

M. ANDRIOLLO, A. DI GERLANDO, M. UBALDINI

**ATTUATORI LINEARI PER APPLICAZIONI INDUSTRIALI:
TIPOLOGIE, DISPOSIZIONI, CARATTERISTICHE.
ASPETTI INNOVATIVI DI ATTUATORI A MAGNETI
PERMANENTI CON AVVOLGIMENTI CONCENTRATI.**

Atti della Giornata di Studio ANIPLA
MOTORI LINEARI:
Caratteristiche costruttive e applicazioni in ambito industriale
Cinisello Balsamo (MI), Italia, 18 Novembre 2004
c/o SEDE UCIMU
Atti su CD: Memoria N° 1



A.N.I.P.L.A.
**ASSOCIAZIONE NAZIONALE
ITALIANA PER L'AUTOMAZIONE**
Sezione di Milano
P.le Morandi 2, 20121 Milano
<http://www.anipla.it>
E-mail: anipla@anipla.it

GIORNATA DI STUDIO

MOTORI LINEARI: CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE E APPLICAZIONI IN AMBITO INDUSTRIALE

Cinisello Balsamo, 18 Novembre 2004

Con l'adesione di:



Associazione Italiana
Strumentisti



Associazione Imprese
Italiane di Strumentazione



Sede:
UCIMU-SISTEMI PER PRODURRE
Sala Assemblea
Viale Fulvio Testi, 128 - Cinisello Balsamo (MI)



Sezione di Milano



ISA - The Instrumentation Systems
and Automation Society
Italy Section



UCIMU - SISTEMI PER PRODURRE

PROGRAMMA

Giovedì 18 Novembre 2004

Mattino

- 8.30 ■ Registrazione dei partecipanti
- 9.00 ■ Saluto di benvenuto
Leone D'Alessandro,
Presidente Anipla Sezione di Milano
Ezio Bassi,
Coordinatore della Giornata di Studio
Moderatore: Ezio Bassi
- 9.20 ■ Attuatori lineari per applicazioni
industriali: tipologie, disposizioni,
caratteristiche.
Aspetti innovativi di attuatori a magneti
permanenti con avvolgimenti
concentrati.
M. Andriollo, A. Di Gerlando,
M. Ubal dini - Politecnico di Milano
- 10.00 ■ Applicazione di codici numerici al
progetto di motori lineari brushless
di tipo ironless ed ironcore
M. Andriollo, M. Bertoluzzo, G. Buja,
G. Martinelli, A. Morini, A. Tortella,
M. Zerbetto - Università di Padova
- 10.40 *Coffee break*
- 11.00 ■ Metodologie di progettazione
di motori tubolari
D. Casadei, G. Serra - Università di
Bologna
- 11.40 ■ Motori lineari e motori rotanti negli
azionamenti elettrici industriali:
applicazioni e prospettive
S. Chiama - Consulente,
membro CEI-CT2 e CT-301/22G
- 12.20 ■ Ottimizzazione dinamica di macchine
con motori lineari
G. Bianchi - CNR/ITIA, Milano
- 13.00 *Intervallo Pranzo*

PROGRAMMA

Giovedì 18 Novembre 2004

Pomeriggio

Moderatore: Paolo Rocco

- 14.00 ■ L'applicazione dei motori lineari
nelle macchine utensili
A. Franchini - Siemens
- 14.40 ■ Motori lineari e loro utilizzo nei principali
settori applicativi: pro e contro di una
tecnologia in evoluzione
M. Crespi - Rockwell Automation
- 15.20 *Coffee break*
- 15.40 ■ Limiti di prestazioni dei motori lineari:
sensori impiegati e rigidità meccanica
G. Locatelli - Phase Motion Control
- 16.20 ■ I motori lineari: applicazioni nei centri
di lavoro per i settori stampi e modelli
e per lavorazioni aeronautiche
A. Dalcini - Mecof
- 17.00 ■ Applicazione di motori lineari su sistemi
di termoformatura per imballaggi
A. Rigliano - AMUT
- 17.40 *Dibattito e chiusura dei lavori*

ANIPLA ringrazia
UCIMU-SISTEMI PER PRODURRE per la concessione
gratuita della sede della manifestazione.

ATTUATORI LINEARI PER APPLICAZIONI INDUSTRIALI: TIPOLOGIE, DISPOSIZIONI, CARATTERISTICHE. ASPETTI INNOVATIVI DI ATTUATORI A MAGNETI PERMANENTI CON AVVOLGIMENTI CONCENTRATI

M. Andriollo – A. Di Gerlando – M. Ubaldini
[mauro.andriollo, antonino.digerlando, mario.ubaldini]@polimi.it

Dipartimento di Elettrotecnica – Politecnico di Milano
Piazza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano

Sommario

Si presenta una panoramica generale delle tipologie di attuatori lineari utilizzati nelle applicazioni industriali, descrivendone configurazioni, principio di funzionamento, caratteristiche, effetti secondari, campi di impiego.

Dopo una sintetica classificazione basata sulla struttura dei dispositivi e sui settori applicativi, ed alcune note sui fenomeni tipici di queste macchine, si descrivono i motori lineari a passo, le macchine lineari a induzione, gli attuatori a magnete permanente, sincroni e in c.c..

Vengono quindi descritte le caratteristiche peculiari di attuatori a MP con avvolgimenti a bobine concentrate, recentemente oggetto di studio presso il nostro Dipartimento.

Parole chiave

Motori lineari: strutture, principi di funzionamento. Attuatori a MP con bobine concentrate.

1. INTRODUZIONE

Le applicazioni che richiedono l'attuazione di movimenti rettilinei sono innumerevoli; i sistemi utilizzati a tale scopo sono classificabili secondo una delle seguenti categorie:

- attuatori con cilindri di tipo pneumatico od idraulico;
- accoppiamento (ruota dentata-vite senza fine) o (madrevite-vite senza fine);
- accoppiamento (puleggia-cinghia);
- attuatori elettromagnetici lineari.

I primi tre sistemi, pur molto diffusi, presentano spesso diversi limiti, tra cui imprecisione di posizionamento, corse limitate, giochi, attrito, basso rendimento, rumorosità.

Gli attuatori elettromagnetici lineari, invece, sviluppano direttamente il moto lineare, senza contatto fisico, usura e giochi fra le parti in moto relativo, con migliore efficienza e maggior durata del dispositivo; la costruzione risulta semplice e compatta; il moto è regolare e silenzioso; il posizionamento è preciso, con ampia regolazione di corsa, velocità e accelerazione; una stessa struttura fissa può supportare più parti mobili, controllabili indipendentemente.

L'impiego degli attuatori lineari elettromagnetici, ancora non sistematicamente diffuso, è peraltro destinato ad una progressiva crescita, come evidenziato anche in fig.1, principalmente grazie ai seguenti fattori:

- il rapido sviluppo e la crescente diffusione dell'elettronica di potenza, per l'alimentazione controllata dei motori;
- l'evoluzione dei sistemi e dei componenti elettronici, dei circuiti integrati e dei sensori, che consentono la implementazione di tecniche di controllo sempre più sofisticate;
- la richiesta di azionamenti ad elevate prestazioni, in termini di spinta, precisione e velocità di risposta, non facilmente ottenibili con sistemi ad accoppiamento meccanico.

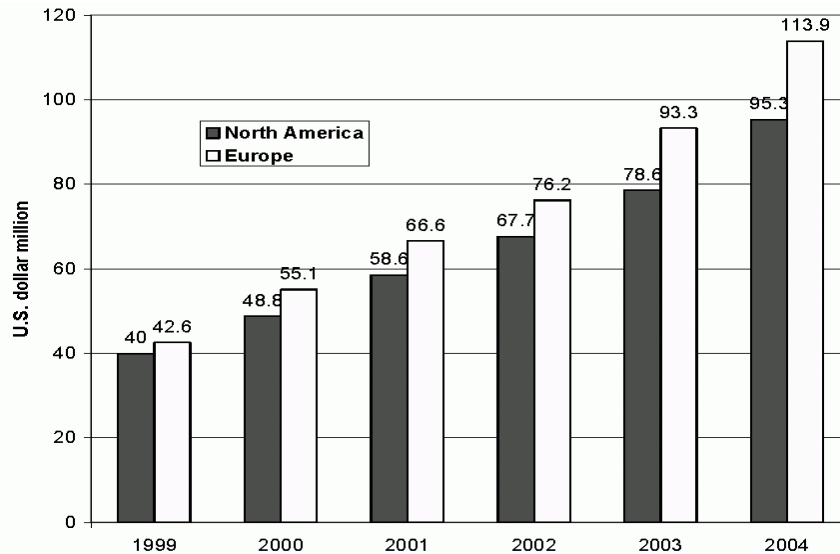


Fig.1: Evoluzione del mercato dei motori lineari (fonte: IMS Research, UK).

2. GENERALITÀ SULLA STRUTTURA ELETTROMAGNETICA

Come noto, gli attuatori elettromagnetici lineari sono concettualmente ottenibili dallo “srotolamento” su un piano dei più comuni motori elettrici rotanti (Fig.2). Inoltre, gli stessi principi di funzionamento dei tradizionali motori asincroni, sincroni e a corrente continua sovrintendono il funzionamento degli attuatori lineari. Nella tabella sottostante sono riassunte le corrispondenze tra le principali grandezze meccaniche, per i dispositivi rotanti e lineari.

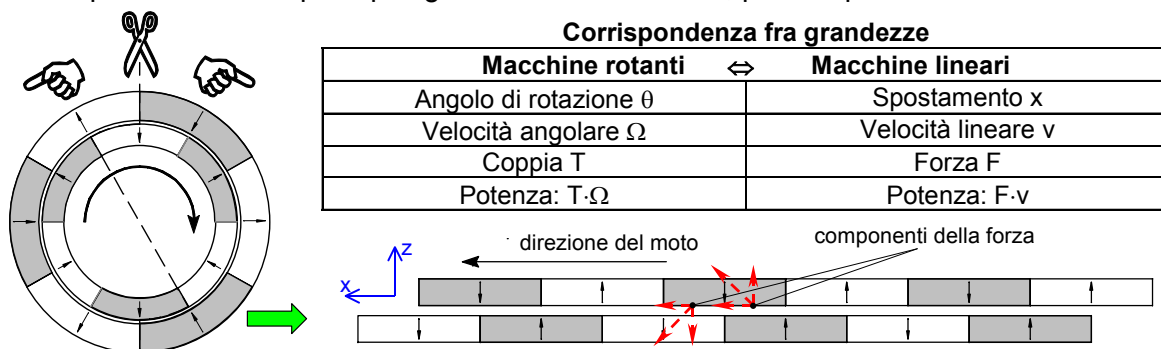


Fig.2: “Trasformazione” di principio di un motore rotante in un motore lineare; sono indicate le polarità magnetiche delle strutture affacciate e le componenti di forza f_x , f_z .

Anche la terminologia deriva da quella delle macchine rotanti: *statore* indica la parte fissa; la parte mobile, risultando improprio il termine “rotore”, è denominata *traslatore*, (in inglese, *slider* o *mover*); il meato interposto è detto *traferro*. *Primario* è la parte che produce il campo magnetico di eccitazione, mentre *l'indotto*, o *secondario*, investito da tale campo, è sede di f.e.m. indotte. Il *passo polare* ($2 \cdot \tau$) è la distanza che separa due poli omonimi magnetici consecutivi. Circa la struttura, si possono distinguere le seguenti tipologie:

- struttura *monolatera*: l'interazione avviene tra due superfici, attraverso un unico traferro;
- struttura *bilatera*: vi sono due coppie di superfici, affacciate attraverso due traferri: si tratta di una struttura a “sandwich” (con un doppio induttore includente un indotto o viceversa);
- qualora la struttura originaria della macchina rotante, “srotolata” sul piano, venga idealmente “riarrotolata” lungo la direzione del moto, si ottiene una configurazione *tubolare*;
- riguardo al campo magnetico, se le sue linee di forza si sviluppano nelle sezioni longitudinali del dispositivo, la struttura si definisce a *flusso longitudinale*, mentre si parla di una struttura a *flusso trasverso* nel caso di linee di campo giacenti in sezioni trasversali.

Per quanto riguarda la genesi fisica della spinta propulsiva, i contributi sono:

- l'*azione elettromagnetica* che si manifesta in presenza di anisotropia in una struttura ferromagnetica (presenza di salienze, dentatura,...): il campo di eccitazione, prodotto dall'induttore e solidale con esso, tende ad "attrarre le salienze", così da "agevolare" le linee di flusso (ad es., tendenza all'allineamento di un dente con un polo magnetico);
- l'*azione elettrodinamica* tra i campi generati da induttore ed indotto; anche in questo caso, il senso della azione è verso il rafforzamento del campo magnetico, per cui le due strutture tendono a disporsi in modo da avere le linee di flusso concordi (tendenza alla attrazione tra polarità magnetiche diverse, e alla repulsione tra polarità uguali → principio dell'allineamento).

Pur con tali analogie, gli attuatori lineari presentano alcune peculiarità che ne influenzano la struttura, il funzionamento e le prestazioni; tra queste specificità, si hanno:

- gli effetti di bordo longitudinali;
- la presenza di componenti di forza normali alla direzione del moto;
- la possibilità che la parte mobile costituisca direttamente il carico dell'attuatore.

2.1. Effetti di bordo longitudinali

Diversamente da una macchina rotante, nell'attuatore elettromagnetico lineare vi è un "inizio" ed ad una "fine" della struttura. Poiché l'azione elettromagnetica si sviluppa nella zona di sovrapposizione delle due parti, nel caso si adottassero parti di uguale lunghezza, si otterrebbe una spinta via via decrescente al ridursi dell'affacciamento reciproco (Fig.3).

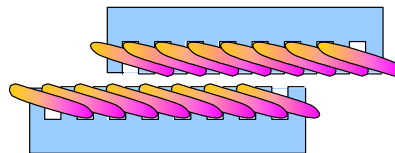


Fig.3: In un motore lineare con parti di lunghezza uguale, la zona di interazione elettromagnetica si riduce man mano che le due parti si spostano reciprocamente.

Per sviluppare una spinta uniforme con corse sufficientemente lunghe è necessario che una delle due parti sia considerevolmente più estesa dell'altra nel senso del moto. A seconda della collocazione di tale parte e della sua funzione si parla di attuatori a *statore lungo* (Fig.4.a) o a *statore corto* (Fig.4.b), oppure a *primario lungo* o a *primario corto*.

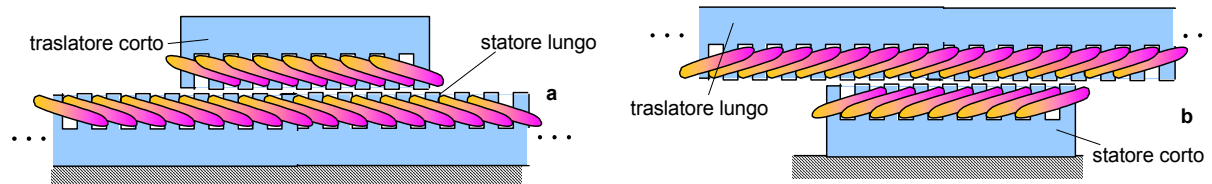


Fig.4: configurazioni di attuatori lineari: a) a statore lungo; b) a statore corto.

Se l'estensione della zona di sovrapposizione include un elevato numero di passi polari, il campo magnetico ha un andamento pressoché periodico per gran parte dell'estensione del dispositivo, con prestazioni sostanzialmente simili a quelle di una macchina rotante corrispondente; viceversa, se ciò non avviene, si possono manifestare conseguenze negative sulle prestazioni, sia in termini di forza specifica (N/m) che di rendimento.

2.2 Forza normale

Nel caso di struttura monolaterale, l'interazione elettromagnetica tra le due parti possiede una componente di forza F_z ortogonale alle superfici affacciate (vedi Fig.2): talvolta, tale componente può essere dell'ordine di alcune volte l'entità della spinta propulsiva F_x .

Circa il verso di F_z , anche in questo caso si possono verificare due effetti, spesso simultanei:

- l'*attrazione elettromagnetica*, presente se la parte contenente l'indotto è ferromagnetica;

– l'interazione *elettrodinamica* tra i campi generati da induttore ed indotto: questo effetto può essere attrattivo o repulsivo a seconda dell'orientazione di tali campi (dipendente dal verso delle correnti negli avvolgimenti o da quello di magnetizzazione dei magneti permanenti).

In certi casi la componente normale risulta indesiderabile in quanto richiede un robusto sovradimensionamento strutturale delle parti e dei supporti di separazione fra esse: in tal caso si adottano, ove possibile, configurazioni in cui la forza normale sia assente (strutture ironless) o bilanciata (strutture bilatero o tubolari). In altri casi, invece, la componente normale risulta utile per realizzare un sistema di *sospensione o levitazione magnetica*, a seconda che si sfrutti il fenomeno dell'attrazione magnetica o della repulsione elettrodinamica.

2.3 Costruzione “aperta”

Nella grandissima parte delle macchine elettriche rotanti la parte mobile (rotore) è “avvolta” dallo statore, richiedendo quindi un albero per rinviare il moto al carico da azionare. Nel caso degli attuatori lineari, la configurazione aperta consente di collocare il traslatore al di sopra dello statore, senza alcun pregiudizio per il carico da disporre sul traslatore (“payload”); anzi, talvolta lo stesso oggetto da spostare può costituire il traslatore, qualora l'oggetto presenti adeguate caratteristiche di conducibilità elettrica e/o di permeabilità magnetica.

Lo schema di fig.5 riassume le principali caratteristiche strutturali dianzi considerate.

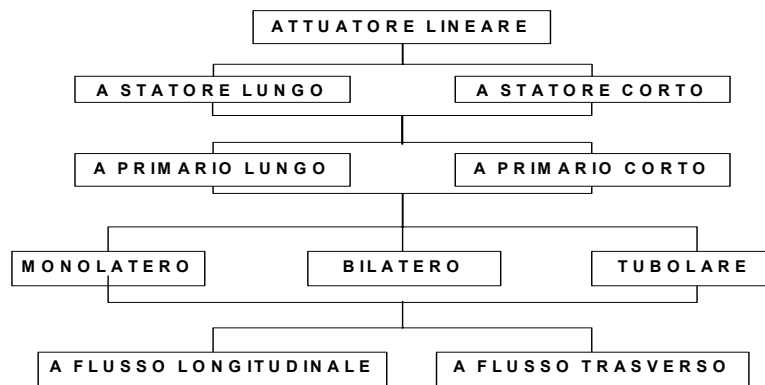


Fig.5: Schema riassuntivo delle tipologie strutturali degli attuatori elettromagnetici lineari.

