

Progettazione e sperimentazione preliminare del sistema di sospensioni attive/semi-attive del pantografo T2006

Parte I – Progettazione

Proff. Ingg. Paolo TONI^(), Benedetto ALLOTTA^(*), Mirko RINCHI^(*)
Dott. Ingg. Luca PUGI^(*), Andrea RINDI^(*), Riccardo CHELI^(**)*

SOMMARIO – Oggetto di questo lavoro è la descrizione di un progetto di ricerca e sviluppo avente per obiettivo il miglioramento della captazione pantografo-catenaria tramite la realizzazione di un pantografo meccatronico, basato sul principio innovativo della riduzione della massa apparente, utilizzando un sistema asservito, pilotato da opportune logiche di controllo. Il pantografo, denominato T2006, è stato realizzato in un'ottica di dimostratore aperto su cui verificare teorie e soluzioni innovative, anche a più basso livello di automazione, volte al miglioramento della interazione pantografo catenaria nelle varie condizioni di esercizio. Il sistema di controllo consente di emulare anche il comportamento di componenti semi-attive a smorzamento variabile. È possibile pertanto, utilizzando un unico asset di prova sperimentare anche una versione semi-attiva del pantografo, ottimizzandola in funzione della velocità e delle caratteristiche della linea aerea.

Il lavoro si articola in due parti: nella prima vengono descritti i criteri e metodologie che hanno guidato la progettazione, nella seconda i risultati ottenuti con la sperimentazione svolta presso i laboratori del fornitore.

1. Introduzione: il problema della captazione

Stabilità e qualità della captazione di corrente tra pantografo e linea aerea rivestono grande importanza per lo sviluppo e l'esercizio soprattutto dell'alta velocità ferroviaria.

Numerosi studi sono stati effettuati e pubblicati sia sui criteri di valutazione dell'interazione pantografo-catenaria [1,2,3] sia sulla sua ottimizzazione [4, 5, 6].

In breve si ricordano i vantaggi derivanti da una migliore interazione tra pantografo e catenaria.

1) *Riduzione dei costi manutentivi*: gli archi elettrici dovuti ai distacchi causano surriscaldamento ed usura delle superfici di contatto dello strisciante e della linea aerea. L'effetto congiunto della riduzione dei distacchi dovuto al miglioramento della dinamica del pantografo, ottienibile con l'impiego di sistemi attivi o semi-attivi, e della diminuzione della forza d'attrito per effetto della minore spinta media impressa al pantografo, portano a minore usura degli strisciamenti e del filo di contatto, con riduzione degli interventi di sostituzione. Secondo una stima effettuata da TRENITALIA [7] l'onere economico associato è quantificabile in circa 1.600 k€/anno per la sola sostituzione degli strisciamenti. Una riduzione della forza media di contatto di circa il 30-40%, che i primi risultati della ricerca indicano come possibile, può creare aspettative di risparmio interessanti.

2) *Maggiore affidabilità del sistema*: la migliore dinamica consente di imprimere al pantografo spinte statiche inferiori. Inoltre le fluttuazioni della forza di contatto si riducono notevolmente. Tutto ciò si traduce in minori sollevalimenti della catenaria e quindi in una minore probabilità di impatto del pantografo con gli organi di sostegno della linea aerea. Quando tale evento si verifica, la conseguenza è il danneggiamento sicuro e spesso irreversibile del pantografo, e, nei casi più gravi, la caduta della linea aerea.

Quest'ultimo evento in particolare, per quanto raro, ha conseguenze assai negative in termini di perturbazione del traffico, costi di ripristino e ricaduta d'immagine per chi gestisce servizio ed infrastruttura.

Una stima di larga massima effettuata prima dell'inizio dell'attività di ricerca, basata su dati relativi all'anno 2003, ha evidenziato che l'ammontare complessivo dei danni in un solo anno supera il costo stesso della ricerca di almeno un ordine di grandezza.

3) *Elettronica di potenza*: dal punto di vista elettrico una buona qualità di captazione comporta migliori condizioni di funzionamento di tutti gli apparati di potenza, con minore degrado degli stessi. Per citare un esempio, si pensi alle sole aperture indebite degli interruttori extrarapidi dovute al distacco del pantografo dalla catenaria. Inoltre una migliore captazione si traduce in un minor rumore armonico immesso in linea.

^(*) Università di Firenze, Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco," Sez. di Meccanica Applicata alle Macchine.

^(**) TRENITALIA SpA, Direzione Ingegneria e qualità di sistema - Osservatorio di Mercato Nuove Tecnologie.

5) *Interoperabilità*: diversi standard d'elettrificazione corrispondono a linee aeree con caratteristiche geometriche, meccaniche ed elettriche differenti. Per questo motivo specie su materiale rotabile poli-tensione sono installati pantografi con caratteristiche diverse in ragione dei diversi standard di elettrificazione. Questo si traduce in una serie di problemi tecnici (ingombri, sagome limite, diverse inerzie e frequenze proprie, ridondanza dei sistemi etc.) che in definitiva provocano un incremento di costi non trascurabile. Pantografi capaci di adattarsi, con limitate modifiche, a linee aeree con caratteristiche diverse potrebbero contribuire a ridurre problemi e costi legati all'interoperabilità. Nel caso specifico del sistema AV italiano la poligonazione della linea 25 kV risulta compatibile con la larghezza dello strisciante 3 kV, inoltre si sta procedendo all'introduzione generalizzata dello strisciante in carbone anche sui pantografi 3 kV. Si può pertanto ipotizzare l'uso di un solo tipo di pantografo, con notevole semplificazione del layout dell'imperiale. Considerata poi la modularità della soluzione realizzata, il pantografo, pur con diverse modalità di funzionamento (attivo, semi-attivo, passivo), in relazione al servizio effettuato, potrebbe essere proposto come pantografo standard per tutti i mezzi del parco con riduzione quindi dei pezzi di ricambio e degli oneri manutentivi.

6) *Possibilità di utilizzare doppia captazione*: su linee con elettrificazione DC (3 kV o addirittura 1.5 kV), la captazione di potenze rilevanti implica l'assorbimento di correnti molto elevate.

Con correnti superiori a 2200 A, la captazione con un solo pantografo diventa critica. Si rende necessario l'uso di due pantografi in presa. In questo caso l'ottimizzazione della captazione è resa problematica dalla mutua interazione dei due pantografi. Tentativi effettuati in passato, con pantografi passivi, non hanno avuto esiti soddisfacenti tanto che attualmente per velocità maggiori di 200 km/h gli ETR 500 viaggiano con una sola locomotiva attiva sulla linea DD Firenze-Roma con un maggior tempo di percorrenza di 8', su un totale di 1h e 40'. Il problema può trovare una soluzione con l'introduzione di sistemi di controllo attivo.

7) *Il pantografo come strumento di certificazione*: la certificazione delle linee aeree richiede l'uso di un pantografo. Poiché il comportamento dinamico della linea dipende dal tipo di pantografo usato è evidente che la risposta risulta influenzata dalla mutua interazione fra i due componenti. L'uso di un pantografo con massa apparente controllabile potrebbe consentire di esplorare il comportamento della linea in un range dinamico più ampio, non vincolato a quello necessariamente imposto da un pantografo passivo. Ciò garantirebbe una certificazione maggiormente oggettiva della linea con riferimento a condizioni standard di prova, e una maggiore confidenza nella sua accoppiabilità con pantografi aventi caratteristiche fra loro diverse.

