

MOTORI ELETTRICI LINEARI AD ELEVATA SPINTA PER APPLICAZIONI NAVALI

AUTORE 1: CLAUDIO BRUZZESE UNIVERSITA' DI ROMA – SAPIENZA

AUTORE 2: ALBERTO TESSAROLO UNIVERSITA' DI TRIESTE

Gli attuatori oleodinamici usati per timonerie e pinne stabilizzatrici sviluppano elevate coppie a basse velocità. Viene presentato, in alternativa, un innovativo motore elettrico lineare ad elevata spinta alimentato da inverter per azionamenti diretti a bordo nave, che offre grandi vantaggi in termini di compattezza, manutenzione, efficienza, e tolleranza al guasto.

INTRODUZIONE

A bordo nave trovano applicazione numerosi azionamenti per gli scopi più svariati, e tra essi spiccano, per importanza, quelli preposti alla movimentazione delle superfici di controllo del natante [1]. Si pensi, a tal proposito, che la “perdita del timone” indica, in gergo marinaresco, una situazione estremamente critica per la nave, data la conseguente perdita di governabilità. Ne conseguono requisiti di affidabilità e ridondanza molto severi per il macchinario di sterzaggio [2]. I timoni e le pinne stabilizzatrici richiedono inoltre coppie motrici molto elevate (dalle centinaia alle migliaia di kNm, in base alla stazza del natante) a bassissime velocità (frazioni di RPM). Essi sono classicamente azionati da impianti idraulici (anche detti impianti oleodinamici, ma più propriamente classificabili come trasmissioni idrostatiche [3]) alimentati con olio ad alta pressione. Il fluido in pressione è fornito da pompe volumetriche mosse da asincroni alimentati alla frequenza di rete nave (50-60Hz), e trasportato agli attuatori (normalmente motori a palmole di grossa cilindrata) tramite tubazioni idrauliche anche di notevole estensione, regolate da un apposito sistema di valvole di controllo, deviazione, massima pressione, etc., situate lungo il circuito. La stessa tecnologia viene anche tradizionalmente usata per altri impianti e servizi di scafo come verricelli, argani, elevatori, gru, serrande, ecc., con diversi tipi di motori volumetrici (a palmole, rotativi a pistoni, lineari a cilindro) e pompe (a pistoni, a vite, a ingranaggi) [3].

La tecnologia idraulica gode di buona reputazione riguardo all'elevata affidabilità dell'impianto idraulico nel suo insieme. Essa d'altronde soffre di gravi inconvenienti quali la bassa efficienza, la necessità di continua manutenzione, le perdite d'olio, l'esteso ingombro in pianta, il notevole peso e gli elevati costi di esercizio, anche legati al periodico ricambio e smaltimento di grandi quantità di olio [4]. Ne risulta un comprensibile interesse al superamento di tale tecnologia. Per ovviare agli inconvenienti della tecnologia idraulica, negli ultimi anni sono state proposte soluzioni basate su sistemi di attuazione elettrica diretta con alimentazione da inverter [5], [6]. Queste ultime differiscono dalle soluzioni di azionamenti “*full electric*” fin'ora apparse sul mercato come alternativa agli attuatori idraulici, utilizzando riduttori meccanici (in particolare di tipo epicicloidale multistadio o con viti a sfere) che sono generalmente costosi, delicati, e necessitanti di continua lubrificazione. Particolarmente critico è il rischio di grippaggio per le viti, mentre i riduttori epicicloidali mal tollerano i carichi assiali. La perdita di lubrificazione comporta normalmente un guasto distruttivo, date le enormi forze scambiate tra le ridotte superfici di contatto dell'ingranaggio riduttore.

Sulla base di tali premesse, la Marina Militare Italiana (MMI) ha recentemente cofinanziato un programma di ricerca (Soluzioni innovative per attuatori elettromeccanici di bordo (ISO) [7], [4]), finalizzato ad individuare le alternative più promettenti alle

trasmissioni idrostatiche per l'azionamento di carichi di bordo ad alta coppia e bassa velocità ed a studiarne la convenienza, considerando anche gli aspetti di affidabilità, ridondanza, e tolleranza al guasto. Il progetto di ricerca, sviluppato tramite estese analisi dello stato dell'arte [4], è culminato nella proposta di un nuovo concetto di attuazione elettrica senza riduttore basata su motore sincrono lineare a magneti permanenti (PMLSM, *Permanent Magnet Linear Synchronous Motor*) collegato direttamente al carico rotante tramite giunto prismatico-rotoidale [8], [9]. La tolleranza ai guasti dell'azionamento è garantita dalla piena ridondanza strutturale del PMLSM. Il PMLSM è suddiviso in diversi moduli trifase magneticamente disaccoppiati, ciascuno alimentato autonomamente da un inverter di potenza. Per dimostrare il potenziale della soluzione, un prototipo di modulo di PMLSM è stato progettato, costruito e collaudato [10]. I principali risultati dello sviluppo del prototipo e delle attività di test fin'ora condotte sono riportati in questo articolo.

AZIONAMENTI DIRETTI BASATI SU PMLSM AD ELEVATA SPINTA

L'azionamento innovativo basato su PMLSM è stato ideato per adattarsi alle esigenze dei timoni e delle pinne di stabilizzazione laterali di grandi navi militari (Figura 1). Si tratta di carichi a rotazione limitata azionati da motori idrostatici come quello in figura 2. Anche se il motore idrostatico in sé è abbastanza vantaggioso in termini di peso, dimensioni, e coppia specifica, esso necessita di numerosi impianti ausiliari per la fornitura di olio (pompe, tubi, filtri, serbatoi olio, valvole, ecc.) costituenti nell'insieme un apparato molto ingombrante, pesante e complesso [4]. Gli ausiliari devono essere mantenuti sempre in servizio per garantire la pressurizzazione ininterrotta dell'olio, con importanti perdite a vuoto associate alle motopompe in funzionamento continuo. Inoltre, si richiedono importante manutenzione e frequenti riparazioni connesse con i problemi di perdita di olio.