3. TIPOLOGIE ED APPLICAZIONI

Anche se tutti i tipi di macchine rotanti possiedono concettualmente una corrispondente versione lineare, tuttavia, per “selezione naturale”, alcune tipologie si sono maggiormente affermate. Inoltre, mentre nell'uso delle macchine rotanti si considera prevalentemente la *potenza meccanica*, nel caso delle macchine lineari, vi sono i seguenti ambiti applicativi:

- *applicazioni di forza*: esse richiedono l'applicazione di forze a velocità nulle o molto basse: in questi casi non ha senso definire il rendimento, mentre utili indici di merito sono il rapporto (spinta/corrente assorbita), il rapporto (spinta/ $\sqrt{\text{potenza assorbita [VA]}}$) o il rapporto (spinta/peso della parte mobile); nei sistemi di posizionamento ha rilevanza la *risoluzione*;
- *applicazioni di potenza*: hanno campo di impiego simile a quello delle macchine rotanti; gli indici di merito sono pertanto il rendimento, il rapporto (potenza meccanica/corrente assorbita), il rapporto (potenza meccanica/peso della parte mobile); essendo di comune impiego in asservimenti di posizione e/o velocità, sono di interesse la risoluzione e la risposta dinamica;
- *applicazioni di energia o velocità*: il carico subisce una elevata accelerazione in corse brevi (ad es.: *catapulte* o *lanciatori* elettromagnetici); è richiesto il massimo trasferimento di energia cinetica W_c al sistema mobile, a scapito del rendimento; indici qualificanti sono i rapporti ($W_c/\text{corrente assorbita}$), ($W_c/\sqrt{\text{potenza assorbita [VA]}}$), ($W_c/\text{peso parte mobile}$).

Tra le varie tipologie di dispositivi lineari, quelle più diffuse sono basate su:

- motori passo-passo (Linear **Step Motor**: **LSTM**);

- motori a induzione (**Linear Induction Motor: LIM**);
- motori sincroni a MP (**Permanent Magnet Linear Synchr. Motor: PMLSM**);
- motori sincroni con bobine di campo (**Field Winding Linear Synchr. Motor: FWLSM**);
- attuatori per corse brevi (**LDCM**) e lanciatori elettromagnetici (**EML**).

Il tipo di motore lineare adottato dipende dalle caratteristiche della applicazione e dalle prestazioni richieste; di massima, si possono definire delle zone tipiche d'uso (Fig.6).

Il tipo sincrono con avvolgimenti di eccitazione (FWLSM), frequentemente usato nei sistemi di trasporto (ad es. nei treni MagLev EMS e EDS), non verrà approfondito nel seguito.

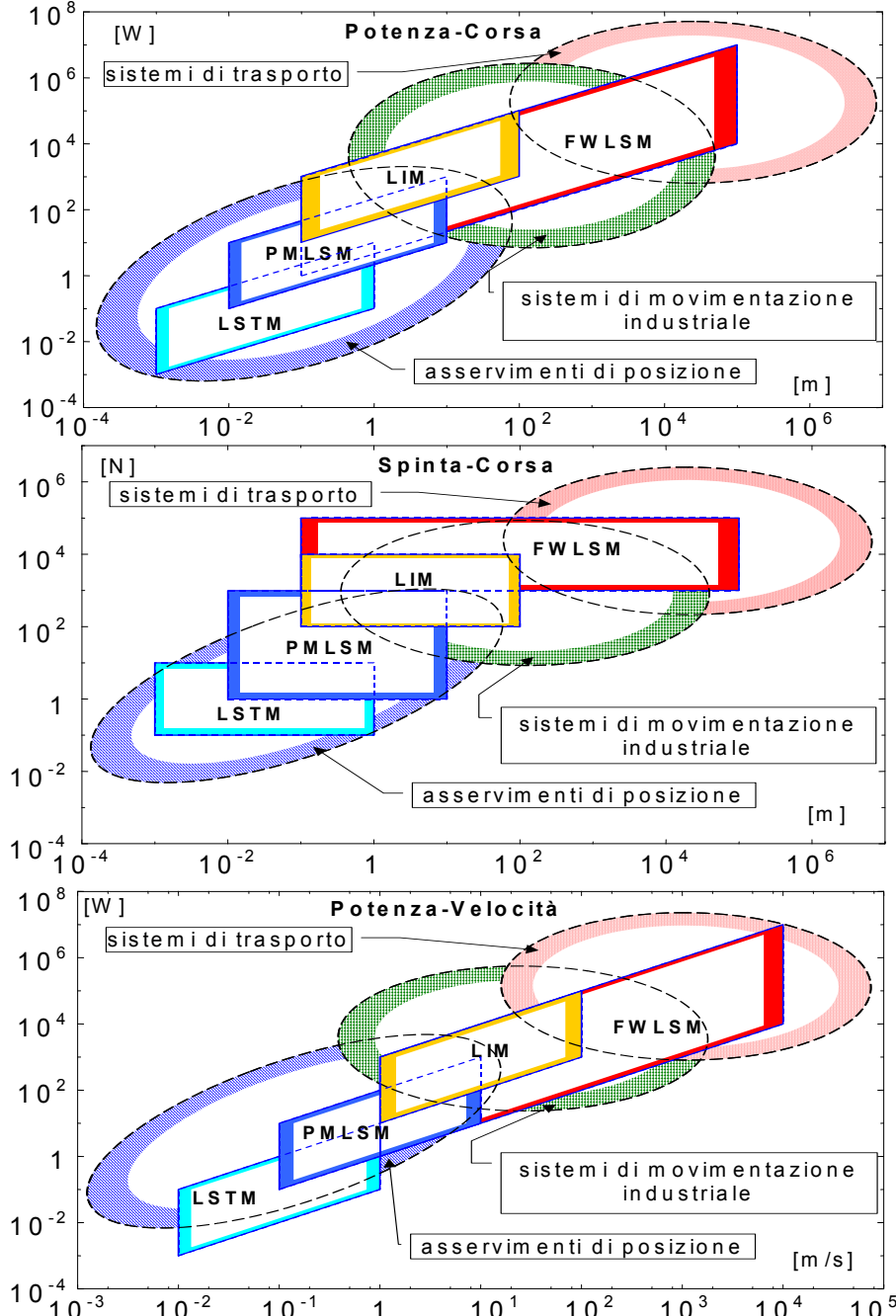


Fig.6: Campi tipici di impiego degli attuatori e dei motori lineari; legenda dei tipi:
 LSTM (Linear Step Motors): motori passo-passo;
 LIM (Linear Induction Motors): motori a induzione (asincroni);
 PMLSM (PM Linear Synchronous Motors): motori sincroni a magnete permanente;
 FWLSM (Field Winding Linear Synchr. Motors): motori sincroni con avvolgimento di campo.

3.1. Attuatori lineari utilizzando motori lineari passo-passo (LSTM)

Si tratta di dispositivi impiegati per corse medio-piccole (al massimo attorno al metro) e, come le loro controparti rotanti, sono caratterizzati dal fatto di poter realizzare spostamenti incrementali (ciascuno definito *passo*), in corrispondenza ad un'opportuna sequenza di impulsi di alimentazione, la cui frequenza può raggiungere anche qualche kHz, realizzando un movimento praticamente continuo. Circa la struttura elettromagnetica, gli avvolgimenti sono di solito posti sulla parte corta; se questa è mobile, l'alimentazione giunge mediante cavi flessibili. La parte lunga, normalmente fissa, può essere costituita da una struttura dentata ferromagnetica oppure da una serie di MP; una soluzione ibrida (da cui la denominazione del motore) è quella di collocare sulla parte mobile sia gli avvolgimenti che il MP (cfr. Fig.7).

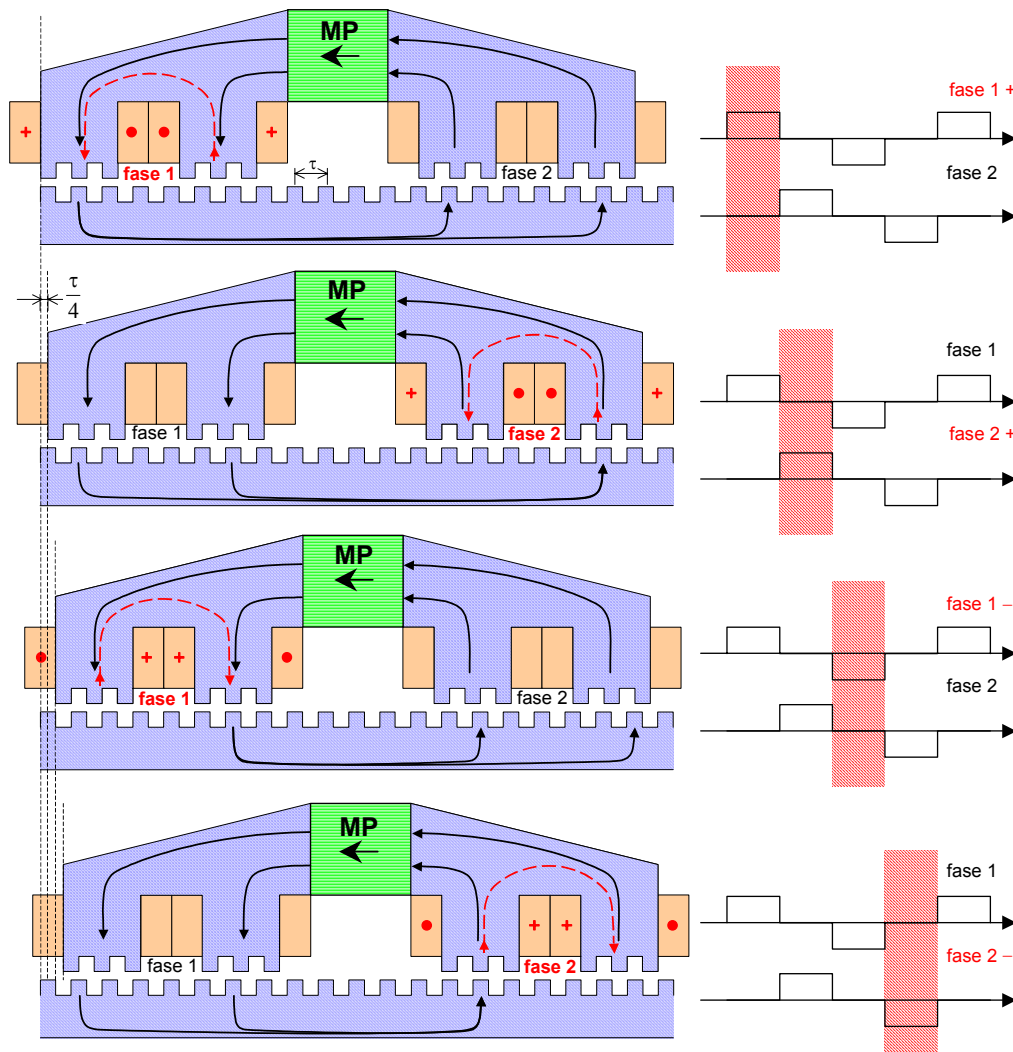


Fig.7: Sequenza di alimentazione di un motore passo-passo lineare ibrido bifase a semplice induttore: sono schematizzate a tratto continuo le linee di campo magnetico prodotto dal magnete permanente, a tratteggio quelle prodotte dalle correnti delle bobine alimentate.

Il passo di avanzamento di un motore a m fasi ($m=2$ o $m=4$) risulta essere $p=\tau/(2\cdot m)$; sempre in Fig.7, si osservi lo sfasamento di mezzo passo di dentatura ($\tau/2$) tra le due espansioni della stessa fase e di $\tau/4$ tra espansioni corrispondenti delle due fasi.

Tra le principali prerogative di questo tipo di attuatori, nella loro struttura base, vi sono:
 – la semplicità del controllo; infatti, non è necessario avere alcuna retroazione di posizione della parte mobile, e quindi il funzionamento può avvenire in catena aperta (Fig.8);

- l'economicità della pista, dovuta alla semplicità costruttiva e all'uso del solo lamierino;
- la semplicità del sistema di alimentazione (impulsi rettangolari alternati di tensione, Fig.7).



Fig.8: Schema di principio di controllo in catena aperta di un motore a passo lineare.

Valori tipici del passo sono dell'ordine del mm o di frazioni di mm; l'uso di tecniche di *microstepping* (alimentazione simultanea di due fasi consecutive con variazione graduale delle correnti) consente di aumentare la risoluzione del posizionamento: ciò evidentemente comporta un dispositivo di alimentazione più complesso di quello a semplice onda quadra.

Vi sono naturalmente anche alcuni svantaggi, da considerare in particolari applicazioni:

- la forza ha un andamento discontinuo, con conseguenti rischi di rumorosità, risonanze meccaniche ed instabilità in corrispondenza a particolari frequenze di alimentazione; questi fenomeni si possono attenuare variando gradualmente le correnti (*microstepping*);
- per ottenere prestazioni soddisfacenti, il rapporto tra traferro e passo di dentatura τ deve essere il più piccolo possibile; dunque, per valori piccoli del passo, il traferro deve essere ridotto a valori così bassi da implicare seri problemi di realizzazione meccanica;
- nelle realizzazioni monolateri, come quelle di Fig.7, vi è una forza normale di attrazione molto intensa, dell'ordine di 7÷10 volte la forza propulsiva.

Prestazioni statiche e dinamiche più elevate possono essere ottenute utilizzando un sistema di controllo in catena chiusa, nel quale la posizione della parte mobile viene rilevata mediante un opportuno sensore (generalmente un encoder di tipo lineare).

Configurazioni bilateri o tubolari (Fig.9), ove applicabili, consentono virtualmente di annullare, o almeno di ridurre la forza normale. Nel motore passo-passo a doppio induttore (Fig.9, a sinistra) le linee di flusso attraversano lo statore solo ortogonalmente al moto: ciò consente di ridurre la sezione centrale della guida, in quanto non interessata dalla richiusura del flusso; d'altro canto, rispetto alla struttura precedente, risulta aumentata l'inerzia della parte mobile. La figura di destra mostra invece la vista sezionata di un motore passo-passo ibrido tubolare, idoneo a sviluppare corse brevi; il principale vantaggio di tale soluzione sta nell'estrema semplicità costruttiva degli avvolgimenti, costituiti da bobine circolari, senza teste di collegamento; risulta invece problematica la costruzione di nuclei e guida ferromagnetica, se si vuole adottare il verso di laminazione in senso longitudinale, più congeniale al percorso delle linee di flusso.

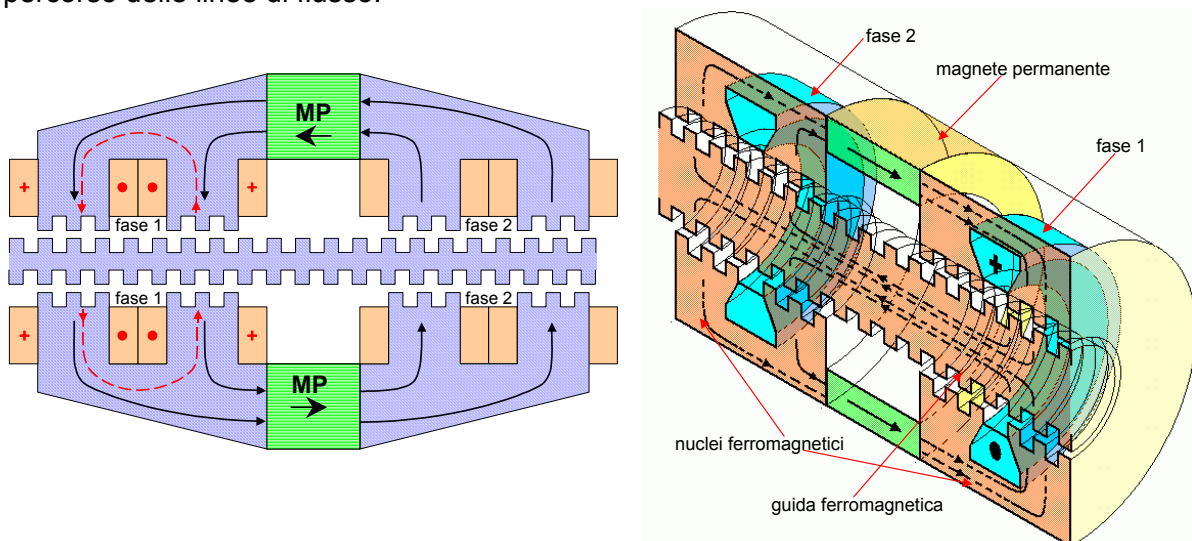


Fig.9: Sinistra: motore passo-passo lineare ibrido bifase bilatero a doppio induttore; destra: sezione di motore passo-passo lineare ibrido bifase di tipo tubolare.

Applicazione di guide lineari elettromagnetiche utilizzando LSTM piani.

Per quanto riguarda gli ambiti applicativi, possiamo dire che i motori lineari passo-passo rappresentano una soluzione economica ed affidabile per sistemi di posizionamento che richiedono precisioni dell'ordine della frazione di millimetro, corse non superiori a 2÷3 m e forze al massimo di qualche centinaio di N. Il peso della parte mobile tipicamente va da qualche decina di grammi a poco più di un chilogrammo, mentre i valori massimi di velocità ed accelerazione sono generalmente di qualche m/s e dell'ordine di 1 o 2 g ($10\div 20 \text{ m/s}^2$).

Possono essere realizzati anche controlli di posizione su due assi (vedi Fig.10.a): in tal caso la parte mobile può essere mantenuta sospesa sulla guida mediante cuscino d'aria, mentre la guida risulta costituita da una griglia rettangolare di denti uniformemente distribuiti.

Una possibile variante di motore passo-passo planare è mostrata in Fig.10.b: la parte fissa presenta una griglia rettangolare di MP, mentre quella mobile è dotata di un array tetra-fase di elettromagneti: il passo dei MP τ_{PM} è diverso dal passo degli elettromagneti τ_{EM} .

Senza pretesa di completezza, gli LSTM trovano applicazione nei seguenti settori: orologeria; macchine a controllo numerico; fotocopiatrici; plotter e stampanti; lettori di microfiches; registratori continui su carta; strumenti elettromedicali; apparati per la RMN; sistemi di controllo ottico; sistemi robotizzati; macchine per l'industria tessile.

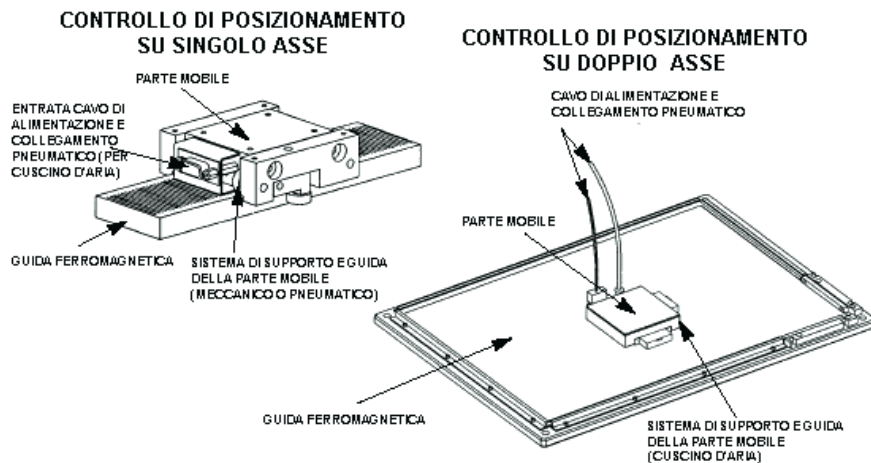


Fig.10.a: Sistemi di posizionamento su uno e due assi, con motori lineari passo-passo.

