

F. CASTELLI DEZZA, A. DI GERLANDO, S. FORTUNA

ANALISI PROGETTUALE E SPERIMENTALE DI SISTEMI  
MAGLEV DI TIPO EMS CON APPARATI DI ECCITAZIONE-  
LEVITAZIONE ELETTROMAGNETICI E IBRIDI

Atti del III Convegno Nazionale del  
Progetto Finalizzato Trasporti 2  
del Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Atti su CD-ROM

TAORMINA, 10-12 Novembre 1997



**CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE  
PROGETTO FINALIZZATO TRASPORTI 2**

**III Convegno Nazionale  
10-12 novembre 1997  
Taormina**

**Atti del Convegno  
Guida per gli Utenti  
della Ricerca**

Date sent: **Tue, 13 Jan 1998 10:31:58 +0100 (MET)**  
From: **cilione@IASI.RM.CNR.IT (Emanuela Cilione)**  
Subject: **risposta deposito CD**  
To: **diger@bottani.etc.polimi.it**

Gent.mo Dr. Di Gerlando

Le rispondo a proposito della sua richiesta di deposito degli atti del 3°  
Convegno Nazionale del PFT2 elaborati su CD-rom.

Le comunico che la registrazione degli atti presso la Procura della  
Repubblica (Tribunale di Roma) e la Questura di Roma è stata effettuata in  
data 22 dicembre u.s. Pertanto le memorie sono citabili come pubblicazioni.  
Sono spiacente di dirle, però, che non esiste un volume cartaceo degli atti.  
A disposizione per ulteriori chiarimenti, distinti saluti.

Emanuela Cilione

Dr. ssa Emanuela Cilione  
PFT2 - CNR  
V.le dell'Universita' 11 - 00185 ROMA  
tel +39 6 4457125  
fax +39 6 4457186

# **ANALISI PROGETTUALE E SPERIMENTALE DI SISTEMI MAGLEV DI TIPO EMS CON APPARATI DI ECCITAZIONE-LEVITAZIONE ELETTROMAGNETICI E IBRIDI**

Francesco Castelli Dezza, Antonino Di Gerlando, Stella Fortuna  
Dipartimento di Elettrotecnica - Politecnico di Milano

SpTP 2 11 1

## **Sommario**

Si analizzano alcune problematiche di progetto dei sistemi di levitazione-eccitazione di bordo dei veicoli a levitazione magnetica (MagLev) con Sospensione ElettroMagnetica attrattiva (EMS), considerando dispositivi con eccitazione puramente elettromagnetica (impiego di sole bobine alimentate) e con eccitazione ibrida (presenza di bobine alimentate e di magneti permanenti); sono esaminate le diverse possibili configurazioni delle unità polari (avvolgimenti singoli o multipli, magneti permanenti nei corpi polari o nei gioghi del levitatore), comparandone le principali caratteristiche dimensionali, funzionali e di controllo.

Si fa cenno, infine, alle caratteristiche principali di un prototipo di piattaforma levitante, realizzata presso il Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano, finalizzata a diversi tipi di esperienze di levitazione.

**Parole chiave:** sistemi Maglev, modellistica per il progetto, analisi parametrica

## **Premessa.**

E' noto il grande interesse che i sistemi di trasporto Maglev riscuotono a livello mondiale in termini di ricerca applicata, sviluppo industriale e strategia delle reti di trasporto: la loro fondamentale caratteristica è la possibilità di raggiungere elevate velocità eliminando ogni contatto fisico tra veicolo e pista, causa di numerosi, rilevanti problemi nei sistemi di trasporto a guida vincolata di tipo convenzionale (usura della catenaria e del binario, difficoltà di captazione crescenti con la velocità, costosa manutenzione).

In Italia, all'interno del Piano Finalizzato PFT2 del CNR, giunto al suo 5° anno, nel Sottoprogetto 2."Veicoli", Tema 2.11.1 "Veicoli a guida vincolata con sustentazione e/o propulsione non convenzionale: metodologie di calcolo e modellistica", è stato sviluppato un Progetto di ricerca, svolto in collaborazione da diverse Unità Operative, dal titolo generale: "Studio di sistemi innovativi di trasporto con motori lineari sincroni a statore lungo a levitazione magnetica con bobine superconduttive e/o convenzionali".

Nel corso della ricerca poliennale, l'U.O. di Milano (il cui Responsabile Scientifico è il Prof. Ivo Vistoli) ha approfondito aspetti relativi alla comparazione e al progetto, analizzando sia problematiche di sistema sia questioni di modellizzazione e di dimensionamento di alcuni componenti [1-9].

Una problematica di notevole importanza nei sistemi Maglev, oggetto di particolare attenzione nel corso di quest'ultima fase degli studi, è quella relativa alla ottimizzazione di progetto e al controllo degli apparati induttori di bordo, che svolgono la duplice funzione di dispositivi di levitazione e di sistemi di eccitazione dei motori sincroni lineari di propulsione (LSM). Il lavoro proposto intende riferire i risultati di questi ultimi studi, con specifico riferimento ai sistemi con levitazione attrattiva (sistemi EMS) e in relazione ai seguenti aspetti:

- analisi comparativa delle caratteristiche progettuali e funzionali di diverse configurazioni delle unità polari di eccitazione-levitazione dei sistemi di trasporto Maglev: unità dotate di induttori di tipo puramente elettromagnetico (cioè equipaggiate con sole bobine) e unità con induttori di tipo ibrido, comprendenti magneti permanenti (MP, per la generazione del flusso di polarizzazione) e bobine (per la stabilizzazione della levitazione);
- descrizione di alcune caratteristiche costruttive e funzionali del prototipo di piattaforma di levitazione realizzato c/o i nostri laboratori, per sperimentare diversi aspetti della sospensione elettromagnetica attiva.

## **Tipologie strutturali e modelli circuitali dei dispositivi di levitazione.**

Le configurazioni costruttive dei dispositivi di levitazione, effettivamente realizzate nei sistemi sperimentali di trasporto di tipo Maglev e/o proposte in letteratura, sono assai numerose e sarebbe al di là dei limiti del presente lavoro operare un esauriente confronto fra tutte: si fisserà, pertanto, l'attenzione su alcune tipologie fondamentali, la cui analisi si possa ritenere rappresentativa delle caratteristiche di ciascuna categoria.

La fig.1 mostra la struttura schematica delle tre tipologie di unità polare di levitazione (nel seguito denominata sinteticamente levitatore) esaminate nel seguito, con le dimensioni principali (N.B.: nel primo tipo sono quotati alcuni dettagli costruttivi comuni anche agli altri, anche se non ripetuti, per semplicità di rappresentazione).

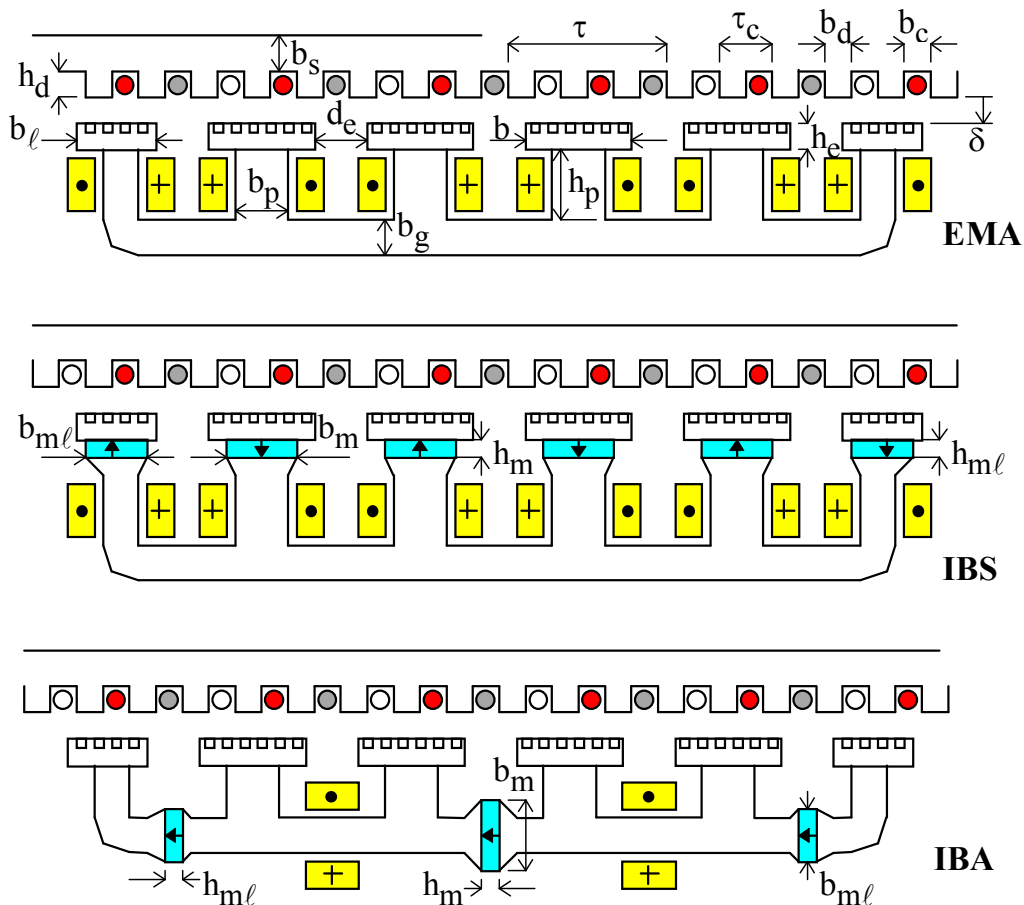


Fig.1 - Struttura schematica dei 3 tipi di unità polari di levitazione-eccitazione considerate nello studio: EMA = levitatore ElettroMagnetico con soli Avvolgimenti di eccitazione; IBS = levitatore di tipo Ibrido (avvolgimenti + magneti permanenti), con configurazione Simmetrica; IBA = levitatore di tipo Ibrido (avvolgimenti + magneti permanenti), con configurazione Asimmetrica.

Valgono le seguenti osservazioni:

- la dimensione trasversale di ogni componente magnetico (rispetto al senso del moto) è la medesima, pari a  $\ell$ ;
- tutte le configurazioni sono esapolari e gli avvolgimenti di statore hanno  $q = 1$  cava / (polo-fase);
- le bobine rappresentate negli schemi possono essere uniche oppure sdoppiate: nel primo caso, la corrente che le percorre, con valore medio diverso da zero, ha contemporanea funzione di polarizzazione e regolazione; nel secondo caso, le due bobine svolgono separatamente tali funzioni;
- la lunghezza (nel senso del moto) delle espansioni laterali ( $b_\ell$ ) è, in generale, inferiore rispetto a quella delle espansioni centrali ( $b$ ); indicato con  $\sigma_\delta$  un coefficiente di riduzione laterale, si pone:

$$b_\ell = \sigma_\delta \cdot b \quad ; \quad 0.5 \leq \sigma_\delta \leq 1 \quad ; \quad (1)$$

- analogamente, nel caso di levitatore ibrido (IBS o IBA), i MP laterali hanno, in generale, altezza ( $h_{m\ell}$ ) e larghezza ( $b_{m\ell}$ ) differenti dalle corrispondenti dimensioni dei MP centrali ( $h_m$ ,  $b_m$ ); in particolare:

$$b_{m\ell} = \sigma_m \cdot b_m \quad ; \quad 0.5 \leq \sigma_m \leq 1 \quad ; \quad (2)$$

- nelle configurazioni dotate di MP non sono state rappresentati, per semplicità grafica, i necessari dispositivi meccanici di assemblaggio e inclusione dei MP (di tipo amagnetico): tali dispositivi hanno la indispensabile funzione di evitare che le sollecitazioni meccaniche (forze di levitazione e propulsione, vibrazioni e urti) possano scaricarsi sui MP stessi, provocandone la frantumazione.

La fig.2 mostra le reti magnetiche dei suddetti sistemi levitatore+pista, equivalenti agli effetti della levitazione: si noti che non sono considerate le f.m.m. equivalenti alle correnti di statore; pertanto, agli effetti della funzione di levitazione, si trascurerà l'effetto del funzionamento a carico del LSM.

Valgono le seguenti osservazioni e ipotesi di studio:

- nei tipi ibridi, i MP sono stati modellizzati mediante un bipolo magnetico attivo serie: per i MP centrali esso è costituito, come noto, da una f.m.m. equivalente interna  $M_m$  e da una riluttanza interna  $\theta_m$ , pari a:

$$M_m = H_0 \cdot h_m ; \quad \theta_m = \frac{h_m}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_m} = \frac{h_m}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot b_m \cdot \ell} ; \quad \mu_r = \frac{B_r / \mu_0}{H_0} , \quad (3)$$

dove  $H_0$  è la forza coercitiva del MP (valore di estrapolazione della curva di smagnetizzazione linearizzata),  $B_r$  la sua induzione residua,  $\mu_r$  la sua permeabilità reversibile relativa; i parametri relativi ai MP laterali hanno espressioni del tutto analoghe, salvo la sostituzione del pedice  $m\ell$  al pedice  $m$ ;

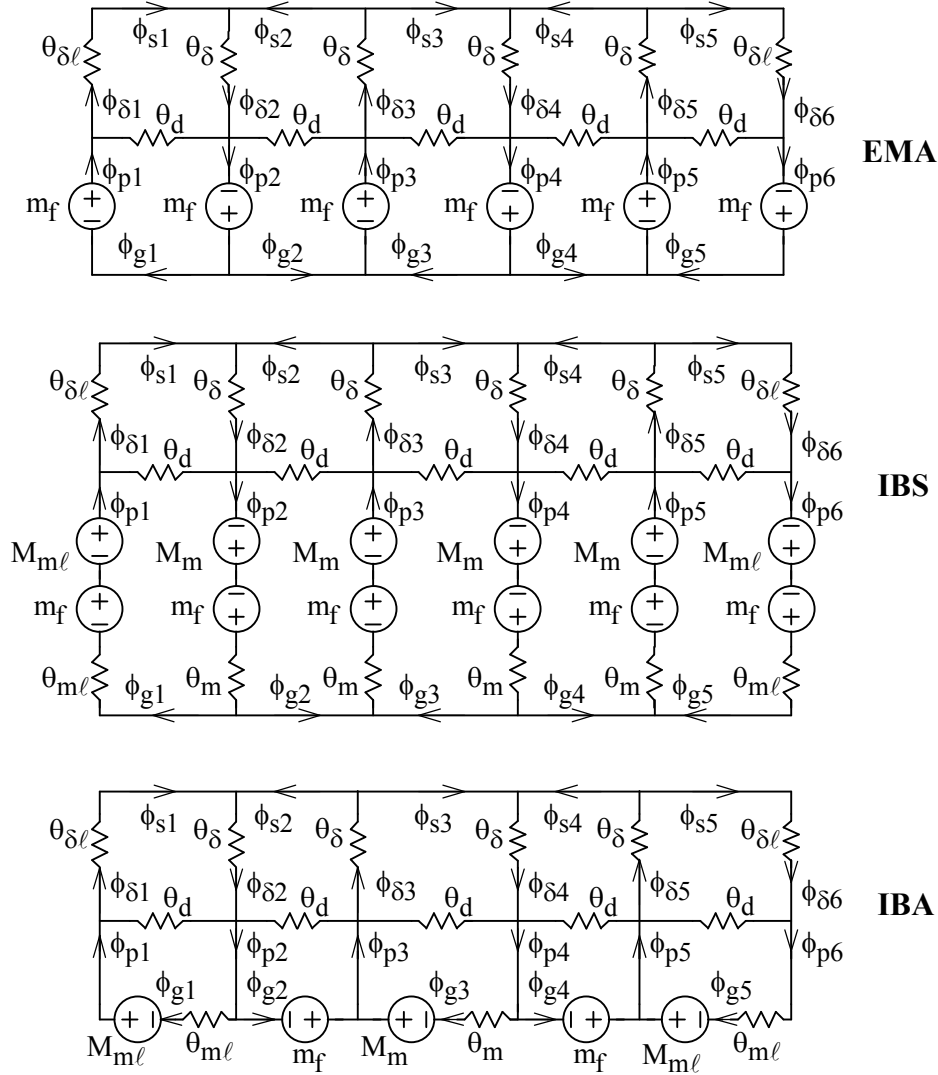


Fig.2 - Reti magnetiche dei sistemi di levitazione di fig.1, equivalenti agli effetti della levitazione.