Figura 1. Pinna stabilizzatrice (a) e timone (b) di una nave di notevole stazza.

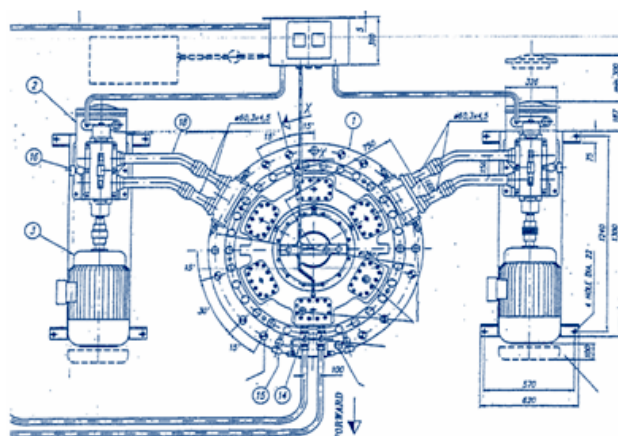


Figura 2. Motore idrostatico a palmole tradizionale per sterzaggio timone. Due pompe a vite azionate con motori asincroni alimentano il motore a palmole con olio in pressione.

Il concetto di base della tecnologia alternativa proposta è mostrato nelle figure 3, 4. Esso comprende un motore lineare (PMLSM) azionante il carico meccanico rotante tramite un giunto appositamente disegnato. Quest'ultimo implementa la conversione della spinta lineare sviluppata dal PMLSM nella coppia applicata al carico. Come mostrato in figura 3, il giunto prismatico-rotoidale può essere adattato per consentire diversi possibili tipi di montaggio del motore lineare. Svariate soluzioni alternative possono essere proposte ed implementate per un dato carico, dipendentemente dai vincoli di ingombro imposti dal limitato spazio a bordo e da altri macchinari circostanti.

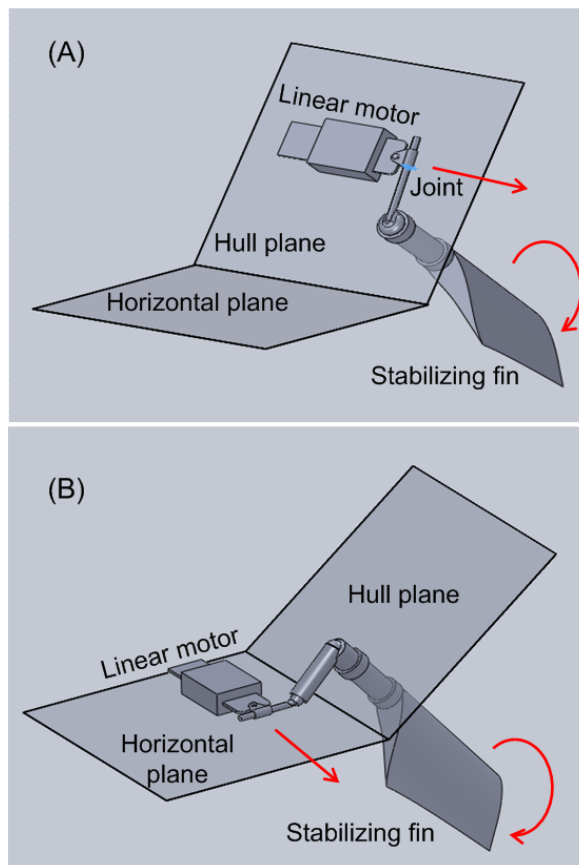


Figura 3. Due possibili arrangiamenti per l'installazione di un azionamento basato su PMLSM per la movimentazione di una pinna stabilizzatrice: (A) montaggio motore a scafo; (B) montaggio motore sul ponte.

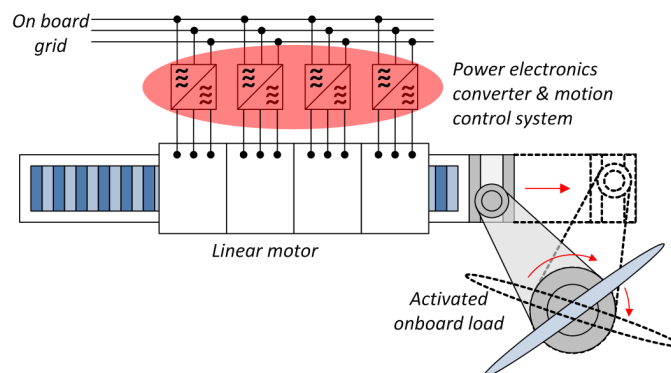


Figura 4. Motore lineare alimentato tramite inverter multipli e accoppiato meccanicamente al carico rotativo tramite giunto prismatico-rotoidale.