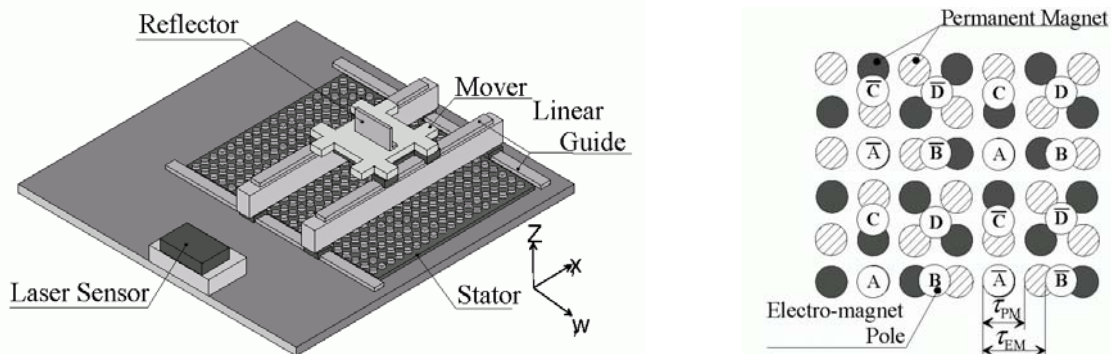


Fig.10.b: Motore planare con elettromagneti tetra-fase; a sinistra: vista complessiva; a destra: disposizione relativa fra elettromagneti e MP.

3.2. Attuatori lineari elettromagnetici utilizzando motori lineari a induzione

Nelle dispositivi utilizzando i motori lineari a induzione (LIM), il campo magnetico trasla al traferro con una velocità v_s [m/s], proporzionale a τ [m] e alla frequenza f [Hz]: $v_s = 2 \cdot f \cdot \tau$; come noto, il movimento relativo di tale campo rispetto all'indotto genera nella parte attiva di quest'ultimo una distribuzione di forze elettromotrici (f.e.m.), facendovi circolare un sistema di correnti: la loro interazione con il campo al traferro produce la spinta motrice, che trascina

l'indotto, facendogli inseguire il campo inducente, con velocità vicina, per difetto, a v_s . Tuttavia, il campo magnetico di un LIM è solo approssimativamente simile a quello della versione rotante: infatti, oltre alla componente diretta (nel senso del moto), esso ha anche una componente inversa (in senso opposto) ed una pulsante (dovuta alle discontinuità del circuito magnetico); peraltro, la componente diretta, responsabile delle forze utili, prevale.

Il primario del LIM (che include gli avvolgimenti alimentati) può essere mobile (traslatore) e in tal caso il secondario (detto anche indotto) è fisso (statore), o viceversa; inoltre, con riferimento alla loro lunghezza relativa, il primario può essere corto (Fig.11.a) o lungo (Fig.11.b); si hanno, poi, anche le versioni monolatera, detta anche a singola faccia (SLIM, Fig.12.a) e bilatera, denominata anche a doppia faccia (DSLIM, Fig.12.b).

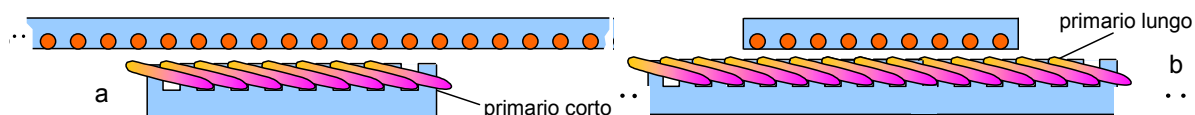


Fig.11: Configurazioni primario – secondario di un LIM:
a: LIM con primario corto; b: LIM con primario lungo.

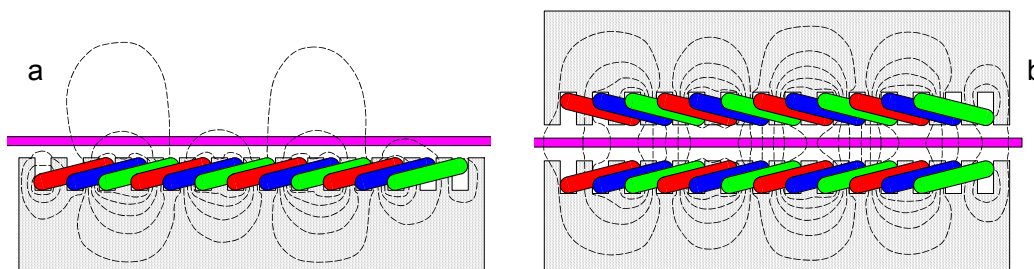


Fig.12: Strutture di principio di LIM, con mappe di campo:
a: LIM a singola faccia, o monolatero (SLIM); b: LIM a doppia faccia, o bilatero (DSLIM).

L'avvolgimento induttore, distribuito in cave, usualmente trifase, talvolta bifase, è simile a quello usato nelle versioni rotanti (tuttavia, frequentemente le cave di estremità sono occupate solo parzialmente dai conduttori); l'alimentazione può essere diretta da rete, cui consegue una velocità di traslazione praticamente costante; viceversa, per regolare la velocità è richiesta l'interposizione di un convertitore statico (tipicamente: raddrizzatore + invertitore).

L'indotto può presentare diverse configurazioni:

- indotto di tipo continuo, in lastra di materiale conduttore (vedi ancora Fig.12.a,b);
- indotto a scala, simile, nella versione linearizzata, all'indotto a gabbia (cfr. Fig.11);
- indotto composito, con la lastra conduttrice fissata su una base ferromagnetica (cfr.Fig.13).

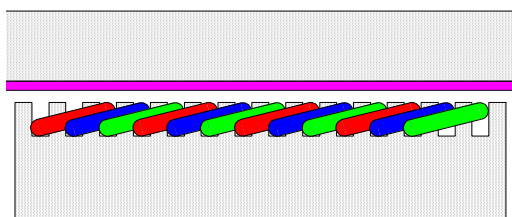


Fig.13: LIM monolatero con secondario di tipo composito: indotto a lastra, solidale ad un nucleo ferromagnetico per la richiusura dei flussi.

Se la struttura piana del primario viene riarrotolata attorno alla direzione del moto, si realizza una struttura cilindrica completamente diversa, con il campo in movimento lungo il "foro" del primario: questo tipo di macchina viene detta motore tubolare (cfr. Fig.14.a,b,c).

Il LIM piano e quello tubolare appartengono alla classe di motori lineari nei quali il flusso si sviluppa nel senso del moto: pertanto essi vengono anche detti motori a flusso magnetico longitudinale.

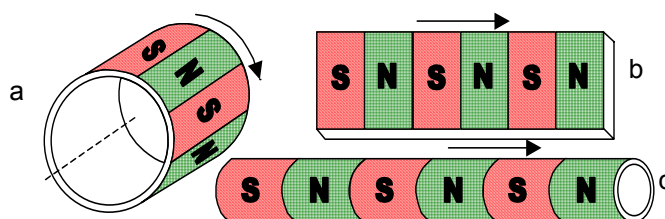


Fig.14: Sequenza di principio (a → b → c) per la realizzazione di un LIM di tipo tubolare.

Vi sono, tuttavia, anche versioni nelle quali il flusso si sviluppa perpendicolarmente alla direzione del moto (motori a flusso trasversale; cfr. Fig.15.I - caso a faccia singola, con indotto a lastra, di tipo composito - e Fig.15.II - caso a doppia faccia, con indotto a lastra-).

Nella Tabella successiva è riportata una classificazione schematica delle tipologie.

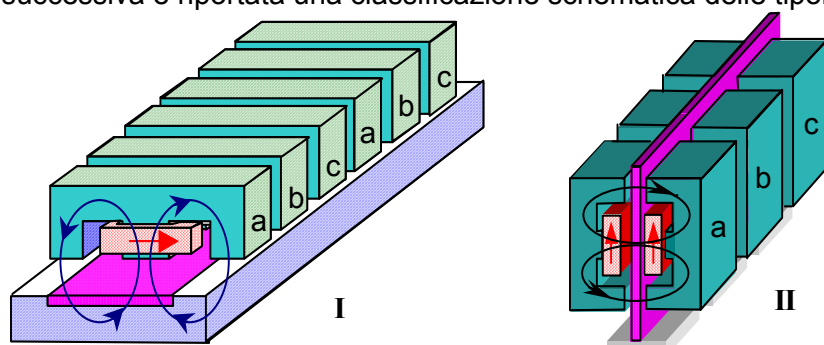


Fig.15 – Strutture di principio di LIM a flusso trasversale (TFLIM):
 I: LIM a flusso trasversale a singola faccia, o monolatero (STFLIM);
 II: LIM a flusso trasversale a doppia faccia, o bilatero (DSTFLIM).

| Classificazione delle tipologie di motori lineari a induzione (LIM) | | | | |
|---|---|---|----------------------------|----------------------------|
| primario corto | ← | ↓ | → | secondario corto |
| primario mobile | ← | | → | secondario mobile |
| secondario composito | ← | ↔ | → | secondario a lastra |
| traferro piano | ← | | → | traferro cilindrico |
| LIM a flusso trasversale | | | | LIM a flusso longitudinale |
| | | | | |
| monolatero (a singola faccia); | | | bilatero (a doppia faccia) | |

3.2.1 Caratteristiche peculiari dei motori lineari a induzione di tipo piano.

I motori lineari a induzione di tipo piano presentano alcune specificità costruttive e funzionali usualmente assenti nei tipi rotanti: particolarità degli avvolgimenti; presenza di forze normali; effetti di estremità longitudinali ed effetti di bordo trasversali.

Particolarità degli avvolgimenti.

La realizzazione di un avvolgimento in doppio strato con cave uniformemente riempite richiede, per i LIM piani, particolari accorgimenti, dovuti alle discontinuità nelle zone di estremità longitudinale; in linea di principio, si possono adottare le seguenti soluzioni:

- completamento delle matasse di estremità al di fuori del traferro (metodo non molto applicato, perché non agevolmente realizzabile con sufficiente compattezza costruttiva);
- avvolgimento delle sole matasse di estremità attorno al nucleo magnetico primario (soluzione valida per applicazioni a bassa velocità, perché in questo caso tali matasse contribuiscono pienamente alla spinta propulsiva, comportando, per contro, scarsi effetti negativi);
- avvolgimento di tutte le matasse attorno al nucleo magnetico primario (l'avvolgimento assume l'aspetto ad anello di Pacinotti, con notevoli vantaggi di semplicità costruttiva).

Peculiarità funzionali dei LIM piani.

Forze normali.

Si tratta di azioni meccaniche normali al traferro, di entità anche fino ad alcune volte la spinta; in un LIM piano è presente la forza normale repulsiva, generata dalle correnti indotte nel secondario; se, però questo è dotato anche di un nucleo ferromagnetico, si sviluppano anche forze normali attrattive (superiori o inferiori a quelle repulsive, a seconda delle scelte di progetto e delle condizioni funzionali). In caso di LIM bilatero, le forze normali sono nulle.

Effetti di estremità longitudinali.

Sono dovuti alle discontinuità magnetiche longitudinali agli estremi del traslatore: gli effetti dinamici, crescenti con la velocità, generano f.e.m. e quindi correnti aggiuntive nel secondario, vicino agli estremi del traslatore, causando perdite addizionali e forze frenanti (questi effetti si attenuano graduando gli avvolgimenti agli estremi del traslatore, in modo che la distribuzione di estremità del campo magnetico sia spazialmente più graduale); viceversa, gli effetti statici, presenti anche da fermo, sono legati alle dissimmetrie nei parametri di fase, che implicano correnti squilibrare, anche con tensioni di alimentazione simmetriche.

Effetti di bordo trasversale.

Si verificano perché il primario e il secondario di un LIM hanno larghezza trasversale finita e di solito il secondario è di ampiezza maggiore (Fig.16.a,b). In ogni punto della lastra esistono componenti di densità corrente J_x dirette in senso normale al moto (utili alla spinta) e componenti J_y dirette nel senso del moto (causa degli effetti di bordo trasversali: incremento di perdite, riduzione della azione propulsiva, possibili forze di sbandamento trasversale); a tale proposito, esiste una dimensione "d" ottima delle bande trasversali della lastra, che fungono da richiusura delle correnti di indotto, e lungo le quali è massima J_y : larghezze "d" troppo esigue obbligano le correnti indotte a richiudersi nella zona di influenza del primario, con degrado delle prestazioni; valori esuberanti di "d", non più efficaci, risultano invece costosi. In Fig.17 sono mostrati un primario di LIM piano e un LIM piano bilatero, per uso industriale.

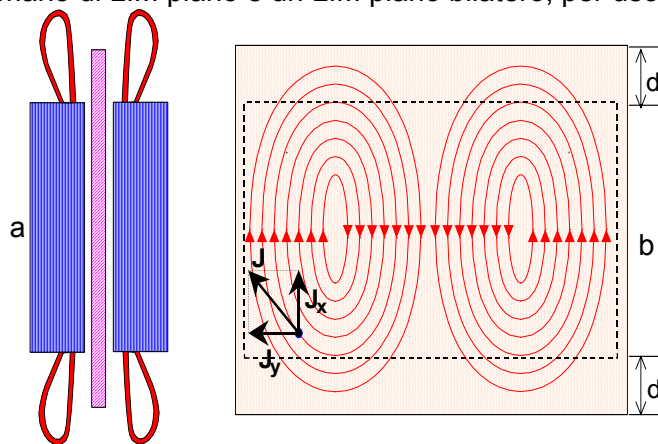


Fig.16: Vista trasversale e nel piano della lastra di un DSLIM a primario corto; a: vista delle teste delle bobine primarie e delle bande trasversali del secondario a lastra; b: distribuzione qualitativa delle linee del campo di densità di corrente indotta nella lastra.

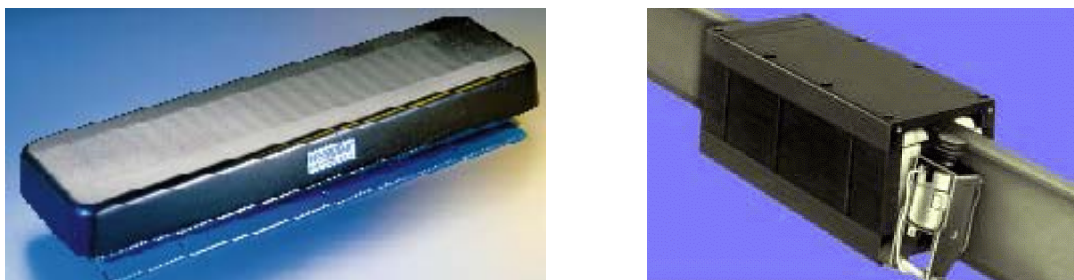
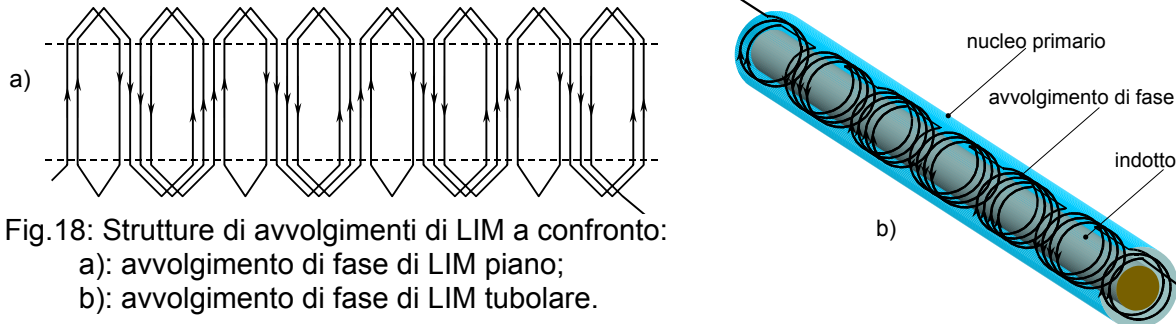


Fig.17: LIM piani a induttore corto: a sinistra: primario di LIM monilatero; a destra LIM piano bilatero.

3.2.2 Caratteristiche peculiari dei motori lineari a induzione di tipo tubolare.

Particolarità degli avvolgimenti.

La struttura di avvolgimento dei LIM tubolari costituisce uno degli elementi a favore di questa tipologia: si tratta, infatti, di avvolgimenti concentrati (Fig.18.b), che consentono notevoli vantaggi rispetto alla soluzione tradizionale (tipica dei LIM piani e dei dispositivi rotanti, cfr. Fig.18.a): il vantaggio costruttivo è la facilità realizzativa delle bobine concentrate; il vantaggio funzionale è dovuto alla assenza delle teste di collegamento, con riduzione delle perdite per effetto Joule e totale sfruttamento del materiale conduttore ai fini della spinta.



Peculiarità funzionali dei LIM tubolari.

Forze normali, effetti di estremità longitudinali e di bordo trasversali.

Pur esistendo una distribuzione di sforzi normali al traferro, che agiscono radialmente in ogni punto delle strutture cilindriche, in condizioni di simmetria la risultante è nulla.

La limitata estensione longitudinale dei LIM tubolari implica effetti simili a quelli dei LIM piani; peraltro, date le velocità medio - basse, tali fenomeni si possono ritenere modesti.

La simmetria di rotazione dei LIM tubolari implica la totale assenza di effetti trasversali. In Fig.19 sono mostrati, come esempio, due motori tubolari, per applicazioni di corsa ridotta e forza limitata; a destra, è illustrata una soluzione costruttiva di carcassa alettata estrusa.

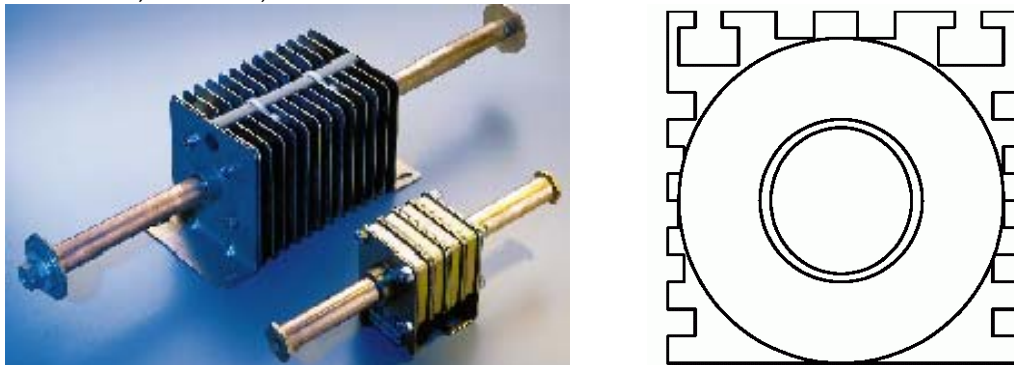


Fig.19: A sinistra: coppia di motori LIM di tipo tubolare, per applicazioni industriali di corsa e forza limitate; a destra: sezione di carcassa alettata longitudinalmente per estrusione

Esempi di applicazione di guide lineari elettromagnetiche utilizzando LIM piani.

Applicazioni industriali dei LIM piani.

I LIM piani per uso industriale possono sviluppare forze di 2 kN, soprattutto a bassi valori di rapporto di intermittenza (ad es., 10%), con accelerazioni di 1 g e velocità fino a 50 m/s. Questi dispositivi sono caratterizzati da: manutenzione limitata, costi ridotti, varietà nelle dimensioni, usura modesta, corse estese; se impiegati con azionamenti vettoriali, consentono anche il controllo di posizione.

