



TP

Anno XXXVII - Settembre/Ottobre 2022

TRASPORTI PUBBLICI



STABILITA' ECONOMICA E NORMATIVA PER LO SVILUPPO INDUSTRIALE DEL TPL

Idrogeno

- 4** PNRR, IDROGENO FERROVIARIO: PUBBLICATO IL DECRETO PER ACCEDERE ALLE RISORSE
di Veronica Usai
- 8** PROCEDURE E MODALITÀ PER AVVIARE I PROGETTI DI SPERIMENTAZIONE DELL'IDROGENO PER IL TRASPORTO STRADALE
di Maurizio Cianfanelli
- 10** TRAM-TRENO AOSTA-PRÉ-SAINT-DIDIER: IPOTESI TECNICO-ECONOMICHE ED ENERGETICHE ALLA LUCE DI INNOVAZIONI IN TEMA DI ALIMENTAZIONE A IDROGENO
di Claudio Carlini, Diana Moneta, Marco Rossi

COP27

- 17** L'ITALIANA TPER TRA LE CASE HISTORY DEL POSITION PAPER SULLE CATENE DI FORNITURA ILLUSTRATE ALLA CONFERENZA DELLE NAZIONI UNITE SUL CLIMA
di Paolo Mezzetti
- 19** LA GESTIONE SOSTENIBILE DELLE CATENE DI FORNITURA: TRA RESPONSABILITÀ E OPPORTUNITÀ PER LE IMPRESE

Sistema tram

- 31** CONVERTITORE ELETTROMAGNETICO ROTO-TRASLANTE PER LA PROPULSIONE 'CONTACT-LESS' DI VEICOLI LEGGERI A CORTA PERCORRENZA
di Mauro Andriollo, Marco Soldera, Andrea Tortorella
- 43** QUALI PROSPETTIVE PER NUOVE TRANVIE?
di Giovanni Mantovani

Professione autista

- 56** IL PROGETTO SCUDERIA START, FORMATI 19 NUOVI AUTISTI

PUBBLIREDAZIONALE

- 59** INTEGRATO, COMPLETO, EFFICIENTE: ENEL X PARTNER PER IL TRASPORTO PUBBLICO ELETTRIFICATO
- 61** NEXT MOBILITY EXHIBITION: LA MOBILITÀ SOSTENIBILE HA TROVATO UN NUOVO PUNTO DI RIFERIMENTO
- 63** LE SFIDE E LE OPPORTUNITÀ DELLA SOSTENIBILITÀ PER IL SETTORE TRANSPORTATION

Sistema tram



INNOVAZIONE TECNOLOGICA

CONVERTITORE ELETTROMAGNETICO ROTO-TRASLANTE PER LA PROPULSIONE 'CONTACT-LESS' DI VEICOLI LEGGERI A CORTA PERCORRENZA*

Lo sviluppo di sistemi di trasporto pubblici a propulsione elettrica fornisce svariati vantaggi dal punto di vista delle emissioni inquinanti e dell'impatto sulle attività sociali. Tuttavia, nel caso di veicoli tranviari e metropolitani tradizionalmente a via guidata e provvisti di alimentazione fissa, il loro inserimento nell'ambito del tessuto urbano può comunque essere problematico, tenendo conto dei vincoli in termini di rumore ed impatto visivo. A questo si possono aggiungere vincoli operativi determinati dall'aderenza ruota/rotaia che possono condizionare il tipo di tracciato o addirittura precluderne l'applicabilità in caso di

superamento di pendenze elevate, tipiche ad esempio di un contesto collinare o montano. In questi casi la propulsione è affidata a sistemi funicolari che hanno il pregio di garantire elevate capacità di trasporto (fino a 8000-9000 pass/h/dir nel caso di people mover automatizzati [1,2]), sfruttando una tecnologia di tipo convenzionale. Per tratti brevi, dell'ordine di centinaia di metri, possono essere usati anche ascensori inclinati o people mover a bassa capacità (fino a 400-600 pass/h/dir) che, nel caso di pendenze più severe, possono dotarsi di una guida a cremagliera. Le tipologie di trazione e guida sopra menzionate

**di Mauro Andriollo,
Marco Soldera,
Andrea Tortorella**

sistema tram



presentano tuttavia degli svantaggi non trascurabili in termini di invasività dall'infrastruttura, di necessità di manutenzione frequente per garantire le necessarie condizioni di sicurezza, di emissioni di rumore e di efficienza complessiva di sistema.

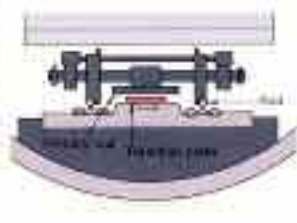
Per superare in parte queste problematiche, sono stati studiati dei sistemi alternativi di propulsione che hanno in qualche caso raggiunto una maturità commerciale. Essi si fondano sulla trasmissione elettromagnetica dello sforzo di trazione senza utilizzare il fenomeno dell'aderenza, potendo quindi superare le limitazioni ambientali (umidità, sporcizia, eccetera) nonché operative (elevate pendenze) che costituiscono generalmente un ostacolo per i veicoli ferroviari tradizionali. I principali candidati in questo senso sono i motori elettrici lineari (LEM). Essi sono caratterizzati da un primario ed un secondario a simmetria piana collocati su parti opposte veicolo/pista che sfruttano l'interazione tra i campi magnetici per trasmettere la

forza al veicolo, quindi con un'azione di tipo 'contact-less'. La funzione di supporto e di guida può essere ancora affidata ad una rotaia convenzionale, nel caso ad esempio di integrazione in un'infrastruttura esistente. Un esempio significativo è costituito dalla linea metropolitana Linear Metro di Tokyo e Osaka (Fig.1a), dove viene utilizzato un motore lineare asincrono (LIM) con avvolgimento primario sul veicolo, alimentato attraverso linea di contatto e pantografo; il secondario è formato da una lastra in rame o alluminio depositati su una base in acciaio installata tra i binari. La spinta sviluppata dai LIM (circa 2 kN/LIM) consente un'accelerazione massima di 0.69 m/s² e di superare pendenze fino all'8% [3].

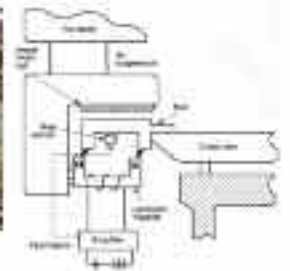
L'eliminazione di ogni tipologia di contatto con il terreno può essere ottenuta attraverso la tecnologia a levitazione magnetica (Maglev), dove opportuni elettromagneti o avvolgimenti dedicati possono mantenere in sospensione il veicolo e guidarlo lungo la pista [4,5]. Esempi di applicazioni in ambito urbano con pista sopraelevata sono i veicoli HSST-Linimo a Nagoya, Rotem EcoBee a Incheon e Maglev Express a Changsha. Nel caso del veicolo HSST-Linimo (Fig.1b), la propulsione è ancora affidata ad un LIM, mentre la levitazione è di tipo attrattivo con l'alimentazione degli elettromagneti controllata attivamente in funzione del valore del traferro. Attraverso un'opportuna sagomatura dei nuclei magnetici si ottiene anche la funzione di guida. Un convoglio di questo tipo fornisce una capacità di 3500 pass/h/dir, un'accelerazione massima di 1.11 m/s² e di superare pendenze del 6% [6].