- nel presente studio si ipotizza che il materiale di cui sono costituiti i MP sia una lega NdFeB; pertanto si ha:

$$B_r = 1.2 \text{ T} ; \quad H_0 = 900 \text{ kA / m} \rightarrow \mu_r \approx 1.06 ; \quad (4)$$

il valore di  $\mu_r$ , assai prossimo all'unità, evidenzia la proprietà, tipica dei MP, di presentare una riluttanza interna  $\theta_m$  di poco inferiore a quella di un tronco magnetico in aria avente le stesse dimensioni del MP;

- $m_f$  è la f.m.m. totale concatenata con ciascun polo (o giogo) avvolto, dovuta ad avvolgimenti unici o sdoppiati, comprensiva della f.m.m. di polarizzazione costante ( $M_b$ ,  $b = \text{biasing}$ ) e di regolazione ( $m_r$ );
- nel levitatore IBS, la f.m.m. totale agente lungo ciascun polo centrale ( $m_{totc}$ ) e laterale ( $m_{tot\ell}$ ) vale:

$$m_{totc} = m_f + M_m ; \quad m_{tot\ell} = m_f + M_{m\ell} ; \quad (5)$$

- tutti i tronchi ferromagnetici (corona del levitatore (g), corpi polari (p), corona di statore (s), denti di statore) si suppongono non saturi (in ottemperanza a esigenze essenziali di linearità e controllabilità della funzione di levitazione): non sono pertanto considerate le corrispondenti riluttanze equivalenti, assunte trascurabili;

– le riluttanze di dispersione interpolare  $\theta_d$  si assumono concentrate tra le espansioni e tutte uguali fra loro:

$$\theta_d \approx d_e / (\mu_o \cdot h_e \cdot \ell) \quad ; \quad (6)$$

– la presenza delle cave lungo la pista (per alloggiare gli avvolgimenti di statore del LSM) e di quelle lungo le espansioni polari (per alloggiare gli avvolgimenti del generatore lineare di bordo, LG, con cave di larghezza  $b_{cg}$  e passo  $\tau_{cg}$ ) è modellizzata mediante il prodotto dei rispettivi fattori di Carter:

$$k_c(\delta) \approx k_{cs}(\delta) \cdot k_{cg}(\delta) \quad ; \quad k_{cs}(\delta) \approx \frac{1}{1 - (b_c/\tau_c)/(1 + 5 \cdot \delta/b_c)} \quad ; \quad k_{cg}(\delta) \approx \frac{1}{1 - (b_{cg}/\tau_{cg})/(1 + 5 \cdot \delta/b_{cg})} \quad ; \quad (7)$$

– per effetto del fattore di Carter, la riluttanza al traferro è funzione non lineare del suo spessore:

$$\theta_\delta(\delta) = \frac{k_c(\delta) \cdot \delta}{\mu_o \cdot A_\delta} = \frac{k_c(\delta) \cdot \delta}{\mu_o \cdot b \cdot \ell} \quad ; \quad (8)$$

– è utile definire un coefficiente di dispersione:

$$\varepsilon_d(\delta) = \theta_\delta(\delta) / \theta_d \quad , \quad (9)$$

che esprime la dispersione interpolare in valore relativo: tale dispersione cresce al crescere del traferro;

– tutte le quantità relative ai tronchi laterali (pedice  $\ell$ ) hanno espressione analoga a quella dei corrispondenti parametri centrali, pur di mettere in conto i coefficienti  $\sigma_\delta$  e  $\sigma_m$  e la diversa altezza dei MP:

$$\theta_{\delta\ell} = \theta_\delta / \sigma_\delta \quad ; \quad \theta_{m\ell} = h_{m\ell} / (\mu_o \cdot \mu_r \cdot b_{m\ell}) = (h_{m\ell} / h_m) \cdot (\theta_m / \sigma_m) \quad ; \quad M_{m\ell} = M_m \cdot (h_{m\ell} / h_m) \quad . \quad (10)$$

## Elementi comuni nel dimensionamento dei levitatori.

La risoluzione analitica generale delle reti equivalenti di fig.2 (assumendo indipendenti e a priori non definiti i parametri  $b$ ,  $\ell$ ,  $\sigma_\delta$ ,  $b_m$ ,  $h_m$ ,  $\sigma_m$ ,  $h_{m\ell}$ , ...) risulta alquanto pesante e, d'altra parte, non è neppure necessaria.

E' più proficuo individuare il valore dei parametri in condizioni nominali (ovvero dimensionare il levitatore per le condizioni di equilibrio stazionario con traferro nominale ( $\delta_n$ ) e con forza levitante pari alla forza peso a pieno carico ( $F_{\delta n}$ )), studiando poi il comportamento del levitatore al variare di  $\delta$  e  $F_\delta$ .

L'unico parametro che si decide di non definire a priori è il coefficiente di riduzione laterale  $\sigma_\delta$ .

Le quantità elaborate nel seguito saranno accompagnate dal corrispondente valore numerico, in modo da evidenziarne gli aspetti quantitativi: a tale scopo, si fa riferimento ai dati riportati in Tab.I, relativi a un esempio di sistema Maglev; tali dati costituiscono le specifiche comuni di progetto dei diversi levitatori da studiare.

Tab.I - Dati di base di un sistema Maglev, adottati per l'analisi comparativa di diversi tipi di levitatore.

passo polare: $\tau$ [mm]	300	dimensione trasversale (per lato): $\ell$ [mm]	240
larghezza dente di statore: $b_d$ [mm]	58	larghezza cava di statore: $b_c$ [mm]	42
altezza dente di statore: $h_d$ [mm]	43	traferro geometrico nominale: $\delta_n$ [mm]	10
estensione espansioni centrali: $b$ [mm]	200	altezza delle espansioni: $h_e$ [mm]	28
passo di cava del generatore lin.: $\tau_{cg}$ [mm]	28.6	larghezza cava generatore lin.: $b_{cg}$ [mm]	8.6
forza nom. di levitaz. (1 levitat.) $F_{\delta n}$ [kN]	24	forza levit. x tara veicolo (1 levit.) $F_{\delta o}$ [kN]	18

Ovviamente, i dati di Tab.I sono compatibili con tutte le funzioni di un sistema Maglev; in particolare:

- il raggiungimento della velocità massima desiderata,  $v_M = 500$  km/h  $\approx 139$  m/s, da parte del veicolo richiede che l'inverter per l'alimentazione degli avvolgimenti statorici generi una frequenza massima di uscita pari a:  $f_M = v_M / (2 \cdot \tau) \approx 230$  Hz, ottenibile con le attuali tecnologie ai livelli di potenza necessaria;
- le dimensioni delle cave di statore sono commisurate alla corrente di statore  $I_{sn}$  necessaria a produrre la spinta propulsiva alla massima velocità ( $I_{sn} = 1000$  A) ;
- anche le dimensioni delle cave del LG corrispondono alle esigenze di generazione della potenza di bordo.

Il dimensionamento parte da una base di elaborazione comune, grazie alla circostanza che le sottoreti dei tronchi magnetici traferro-statore di fig.2 sono identiche per le tre tipologie considerate.

Adottando lo stesso valore (in modulo) di induzione nominale al traferro ( $B_{\delta n}$ ) sotto tutti i poli (valore medio sotto il polo, prodotto dalla sola f.m.m. di eccitazione), si ottiene:

$$B_{\delta n} = \sqrt{(2 \cdot \mu_o \cdot F_{\delta n}) / [(4 + 2 \cdot \sigma_\delta) \cdot A_\delta]} \quad , \quad (11)$$



dove si è indicato con  $A_\delta = b \cdot \ell$  la sezione al traferro delle espansioni centrali.

La (11) mostra che, fissata la forza levitante ( $F_{\delta n}$ ) e la geometria delle espansioni centrali ( $b$ ,  $\ell$ ), al diminuire di  $\sigma_\delta$ , deve aumentare l'induzione al traferro: con i dati di Tab.I e per valori estremi di  $\sigma_\delta$ , si ha:  $\sigma_\delta = 0.5 \rightarrow B_{\delta n} = 0.501$  T;  $\sigma_\delta = 1 \rightarrow B_{\delta n} = 0.458$  T (nei prototipi Transrapid di Emsland (Germania) risulta  $\sigma_\delta \approx 0.75$ ). E' importante osservare che un valore  $\sigma_\delta < 1$  rende il LSM non direttamente comparabile con la sua corrispondente versione rotante, in quanto la scelta  $\sigma_\delta < 1$  implica una importante dissimmetria costruttiva e funzionale del sistema di eccitazione. In base a queste osservazioni, la quantità

$$p_e = 4 + 2 \cdot \sigma_\delta \quad (12)$$

contenuta nella (11) può essere utilmente denominata "numero di poli efficaci" del levitatore.

In generale, il numero di poli efficaci,  $p_e = p_e(\sigma_\delta)$  è un numero non intero, ed è direttamente coinvolto nelle prestazioni del sistema Maglev di levitazione-propulsione. Infatti, applicando le note leggi generali per il calcolo delle azioni meccaniche del campo magnetico (basate sul principio dei lavori virtuali), si può mostrare che, in condizioni nominali, valgono, per ogni singolo levitatore, le seguenti espressioni:

– forza di levitazione nominale sviluppata da un levitatore:

$$F_{\delta n} = p_e \cdot \left( B_{\delta n}^2 / (2 \cdot \mu_0) \right) \cdot A_\delta ; \quad (13)$$

– forza di spinta nominale sviluppata da un levitatore:

$$F_{sn} = p_e \cdot \frac{2}{k_c(\delta_n)} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot B_{\delta n} \cdot I_{sn} \cdot \sin(\beta_n) \cdot \ell \cdot \xi ; \quad (14)$$

$\beta_n$  è l'angolo elettrico nominale fra l'asse magnetico dell'onda fondamentale della f.m.m. di statore e l'asse magnetico di campo, cioè l'asse geometrico del polo (di norma  $\beta_n = 65^\circ \div 75^\circ$ ); la quantità  $\xi$  è così definita:

$$\xi = \left[ 4 \cdot \sin\left(\frac{b}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + 2 \cdot \sin\left(\sigma_\delta \cdot \frac{b}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] / (4 + 2 \cdot \sigma_\delta) . \quad (15)$$

In base alla struttura della (15),  $\xi$  sembra dipendere da  $\sigma_\delta$ , come ne dipende  $p_e$ ; in realtà, ancora per le due situazioni limite di  $\sigma_\delta$  si ottiene:  $\sigma_\delta = 0.5 (\rightarrow p_e = 5$  poli eff./levit.)  $\rightarrow \xi = 0.893$ ;  $\sigma_\delta = 1 (\rightarrow p_e = 6$  poli eff./levit.)  $\rightarrow \xi = 0.866$  (variazione del 3% circa, dunque relativamente modesta).

In conclusione, la (13) e la (14) evidenziano la interessante proprietà che le azioni meccaniche globali di un levitatore con espansioni di estremità a sezione ridotta sono calcolabili in base al valore di forza che compete un polo centrale, moltiplicato per il numero di poli efficaci  $p_e$  del levitatore.

Tornando all'analisi della sola funzione di levitazione, si indichi con  $\phi_{\delta n}$  e con  $\phi_{\delta \ell n}$  rispettivamente il flusso nominale sotto le espansioni centrali e sotto quelle laterali:

$$\phi_{\delta n} = B_{\delta n} \cdot A_\delta ; \quad \phi_{\delta \ell n} = \sigma_\delta \cdot \phi_{\delta n} , \quad (16)$$

e con  $\varepsilon_{dn} = \varepsilon_d(\delta_n) = 0.018$  il coefficiente di dispersione in corrispondenza al traferro nominale.

Dall'analisi delle reti di fig.2, si ottengono le seguenti espressioni dei flussi nominali, con i versi ivi indicati:

$$\phi_{\delta 1n} = \phi_{\delta 6n} = \phi_{\delta \ell n} = \sigma_\delta \cdot \phi_{\delta n} ; \quad \phi_{\delta 2n} = \phi_{\delta 3n} = \phi_{\delta 4n} = \phi_{\delta 5n} = \phi_{\delta n} , \quad (17)$$

$$\phi_{s 1n} = \phi_{s 3n} = \phi_{s 5n} = \sigma_\delta \cdot \phi_{\delta n} ; \quad \phi_{s 2n} = \phi_{s 4n} = (1 - \sigma_\delta) \cdot \phi_{\delta n} , \quad (18)$$

$$\phi_{p 1n} = \phi_{p 6n} = (1 + 2 \cdot \varepsilon_{dn} / \sigma_\delta) \cdot \sigma_\delta \cdot \phi_{\delta n} ; \quad \phi_{p 2n} = \phi_{p 3n} = \phi_{p 4n} = \phi_{p 5n} = (1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}) \cdot \phi_{\delta n} , \quad (19)$$

$$\phi_{g 1n} = \phi_{g 3n} = \phi_{g 5n} = (1 + 2 \cdot \varepsilon_{dn} / \sigma_\delta) \cdot \sigma_\delta \cdot \phi_{\delta n} ; \quad \phi_{g 2n} = \phi_{g 4n} = (1 - \sigma_\delta + 2 \cdot \varepsilon_{dn}) \cdot \phi_{\delta n} . \quad (20)$$

Prescindendo, per ora, dai valori di f.m.m. e dai parametri dei MP che consentono di avere questa distribuzione di flussi al traferro e nei diversi tronchi ferromagnetici, si possono già fare alcune considerazioni circa la scelta del coefficiente di riduzione laterale  $\sigma_\delta$  nel campo  $0.5 \leq \sigma_\delta \leq 1$ :

- per quanto riguarda l'induzione al traferro, entrambi i valori  $B_{\delta n}$  precedentemente ottenuti appaiono, di per sé, compatibili con i margini di linearità magnetica che la funzione di levitazione esige;
- circa i corpi polari, i flussi nei corpi polari centrali non dipendono da  $\sigma_\delta$ , mentre i flussi nei corpi polari di estremità variano, in pratica, in proporzione di quelli corrispondenti al traferro;
- per quanto riguarda i gioghi magnetici di statore e del levitatore, si ha una notevole, analoga influenza di  $\sigma_\delta$  (cui si aggiunge il contributo della dispersione, di minore entità):
  - la scelta  $\sigma_\delta = 1$  rende uguali tutti i flussi al traferro, con distribuzione "a poli accoppiati": i flussi dei gioghi statorici pari sono nulli, come pure avviene praticamente per quelli pari del levitatore (se si prescinde dalla dispersione,  $2 \cdot \varepsilon_{dn} \cdot \phi_{\delta n}$ ); d'altra parte i flussi dei gioghi dispari risultano pari ai flussi di polo al traferro: ne consegue un dimensionamento assi gravoso dello spessore dei gioghi di levitatore ( $b_g$ ) e di statore ( $b_s$ ); tale circostanza è particolarmente sfavorevole per lo statore, data la sua notevole estensione;



– la scelta  $\sigma_\delta = 0.5$  è la migliore agli effetti dei gioghi, in quanto tutti i flussi in tali tronchi sono uguali fra loro; in particolare, per lo statore tali flussi sono pari a metà del flusso al traferro dei poli centrali. E' interessante determinare il valore del rapporto  $\rho_s(\sigma_\delta) = b_s(\sigma_\delta)/b_s(0.5)$ , tra lo spessore del giogo statorico per un generico  $\sigma_\delta$  e il valore di tale spessore per  $\sigma_\delta = 0.5$  (supponendo invariata la forza levitante richiesta e l'induzione  $B_{sn}$  nominale di dimensionamento del giogo); dalle elaborazioni risulta:

$$\rho_s(\sigma_\delta) = \frac{\sigma_\delta}{\sqrt{2 + \sigma_\delta}} \cdot \frac{\sqrt{2 + 1/2}}{1/2} ; \quad (21)$$

Poiché  $\ell$  e la lunghezza della pista sono pure invarianti,  $\rho_s$  coincide anche con il rapporto delle corrispondenti masse di materiale ferromagnetico; considerando, inoltre, che la zona dentata ha una densità di massa lineare media circa dimezzata ( $b_c/\tau_c \approx 0.5$ ),  $\rho_s(\sigma_\delta)$  indica sostanzialmente il sovradimensionamento ferromagnetico della pista statorica. In Tab.II sono riportati alcuni valori del suddetto rapporto.