Le applicazioni, anche per forze e corse rilevanti, riguardano: movimentazione e manipolazione industriale dei materiali: stiramento di nastri di alluminio; azionamento di nastri trasportatori; movimentazione x-y di contenitori per trasporto materiale ("pallets"); estrusione di materiali metallici; separazione del materiale metallico da quello non metallico.

Applicazioni industriali dei LIM tubolari

Si tratta di LIM usualmente non impiegati per posizionamento, ma in grado di sviluppare discreti valori di forza, con buone caratteristiche di uniformità e costanza, per corse medio-piccole. Sono dispositivi senza contatto, quindi a bassa usura e manutenzione; consentono di applicare accelerazioni dell'ordine di 1 g, con velocità dell'ordine di 2-3 m/s, sostituendo efficacemente gli attuatori di tipo pneumatico o oleodinamico. Fra le applicazioni, i lanciatori elettromagnetici di spolette per telai e le pompe elettromagnetiche per i metalli liquidi.

3.3. Attuatori lineari elettromagnetici con motori lineari sincroni a MP (PMLSM).

L'elemento peculiare dei motori sincroni lineari a MP (PMLSM) è la generazione del campo magnetico ad opera dei MP: in generale, questa caratteristica consente di contenere le perdite, incrementare la densità di forza, l'efficienza e il fattore di potenza. La Fig.20 mostra, in funzione della spinta, la densità di forza di diversi PMLSM a confronto con il LIM, funzionante in condizioni di raffreddamento naturale (NC): ovviamente, i LSM con raffreddamento forzato (AC, WC, OC) hanno densità di forza superiori; tuttavia, anche il LSM con raffreddamento NC ha densità di forza più alte, sia pure per valori di forza più ridotti, rispetto a quelli dei LIM.

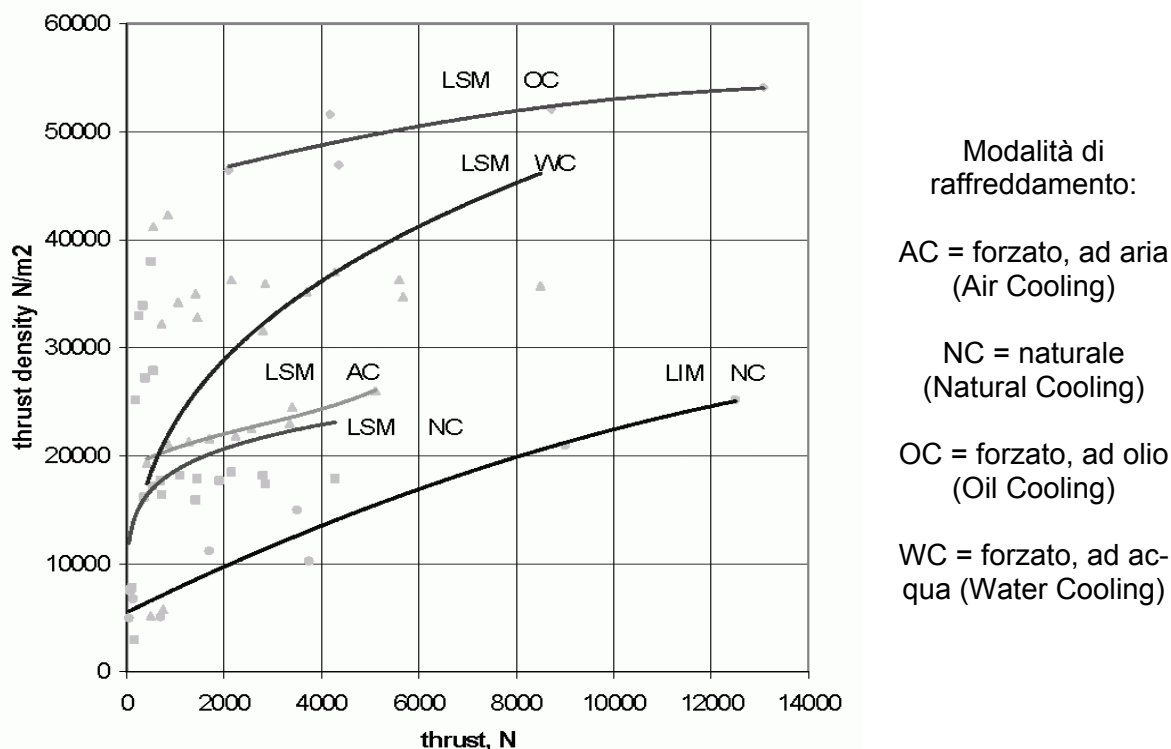


Fig.20 – Confronto fra la densità di forza di LIM monolateri e motori sincroni a MP (LSM).

In termini strutturali, i PMLSM presentano diverse configurazioni (cfr. Fig.21): possono avere forma piana o tubolare, induttore corto o lungo, MP superficiali (SPM) o interni (IPM), indotto dentato ("slotted"), senza cave ("slotless") o senza nucleo ("ironless").

Le modalità di alimentazione adottate, in analogia alle controparti rotanti, possono essere con correnti a forma d'onda sinusoidale o in onda quadra, corrispondentemente al fatto che la f.e.m. indotta in ciascuna fase può avere forma d'onda sinusoidale o trapezoidale (per questa intrinseca proprietà, talvolta le macchine sono denominate "a.c. brushless" o "d.c. brushless").

La generazione della spinta si può interpretare invocando la legge delle azioni elettrodinamiche agenti sui conduttori attivi immersi in un campo magnetico, oppure considerando il principio dell'allineamento fra i campi al traferro, dovuti rispettivamente all'induttore e all'indotto.

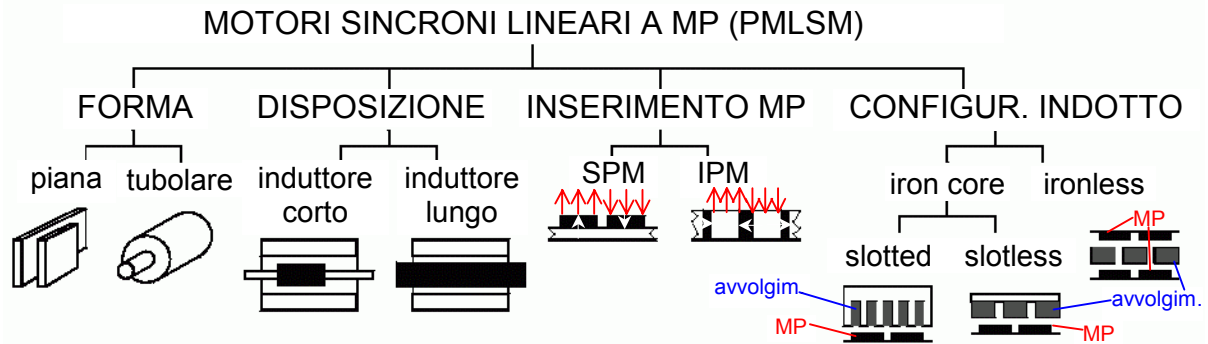


Fig.21: Disposizioni strutturali dei motori sincroni lineari a MP

La legge delle azioni elettrodinamiche si può così descrivere: un conduttore di lunghezza ℓ percorso dalla corrente i e immerso in un campo magnetico di induzione B è soggetto ad una *forza elettrodinamica* F diretta ortogonalmente sia alle linee di campo che alla direzione della corrente; vettorialmente si ha: $\vec{F} = i \cdot \vec{\ell} \wedge \vec{B}$. Nel contempo, se il conduttore è in moto, in esso si sviluppa una *forza elettromotrice (f.e.m.)* che tende ad opporsi alla circolazione di corrente (funzionamento da *motore*) o a favorirla (funzionamento da *generatore*). Se si dispone una serie allineata di MP di polarità alternate e si alimentano opportunamente nel tempo le 3 fasi di armatura, è possibile ottenere una spinta pressoché costante nel tempo.

Nelle macchine “sinusoidali” il campo al traferro prodotto dalle correnti, a distribuzione pressoché sinusoidale, trasla con velocità $v = 2 \cdot f \cdot \tau$: la sua interazione con il campo dei MP è all’origine dell’effetto propulsivo: la generazione della spinta si può interpretare sia con l’applicazione del principio dell’allineamento fra i campi, che sulla base delle forze elettrodinamiche sui lati attivi in cava (cfr. Fig.22, frecce \leftarrow), immersi nel campo prodotto dai MP.

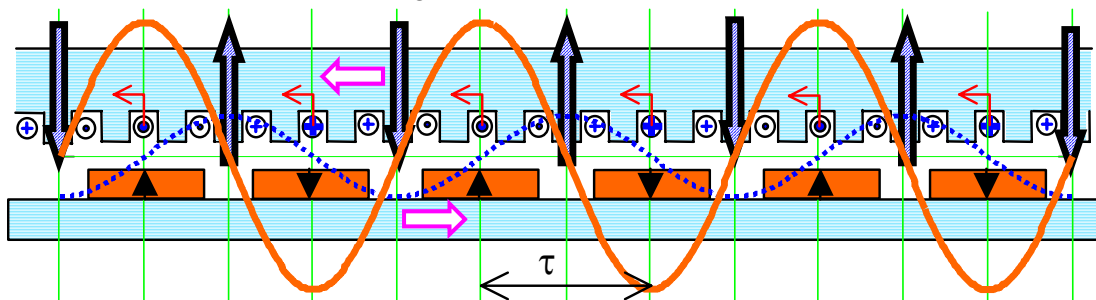


Fig.22: Schema del principio di funzionamento del motore sincrono lineare a MP: sinusoide —, con relativi assi magnetici (frecce $\blacktriangle, \blacktriangledown$ nei MP): campo prodotto dai MP; sinusoide - - - -, con relativi assi magnetici (frecce spesse a tratteggio): campo prodotto dalle correnti trifase di statore (versi di figura nell’istante generico); tale campo è traslante perché le correnti statoriche sono alternate, con forma d’onda pressoché sinusoidale. Per il principio dell’allineamento, le due onde di campo al traferro tendono ad orientarsi additivamente: ne segue un effetto propulsivo reciproco (\leftrightarrow); la spinta sull’indotto può anche considerarsi come la risultante delle forze elettrodinamiche sui conduttori (\leftarrow).

Viceversa, nelle macchine “trapezoidali” l’alimentazione alle fasi si sussegue in modo diverso, come illustrato nello schema ideale di Fig.23: il campo magnetico presenta una distribuzione alternata, circa rettangolare, ed i conduttori di ogni fase sono considerati concentrati e idealmente filiformi. In realtà, la transizione nello spazio da una polarità all’altra avviene gradualmente e i conduttori di indotto sono distribuiti in più cave: nel caso vi sia un nucleo ferromagnetico, oppure, nelle configurazioni *ironless*, i conduttori si sviluppano su una certa estensione superficiale, a costituire una *bobina mobile (“moving coil”)*. In entrambi i casi, la f.e.m. indotta nei conduttori in movimento non varia bruscamente nel passaggio da una polarità all’altra, presentando una inversione graduale, con forma d’onda circa *trapezoidale*.

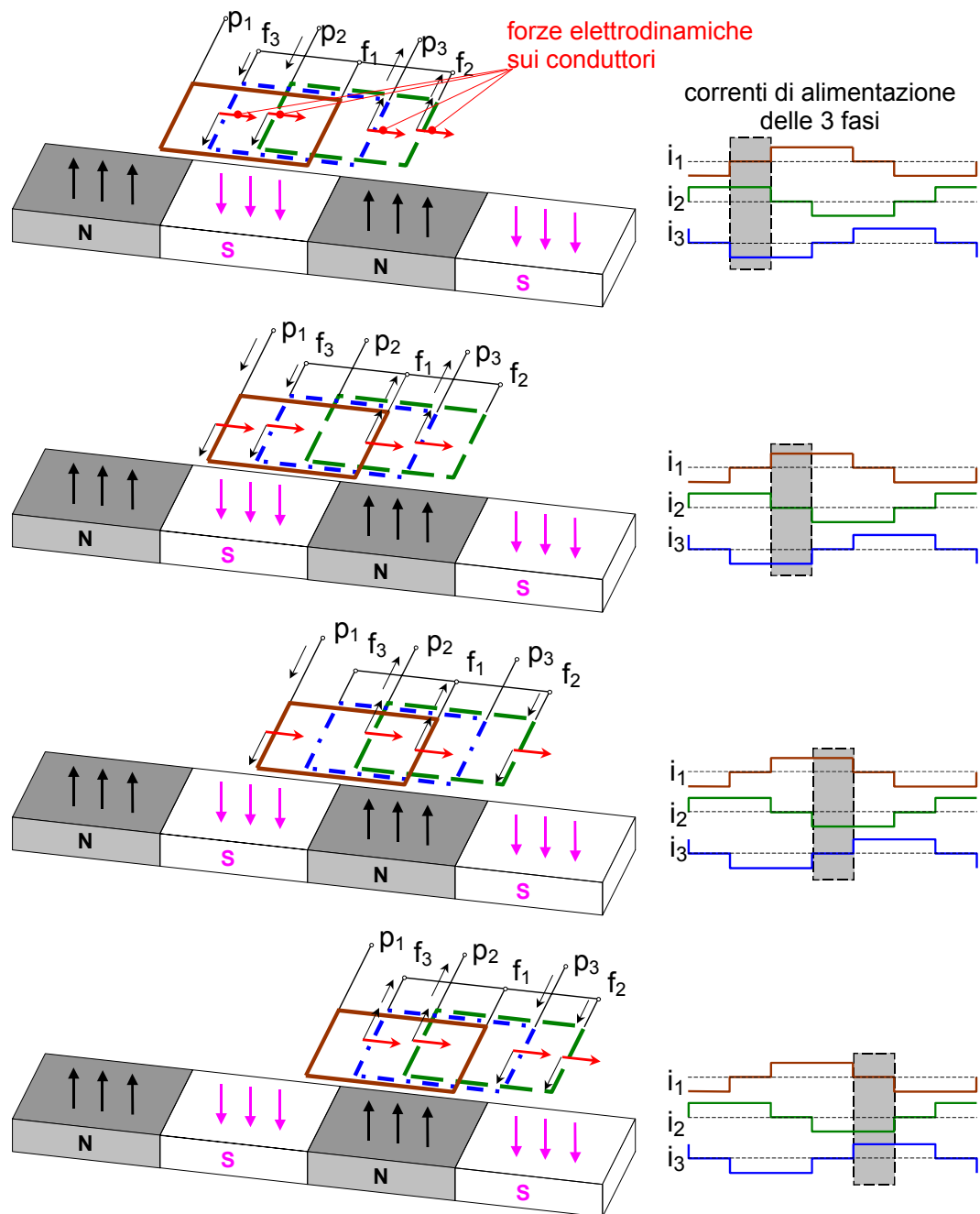


Fig.23: Principio di funzionamento di un PMLSM "trapezoidale", con collegamento a stella degli avvolgimenti di armatura (p_k, f_k = principio, fine dell'avvolgimento di fase k , $k = 1, 2, 3$).

La determinazione degli istanti opportuni in cui effettuare la commutazione richiede di individuare la posizione degli avvolgimenti rispetto al campo magnetico dei MP. Comunemente ciò si ottiene mediante 3 sensori ad effetto Hall, sfasati tra loro di $2\cdot\tau/3$: tali sensori, in base alla orientazione del campo dei MP da cui sono investiti, forniscono tre segnali in tensione sfasati tra loro temporalmente di $2/3$ del periodo impiegato dalla parte mobile a percorrere il passo polare $2\cdot\tau$. Queste uscite sono elaborate dalla logica di controllo, insieme con il segnale proveniente generalmente da un encoder di tipo lineare che definisce lo spostamento della parte mobile rispetto ad un riferimento fisso, per pilotare opportunamente gli interruttori statici che collegano gli avvolgimenti di armatura alla sorgente di alimentazione.

La Fig.24 mostra una rappresentazione di principio dello schema di comando di un PMLSM, dotato di un servoamplificatore (costituito da un convertitore statico di potenza) per l'alimentazione in corrente alle tre fasi, di un trasduttore che fornisce un opportuno segnale proveniente dal sistema azionato dal LSM, di un trasduttore di posizione e di un controllo che invia i comandi di accensione agli interruttori statici del convertitore, sulla base del segnale di comando e dei segnali di retroazione anzidetti.

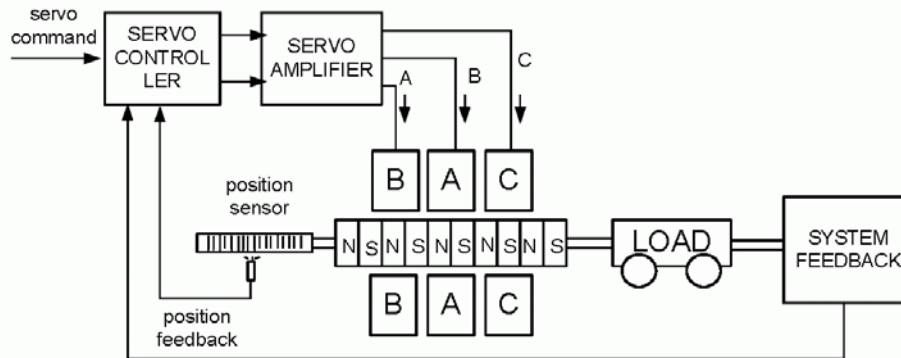


Fig.24: Rappresentazione di principio dello schema di comando di un PMLSM.

In linea di principio, i LSM possono essere configurati con induttore a MP corto o lungo. Il vantaggio della soluzione con induttore corto è l'assenza di avvolgimenti sulla parte mobile e quindi di cavi flessibili o di contatti striscianti per l'alimentazione ed anche un limitato impiego di MP, relativamente costosi; d'altro canto, l'avvolgimento di indotto deve essere sviluppato sull'intera corsa del dispositivo, che, nel caso di sistemi di automazione o di movimentazione, può essere di diversi metri. Ciò risulta estremamente penalizzante in termini di:

- elevati costi di costruzione dell'avvolgimento di indotto, che, data la sua lunghezza, deve essere alimentato con tensioni relativamente elevate;
- sovradimensionamento in tensione del convertitore di alimentazione;
- bassi valori di rendimento e di fattore di potenza, in quanto deve essere alimentata l'intera pista, mentre l'interazione tra parte fissa e mobile è limitata alla lunghezza di quest'ultima;
- basse velocità di risposta, per l'elevata induttanza di dispersione degli avvolgimenti.

Un'ulteriore considerazione gioca a favore della soluzione con induttore lungo: infatti, alimentando separatamente due o più indotti mobili, è possibile, pur di evitare collisioni, utilizzare la medesima guida a MP per comandare più traslatori tra di loro indipendenti, con significativo risparmio economico. Di fatto, dal punto di vista applicativo, si riscontra che la soluzione a induttore lungo è comunemente adottata per spinte fino a qualche kN e corse fino a qualche metro. Dato che le velocità di rado superano qualche m/s, per le lunghezze di corsa più cospicue l'alimentazione avviene tramite contatti striscianti.