Il PMLSM in esame è stato progettato per essere alimentato mediante convertitori a frequenza variabile collegati alla rete a bassa tensione di bordo secondo lo schema di figura 4. Al fine di massimizzare sia l'affidabilità che la scalabilità del disegno, il PMLSM è disegnato secondo un principio modulare. Esso infatti è costituito da N distinti moduli statorici trifase interagenti elettromagneticamente col medesimo organo mobile (asse di spinta o *mover*) recante i magneti permanenti. Ogni modulo statorico è alimentato in modo indipendente da un convertitore di potenza trifase. Gli inverter di alimentazione sono sincronizzati indirettamente tramite la sola retroazione del segnale di posizione del mover. Il disaccoppiamento elettromagnetico dei moduli trifase statorici è garantito dallo schema di avvolgimento a cave frazionarie, che assicura che il flusso di reazione di indotto generato da ciascun modulo rimanga confinato nel modulo stesso senza influenzare i moduli adiacenti. Questo significa, per esempio, che un guasto per cortocircuito in un modulo non ha alcun effetto sul resto della macchina, risultando in un funzionamento *fault-tolerant*. Inoltre la macchina è in grado di funzionare egualmente in seguito allo smontaggio del modulo guasto (Figura 5). Ragionamento analogo vale nel caso di guasto di un inverter con conseguente intervento delle protezioni e disconnessione dal modulo corrispondente. Dato il disaccoppiamento magnetico tra moduli, la rimozione di uno di essi non degrada le prestazioni degli altri, risultando nella semplice riduzione di capacità di spinta massima totale da $N \times F$ a $(N-1) \times F$ essendo F la forza massima di un singolo modulo. Quando il servizio non richiede la spinta massima (ovvero nella maggioranza dei casi), i moduli restanti compensano quello mancante, e la qualità del servizio risulta invariata (ad esempio in modalità di controllo-autopilota in servizio di crociera).

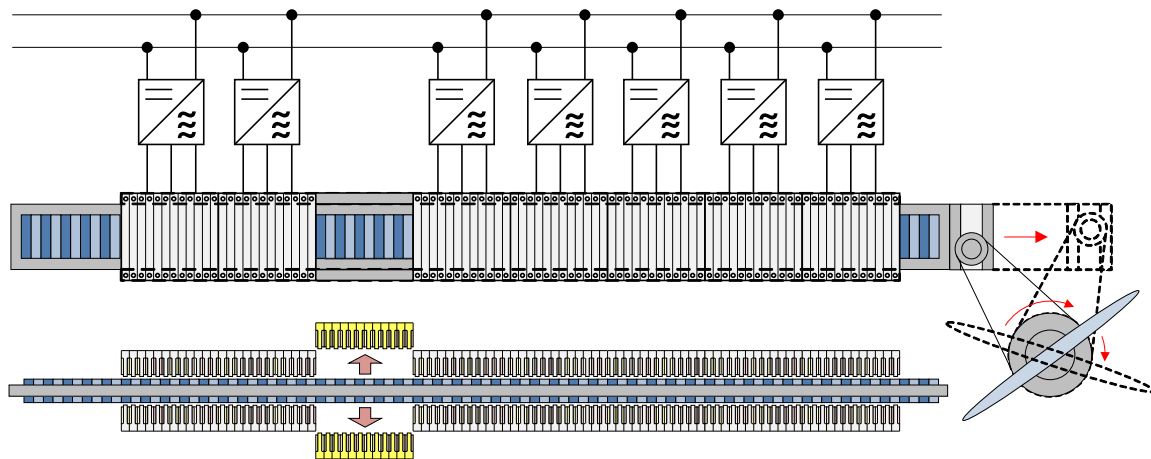


Figura 5. Smontaggio di un modulo statorico guasto dopo la disconnessione del relativo convertitore con possibilità di funzionamento ininterrotto dell'azionamento.

La struttura modulare comporta anche una facile scalabilità del dimensionamento di macchina per diverse applicazioni, in sede progettuale. Infatti, una volta ottimizzato magneticamente [10] il disegno geometrico di un singolo modulo per ottenere una data forza massima unitaria F (come spiegato nel successivo paragrafo), esso può essere replicato N volte per ottenere un motore con una capacità di forza totale pari a $N \times F$. Ciò è garantito di nuovo dal disaccoppiamento magnetico dei moduli. Tale stima di forza totale è conservativa (nel senso che la forza ottenibile con N moduli risulta anche superiore ad $N \times F$) per via della riduzione degli effetti di bordo conseguente all'uso di più moduli accostati. Un altro grado di libertà a disposizione del progettista per scalare il dimensionamento del motore è la larghezza del modulo in senso normale al moto, come indicato nel seguito. Ne risulta che le modifiche progettuali necessarie per adattare il concetto proposto a diversi scopi (al variare delle disposizioni meccaniche e delle

condizioni di installazione) possono essere ristrette al giunto di accoppiamento senza necessità di revisioni nel disegno di base convalidato per il singolo modulo del PMLSM, portando ad una notevole economia di lavoro nella fase di progetto. Questa facilità di adattamento del disegno di base del motore lineare, insieme alla semplice fattura e rimpiazzabilità dei moduli, alla flessibilità di installazione, e ad altri vantaggi pratici descritti nel seguito, sarebbero ovviamente difficilmente ottenibili con un motore di tipo rotativo.