*Tab.II - Rapporto  $\rho_s(\sigma_\delta) = b_s(\sigma_\delta)/b_s(0.5)$  fra lo spessore (massa) del giogo statorico al variare di  $\sigma_\delta$  e lo spessore (massa) minimo (per  $\sigma_\delta = 0.5$ ), a parità di forza levitante richiesta.*

$\sigma_\delta$	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1
$\rho_s(\sigma_\delta)$	1	1.09	1.18	1.26	1.35	1.43	1.51	1.59	1.67	1.75	1.83

Da tali valori risulta confermato l'inaccettabile aggravio corrispondente al valore  $\sigma_\delta = 1$  (+83 %), mentre nel caso dei prototipi Transrapid ( $\sigma_\delta = 0.75$ ) tale aggravio, pur rilevante, è circa dimezzato (+43%). Sorge spontaneo chiedersi perché operare una scelta diversa da quella ottima ( $\sigma_\delta = 0.5$ ): evidentemente l'adozione di un valore intermedio è un compromesso tra l'esigenza di limitare il dimensionamento dello statore e quella di non squilibrare eccessivamente i flussi al traferro; tale esigenza non sembrerebbe però giustificabile in base agli effetti di tale squilibrio sulla entità delle azioni meccaniche (le (13) e (14) evidenziano la proporzionalità di tali azioni con il numero di poli efficaci  $p_e$ ); piuttosto, potrebbero avere qualche ruolo alcune considerazioni sull'effetto della alternanza denti-cave (pulsazioni di flusso) e sulla forma d'onda del campo al traferro. Pertanto, per generalità, l'analisi seguente manterrà ancora come variabile il coefficiente  $\sigma_\delta$ .

## Calcolo delle bobine e dei MP e analisi delle prestazioni.

Nel seguito si porta a compimento il calcolo di dimensionamento del levitatore, specializzando la procedura in relazione alle diverse caratteristiche di ciascuna tipologia e discutendone le possibili varianti. Tale calcolo definisce le caratteristiche delle f.m.m. di bobina, quelle dei MP e le sezioni ferromagnetiche basandosi sulle condizioni nominali; si verificano, poi, le prestazioni in diverse altre condizioni, fra le quali: la levitazione a carico nullo, il processo di sollevamento, la regolazione della levitazione al variare del traferro, le condizioni di funzionamento e di controllabilità per uno spessore di traferro tendente a zero. Si determinano, inoltre, le masse di rame e di materiale ferromagnetico di pista e levitatore, le masse degli eventuali MP, le perdite negli avvolgimenti nelle condizioni nominali e nelle altre di interesse principale.

### Il levitatore elettromagnetico con soli avvolgimenti (EMA).

Il calcolo delle f.m.m. necessarie a far circolare nella rete magnetica EMA di fig.2 i flussi nominali (17)÷(20) è semplice: si riconosce, infatti, che le (17)÷(20) sono soddisfatte da valori di f.m.m. tutti uguali (in modulo):

$$M_{fn} = \theta_{\delta n} \cdot \phi_{\delta n} , \quad (22)$$

dove la riluttanza nominale al traferro dei poli centrali  $\theta_{\delta n} = \theta_\delta(\delta_n)$  è data da:

$$\theta_{\delta n} = \frac{k_{cn} \cdot \delta_n}{\mu_o \cdot A_\delta} = \frac{k_c(\delta_n) \cdot \delta_n}{\mu_o \cdot b \cdot \ell} . \quad (23)$$

Più in generale, la soluzione della rete EMA di fig.2 per qualunque condizione è data dalle seguenti equazioni:

$$\phi_\delta = m_f / \theta_\delta , \quad (24)$$

$$\phi_{\delta 1} = \phi_{\delta 6} = \phi_{\delta \ell} = \sigma_\delta \cdot \phi_\delta ; \quad \phi_{\delta 2} = \phi_{\delta 3} = \phi_{\delta 4} = \phi_{\delta 5} = \phi_\delta , \quad (25)$$

$$\phi_{s1} = \phi_{s3} = \phi_{s5} = \sigma_\delta \cdot \phi_\delta ; \quad \phi_{s2} = \phi_{s4} = (1 - \sigma_\delta) \cdot \phi_\delta , \quad (26)$$

$$\phi_{p1} = \phi_{p6} = (1 + 2 \cdot \varepsilon_d / \sigma_\delta) \cdot \sigma_\delta \cdot \phi_\delta ; \quad \phi_{p2} = \phi_{p3} = \phi_{p4} = \phi_{p5} = (1 + 4 \cdot \varepsilon_d) \cdot \phi_\delta , \quad (27)$$

$$\phi_{g1} = \phi_{g3} = \phi_{g5} = (1 + 2 \cdot \varepsilon_d / \sigma_\delta) \cdot \sigma_\delta \cdot \phi_\delta ; \quad \phi_{g2} = \phi_{g4} = (1 - \sigma_\delta + 2 \cdot \varepsilon_d) \cdot \phi_\delta . \quad (28)$$

Si riconosce come le (17), (18), (19), (20), (22), considerate per il dimensionamento in condizioni nominali, costituiscono un caso particolare delle (24)-(28); queste ultime confermano che le considerazioni relative al dimensionamento dei gioghi sono estendibili ad una condizione di funzionamento generica del levitatore.

Rielaborando e generalizzando la (13) si ottiene la forza di levitazione di un levitatore:

$$F_\delta = p_e \cdot \frac{\phi_\delta^2}{2 \cdot \mu_o \cdot A_\delta} = \frac{p_e}{2 \cdot \mu_o \cdot A_\delta} \cdot \frac{m_f^2}{\theta_\delta^2} = p_e \cdot \frac{\mu_o}{2} \cdot A_\delta \cdot \frac{m_f^2}{(k_c(\delta) \cdot \delta)^2} . \quad (29)$$

L'osservazione delle (22), (23), (24) e (29) suggerisce l'importanza quantitativa del fattore di Carter: la Tab.III mostra alcuni valori di  $k_c$  al variare di  $\delta$ , calcolati in base alla geometria riassunta nei dati di Tab.I.

Tab.III - Valori del fattore di Carter al variare dello spessore di traferro, in base ai dati di Tab.I.

$\delta$ [mm]	0	5	10	15	20	25	30
$k_c(\delta)$	2.463	1.470	1.294	1.215	1.170	1.140	1.119

Valgono le seguenti osservazioni:

- nel caso presente, in condizioni nominali si ha  $k_{cN} \approx 1.29$ : si tratta di un valore elevato, dovuto prevalentemente alla apertura delle cave di statore ( $k_{cSN} \approx 1.24$ ); considerando che nella (29)  $k_c$  compare al quadrato ( $k_{cN}^2 \approx 1.67$ ), è evidente l'assoluta importanza di tenerne adeguatamente conto, in particolare nel calcolo di  $M_{fn}$  tramite la (22), valore cui è sostanzialmente legato il dimensionamento dell'avvolgimento;
- $k_c$  varia sensibilmente con il traferro, in senso, peraltro, favorevole; infatti, si consideri dapprima che le strutture ferromagnetiche siano lisce: posta pari a 1 la f.m.m.  $M_{fpu}$  necessaria a far circolare il flusso  $\phi_{\delta n}$ , il mantenimento di un flusso invariato a seguito di un raddoppio del traferro da  $\delta_n$  a  $2 \cdot \delta_n$  richiede  $M_{fpu} = 2$ , ovvero un raddoppio della f.m.m.; viceversa, per strutture dentate con i valori di  $k_c$  di Tab.III, la circolazione di un flusso  $\phi_{\delta n}$  per  $\delta = \delta_n$  richiede una f.m.m. relativa pari a  $M_{fpu} = 1.294$ , e il mantenimento di tale flusso per  $\delta = 2 \cdot \delta_n$  richiede  $M_{fpu} \approx 2 \cdot 1.170 = 2.340 < 2 \cdot 1.294 = 2.588$ : tale valore è ancora superiore a quello del caso liscio (solo ideale), ma presenta, rispetto all'atteso raddoppio, una riduzione di circa il 10%.

### Polarizzazione, stabilizzazione e controllo dei levitatori per veicoli Maglev EMS.

Le precedenti osservazioni relative al funzionamento al variare del traferro suggeriscono l'opportunità di qualche precisazione sulle modalità di alimentazione e controllo degli avvolgimenti; le considerazioni che seguono saranno riferite al sistema elettromagnetico EMS di tipo EMA, ma sono facilmente generalizzabili. Come noto, un levitatore EMS, intrinsecamente instabile, richiede, per poter funzionare, tre tipi di dispositivi:

- alimentatori a corrente controllata, con regolazione rapida della corrente iniettata nelle bobine;
- trasduttore dello spessore di traferro, con adatte caratteristiche dinamiche e di immunità ai disturbi;
- regolatore per il controllo della corrente istantanea erogata dagli alimentatori.

Alle correnti erogate dagli alimentatori corrisponde, istante per istante, la f.m.m.  $m_f(t)$  che deve essere prodotta attorno a ciascun polo; schematizzando, la  $m_f(t)$  si può pensare costituita dai seguenti contributi:

$$m_f(t) = M_b + m_r(t) = M_b + m_{rs}(t) + m_{rc}(t) ; \quad (30)$$

- $M_b$  ( $b = \text{biasing}$ ) è una f.m.m. costante di polarizzazione, destinata a produrre il flusso necessario a generare una forza di levitazione media uguale al peso gravante sul levitatore ( $M_b$  è pari a  $M_{fn}$  con veicolo a pieno carico, mentre è inferiore a carico ridotto o con tara veicolo - nel caso dei dati di Tab.I,  $F_{\delta 0} = (3/4) \cdot F_{\delta n} \rightarrow M_{f0} = (\sqrt{3}/2) \cdot M_{fn} = 0.866 \cdot M_{fn}$  -); se idealmente non ci fossero disturbi e si potesse mantenere il sistema in condizioni di equilibrio instabile,  $M_b$  sarebbe l'unica componente di f.m.m. presente;
- $m_{rs}(t)$  ( $r = \text{regolazione}$ ,  $s = \text{stabilizzazione}$ ) è la componente della f.m.m. di regolazione destinata a stabilizzare la levitazione: questa f.m.m. corrisponde al contributo che, con veicolo fermo e in assenza di perturbazioni esterne (salita e discesa passeggeri, spostamenti del carico, raffiche di vento,...) stabilizza la levitazione (grazie alla catena trasduttore+regolatore+alimentatore), mantenendo il traferro effettivo in un intorno ristretto di quello nominale: si riconosce che  $m_{rs}(t)$  è a valore medio nullo, è di tipo aperiodico (si può assimilare al "rumore bianco") e ha ampiezze sensibilmente inferiori alla componente  $M_b$ ;
- $m_{rc}(t)$  ( $r = \text{regolazione}$ ,  $c = \text{compensazione}$ ) è la componente della f.m.m. regolante destinata a compensare le forze di disturbo, principalmente originate durante la marcia del veicolo dalle irregolarità della pista; le caratteristiche della forma d'onda di  $m_{rc}(t)$  dipendono, da un lato, dalla natura di tali irregolarità,

dall'altro dalla legge di controllo implementata nel regolatore:

- le irregolarità della pista sono, per lo più, di tipo spazialmente periodico (ad esempio, nel caso di pista sopraelevata con campate a trave appoggiate a piloni, la sequenza punti angolosi - frecce di campata della deformata di ciascuna trave): la legge temporale con la quale tali irregolarità si trasferiscono al veicolo in moto dipende dalla velocità del veicolo stesso;
- le leggi di controllo sperimentate e/o proposte in letteratura sono assi numerose e sofisticate: in genere tali leggi sono costruite in modo da contemperare (con vari gradi di priorità e/o con diversi fattori di peso) tre importanti esigenze: il contenimento della variazione di traferro (in modo da evitare il rischio di contatto fra veicolo e pista), la limitazione della accelerazione normale alla direzione del moto (per garantire un accettabile comfort di marcia ai passeggeri), la riduzione della potenza necessaria al controllo (per limitare la potenza di dimensionamento degli alimentatori elettronici e le perdite di levitazione);

la f.m.m. di compensazione  $m_{rc}(t)$  si può dunque ritenere, almeno in prima approssimazione, di tipo periodico; la sua ampiezza, dipendente dall'entità delle irregolarità e dalla legge di controllo, si può ritenere pari a una frazione significativa della  $M_b$ , dunque assi superiore al contributo di stabilizzazione  $m_{rs}(t)$ .

In conclusione, in base alle precedenti considerazioni e agli effetti dei calcoli di dimensionamento, nella (30) si può assumere che  $m_r(t)$  sia prevalentemente costituita dalla componente di compensazione  $m_{rc}(t)$ .

L'analisi comparativa dettagliata delle diverse strategie di controllo richiederebbe approfondimenti ben più ampi dello spazio qui disponibile: si vuole quindi proporre solo qualche considerazione qualitativa.

E' utile ricordare che nei veicoli Maglev è di norma utilizzato anche un dispositivo di sospensione secondario (riconducibile ad un sistema molla+smorzatore), interposto fra ciascun levitatore esapolare e la cassa del veicolo, con lo scopo di assorbire e smorzare parte delle oscillazioni che tali sottosistemi si trasmettono reciprocamente. Questo accoppiamento presenta importanti vantaggi sulla dinamica verticale del veicolo: si supponga, in via ipotetica, che, durante il moto del veicolo e in presenza di irregolarità della pista, il sistema di controllo agisca in modo da mantenere il traferro in un ristretto intorno del valore nominale; tale tecnica di levitazione implica uno stretto inseguimento verticale della pista da parte del levitatore, ovvero l'applicazione di rilevanti accelerazioni verticali al veicolo stesso. Ne consegue la necessità di sviluppare rapidamente elevate forze levitanti, dunque di iniettare nelle bobine rilevanti f.m.m. di compensazione: in assenza di un sistema secondario di sospensione, cioè con collegamento rigido tra levitatore e veicolo, il funzionamento sarebbe del tutto insoddisfacente, in quanto la massa da accelerare sarebbe quella dell'intero veicolo: da un lato, questo richiederebbe correnti di compensazione assolutamente intollerabili, dall'altro, trasferirebbe anche ai passeggeri le accelerazioni normali, generando una condizione di marcia assai tormentata. Evidentemente le tecniche di controllo precedentemente citate, insieme alla adozione di ben calibrati dispositivi di sospensione secondaria, hanno proprio lo scopo di minimizzare le correnti di compensazione e i disagi ai passeggeri.

In realtà, è importante osservare che, fatta salva la imprescindibile esigenza di evitare il contatto veicolo-pista (evenienza che comunque si previene principalmente con una accurata realizzazione della pista), non c'è alcuna reale necessità di inseguimento delle irregolarità della pista: al limite, la condizione migliore consiste nell'ignorare del tutto tali irregolarità, controllando le correnti in modo da mantenere la forza levitante istantanea sviluppata uguale alla forza peso del veicolo; in tal modo il levitatore viaggia nella direzione del moto in totale assenza di moti verticali, pertanto senza trasmettere vibrazioni alla cassa e ai passeggeri.

Questa modalità di funzionamento, che è la migliore dal punto di vista del comfort di marcia, è anche quella più vantaggiosa riguardo alla entità delle correnti di compensazione: lo scopo di tali correnti, infatti, non è quello di produrre elevate forze acceleranti, aumentando i flussi al traferro tanto più intensamente quanto maggiore è la massa rigida da accelerare e quanto più rapido è l'inseguimento del riferimento di traferro; viceversa, si tratta di controllare le correnti di compensazione in modo da mantenere costante la forza levitante, cioè mantenere costanti i flussi al traferro, pari al valore che essi avrebbero in condizioni di equilibrio statico.