Le disposizioni adottate sono numerose; fra esse, si citano le seguenti:

- strutture piane, bilatere, *ironless*, con indotto del tipo *moving coil*;
- strutture piane, monolatere, *ironless*, con induttore a MP in configurazione Halbach;
- strutture piane, mono e bilatere, con nucleo ferromagnetico;
- strutture tubolari, con nucleo ferromagnetico.

Le strutture piane, bilatere, *ironless*, con indotto *moving coil* (Fig.25) generano una spinta regolare, senza le fluttuazioni ("ripple" di forza) dovute alla presenza della dentatura e agli effetti di estremità longitudinale, propri delle strutture ferromagnetiche (fenomeno del *cogging*). Inoltre, l'assenza di parti ferromagnetiche riduce l'inerzia, migliorando perciò le prestazioni dinamiche; infine la soluzione "ironless" (al pari della disposizione bilatere) implica forze normali virtualmente nulle, riducendo notevolmente l'onere legato al dimensionamento del sistema di supporto.

Per contro, nel caso si desiderino ottenere valori adeguati dell'induzione e quindi della spinta, l'assenza del materiale ferromagnetico impone l'adozione di una disposizione bilatere

dell'induttore, tra cui va posto l'indotto: i magneti disposti sull'induttore devono inoltre essere di adeguato spessore nel senso della magnetizzazione, così da ottenere adeguati valori di induzione al traferro. Ciò da un lato determina un sensibile incremento del costo; dall'altro implica talvolta problemi dimensionali e di sollecitazioni meccaniche, che possono limitare l'applicabilità del dispositivo, in quanto il carico può essere collegato alla parte mobile solo su di un fianco e non su di una faccia frontale come nel caso di configurazione monolatera.

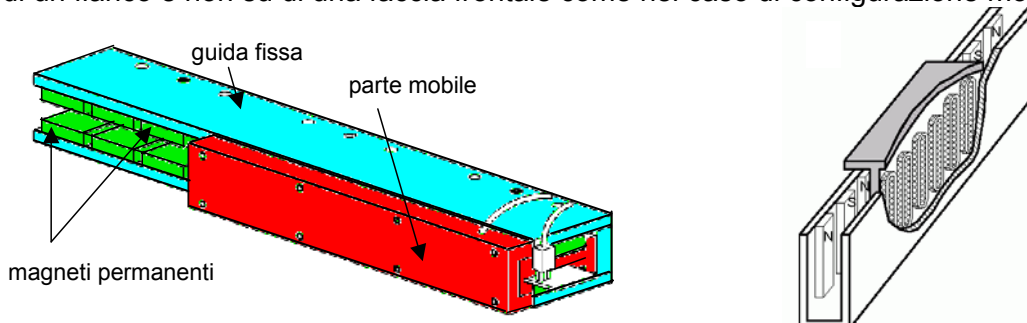


Fig.25: Layout e struttura schematica interna di un PMLSM "ironless" bilatero.

Allo scopo di ottenere attuatori con sviluppo di forza assolutamente esente da oscillazioni, sono state studiate soluzioni totalmente prive di parti ferromagnetiche, sia sull'induttore che sull'indotto. Una configurazione di induttore particolarmente efficace a questo scopo è quella denominata Halbach (Fig.26, a sinistra), nella quale i MP adiacenti presentano disposizione della magnetizzazione ciclicamente ruotata; una particolarità è la assenza della corona ferromagnetica di supporto. Come mostrato in figura, nella faccia inferiore dell'array di MP il campo di induzione è pressoché nullo, mentre si sviluppa ampiamente nello spazio soprastante la faccia superiore, ove la distribuzione $B_z(x)$ della componente normale di induzione risulta praticamente sinusoidale. Disponendo pertanto davanti alla superficie "attiva" dell'induttore un indotto monolatero di tipo "ironless", dotato di un avvolgimento polifase che produca un campo a distribuzione spaziale "sinusoidale", nel funzionamento in sincronismo, con correnti sinusoidali, si genera una spinta priva di "ripple".

La Fig.26 mostra, sulla destra, una versione 2D di un induttore con MP in configurazione Halbach (N, S: magnetizzazione rispettivamente uscente e entrante perpendicolarmente nel piano del disegno; $\leftarrow \uparrow \rightarrow \downarrow$: magnetizzazione giacente nel piano). Questa soluzione consente la realizzazione di attuatori per la movimentazione con direzione qualsiasi nel piano xy, pur di impiegare strutture "bidirezionali" per l'indotto. La Fig.27 ne illustra la struttura complessiva (a sinistra) e i singoli componenti (a destra): annegati in una opportuna matrice di supporto, nell'indotto sono disposti due avvolgimenti trifase, fra di loro ortogonali: la loro alimentazione separata e indipendente consente di controllare moti traslatori con qualunque direzione nel piano xy, producendo forze di propulsione praticamente prive di oscillazione.

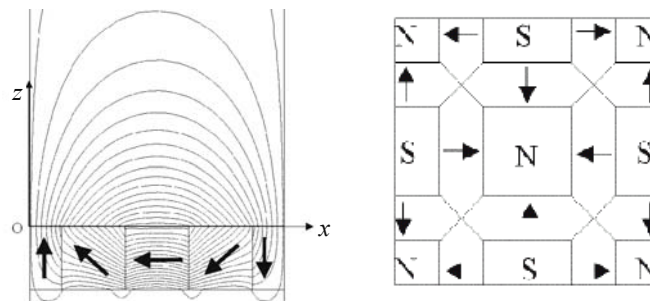


Fig.26 – Disposizione Halbach di un induttore "ironless" a MP: a sinistra = configurazione 1D (il campo si sviluppa praticamente solo davanti alla faccia superiore, con distribuzione sostanzialmente sinusoidale della componente normale, $B_z(x)$); a destra = configurazione 2D (N e S indicano rispettivamente magnetizzazione uscente e entrante perpendicolarmente nel piano del disegno, mentre le frecce indicano magnetizzazione giacente in tale piano).

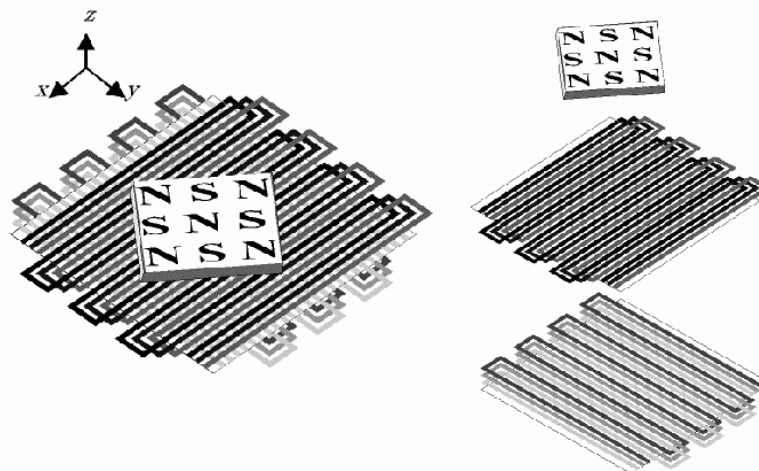


Fig.27 – Motore PMLSM per movimentazione planare: a sinistra: disposizione d'insieme; a destra: array di MP in configurazione Halbach planare e avvolgimenti trifase d'asse x e y.

Anche nel caso di attuatori lineari o planari con induttore del tipo Halbach, la struttura totalmente “ironless”, avente il pregio di eliminare il “ripple” di forza, limita la densità di spinta ottenibile e quindi è poco adatta in quelle applicazioni che richiedono spinte elevate, con limitato ingombro dell’attuatore.

La configurazione con nucleo ferromagnetico (Fig.28) è quella che consente di sviluppare la spinta più elevata, a parità di amperspire di indotto, naturalmente a costo di una maggiore inerzia. A parità di forza da sviluppare, la più elevata magnetizzazione del traferro, dovuta alla presenza del nucleo ferromagnetico, consente di ridurre il livello delle correnti: ciò ha risvolti vantaggiosi anche per il dimensionamento del convertitore e quindi per il parametro costo per unità di spinta. La penalizzazione in termini di prestazioni dinamiche può risultare poco rilevante qualora il carico abbia già di per sé un’inerzia elevata. Il *cogging* risulta inevitabile a causa della presenza delle cave, anche se può essere sensibilmente ridotto adottando per i magneti una disposizione inclinata nel senso del moto (*skewing*). Un problema, legato al dimensionamento del sistema di supporto, può essere costituito dalla forza normale, che può essere dell’ordine di 10÷20 volte la spinta: questo richiede l’adozione di cuscinetti adeguatamente dimensionati per sopportare i rilevanti carichi statici e dinamici che ne conseguono, oltre alla realizzazione di soluzioni meccanicamente assai rigide, per evitare problemi di deformazione. La fig.29 mostra una tipica vista di insieme di un sistema di posizionamento lineare a singolo asse, incorporante un PMLSM “iron-core” monolatero.

Infine, la fig.30 mostra lo spaccato di un PMLSM di tipo tubolare, nel quale i MP, con struttura anulare e magnetizzazione radiale, sono fissati sull’albero, mobile assialmente; gli avvolgimenti di indotto, sullo statore, sono costituiti da bobine concentriche: per questa tipologia di avvolgimento valgono le considerazioni precedentemente svolte a proposito dei LIM.

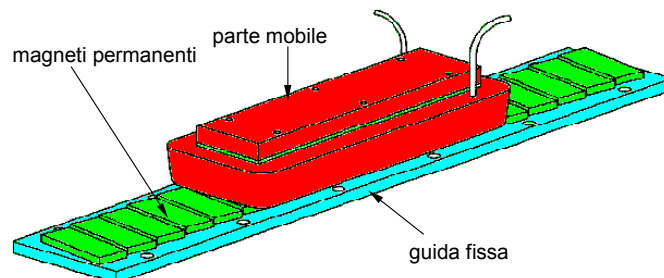


Fig.28: configurazione tipica di un LSM monolatero del tipo “iron-core” (indotto con nucleo ferromagnetico): da notare la disposizione inclinata dei magneti, per ridurre il “cogging”.

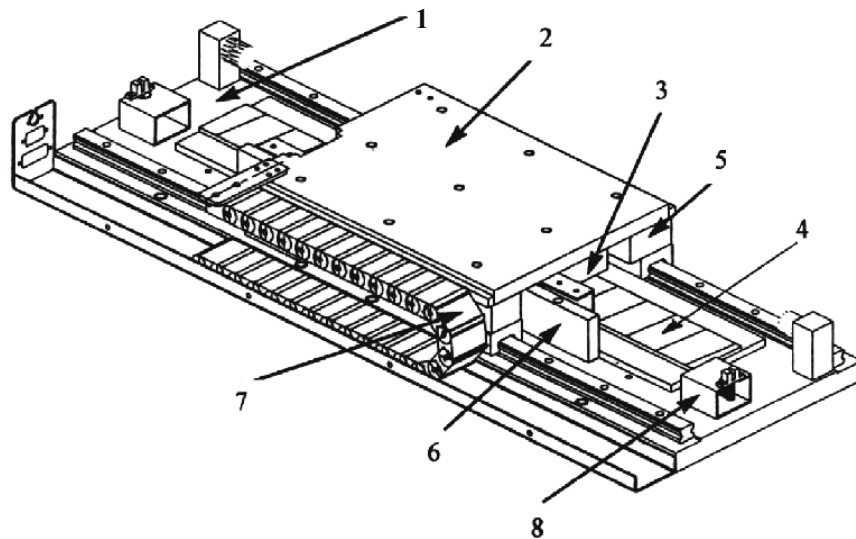


Fig.29 – Sistema di posizionamento lineare a singolo asse, con motore PMLSM monolatero “iron-core”: 1: basamento; 2: tavola mobile; 3: armatura del LSM; 4: magneti permanenti; 5: cuscinetti lineari; 6: encoder lineare; 7: nastro porta-cavi; 8: interruttore di fine corsa.

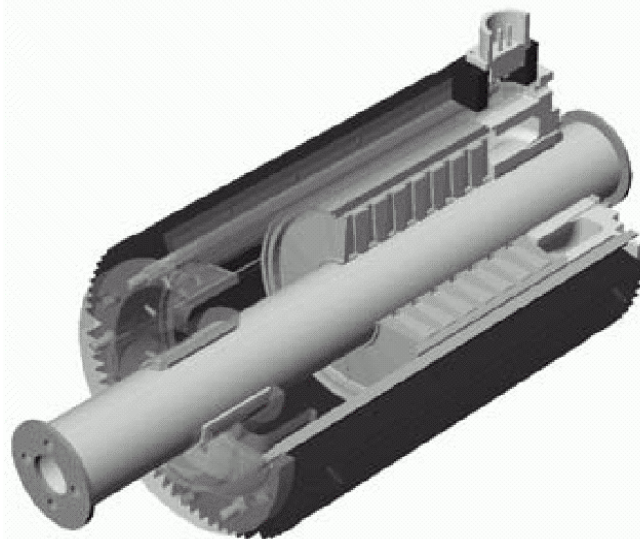


Fig.30 – Motore sincrono lineare tubolare a MP: i MP anulari (non visibili), sono montati sull'albero; gli avvolgimenti a bobine concentriche sono montati nella parte statorica.

Applicazioni dei PMLSM.

Sostanzialmente gli attuatori PMLSM coprono dei range di forza, potenza e lunghezza di corsa superiori a quelli degli LSTM, proponendosi come alternativa agli azionamenti che utilizzano i motori brushless rotanti convenzionali, accoppiati ai cinematismi di conversione da moto rotatorio a lineare.

Nei possibili campi di applicazione rientrano perciò: sistemi di imballaggio automatizzato; sistemi di stoccaggio automatizzato; sistemi di movimentazione ad alta velocità; sistemi di sollevamento senza fune; sistemi di manipolazione e di posizionamento di precisione; sistemi di puntamento per laser; sistemi di produzione di componenti nell'industria elettronica e nelle fabbriche di semiconduttori; sistemi di traslazione in ambienti ostili o “camere bianche”; assemblaggio automatizzato nell'industria automobilistica; robot di saldatura e taglio a caldo; lavorazione di fogli metallici; macchine manipolatrici per l'industria tessile; macchine per l'industria della plastica e del legno.

3.4. Attuatori lineari elettromagnetici in c.c. per corse brevi (LDCM).

Le tipologie e le disposizioni precedentemente descritte sono utilizzate, con diverse motivazioni di scelta, in applicazioni caratterizzate da corse di varia estensione, in relazione al sistema da azionare: peraltro, anche qualora il loro uso implichi corse limitate, tale ridotta escursione è tipica della applicazione, ma non costituisce un limite intrinseco dell'attuatore.

Viceversa, nel seguito si farà qualche accenno ad alcuni attuatori che strutturalmente sono del tipo "a corsa breve" (dell'ordine di grandezza da alcuni millimetri a qualche centimetro), in quanto la dimensione del traslatore nel senso del moto è poco diversa da quella della parte fissa, non potendosi dunque allontanare troppo da quest'ultima.

Sono dispositivi da alimentare in c.c. e pertanto vengono talvolta denominati motori lineari in corrente continua (Linear D.C. Motors).

Va subito osservato che la controparte lineare del motore rotante in corrente continua, dotato di collettore a lamelle, per quanto realizzabile in linea di principio ed effettivamente attuata in alcuni casi, soffre di un notevole handicap costruttivo: infatti per il suo funzionamento sarebbe necessario costruire un collettore "rettificato" costituito da una serie di lamelle disposte lungo l'intera escursione della parte mobile, con comprensibili aggravii economici di costruzione e di manutenzione, soprattutto per lunghe corse: tuttavia, proprio la breve escursione della corsa consente di evitare l'impiego del collettore, con grande semplificazione realizzativa.

Frequentemente i LDCM presentano strutture di tipo tubolare: la Fig.31 ne mostra due possibili disposizioni di principio, fra loro invertite: configurazione a bobina mobile (a), oppure disposizione a induttore mobile (b), quasi sempre del tipo a MP.

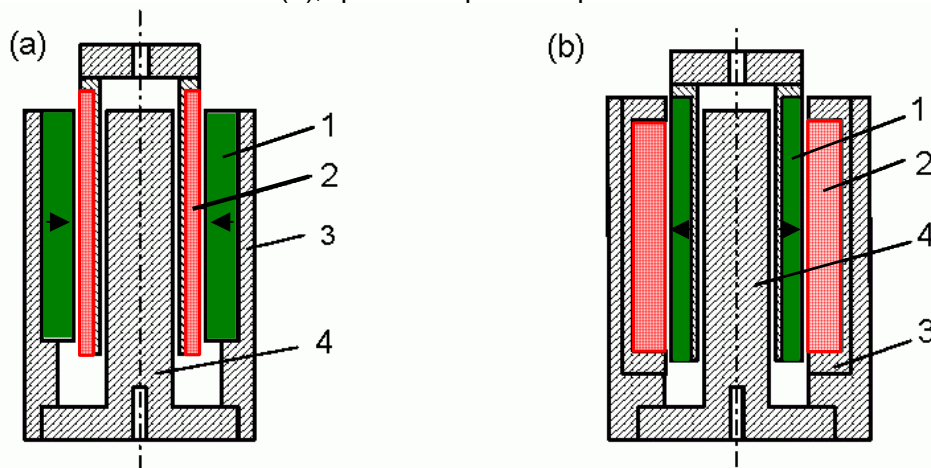


Fig.31: Attuatori lineari cilindrici a MP a corsa breve: (a) tipo a bobina mobile; (b) tipo a magnete permanente mobile. 1: magnete permanente; 2: bobina; 3: nucleo ferromagnetico esterno; 4: nucleo ferromagnetico interno.

In entrambi i casi, il campo magnetico prodotto dall'induttore si sviluppa con linee di induzione dirette radialmente, investendo le spire della bobina: quando essa è percorsa da corrente continua, tra la parte fissa e quella mobile si genera una spinta in direzione assiale, per il principio delle azioni elettrodinamiche, il cui verso (di sfilamento o di succhiamento reciproco) dipende dal verso radiale di magnetizzazione dei MP, dal senso di avvolgimento della bobina e dal verso della corrente in essa circolante.

Nella pratica, si possono presentare configurazioni sia eteropolari (presenza di espansioni polari di polarità magnetica opposta, cfr. Fig.32.a) che omopolari (presenza di una espansione polare, avente un'unica polarità magnetica, cfr. Fig.32.b). In entrambe le disposizioni esemplificate in Fig.32 l'indotto (o armatura) è posto sulla parte mobile, ed è costituito da uno o più solenoidi alimentati in corrente continua mediante cavi flessibili; il campo magnetico di eccitazione può essere realizzato sia mediante una bobina (sempre alimentata in corrente continua, Fig.32.a) sia per mezzo di un magnete permanente (Fig.32.b).

La direzione della forza è ortogonale al piano definito dalle direzioni di corrente e campo magnetico ed è orientata in modo tale da vedere il vettore campo magnetico ruotato in senso antiorario rispetto alla direzione della corrente.