Nella memoria viene proposta una configurazione alternativa con aspetti innovativi dal punto di vista tecnologico, orientato ad un tra-

Figura 1 - Veicoli urbani con propulsione a motore elettrico lineare; (a): Linear Metro con schema della configurazione del LIM di propulsione; (b): Maglev HSST-Linimo con schema del sistema di propulsione tramite LIM e dell'elettromagnete di levitazione e guida



(a)



(b)

sporto su corto raggio (dell'ordine di qualche km) ed a bassa capacità (fino ad alcune centinaia di pass/h/dir). Il sistema di propulsione utilizza una trasmissione contactless della forza come nei LEM, ma è dotata di un motore elettrico rotante di tipo tradizionale. Il componente principale è un convertitore di moto da rotante a lineare (RLMC) basato su un ingranaggio magnetico (MG) per trasformare la coppia ad alta velocità del motore rotante in spinta sul veicolo con bassa velocità di crociera senza organi di trasmissione meccanica da motore a ruota.

Gli MG stanno acquistando un forte interesse come possibili sostituti degli ingranaggi meccanici, sebbene la densità di coppia trasmissibile sia più limitata (valori dell'ordine di 100 kNm/m³) ed il rapporto di trasmissione tipicamente non superi 10:1. Essi, tuttavia, offrono vantaggi non trascurabili quali l'alta efficienza (> 90%), la ridotta manutenzione e rumorosità, il basso stress termico e la minor incidenza delle tolleranze meccaniche e di eventuali agenti esterni.

Le applicazioni riguardano l'ambito industriale, di conversione/produzione di energia elettrica e dei trasporti, grazie anche all'affidabilità crescente evidenziata sia da prototipi che da componenti commerciali [7,8]. La conversione di moto avviene attraverso l'interazione di due distribuzioni di magneti permanenti (PM) con diverso numero di poli separate da una serie di salienze ferromagnetiche (modulatori). La loro funzione è di modulare il campo prodotto dai PM per ottenere delle componenti di campo aventi le medesime polarità ai rispettivi trasferi e consentire quindi la trasmis-

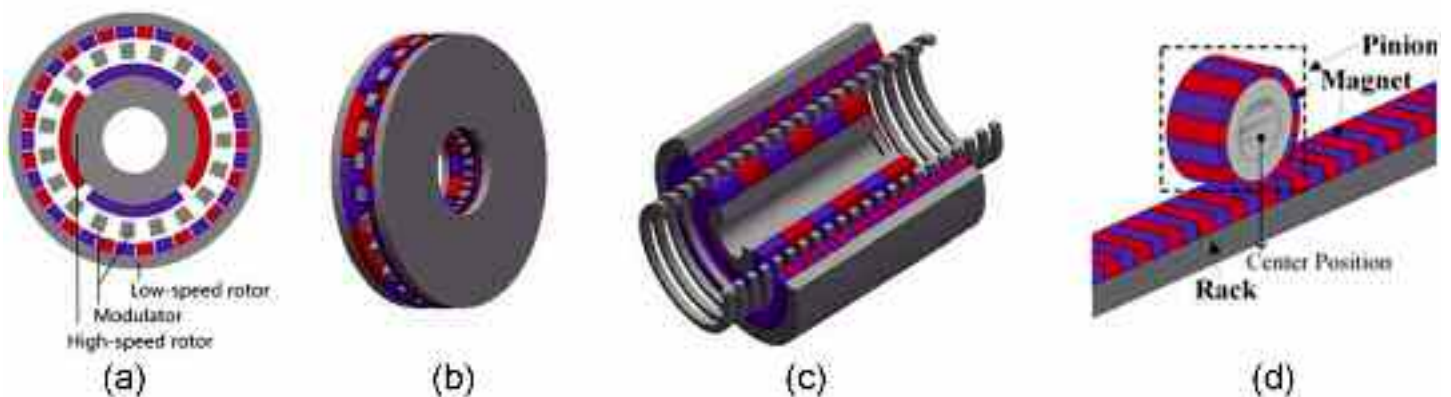


sione di coppia e/o forza su entrambi. Si deve puntualizzare che il rapporto di trasmissione si modifica a seconda che le parti in movimento siano le distribuzioni di PM o una distribuzione di PM ed i modulatori, in modo analogo a quanto accade ad esempio nei riduttori epicicloidali.

Nella Fig. 2 sono riportate alcune configurazioni proposte in letteratura con diversa simmetria geometrica e quindi anche magnetica. In Fig. 2a-b sono mostrate configurazioni per la trasmissione di moto rotante da albero lento ad albero veloce e viceversa; la Fig. 2c mostra un MG per la trasmissione di moto lineare; infine, la Fig. 2d mostra una configurazione che emula una struttura a pignone e cremagliera dove i denti meccanici sono sostituiti dai PM. In questo caso, si ottiene una trasmissione di moto senza effetto di riduzione/moltiplicazione, determinando



Figura 2 - Tipologie di ingranaggi magnetici; (a): coassiale; (b): assiale a disco; (c): tubolare a moto lineare; (d): roto-lineare a pignone cremagliera





quindi semplicemente un accoppiamento magnetico tra il corpo rotante e quello traslante.

A partire da quest'ultima configurazione, è stata elaborata quella proposta in questa relazione, considerando il fatto che permette di trasformare la coppia prodotta da un eventuale motore rotante in forza che agisce su un corpo traslante solidale con il veicolo.

L'applicabilità di questo principio è stata tuttavia migliorata attraverso l'introduzione delle seguenti soluzioni:

- inserimento di una guida costituita da salienze ferromagnetiche tra cilindrici e cremagliera analogamente agli MG convenzionali per ottenere un rapporto di riduzione e renderne più conveniente il dimensionamento;
- aggiunta di più cilindri, ciascuno formante una polarità magnetica, per incrementare la

superficie di interazione e rendere più omogenea ed efficace la trasmissione di forza.