2. Il progetto di TRENITALIA

L'idea di dotare il pantografo ferroviario di dispositivi di controllo attivi o semi-attivi per migliorare la qualità della captazione è stata già affrontata in numerosi studi e pubblicazioni che ne hanno ampiamente valutato le potenzialità [8, 9, 10, 11, 12].

A livello industriale è tuttavia mancata la capacità di trasformare questi studi in prototipi, anche dimostrativi, che consentissero di valutare fattibilità ed affidabilità delle diverse strategie di intervento proposte. Inoltre, l'adozione di sistemi di sospensioni attive/semi-attive su di un pantografo destinato all'alta velocità non può prescindere dall'ottimizzazione di numerosi aspetti importanti, quali ad esempio quello aerodinamico ed aero-acustico.

Al riguardo tra le poche eccezioni di rilievo si cita il solido lavoro di ricerca e sperimentazione svolto da DB in Germania [13]. A livello nazionale, in passato, Università di Firenze [9] e Politecnico di Milano [10] hanno svolto autonomamente attività simili.

Nel 2003 TRENITALIA S.p.A. ha deciso di affidare ad Italcertifier, società partecipata dal gruppo FS e da quattro università italiane, l'incarico di realizzare un prototipo di pantografo ferroviario per alta velocità ed ha optato per un progetto globale in cui tutti i diversi aspetti della progettazione venivano curati in maniera sinergica.

Scopo dichiarato del progetto era lo sviluppo di un prototipo dimostrativo da utilizzare per la sperimentazione di soluzioni innovative, con una forte attenzione alla fattibilità industriale ed alla possibilità di realizzare con costi limitati una produzione di serie.

Ai vari gruppi di ricerca universitari coordinati da Italcertifier sono state attribuite precise responsabilità:

1) *Politecnico di Milano*: il gruppo afferente al Politecnico di Milano si è occupato di effettuare simulazioni dell'interazione pantografo catenaria suggerendo possibili soluzioni per ottimizzare l'architettura delle sospensioni ed in particolare il comportamento dinamico degli archetti. Presso i laboratori di Milano Bovisa esistono banchi prova ed attrezzature quali, ad esempio la galleria del vento. Tale disponibilità ha reso possibile lo studio e la ottimizzazione sperimentale del pantografo anche dal punto di vista aerodinamico.

2) *Università di Firenze*: i ricercatori dell'Università di Firenze si sono occupati della progettazione esecutiva di tutta la parte meccatronica del pantografo seguendo sia la progettazione meccanica sia quella di tutta la parte di attuazione, misura e controllo. Ad Università di Firenze è stato anche affidato il collaudo preliminare del sistema presso l'azienda incaricata della costruzione che è risultata essere Fabbrica Machinale SRL, società specializzata nella prototipazione di macchine e soluzioni avanzate di automazione.

3) *Università di Napoli*: Università di Napoli ha collaborato al progetto fornendo preziose competenze nel

SCIENZA E TECNICA

campo dell'aero-acustica e nella scelta dei materiali utilizzati per la costruzione.

4) *Università di Pisa*: ha svolto nell'ambito della ricerca un'attività parallela per la messa a punto di un sistema ottico di rilevamento degli archi, per la misura della qualità di captazione.

TRENITALIA S.p.A., ha svolto il ruolo tipico del Committente, redigendo le specifiche tecniche e procedendo alla design-review del progetto. Inoltre, ha fornito un contributo in termini di know-how per quanto riguarda l'ottimizzazione di particolari costruttivi (strisciante, rigidezza e corsa delle sospensioni primarie, trecciole ecc.). Inoltre, tramite la propria struttura sperimentale ha contribuito alla strumentazione del pantografo per mezzo di sensori di forza, accelerazione e spostamento e all'esecuzione delle prove al banco e delle prove di isolamento elettrico presso la Sala prova di Empoli; provvederà inoltre alla validazione del pantografo mediante prove in linea.

La progettazione del prototipo ha richiesto lo studio di vari aspetti, elettrici, strutturali, aero-acustici. In questo lavoro tuttavia gli autori si limitano a descrivere la parte del progetto relativa al sistema di controllo, con alcuni cenni alla parte meccanica.

Si auspica che altri rilevanti aspetti della ricerca siano oggetto di future pubblicazioni da parte dei soggetti coinvolti.

3. Requisiti del sistema di attuazione e controllo

La progettazione del sistema di attuazione del pantografo T2006 è stata portata avanti in modo da rispondere a precisi obbiettivi:

- prestazioni;
- compatibilità con ambiente e condizioni di esercizio;
- sicurezza;
- interoperabilità;
- costo e fattibilità del prodotto.

3.1. Prestazioni

Il sistema di controllo deve intervenire in modo da ridurre le oscillazioni della forza di contatto.

A tali fluttuazioni concorrono diversi fenomeni fisici il cui studio implica la modellazione del comportamento modale della catenaria, degli archetti e della loro interazione con le forze aerodinamiche.

Il sistema di controllo proposto interviene su sospensioni ed attuazione del pantografo e quindi ha limitate possibilità di intervento su fenomeni di tipo aerodinamico.

L'azione del controllo deve essere inoltre esercitata in maniera da non eccitare modi propri della stessa struttura del pantografo causando vibrazioni.

Poiché la struttura meccanica di un pantografo AV è relativamente "snella" i primi modi di vibrare della struttura si collocano a frequenze che sono poco superiori a quelle delle sospensioni.

La pulsazione propria delle sospensioni si colloca tipicamente nel range dei 4-5 Hz.

Per frequenze relativamente basse, minori di 3-4 Hz, è realistico pensare che la risposta del sistema sospensivo possa essere modificata in maniera significativa senza incorrere in vibrazioni o in altri fenomeni in cui il sistema di controllo eccita i modi di vibrare del sistema.

Disturbi associati alla non uniforme elasticità della catenaria o alla palificazione sono approssimativamente periodici rispetto alla lunghezza di una campata, che è circa 60 m.

Inoltre il primo modo di vibrare flessionale della catenaria si colloca ad una frequenza di circa 1 Hz. E' quindi plausibile che una sospensione semi-attiva come quella proposta possa migliorare la qualità di captazione intervenendo soprattutto sui disturbi a frequenze più basse associati alla eccitazione dei primi modi di vibrare della catenaria.

Tutto il sistema è comunque caratterizzato da forti incertezze parametriche, per cui la strategia di controllo proposta dovrà essere "robusta" nella tipica accezione utilizzata in automazione: prestazioni e stabilità del sistema di controllo devono essere relativamente insensibili a variazioni delle caratteristiche del sistema, ad approssimazioni introdotte nella modellazione dello stesso, alla presenza di disturbi sui segnali utilizzati.

3.2. Compatibilità con ambiente e condizioni di esercizio

Condizioni e ambiente di esercizio sono particolarmente ostili.

Il pantografo è sotto tensione (3 kV in continua, 25 kV in alternata) e su di esso transitano correnti rilevanti: orientativamente fino a 2500 A nei sistemi DC e fino a 400 A nei sistemi alimentati a 25 kV AC. Rilevanti sono i problemi di compatibilità elettromagnetica.

La struttura del pantografo è relativamente leggera e soggetta a carichi dinamici violenti che ne possono pregiudicare l'affidabilità. Limitazioni concernenti la sagoma limite del veicolo e lo spazio disponibile sull'imperiale condizionano posizionamento ed ingombri degli apparati.

Tutto il sistema è all'aperto sull'imperiale; il dispositivo è quindi soggetto a condizioni atmosferiche avverse (temperatura, umidità etc.), alla contaminazione da parte di agenti esterni (acqua, ossidi metallici, lubrificanti, etc.), a flussi di aria che possono superare i 300-400 km/h per l'azione combinata dei venti e del moto del veicolo.