OTTIMIZZAZIONE DEL DISEGNO MAGNETICO DI UN SINGOLO MODULO DEL PMLSM

Il concetto modulare sopra illustrato ha permesso di focalizzare l'attenzione sulla ottimizzazione del disegno di un singolo modulo del PMLSM, inteso come "mattoncino" fondamentale per costruire motori di varie dimensioni e per diverse applicazioni semplicemente combinando insieme un adeguato numero di moduli identici. L'approccio seguito per l'ottimizzazione si è basato sulla parametrizzazione di tutte le dimensioni caratterizzanti la forma geometrica del modulo, da trattare come variabili di uno spazio multi-dimensionale libero da vincoli. Queste sono le quantità indicate in rosso nel disegno di figura 6. Le uniche quantità vincolate sono il traferro g (per ragioni di minima *clearance* meccanica) e lo spessore del mover m (dettato dalla necessaria resistenza a trazione/compressione che l'asse di spinta deve assicurare). Una speciale procedura di ottimizzazione algoritmica [10] è stata quindi utilizzata per trovare la combinazione dei valori di progetto in grado di produrre la massima densità di forza possibile. Con densità di forza si intende il rapporto tra la spinta sviluppata dal modulo ed il volume complessivo delle parti attive. Il lavoro di ottimizzazione è stato eseguito mediante un programma dedicato dove ogni geometria del PMLSM, identificata da un certo set di variabili di progetto, è individualmente indagata tramite analisi degli elementi finiti (FEA, *Finite Element Analysis*) per calcolare la sua capacità di spinta e, quindi, la sua densità di forza. L'algoritmo cambia automaticamente le variabili geometriche ad ogni passo del processo di ottimizzazione, esplorando sistematicamente lo spazio dei parametri, in modo da guidare la progettazione verso più elevate densità di forza. Questo processo è stato condotto tenendo anche presente la possibilità di saturare notevolmente il ferro di macchina, date le basse frequenze elettriche con cui si prevede di alimentare il PMLSM e le basse perdite associate (come spiegato nel seguito), in modo da sfruttare pienamente il ferro statorico per la produzione di spinta. La elevata saturazione 'funzionale' del PMLSM ne accentua ovviamente il carattere non-convenzionale del disegno. Dopo numerose simulazioni, l'ottimizzazione è risultata convergere ad una soluzione che è stata a posteriori verificata come ragionevolmente coincidente con un ottimo globale. La larghezza del modulo (in senso normale al foglio in figura 6) rimane un parametro geometrico a disposizione del progettista per aumentare/diminuire la capacità di forza totale del modulo, in base alla particolare applicazione.

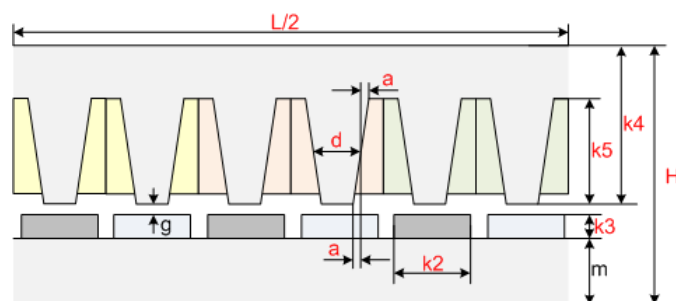


Figura 6. Modello per l'ottimizzazione parametrica di un modulo del PMLSM.

DISEGNO MECCANICO E COSTRUZIONE DI UN PROTOTIPO DI MODULO DEL PMLSM

La configurazione di disegno identificata come ottimale dal punto di vista elettromagnetico è stata poi sottoposta ad analisi FEA più dettagliate, al fine di controllare accuratamente le prestazioni rispetto ad alcuni aspetti non inclusi nel processo di ottimizzazione descritto. Uno di questi aspetti chiave è la forza di ritenzione (*cogging force*), che è nota per essere un inconveniente potenzialmente nocivo per le prestazioni di macchine a magneti permanenti montati superficialmente (SPM, *Surface Permanent Magnet*), soprattutto nel caso di statore a cave aperte. Tuttavia, grazie all'altezza relativamente elevata del magnete, la forza di cog calcolata è risultata essere quasi trascurabile (con valori di picco intorno a 78kg) rispetto alla capacità di forza massima del modulo, che ammonta a oltre 3,5 tonnellate.

Uno studio più approfondito condotto sul modulo ottimizzato riguarda la previsione del suo comportamento in condizioni dinamiche con alimentazione da inverter. Questa indagine è stata svolta per mezzo di strumenti FEA *time-stepping* che consentono di interfacciare il modello elettromagnetico del PMLSM con il modello circuitale a parametri concentrati del convertitore elettronico di potenza e con il modello del carico meccanico. Simulazioni sono state eseguite per riprodurre il normale funzionamento transitorio del motore accoppiato ad un carico meccanico come una pinna stabilizzatrice. Il funzionamento a regime comporta velocità operative massime dell'ordine di 10-15 cm al secondo, che corrispondono ad una frequenza statorica inferiore ad 1Hz. Le simulazioni FEA *time-stepping* hanno confermato che, per valori così bassi di frequenza fondamentale, le perdite in ferro del PMLSM sono estremamente contenute, nonostante la costruzione del nucleo in acciaio massiccio.

Le perdite in ferro non aumentano significativamente neanche nel caso di modulazione PWM delle forme d'onda di tensione in uscita dal convertitore, con una frequenza portante di circa 200Hz. Infatti, nonostante i piccoli valori di induttanza di fase, l'elevato rapporto tra la frequenza di commutazione e quella fondamentale fa sì che le armoniche di alimentazione di ordine elevato siano efficacemente smorzate dalle induttanze di statore, anche senza l'uso di appositi filtri esterni.

I risultati delle simulazioni FEA *time-stepping* hanno incoraggiato la decisione di utilizzare acciaio massiccio al posto dei consueti lamierini al silicio [5] come materiale per la costruzione del nucleo magnetico. Questa scelta porta a notevoli vantaggi in termini di robustezza ed economia strutturale e rende praticabile l'adozione di alcune soluzioni di progettazione meccanica che non sarebbero possibili se venisse utilizzato il tradizionale pacco laminato.