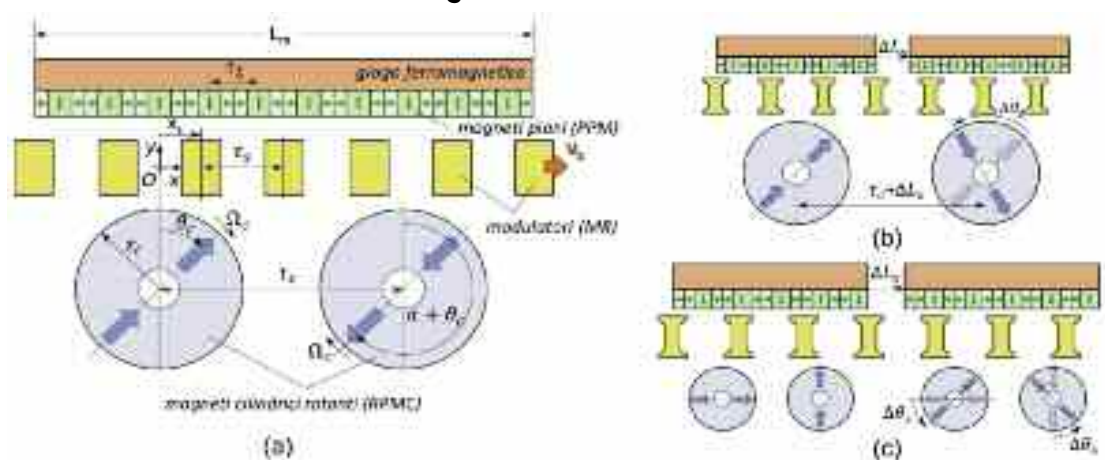
Nella memoria verrà illustrato il principio di funzionamento ed alcune analisi preliminari effettuate con codici di simulazione agli elementi finiti che hanno condotto allo sviluppo di un prototipo di piccola scala. Successivamente, verranno analizzate le prestazioni e l'ottimizzazione elettromagnetica effettuata con riferimento all'applicazione in un sistema di trasporto a bassa velocità e corta percorrenza che deve operare su tratte con pendenza elevata. In questa condizione, verrà riportata un'analisi di tipo energetico ipotizzando una condizione di esercizio tipica di un sistema funiviario per valutare il dimensionamento del sistema di alimentazione di bordo ed i consumi di energia.

Principio di funzionamento del RLMC

Uno schema della configurazione proposta relativa ad un modulo di propulsione è riportato in Fig. 3a [9]. La parte sul veicolo è formata da:

- una distribuzione di magneti cilindrici (RPMC) ad una coppia polare ($p_c = 1$) azionati da un motore rotante attraverso una trasmissione a cinghia che garantisce comunque un'affidabilità ottimale trattandosi di una tecnologia consolidata ed una buona efficienza di trasmissione;
- una distribuzione di magneti piani (PPM) con numero di coppie polari $p_l > p_c$ disposti su un giogo ferromagnetico; la direzione di magnetizzazione può essere unicamente verticale o secondo uno schema di tipo

Figura 3 - (a): Modulo base del RLMC ($nc=2$); (b): configurazione con singolo cilindro per modulo ($nc=1$); (c): configurazione con doppio cilindro per modulo ($nc=2$) a magnetizzazione Halbach



quasi Halbach come in Fig. 3a, quest'ultima generalmente più conveniente in termini di densità di forza e di regolarità della spinta.

I modulatori (MR) sono in materiale ferromagnetico massiccio e vengono posizionati lungo la pista, limitando così i costi rispetto ad una soluzione che preveda l'utilizzo di PM. Il numero di salienze n_s coperte da un modulo deve soddisfare alla relazione $n_s = p_c + p_L$ per garantire l'interazione tra i magneti. L'insieme costituisce quindi una sorta di cremagliera magnetica che consente di trasmettere potenza da alta velocità/bassa coppia del motore convenzionale ad alta forza/bassa velocità del veicolo, caratteristica vantaggiosa nei percorsi in pendenza. Il rapporto di trasmissione è $G_R = v_c/v_s = n_s/p_c$ con v_s la velocità del veicolo rispetto alla pista e $v_c = \Omega r_c$ la velocità periferica dei RPMC. Anche se non rappresentati in Fig. 3a, potranno essere presenti dei distanziatori a ruota libera per evitare collisioni tra i PM e gli MR.

I principali vantaggi di questa configurazione per un sistema di trasporto sono:

- elevata aderenza visto che la forza viene trasmessa per via magnetica;
- sincronizzazione automatica della posizione relativa tra PM e MR in base alla forza da sviluppare (assenza di sensori);
- controllo di forza/velocità ottenuto tramite l'azionamento del motore rotante;
- tolleranza ai sovraccarichi che evita rotture come nel caso di un corrispondente componente meccanico;
- presenza di una forza di trattenuta in assenza di coppia del motore rotante che aiuta a frenare o a mantenere bloccato il ve-

colo;

- uso di materiali magnetici a basso costo (ferrite, acciaio magnetico massiccio);
- scalabilità della configurazione, che ne permette un adattamento a diverse tipologie di servizio;
- rispetto ad un motore lineare con avvolgimento al posto degli RPMC, riduzione degli effetti di bordo che generalmente penalizzano le prestazioni ed assenza di cavi nei pressi della pista e di riscaldamento dei PM.

Nelle Figg. 3b-c sono riportate delle configurazioni alternative il cui scopo principale è limitare l'interazione tra gli RPMC che può causare un elevato ripple di coppia sui singoli magneti. Tale effetto è determinato dalla variazione di energia magnetica al variare della posizione causato dall'alternanza di effetti di attrazione e repulsione delle rispettive polarità.

In Fig. 3b è presente un unico cilindro per modulo, mentre nella Fig. 3c si usa un doppio cilindro per modulo con una magnetizzazione di tipo quasi-Halbach.

Questa soluzione permette di usare cilindri di raggio inferiore, incrementando la densità di forza e riducendo l'inerzia rotante accoppiata al motore primo. Con queste soluzioni, si può ottenere una riduzione consistente del ripple di coppia totale sfasando spazialmente i moduli di una distanza ΔL_s . Per mantenere invariata l'interazione tra RPMC e PPM, dovrà essere eseguita anche un'opportuna rotazione $\Delta\theta_s = 360^\circ \Delta L_s/\tau_s$ della magnetizzazione degli RPMC appartenenti ai moduli adiacenti. Tramite questa operazione, pur avendo una leggera riduzione del valore medio della spinta, viene attenuata

Figura 4 - (a): RLMC con magneti fissi e guida mobile ($n_m=4$, $n_c=1$); (b): trasmissione a cinghia; (c): posizionamento dei magneti cilindrici e piani con guida rimossa.



sistema tram



anche l'ondulazione prodotta dai MR [10,11]. Per la geometria dei modulatori, può essere adottata anche una sezione ad IPE per risparmiare materiale ed attenuare le correnti indotte nel materiale massiccio [11].