Per queste caratteristiche, la descritta modalità di controllo della levitazione può essere denominata controllo "a forza levitante costante": nel caso EMS di tipo EMA, qui considerato, essa coincide anche con il controllo "a flusso di traferro costante".

Il tipo di trasduttori da impiegare per realizzare questa modalità di funzionamento e la messa a punto della strategia di controllo a forza levitante costante, sono tuttora oggetto di ricerca da parte della U.O. di Milano: si ritiene, però che tale modalità di controllo della levitazione sia fattibile, tanto che l'analisi seguente verrà condotta ipotizzando la sua adozione.

Tornando alla (30), si possono distinguere due tipi di levitatori EMS di tipo EMA:

- levitatore a bobina singola (EMA1), con un avvolgimento unico di  $N$  spire; la (30) in tal caso diviene:

$$m_f(t) = M_b + m_r(t) = N \cdot I_b + N \cdot i_r(t) = N \cdot (I_b + i_r(t)) ; \quad (31)$$

– levitatore a bobine separate (EMA2), con un avvolgimento di polarizzazione di  $N_b$  spire e un avvolgimento di regolazione di  $N_r$  spire, galvanicamente separato dal precedente; in questo caso la (30) diviene:

$$m_f(t) = M_b + m_r(t) = N_b \cdot I_b + N_r \cdot i_r(t) . \quad (32)$$

L'adozione di un levitatore di tipo EMA2 ha come vantaggio principale quello di un dimensionamento separato, e quindi più ridotto, dell'alimentatore di polarizzazione, funzionante a corrente costante (dunque con ridotte esigenze di risposta dinamica) e dell'alimentatore di regolazione, cui si richiede di erogare correnti rapidamente variabili, ma di ampiezza modesta (virtualmente nulle, nel caso di pista priva di irregolarità).

Si potrebbe obiettare che anche l'alimentatore di polarizzazione deve possedere buone caratteristiche di controllo della corrente, in quanto, durante le variazioni di flusso, negli avvolgimenti di polarizzazione nascono delle f.e.m. che tale alimentatore deve compensare istante per istante, al fine di mantenere costante la corrente di polarizzazione: in realtà, le supposte variazioni di flusso, provocate dalle irregolarità della pista, si verificano con fasi temporali diverse in avvolgimenti di polarizzazione di levitatori successivi del veicolo; è pertanto sufficiente collegare in serie un adeguato numero di avvolgimenti di polarizzazione di diversi levitatori, così da annullare, in pratica, la suddetta f.e.m. indotta; in conclusione, l'alimentatore di polarizzazione deve generare una tensione sostanzialmente pari alla c.d.t. resistiva delle bobine da esso alimentate in serie.

Naturalmente, le sei bobine di regolazione di ogni levitatore sono pure connesse in serie fra loro, ma alimentate da un proprio alimentatore di regolazione, a garanzia di una regolazione indipendente per ogni levitatore.

I vantaggi di questa separazione sono, purtroppo, pagati con un incremento della massa di rame delle bobine e con un uguale aumento delle perdite di levitazione. Per quantificare tale incremento, è necessario applicare alle (31) e (32) l'operatore valore medio quadratico (RMS); come noto, per una grandezza  $x(t)$  esso è dato da:

$$X = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \cdot \int_0^{\Delta t} (x(t))^2 \cdot dt} . \quad (33)$$

La (33) coinciderebbe con la ben nota definizione di valore efficace, se non fosse che nel nostro caso  $x(t)$  non è, in realtà, una funzione periodica: è tuttavia ragionevole ritenere che il valore calcolato con la (33) converga ad un risultato stabile e univoco, pur di assumere una durata di osservazione  $\Delta t$  adeguatamente prolungata.

Nel nostro caso l'uso della (33) ha un significato termico e di dimensionamento, essendo legato alle perdite smaltite dalle bobine verso l'ambiente, sotto il salto termico ammissibile per la loro classe di isolamento: sia  $S$  il valore RMS della densità di corrente superficiale compatibile con tale corretto smaltimento delle perdite.

Indicato con  $M_r$  il valore RMS della f.m.m. di regolazione, applicando la (33) alla (31), il valore RMS  $M_f$  della f.m.m.  $m_f(t)$  del levitatore EMA1 risulta dato da:

$$M_f = \sqrt{M_b^2 + M_r^2} = S \cdot A_{cu1} ; \quad (34)$$

si osservi che la f.m.m. RMS  $M_f$  della (34) ha un significato di dimensionamento, essendo stata espressa in funzione della densità di corrente  $S$  e della totale sezione di rame della bobina  $A_{cu1} = A_{spira} \cdot N$ .

Viceversa, il levitatore di tipo EAM2, per effetto della separazione delle bobine, richiede che queste vengano dimensionate in base al proprio valore RMS, cioè:

$$M_b = S \cdot A_{cub} ; \quad M_r = S \cdot A_{cur} ; \quad (35)$$

detta

$$A_{cu2} = A_{cub} + A_{cur} \quad (36)$$

la sezione totale di rame del levitatore EMA2, è interessante analizzare la quantità  $\sigma_{cu}$ , rapporto fra la sezione  $A_{cu2}$  e la sezione  $A_{cu1}$ : si noti che, supponendo una medesima lunghezza della spira media ( $\ell_s$ ),  $\sigma_{cu}$  coincide anche con il corrispondente rapporto fra le masse e fra le perdite totali di levitazione ( $P_{pcu}$ ):

$$\sigma_{cu} = \frac{A_{cu2}}{A_{cu1}} = \frac{A_{cu2} \cdot \ell_s \cdot \rho_{cu} \cdot S^2}{A_{cu1} \cdot \ell_s \cdot \rho_{cu} \cdot S^2} = \frac{P_{pcu2}}{P_{pcu1}} . \quad (37)$$

Applicando alla (37) le (34), (35) e (36) si giunge alla seguente espressione

$$\sigma_{cu} = \frac{M_b + M_r}{\sqrt{M_b^2 + M_r^2}} = \frac{1 + M_r/M_b}{\sqrt{1 + (M_r/M_b)^2}} = \frac{1 + M_{rpu}}{\sqrt{1 + M_{rpu}^2}} , \quad (38)$$

dove si è indicato con  $M_{\text{rpu}}$  la f.m.m. RMS di regolazione in valore relativo, riferita alla f.m.m.  $M_b$ ; la (38) esprime il sovradimensionamento e l'incremento delle perdite del sistema EMA2 rispetto al sistema EMA1, al crescere della componente di regolazione: in Tab.IV sono mostrati i valori di  $\sigma_{\text{cu}}$  per alcuni valori di  $M_{\text{rpu}}$ .

Tab.IV - Rapporto  $\sigma_{\text{cu}}$  di sovradimensionamento (e di incremento di perdite) del sistema EMA2 rispetto al sistema EMA1, per diversi valori della f.m.m.  $M_{\text{rpu}}$  di regolazione, riferita a quella di polarizzazione  $M_b$ .

$M_{\text{rpu}}$	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
$\sigma_{\text{cu}}$	1	1.049	1.095	1.137	1.177	1.213	1.245

Si analizzano ora le condizioni di levitazione diverse da quelle nominali, fra le quali la più gravosa è certamente il processo di sollevamento da fermo: ritenendo che un sistema Maglev possa normalmente funzionare accettando oscillazioni di traferro nel campo  $0.5 \cdot \delta_n \leq \delta \leq 1.5 \cdot \delta_n$ , in condizioni di riposo il traferro è massimo, usualmente  $\delta_M = 2 \cdot \delta_n$ . In realtà, la condizione di sollevamento, come la sua opposta, cioè quella per traferro tendente a zero, sono casi particolari della levitazione a traferro variabile.

Noto il peso gravante sul levitatore, ne consegue un valore della f.m.m.  $M_b$  (da  $M_b = M_{f_0}$  per  $F_\delta = F_0$ , cioè con veicolo vuoto, fino alla condizione di pieno carico, con  $M_b = M_{f_n}$  per  $F_\delta = F_{\delta_n}$ ). In corrispondenza al traferro nominale, dalla (29), per un generico valore di carico  $F_\delta$ , si ottiene:

$$F_\delta = p_e \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot A_\delta \cdot \left[ M_b^2 / (k_c(\delta_n) \cdot \delta_n)^2 \right] ; \quad (39)$$

Poiché si suppone che, al variare del traferro, si debba produrre sempre la stessa forza levitante  $F_\delta$  (in base alla tecnica di controllo a forza levitante costante), dal rapporto membro a membro della (29) e della (39), considerando anche la (30), si ottiene:

$$m_r(t) = M_b \cdot \left\{ \frac{k_c[\delta(t)]}{k_c(\delta_n)} \cdot \frac{\delta(t)}{\delta_n} - 1 \right\} . \quad (40)$$

La (40), valida in qualunque condizione di carico, evidenzia che:

- la f.m.m. di regolazione, virtualmente nulla per  $\delta = \delta_n$  (a meno della componente di stabilizzazione) cresce meno che linearmente con l'aumento di  $\delta$  (grazie alla corrispondente riduzione del fattore di Carter), assumendo il valore massimo nella condizione di sollevamento (per  $\delta_M = 2 \cdot \delta_n = 20 \text{ mm} \rightarrow m_r = 1.81 \cdot M_b$ );
- poiché la  $M_b$  è tanto inferiore quanto minore è la forza levitante  $F_\delta$  da produrre (secondo il legame non lineare espresso nella (39)), altrettanto minore è la  $m_r$ , a parità di traferro;
- dalla (40) si dovrebbe desumere che  $m_r$  tende al valore  $-M_b$  per spessore di traferro tendente a zero: questo evidenzia la sensibile differenza tra la soluzione EMA1 (per la quale sarebbe  $i_f = 0$ ) e la soluzione EMA2 (per la quale si avrebbe  $N_r \cdot i_r = -N_b \cdot I_b$ , con entrambe le correnti diverse da zero); in realtà la (40) perde di validità per traferro nullo (la f.m.m. di regolazione deve sempre sopperire anche alle c.d.t.m. nelle parti ferromagnetiche, non più trascurabili rispetto alla tensione magnetica al traferro nel caso in cui  $\delta \rightarrow 0$ ).

Si consideri ora la situazione di regolazione con carico nominale, ovvero per  $F_\delta = F_{\delta_n}$ : in tale situazione la f.m.m. di polarizzazione vale  $M_b = M_{f_n}$ ; d'altra parte, dallo sviluppo della (22), la f.m.m.  $M_{f_n}$  è data da

$$M_{f_n} = U_{\delta_n} , \quad (41)$$

avendo indicato con  $U_{\delta_n}$  la tensione magnetica nominale al traferro:

$$U_{\delta_n} = k_{cn} \cdot \delta_n \cdot B_{\delta_n} / \mu_0 . \quad (42)$$

Indicando con  $m_{r_n}(t)$  la componente di regolazione della f.m.m., necessaria a mantenere il flusso nominale (quindi a sostenere il carico nominale) al variare del traferro, attraverso le (41) e (42), dalla (40) si ottiene:

$$m_{r_n}(t) = U_{\delta_n} \cdot \left\{ \frac{k_c[\delta(t)]}{k_c(\delta_n)} \cdot \frac{\delta(t)}{\delta_n} - 1 \right\} . \quad (43)$$

### **Il levitatore elettromagnetico ibrido simmetrico (IBS).**

Con riferimento alla rete IBS di fig.2, si tratta di determinare le dimensioni dei MP e il valore della f.m.m.  $M_{f_n}$  delle bobine che, in condizioni nominali, fanno circolare i flussi dati dalle (16)-(20). Osservando la rete IBS di fig.2 si riconosce che, sempre in condizioni nominali, esistono due soli tipi distinti di equazioni agli anelli magnetici nei flussi di polo e di traferro: una equazione, relativa a uno qualunque dei tre anelli centrali, fornisce:

$$M_m + M_{fn} = \theta_m \cdot \phi_{pn} + \theta_{\delta n} \cdot \phi_{\delta n} = [\theta_m \cdot (1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}) + \theta_{\delta n}] \cdot \phi_{\delta n} , \quad (44)$$

mentre l'altra equazione, riguardante uno dei due anelli laterali, è data da:

$$M_{m\ell} + M_m + 2 \cdot M_{fn} = [\theta_{m\ell} \cdot (\sigma_\delta + 2 \cdot \varepsilon_{dn}) + \theta_m \cdot (1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}) + 2 \cdot \theta_{\delta n}] \cdot \phi_{\delta n} . \quad (45)$$

Sottraendo la (44) dalla (45) si ottiene:

$$M_{m\ell} + M_{fn} = [\theta_{m\ell} \cdot (\sigma_\delta + 2 \cdot \varepsilon_{dn}) + \theta_{\delta n}] \cdot \phi_{\delta n} . \quad (46)$$

Si indichi con  $\chi$  il rapporto:

$$\chi = B_{MPn}/B_r \quad (47)$$

fra l'induzione nominale del MP e l'induzione residua;  $\chi$ , che può denominarsi "coefficiente di lavoro del MP", è una scelta di progetto, in quanto rappresenta, in valore relativo rispetto all'induzione residua, l'induzione di lavoro alla quale, in condizioni nominali, si fa funzionare il MP.

Detta  $A_{m\ell}$  la sezione del MP laterale, il flusso che lo attraversa in condizioni nominali, pari al flusso di polo ( $\phi_{p\ell n} = (\sigma_\delta + 2 \cdot \varepsilon_{dn}) \cdot \phi_{\delta n}$ ), è così esprimibile:

$$\phi_{p\ell n} = \chi \cdot B_r \cdot A_{m\ell} . \quad (48)$$

D'altra parte, esprimendo  $\phi_{p\ell n}$  in funzione di  $B_{\delta n}$  mediante la (16), dalla (48) si ottengono la sezione  $A_{m\ell}$  del MP laterale e la sua estensione longitudinale (nell'ipotesi qui assunta di profondità  $\ell$  di MP):

$$A_{m\ell} = A_\delta \cdot \frac{\sigma_\delta + 2 \cdot \varepsilon_{dn}}{\chi} \cdot \frac{B_{\delta n}}{B_r} , \quad b_{m\ell} = A_{m\ell}/\ell . \quad (49)$$

Ovviamente deve essere  $b_{p\ell} < b_{m\ell} < b_\ell$ , affinché il MP sia collocabile tra il corpo del polo e l'espansione.

Dalla (46), dalla (3) con pedice  $m\ell$ , e dalle (8), (16), (48), si ottiene l'altezza  $h_{m\ell}$  del MP laterale:

$$h_{m\ell} = \delta_n \cdot (1 - \rho_{fn}) \cdot \frac{k_{cn} \cdot \mu_r}{1 - \chi} \cdot \frac{B_{\delta n}}{B_r} , \quad \rho_{fn} = \frac{M_{fn}}{U_{\delta n}} \quad (50)$$

dove si è indicato con  $\rho_{fn}$  il contributo attivo di polarizzazione in condizioni nominali.

