di potenza: per questo motivo, la loro utilità nell'ambito dei trasporti si esprime al meglio solo in fase di accelerazione e decelerazione del mezzo.

#### 4.4.3 - Industria aerospaziale

Questo particolare settore presenta buone previsioni di impiego per la tecnologia flywheel, seppur le circostanze di utilizzo siano completamente diverse dagli ambiti applicativi precedentemente considerati.

L'interesse dell'industria aerospaziale verso questo tipo di accumulatori è da ricondurre fondamentalmente ad uno specifico vantaggio che li caratterizza, ovvero la manutenzione ridotta. È facilmente intuibile quanto questo pregio risulti apprezzabile nel caso in cui si debba effettuare manutenzione a bordo di stazioni orbitanti piuttosto che satelliti. Queste strutture sono basate principalmente sull'energia fotovoltaica come fonte primaria di alimentazione; tuttavia, a causa del loro movimento l'esposizione dei pannelli alla luce solare risulta ciclica, dando luogo a periodi di oscuramento durante i quali l'alimentazione proviene dalla riserva interna. Nonostante l'autonomia prolungata non sia certo un punto a favore dei sistemi flywheel, tipicamente i periodi di oscuramento che si devono fronteggiare si aggirano intorno ai 30-40 minuti, dato che un satellite di tipo Low Earth percorre l'orbita terrestre in circa 90 minuti: vuoti di quest'ordine di durata sono ampiamente colmabili da una batteria flywheel. Nella figura seguente viene illustrato il comportamento del sistema di accumulo progettato e installato dalla Nasa proprio all'interno della ISS:

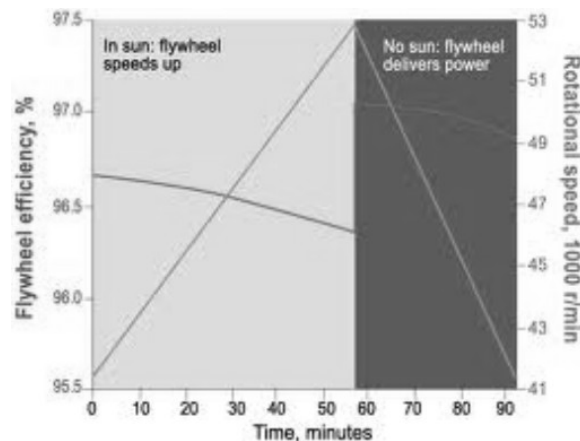


Figura 45 - Funzionamento FESS per la Stazione Spaziale Internazionale [33]

A bordo della stazione spaziale è stato effettuato un upgrade del preesistente sistema di accumulo basato sulle tradizionali batterie elettrochimiche: ciascuna di queste è stata rimpiazzata da una coppia di moduli flywheel in grado di erogare complessivamente 4.1kW. I vantaggi ottenuti rimpiazzando gli accumulatori elettrochimici sono netti: in fase di installazione, dato che i nuovi accumulatori cinetici hanno un ingombro inferiore a parità di prestazioni; in termini di prestazioni, dato che alimentano il carico ad un'efficienza di circa 94% contro gli 80% precedenti, e con un'autonomia raddoppiata; infine, in termine di costi di manutenzione, avendo un tempo di vita stimato fino a dieci volte superiore alle batterie elettrochimiche.

*Esempio.* In ambito aerospaziale, un eventuale intervento di riparazione manuale risulterebbe spesso inattuabile o troppo costoso, pertanto l'affidabilità di un sistema diventa una caratteristica particolarmente apprezzata. È questo il caso degli accumulatori flywheel collocati a bordo dei satelliti, ad esempio quello progettato e presentato in [39]

per l'utilizzo in un satellite a bassa orbita terrestre. L'accumulatore in questione ha una capacità di 2.6 kWh, erogabili ad una potenza di 6.4 kW: si basa su un sistema di cuscinetti elettrodinamici che, proprio per la loro semplicità strutturale, permettono di offrire una grande affidabilità. In questa applicazione si è scelto di realizzare un volano di due materiali combinati, come mostrato nella figura seguente:

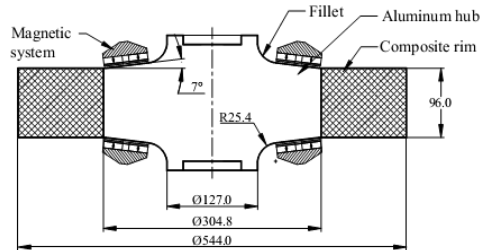


Figura 46 - Sezione del volano presentato in [39]

Questa scelta è dovuta principalmente alla necessità di soddisfare una duplice esigenza: da un lato, l'adozione di cuscinetti elettrodinamici presuppone l'esistenza di un rotore conduttore, affinché in caso di necessità possano circolare le correnti indotte. D'altro canto, però, è sempre auspicabile massimizzare la densità energetica per unità di massa, motivo per cui la scelta di progetto è ricaduta su un nucleo in alluminio, dove opera il sistema di sospensione, circondato da un anello in materiale composito che permette di abbassare la massa complessiva.