Innanzitutto è stato possibile suddividere il modulo statorico in sotto-moduli, ciascuno composto da un dente in acciaio massiccio completo di bobina e caratterizzato dal disegno semplice e robusto mostrato in figura 7a. Il dente forma un corpo unico con il segmento di giogo statorico corrispondente, che è atto ad essere avvitato ad un telaio in alluminio (Figura 7b). L'assemblaggio risultante, illustrato in figura 8, mostra che l'insieme dei giochi statorici (Figura 7a) forma la parte superiore ed inferiore del telaio della macchina. Questo rappresenta un concetto di motore a "telaio attivo", nel senso che una parte del nucleo magnetico (il giogo) è usato sia come materiale attivo (per convogliare il flusso magnetico) sia come elemento strutturale portante, incrementando eccezionalmente la robustezza del PMLSM. La scelta dell'alluminio come materiale per le porzioni non attive del telaio, cioè per i longheroni laterali e gli scudi (Figura 7b), ha il duplice scopo di minimizzare il peso del motore e di confinare il flusso magnetico all'interno del percorso desiderato in modo da ridurre i fenomeni di dispersione. Allo scopo sono pensabili anche soluzioni impieganti materiali compositi.

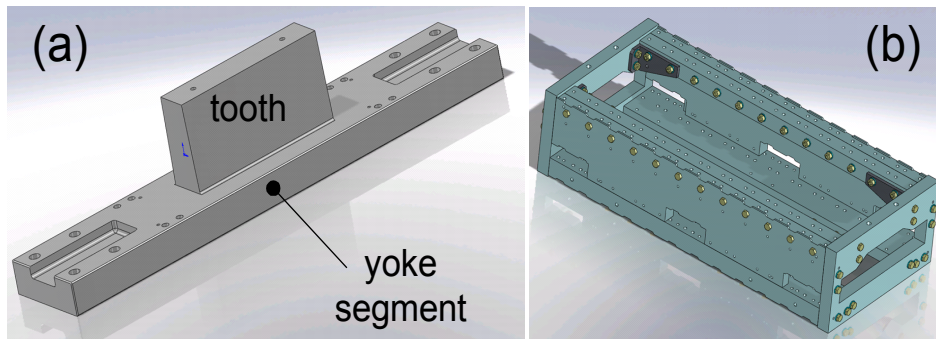


Figura 7. (a) singolo dente del PMLSM, facente corpo unico col relativo segmento di giogo statorico (*back-iron*); (b) struttura di supporto in alluminio (telaio).

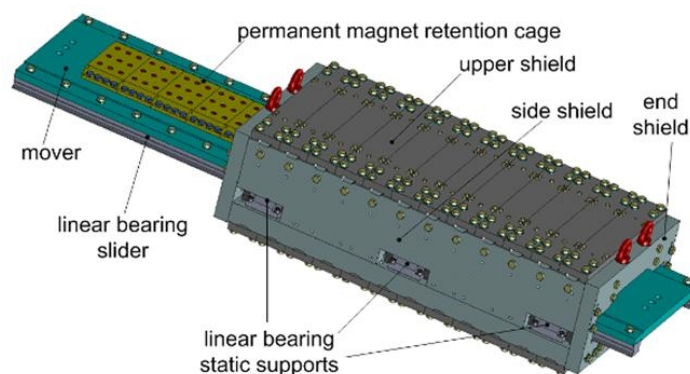


Figura 8. Modellazione solida del prototipo di PMLSM.

La Figura 9 mostra i componenti realizzati, prima dell'assemblaggio finale. L'avvolgimento a cave frazionarie presenta il vantaggio della facile manifatturabilità, dell'economia di costi, e del facile smontaggio e riparabilità in caso di guasto (riavvolgimento della bobina).

Prima di implementare il progetto ottimizzato del modulo in un prototipo sperimentale, dettagliate analisi strutturali sono state eseguite per valutare le sollecitazioni e le deformazioni che hanno origine in tutte le parti del motore (attive e non) nelle condizioni di funzionamento più gravose (Figure 9A, 10).

A tal fine, le forze elettromagnetiche agenti su ogni parte attiva (denti, gioghi, magneti permanenti, acciaio magnetico, bobine) sono state calcolate tramite FEA magnetico nel caso di maggiore sollecitazione. Alle sollecitazioni elettromagnetiche così calcolate sono state poi aggiunte le reazioni vincolari e le rimanenti forze esterne (tra cui il peso). Il set completo di forze è stato poi applicato per le simulazioni 3D FEA strutturali per prevedere i campi di sollecitazione e deformazione originati in ciascuno dei componenti del motore. Sulla base delle simulazioni FEA strutturali, il dimensionamento delle parti attive ottenuto dalla ottimizzazione elettromagnetica è stato confermato come plausibile. Inoltre, il FEA strutturale ha guidato l'appropriato dimensionamento delle parti non attive, come i componenti del frame di alluminio, in modo da mantenere le deformazioni entro margini di sicurezza in base alle caratteristiche meccaniche del materiale.

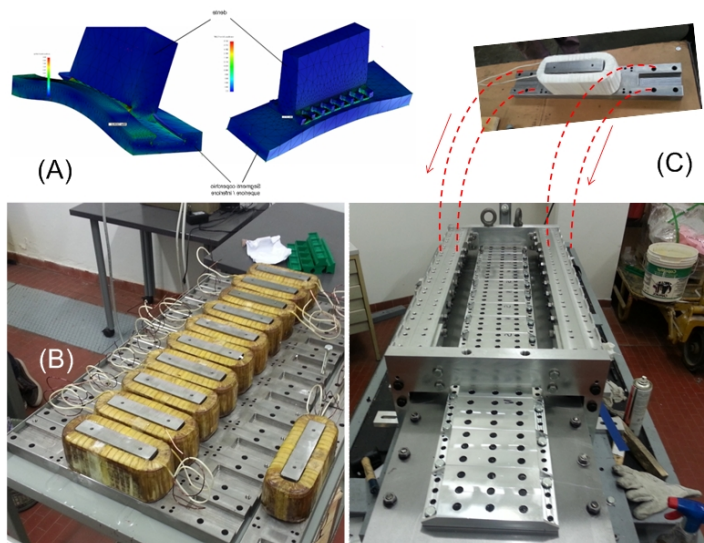


Figura 9. (A) Analisi strutturale di un singolo dente statorico. (B) Insieme dei denti avvolti, prima dell'assemblaggio finale. (C) Montaggio di un dente sul telaio di alluminio.