Nel caso del dispositivo eteropolare (Fig.32.a), l'inversione della direzione del campo magnetico nel passaggio da un polo al successivo richiede, per ottenere una forza concorde con quella del polo precedente, anche l'inversione della direzione della corrente: pertanto, la sezione successiva dell'avvolgimento di armatura deve essere avvolta in senso opposto alla precedente. Va osservato inoltre che la parte centrale del nucleo ferromagnetico ha solo funzione di facilitare la richiusura delle linee di flusso e può quindi essere fissa, riducendo in modo consistente l'inerzia della parte mobile. L'avvolgimento di armatura deve perciò essere avvolto su un supporto mobile di spessore limitato onde non incrementare eccessivamente il traferro che separa le diverse parti ferromagnetiche.

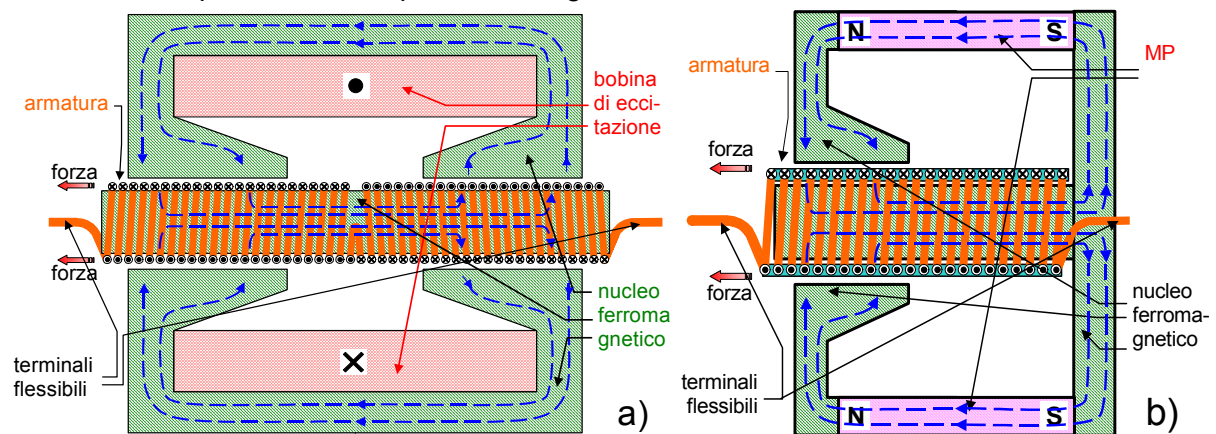


Fig.32: configurazioni tipiche di LDCM tubolari a) di tipo eteropolare, b) di tipo omopolare.

Applicazioni dei LDCM.

Esempi di applicazione dei LDCM sono i seguenti: testine delle stampanti ad aghi; altoparlanti; sistemi ottici di posizionamento di lenti e specchi; dispositivi di presa e spostamento verticale; controllo di valvole di precisione; stadi di posizionamento di macchine utensili; compressori lineari; dispositivi di vibrazione per prove; sistemi di molatura; sistemi per incisione; dispositivi elettromedicali ad uso terapeutico, di diagnostica e per chirurgia.

3.5. Lanciatori elettromagnetici (EML).

Più che per originalità nei principi di funzionamento e nella topologia degli avvolgimenti, che di fatto sono del tutto analoghi a quelli già visti per le varie tipologie di macchine lineari, a loro volta mutuati da quelle rotanti, gli EML si distinguono per il particolare campo di applicazione, che condiziona in misura rilevante sia la configurazione del dispositivo in sé, sia il progetto del sistema di alimentazione e dei dispositivi ausiliari.

I lanciatori elettromagnetici rientrano a pieno titolo nelle cosiddette *applicazioni di energia* e sono dispositivi adottati per il lancio di masse, con elevate accelerazioni, per le finalità più diverse: una tipica applicazione è quella relativa al lancio balistico di proiettili e missili, ma ve ne sono anche per usi non bellici, fra i quali:

- lanciatori di aerei, in partenza da piste di decollo di lunghezza ridotta: in tal caso, il lanciatore ha la funzione di incrementare l'accelerazione rispetto al valore naturale raggiungibile, in percorsi molto contenuti, con i soli motori di spinta dell'aereo stesso;
- lanciatori di autoveicoli stradali, per prove d'urto di tipo distruttivo: in questo caso lo scopo del lanciatore è di far raggiungere al veicolo elevate velocità, rapidamente e in brevi spazi, regolando in modo preciso l'energia cinetica da trasferire al veicolo, al fine controllare con accuratezza le modalità di impatto.

Trattandosi di dispositivi che generalmente lavorano con un regime di intermittenza molto basso (al limite, in applicazioni di tipo militare ed aerospaziale, parte, se non tutto, del siste-

ma viene utilizzato una sola volta), il progetto di questo tipo di apparecchiature è usualmente basato su un'utilizzazione molto spinta dei materiali, risultando secondarie considerazioni di durata rispetto all'esigenza di limitare al massimo l'inerzia della parte mobile.

Per rendere l'idea della criticità del dimensionamento dei lanciatori, basti pensare che sono state concepite applicazioni in cui la velocità finale di uscita della parte mobile può superare i 10 km/s, richiedendo correnti dell'ordine di 10^6 A.

Storicamente, i primi esempi di lanciatori elettromagnetici realizzati consistevano in pratica in LDCM dotati di contatti striscianti, con configurazione tubolare, come mostrato nello schema di Fig.33.

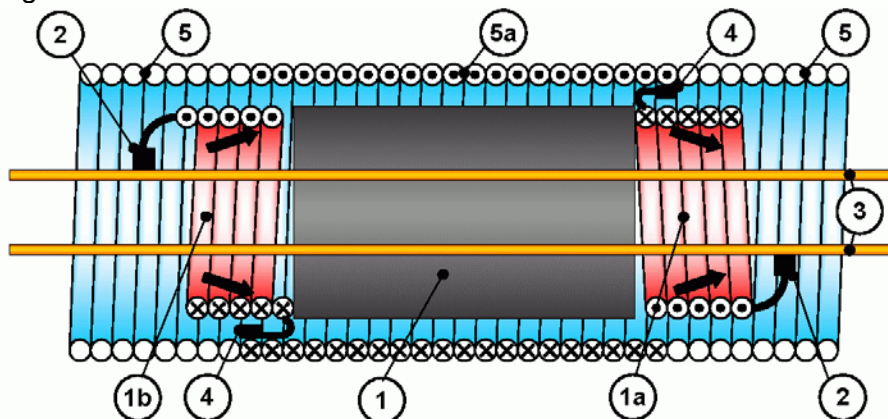


Fig.33: Configurazione tipica di EML tubolare a corrente continua con contatti striscianti (le frecce individuano la direzione della forza agente sui conduttori delle bobine mobili).

L'avvolgimento di eccitazione è costituito da due bobine cilindriche (1a) e (1b) solidali con la parte mobile (1); tali bobine di eccitazione sono alimentate mediante i contatti striscianti (2) da i due conduttori fissi (3) in modo tale da essere percorse da correnti di verso opposto; a sua volta, la sezione (5a) dell'armatura fissa (5) che circonda la parte mobile, viene percorsa da corrente risultando collegata in serie alle due bobine di eccitazione mediante i contatti striscianti (4); i versi della corrente nelle spire di armatura risultano tali da esplicare un effetto repulsivo sulla bobina anteriore (1a) ed attrattivo su quella posteriore (1b). In tal modo le due azioni elettrodinamiche risultano concordi.

L'aspetto particolarmente critico di tale tipo di dispositivi risulta, come intuibile, la realizzazione dei contatti mobili, tenuto conto degli elevatissimi valori di velocità e corrente che si vengono a determinare.

La necessità dei contatti striscianti viene meno se sulla parte mobile è collocato un avvolgimento in corto circuito (1) (cfr. Fig.34). In quest'ultimo viene indotta una corrente di circolazione per effetto della brusca variazione di flusso magnetico generato da una bobina di eccitazione fissa, posta a monte di quella mobile, iniettandovi rapidamente della corrente. Ciò viene realizzato scaricando l'energia accumulata nella batteria di induttori – condensatori (4) mediante la chiusura in un istante opportuno del corrispondente interruttore (3).

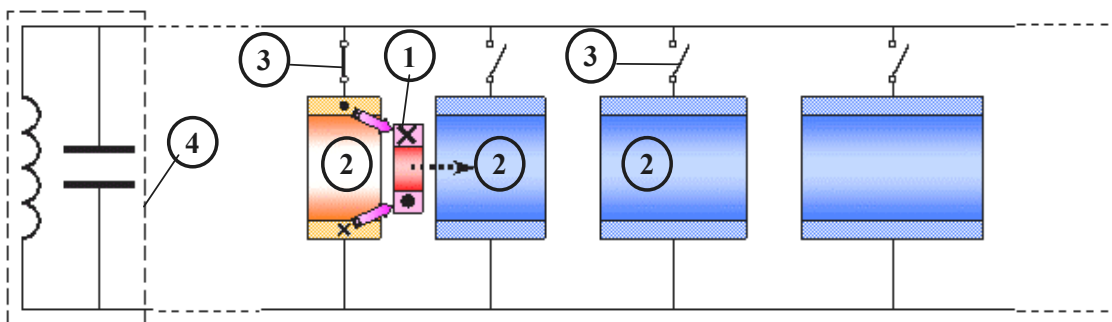


Fig.34: Schema di principio di EML tubolare con induzione di corrente nella bobina mobile (le frecce individuano la direzione della forza agente sui conduttori delle bobine mobili).

Per il corretto funzionamento del sistema, sono critici il dimensionamento del sistema di accumulo (4), che risulta a sua volta alimentato da una rete o da un generatore più o meno convenzionali e che non sono rappresentati in figura, e la precisione e rapidità di intervento degli interruttori (3), tenuto conto dei picchi estremamente elevati, anche se concentrati in un tempo limitato, delle potenze e correnti in gioco. Le bobine fisse sono generalmente di lunghezza progressivamente crescente per consentire di compensare l'effetto dell'incremento di velocità della parte mobile, che porterebbe a ridurre il tempo di interazione tra bobina mobile e fissa, se quest'ultima fosse di lunghezza costante.

Un funzionamento di tipo "asincrono" si ottiene realizzando le varie sezioni fisse (2) anziché con singole bobine, con avvolgimenti trifase veri e propri che, una volta alimentati, producono un campo magnetico traslante: ciascuna sezione costituisce quindi l'avvolgimento statorico di un LIM; a seconda dell'applicazione, si adottano versioni tubolari o piane.

Ragioni di efficienza del sistema suggeriscono di far sì che la velocità della parte mobile e quella del campo magnetico traslante non differiscano di molto e che la loro progressione nel tempo sia pertanto la stessa. Pertanto, accelerando la parte mobile, anche la velocità del campo magnetico deve aumentare. Dato che la velocità sincrona del campo traslante v_s è legata al passo polare e alla frequenza di alimentazione dalla già citata relazione $v_s = 2 \cdot f \cdot \tau$, l'adattamento della velocità può essere realizzato sostanzialmente in due modi:

- con un avvolgimento primario avente il medesimo passo polare $2 \cdot \tau$ lungo tutto lo sviluppo longitudinale: in tal caso, l'incremento di velocità v_s del campo traslante lungo lo sviluppo del LIM può essere ottenuto con un corrispondente incremento della frequenza f di alimentazione degli avvolgimenti (mediante inverter, comandato a frequenza crescente);
- con alimentazione a frequenza f fissa, ma con un primario caratterizzato da un passo polare $2 \cdot \tau$ crescente mano a mano che ci si avvicina alla estremità di uscita: questa variazione del passo polare può essere ottenuta nei due diversi modi schematizzati in Fig.35.

La Fig.35.a mostra una struttura a passo crescente ottenuta modificando progressivamente la distanza τ_c fra gli assi delle cave della struttura magnetica (questo consente di aumentare la estensione geometrica del passo polare, mantenendo lo stesso passo delle matasse – espresso in numero di cave –).

La Fig.35.b realizza lo stesso scopo adottando un nucleo magnetico dentato con distanza fissa fra gli assi di cava, ma graduando progressivamente il passo delle spire di matassa (tutte le matasse hanno lati attivi di sinistra contenenti lo stesso numero di conduttori (3 nell'esempio di fig.35.b), ma la distanza fra i conduttori attivi di sinistra e di destra aumenta, in numero di cave, quanto più ci si sposta verso destra).

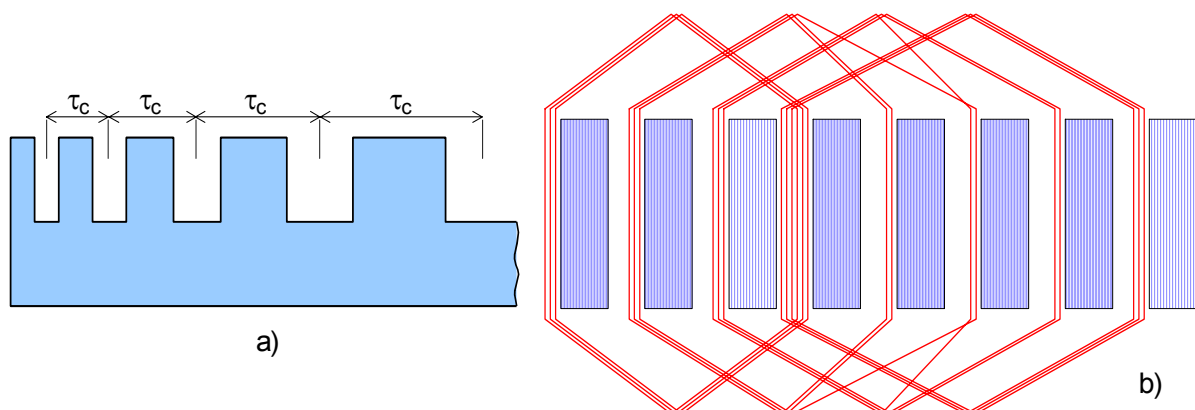


Fig.35: Strutture graduate di primario per lanciatori elettromagnetici LIM:

- a) struttura con gradazione della distanza fra assi di cava;
- b) struttura con gradazione dei passi di matassa.

4. ATTUATORI LINEARI A MP CON AVVOLGIMENTI CONCENTRATI

4.1. Premessa

Come noto, gli attuatori lineari impiegati nell'automazione e nei processi industriali dovrebbero presentare elevate prestazioni, in termini di intensità della spinta, risposta dinamica elevata, basso "cogging", ridotta ondulazione di forza, piccola distorsione della f.e.m., semplicità strutturale, compattezza e robustezza, basso costo: il contemporaneo, efficace perseguimento di tutti questi obiettivi non è una sfida semplice.

Nelle note che seguono sono descritte configurazioni, criteri di progetto e prestazioni di alcuni attuatori a magnete permanente in grado di soddisfare le richieste indicate; le strutture di armatura di tali attuatori, di tipo iron-core e dentate (peraltro, si possono realizzare anche nella versione "ironless"), sono equipaggiate con avvolgimenti simmetrici trifase costituiti da bobine concentrate: si tratta di attuatori PMLSM di tipo "sinusoidale", recentemente oggetto di studio presso il nostro Dipartimento [19], [20].

Durante gli ultimi anni, è notevolmente cresciuto l'interesse verso le macchine elettriche a bobine di dente (sia rotanti che lineari), equipaggiate con bobine concentrate, grazie ai loro notevoli vantaggi costruttivi e funzionali (soprattutto una più agevole costruzione della macchina e lo sviluppo di elevate forze (o coppie) e f.e.m. a basse velocità).

Sono stati sviluppati numerosi tipi di macchine a bobine di dente, principalmente riguardanti strutture rotanti [13-18]. I problemi usualmente concernenti un efficace impiego di queste soluzioni riguardano la forma d'onda della f.e.m. e l'ondulazione di forza: l'approccio finora seguito per attenuare questi problemi ha considerato diversi aspetti, tra cui la modifica della estensione di denti e poli (riferita alla estensione dei passi di dente), oppure la disposizione dissimmetrica dei MP; tuttavia, una teoria sistematica delle strutture di avvolgimento costituite da bobine concentrate sembra non essere ancora stata pienamente sviluppata.

Nel seguito, si considera la teoria generale degli avvolgimenti equipaggiati con bobine concentrate, descrivendo le leggi adatte per la loro definizione [19], [20] e mostrando analogie e differenze rispetto ai classici avvolgimenti distribuiti.

Successivamente, vengono analizzate le caratteristiche costruttive e funzionali degli attuatori lineari dotati di tali avvolgimenti a bobine concentrate: si farà riferimento a strutture a uno o due lati, discutendo anche gli effetti di estremità longitudinali, che influenzano la forma d'onda della f.e.m. e della forza, e i modi per mitigare tali effetti. Infine, verranno valutati alcuni parametri di merito di questi dispositivi, per caratterizzarne le prestazioni.

4.2. Caratteristiche generali delle disposizioni di avvolgimento a bobine concentrate

L'impiego delle macchine a bobine di dente evidenzia numerosi vantaggi costruttivi e funzionali:

- gli avvolgimenti a bobine concentrate sono intrinsecamente più ordinati, per l'assenza delle sovrapposizioni fra le teste di matassa;
- le teste di matassa delle bobine sono molto corte, con significativo risparmio nella massa di rame e nella entità delle perdite negli avvolgimenti;
- l'uso delle bobine concentrate facilita la costruzione dell'avvolgimento: in caso di cave aperte, è anche possibile e conveniente costruire separatamente le bobine, disponendole successivamente attorno ai denti e infine completando le connessioni di avvolgimento.

Nel seguito verranno analizzate le caratteristiche generali delle macchine a bobine di dente, riferendosi alla sola estensione di un ciclo elettromagnetico; per il momento non verranno considerati gli effetti di estremità longitudinali che si verificano nelle macchine lineari. La Fig.37 rappresenta una porzione esemplificativa di un attuatore a MP con bobine di dente, adatta a descrivere le caratteristiche generali di avvolgimento di questo tipo di macchine.

Le particolarità di queste macchine sono:

- strutture magnetiche di armatura e di induttore uniformemente distribuite (le salienze proprie di ogni struttura hanno tutte uguale forma e distanza reciproca);

- assenza di inclinazione relativa tra denti e magneti permanenti (“skewing”);
- quasi uguaglianza tra i valori del passo di dente τ_d e del passo di MP τ_m (può essere $\tau_m < \tau_d$ oppure $\tau_m > \tau_d$, ma sempre $\tau_m \neq \tau_d$);
- in caso di avvolgimento in doppio strato (le cui prestazioni sono generalmente migliori di quelle degli avvolgimenti in singolo strato), identità tra gli strati, salvo il loro reciproco spostamento lungo la periferia;
- nel caso in cui tutti i denti siano avvolti, le bobine di una stesso strato appartenenti alla stessa fase e disposte attorno a denti adiacenti sono connesse in serie controverse (cfr. Fig.36): questa disposizione dà luogo ad avvolgimenti di tipo controverso;
- in caso di denti avvolti in modo alterno (alternativamente un dente è avvolto e il successivo non avvolto, e così via, ancora Fig.36), le bobine adiacenti di una stessa fase (e appartenenti allo strato considerato) devono essere connesse in serie equiverse: questa disposizione dà luogo ad avvolgimenti di tipo equiverso.