Nella Fig. 4 viene riportato un prototipo dimostrativo in corso di validazione realizzato secondo lo schema di Fig. 3b con $n_m=4$ moduli. I dati progettuali sono riportati in Tab.1 e si riferiscono ad un'applicazione di piccola scala con guida mobile e magneti fissi. I modulatori in acciaio magnetico massiccio sono vincolati tramite un telaio in alluminio per evitare richiusure di flusso nella parte esterna al traferro. Il motore aziona i quattro RPMC in ferrite tramite una trasmissione a cinghia con opportuni tenditori (rapporto di trasmissione 1.3:1). Gli RPMC sono montati su cuscinetti inseriti nelle piastre di sostegno laterali. I PPM sono anch'essi in ferrite ed incollati su un giogo ferromagnetico massiccio. I dati di progetto evidenziano una buona densità di forza ($\approx 200 \text{ kN/m}^3$), nonostante l'utilizzo di materiali attivi non particolarmente pregiati.

Studio e calcolo delle prestazioni del RLMC

Il modulo base di Fig. 3a è stato analizzato considerando un'applicazione di trasporto su corta

distanza ed a bassa capacità che deve operare su una tratta ad elevata pendenza. I dati principali sono riportati in Tab. 2. Il valore della forza massima è stato stimato includendo sia le forze inerziali che le resistenze al moto, ipotizzando che il veicolo si muova su rotaia. Tale valore influenza il numero dei moduli n_m da installare sul veicolo e la loro profondità, nell'ambito dei vincoli dimensionali riportati in Tab. 2. Il rapporto di trasmissione è $G_R=6:1$. Considerando una configurazione preliminare che utilizza il modello base di Fig. 3a, si opta quindi per $n_s=6$ modulatori e $p_L=5$ coppie polari per s modulo. I magneti sono in ferrite ($B_r=0.4 \text{ T}$, $H_c=300 \text{ kA/m}$), i modulatori in acciaio magnetico e massiccio (permeabilità relativa $\mu_{Fe}=3000$, resistività $50 \mu\Omega\cdot\text{m}$). Il giogo su cui poggiano i PPM è invece considerato laminato per ridurre le perdite per correnti parassite.

Attraverso delle analisi svolte per mezzo di codici numerici agli elementi finiti (FE), sono stati ricavati i dati principali del progetto preliminare (Tab. 3) che soddisfano la specifica di forza. Come si vede in Fig. 5a per le curve con moduli non sfasati ($\Delta\theta_s=0$), l'andamento della forza per unità di profondità in funzione dell'angolo θ_c risulta abbastanza livellato; al contrario, l'andamento della coppia totale presenta un ripple molto pronunciato, con un'escursione

Tabella 1 - Dati di riferimento del modulo per il prototipo dimostrativo

MR/modulo (n_s)	5	Rapporto trasmissione (G_R)	5:1
PPM/modulo (p_L)	4	Velocità traslazione (v_t)	0.5 m/s
Larghezza modulo	34.5 mm	Velocità rotazione RPMC (ω_c)	2500 rpm
Raggio RPMC	10.8 mm	Velocità rotazione motore (ω_m)	3250 rpm
Altezza/Larghezza MR	8.64 x 4.32 mm	Spinta (max)	95 N
Profondità	72 mm	Potenza motore	100 W
Altezza totale	47.2 mm	Forza verticale RPMC (max)	17 N
Lunghezza totale	138 mm	Forza verticale MR (max)	190 N

Tabella 2 - Dati di riferimento per un'applicazione di trasporto su corta distanza/bassa capacità

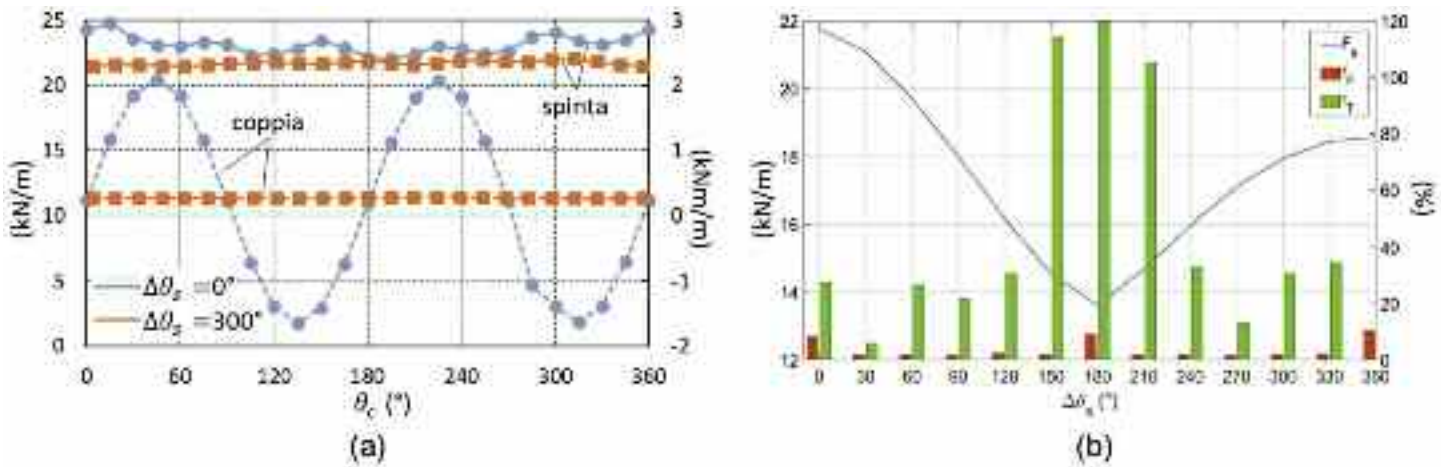
Distanza	1000 m	Pendenza	20%
Passeggeri	8	Velocità di crociera	3 m/s
Massa veicolo	1800 kg	Forza massima	4.4 kN
Lunghezza attiva (max)	2 m	Profondità attiva (max)	0.25 m

Tabella 3 - Dati per il progetto preliminare per l'applicazione di trasporto

Numero moduli n_m	5	Traferri g_1/g_2	1.5/2.5 mm
Raggio RPMC r_c	70 mm	Spessore modulatori h_s	43 mm
Altezza modulo H_m	144 mm	Lunghezza modulo L_m	360 mm



Figura 5 - (a): andamento forza di spinta e coppia per le configurazioni senza e con sfasamento tra i moduli; (b): influenza dello sfasamento tra i moduli nella configurazione con $n_m=10$



paragonabile al valore medio. Se invece viene adottato un opportuno sfasamento ($\Delta\theta_c = 300^\circ$), si ottiene una compensazione praticamente completa dell'ondulazione, a spese di una leggera riduzione del valore medio della forza e di un allungamento della parte attiva essendo $\Delta L_s > 0$, il cui valore comunque permette di rimanere all'interno dello spazio previsto per l'installazione.