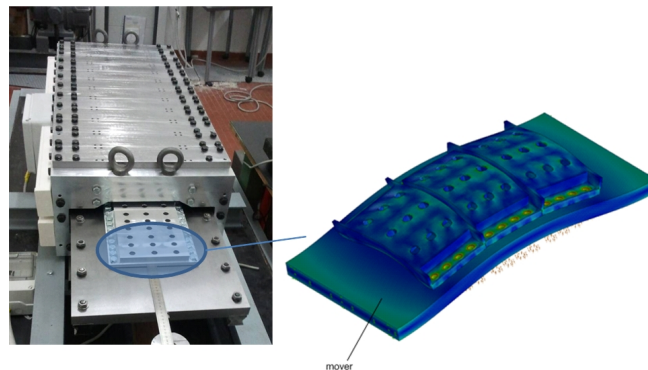


Figura 10. Gabbia in alluminio per il serraggio dei magneti permanenti, analizzata tramite FEA strutturale per il calcolo degli sforzi di Von Mises.

Oltre ai denti statorici e ai gioghi (Figura 9a), anche l'asse di spinta (mover) ha richiesto una analisi strutturale approfondita (Figura 10). Qui la maggiore criticità emersa dalle simulazioni ha riguardato il fissaggio dei magneti permanenti superficiali (SPM). L'incollaggio è stato giudicato inadeguato per i livelli di stress previsti, considerando anche l'invecchiamento e i requisiti di affidabilità. L'uso di bendaggi ad alta resistenza come nelle macchine rotanti di tipo SPM era ovviamente impedito dalla forma lineare della macchina e dalla presenza di guide per i cuscinetti lineari sui lati del mover (Figura 8). Una efficace soluzione innovativa è stata trovata, ricorrendo a gabbie di ritenzione in alluminio (Figura 10) imbullonate sulla superficie del mover. Ciascuna gabbia è progettata per ospitare un certo numero di magneti (sei blocchetti al Sm-Co di dimensioni commerciali) ugualmente magnetizzati per formare un polo. La soluzione proposta, oltre a garantire robustezza, è particolarmente conveniente nel caso di smagnetizzazione dei magneti in quanto consente la facile sostituzione dei singoli blocchetti smagnetizzati.

Dopo aver eseguito le attività di dimensionamento e le necessarie verifiche strutturali, si è passati alla fabbricazione del prototipo. Le operazioni di fabbricazione e montaggio sono risultate relativamente semplici grazie alla modularità e alla semplicità della progettazione del motore. L'unica criticità incontrata ha riguardato il montaggio dei magneti permanenti. Infatti, a causa delle elevate forze di repulsione fra i magneti dello stesso polo, è stato necessario realizzare uno strumento apposito per il montaggio dei blocchetti nelle gabbie. Partendo dai singoli componenti, il prototipo è stato montato pezzo per pezzo direttamente sul banco di prova (Figura 11) su cui sono state valutate le prestazioni.

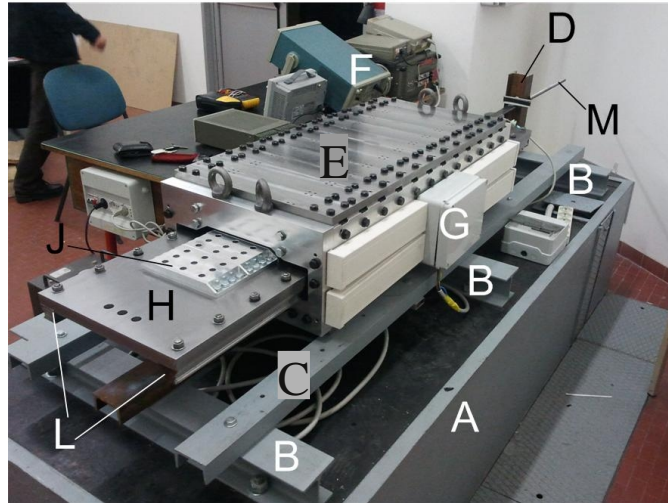


Figura 11. Prototipo del PMLSM installato sul banco di prova. A: Basamento in concreto. B, C: Longheroni imbullonati per il fissaggio del prototipo al basamento. D: Supporto rigido per l'ancoraggio del mover, con cella dinamometrica. E: elementi statorici imbullonati al telaio. F: Oscilloscopio. G: Morsettiera. H: Mover. J: Gabbia di ritenzione dei magneti. L: Guide per i cuscinetti a ricircolo di sfere. M: asta filettata fissata al mover ed al supporto rigido, per bloccare il mover in una data posizione (per misure statiche di forza).

TEST DEL PROTOTIPO

Alcuni test preliminari sono stati condotti sul prototipo per verificare le resistenze e le induttanze dell'avvolgimento in funzione della frequenza di alimentazione. I test sono stati fatti anche con alimentazione PWM, al fine di verificare le ulteriori perdite indotte dalle armoniche di tensione e dalle relative forme d'onda di corrente. Tutti questi controlli hanno confermato le previsioni progettuali e convalidato la scelta di una costruzione in acciaio massiccio del nucleo.