L'introduzione del materiale composito, tuttavia, ha imposto un limite superiore alla velocità di rotazione, dovuta al massimo stress meccanico in grado di sopportare ( $140 \cdot 10^6 Pa$  del composito, contro i  $572 \cdot 10^6 Pa$  del nucleo in alluminio): si è fissata dunque a 35.000 rpm la massima velocità angolare sostenibile dal volano. È poi opportuno precisare che, in presenza di cuscinetti ad induzione, il sistema FESS presenta in aggiunta una velocità minima di rotazione, in questo caso 15.000 rpm: al di sotto di tale soglia, infatti, l'intensità delle correnti indotte non è tale da poter sostenere il rotore.

## **Conclusioni**

Con la presente trattazione, si è partiti da una descrizione generale degli accumulatori cinetici, rimanendo ad un livello di profondità comune a tutte le applicazioni. Successivamente, si è posta in risalto l'importanza cruciale dei cuscinetti, tracciando un profilo di ciascuna delle tecnologie a levitazione magnetica attualmente disponibili. Infine, si è ritornati a livello di accumulatore complessivo, per capire come e quando si impieghino queste tecnologie, anche in relazione all'applicazione desiderata.

Ciò che appare chiaro dallo studio della letteratura più recente (*i.e.* ultima decade) è che gli accumulatori di energia a volano rappresentano una tecnologia attraente e senza dubbio competitiva nel campo dell'energy storage: è altrettanto chiaro che buona parte di questo interesse è al momento limitato all'ambito della ricerca, promettendo però una potenziale diffusione su larga scala non appena tale tecnologia raggiunga la piena maturazione.

Non si può però pensare che gli accumulatori a volano serviranno come soluzione universale per l'energy storage, anche se esiste un ruolo ben preciso nel quale risultano essere molto competitivi : ora, come in futuro, la loro prerogativa sarà prevalentemente quella di gestire eventi transitori, dal momento che sono in grado di tollerare efficacemente picchi di assorbimento e generazione anche molto intensi. Secondo il trend corrente, l'utilità degli accumulatori FESS si esprimerà al meglio in termini di supporto ad altri accumulatori: questi ultimi dovranno intervenire in presenza di eventi prolungati nel tempo, compito in cui per loro natura le batterie a volano non primeggiano.

Con buona probabilità, negli anni a venire sarà sempre più naturale abbinare i sistemi FESS ad altri sistemi quali il CAES (*i.e.* compressed air energy storage).

## **Bibliografia**

- [1] *Simon M.D.* – “Diamagnetically stabilized magnet levitation” (2001)  
Manuscript number 12096  
Department of Physics and Astronomy, University of California Los Angeles
- [2] *Genta G.* – “Kinetic energy storage” (1985)  
Butterworths
- [3] *Moon F.C.* – “Superconducting levitation – Application to bearings and magnetic transportation”  
John Wiley & Sons
- [4] *Tony Hyun Kim* – “Magnetic Levitation Design Project” (2009)
- [5] *Schweitzer, Bleuler* – “Magnetic bearings – Theory, Design and Application to Rotating Machinery”  
Springer (2009)
- [6] *Lembke Torbjörn A.* – “Design and Analysis of a Novel Low Loss Homopolar Electrodynamic Bearing” (2005)  
Department of Electrical Engineering - Royal Institute of Technology, Sweden
- [7] *Filatov Alexei* – “Null-E Magnetic Bearings” (2002)  
University of Virginia
- [8] *Sotelo, Andrade, Ferreira* – “Magnetic Bearing Sets for a flywheel system”  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, June 2007
- [9] *Sung, Lee, Han* – “Flywheel energy storage system with a horizontal axle mounted on high  $T_C$  superconductor bearings”  
Elsevier, Cryogenics, 41, 461-467, May 2001
- [10] *Tang, Fang, Sam Ge* – “Roles of superconducting magnetic bearings and active magnetic bearings in attitude control and energy storage flywheel”  
Elsevier, Physica C, 483, 178-185, July 2012
- [11] *Nagaya, Komura, Kashima (.)* – “Improvement and enlarging of the CFRP flywheel with superconducting magnetic bearings”  
Elsevier, Physica C, 392-396, pg. 769-772, January 2003
- [12] *Andrade, Ferreira, Sotelo (.)* – “A superconducting high-speed flywheel energy storage system”  
Elsevier, Physica C, 408-410, pg. 930-931, 2004