Un possibile miglioramento progettuale consiste nell'introdurre una magnetizzazione quasi Halbach anche per gli RPMC come in Fig.3c, riducendo allo stesso tempo il raggio r_s . I vantaggi sono i seguenti:

- incremento della densità di forza in rapporto al volume di magneti per una migliore utilizzazione del flusso dei magneti cilindrici ed un miglior confinamento del flusso al traferro;
- riduzione del ripple di coppia per la ridotta interazione tra RPMC adiacenti;
- riduzione del coefficiente inerziale rotante, permettendo di applicare accelerazioni più elevate.

Come svantaggio si ottiene un incremento del numero di RPMC e quindi una maggior complicazione nella trasmissione del moto dal motore primo.

La configurazione modificata come descritto sopra si può ottenere direttamente da quella originale, sdoppiando gli RPMC per ciascun modulo ($n_c=4$) e dimezzando il raggio corrispondente e ($r_c=35$ mm). Infine, si può dividere in due parti uguali il modulo completo, in modo da avere $n_c=2$ RPMC distanziati di un opportuno ΔL_s , come nella Fig. 3b.

Considerando $n_m=10$ moduli di questo tipo, sono state esaminate le prestazioni in termini di forza (valore medio F_s , ripple r_F) e coppia totale (ripple r_T) al variare della distanza ΔL_s ovvero del corrispondente sfasamento angolare $\Delta\theta_s$ della magnetizzazione. Nella Fig. 5b si nota che, in corrispondenza al valore $\Delta\theta_s = 30^\circ$ ($\Delta L_s = 15$ mm), si ottiene una minimizzazione dei ripple r_F ed r_T , senza penalizzare apprezzabilmente la forza. Vista la distanza limitata tra i moduli, si può anche considerare di realizzare un unico giogo dietro ai PPM per incrementare anche la robustezza meccanica della struttura.

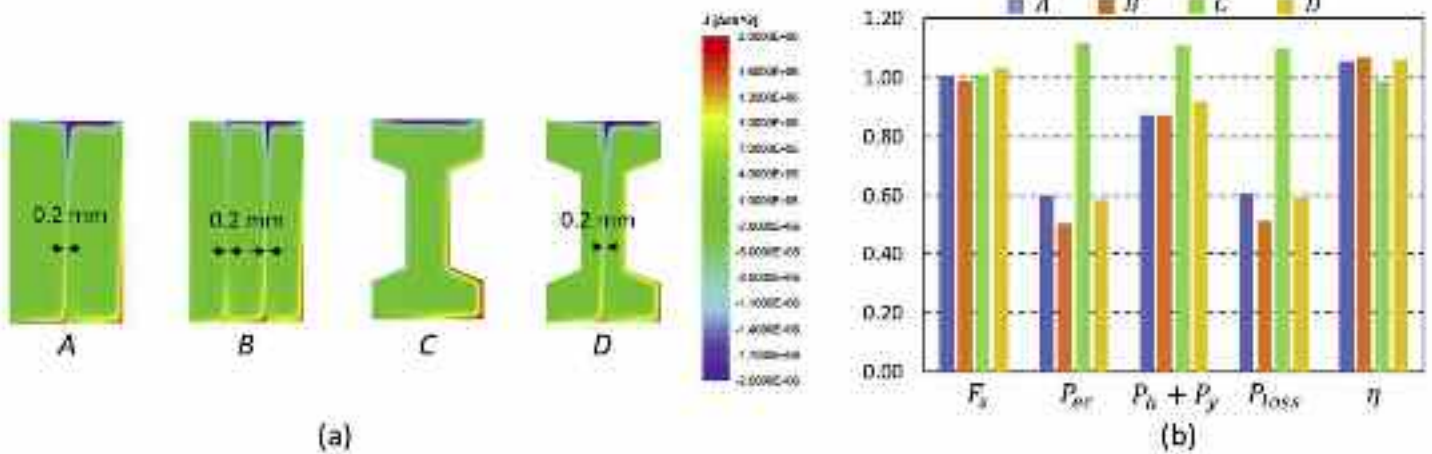
Un ulteriore aspetto da valutare attentamente per l'applicazione al trasporto riguarda le perdite di origine elettromagnetica (P_{loss}), suddivise in perdite per correnti parassite (P_{ec}) e d'isteresi magnetica e nei modulatori (P_h) ed in perdite della stessa natura nei gioghi piani (P_v). La componente P_{ec} è quella preponderante che diventa tanto più significativa quanto più aumenta la velocità. Infatti, a questa è legata la variazione temporale del campo magnetico vista dai modulatori che è principalmente soggetta alla frequenza imposta dal campo dei PPM. Il calcolo delle perdite è stato effettuato tramite codici FE di tipo 'transient', partendo dal modulatore a forma rettangolare massiccia (conf. 0) e successivamente esaminando delle modifiche (Fig. 6a), inserendo uno o più strati isolanti da 0.2 mm (conf. A e B) o utilizzando una forma di tipo IPE (conf. C e D).

A titolo di confronto, nella Fig. 6a viene mostrata la distribuzione delle correnti indotte per uno specifico istante temporale. Queste sono localizzate principalmente in vicinanza



sistema tram

Figura 6 - (a): distribuzione delle perdite nei vari tipi di modulatori; (b): variazione della forza, delle perdite e del rendimento rispetto alla MR con modulatori rettangolari massicci



del bordo esterno per la presenza di un effetto pelle. Tuttavia, i valori sono abbastanza contenuti (non superiori a 2 A/mm²), escludendo perciò problemi di eccessivo riscaldamento. Lo strato isolante che separa in parti uguali la sezione permette la concentrazione della corrente su un'area più ristretta per il comportamento più resistivo della sezione e quindi ad una riduzione delle perdite. La realizzazione non dovrebbe essere particolarmente problematica, potendo serrare le parti della barra tramite perni con testa isolata.

Nella Fig. 6b sono mostrate le variazioni relative della forza media, delle perdite e del rendimento elettromagnetico $\eta = F_s v_s / P_m$ (P_m : potenza meccanica fornita dai motori) rispetto alle stesse grandezze valutate per la conf. 0. Dall'istogramma si nota che:

- le perdite totali subiscono una riduzione notevole, dell'ordine del 50% per la conf. B;
- la forza non subisce variazioni significative; per le configurazioni a perdite più elevate (ad esempio la conf. C) questo si traduce in una maggiore potenza P_m assorbita che comporta quindi una riduzione di rendimento;
- le perdite per isteresi si riducono per la riduzione dell'induzione all'interno del modulatore; tuttavia, bisogna tener conto che P_h e

P_y rappresentano contributi molto limitati essendo $P_h/P_{ec} \approx 0.1$ e $P_y/P_h \approx 0.33$.