Il test più significativo finora condotto sul prototipo ha avuto lo scopo di valutare la sua capacità massima di spinta. A tal fine, è stato usato il dispositivo di misura mostrato nelle figure 12 e 13. I dettagli meccanici ed elettrici sono discussi di seguito.

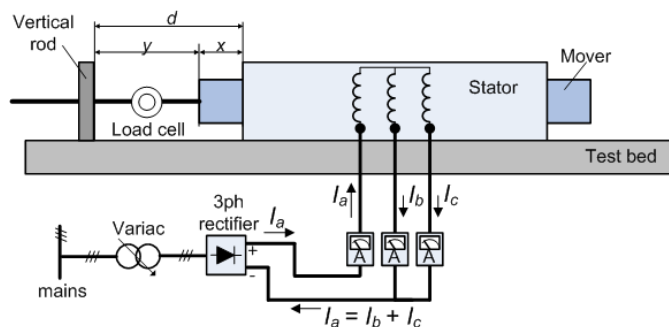


Figura 12. Schema circuitale e meccanico per la misura delle prestazioni di forza.

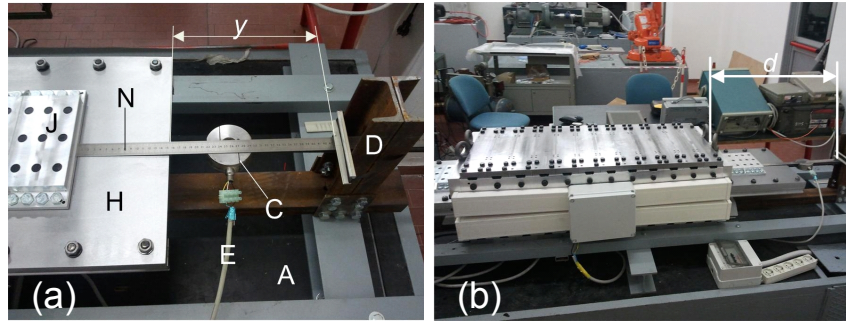


Figura 13. Fotografie del PMLSM con evidenziate le dimensioni y , d di Figura 12. E' visibile anche la cella di carico (C) con i cavi di alimentazione e segnale (E), ed un righello per la misura di y (N).

Arrangiamento Meccanico del Banco di Prova

Per misurare la spinta del PMLSM, il telaio è stato saldamente fissato su un basamento (Figura 13) mediante travi in acciaio imbullonate. Il mover è collegato ad un supporto verticale (trave) tramite un'asta filettata regolabile, mentre la trave di supporto è rigidamente collegata al basamento. Una cella di carico calibrata (sensore di forza) è posta in serie all'asta filettata. La posizione dell'elemento mobile viene identificata dalla distanza x tra la sua estremità e lo scudo statorico (Figura 12). Il valore preciso di x viene ottenuto indirettamente come $x=d-y$, dove d è la distanza costante tra il vincolo verticale e lo scudo (Figura 13b) e y è la distanza tra l'estremità dell'elemento mobile e lo stesso vincolo (Figura 13a). Il valore di x può essere finemente regolato agendo sui bulloni che trattengono l'asta filettata attaccata al supporto. Questo permette di bloccare fermamente il mover ed effettuare le misure di forza in sicurezza.

Arrangiamento Elettrico del Banco di Prova

Le tre fasi statoriche connesse a stella sono alimentate durante la prova mediante la circuiteria schematizzata in figura 12. Un raddrizzatore trifase a diodi è alimentato da una sorgente a tensione variabile. Il raddrizzatore include anche un condensatore di livellamento. Il polo di uscita positivo del raddrizzatore è collegato ad un terminale di fase, mentre i terminali delle altre due fasi sono collegati tra loro ed al polo negativo. In tal modo, in condizioni statiche la corrente continua della fase A si ripartisce equamente tra le fasi B, C ottenendo un sistema trifase equilibrato. In tali condizioni si stabilisce al traferro un campo di reazione statico, ma di ampiezza regolabile. La forza di interazione utile tra magneti e correnti deriva dalla componente di quinta armonica spaziale del campo di reazione sviluppato dai 12 denti superiori o inferiori, dato che lo statore copre l'estensione di 10 poli magnetici dell'asse di spinta.

Attività di Test e Risultati

Grazie alle soluzioni meccaniche ed elettriche sopra descritte, è stato possibile determinare la spinta F sviluppata dal PMLSM in funzione della posizione x del mover e della corrente statorica I . Come risultato dei test è stata ottenuta una funzione campionata $F(x,I)$. Come esempio, la figura 14 illustra la spinta F in funzione della posizione del mover per corrente statorica costante pari a 18A. Questa corrente è prossima al massimo ammissibile in condizioni transitorie con raffreddamento naturale, anche se valori più alti sono possibili in caso di raffreddamento diretto della macchina (nuovi test sono attualmente in corso per valutare i reali limiti termici). Il valore di spinta di picco misurato in figura 14 (circa 3.3 tonnellate) è abbastanza rappresentativo delle potenzialità del

PMLSM. Pesando il motore circa 700kg, si ottiene un rapporto spinta/peso prossimo a 5. La figura 14 mostra inoltre che i risultati degli esperimenti si accordano con le previsioni di spinta ottenute tramite FEA durante la fase di progettazione.

Altre misure di forza con macchina disalimentata (corrente nulla) hanno invece fornito l'andamento della forza residua (*cogging force*) in funzione di x . Un'ampiezza massima di circa 83kg è stata misurata, che ben corrisponde alle previsioni teoriche (78kg) e che conferma la correttezza del progetto.