Le (49) e (50) sono relazioni di progetto del MP; riguardo alla (50) si può osservare che:

- $\rho_{fn}$  indica la frazione di  $U_{\delta n}$  prodotta dalla f.m.m. della bobina ( $0 \leq \rho_{fn} \leq 1$ ); correlativamente,  $(1 - \rho_{fn})$  rappresenta la quota parte prodotta dal MP; vi sono due condizioni limite:  $\rho_{fn} = 0$  (assenza di polarizzazione in corrente) e  $\rho_{fn} = 1$  (assenza di MP:  $h_{m\ell} = 0$ , ovvero coincidenza con un sistema EMA);
- indicata con  $\gamma_{MP}$  la densità del MP, dalle (49) e (50) si ricava l'espressione della massa  $M_{MP\ell}$ :

$$M_{MP\ell} = \frac{(1 - \rho_{fn}) \cdot [\gamma_{MP} \cdot k_{cn} \cdot \delta_n \cdot A_\delta \cdot (\sigma_\delta + 2 \cdot \varepsilon_{dn})] \cdot \mu_r \cdot (B_{\delta n}/B_r)^2}{\chi \cdot (1 - \chi)} ; \quad (51)$$

si riconosce che  $M_{MP\ell}$  è proporzionale alla quota parte  $(1 - \rho_{fn})$  di  $U_{\delta n}$  prodotta dal MP, al volume equivalente del traferro dei poli laterali (comprensivo del contributo di dispersione) e al quadrato del rapporto fra induzione al traferro e induzione residua del MP;

- circa la dipendenza da  $\chi$ , si riconosce un comportamento simmetrico rispetto a  $\chi = 0.5$ ; la Tab.V riporta alcuni valori di  $\sigma_{MP} = M_{MP}(\chi)/M_{MP}(0.5)$  nel campo  $0.5 \leq \chi < 1$ , che è quello di normale progetto dei MP:

*Tab.V - Rapporto  $\sigma_{MP} = M_{MP}(\chi)/M_{MP}(0.5)$  della massa di MP, in funzione del coefficiente di lavoro  $\chi$  del MP.*

$\chi$	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
$\sigma_{MP}$	1	1.010	1.042	1.099	1.190	1.333	1.563

si può osservare che per  $\chi = 0.5$  la massa di MP è minima: come noto, tale scelta corrisponde a far lavorare il MP in condizioni di massimo prodotto di energia; se, per altre esigenze, può risultare necessario adottare un valore  $\chi > 0.5$ , ne consegue in incremento di massa non eccessivo, pur di non avvicinarsi troppo al valore dell'asintoto  $\chi = 1$  (cui corrisponderebbe, in base alla (50), una altezza infinita di MP).

Il dimensionamento dei MP centrali segue criteri simili, pur di riconoscere che, sempre in condizioni nominali, essi sono percorsi da un flusso pari a  $\phi_{\delta n} \cdot (1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn})$ ; ritenendo ragionevole adottare lo stesso valore di  $\chi$  assunto per i MP laterali, ne conseguono le seguenti espressioni per la sezione e la estensione:

$$A_m = A_\delta \cdot \frac{1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}}{\chi} \cdot \frac{B_{\delta n}}{B_r} \quad b_m = A_m/\ell ; \quad (52)$$

naturalmente, anche in questo caso è necessario che  $b_p < b_m < b$ , per un corretto alloggiamento del MP.

Sviluppando la (44) in modo analogo a quanto fatto per la (46) si ottiene:

$$h_m = \delta_n \cdot (1 - \rho_{fn}) \cdot \frac{k_{cn} \cdot \mu_r}{1 - \chi} \cdot \frac{B\delta_n}{B_r}, \quad (53)$$

ovvero, per confronto con la (50), si deduce che tutti i MP, pur avendo diversa sezione, hanno uguale altezza.

Valgono anche in questo caso le precedenti considerazioni circa le scelte di  $\rho_{fn}$  e  $\chi$ , pur di osservare che il volume equivalente di traferro coinvolto nella (51) è quello relativo ai poli centrali.

E' utile valutare il rapporto  $\sigma_m = A_{m\ell}/A_m$  tra le sezioni dei MP; dalle (49) e (52) si ottiene:

$$\sigma_m = \sigma_\delta \cdot \frac{1 + 2 \cdot \varepsilon_{dn}/\sigma_\delta}{1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}}. \quad (54)$$

E' interessante osservare che  $\sigma_m$  è poco diverso da  $\sigma_\delta$ , coincidendo esattamente con quest'ultimo nel caso si abbia  $\sigma_\delta = 0.5$ ; inoltre vale la pena notare che  $\sigma_m$  è anche così interpretabile:

$$\sigma_m = A_{m\ell}/A_m = b_{m\ell}/b_m = \theta_m/\theta_{m\ell}. \quad (55)$$

Le relazioni precedenti definiscono il dimensionamento dei MP e della f.m.m. di polarizzazione nominale  $M_{fn}$ , in modo che la rete IBS di fig.2 sia interessata dai flussi espressi dalle (16)÷(20), con valori nominali.

Per ogni generica condizione di traferro  $\delta$  e di f.m.m.  $m_f$ , indicati con  $\phi_\delta$  e  $\phi_{\delta\ell}$  rispettivamente i flussi nei traferri centrali e laterali, aventi espressioni:

$$\phi_\delta = \frac{m_f + M_m}{(1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta)) \cdot \theta_m + \theta_\delta(\delta)} \quad \phi_{\delta\ell} = \frac{\sigma_\delta \cdot (m_f + M_m)}{(\sigma_\delta/\sigma_m + 2 \cdot \varepsilon_d(\delta)/\sigma_m) \cdot \theta_m + \theta_\delta(\delta)}, \quad (56)$$

la soluzione della rete IBS di fig.2 dà luogo alla seguente distribuzione di flussi:

$$\phi_{\delta 1} = \phi_{\delta 6} = \phi_{\delta\ell} \quad \phi_{\delta 2} = \phi_{\delta 3} = \phi_{\delta 4} = \phi_{\delta 5} = \phi_\delta \quad (57)$$

$$\phi_{s1} = \phi_{s3} = \phi_{s5} = \phi_{\delta\ell} \quad \phi_{s2} = \phi_{s4} = \phi_\delta - \phi_{\delta\ell} \quad (58)$$

$$\phi_{p1} = \phi_{p6} = \phi_{\delta\ell} \cdot (1 + 2 \cdot \varepsilon_d(\delta)/\sigma_\delta) \quad \phi_{p2} = \phi_{p3} = \phi_{p4} = \phi_{p5} = \phi_\delta \cdot (1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta)) \quad (59)$$

$$\phi_{g1} = \phi_{g3} = \phi_{g5} = \phi_{\delta\ell} \cdot (1 + 2 \cdot \varepsilon_d(\delta)/\sigma_\delta) \quad \phi_{g2} = \phi_{g4} = \phi_\delta \cdot (1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta)) - \phi_{\delta\ell} \cdot (1 + 2 \cdot \varepsilon_d(\delta)/\sigma_\delta) \quad (60)$$

Si può osservare che:

– il legame che si ottiene tra  $\phi_{\delta\ell}$  e  $\phi_\delta$  ricavando  $(m_f + M_m)$  dalla prima delle (56) e sostituendo nella seconda delle (56) è più complesso di quello espresso dalla prima delle (25) del sistema EMA ( $\phi_{\delta\ell} = \sigma_\delta \cdot \phi_\delta$ ):

$$\phi_{\delta\ell} = \sigma_\delta \cdot \phi_\delta \cdot \eta_\theta(\delta) \quad , \quad \eta_\theta(\delta) = \frac{(1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta)) \cdot \theta_m + \theta_\delta(\delta)}{(\sigma_\delta/\sigma_m + 2 \cdot \varepsilon_d(\delta)/\sigma_m) \cdot \theta_m + \theta_\delta(\delta)}; \quad (61)$$

in generale si verifica che  $\eta_\theta(\delta)$  è sempre poco diverso dall'unità, per ogni valore di  $\sigma_\delta$ , tendendo al valore unitario per  $\delta \rightarrow \delta_n$ ; in particolare, per  $\sigma_\delta = 0.5$ , è esattamente  $\eta_\theta(\delta) = 1$  per ogni valore di  $\delta$ ;

– in base a queste considerazioni, anche le (57)÷(60) risultano analoghe alle (25)÷(28); in particolare, al variare del traferro, i flussi dei poli centrali rimangono uguali fra loro, come pure avviene fra i due flussi laterali;

– rimane confermata la dipendenza dello squilibrio dei flussi di giogo statorico e di levitatore al crescere di  $\sigma_\delta$  al di sopra del valore  $\sigma_\delta = 0.5$ , che dunque si conferma la scelta migliore, da questo punto di vista;

– in definitiva, proprio considerando la opportunità che  $\sigma_\delta$  sia il più prossimo possibile al valore  $\sigma_\delta = 0.5$ , alla luce delle precedenti considerazioni non si commette un errore significativo se si assume  $\eta_\theta(\delta) \approx 1$ .

Le precedenti relazioni consentono di ricavare l'espressione della forza di levitazione del levitatore IBS; sviluppando i contributi di forza relativi a ciascuno dei 6 traferri si ottiene:

$$F_\delta = \frac{1}{2 \cdot \mu_o \cdot A_\delta} \cdot \left( 4 \cdot \phi_\delta^2 + \frac{2}{\sigma_\delta} \cdot \phi_{\delta\ell}^2 \right) = \frac{4 + 2 \cdot \sigma_\delta \cdot \eta_\theta^2}{2 \cdot \mu_o \cdot A_\delta} \cdot \phi_\delta^2 \approx \frac{p_e}{2 \cdot \mu_o \cdot A_\delta} \cdot \phi_\delta^2 \quad (62)$$

La (62) esprime una proprietà importante ai fini dello studio del funzionamento e delle modalità di controllo: la forza di levitazione è univocamente legata al valore del flusso di traferro dei poli centrali, moltiplicata per il numero di poli efficaci  $p_e$ , analogamente a quanto si verifica per il levitatore EMA.

Il confronto fra sistema EMA e IBS si riconduce, pertanto, al confronto fra le espressioni che in tali sistemi ha il flusso al traferro  $\phi_\delta(m_f)$ ; riportando la (24) e la prima delle (56) si ha, rispettivamente:

$$\text{EMA: } \phi_\delta = m_f/\theta_\delta(\delta) \quad \text{IBS: } \phi_\delta = \frac{m_f + M_m}{(1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta)) \cdot \theta_m + \theta_\delta(\delta)}. \quad (63)$$

Si noti che nelle (63) non è coinvolto il coefficiente  $\sigma_\delta$ , dal quale si può, quindi, prescindere.



L'osservazione delle (63) conduce alla seguente relazione:

$$\left(\frac{\partial\phi_{\delta}}{\partial m_f}\right)_{\text{IBS}} = \frac{\Lambda_{\delta}(\delta)}{1+(1+4\cdot\varepsilon_d(\delta))\cdot\theta_m/\theta_{\delta}(\delta)} = \frac{1}{1+(1+4\cdot\varepsilon_d(\delta))\cdot\theta_m/\theta_{\delta}(\delta)} \cdot \left(\frac{\partial\phi_{\delta}}{\partial m_f}\right)_{\text{EMA}}, \quad (64)$$

dove si è indicata con  $\Lambda_{\delta}(\delta) = 1/\theta_{\delta}(\delta)$  la permeanza al traferro sotto i poli centrali.

Alle derivate parziali della (64) si può attribuire il significato di permeanze differenziali di regolazione al traferro (indicate con  $\Lambda_{\text{rIBS}}$  e  $\Lambda_{\text{rEMA}}$  rispettivamente per il sistema EMA e per quello IBS).

Un primo esame della (64) mette in evidenza che, fissato un certo traferro, la permeanza di regolazione del sistema IBS è assai più bassa di quella del sistema EMA: pertanto, la variazione di f.m.m.  $\Delta m_f$  necessaria per ottenere una desiderata variazione  $\Delta\phi_{\delta}$  del flusso al traferro (e conseguentemente della forza levitante  $F_{\delta}$ ) è assai maggiore in un sistema IBS che in un sistema EMA.

L'effetto di un incremento del traferro tende ad attenuare questo fenomeno; viceversa, la riduzione del traferro (e quindi la diminuzione di  $\theta_{\delta}$ ) causa un deciso peggioramento, come d'altro canto riconoscibile dalle (63): per  $\theta_{\delta} \rightarrow 0$ , nel caso EMA basta una modesta variazione  $\Delta m_f$  per produrre una notevole variazione  $\Delta\phi_{\delta}$ , mentre nel caso IBS la variazione  $\Delta m_f$  è sempre consistente, perché deve vincere la riluttanza  $\theta_m$ .

Questo effetto, causato proprio della presenza della riluttanza equivalente del magnete  $\theta_m$ , controbilancia negativamente il vantaggio principale del sistema IBS (che consiste nella possibilità di produrre una forza di levitazione statica teoricamente in condizioni di correnti di polarizzazione nulle).

Per valutare compiutamente i parametri di influenza dell'aggravio descritto, è necessario sviluppare la (64). Innanzi tutto, si dimostra che, per  $\delta = \delta_n$ , vale la seguente relazione:

$$(1+4\cdot\varepsilon_{dn})\cdot\theta_m/\theta_{\delta_n} = (1-\rho_{fn})\cdot\frac{\chi}{1-\chi}. \quad (65)$$

Dopo alcune elaborazioni, dalla trasformazione della (64) si ottiene:

$$\left(\frac{\partial\phi_{\delta}}{\partial m_f}\right)_{\text{IBS}} = \frac{1-\chi}{1-\rho_{fn}\cdot\chi} \cdot \left[1 + \frac{(1-\rho_{fn})\cdot\chi}{(1+4\cdot\varepsilon_{dn})\cdot(1-\rho_{fn}\cdot\chi)} \cdot \left(\frac{k_c(\delta)\cdot\delta}{k_{cn}\cdot\delta_n} - 1\right)\right] \cdot \left(\frac{\partial\phi_{\delta}}{\partial m_f}\right)_{\text{EMA}}. \quad (66)$$

Valgono le seguenti osservazioni:

– a parità di ogni altra variabile, è confermato l'incremento della  $\Lambda_{\text{rIBS}}$  a seguito dell'aumento del traferro  $\delta$ ;

– per  $\delta = \delta_n$  si assuma, per ora,  $\rho_{fn} = 0$ : in tali condizioni (corrispondenti alla levitazione IBS con corrente di polarizzazione nulla) si ha  $\Lambda_{\text{rIBS}} = (1-\chi)\cdot\Lambda_{\text{rEMA}}$ ; nel caso di MP a massimo prodotto di energia ( $\chi = 0.5$ ) tale circostanza comporta una f.m.m. di regolazione del caso IBS doppia rispetto a quella del sistema EMA (va peraltro ricordato che in quest'ultimo caso è presente la f.m.m.  $M_{fn}$ , assente nel sistema IBS); se poi  $\chi$  fosse superiore al valore  $\chi = 0.5$ , l'effetto sarebbe ulteriormente peggiorativo;

– l'effetto di un valore  $\rho_{fn} > 0$  è migliorativo (infatti, in tal caso risulta  $1/(1-\rho_{fn}\cdot\chi) > 1$ ).

In realtà, se si considera di implementare la tecnica di controllo "a forza levitante costante", ovvero, in base alla (62), il controllo "a flusso di traferro costante", si riconosce che le conclusioni tratte dall'esame della (66) sono troppo pessimistiche: in effetti, per ogni valore del traferro, il vero obiettivo del controllo non è la variazione del flusso, ma il suo mantenimento a un valore costante.

Con riferimento alla condizione nominale ( $F_{\delta} = F_{\delta_n}$ ), in base alla seconda delle (63) si può scrivere:

$$\phi_{\delta} = \frac{m_f + M_m}{(1+4\cdot\varepsilon_d(\delta))\cdot\theta_m + \theta_{\delta}(\delta)} = \phi_{\delta_n} = \frac{M_{fn} + M_m}{(1+4\cdot\varepsilon_d(\delta_n))\cdot\theta_m + \theta_{\delta}(\delta_n)}; \quad (67)$$

dalla (67), tenendo conto della (65) e osservato che per  $F_{\delta} = F_{\delta_n}$  si ha  $m_f(t) = M_{fn} + m_{rn}(t)$  (dove la f.m.m. di polarizzazione nominale vale  $M_{fn} = \rho_{fn}\cdot U_{\delta_n}$ , con  $0 \leq \rho_{fn} \leq 1$ ) dopo alcune elaborazioni si ottiene:

$$m_{rn}(t) = \left[1 + \frac{4\cdot\varepsilon_{dn}}{1+4\cdot\varepsilon_{dn}} \cdot (1-\rho_{fn}) \cdot \frac{\chi}{1-\chi}\right] \cdot U_{\delta_n} \cdot \left(\frac{k_c(\delta)\cdot\delta}{k_c(\delta_n)\cdot\delta_n} - 1\right). \quad (68)$$

Sorprendentemente, il confronto con la (43) del sistema EMA, cui peraltro la (68) si riduce per  $\rho_{fn} = 1$ , evidenzia che la f.m.m. di regolazione necessaria per mantenere il flusso  $\phi_{\delta}$  al valore nominale  $\phi_{\delta_n}$  è praticamente la medesima del sistema EMA, a meno di un incremento limitato, necessario per sopperire ai flussi di dispersione interpolare (l'addendo a fianco dell'unità entro parentesi quadra è inferiore al 10 % nel caso in esame).