Nel complesso si ritiene che la conf. D sia la più conveniente per il risparmio di materiale. Si è verificato che ulteriori suddivisioni non porterebbe ad una riduzione significativa delle perdite, altresì comportando una maggior difficoltà di assemblaggio. La Tab. 4 mostra il confronto tra i valori espressi in per unità di profondità delle configurazioni iniziale e finale.

Risulta evidente la riduzione delle perdite ed anche il leggero incremento della forza, permettendo di ottenere un rendimento superiore al 92% che rende il dispositivo molto vantaggioso anche per il consumo di energia. Dalla specifica di forza, si può calcolare la profondità $l_D \approx 0.21$ m; le perdite complessive risultano quindi 1113 W.

Dipendenza delle perdite dalle condizioni operative

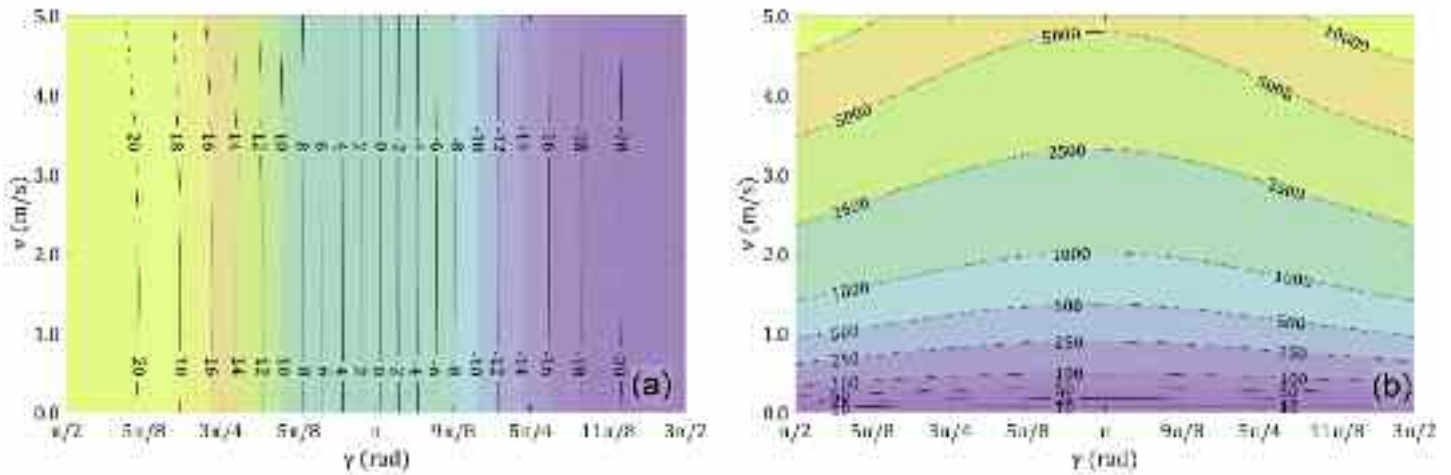
L'analisi sin qui svolta si riferisce ad un regime di funzionamento in condizioni nominali, quando viene esplicitato il massimo della spinta F_s , situazione in cui lo sfasamento γ (definito come "angolo di carico") tra θ_c e l'angolo elettrico associato alla posizione x_s dei modulatori assume un valore $\approx \pi/2$. Per valori di F_s via via inferiori, il valore di γ aumenta, diventando $\approx \pi$ per $F_s=0$ (funzionamento a vuoto) e assumendo valori compresi tra π e $3\pi/2$ per $F_s < 0$ (funzionamento in frenatura) raggiungendo, per i valori di γ più elevati, valori assoluti equivalenti a quello nominale. Si riscontra che, oltre che dall'angolo di carico, F_s dipende, sia pure in misura molto più modesta, dalla velocità di traslazione v (Fig.



Tabella 4 - Prestazioni della configurazione iniziale e quella ottimizzata

conf	F_s (kN/m)	P_{er} (kW/m)	P_{loss} (kW/m)	η (%)
0	20.1	8.3	9.0	87.0
D	20.9	4.9	5.3	92.2

Figura 7 - (a): F_s (kN/m) e (b) P_{loss} (W/m) in funzione dell'angolo di carico γ e della velocità v



7a). Alla variazione di γ , tuttavia, corrisponde anche una diversa distribuzione del campo magnetico negli MR, da cui dipende l'entità delle perdite ferromagnetiche P_{loss} . Tali perdite quindi, oltre a dipendere in modo molto rilevante dalla velocità, essendo ad essa associata la frequenza di variazione del campo magnetico, risulta anche funzione di γ (Fig. 7b). Tenuto conto quindi della variazione della spinta richiesta e della velocità lungo il percorso, in base alle relazioni che legano F_s e P_{loss} a γ e v (interpolate mediante opportune funzioni analitiche), è possibile, dati F_s e v , risalire al valore di γ , e da questo, insieme a v , ricavare il valore di P_{loss} corrispondente. Tale elaborazione viene effettuata nel corso della simulazione dinamica del comportamento del veicolo (Fig. 8a), realizzata tramite un modello

sviluppato nell'ambiente Simulink®.

Dimensionamento preliminare

Il convertitore RLDC le cui specifiche e le conseguenti prestazioni sono state fin qui identificate si presta ad essere impiegato per la trazione di una cabinovia innovativa su brevi distanze, come alternativa ai convenzionali sistemi basati su trazione a fune o tramite accoppiamento ruota dentata/cremagliera. L'assenza di contatto fisico sulla superficie su cui si esplica l'azione propulsiva garantisce che la sua efficacia non sia condizionata dall'aderenza e quindi da condizioni ambientali/strutturali, quali formazione di ghiaccio, usura, ecc. Inoltre, tale assenza di contatto consente un drastico ridimensionamento delle problematiche di manutenzione a cui sono in-



Figura 8 - (a): schema a blocchi per la determinazione di γ in funzione di F_s ; (b): rappresentazione dell'implementazione in Simulink® per la simulazione e la valutazione delle prestazioni