L'accessibilità non ottimale richiede l'esecuzione dell'eventuale manutenzione in strutture dove la linea aerea sia assente o comunque non alimentata.

SCIENZA E TECNICA

L'elevata affidabilità richiesta e l'ambiente di esercizio particolarmente ostile condizionano pesantemente la progettazione del sistema e la scelta dei componenti.

3.3. Sicurezza, comportamento "fail safe"

Poiché l'ambiente di esercizio è particolarmente ostile, la possibilità di un'avarìa del sistema non può essere esclusa a priori.

In caso di avarìa un sistema di controllo non deve causare sollecitazioni eccessive e comportamenti dinamici del pantografo che potrebbero avere effetti disastrosi sulla linea aerea.

In particolare il danneggiamento o addirittura l'abbattimento della linea aerea da parte di un pantografo non correttamente funzionante hanno conseguenze gravissime sia dal punto di vista del danno economico sia da quello della gestione del traffico sulla linea interessata.

Per questo motivo, anche in condizioni di degradazione estrema del sistema, quest'ultimo deve garantire prestazioni tali da evitare eccessivi disagi all'esercizio o i gravi eventi sopra-citati.

Questo requisito viene brevemente indicato in questo lavoro come "comportamento fail safe".

3.4. Interoperabilità

Le specifiche tecniche di interoperabilità europee pongono il pantografo tra i sistemi rilevanti ai fini dell'interoperabilità. Esistono inoltre a livello nazionale ulteriori normative che fissano i requisiti dei pantografi destinati a circolare sulle linee italiane. Tutte queste specifiche e questi riferimenti normativi sono stati raccolti da TRENITALIA in un unico documento [14] che è stato utilizzato come riferimento e guida per lo sviluppo del progetto.

3.5. Economicità

La soluzione proposta deve essere economicamente conveniente. Questo significa un prodotto relativamente semplice ed affidabile, con costi di sviluppo ed industrializzazione recuperabili anche su lotti di produzione relativamente piccoli (nell'ordine comunque delle centinaia di pezzi).

4. Il pantografo T2006: layout del sistema

La progettazione meccanica del pantografo è stata fortemente con-

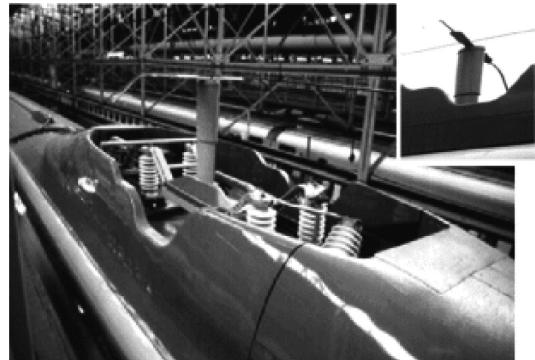


Fig. 1a - Esempio di pantografo telescopico sperimentato sui treni Shinkansen serie 500.

dizionata dalle specifiche di progetto [32] e dalla necessità di rispettare i numerosi vincoli imposti dalle normative vigenti.

Per questo motivo il prototipo T2006 rispecchia il classico schema di pantografo "asimmetrico" in uso presso le principali ferrovie europee. Lo studio della cinematica, il dimensionamento dei componenti, la scelta di corse e rigidezze delle sospensioni sono state effettuate utilizzando i più aggiornati strumenti di progettazione e hanno visto la collaborazione di tutti i principali partner del progetto.

Su linee ad alta velocità giapponesi, dove caratteristiche e specifiche della linea aerea sono molto diverse, sono risultate praticabili soluzioni cinematiche molto innovative.

Tali soluzioni, visibili in figg. 1a, 1b, sono state sperimentate sugli elettrotreni *Shinkansen*.

Queste soluzioni sono praticabili solo su linee AV "dedicate", in cui l'altezza di posa e l'elasticità della linea aerea può variare in range molto ristretti.



Fig. 1b - Esempi di pantografo ottimizzato dal punto di vista aero-acustico con dettaglio relativo alla sperimentazione di schermature aero-acustiche mobili.

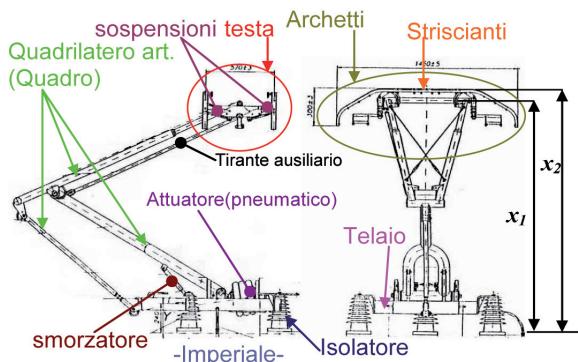


Fig. 2a - Nomenclatura adottata in questo articolo per descrivere i principali componenti di un pantografo ferroviario (WBL 95).

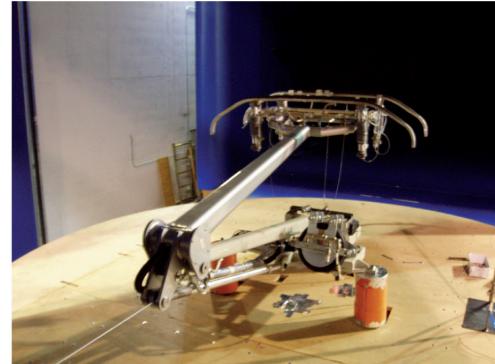


Fig. 2b - Il prototipo T2006 durante le prove in galleria del vento presso il Politecnico di Milano.

In fig. 2a si riporta il disegno di un pantografo asimmetrico commerciale e la relativa nomenclatura utilizzata per descriverne i principali componenti.

In fig. 2b si riporta una suggestiva foto del prototipo T2006 scattata presso la galleria del vento del Politecnico di Milano durante alcuni test aerodinamici svolti nell'autunno del 2006.

Il pantografo così realizzato presenta un doppio stadio di sospensione:

- il primo stadio tra gli archetti ed il quadrilatero articolato;
- il secondo tra quadrilatero articolato e telaio.

Su entrambi gli stadi di sospensione si può intervenire in modo da renderli attivi o semi-attivi.

Teoricamente sarebbe possibile prevedere almeno tre differenti configurazioni di controllo attivo/semi-attivo:

- a) attuatori solo sul primo stadio di sospensione (tra archetti e quadrilatero), secondo schema riportato in fig. 3a;
- b) attuatori solo sul secondo stadio di sospensione (tra telaio e quadrilatero), secondo schema riportato in fig. 3b;

c) attuatori su entrambi gli stadi di sospensione, secondo schema riportato in fig. 3c.

Gli studi coordinati e promossi da DB [13] si sono concentrati sulla soluzione "a".

In fig. 3d si riporta un'immagine CAD del prototipo tedesco [13].

L'attuazione agente direttamente sugli archetti è quella che richiede le minori potenze e garantisce la più alta banda passante [31]. Nel caso del prototipo T2006 si è preferito realizzare un sistema di controllo con un layout di tipo "b" cioè con attuatori posti tra quadro mobile e telaio.

Le motivazioni di questa scelta sono molteplici.

L'alloggiamento di un attuatore sul telaio si presta alla realizzazione di un sistema relativamente più semplice, con minori costi di prototipazione ed elevata affidabilità dovuta proprio alla posizione prescelta. In caso di avaria del sistema di controllo risulta più facile garantire un comportamento "fail safe" per la presenza della sospensione tra archetti e quadrilatero.