Questo apparente paradosso si spiega con il fatto che, se il flusso al traferro è costante, all'aumento del traferro non si ha praticamente variazione di tensione magnetica ai capi della riluttanza interna di MP ( $\theta_m$ ), ma solo un incremento della tensione magnetica al traferro: questo è l'unico contributo che la f.m.m. di regola-

zione della bobina è chiamata a compensare. In conclusione, con veicolo a carico nominale, agli effetti della regolazione a flusso di traferro costante nell'intorno del traferro nominale, il sistema IBS è assai simile al sistema EMA, con in più il vantaggio di una drastica riduzione delle perdite di polarizzazione nelle bobine. Da quanto precede, la scelta più conveniente del sistema IBS sembrerebbe quella con corrente di polarizzazione nominale nulla ( $\rho_{fn} = 0 \rightarrow M_{fn} = 0$ ) e con MP dimensionati per  $\chi = 0.5$ : si supponga, per il momento, di adottare questo dimensionamento.

Vale la pena di discutere le modalità di funzionamento del sistema IBS qualora il veicolo marci in condizioni differenti, ad esempio a vuoto ( $F_{\delta_0} = 0.75 \cdot F_{\delta_n}$ ): in questo caso, in base alla (62), per mantenere l'equilibrio di levitazione è necessario ridurre il flusso al traferro al valore  $\phi_{\delta_0} = (\sqrt{3}/2) \cdot \phi_{\delta_n} = 0.866 \cdot \phi_{\delta_n}$ ; questo risultato può essere conseguito in due modi diversi:

– mantenimento di un traferro di riferimento pari al traferro nominale, con l'applicazione di una f.m.m.  $M_{f_0}$  smagnetizzante (ovvero  $M_{f_0} < 0$ ) che, in base alla 2<sup>a</sup> delle (63), per  $\delta = \delta_n$  vale:

$$M_{f_0} = (1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta_n)) \cdot \theta_m + \theta_\delta(\delta_n) \cdot \phi_{\delta_0} - M_m \quad ; \quad (69)$$

– ridefinizione di un diverso traferro di riferimento ( $\delta_0 > \delta_n$ ) che, con f.m.m. nulla di polarizzazione, consenta ai MP di erogare al traferro il flusso  $\phi_{\delta_0}$ ; tale traferro si ottiene ancora mediante la 2<sup>a</sup> delle (63), risolvendo l'equazione non lineare seguente, nella variabile  $\delta_0$ :

$$\theta_\delta(\delta_0) = \frac{\delta_0 \cdot k_c(\delta_0)}{\mu_o \cdot A_\delta} = \frac{M_m / \phi_{\delta_0} - \theta_m}{1 + 4 \cdot \theta_m / \theta_d} \quad ; \quad (70)$$

evidentemente questa seconda modalità è migliore, in quanto non dissipativa; inoltre si ha un aumento del traferro di equilibrio statico nella marcia a vuoto (con i dati di Tab.I, per  $\sigma_\delta = 0.5$ , si ha  $\delta_0 = 13.5$  mm).

Evidentemente, per ogni valore del carico gravante sul levitatore, compreso nell'intervallo  $F_{\delta_0} < F_\delta < F_{\delta_n}$ , esiste un diverso valore del traferro in corrispondenza del quale si ha equilibrio statico con f.m.m. di polarizzazione nulla: se si volesse effettivamente realizzare tale modo di regolazione sarebbe pertanto necessario tarare di volta in volta il traferro di equilibrio statico, previa misura dell'effettivo carico gravante sul levitatore (questa operazione potrebbe, ad esempio, avvenire con veicolo fermo in stazione, al termine delle operazioni di carico e scarico, mediante celle di carico inserite nel sistema di sospensione secondario).

Un altro interessante confronto riguarda l'incremento di traferro nominale reso possibile, in condizioni di carico nominale, dall'adozione del levitatore IBS in luogo di quello EMA, a parità di f.m.m. di polarizzazione ( $M_{fnEMA}$ ); detto  $\delta_{na}$  il traferro aumentato consentito, in tali condizioni, dal sistema IBS, dalle (63) si ha:

$$\phi_{\delta_n} = \frac{M_{fnEMA} + M_m}{(1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta_{na})) \cdot \theta_m + \theta_\delta(\delta_{na})} \quad , \quad M_{fnEMA} = \theta_\delta(\delta_n) \cdot \phi_{\delta_n} \quad , \quad (71)$$

cui consegue una equazione non lineare nell'incognita  $\delta_{na}$ :

$$\theta_\delta(\delta_{na}) = \frac{\delta_{na} \cdot k_c(\delta_{na})}{\mu_o \cdot A_\delta} = \frac{\theta_{\delta_n} + \theta_m \cdot ((B_r \cdot A_m) / \phi_{\delta_n} - 1)}{1 + 4 \cdot \theta_m / \theta_d} \quad ; \quad (72)$$

$\delta_{na}$  è sensibilmente maggiore rispetto a quello del sistema EMA (nel caso qui considerato  $\delta_{na} = 21.6$  mm).

Questo tipo di confronto si può estendere anche alla condizione di sollevamento: si tratta di valutare quale traferro aumentato  $\delta_{Ma}$  è possibile adottare, da fermo, nel caso di levitatore IBS: nell'ipotesi di applicare a quest'ultimo una f.m.m. di sollevamento uguale a quella che, per  $\delta_M = 2 \cdot \delta_n$ , consente il sollevamento del levitatore EMA, con elaborazioni del tutto simili al caso precedente si giunge a:

$$\theta_\delta(\delta_{Ma}) = \frac{\delta_{Ma} \cdot k_c(\delta_{Ma})}{\mu_o \cdot A_\delta} = \frac{\theta_\delta(2 \cdot \delta_n) + \theta_m \cdot ((B_r \cdot A_m) / \phi_{\delta_n} - 1)}{1 + 4 \cdot \theta_m / \theta_d} \quad ; \quad (73)$$

risulta evidente come sia  $\delta_{Ma} > \delta_M = 2 \cdot \delta_n$  (nel caso presente si ha:  $\delta_{Ma} = 31.3$  mm  $>$   $\delta_{na} = 21.6$  mm).

Dalla precedente trattazione, riguardante la procedura di dimensionamento dei MP, non appare evidente la necessità di adottare, per i parametri  $\chi$  e  $\rho_{fn}$ , valori  $\chi > 0.5$  e/o  $\rho_{fn} > 0$ : per mettere in evidenza la opportunità di scelte diverse, è necessario considerare il comportamento del sistema nella condizione limite di traferro nullo.

In effetti, sempre nell'ipotesi  $\chi = 0.5$  e  $\rho_{fn} = 0$ , quando il traferro tende ad annullarsi, in base alla 2<sup>a</sup> delle (63), si ha:  $\theta_\delta \rightarrow 0$  e  $\varepsilon_d \rightarrow 0$ ; pertanto il flusso al traferro in queste condizioni (indicato con  $\phi_{\delta_{co}}$ , c = contatto levitatore-pista; o = con correnti nulle) uguaglia il flusso residuo del magnete:

$$\phi_{\delta_{co}} = \phi_\delta(\delta=0, m_f=0) = M_m / \theta_m = B_r \cdot A_m \quad ; \quad (74)$$

tale flusso è sensibilmente superiore a quello nominale, rispetto al quale conviene valutarne il valore relativo.

Infatti, in base alle (19) e (47), il flusso  $\phi_{\delta n}$  può essere espresso come segue:

$$\phi_{\delta n} = B_{\delta n} \cdot A_{\delta} = \frac{B_{MPn} \cdot A_m}{1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}} = \chi \cdot \frac{B_r \cdot A_m}{1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}} = \frac{\chi}{1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}} \cdot \phi_{\delta co} \quad ; \quad (75)$$

pertanto, considerando anche la (62), i valori di flusso  $\phi_{\delta co}$  e di forza levitante  $f_{\delta co}$ , espressi in p.u., riferiti ai corrispondenti valori nominali risultano pari a:

$$\varphi_{\delta co} = \phi_{\delta co} / \phi_{\delta n} = (1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}) / \chi \quad f_{\delta co} = F_{\delta co} / F_{\delta n} = \varphi_{\delta co}^2 = (1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn})^2 / \chi^2 \quad . \quad (76)$$

Nel caso presente ( $\varepsilon_{dn} = 0.018$  e  $\chi = 0.5$ ) si ha  $\varphi_{\delta co} = \phi_{\delta co} / \phi_{\delta n} \approx 2.14$  e  $f_{\delta co} = F_{\delta co} / F_{\delta n} \approx 4.60$ : un valore così elevato della forza attrattiva di contatto (oltre quattro volte il peso proprio del veicolo a pieno carico, che diviene oltre sei volte il peso del solo veicolo a vuoto) è estremamente pericoloso in quanto, in caso di fallimento del sistema di controllo delle correnti di bobina, può provocare un violento contatto per urto tra veicolo e pista, con pericolo per la sicurezza di marcia e con la concreta possibilità di seri danni, soprattutto ai MP, particolarmente sensibili agli urti, a causa della loro fragilità.

D'ora innanzi, per brevità, questa condizione di funzionamento a traferro nullo e correnti di bobina nulle verrà sinteticamente denominata condizione di "incollamento", in base alla analogia con il corrispondente fenomeno di aderenza per contatto, con pressione -in questo caso di origine magnetica- fra parti affacciate.

Per prevenire l'incollamento, possibile in caso di accidentale avvicinamento del levitatore alla pista, è necessario operare una rapida e robusta iniezione di correnti smagnetizzanti nelle bobine: questo rende il levitatore IBS assai più critico di quanto prevedibile in base al solo dimensionamento in condizioni nominali; infatti:

- il sistema EMA, meno conveniente in condizioni nominali, non presenta il fenomeno dell'incollamento;
- nel sistema IBS, l'entità e la velocità di variazione delle correnti smagnetizzanti necessarie per prevenire l'incollamento rappresentano un aggravio per il dimensionamento del sistema di alimentazione;
- qualora il fenomeno di incollamento si sia verificato, la f.m.m.  $M_{fdIBS}$  richiesta per il distacco del levitatore dalla pista è superiore a quella nominale del sistema EMA ( $M_{fdIBS} = 1.065 \cdot M_{fmEMA}$  nel caso di veicolo a pieno carico, mentre per veicolo a vuoto si ha:  $M_{fdIBS} = 1.19 \cdot M_{fmEMA}$ ).

In realtà le cose sono meno drammatiche di quanto indicato nelle (76): se le sezioni dei tronchi ferromagnetici sono dimensionate per il flusso nominale, i flussi delle (76) portano sicuramente a saturazione tali tronchi, con automatica limitazione dei flussi al traferro e della forza di incollamento (il valore calcolato è dunque un valore limite); tuttavia, anche considerando il fatto che, per esigenze di controllo, l'induzione nominale nel ferro è mantenuta bassa, la suddetta limitazione è poco efficace e, per prudenza, è meglio non farvi affidamento.

Un primo modo per migliorare il comportamento del levitatore IBS è suggerita dalle (76): supponendo, per ora, ancora  $\rho_{fn} = 0$ , l'adozione di  $\chi > 0.5$  è in grado di ridurre l'entità del fenomeno di incollamento. Questo effetto benefico è legato alla struttura delle (52) e (53): l'aumento di  $\chi$  fa aumentare  $h_m = h_m(\chi)$ , e pertanto anche  $M_m = H_o \cdot h_m$ , ma la riluttanza  $\theta_m$  aumenta in misura maggiore, per la contemporanea riduzione della sezione di MP: pertanto, il flusso residuo  $\phi_{MPr} = M_m / \theta_m = \phi_{\delta co}$  si riduce.

Dalla 2ª delle (76), si ottiene il valore di  $\chi$  per una forza di incollamento relativa  $f_{\delta co}$  di valore prefissato:

$$\chi = (1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}) / \sqrt{f_{\delta co}} \quad ; \quad (77)$$

naturalmente l'incremento di  $\chi$  implica l'aumento della massa del MP rispetto a quella della condizione ottima  $\chi = 0.5$ , come già evidenziato in Tab.V; inoltre (considerando che:  $(1 + 4 \cdot \varepsilon_{dn}) > 1$  e che, per la (53), deve essere  $\chi < 1$ ), in nessun caso si può ottenere una forza di incollamento inferiore alla forza levitante nominale: la Tab.VI mostra alcuni valori di  $\chi$  e del rapporto  $\sigma_{MP}$  delle masse di MP in funzione di  $f_{\delta co}$ .

Tab.VI - Valori del coefficiente di lavoro  $\chi = B_{MPn} / B_r$  del MP e del rapporto  $\sigma_{MP} = M_{MP}(\chi) / M_{MP}(0.5)$  delle masse di MP, in funzione della forza di incollamento relativa  $f_{\delta co} = F_{\delta co} / F_{\delta n}$  (per  $\rho_{fn} = 0$ ).

$f_{\delta co}$	4	3.75	3.5	3.25	3.00	2.75	2.50	2.25	2.00	1.75
$\chi$	0.536	0.554	0.573	0.595	0.619	0.646	0.678	0.715	0.758	0.810
$\sigma_{MP}$	1.005	1.012	1.022	1.037	1.060	1.094	1.145	1.226	1.363	1.627

Come si osserva, l'incremento di massa del MP al diminuire della forza di incollamento è inizialmente modesto, ma si fa sentire in modo più marcato quando si voglia ridurre  $f_{\delta co}$  al di sotto di 3: in particolare, la condizione che sembra più ragionevole accettare è quella per  $f_{\delta co} = 1.75$  ( $\rightarrow \chi = \chi_c = 0.810$ ), in quanto, in caso di veicolo a vuoto (condizione peggiore, con  $F_{peso} = 0.75 \cdot F_{\delta n}$ ) essa corrisponde a una forza risultante sul veicolo uguale (in ampiezza) alla forza peso a pieno carico. Si tratta di una situazione equivalente a quel-

la del veicolo con levitatori di tipo EMA, quando il fallimento del sistema di alimentazione delle bobine (e quindi l'annullamento delle corrispondenti correnti), provoca la caduta del veicolo sotto il proprio peso. Nel caso IBS, il fallimento del sistema di alimentazione può fare evolvere il veicolo o verso la caduta, analogamente al caso EMA, o verso l'incollamento, con la stessa accelerazione (salvo il segno) della forza di gravità; è evidente che il veicolo (come pure il sistema di contenimento e protezione dei MP) deve essere normalmente dimensionato per sopportare tali sollecitazioni, che sono peraltro da considerarsi eventi eccezionali.

In base alle precedenti considerazioni si conclude che la scelta progettuale  $f_{\delta_{co}} = 1.75$  sia accettabile: tuttavia, dalla Tab.VI si deve riconoscere che il corrispondente sovradimensionamento in massa del MP ( $\sigma_{MP} \approx 1.63$ ), pur essendo tecnicamente possibile, è assai consistente. Nonostante che l'incidenza maggiore di spesa per un sistema di trasporto Maglev sia largamente da attribuirsi alla realizzazione e alla manutenzione della pista e degli impianti fissi di alimentazione, conversione e controllo, tale sovradimensionamento del MP potrebbe risultare economicamente gravoso, per il notevole costo del NdFeB (attualmente pari a circa 1 Mfit/kg).

Ne deriva la convenienza ad adottare un contributo attivo di polarizzazione, ovvero a porre  $\rho_{fn} > 0$ : fra tutte le possibilità, è interessante considerare quel valore  $\rho_{fnc}$  che, con  $\chi = \chi_c = 0.810$ , consente di mantenere invariata la massa del MP rispetto al caso  $\chi = 0.5$ ; a tale scopo, dalla (51), si impone la seguente condizione:

$$(1 - \rho_{fnc}) / [\chi_c \cdot (1 - \chi_c)] = 1 / [(1/2) \cdot (1 - 1/2)] \rightarrow \rho_{fnc} = 1 - 4 \cdot \chi_c \cdot (1 - \chi_c) , \quad (78)$$

che nel caso in esame conduce a  $\rho_{fnc} = 0.384$ .