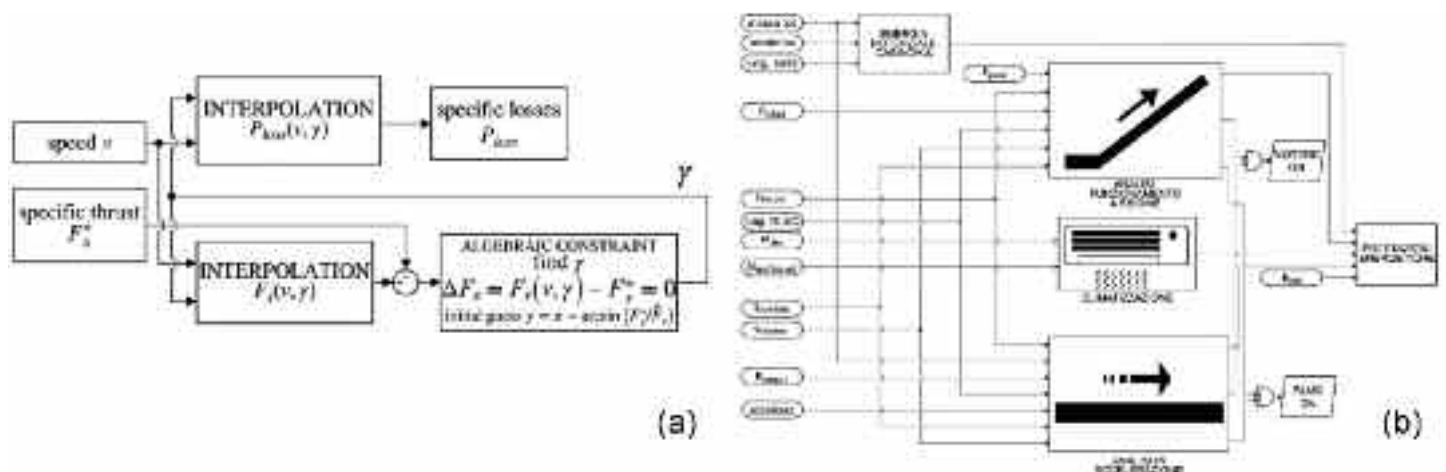




Tabella 5 – Caratteristiche di cella per batterie agli ioni di litio

Tensione nominale [V]	Energia nominale [Wh]	Corrente di scarica continuativa [A]	Massa cella complessiva [Kg]	Rendimento carica/scarica
3,67	42,6	23,2	0,1925	0,9

vitabilmente soggetti gli impianti convenzionali, nonché un sensibile miglioramento dell'efficienza.

Si propone un'architettura in cui ogni singola cabina dispone di un sistema di alimentazione autonomo supportato da batterie agli ioni di litio per l'alimentazione e la trazione realizzata tramite motore asincrono azionato tramite inverter e parte del convertitore RLMC.

Il percorso idealizzato è costituito da un breve tratto orizzontale per l'accelerazione iniziale, a cui segue la parte prevalente del percorso a pendenza e velocità costante ed infine un breve tratto finale ancora orizzontale per la fase di arresto. L'utilizzo di inverter predisposti per la frenatura rigenerativa consente un parziale (ma consistente) recupero di energia durante la fase di discesa.

Con riferimento ai dati riportati nelle Tab. 2-3, ci si propone di utilizzare un convertitore con una profondità attiva (lunghezza dei rulli) di 0,25 m. In base ai dati sopra citati, per la trazione si utilizza un motore asincrono con potenza nominale di 15 kW (o, come alternativa per migliorare la "fault tolerance" del sistema, 2 motori da 7,5kW con azionamenti indipendenti), mentre per le batterie agli ioni di litio, con riferimento alle caratteristiche di cella riportate in Tab. 5, si adottano un totale di 440 celle con una capacità energetica totale massima $E_{batt,max} = 18,74$ kWh. Operando co-

munque con uno stato di carica non inferiore al minimo $SoC_{min} = 20\%$, l'energia effettivamente disponibile a cui fare riferimento per la valutazione dell'autonomia del veicolo è pari a $80\%E_{batt,max} = 15$ kWh.

Va tenuto conto anche dell'assorbimento dovuto ad altre apparecchiature ausiliarie, in particolare l'impianto di climatizzazione della cabina ed il sistema di raffreddamento del pacco batterie e dei componenti elettromeccanici/elettronici (motore, inverter): per tali esigenze si stima una potenza complessiva massima di 5 kW. Per procedere alla valutazione delle prestazioni su di un intervallo relativamente lungo, si ipotizza un assorbimento medio di potenza di questi impianti pari al 50% della potenza massima; si ipotizza inoltre un intervallo di tempo pari a 1 min per la fase di imbarco/sbarco dei passeggeri. Tutte queste informazioni, inserite tramite un'opportuna maschera di interfaccia nel modello Simulink®, permettono di simulare l'assorbimento di potenza e le prestazioni energetiche nelle varie fasi del percorso di una singola corsa di andata e ritorno (Fig. 8b). I risultati più significativi sono riassunti nel seguito:

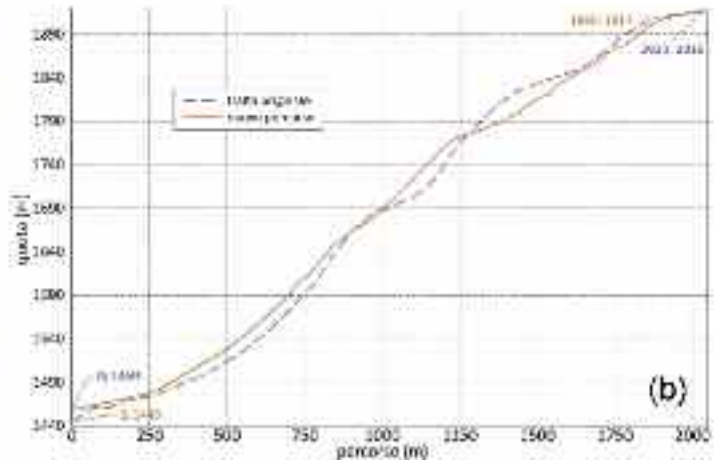
- numero di corse consecutive senza ricarica: 13
- corrispondente autonomia temporale: 3h 09min
- rendimento energetico totale della conversione (da batteria a lavoro svolto): 72%
- rendimento elettromagnetico η (conversione da moto rotatorio a lineare): 94,6%
- energia totale assorbita per corsa: 1,17 kWh
- energia recuperata nella fase di discesa: 0,69 kWh

Esempio di applicazione su di una tratta già servita da un impianto convenzionale

A fini comparativi, si è cercato un percorso già gestito da un impianto convenzionale e che potrebbe essere esercito da un sistema con caratteristiche prossime a quelle di progetto. È stato quindi individuato l'impianto di risalita del Col



Figura 9 - (a): visualizzazione su Google Maps e (b) profili altimetrici del percorso dell'attuale impianto di risalita e del percorso alternativo per il nuovo sistema di propulsione proposto



dei Baldi nel comprensorio del gruppo Civetta, che presenta le seguenti caratteristiche (Fig. 9) [12,13]:

- dislivello (da 1445slm a 1914slm): 469m
- lunghezza tratta: 1986m
- pendenza media: 24.3%
- pendenza massima: 60%
- capacità dell'impianto: 2800 pers./h
- numero di cabine: 75
- posti per cabina: 8
- velocità di regime: 6 m/s
- potenza del motore per la trazione della cabina: 670 kW