In questo modo risulta più semplice realizzare un attuatore che non risulti invasivo rispetto alla delicata aero-

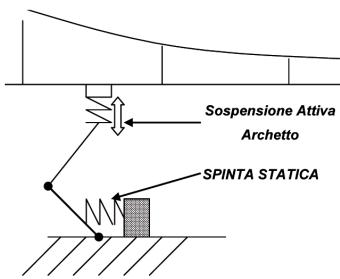


Fig. 3a - Attuazione sugli archetti.

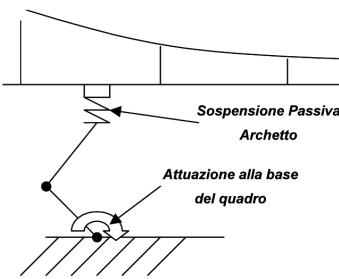


Fig. 3b - Attuazione alla base del quadro.

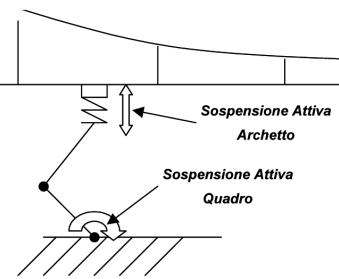


Fig. 3c - Attuazione su entrambi gli stadi di sospensione.



Fig. 3d - Prototipo di pantografo ferroviario con stadio di sospensioni attive/semitattive [12].

dinamica degli archetti e delle relative sospensioni, direttamente investite dal flusso dell'aria ad alta velocità.

5. Criteri di progettazione della parte meccanica (cenni)

5.1. Cinematica e dimensionamento del quadro mobile

La cinematica di un pantografo ferroviario asimmetrico è riconducibile con poche varianti al meccanismo, in fig. 4a; tale meccanismo può essere studiato come un doppio quadrilatero articolato. Il primo quadrilatero articolato è costituito dai membri indicati in figura come "0", "1", "2" e "3".

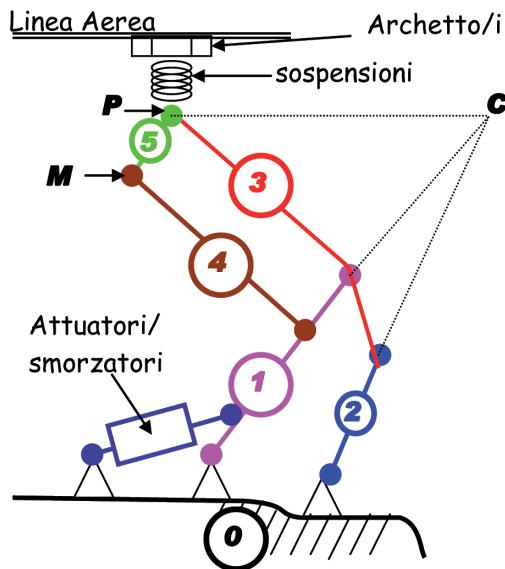
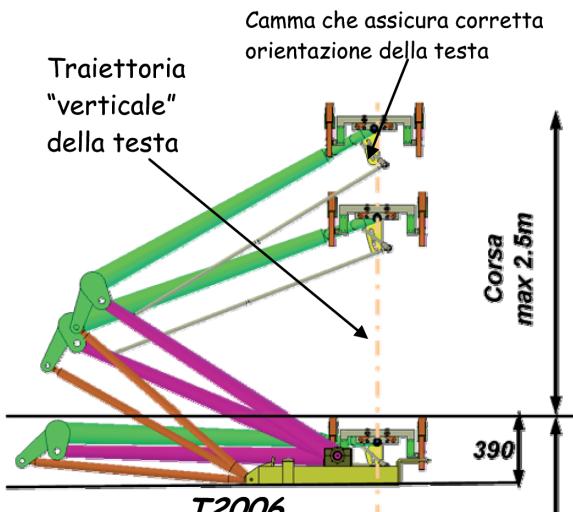


Fig. 4a - Cinematica del quadro mobile, schema di principio e realizzazione sul T2006.



L'uso di un quadrilatero articolato per garantire la corretta orientazione della testa può comportare errori cinematici eccessivi. Tale problema viene spesso risolto sostituendo la coppia rotoidale "M" con una camma (es. Ansaldo ATR95) oppure introducendo cedevolezze e giochi controllati sull'asta "4" che in molti pantografi viene resa "allungabile" inserendo elementi elasticci e/o smorzanti opportunamente dimensionati.

In particolare sul prototipo T2006 è stata preferita la prima soluzione, quella con camma, che teoricamente garantisce una cinematica più precisa.

Per quanto riguarda il sistema di attuazione, è conveniente progettare la cinematica in modo che ad un valore di pressione noto all'interno dell'attuatore corrisponda una spinta statica costante indipendente dall'altezza di posa della linea. Anche questa condizione nel prototipo T2006 viene approssimativamente rispettata progettando in maniera opportuna la trasmissione tra attuatore e quadro del pantografo. Il rispetto di questa specifica è servito anche per la progettazione dell'attuatore idraulico utilizzato per il controllo. In questo modo l'attuatore può essere ottimizzato per operare su un range di forze e velocità più ristretto.

L'ottimizzazione della cinematica si è rivelata quindi un'attività importante e relativamente complesso che ha richiesto lo sviluppo di appositi strumenti di sintesi ed ottimizzazione della cinematica sviluppati in ambiente Matlab-Simulink™ e in MSC-ADAMS™.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione strutturale si è invece ricorsi a strumenti di ottimizzazione standard quali codici agli elementi finiti per il calcolo strutturale ed a modelli di simulazione dinamica (multibody). Il codice multibody è servito soprattutto per valutare l'inerzia del quadro ridotta alla traslazione verticale del punto "P" e quindi della testa del pantografo. Il risultato di questa attività è stato un quadro mobile con una cinematica ottimizzata, ed una struttura relativamente rigida rispetto all'inerzia equivalente.

5.2. Sistema di articolazione del porta strisciante

Nell'uso comune si definisce "testa del pantografo" l'insieme degli archetti e delle relative sospensioni (fig. 2a). Gli archetti sono, sospesi elasticamente tramite le sospensioni.

Sugli archetti sono montati gli strisciamenti veri e propri (di rame o carbone). Per garantire la corretta orientazione degli archetti rispetto alla linea, le sospensioni sono collegate al quadro mobile del pantografo tramite un sistema articolato. Tale cinematicismo viene realizzato in maniera diversa in relazione a diverse scelte di progettazione. La soluzione prescelta è solitamente un compromesso tra semplicità costruttiva cinematica desiderata.

Con il termine "cabraggio" del pantografo si intende un fenomeno che comporta una non uniforme ripartizio-

ne della forza di contatto tra gli strisciamenti anteriori e posteriori.

Tale fenomeno è dannoso perché provoca una usura accelerata di uno dei due strisciamenti per l'effetto combinato dell'usura meccanica e del surriscaldamento elettrico.

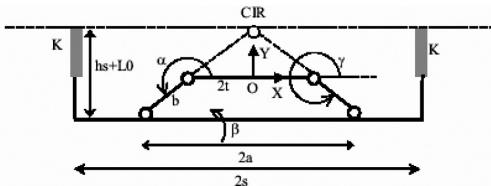


Fig. 4b - Articolazione della testa del pantografo (versione originale proposta da Politecnico di Milano).

Lo squilibrio che determina il cabraggio è causato dalle forze d'attrito e aerodinamiche che agiscono sulla testa, secondo rette d'azione che si trovano in prossimità del filo di contatto; se le reazioni vincolari che si oppongono alle forze longitudinali non sono ad esse allineate si determina una coppia e quindi un diverso valore della forza di contatto tra archetto posteriore ed anteriore.