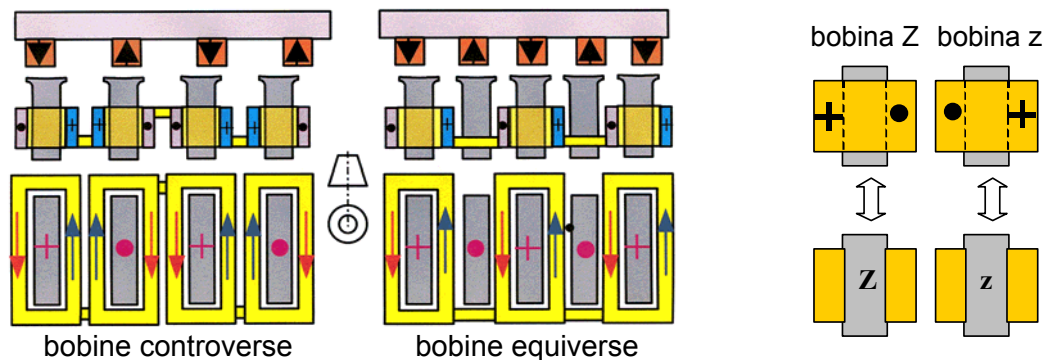


Fig.36: sinistra: disposizioni di avvolgimento controverso e equiverso; destra: senso di avvolgimento attorno al dente e relativa convenzione letterale, per una bobina della fase Z (Z = A, B, C)

Con riferimento alla Fig.37, che si riferisce ad un avvolgimento controverso in due strati, valgono le seguenti definizioni e proprietà:

- ciclo: periodo spaziale, cioè porzione della periferia alle cui estremità le strutture salienti affacciate tornano a mostrare la stessa reciproca disposizione;
- ciclo-fase: con riferimento ad uno strato, porzione di un ciclo che include bobine adiacenti appartenenti alla stessa fase;
- il N° di denti di armatura/ciclo N_{dc} e il N° di bobine di armatura/ciclo di uno strato N_{bc} deve essere multiplo del N° di fasi N_f ;
- il N° di denti/(ciclo-fase) $N_{dcf} = N_{dc}/N_f$ e il N° di bobine/(ciclo-fase) $N_{bcf} = N_{bc}/N_f$ sono fra loro legati come segue: per avvolgimenti controversi: $N_{bcf} = N_{dcf}$ (con N_{dcf} intero qualsiasi); per avvolgimenti equiversi: $N_{bcf} = N_{dcf}/2$ (con N_{dcf} intero pari);

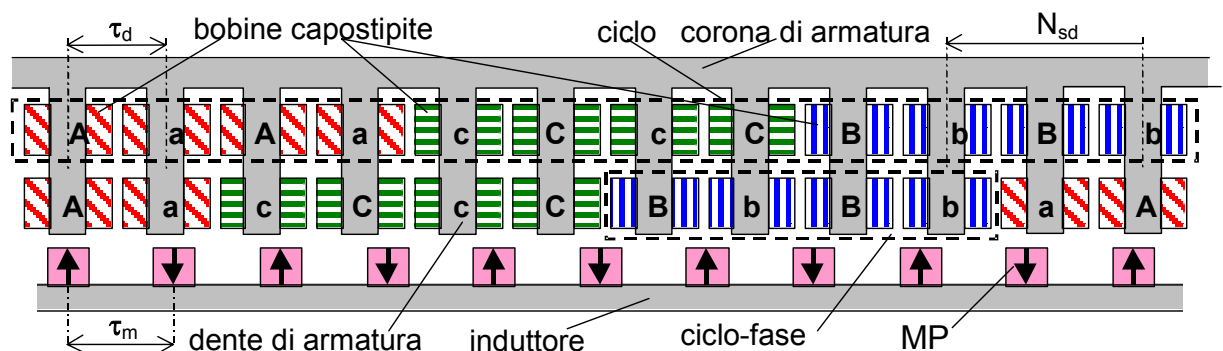


Fig.37: Porzione di un PMLSM ad avvolgimenti concentrati, con induttore monolatero a MP e struttura di armatura con avvolgimento in doppio strato ($N_{dc} = N_{bc} = 12$; $N_{mc} = 11$; $N_{sd} = 2$).

- si dimostra che, per ottenere il fattore di avvolgimento massimo, il N° di MP/ciclo N_{mc} deve differire di ± 1 dal N° di denti/ciclo N_{dc} ; quindi, si può scegliere tra uno dei seguenti due casi: $N_{mcs} = N_{dc} + 1$ (“s” = superiore); $N_{mci} = N_{dc} - 1$ (“i” = inferiore);
- tutti i cicli sono identici: quindi, il massimo N° di vie in parallelo di ciascuna fase uguaglia il N° di cicli N_c (ma può essere inferiore, secondo i suoi sottomultipli).

Considerando per ora solo lo strato superiore, chiamate con Z, z le bobine della generica fase di armatura Z (Z = A, B, C; z = a, b, c), per assegnare le bobine alle fasi, si devono considerare gli angoli elettrici che tali bobine assumono in base alle posizioni da esse occupate lungo la periferia (essendo 180° l'angolo elettrico tra MP adiacenti). Prescindendo dai sensi di percorrenza, l'angolo α_d fra denti adiacenti è pari a: $\alpha_d = 180^\circ \cdot (N_{mc}/N_{dc})$; dunque:

- successione delle bobine di un ciclo-fase: ZZZ... (o zzz...) per avvolgimenti controversi; ZZZ... (o zzz...) per avvolgimenti equiversi;
- angolo α_{cf} fra le prime bobine di cicli fase successivi dello stesso strato (dette bobine capostipite, cfr. Fig.37): $\alpha_{cf} = (N_{dcf} + 1/N_f) \cdot 180^\circ$: la valutazione di α_{cf} (da ridurre nell'ambito del campo $0^\circ - 360^\circ$) permette di assegnare le bobine capostipite alle fasi;
- come noto, per avvolgimenti tri-fase e bi-fase, si hanno le seguenti sequenze fasoriali rispettivamente: sequenza esa-fase: AcBaCb; sequenza tetra-fase: ABab (con sfasamenti angolari fra fasi adiacenti rispettivamente di 60° e 90°);
- si consideri definita l'appartenenza ad una certa fase (incluso il senso di avvolgimento) della bobina capostipite del primo ciclo-fase (il cui nome è X, fra quelli del diagramma fasoriale; - in fig.37: A, prima bobina a sinistra dello strato superiore -): la bobina capostipite del ciclo fase adiacente è assegnata alla fase il cui nome Y è quello del fasore che, nella sequenza fasoriale considerata, ha una distanza angolare uguale a α_{cf} angoli elettrici da X (c nello strato superiore di Fig.37, dove $\alpha_{cf} = 60^\circ$); una attribuzione simile deve essere operata per le bobine capostipite di tutti i successivi cicli-fase dello stesso strato (sempre secondo la direzione di rotazione scelta lungo la sequenza fasoriale, in senso orario nelle sequenze fasoriali e in Fig.37);
- l'altro strato è ottenuto per semplice copiatura dal precedente, spostato di N_{sd} ; si può mostrare che la scelta di N_{sd} che ottimizza la forma d'onda della f.e.m. è la più vicina al valore $N_{sd,opt} = N_{dcf}/2$ (se N_{sd} è pari, gli strati sono identici anche per quanto concerne il senso di avvolgimento delle bobine; se N_{sd} è dispari, gli strati sono uguali, ma con senso di avvolgimento invertito per le bobine).

Per avvolgimenti tri-fase, la Tab.1 mostra alcuni valori di esempio di N_{dc} e di N_{mci} , N_{mcs} ; sono anche riportate le corrispondenti successioni $S_{cf,i}$ e $S_{cf,s}$ per le bobine capostipite di due cicli adiacenti dello strato superiore (S_{cf} può essere denominata successione delle bobine capostipite dei cicli-fase). Tabelle simili sono realizzabili anche per diversi numeri di fasi.

Tab.1: Combinazioni di N_{dc} e N_{mc} per avvolgimenti tri-fase, per alcuni valori di N_{dcf} . Successione S delle bobine capostipite relative a due cicli adiacenti

| Avvolgimenti trifase controversi | | | | | | Avvolgimenti trifase equiversi | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------|----------|-----------|------------|-----------|--------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|------------|-----------|------------|
| N_{dcf} | N_{bcf} | N_{dc} | N_{mci} | $S_{cf,i}$ | N_{mcs} | $S_{cf,s}$ | N_{dcf} | N_{bcf} | N_{dc} | N_{mci} | $S_{cf,i}$ | N_{mcs} | $S_{cf,s}$ |
| 2 | 2 | 6 | 5 | AcBaCb | 7 | AbCaBc | 2 | 1 | 6 | 5 | AcBaCb | 7 | AbCaBc |
| 3 | 3 | 9 | 8 | ACBACB | 10 | ABCABC | 4 | 2 | 12 | 11 | AcBaCb | 13 | AbCaBc |
| 4 | 4 | 12 | 11 | AcBaCb | 13 | AbCaBc | 6 | 3 | 18 | 17 | AcBaCb | 19 | AbCaBc |
| 5 | 5 | 15 | 14 | ACBACB | 16 | ABCABC | 8 | 4 | 24 | 23 | AcBaCb | 25 | AbCaBc |
| 6 | 6 | 18 | 17 | AcBaCb | 19 | AbCaBc | 10 | 5 | 30 | 29 | AcBaCb | 31 | AbCaBc |

Fra le ulteriori importanti proprietà delle macchine a bobine di dente vi sono le seguenti:

- considerando che il N° di cave uguaglia il N° di denti, il N° di cave/(polo·fase) q di una macchina a bobine di dente è dato da: $q = N_{dc}/(N_{mc} \cdot N_f) \Rightarrow q = (1 \pm 1/N_{mc}) \cdot (1/N_f) \approx 1/N_f$; quindi per una macchina tri-fase si ha: $q \approx 0.33$;

- si può dimostrare che il fattore di avvolgimento k_w di una macchina tri-fase a bobine di dente (con avvolgimenti in doppio strato, N_{bcf} bobine/(ciclo-fase), N_{dcf} denti/(ciclo-fase) e uno spostamento di strato di N_{sd} denti) uguaglia il prodotto di un fattore di distribuzione k_d per un fattore di spostamento k_s ; per l'armonica j -esima della f.e.m. dell'avvolgimento di fase ($j = 1, 3, 5, \dots$), si ha:

$$k_{w_j} = k_{d_j} \cdot k_{s_j} \quad \text{con:} \quad k_{d_j} = \frac{\sin(j \cdot \pi/6)}{N_{bcf} \cdot \sin[(j/N_{bcf}) \cdot \pi/6]}, \quad k_{s_j} = \cos(j \cdot (N_{sd}/N_{dcf}) \cdot \pi/6);$$

come noto, una macchina tradizionale, con avvolgimenti distribuiti in due strati, q cave/(polo-fase) e accorciamento del passo di matassa di c_a cave, evidenzia un fattore di avvolgimento f_a uguale al prodotto di un fattore di distribuzione f_d per un fattore di passo f_p , con espressioni esattamente corrispondenti alle precedenti, pur di associare N_{bcf} con q , e N_{sd} con c_a : la differenza è che, con una macchina tradizionale, una buona qualità della forma d'onda della f.e.m. e una ridotta ondulazione di forza (coppia) si può ottenere adottando strutture di armatura con N° di cave/(polo-fase) q attorno a 5-6, mentre una macchina a bobine di dente evidenzia prestazioni di qualità simili con valori di q praticamente uguali a circa 0.33;

- lo sfalsamento spaziale incrementale fra poli di eccitazione e denti di armatura conduce ad una pratica assenza di disturbi dovuti alla dentatura (distorsione della forma d'onda di f.e.m. e oscillazioni di forza -coppia-); nelle macchine tradizionali a MP l'effetto di *cogging* si verifica anche in assenza di alimentazione di armatura, così che per ridurlo, si richiede la applicazione di un adatto *skewing* (inclinazione tra cave e poli delle strutture affacciate).

4.2. Attuatori lineari con avvolgimenti a bobine concentrate.

Anche se un attuatore lineare potrebbe essere costituito da una armatura a statore lungo affacciata a un traslatore corto a MP, in pratica questa disposizione è raramente adottata, a causa dei già citati inconvenienti connessi ad una struttura unica molto estesa di avvolgimento (elevate cadute di tensione, forti perdite Joule negli avvolgimenti, sovradimensionamento dell'inverter di alimentazione); d'altra parte, neppure la suddivisione della struttura di armatura in più sezioni (da alimentare separatamente e successivamente in relazione alla posizione del traslatore) rappresenta una efficace soluzione ai problemi citati, che compensi sufficientemente delle complicazioni insite nella presenza dei contattori di sezionamento dei settori di armatura alimentati, nei dispositivi per il loro comando e nella loro manutenzione. Pertanto, nel seguito, saranno considerati solo attuatori con induttore statorico lungo a MP e con traslatore corto dotato di avvolgimenti tri-fase di armatura, alimentati tramite connessione in cavo flessibile.

Come noto, in caso di strutture iron-core, le forze normali sono molto alte; pertanto, quando possibile, si adottano configurazioni di tipo bilatero. Ciononostante, verranno nel seguito analizzate anche strutture monolatero, non solo in quanto utilizzate, ma anche perché la loro analisi può suggerire opportune modifiche dei dispositivi bilateri, in grado di limitare i contributi indesiderati di forza e la distorsione della forma d'onda, dovuta prevalentemente agli effetti di estremità longitudinale (non presenti nelle macchine rotanti, ma significative nelle macchine lineari, anche in quelle del tipo a bobine di dente).

Allo scopo di limitare la lunghezza del traslatore e di mostrare la qualità delle prestazioni del dispositivo anche in caso di un piccolo numero di denti, nel seguito sarà studiata la struttura più semplice ($N_{dc} = 6$, $N_{mc} = N_{dc} + 1 = 7$), equipaggiata con un avvolgimento in due strati, fra loro spostati di $N_{sd} = N_{dcf}/2 = 1$.

Analisi numeriche preliminari condotte con il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) [21], non riportate qui per brevità, hanno evidenziato che adottare un traslatore con un numero di denti strettamente uguale a quello dei denti avvolti (6 nel nostro esempio) implica f.e.m. di fase asimmetriche e forme d'onda di coppia distorte; quindi, nel seguito saranno analizzati solamente traslatori dotati di due denti aggiuntivi, non avvolti, posti alle estremità (le analisi han-

no anche mostrato che, al fine di minimizzare il *cogging* di forza, la migliore dimensione di tali denti di estremità è uguale a quella dei denti avvolti).

La Fig.38 e la Tab.2 illustrano i dati di un attuatore del tipo monolatero in doppio strato (*Single-Side, Double-Layer* = SS-DL), con un traslatore a 8 denti: come mostrato con le linee a tratteggio di Fig.38, la struttura magnetica del traslatore può essere ottenuta da un accostamento di nuclei standard per trasformatore, con forma ad “E”, più 2 frazioni di estremità di tali nuclei, con significativi vantaggi in termini di reperibilità ed economicità.

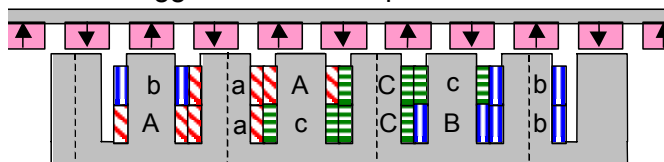


Fig.38: Attuatore monolatero in doppio strato (*Single-Side, Double-Layer* = SSDL), con statore lungo a MP non inclinati e traslatore iron-core corto (con avvolgimento tri-fase a bobine di dente); armatura estesa ad un ciclo elettromagnetico, comprendente $N_{mc} = 7$ MP, $N_{dc} = 6$ denti (più 2 denti aggiuntivi non avvolti di estremità); la struttura magnetica del traslatore è ottenibile da un accostamento di nuclei standard con forma ad “E” (cfr. linee tratteggiate)

Tab.2: Dati principali dell'attuatore di Fig.38

| | |
|--|-----------------------|
| passo di dente, larghezza dente, altezza dente [mm] | 18, 12, 18 |
| dimensione trasversale del traslatore [mm] | 100 |
| spessore della corona del nucleo del traslatore [mm] | 6 |
| estensione longitudinale del ciclo elettromagnetico [mm] | 108 = 6 x 18 |
| N° di bobine/dente; N° di spire/bobina | 2 ; 30 |
| diametro del filo [mm] | 0.56 |
| resistenza di bobina (a 115 °C) [Ω] | 0.73 |
| materiale del magnete permanente | NdFeB 35 |
| induzione residua, forza coercitiva H_{CB} del MP | 1.23 T; 980 kA/m |
| larghezza, altezza, lunghezza dei MP [mm] | 12 x 5 x 100 |
| passo dei MP [mm] | 108/7 \approx 15.43 |
| dimensioni esterne del nucleo del traslatore [mm] | 138 x 24 x 100 |

Come noto, un modo classico di raddoppiare la spinta, con una contemporanea sensibile riduzione della forza normale, consiste semplicemente nella duplicazione speculare della struttura di Fig.38: tuttavia, anche se questa scelta raggiunge tali obiettivi, essa non consente di ridurre la “detent force”, cioè la forza che, a corrente nulla, si sviluppa per effetto del *cogging* di estremità longitudinale (assente in un dispositivo rotante); un primo modo per ottenere un filtraggio spaziale del “*cogging*” è quello di applicare uno spostamento di 90° spaziali fra le sequenze dei MP sui due lati, come mostrato nel dispositivo bilatero a doppio strato di Fig.39D (*Double-Side, Double-Layer* = DS-DL): in esso, tutte le bobine di fase, opportunamente riposizionate (per tener conto del citato spostamento spaziale di 90° fra file di MP), sono connesse in serie.

Una disposizione elettromagneticamente equivalente, ma costruttivamente più conveniente è quella bilatero, con lati a singolo strato, di Fig.39S (*Double-Side, Single-Layer* = DS-SL): in essa, i vantaggi dell'avvolgimento in doppio strato (tra i quali: migliore forma d'onda della f.e.m. indotta e più ridotta ondulazione della forza a carico) sono ottenibili anche utilizzando, all'interno di ciascun lato, avvolgimenti con un solo strato, pur di applicare un opportuno, ulteriore spostamento fra le porzioni di avvolgimento di ciascun lato (in pratica, con riferimento alla Fig.39, per passare dal caso “D” a quello “S” è sufficiente eliminare gli strati più esterni di avvolgimento, estendendo quelli interni a tutta l'altezza di cava). Riguardo al citato spostamento di 90° fra le sequenze di MP di ciascun lato, esso è riconoscibile dalla posizione della linea a tratto e punto sulla sinistra dei disegni di Fig.39.

Ancora, con uguali caratteristiche elettromagnetiche, è possibile adottare anche la disposizione bilatero, con lati a singolo strato, e traslatore esterno (Fig.40).

In tale disposizione le file di MP, sempre sfalsate di 90° , sono montate su una guida ferromagnetica centrale, posta tra i due lati del traslatore.

La Fig.40 ne mostra, sulla destra, una possibile disposizione meccanica di principio.