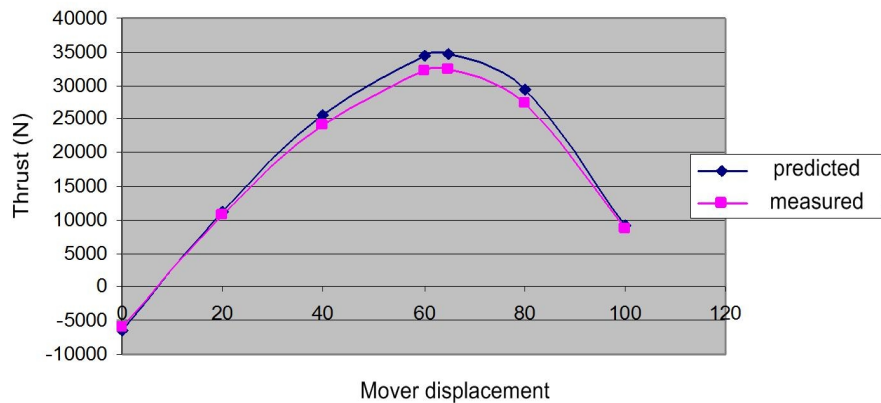


Figura 14. Spinta prevista e misurata del PMLSM prototipato, in funzione della posizione lineare x del mover e con corrente statorica I_a pari a 18A.

CONCLUSIONE

Questo articolo ha delineato il concetto di base, lo sviluppo progettuale e la costruzione di un prototipo di PMLSM finalizzato all'attuazione diretta di carichi di bordo a coppia elevata e bassa velocità, come timoni ed alette stabilizzatrici. La tecnologia full-electric proposta si pone in alternativa agli attuatori idrostatici classici ed alle soluzioni a riduttore meccanico recentemente apparse sul mercato. Dopo aver illustrato le principali necessità ed esigenze che hanno ispirato l'idea di base, sono stati descritti i dettagli dello sviluppo del prototipo quali l'ottimizzazione elettromagnetica di un modulo, l'analisi strutturale, la selezione dei materiali, il dimensionamento dei componenti e i risultati di simulazioni ad elementi finiti nel dominio del tempo. Infine è stata descritta l'attività di fabbricazione del prototipo, e sono stati riportati i risultati delle principali prove sperimentali eseguite in laboratorio. L'attività sperimentale svolta finora ha confermato la validità pratica delle scelte progettuali. Ulteriore lavoro è attualmente in corso per sfruttare il know-how tecnologico acquisito in laboratorio in un nuovo progetto all'esame della MMI, nell'ambito del Piano Nazionale di Ricerca Militare (PNRM), finalizzato alla costruzione di un dimostratore tecnologico in scala reale, da installare su una nave militare per prove in navigazione.

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento da parte degli autori va al Dott. Michele Torre ed all'Ing. Teresa Mazzuca, dell'Ufficio Studi Progetti Mezzi e Materiali (SPMM) dello Stato Maggiore della Marina Italiana (MARISTAT), ed ai Comandanti Giorgio Scala (T.V.) e Lucio Piva (C.F.) della Direzione Generale degli Armamenti Navali (NAVARM), per il loro valido supporto nello svolgimento e finalizzazione del Progetto di Ricerca "ISO".

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. Perez, *Ship Motion Control*. Springer-Verlag, London, 2005.
- [2] *Rules for The Classification of Naval Ships - Part C – Machinery, Systems and Fire Protection – Steering Gear*, Ch. 1, Sec. 11, RINAMIL 2007.
- [3] A. Akers, M. Gassman, and R. Smith, *Hydraulic Power System Analysis*. CRC Press, Taylor and Francis, 2006.
- [4] C. Bruzzese, A. Tassarolo, T. Mazzuca, G. Scala, "A closer look at conventional hydraulic ship actuator systems and the convenience of shifting to (possibly) all-electric drives," *IEEE Electric Ship Technology Symposium, IEEE ESTS 2013*, Arlington, VA, 22-24 April 2013.
- [5] Dong-Yeup Lee, Chun-Gil Jung, Kang-Jun Yoon, Gyu-Tak Kim, "A study on the efficiency optimum design of a permanent magnet type linear synchronous motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 5, pp. 1860- 1863, May 2005.
- [6] Y. Fujimoto, T. Kominami, and H. Hamada, "Development and analysis of a high thrust force direct-drive linear actuator", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1383-1392, May 2009.
- [7] T. Mazzuca, C. Bruzzese, "Project "ISO": innovative solutions for Italian Navy's onboard full-electric actuators," *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, 2012, 16-18 Oct. 2012.
- [8] C. Bruzzese, "A high absolute thrust permanent magnet linear actuator for direct drive of ship's steering gears: Concept and FEM analysis," in *Proc. ICEM Conf.*, Marseille, France, Sept. 2-5, 2012.
- [9] A. Tassarolo, C. Bruzzese, T. Mazzuca, G. Scala, "A novel fault-tolerant high-thrust inverter-controlled permanent magnet linear actuator for direct-drive of shipboard loads," *IEEE Electric Ship Technology Symposium, IEEE ESTS 2013*, Arlington, VA, 22-24 April 2013.
- [10] M. Bortolozzi, C. Bruzzese, F. Ferro, T. Mazzuca, M. Mezzarobba, G. Scala, A. Tassarolo, and D. Zito, "Magnetic optimization of a fault-tolerant linear permanent magnet modular actuator for shipboard applications," in *Proc. IEEE SDEMPED Conf.*, Valencia, Spain, Aug. 27-30, 2013.