Sul pantografo T2006 è stato proposto, dal Politecnico di Milano, un sistema di articolazione della testa che tende a contrastare il fenomeno del cabraggio. Lo schema proposto è rappresentato nella fig. 4b. Il telaio su cui sono montati gli strisciamenti è solidale con la base maggiore del quadrilatero articolato. La base minore del suddetto quadrilatero è invece incernierata elasticamente alla struttura del quadro di base del pantografo ed è mantenuta nella posizione orizzontale da un'apposita camma. Il centro di istantanea rotazione del cinematicismo coincide, per un dato valore di schiacciamento delle molle di sospensione degli archetti, col filo di contatto. In ogni altra condizione tende comunque a non allontanarsene troppo, annullando quasi del tutto il braccio delle forze responsabili del cabraggio del telaio.

Nella fig. 4c è rappresentato l'andamento delle forze di contatto agenti fra gli strisciamenti e filo di contatto, per una determinata configurazione geometrica del cinematicismo,

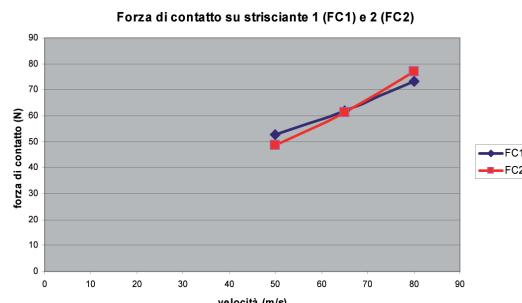


Fig 4c – Forza di contatto su strisciamenti (risultati prodotti da attività sperimentali del Politecnico di Milano).

in cui l'angolo di inclinazione delle bielette di 45° e la base del quadrilatero uguale a 0,25 m. Posizionamento e lunghezza delle bielette possono essere modificati per aggiustare il comportamento aerodinamico del pantografo in ragione delle reali condizioni di esercizio o del diverso tipo di archetti installati.

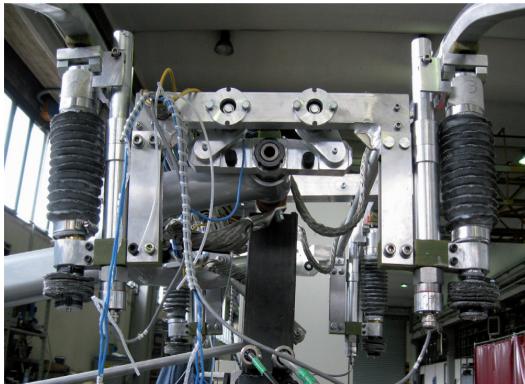


Fig. 4d – Dispositivo di articolazione della testa del pantografo.

Dal punto di vista costruttivo, la configurazione rappresentata è stata modificata senza tuttavia alterarne il principio di funzionamento. Rispetto allo schema cinematico di fig. 4c, il pantografo è stato realizzato invertendo la posizione del telaio su cui sono montati gli archetti che è stato reso solidale alla base maggiore anziché a quella minore. Viceversa l'articolazione col quadro di base è stata portata sulla base maggiore (fig. 4d). Ciò ha consentito di aumentare la distanza fra il filo di contatto e parti fisse del pantografo e quindi di avere la possibilità di maggiori escursioni verticali per gli strisciati (fig. 4d).

Lo studio meccanico del pantografo è stato completato con l'analisi delle frequenze e dei modi propri di vibrare degli archetti. Tale argomento esula però dalle finalità del presente articolo.

6. Progettazione e dimensionamento del sistema di attuazione

Per la prototipazione del sistema sono stati utilizzati attuatori a fluido (pneumatici, oleodinamici). Queste tecnologie, molto utilizzate nel campo dell'automazione industriale, presentano caratteristiche ideali per la prototipazione a basso costo.

Inoltre le specifiche TRENITALIA S.p.A. [14] imponevano che il sollevamento del pantografo fosse garantito da un attuatore pneumatico con una pressione di 3,5 bar.

Dopo una serie di valutazioni comparative tra vari tipi di sistemi di attuazione a fluido, si è pertanto deciso di utilizzare un sistema di attuazione costituito da due at-

tuatori in parallelo:

1) attuatore "statico": un attuatore pneumatico di capacità considerevole assicura le elevate forze statiche necessarie per il sollevamento del pantografo e per fornire la maggior parte della spinta statica;

2) attuatore "dinamico": un secondo attuatore (sempre a fluido) con elevata banda passante viene pilotato in modo da correggere la dinamica del sistema. Questo secondo attuatore opera in parallelo all'attuatore "statico" e deve avere una buona risposta in frequenza.

Per quanto riguarda l'attuatore "dinamico" sono state studiate due possibilità:

- attuatore pneumatico;
- attuatore oleodinamico.

Utilizzando il software AMESIM™ in co-simulazione con Matlab-Simulink™ è stato possibile realizzare un modello composto da un sotto-modello multibody del pantografo [15] e da uno del sistema di attuazione.

All'interno di questo strumento di simulazione la dinamica della catenaria viene riprodotta utilizzando un modello modale fornito dal Politecnico di Milano, partner del progetto.

Il modello della catenaria, implementato in Matlab-Simulink™ è uno di quelli utilizzati per la simulazione in tempo reale (real time) sul banco prova pantografi di Milano Bovisa [16].

In fig. 5 si riporta uno schema dei vari sotto-moduli e le principali grandezze calcolate/scambiate durante la co-simulazione.

Viste le semplificazioni introdotte, soprattutto per quanto riguarda la modellazione della catenaria, questo modello è stato utilizzato soprattutto per il dimensionamento e la messa a punto del sistema di attuazione e del relativo impianto.

In particolare, per quanto riguarda il dimensionamento dell'attuatore "dinamico," è emersa l'impossibilità di utilizzare un dispositivo di tipo pneumatico essenzialmente per due motivi:

- 1) *banda passante*: la prontezza di un attuatore pneumatico è limitata dalla comprimibilità del fluido e dalle basse pressioni di esercizio;
- 2) *elevati consumi di aria*: sono state effettuate alcune simulazioni per valutare i consumi di aria. Si ipotizza di utilizzare strategie di controllo semplici: si simula un controllo con retroazione della forza di contatto tramite un regolatore di tipo PID (proporzionale – integrale - derivativo). Le simulazioni sono ripetute ipotizzando diversi guadagni del regolatore e differenti livelli di rumore sulla misura di forza acquisita. Dalle simulazioni è emerso che, a fronte di prestazioni scadenti, un attuatore di tipo pneumatico richiede consumi di aria elevati, nell'ordine delle centinaia di normali litri al minuto.

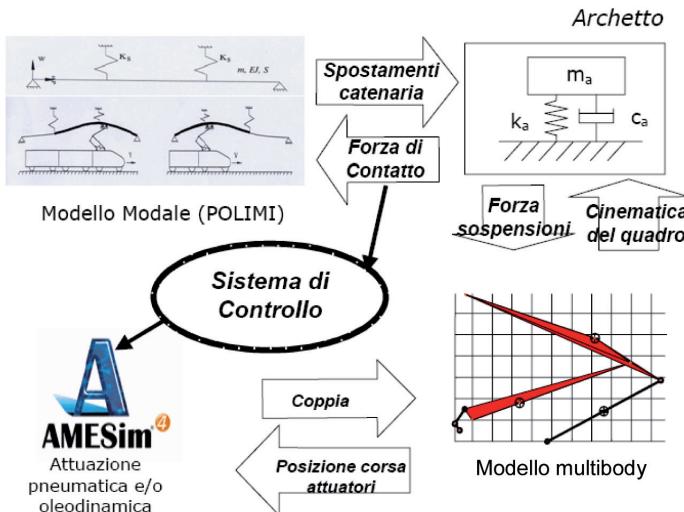


Fig. 5 - Diversi moduli (funzionanti in co-simulazione) del modello di simulazione [15].