È interessante notare che fra i vantaggi di una parziale polarizzazione attiva in corrente in un levitatore IBS vi è la circostanza che, in caso di fallimento del sistema di alimentazione (cui corrisponde, con tutta probabilità, un annullamento della corrente delle bobine) il sistema evolva quasi sicuramente verso la caduta piuttosto che verso l'incollamento, in quanto viene a mancare una quota parte della forza levitante.

### **Il levitatore elettromagnetico ibrido asimmetrico (IBA).**

Anche per questa tipologia (cfr. figg.1 e 2 IBA) si tratta di definire il dimensionamento dei 3 MP e delle 2 bobine in modo tale che, in condizioni nominali, circolino i flussi dati dalle (16)÷(20).

La procedura seguita, del tutto simile a quella impiegata nel caso IBS, salvo la adozione di un unico valore del coefficiente di lavoro dei MP ( $\chi = 0.5$ ), conduce alle espressioni riportate nel seguito:

– parametri geometrici del MP centrale:

$$h_m = \delta_n \cdot 2 \cdot (B_{\delta n} / B_r) \cdot (\mu_r \cdot k_{cn}) / (1 - \chi) , \quad A_m = A_{\delta} \cdot (B_{\delta n} / B_r) \cdot (\sigma_{\delta} + 2 \cdot \varepsilon_{dn}) / \chi , \quad b_m = A_m / \ell ; \quad (79)$$

– parametri geometrici dei MP laterali:

$$h_{ml} = \delta_n \cdot \left( 1 + \frac{1 + 2 \cdot \varepsilon_{dn} / \sigma_{\delta}}{1 + 2 \cdot \varepsilon_{dn}} \right) \cdot \frac{\mu_r \cdot k_{cn}}{1 - \chi} \cdot \frac{B_{\delta n}}{B_r} , \quad A_{ml} = A_{\delta} \cdot \frac{\sigma_{\delta} + 2 \cdot \varepsilon_{dn}}{\chi} \cdot \frac{B_{\delta n}}{B_r} , \quad b_{ml} = A_{ml} / \ell ; \quad (80)$$

– parametri circuitali equivalenti dei 3 MP:

$$M_m = H_o \cdot h_m , \quad \theta_m = h_m / (\mu_o \cdot \mu_r \cdot A_m) , \quad M_{ml} = H_o \cdot h_{ml} , \quad \theta_{ml} = h_{ml} / (\mu_o \cdot \mu_r \cdot A_{ml}) ; \quad (81)$$

– f.m.m. di polarizzazione nominale delle bobine:

$$M_{fn} = 2 \cdot (B_{\delta n} / \mu_o) \cdot k_{cn} \cdot \delta_n = 2 \cdot U_{\delta n} . \quad (82)$$

Questi risultati evidenziano alcune particolarità e differenze rispetto al caso IBS, che vale la pena commentare:

- nel levitatore IBA le sezioni dei MP centrale e laterali sono uguali, mentre sono fra loro diverse le altezze;
- la f.m.m. nominale di polarizzazione  $M_{fn}$  di ogni bobina del levitatore IBA è pari a due volte quella di ogni bobina del caso EMA, come se i due traferri coinvolti nel tipo IBA non fossero interessati parzialmente anche dal flusso prodotto dagli anelli adiacenti, dotati di MP.

Dopo aver introdotto, per comodità le seguenti riluttanze equivalenti, funzioni del traferro:

$$\theta_{\delta d} = \theta_{\delta d}(\delta) = \frac{\theta_{\delta}(\delta)}{1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta)} ; \quad \theta_{\delta \ell d} = \theta_{\delta \ell d}(\delta) = \frac{\theta_{\delta \ell}(\delta)}{1 + 2 \cdot \varepsilon_d(\delta)} = \frac{\theta_{\delta}(\delta) / \sigma_{\delta}}{1 + 2 \cdot \varepsilon_d(\delta)} ; \quad \theta_{\ell} = \theta_{\ell}(\delta) = \theta_{m\ell} + \theta_{\delta \ell d} , \quad (83)$$

la soluzione generale della rete IBA di fig.2 conduce alle seguenti espressioni:

$$\phi_{g2} = \phi_{g4} = \frac{(\theta_{\delta d} + \theta_{\ell}) \cdot (\theta_m + 2 \cdot \theta_{\delta d}) \cdot m_f / \theta_{\delta d} - (\theta_{\delta d} + \theta_{\ell}) \cdot M_m - (\theta_m + 2 \cdot \theta_{\delta d}) \cdot M_{ml}}{\theta_{\delta d} \cdot \theta_m + 2 \cdot \theta_{\ell} \cdot \theta_m + 2 \cdot \theta_{\delta d} \cdot \theta_{\ell}} \quad (84)$$

$$\phi_{g1} = \phi_{g5} = \frac{M_{ml}}{\theta_{\delta d} + \theta_{\ell}} - \frac{\theta_{\delta d}}{\theta_{\delta d} + \theta_{\ell}} \cdot \phi_{g2} , \quad \phi_{g3} = \frac{M_m}{\theta_m + 2 \cdot \theta_{\delta d}} - \frac{2 \cdot \theta_{\delta d}}{\theta_m + 2 \cdot \theta_{\delta d}} \cdot \phi_{g2} \quad (85)$$

$$\phi_{p1} = \phi_{p6} = \phi_{g1} \quad \phi_{p2} = \phi_{p5} = \phi_{g1} + \phi_{g2} \quad \phi_{p3} = \phi_{p4} = \phi_{g2} + \phi_{g3} \quad (86)$$

$$\phi_{\delta 1} = \phi_{\delta 6} = \frac{\phi_{p1}}{1 + 2 \cdot \varepsilon_d(\delta) / \sigma_\delta} \quad \phi_{\delta 2} = \phi_{\delta 5} = \frac{\phi_{p2}}{1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta)} \quad \phi_{\delta 3} = \phi_{\delta 4} = \frac{\phi_{p3}}{1 + 4 \cdot \varepsilon_d(\delta)} \quad (87)$$

$$\phi_{s1} = \phi_{s5} = \phi_{\delta 1} \quad \phi_{s2} = \phi_{s4} = \phi_{\delta 2} - \phi_{s1} \quad \phi_{s3} = \phi_{\delta 3} - \phi_{s2} \quad ; \quad (88)$$

$$F_\delta = \frac{1}{2 \cdot \mu_o \cdot A_\delta} \cdot 2 \cdot \left( \phi_{\delta 1}^2 + \phi_{\delta 2}^2 + \phi_{\delta 3}^2 \right) \quad (89)$$

Una analisi della struttura delle (84)-(89) conduce a riconoscere le seguenti caratteristiche del levitatore IBA:

- a eccezione della condizione nominale, in generale i quattro flussi dei poli centrali e i corrispondenti flussi al traferro non sono equilibrati, ma esiste solo una simmetria funzionale rispetto all'asse centrale del levitatore;
- a causa di tale squilibrio, diversamente dai levitatori EMA e IBS, a un certo valore della forza levitante non corrisponde un univoco valore del flusso dei poli centrali (ciò rende più complessa la implementazione della tecnica di controllo a forza levitante costante: dalla struttura della (89) si può dedurre che la forza levitante rimane costante quando è costante il valore medio quadratico istantaneo dei flussi al traferro));
- analogamente anche la forza di propulsione presenta contributi squilibrati da parte di ciascuna coppia di flussi N-S al traferro ( $\phi_{\delta 1}$  e  $\phi_{\delta 6}$ ,  $\phi_{\delta 2}$  e  $\phi_{\delta 5}$ ,  $\phi_{\delta 3}$  e  $\phi_{\delta 4}$ ): questo fatto non è però causa di particolari problemi;
- sempre a causa del suddetto squilibrio, vi sono gioghi di levitatore e di pista che, in certe condizioni, risultano magneticamente più carichi di altri: la condizione più gravosa, per la quale è necessario dimensionare le sezioni di passaggio, è quella che si verifica durante il processo di sollevamento;
- il fenomeno dell'incollamento è assolutamente da evitare, in quanto in tale condizione il levitatore non potrebbe in alcun modo essere distaccato dalla pista con mezzi elettromagnetici (gli anelli magnetici contenenti le bobine vedrebbero una riluttanza di traferro nulla, senza alcuna possibilità di condizionare i flussi degli anelli contenenti i MP): si è verificato che, fortunatamente, per  $\sigma_\delta = 0.5$  questo evento non può avvenire.

## Confronto tra i dati dimensionali e funzionali dei diversi levitatori

Per meglio operare un confronto quantitativo fra le soluzioni descritte, la Tab.VII riporta i valori delle principali quantità dimensionali e funzionali, avendo assunto gli elementi comuni di comparazione indicati nel seguito: coefficiente di riduzione laterale:  $\sigma_\delta = 0.5$ ; traferro nominale:  $\delta_n = 10$  mm; forza levitante nominale di un levitatore:  $F_{\delta n} = 24$  kN; densità di corrente RMS di dimensionamento delle bobine:  $S = 4$  A/mm<sup>2</sup>; coefficiente di riempimento del rame nelle finestre interpolari:  $\alpha_{cu} = 0.3$ ; valore di picco della oscillazione di traferro durante la marcia, attorno al valore nominale:  $\Delta\delta = 0.5 \cdot \delta_n$  (N.B.: tale valore, qui presunto, è necessario per il calcolo del valore RMS della f.m.m. di regolazione, mediante la (43) e la (48)).

Per quanto riguarda l'induzione nel ferro, adottata per dimensionare le sezioni ferromagnetiche, nei tipi EMA e IBS si è assunto che in condizioni nominali sia  $B_{fe} = 1.2$  T (tale valore consente un discreto margine di linearità, in modo tale da poter circa raddoppiare la forza levitante a pieno carico, nel caso in cui il sistema di alimentazione-controllo richieda un incremento dei flussi particolarmente elevato, ad esempio per prevenire eventuali rischi transitori di contatto veicolo-pista); nel tipo IBA, con riferimento alla condizione più gravosa (quella di sollevamento, perché con flussi più squilibrati), si è assunta l'induzione  $B_{fe} = 1.3$  T.

Per i risultati di Tab.VII valgono i seguenti commenti:

- il levitatore EMA2 ha massa e perdite più elevate del EMA1, ma con i vantaggi della regolazione separata;
- il levitatore IBS-a è il più leggero, la massa MP è minimizzata, ha basse perdite nominali, ma ha una elevatissima forza di incollamento e perdite di distacco che, pur di durata limitata, sono molto elevate;
- il levitatore IBS-b ha una forza di incollamento inferiore e perdite nominali non eccessivamente aumentate (l'incremento è dovuto alla minor permeanza equivalente di regolazione, per l'allungamento del MP); tuttavia la massa di MP è eccessiva; inoltre presenta perdite di distacco troppo alte rispetto a quelle nominali;
- il levitatore IBS-c mantiene limitata sia la forza di incollamento che la relativa perdita di distacco e minimizza la massa di MP, a fronte di un incremento, peraltro non eccessivo, delle perdite nominali e di sollevamento: delle tre soluzioni IBS questa appare la migliore;
- il levitatore IBA presenta l'evidente svantaggio di richiedere un sovradimensionamento magnetico, sia del levitatore che della pista, per prevenire rischi di saturazione nelle condizioni di maggior squilibrio dei

flussi (N.B.: tale sovradimensionamento è praticamente il medesimo che attualmente si ha nei sistemi EMS EMA, a causa della scelta del valore  $\sigma_{\delta} = 0.75$ ); peraltro, sono assai contenute le perdite nominali e di sollevamento e la massa dei MP e non vi è rischio di incollamento: questo favorevole comportamento è dovuto alla circostanza che gli anelli magnetici controllati dalle bobine non hanno MP in serie e dunque la loro permeanza equivalente di regolazione è paragonabile a quella dei tipi EMA, dunque assai più elevata che nel caso IBS.

Tab.VII - Confronto dimensionale e funzionale fra diversi levitatori con  $\sigma_{\delta} = 0.5$ ;  $\delta_n = 10$  mm;  $F_{\delta n} = 24$  kN  
 IBS a:  $\chi = 0.5$ ,  $\rho_{fn} = 0$ ; IBS b:  $\chi = 0.810$ ,  $\rho_{fn} = 0$ ; IBS c:  $\chi = 0.810$ ,  $\rho_{fn} = 0.384$

Parametro di confronto	Tipo di levitatore	EMA1	EMA2	IBS-a	IBS-b	IBS-c	IBA
massa Fe pista (lungo un levitatore, per lato) [kg]		220.5	220.5	220.5	220.5	220.5	318.5
(massa giogo statore)/(massa totale statore) [p.u.]		0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.74
massa Fe di un levitatore [kg]		230.5	241	200	202	208	343
f.m.m. di polarizzazione nominale (per polo) [A]		5170	5170	0	0	1985	10340
perdite Cu polarizz. nomin. (di un levitatore) [W]		2415	2515	0	0	725	710
perdite Cu (polar.+regol.) nom. (di un levitat.) [W]		2620	3240	775	935	1290	750
massa Cu complessiva (di un levitatore) [kg]		69.5	86.0	20.5	25.0	34.0	19.0
massa dei MP (di un levitatore) [kg]		0	0	18.25	29.65	18.25	11.09
(peso nominale levitato)/(massa MP) [kN/kg]		–	–	1.32	0.81	1.32	2.16
massa totale di un levitatore [kg]		300	327	239	257	260	373
(peso levitatore)/(peso nominale levitato) [%]		12.3	13.4	9.8	10.5	10.6	15.2
perdite Cu di sollevamento (da $\delta = 2 \cdot \delta_n$ ) [W]		7890	8195	6060	7315	8735	2750
(forza di incollamento limite)/( $F_{\delta n}$ ) [p.u.]		0	0	4.60	1.75	1.75	0.92
perdite Cu di distacco (da $\delta = 0$ , a carico nom.) [W]		0	0	9255	11170	3070	0

## Il prototipo di levitatore e il programma di attività sperimentale.

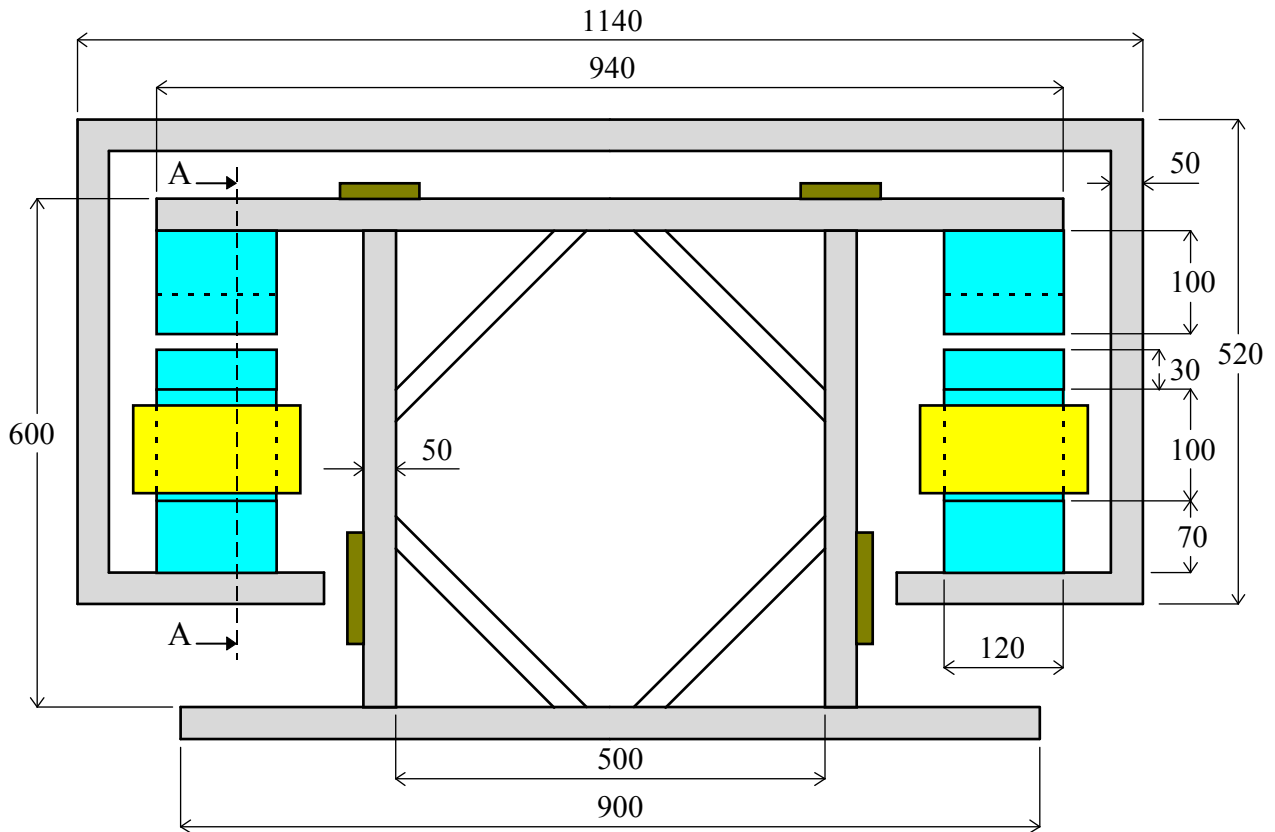
Dai risultati della analisi teorica precedentemente descritta si sono tratti validi elementi per l'avvio di una indagine sperimentale: data la impossibilità di costruire un sistema Maglev completo, sia pure in scala, per limitazioni economiche, di ingombro e di tempo, si è ritenuto opportuno limitare la sperimentazione solo ad alcuni aspetti dei sistemi Maglev, realizzando un apparato di prova di tipo statico.