Essendo la pendenza massima del percorso attuale molto al di sopra di quella prevista in sede di progetto (20%), è stato elaborato un percorso alternativo con una pendenza più uniforme in modo da limitare il valore massimo mantenendolo il più possibile prossimo a quello di progetto. In effetti, il nuovo percorso, individuato dalla linea continua arancione nelle Figg. 9a) e b), ha una pendenza più uniforme, con valore massimo del 42.5% e medio del 22.5%, a fronte di un modesto aumento della lunghezza (2030 m). A fronte di queste variazioni, si impone l'utilizzo di due convertitori indipendenti azionati da un motore asincrono da 22 kW, alimentato da 660 celle per le batterie agli ioni di litio, con un'energia disponibile di 22.5 kWh. La lunghezza del veicolo potrebbe dover essere ridefinita di conseguenza. Per consentire una circolazione regolare anche con un maggior numero di veicoli, è conveniente realizzare la guida ferromagnetica in forma di circuito, con un sistema di scambi per consentire rapidamente l'immissione o il ricovero dei ve-

coli in base alle esigenze del traffico. In base ai dati di progetto, alle caratteristiche della tratta ed alle informazioni sul traffico attuale, è stato utilizzato il modello Simulink® per determinare le caratteristiche di un impianto di nuova concezione, ipotizzando un tempo di ricarica di tre ore e mezza ed un rendimento in fase di carica/scarica sempre pari al 90%. Sono stati quindi ricavati i seguenti risultati:

- durata della corsa (circuito completo di 2030x2=4060 m): 25min 21s
- numero di cabine in esercizio (2800 persone/ora): 74
- potenza nominale della torretta di ricarica per un veicolo: 7 kW
- numero di corse consecutive senza ricarica: 8
- autonomia temporale: 3h 23min
- assorbimento di energia per veicolo per circuito completo (inclusi ausiliari): 2.93 kWh
- assorbimento di energia per veicolo per circuito completo (esclusi ausiliari): 1.87 kWh
- rendimento energetico (inclusi ausiliari)¹: 58.4%
- rendimento energetico (esclusi ausiliari)²: 87.2%
- potenza richiesta per la ricarica (inclusi ausiliari): 513 kW
- potenza richiesta per la ricarica (esclusi ausiliari): 327.5 kW

Conclusioni

Dai risultati sopra riportati si può riscontrare che l'impianto di nuova concezione consente una riduzione della potenza installata richiesta di 157kW rispetto all'impianto attuale, senza tener conto del fatto che nel nuovo impianto





sono inclusi i consumi per la climatizzazione ed il raffreddamento, non considerata nell'impianto esistente. A livello di efficienza complessiva, considerato che i rendimenti energetici tipici degli impianti a fune sono dell'ordine del 40% [14] (senza tener conto di servizi ausiliari nelle cabine), si vede che il sistema proposto è decisamente competitivo rispetto all'attuale. Va inoltre considerato che tali prestazioni energetiche corrispondono ad un'ipotetica condizione di carico di riferimento, che magari statisticamente si verifica non così frequentemente, e che viceversa per gran parte del tempo l'impianto lavora in condizioni di regime ridotto. Sotto questo aspetto, è ancora più interessante la possibilità offerta dalla soluzione proposta di poter modulare la potenzialità del sistema variando il numero di veicoli in esercizio in base alle condizioni di traffico, consentendo di ottimizzare l'efficienza, limitando nel contempo le ore di esercizio di ogni veicolo (e dei corrispondenti componenti) con un'adeguata strategia di rotazione dei veicoli stessi e garantendo la continuità di servizio con esigenze limitate in termini di veicoli di scorta e/o parti di ricambio.

Finanziamento

Questo lavoro è stato finanziato dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova nell'ambito del progetto TORT_SID19_01 "Ingranaggi magnetici per applicazioni domestiche ad alta efficienza ed automazione".

Bibliografia

- [1] Tischler S., & Mailer M. (2019). Cable Propelled Transit Systems in Urban Areas. *Transportation Research Procedia*, 41; pp. 169-173.
- [2] Affatato M., Blengini S., Dalla Chiara B., & Vair E. (2015). Automated People Mover con trazione a fune: progettazione e modellizzazione di una soluzione ibrida innovativa finalizzata al risparmio energetico. *Ingegneria Ferroviaria*, 11, pp. 901-923.
- [3] Isobe E., Cho J.H., Morihisa I., Sekizawa T., & Tanaka R. (1999). Linear Metro Transport Systems for the 21st Century. *Hitachi Review*, 48, pp. 144-148.
- [4] Lee H.W., Kim K., & Lee J. (2006). Review of maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42, 1917-1925.
- [5] Han H., & Kim D. (2016). *Magnetic Levitation: Maglev Technology and Applications*. Springer, pp. 167-222.
- [6] Yasuda Y., Fujino M., Tanaka M., & Ishimoto S. (2004). The First HSST Maglev Commercial Train In Japan. *MAGLEV 2004 proceedings*, pp. 76-85.
- [7] Tlali P.M., Wang R-J., & Gerber S. (2014). Magnetic Gear Technologies: A Review. *Proceedings of the International Conf. on Electrical Machines (ICEM)*.
- [8] McGilton B., Crozier R., McDonald A., & Mueller M. (2018). Review of magnetic gear technologies and their applications in marine energy. *IET Renew. Power Gener.*, 12, pp. 174-181.
- [9] Andriollo M., Saracino F., & Tortella A. (2016). Rotating to Linear Motion Magnetic Converter for Low-Capacity Transport Applications. *Proceedings of the XXII International Conf. on Electrical Machines (ICEM)*.
- [10] Andriollo M., Bernasconi S., & Tortella A. (2021). Force and Torque Assessment in a Rotating to Linear Motion Magnetic Converter with Gearing Capability. *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*.
- [11] Andriollo M., Bernasconi S., & Tortella A. (2021). Design Issues of a Rotating to Linear Motion Magnetic Converter for Short-Distance Transport Applications. *Energies*, 14, 8464.
- [12] <https://www.leitner.com/it/azienda/referenze/dettagli/gd8-col-dei-baldi/>.
- [13] <https://www.superskibook.com/ita/cabinovia-col-dei-baldi.html>.
- [14] Szlosarek R.; Yan C.; Kröger M.; Nußbaumer C. Energy efficiency of ropeways: A modelbased analysis. *Public Transp.* 2019, 11, 617-635.

***Prof. Andrea Tortella, Prof. Mauro Andriollo, Ing. Marco Soldera - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova - Contatti: andrea.tortella@unipd.it (tel. 049 8277568), mauro.andriollo@unipd.it (tel. 049 8277706)**

¹ Rapporto tra energia fornita per il sollevamento dei passeggeri e energia erogata dalle colonnine di ricarica.

² Rapporto tra energia fornita per il sollevamento dei passeggeri e energia erogata dalle colonnine di ricarica, da cui è stata detratta quella richiesta per l'alimentazione dei servizi ausiliari.