In fig. 6 si riportano alcuni dei risultati ottenuti in funzione della velocità di avanzamento del treno. In relazione ai risultati della simulazione si è optato per un attuatore di tipo oleodinamico che può offrire prestazioni nettamente superiori rispetto ad una soluzione pneumatica.

L'attuatore "statico" utilizzato è di tipo pneumatico. I consumi di aria calcolati sono ridotti e visibili in fig. 6.

In questo modo in caso di avaria del sistema oleodinamico risulta possibile sollevare il pantografo alimentando l'attuatore statico con aria compressa alla pressione di 3.5 bar.

La soluzione finale prescelta è dunque di tipo oleo-pneumatico con i due attuatori che agiscono in parallelo sul quadro del pantografo come visibile in fig. 7.

6.1. Attuazione oleodinamica

Nelle figg. 8a, 8b, 8c, 8d, 8e si riportano uno schema semplificato dell'impianto oleodinamico ed alcuni dettagli dei componenti che lo costituiscono.

Un gruppo per la generazione dell'olio in pressione (fig. 8b) è installato all'interno del locomotore. La centralina oleodinamica è costituita da una pompa a cilindrata variabile con il relativo regolatore della pressione e da un accumulatore per smorzare i transitori. Si omettono nel mo-

utilizzato per caricare una batteria tampone che assicura comunque l'alimentazione dell'elettronica di bordo con una autonomia di alcune ore.

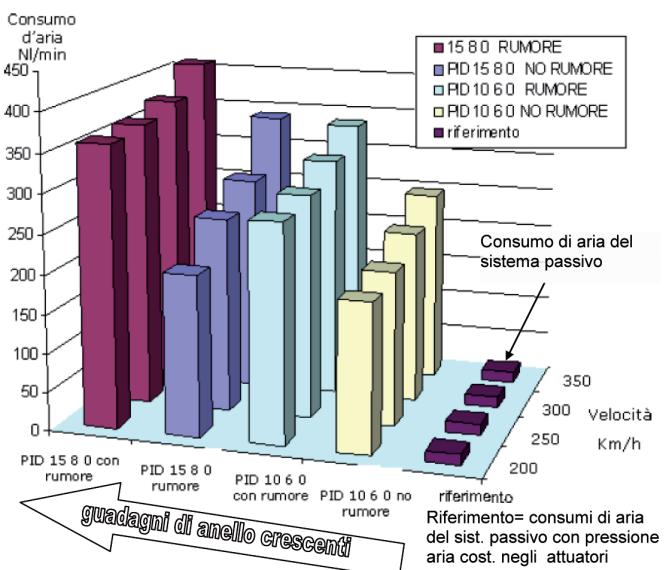


Fig. 6 - Andamento dei consumi aria previsti in relazione a diverse condizioni di prova (diversi guadagni di anello, pulizia del segnale sui sensori, velocità del treno), si ipotizza un semplice controllo in retroazione sulla misura diretta della forza di contatto con un regolatore di tipo PID. I dati relativi alla prestazione indicata come "riferimento" sono quelli relativi al consumo di aria del solo attuatore "statico" alimentato a pressione costante.

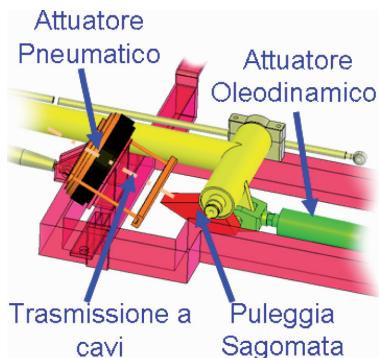


Fig. 7 - La soluzione finale adottata, con attuatore pneumatico e oleodinamico in parallelo.

In questo modo è possibile garantire l'alimentazione e l'isolamento elettrico dell'elettronica di bordo senza ricorrere ad un trasformatore di isolamento. Tale soluzione è peraltro percorribile sul prodotto industriale finale.

L'attuatore vero e proprio è costituito da un cilindro oleodinamico a doppio effetto controllato da una servovalvola ad elevata risposta dinamica (banda passante valvola > 100 Hz).

Le due camere del cilindro sono collegate da un bypass, normalmente chiuso, che può essere aperto in con-

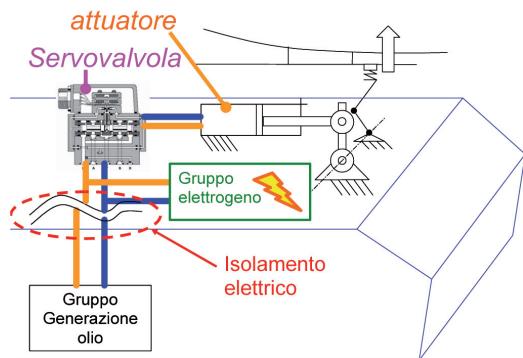


Fig. 8a - Layout dell'impianto oleodinamico progettato.

dizioni di avaria: il by-pass è mantenuto chiuso finché le bobine delle relative elettro-valvole sono eccitate; se si verifica una avaria del sistema, le valvole si aprono e l'olio è libero di laminare da una camera all'altra attraverso il bypass.

Questo accorgimento impedisce il bloccaggio meccanico dell'attuatore in caso di avaria, permettendo il ricircolo dell'olio. Tale soluzione è stata una richiesta esplicita del laboratorio di TRENITALIA.

Dimensionando opportunamente il bypass, lo stesso attuatore può funzionare da smorzatore in modo da attutire la caduta del pantografo in caso, ad esempio, dell'attivazione di una procedura di abbassamento di emergenza.

In fig. 8e si riporta uno schema semplificato dell'attuatore progettato, tratto dal modello AMESim™ utilizzato per il dimensionamento.

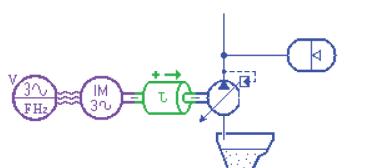


Fig. 8b - Gruppo generazione olio (principali elementi da modello AMESim™).

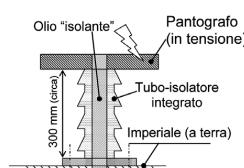


Fig. 8c - Schema semplificato della soluzione utilizzata per garantire isolamento elettrico.

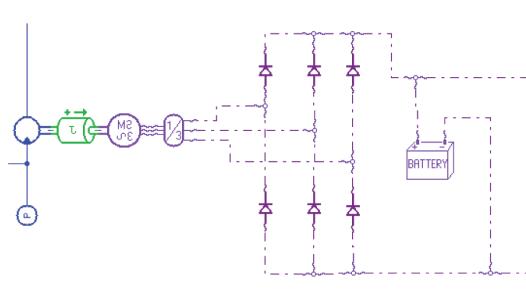


Fig. 8d - Schema semplificato del gruppo elettrogeno previsto sul tetto del rotabile.