E' stato dunque condotto, presso codesto Dipartimento, il progetto esecutivo di una piattaforma levitante, attualmente in fase di completamento, strumentazione e prove di verifica preliminari: tale piattaforma, equipaggiata con bobine di levitazione, trasduttori di traferro, alimentatori e sistemi di controllo, è stata concepita con adeguate caratteristiche di modularità (così da consentire la sperimentazione di diverse soluzioni strutturali, di alimentazione e di controllo) e di espandibilità (per poter sperimentare, con adeguati e limitati completamenti e modifiche, anche alcuni aspetti funzionali eventualmente non previsti nella prima fase delle prove).

La piattaforma (la cui struttura schematica è mostrata in fig.3, insieme alle dimensioni principali) è costituita sostanzialmente da due parti, una fissa e l'altra destinata ad essere levitata, entrambe realizzate mediante telai costituiti da tubi a sezione quadrata (50 mm x 50 mm), laminati a caldo:

- la parte fissa, rappresentativa di una breve porzione di pista, consta di un basamento, sul quale poggia un telaio con funzione di supporto per la struttura ferromagnetica statorica, laminata e dentata;
- la parte mobile, che rappresenta la porzione elettromagneticamente attiva del veicolo, ha una massa complessiva levitata di circa 400 kg: è formata da una struttura portante a C, ottenuta dal collegamento di più telai mediante barre di congiunzione, e da quattro coppie di poli; tali unità levitanti bipolari, laminate e

avvolte, sono magneticamente indipendenti, e sono disposte ai quattro angoli della piattaforma e a questa serrate mediante bulloni, in modo da garantire le citate caratteristiche di modularità e modificabilità. In posizioni opportune, sul piano di accoppiamento orizzontale, sono disposti anche alcuni ammortizzatori in gomma, con lo scopo di prevenire urti in caso di imperfetto controllo della levitazione, e per consentire una condizione morbida di appoggio nel corso della fase di atterraggio della piattaforma e durante la sua condizione di riposo. Analoghi respingenti in gomma sono disposti sui fianchi del telaio fisso, in sostituzione di un sistema attivo di posizionamento laterale, per ora non previsto. Il traferro nominale è stato fissato a 8 mm, con campo di variazione contenuto entro  $\pm 4$  mm.



Sez. A-A

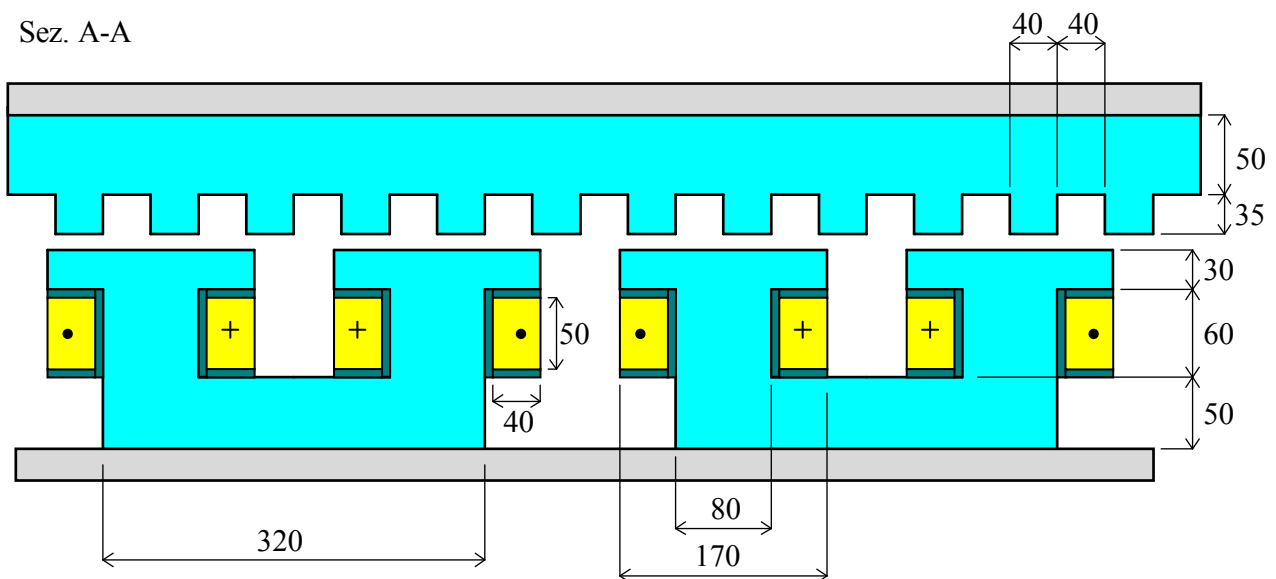


Fig.3 - Vista longitudinale del sistema di piattaforma levitante realizzato, con particolare di una sezione laterale (A-A), relativo alla porzione dentata dello statore e a due coppie di poli di levitazione.



I dispositivi di alimentazione controllata delle bobine impiegano convertitori elettronici di potenza, la cui corrente erogata è imposta dal sistema di controllo, in base al valore di traferro misurato.

Il sistema di trasduttori per il rilievo del traferro, che costituisce uno degli elementi fondamentali dell'anello di controllo della levitazione, è basato, in via preliminare, sull'impiego di telecamere, con relative schede di acquisizione dati. In effetti, tale sistema, pur caratterizzato da una certa complessità e da un costo non trascurabile, garantisce risultati sicuri: esso verrà pertanto adottato come dispositivo di rilevamento campione per la verifica delle prestazioni di altri tipi di trasduttori di misura, che si prevede di disporre in parallelo, per condurre delle verifiche comparative.

Fra le configurazioni che, gradualmente, si intende sperimentare con la descritta piattaforma, vi sono le seguenti:

- sistema di levitazione con poli induttori esclusivamente in materiale ferromagnetico, dotati di avvolgimenti convenzionali di eccitazione; per quanto riguarda le bobine, le soluzioni possibili sono:
  - unico avvolgimento per ciascun polo, percorso da una corrente controllata (levitatore di tipo EMA1);
  - due avvolgimenti per ciascun polo, percorsi rispettivamente dalla corrente di polarizzazione e dalla corrente di regolazione (levitatore di tipo EMA2);fra le soluzioni sperimentate è inclusa anche quella con collegamento fra gli avvolgimenti di polarizzazione di diversi poli;
- levitazione con poli induttori dotati di MP e di avvolgimenti di stabilizzazione: questa eccitazione di tipo IBS sarà valutata e sperimentata, confrontandola in campo con la precedente soluzione EMA, al fine di determinarne le effettive caratteristiche di dimensionamento, stabilità, potenze di controllo.

Gli elementi di comparazione riguarderanno:

- la robustezza costruttiva e la complessità realizzativa;
- i vantaggi ai fini del consumo di energia a bordo;
- il dimensionamento degli avvolgimenti di eccitazione degli induttori;
- il numero, le caratteristiche e la potenza di dimensionamento degli alimentatori di stabilizzazione;
- le diverse caratteristiche dinamiche e di controllo, in presenza di diverse condizioni per il carico di prova (stazionario o oscillante, agente in posizione baricentrica o smentrata);
- le effettive opportunità di un incremento del traferro meccanico, rese possibili grazie ai MP.

Verranno prese in considerazione e, per quanto possibile, sperimentate diverse soluzioni relative ai trasduttori per il rilievo del traferro, valutandone le caratteristiche di precisione, di immunità alle interferenze elettromagnetiche e ai disturbi, di risposta dinamica. Anche per quanto riguarda le tecniche di controllo, saranno considerate diverse opportunità, sia di tipo analogico che digitale.

Naturalmente, una completa e significativa esperienza su un sistema di trasporto a levitazione magnetica richiederebbe la realizzazione di una pista vera e propria, di lunghezza adeguata al raggiungimento di condizioni di marcia congruenti con quelle di un sistema ad alta velocità, quale è intrinsecamente il sistema Maglev.

Tuttavia, le caratteristiche costruttive del sistema di levitazione realizzato, dotato anche di cave lungo la struttura statorica fissa, potrebbero consentire, nel futuro, la effettuazione di esperienze più complete rispetto a quelle descritte in precedenza, fra le quali:

- la verifica del comportamento del sistema in presenza combinata di forze statiche di levitazione e di propulsione, per tutte le soluzioni di levitatore precedentemente descritte;
- la sperimentazione di sistemi senza contatto per la trasmissione dell'energia dalla pista alla piattaforma, tramite iniezione di correnti a media frequenza (600-800 Hz) negli avvolgimenti della pista stessa.

Riguardo alla sperimentazione della funzione di propulsione con piattaforma levitante ferma, questa condizione può essere realizzata disponendo nelle suddette cave statoriche un normale avvolgimento trifase e alimentando le singole fasi con opportune correnti continue, corrispondenti ai valori che tali correnti (di norma ad andamento pressoché sinusoidale nel tempo) avrebbero in un certo istante di funzionamento; questa situazione consente di verificare il comportamento del sistema nelle seguenti due condizioni di prova:

- condizioni stazionarie: applicazione dall'esterno di una opportuna forza e studio sperimentale della correlazione tra angolo di carico del motore sincrono (ovvero limite di stabilità statica) e ampiezza delle correnti di levitazione, svolgenti anche funzione di eccitazione del motore di propulsione;
- condizioni dinamiche: verifica delle interazioni funzionali e di controllo e delle condizioni di stabilità dinamica del motore sincrono e del sistema di levitazione-eccitazione, in presenza di forze perturbanti non costanti imposte dall'esterno, analoghe a quelle presenti nel funzionamento del sistema Maglev reale.

Per quanto concerne la sperimentazione dei sistemi di trasmissione dell'energia a bordo a media frequenza, si tratta di un sistema alternativo a quello attualmente utilizzato dal sistema tedesco e precedentemente ana-

lizzato dall'Unità di Milano, basato sull'impiego di un generatore lineare [3], [4], [6], [9]: tale sistema in media frequenza, in linea di principio, presenta il vantaggio di consentire il trasferimento a bordo di potenze significative anche a veicolo fermo, diversamente da quanto avviene con il generatore sincrono lineare tradizionale. Proprio tale caratteristica, di poter funzionare anche a velocità nulla, implica la possibilità di una sperimentazione condotta con il sistema statico basato sulla descritta piattaforma levitante.

## Conclusioni

Nel presente lavoro sono state descritte e analizzate tre diverse tipologie di dispositivi di levitazione per sistemi di trasporto a levitazione magnetica di tipo elettromagnetico, comprendenti soluzioni dotate solamente di avvolgimenti o soluzioni ibride, con bobine e magneti permanenti, con disposizione simmetrica o asimmetrica.

L'analisi ha approfondito i criteri di progetto, con il dimensionamento del nucleo ferromagnetico, delle bobine e dei magneti permanenti, studiando l'impatto che i diversi parametri hanno sulle caratteristiche dimensionali, funzionali e di controllo relativi al veicolo e alla pista.

Si sono analizzati la condizione di funzionamento intorno alla nominale, il processo di sollevamento e le modalità del fenomeno di incollamento nel caso di levitatore ibrido.

Si è infine fatto un breve cenno alla attività sperimentale in corso, con la realizzazione del prototipo di piattaforma di levitazione strumentata e la serie di prove di levitazione programmate.

Gli studi continueranno, sia riguardo all'approfondimento teorico dell'analisi di progetto e di funzionamento delle tipologie di levitatore già individuate e/o di nuove, sia dal punto di vista delle verifiche sperimentali.

## Ringraziamento

Gli autori ringraziano vivamente il Prof. Ivo Vistoli per la costante guida durante lo svolgimento della ricerca e per i validi consigli nel corso della stesura del presente lavoro.

## Bibliografia

- [1] A. Di Gerlando, M. Galasso: "Problematiche di alimentazione nei sistemi Maglev"; Atti del 1° Workshop su Azionamenti Elettrici con Motori Lineari; Milano, Apr. 1992, Memoria N°4, pp.1-30.
- [2] A. Di Gerlando, I. Vistoli, M. Galasso: "Comparative Analysis of EDS and EMS Maglev Systems", Maglev'93, 13<sup>th</sup> International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Argonne National Laboratory, Illinois, USA, Mag. 1993, pp.336-341.
- [3] A. Di Gerlando, I. Vistoli: "Design Problems of Linear On Board Generators in EMS Maglev Transportation Systems", Maglev'93, 13<sup>th</sup> International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Argonne National Laboratory, Illinois, USA, Mag. 1993, pp.342-347.
- [4] A. Di Gerlando, I. Vistoli: "Analisi di progetto di generatori lineari di bordo per veicoli Maglev di tipo EMS"; Atti del 1° Convegno Nazionale PFT2 del CNR, Roma, Sett. 1993, pp.1489-1508.
- [5] A. Di Gerlando, S. Fortuna, I. Vistoli: "Armature Current Unbalance Detection using On-board Probe Windings for the Stator On-line Diagnostics of EMS Maglev Systems", International Conference on Magnetically Levitated Systems (Maglev), Brema, Germania, Nov. 1995, pp.323-331.
- [6] A. Di Gerlando, S. Fortuna, I. Vistoli: "Design oriented analytical modelling of linear synchronous on-board generators for EMS Maglev systems", Conferenza "Electrimacs '96", Saint Nazaire, Francia, Sett. 1996, pp.793-800.
- [7] A. Di Gerlando, S. Fortuna: "Design and experimental analysis of on-board probe windings for the stator on-line diagnostics of EMS Maglev systems", ICEM'96, Vigo, Spagna, Sett. 1996, pp.142-147.
- [8] C. Fossati, E. Piccagli: "Problemi progettuali degli induttori nei sistemi Maglev di tipo EMS"; Atti del 2° Workshop su Azionamenti Elettrici con Motori Lineari; Pisa, Dic. 1996, pp.115-121.
- [9] A. Di Gerlando, S. Fortuna, I. Vistoli: "Studio di avvolgimenti indotti di bordo per la generazione e la diagnostica nei sistemi di trasporto Maglev di tipo EMS con motori sincroni lineari a statore lungo"; Atti del 2° Workshop su Azionamenti Elettrici con Motori Lineari; Pisa, Dic. 1996, pp.89-108.