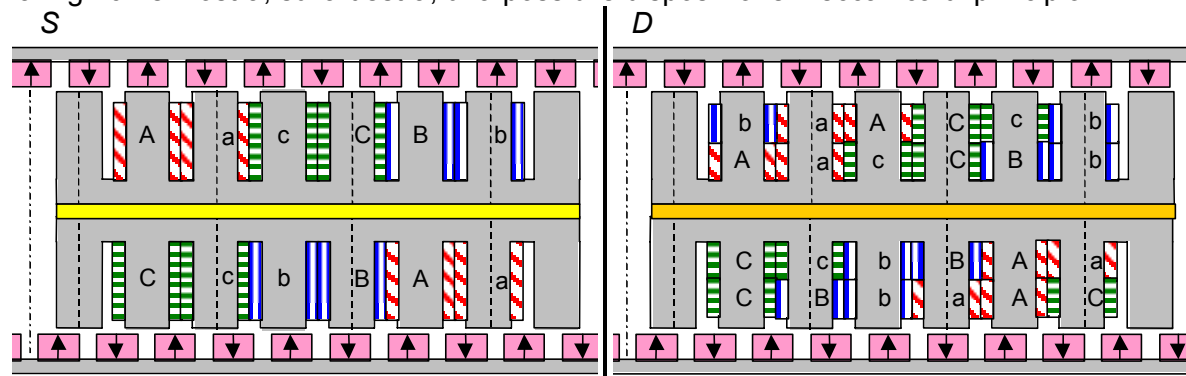


Fig.39: Attuatori bilateri con traslatore interno, con ciascun lato caratterizzato dalla stessa geometria magnetica e dalle stesse dimensioni del traslatore monolatero di Fig.38 e Tab.2: uno spostamento spaziale angolare di 90° è applicato tra le due sequenze di MP di lato, in modo da ridurre gli effetti di estremità sulla "detent force":

Fig.D: traslatore DS-DL, dotato di avvolgimento di lato a **Doppio strato** (30 spire/bobina);

Fig.S: traslatore DS-SL, dotato di avvolgimento di lato a **Singolo strato** (60 spire/bobina).

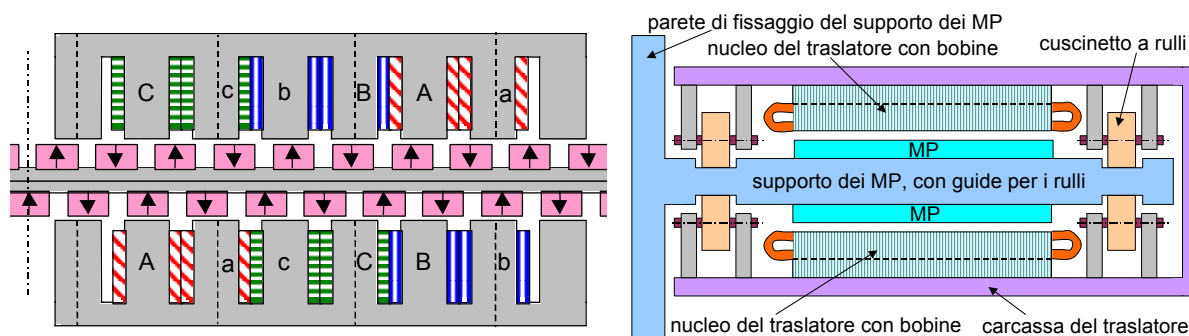


Fig.40: Sinistra: Motore lineare bilatero, con disallineamento delle file di MP sui due lati (per attenuare l'effetto di cogging): struttura a traslatore esterno (meccanicamente invertita rispetto alla Fig.39S, ma ad essa elettromagneticamente equivalente);
destra: possibile disposizione strutturale per il motore lineare bilatero con traslatore esterno (direzione del moto perpendicolare alla figura).

La Fig.41 mostra il risultato di diverse simulazioni FEM nel dominio del tempo, condotte a velocità di traslazione costante, corrispondente alla frequenza di 20 Hz; i diagrammi della colonna di sinistra si riferiscono al traslatore monolatero, con avvolgimento in doppio strato (SS-DL) di Fig.38, mentre i diagrammi della colonna di destra riguardano i traslatori bilateri con avvolgimenti in doppio e singolo strato di Fig.39 (rispettivamente DS-DL (Fig.D) e DS-SL (Fig.S)); le tre coppie di figure in orizzontale forniscono le seguenti informazioni:

- i grafici superiori mostrano le forme d'onda della f.e.m. e_x a vuoto in ciascun avvolgimento di fase ($X = A, B, C$);
- i diagrammi intermedi riportano le forme d'onda delle componenti normali F_n della forza agente sul traslatore in moto con velocità di traslazione costante, sia a vuoto (forza residua: "detent force" = pedice o) che con correnti di fase costanti nel tempo (forza di mantenimento: "holding force" = pedice h; valore delle correnti: $I_A = 7 \text{ A}$; $I_B = I_C = -3.5 \text{ A}$);
- i diagrammi inferiori riportano le forme d'onda delle componenti tangenziali F_t della forza agente sul traslatore in moto con velocità di traslazione costante, sia a vuoto (forza residua: "detent force" = pedice o) che con correnti di fase costanti nel tempo (forza di mantenimento: "holding force" = pedice h; valore delle correnti: $I_A = 7 \text{ A}$; $I_B = I_C = -3.5 \text{ A}$).

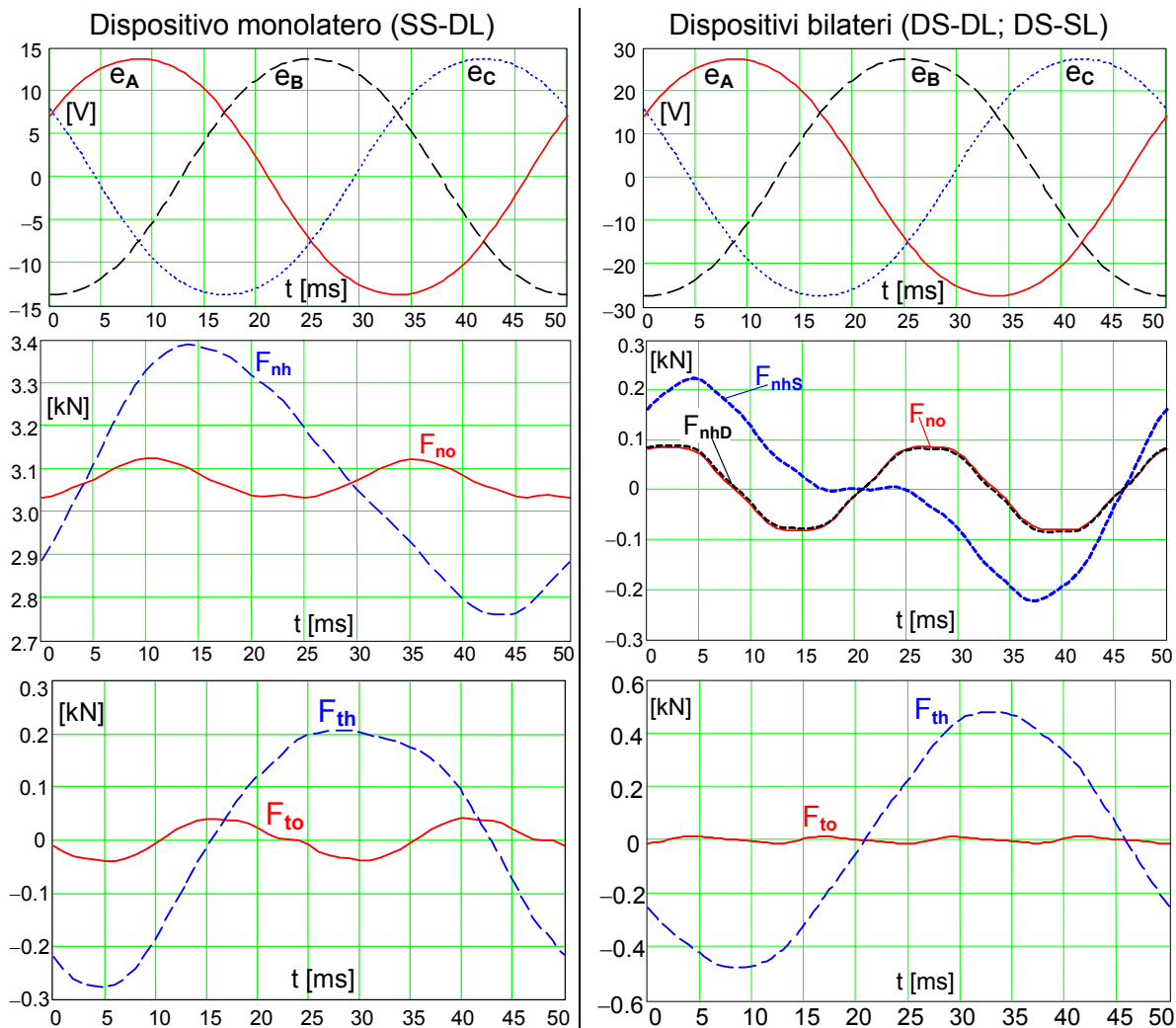


Fig.41: Forme d'onda nel tempo, calcolate da analisi FEM, durante un moto del traslatore a velocità costante (sempre con $f = 20$ Hz): colonna di sinistra: dispositivo monolatero SS-DL (Fig.38); colonna di destra: dispositivi bilateri DS-DL, DS-SL (Fig.39 e 40);
 curve orizzontali superiori: f.e.m. degli avvolgimenti di fase a vuoto;
 curve orizzontali intermedie: componenti normali di forza F_n (o = "detent", h = "holding force");
 curve orizzontali inferiori: componenti tangenziali di forza F_t (o = "detent", h = "holding force");
 valore delle correnti costanti circolanti nelle fasi: $I_A = 7$ A; $I_B = I_C = -3.5$ A.

Esaminando i diagrammi di fig.41, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- tutte le forme d'onda di f.e.m. calcolate sono molto prossime all'essere sinusoidali, esenti da effetti dovuti alla dentatura e simmetriche; inoltre, le f.e.m. dei dispositivi DS-DL e DS-SL sono esattamente uguali, e mostrano una ampiezza doppia rispetto a quella del dispositivo SS-DL, come previsto;
- le forze normali del dispositivo monolatero (SS-DL) sono molto alte (valore medio $F_{n.av} \approx 3.1$ kN), sempre del medesimo segno e con ampiezza di oscillazione significativamente influenzata dalla presenza delle correnti ($\Delta F_{nh,pp} \approx 0.65$ kN $>$ $\Delta F_{no,pp} \approx 0.1$ kN);
- le forze normali dei dispositivi bilateri (DS-DL e DS-SL) sono notevolmente più basse e a valore medio nullo; in particolare:
 - la componente normale della "detent force", F_{no} , ha il medesimo andamento sia per il tipo con avvolgimenti in uno che in due strati (perché la struttura magnetica di DS-DL e DS-SL è la stessa, mentre le correnti sono nulle, rendendo dunque irrilevanti gli effetti della diversa configurazione di avvolgimento); risulta $\Delta F_{no,pp} \approx 0.15$ kN;

- la componente normale F_{nhD} della “holding force” del dispositivo con avvolgimento a doppio strato su ciascun lato (DS-DL) è quasi coincidente con la “detent force”, dimostrando la pratica indipendenza dal valore delle correnti: ($\Delta F_{nhD.pp} \approx \Delta F_{no.pp} \approx 0.15$ kN);
- la componente normale F_{nhS} della “holding force” del dispositivo con avvolgimento a singolo strato su ciascun lato (DS-SL), pur rimanendo a valore medio nullo, è di ampiezza superiore alla “detent force”, mostrando una certa dipendenza dal valore delle correnti: ($\Delta F_{nhS.pp} \approx 0.45$ kN > $\Delta F_{no.pp} \approx 0.15$ kN);

in conclusione, al di là delle diverse entità della oscillazione della componente normale, i valori di tale componente dei dispositivi bilateri sono così bassi da consentire un agevole dimensionamento dei cuscinetti di guida;

- la forza tangenziale a corrente nulla (F_{to} , “tangential detent force”) del dispositivo monolatero è apprezzabile ($\Delta F_{to.pp} \approx 0.08$ kN), mentre la corrispondente componente dei dispositivi bilateri è molto piccola (ordine di grandezza del rumore numerico della soluzione FEM);
- la forza tangenziale in presenza di correnti costanti (F_{th} , “holding force”), rappresentativa delle prestazioni di spinta ottenibili con il motore lineare, presenta andamento alternato; le caratteristiche di qualità di F_{th} sono tanto migliori quanto maggiore è l’ampiezza di ogni semionda e quanto più la forma d’onda è vicina ad una sinusoide; con riferimento ai tipi monolatero e bilatero si può dire quanto segue:
 - la F_{th} del dispositivo monolatero ha, per le correnti assunte, un valore di picco di circa 0.2 kN, mostrando una significativa distorsione, con diverso andamento fra le due semionde;
 - la F_{th} del dispositivo bilatero, uguale per i due tipi DS-DL e DS-SL, ha valore di picco circa doppio del precedente (oltre 0.4 kN), con andamento della forma d’onda più prossimo alla sinusoide, semionde specularmente simmetriche, senza alcun apprezzabile effetto dovuto al cogging o agli effetti di estremità longitudinale.

Una stima approssimativa delle prestazioni ottenibili dal dispositivo bilatero DS-SL conduce alle seguenti quantità, esprimibili la densità di forza sviluppabile:

- forza sviluppata per unità di massa del traslatore: 45 N/kg;
- forza sviluppata per unità di superficie affacciata al traferro: 17 kN/m².

Val la pena di osservare che questi parametri di merito, ancorché già di interesse, non si riferiscono ad un dispositivo ottimizzato, ma lasciano intravedere significativi, ulteriori miglioramenti possibili, tra i quali:

- adozione di magneti permanenti di ampiezza periferica superiore a quella dei denti di armatura ad essi affacciati, così da aumentare il valore del flusso di dente in condizioni di allineamento;
- adozione di sistemi di raffreddamento efficienti (ad esempio, raffreddamento a liquido), che consentano di incrementare il valore della densità di corrente.

Alcuni rilievi preliminari su dispositivi prototipali hanno confermato le previsioni di calcolo descritte in precedenza, lasciando intravedere buone prospettive di applicabilità di questi attuatori a MP ad avvolgimenti concentrati.

5. CONCLUSIONI

Il lavoro ha presentato una descrizione di tipologie, strutture, principi di funzionamento e principali caratteristiche funzionali e applicative di attuatori lineari per applicazioni industriali. Dopo una parte introduttiva sugli aspetti generali riguardanti la configurazione elettromagnetica, i fenomeni peculiari e la classificazione delle disposizioni strutturali, sono stati esaminati i vari tipi di attuatori lineari, nelle diverse versioni costruttive e applicative.

L’attenzione si è rivolta alla descrizione degli attuatori passo-passo, di quelli a induzione, dei sincroni a MP, del tipo in c.c. per corse brevi, dei lanciatori elettromagnetici, con qualche breve esemplificazione dei settori applicativi interessati.

E’ stata quindi presentata una famiglia di attuatori a MP con avvolgimenti di armatura concentrati, recentemente oggetto di studi nel Dipartimento: si tratta di macchine sincrone di

tipo “sinusoidale”, che potenzialmente consentono prestazioni di elevata qualità, grazie alla loro compattezza e alle prestazioni elettromeccaniche a basso livello di oscillazione di forza. L'avvolgimento adottato, molto semplice e costituito da bobine concentrate disposte attorno ai denti di armatura del traslatore, permette una costruzione veloce ed automatizzata, con molti gradi di libertà di progetto riguardo al numero di denti avvolti nell'ambito di un ciclo elettromagnetico. Nonostante non sia necessaria alcuna inclinazione relativa tra magneti e denti e le cave di armatura siano di tipo aperto (tanto che le bobine possono essere preformate, con successivo inserimento attorno ai denti), non si evidenziano apprezzabili armoniche di f.e.m. o armoniche di “slotting” nella forza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. R. Laithwaite: “Induction Machines for Special Purposes”, Ed. Newnes Lim., London (UK), 1966
- [2] S.A. Nasar, I. Boldea: “Linear Motion Electric Machines”, Wiley & Sons, New York (USA), 1976
- [3] M. Jufer: “Transducteurs Électromécaniques”, Ed. Georgi, St-Saphorin (CH), 1979
- [4] M. Poloujadoff: “The Theory of Linear Induction Machinery”, Clarendon Press, Oxford (UK), 1980
- [5] I. Boldea, S.A. Nasar: “Linear Motion Electric Machines”, Wiley & Sons, New York (USA), 1976
- [6] I. Boldea, S.A. Nasar: “Linear Motion Electromagnetic Systems”, Wiley & Sons, New York (USA), 1985
- [7] J. F. Gieras: “Linear Induction Drives”, Clarendon Press, Oxford (UK), 1993
- [8] J. F. Gieras, Z. J. Piech: “Linear Synchronous Motors”, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1999
- [9] A. Basak: “Permanent-Magnet DC Linear Motors”, Clarendon Press, Oxford (UK), 1996
- [10] T.J.E. Miller: “Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives”, Clarendon Press, Oxford (UK), 1989
- [11] I. Boldea, S.A. Nasar: “Linear Electric Actuators and Generators”, Cambridge University Press, (UK), 1997
- [12] M. Andriollo, A. Di Gerlando: “Guide lineari di tipo elettromagnetico: principi di funzionamento e applicazioni”, Rivista *Componenti Industriali*, N°46-Dic.'99, 47-Feb.'00 e 48-Mar.'00.
- [13] E. Spooner, A. C. Williamson: British Patent Application 2278738, “Modular Electromagnetic Machine”.
- [14] P. Lampola, “Electromagnetic Design of an Unconventional Directly Driven Permanent Magnet Wind Generator”, *ICEM'98, Proceedings of the XIII International Conference on Electrical Machines*, Istanbul, Turkey, 1998, pp.1705-1710.
- [15] M. Lukaniszyn, M. Jagiela, R. Wrobel, “Influence of Magnetic Circuit Modifications on the Torque of a Disc Motor with Co-axial Flux in the Stator”, *ICEM'02, Proceedings on CD-ROM of the XV International Conference on Electrical Machines*, Brugge, Belgium, 2002, paper n. 069.
- [16] A. Muetze, A. Jack, B. Mecrow, “Alternate Designs of Low Cost Brushless DC Motors using Soft Magnetic Composites”, *ibidem*, paper n. 237.
- [17] Th. Koch, A. Binder, “PM Machines with Fractional Slot Winding for Electric Traction”, *ibidem*, paper n. 369.
- [18] W.R.Canders, F. Laube, H. Mosebach, “PM Excited Polyphase Synchronous Machines with Single-Phase Segments. Featuring Simple Tooth Coils”, *ibidem*, paper n. 610.
- [19] A. Di Gerlando, M. Ubaldini: Domanda Italiana di Brevetto MI2002A 001186, “Macchina Elettrica Sincrona a Bobine Concentrate”, 31 maggio, 2002; in attesa di estensione internazionale mediante procedura PCT.
- [20] A. Di Gerlando, R. Perini, M. Ubaldini: “Permanent Magnet Linear Actuators with Concentrated Coils”, 4th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, LDIA 2003, Birmingham, UK, 8-10 settembre 2003, pp.371-374.
- [21] Maxwell 2D Transient FEM code, 8.0.27 Version, Ansoft Corporation, Pittsburgh, PA.

NOTA: su precisa indicazione della Redazione, nella didascalia delle immagini non sono stati riportati i riferimenti dei Costruttori.