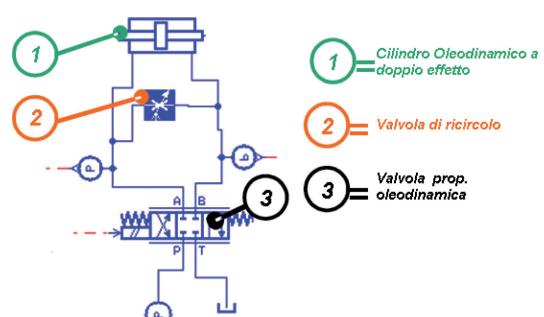


Fig. 8e - Schema semplificato dell'unità di attuazione oleodinamica installata sul pantografo (cilindro, valvola di ricircolo, ser-valvola proporzionale).

7. Il sistema di controllo

7.1. Valutazioni preliminari

In bibliografia sono disponibili numerosi studi riguardanti lo sviluppo di algoritmi di controllo per rendere attivi/semi-attivi uno o più stadi di sospensione di pantografi ferroviari.

La maggior parte di questi studi concentrano la loro attenzione sul controllo in retroazione della forza di contatto che deve essere necessariamente misurata e/o stimata.

La misura diretta della forza di contatto richiede l'uso di numerose celle di carico ed accelerometri [1]. Tale misura risulta onerosa in termini di costi e di complicazione del sistema. Inoltre l'affidabilità di un simile sistema di misura in condizioni di esercizio è comunque problematica. L'uso di stimatori basati su misure cinematiche e procedure di data-fusion, come il filtro di Kalman [17] possono contribuire a rendere più affidabile la misura, ma la complicazione in termini di numero di sensori e canali utilizzati resta elevata.

Per semplificare questo tipo di stima occorrerebbe limitare il numero di gradi di libertà ed i movimenti concessi alle sospensioni, specialmente degli archetti. Sfortunatamente ridurre il numero equivalente di gradi di libertà del sistema implica una riduzione della mobilità degli archetti e quindi una minor adattabilità del pantografo rispetto ai movimenti della linea aerea.

Per questo motivo nella progettazione del sistema di controllo si è deciso di abbandonare la classica strategia del controllo in retroazione della forza di contatto a favore di algoritmi basati sul concetto di "Simulazione di Impedenza Meccanica" [18].

Per "Simulazione di Impedenza Meccanica" si intende una tecnica di controllo in cui si interviene sul sistema reale affinché questo emuli la dinamica di un altro sistema "virtuale".

Rientrano in questa tipologia di controllo molte tecniche utilizzate in campo veicolistico come ad esempio il diffuso "Skyhook Damper" [19, 20] o le simulazioni di inerzia utilizzate nei Banchi Prova Freno Dinamometrici per verificare guarnizioni e dischi freno secondo UIC 541-3.

Per semplificare la trattazione e renderla più "leggera" si ipotizza che la dinamica del sistema reale oggetto del controllo sia descrivibile da un sistema di equazioni differenziali del primo ordine secondo la classica trattazione nello spazio di stato ("state-space") riportata nella (1).

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

dove

$x \Rightarrow$ vettore stati del sistema

$u \Rightarrow$ vettore ingressi / forzanti

$A / B \Rightarrow$ Matrici di Stati / Ingressi

Il controllo deve intervenire sul sistema reale in modo da emulare un "sistema virtuale" la cui dinamica desiderata è rappresentata dal sistema di equazioni (2)

$$\dot{x} = \tilde{A}x + \tilde{B}u \quad (2)$$

Il controllo può intervenire sul sistema "reale" intervenendo tramite appositi attuatori su un numero limitato di ingressi "aggiuntivi" \hat{u} scelti dal progettista. La dinamica, tenendo conto degli attuatori, risulta descritta dalla (3).

$$\dot{x} = Ax + Bu + \hat{B}\hat{u} \quad (3)$$

L'azione di controllo (4) può essere calcolata imponendo l'uguaglianza della dinamica reale (3) con quella desiderata (2).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \hat{B}\hat{u} \\ \dot{x} &= \tilde{A}x + \tilde{B}u \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} Ax + Bu + \hat{B}\hat{u} &= \tilde{A}x + \tilde{B}u \\ \hat{u} &= \tilde{B}^{-1}(\tilde{A} - A)x + \hat{B}^{-1}(\tilde{B} - B)u \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Questo tipo di controllo nella sua versione più semplice è equivalente ad una cancellazione (parziale o totale) di poli-zeri del sistema e alla loro sostituzione con quelli della dinamica desiderata.

Nel caso più specifico del pantografo gli autori si sono rifatti ad un concetto storicamente molto utilizzato in campo ferroviario come indice della risposta dinamica di un pantografo, la "massa apparente" [21]. Con questo termine si indica la funzione di trasferimento $M_a(\omega)$ tra una forza verticale $F_z(\omega)$ applicata agli archetti e la corrispondente accelerazione $\ddot{z}(\omega)$ degli stessi, come mostrato nella (5). Tale funzione di trasferimento è il reciproco della funzione "Inertanza" sovente utilizzata in analisi modale.

$$\text{"massa apparente": } M_a(\omega) = \frac{F_z(\omega)}{\ddot{z}(\omega)} = \frac{1}{\text{inertanza}(\omega)} \quad (5)$$

$$\text{"impedenza meccanica": } \frac{F_z(\omega)}{\ddot{z}(\omega)} = \frac{1}{\text{mobilità}(\omega)} \quad (6)$$

$$\text{inertanza}(\omega) = j\omega \cdot \text{mobilità}(\omega) = -\omega^2 \cdot \text{ricettanza}(\omega) \quad (7)$$

$M_a(\omega)$ viene normalmente identificata in prove di risposta ad eccitazione sinusoidale. Per garantire ripetibilità ed aderenza a condizioni reali di esercizio le prove sono normalmente eseguite con precisi valori di ampiezza alle varie frequenze e con la sovrapposizione di una forza media costante fissata, equivalente alla spinta statica del pantografo.

E' intuitivo che quanto maggiore è l'inertanza e le corrispondenti funzioni di mobilità e ricettanza (7), tanto minori saranno le fluttuazioni della forza di contatto che dovranno avvenire per permettere al pantografo di seguire variazioni di quota della linea aerea alle diverse frequenze.

Partendo dalle considerazioni sopra esposte gli autori hanno progettato un sistema di controllo che misura la cinematica del pantografo e ne corregge la dinamica in modo da simulare la risposta di un "pantografo virtuale" caratterizzato da maggiori valori di inertanza, mobilità e ricettanza, nel range di frequenze di interesse.

7.2. Modello a costanti concentrate del pantografo

Per la sintesi del controllo è stato utilizzato un modello lineare del pantografo.

Come ulteriore semplificazione si trascura la deformabilità dei singoli membri; questo equivale a studiare un meccanismo composto da soli corpi rigidi in cui gli unici gradi di libertà considerati sono quelli derivanti dalla cinematica del sistema.

Si schematizza dunque la dinamica del pantografo come quella di un sistema a due gradi di libertà visibile in fig. 9 cui corrisponde il sistema di equazioni differenziali (8).

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1)_c = -P_2 - F_c \\ m_1 \ddot{x}_1 + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1 \dot{x}_1 + k_1 (x_1 - x_2) + k_1 x_1 = -P_1 + F_s + u_c \end{cases} \quad (8)$$

Dal sistema (8) si può ricavare con facili passaggi la funzione di trasferimento "inertanza" e quindi la "massa apparente" (9).

$$\text{inertanza}(s) = \frac{(m_1 s^2 + (c_1 + c_2) s + k_1 + k_2) s^2}{m_1 m_2 s^4 + (m_2 (c_1 + c_2) + c_2 m_1) s^3 + ((k_1 + k_2) m_2 + c_1 c_2 + k_1 m_1) s^2 + (k_1 c_2 + k_2 c_1) s + k_1 k_2} \quad (9)$$

"massa apparente": $M_a(s) = \frac{1}{\text{inertanza}(s)}$

L'andamento qualitativo di $M_a(s)$ valutato in accordo alla (9) è riportato in fig. 10.