- [13] *Sung, Han, Lee, Jeong, Hwang, Choi* – “Design and analyses of flywheel energy storage systems using high- $T_C$  superconductor bearings”  
Elsevier, Cryogenics, 42, 357-362, December 2001
- [14] *Tsukamoto, Utsunomiya* – “HTS flywheel energy storage system with rotor shaft stabilized by feedback control of armature currents of motor-generator”  
Elsevier, Physica C, 463-465, pg. 1267-1270, June 2007
- [15] *Mitsuda, Inoue, Nakaya, Komori* – “Improvement of energy storage flywheel system with SMB and PMB and its performances”  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, June 2009
- [16] *Subkhan, Komori* – “New Concept for flywheel energy storage system using SMB and PMB”  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, June 2011
- [17] *Zanei, Cevenini, Ruff, Ulibas* – “Integrated Systems for UPS: New Solutions in the Power Quality Chain”  
IEEE 978-1-4244-1628-8, 2007
- [18] *Araki, Nagashima, Seino, Miyazaki (.)* – “Discussions about measurement results of levitation force and its time relaxation between GdBCO bulk superconductors and superconducting magnet with a high magnetic field gradient”  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, June 2009
- [19] *Murakami, Komori, Mitsuda, Inoue* – “Design of an energy storage flywheel system using permanent magnet bearing (PMB) and superconducting magnetic bearing (SMB)”  
Elsevier, Cryogenics, 47, 272-277, March 2007
- [20] *Strasik, Johnson, Day, Mittleider (.)* – “Design, fabrication and test of a 5kWh/100kW flywheel energy storage utilizing a high temperature superconducting bearing”  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, June 2007
- [21] *Zhang, Tseng* – “Design and loss analysis of a high speed flywheel energy storage system based on axial-flux flywheel-rotor electric machines”  
IEEE, 978-1-4244-7398-4, 2010
- [22] *Peña-Alzola, Sebastián, Quesada, Colmenar* – “Review of flywheel based energy storage systems”  
IEEE, 978-1-4244-9843-7, May 2011
- [23] *Daoud, Abdel-Khalik, Massoud, Ahmed, Abbasy* – “On the development of flywheel energy storage systems for power system applications: a survey”

- IEEE , 978-1-4673-0142-8, 2012
- [24] *Vazquez, Lukic, Galvan, Franquelo, Carrasco, Leon* – “Recent advances on energy storage systems”  
IEEE , 978-1-61284-972-0, 2011
- [25] *Thomson W.* – “Reprint of papers on electrostatics and magnetism”  
XXXIII, 493-499, and XXXIV, 514-515, London, MacMillan (1872)
- [26] *Braunbek W.* – “Freischwebende Körper im elektrischen und magnetischen Feld” and “Freies Schweben diamagnetischer Körper im Magnetfeld”  
Z. Phys., 112, 753–763 and 764–769 (1939)
- [27] *Shiraishi, Demachi, Uesaka* – “Numerical simulation of coupled problem of electromagnetic field and heat conduction in superconducting magnetic bearing”  
Elsevier, Physica C 392–396 ,734–738, February 2003
- [28] *Kita, Ichihara, Masaie, Demachi, Sakai, Hirabayashi* – “Rotation loss reduction of superconducting magnetic bearings by stacking and rearranging the shape of the bulks”  
Elsevier, Physica C 426–431, 821–825, July 2005
- [29] *Bolund, Bernhoff, Leijon* – “Flywheel energy and power storage systems”  
Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, 235-258  
January 2005
- [30] *Buchroithner, Andrasec, Bader* – “Optimal system design and ideal application of flywheel energy storage systems for vehicles”  
2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition, 2012 - Sustainable Transportation Systems Symp  
IEEE, 978-1-4673-1454-1/12, April 2012
- [31] *Richardson* – “Flywheel energy storage systems for traction applications”  
IEEE, Power Electronics, Machines and Drives, Conference Publication No.487,  
16-18 April 2002
- [32] *Rex A. Delventhal* – “Flywheel Energy Storage System Designed for the International Space Station”  
<http://www.grc.nasa.gov>, 2002
- [33] *Hebner, Beno, Walls* – “Flywheel batteries come around again”  
IEEE Spectrum, Vol. 39, No. 4, pg. 46-51, 2002
- [34] *Sung, Seong, Sana, Sang* – “Design optimization and fabrication of a hybrid composite flywheel rotor”

Elsevier, Composite Structures 94, 3290–3299, April 2012

- [35] *Koshizuka, Ishikawa, Nasu* - “Present status of R&D on superconducting magnetic bearing technologies for flywheel energy storage system”  
Elsevier, Physica C, 378–381, 11–17, January 2002
- [36] *Koshizuka, Ishikawa, Nasu* – “Progress of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems”  
Elsevier, Physica C, 386, 444–450, 2003
- [37] *Ichihara, Matsunaga, Kita* – “Fabrication and evaluation of superconducting magnetic bearing for 10 kW h-class flywheel energy storage system”  
Elsevier, Physica C 426–431, 752–758, July 2005
- [38] *Tsao, Senesky, Sanders* – “An Integrated Flywheel Energy Storage System With Homopolar Inductor Motor/Generator and High-Frequency Drive”  
IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 39, No. 6, 2003
- [39] *Filatov, McMullen, Davey, Thompson* – “Flywheel Energy Storage System with Homopolar Electrodynamic Magnetic Bearing”  
Tenth International Symposium on Magnetic Bearings, Martigny, Switzerland, August 2006