I dati (masse, smorzamenti, etc.) utilizzati per costruire il grafico di fig. 10 sono qualitativi e verosimilmente de-sunti da quelli di diversi pantografi AV commerciali.

Alcuni dati possono variare sensibilmente: la massa degli archetti, ad esempio, varia sensibilmente se gli strisciamenti sono metallici o di grafite.

Dal grafico di fig. 10 si nota che la dinamica del qua-

| Legenda | |
|----------------------|---|
| m₂ | Massa ridotta archetti |
| m₁ | Massa ridotta quadro |
| k₂ | Rig. Ridotta sospensione archetti |
| k₁ | Rig. Ridotta quadro e attuazione |
| c₂ | Smorz. Ridotto sosp. archetti |
| c₁ | Smorz. Ridotto quadro e attuazione |
| P_i | Forza peso ridotta rispetto alla coordinata i-esima |
| F_c | Forza di contatto |
| F_s | Spinta statica (attuatore pneumatico) |
| u_c | Azione controllo |
| x_i | i-esima coordinata lagrangiana |

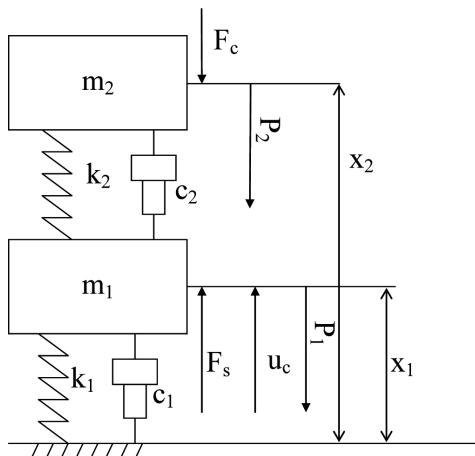


Fig. 9 - Modello a costanti concentrate utilizzato per la sintesi del controllo.

dro influenza negativamente la risposta del sistema per frequenze inferiori a quella di risonanza delle sospensioni degli archetti.

Tale risonanza è normalmente posta a frequenza intorno ai 4-5 Hz per cui la risposta del sistema in termini di "massa apparente" risulta peggiore per frequenze inferiori.

In particolare per frequenze inferiori si nota la presenza di un "massimo locale" piuttosto evidente.

Tale massimo corrisponde al moto in opposizione di fase del quadro del pantografo rispetto agli archetti.

Nei pantografi passivi questo moto del quadro viene parzialmente soppresso dallo smorzatore posto tra quadro mobile e telaio.

Il valore di smorzamento dell'ammortizzatore è un compromesso tra esigenze diverse: valori troppo elevati dello smorzamento possono portare ad un eccessivo deterioramento della risposta del quadro a bassa frequenza e compromettere i requisiti minimi di sistema in termini di tempi di salita/discesa del pantografo.

Poiché il grafico riportato in fig. 10 si riferisce ad un semplice modello a due gradi di libertà mancano completamente tutti i minimi e massimi locali in corrispondenza di modi strutturali di quadro, sospensioni ed archetti.

7.3. Simulazione di impedenza meccanica: sintesi del regolatore

Il sistema di controllo proposto mira a migliorare la risposta del pantografo in termini di "massa apparente" sopprimendo la dinamica del quadro mobile.

Per ricavare le equazioni che descrivono il regolatore è necessario riscrivere le equazioni (8) che descrivono la risposta dinamica del pantografo in forma di "state-space" (10).

Per applicare la "simulazione di impedenza meccanica" descritta dalle relazioni (2), (3), (4) occorre ipotizzare sempre in forma di "state-space" la dinamica "virtuale" che il pantografo controllato dovrà riprodurre. Tale dinamica virtuale è descritta dal sistema di equazioni (11).

La dinamica del sistema virtuale (11) è diversa da quella del sistema reale (10) perché si interviene sulle seguenti grandezze:

L'inerzia del quadro m_1 viene diminuita di un fattore $(1-\alpha)$

SCIENZA E TECNICA

con α , compreso tra zero ed uno.

Smorzamento e rigidezza c_1 e k_1 della sospensione tra quadro ed imperiale sono ridotte rispettivamente di un fattore “ $(1-\beta)$ ” e “ $(1-\gamma)$ ” dove “ β ” e “ γ ” sono compresi tra zero ed uno.

In particolare le prestazioni saranno tanto migliori quanto più i tre coefficienti di elisione “ α ”, “ β ”, “ γ ”, si avvicinano ad uno.

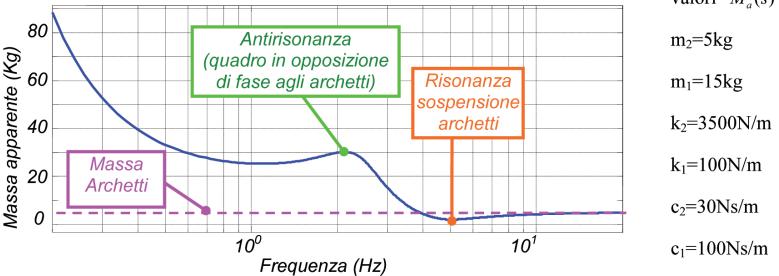


Fig. 10 - $M_a(s)$ secondo il modello semplificato (8), andamento con valori qualitativi.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -(c_2 + c_1) & c_2 & -(k_2 + k_1) & k_2 \\ \frac{c_2}{m_1} & \frac{-c_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{-k_2}{m_1} \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{-c_2}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{-k_2}{m_2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ x_1 \\ x_2 \\ x \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{m_1} & 0 & 0 & \frac{1}{m_1} \\ 0 & -\frac{1}{m_2} & -\frac{1}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ F_c \\ F_s \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} u_c \\ u \\ u \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -(c_2 + (1-\beta)c_1) & c_2 & -(k_2 + (1-\gamma)k_1) & k_2 \\ \frac{c_2}{(1-\alpha)m_1} & \frac{-c_2}{(1-\alpha)m_1} & \frac{k_2}{(1-\alpha)m_1} & \frac{-k_2}{(1-\alpha)m_1} \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{-c_2}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{-k_2}{m_2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ x_1 \\ x_2 \\ x \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{m_1} & 0 & 0 & \frac{1}{m_1} \\ 0 & -\frac{1}{m_2} & -\frac{1}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B=B} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ F_c \\ F_s \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} u_c \\ u \\ u \end{bmatrix} \quad (11)$$

$0 \leq \alpha \leq 1$ dove α fattore di riduzione della massa m_1 del quadro

$0 \leq \beta \leq 1$ dove β fattore di riduzione dello smorzamento c_1 del quadro

$0 \leq \gamma \leq 1$ dove γ fattore di riduzione della rigidezza k_1 del quadro

La forza “ u_c ” (12) che il controllo deve applicare al quadro viene calcolata imponendo l'uguaglianza tra la dinamica reale (10) e quella desiderata (11).

La legge di controllo descritta dalla (12) è un semplice regolatore PD (proporzionale derivativo) che applica al quadro una forza proporzionale alla corsa ed alla velocità di deformazione delle sospensioni tra quadro e archetti.

La massa apparente (13) del pantografo controllato varia in funzione del valore dei tre coefficienti di elisione “ α ”, “ β ”, “ γ ”. In caso di completa cancellazione ($\alpha=\beta=\gamma=1$) la massa apparente (13) assume un valore costante pari all'inerzia dei soli archetti “ m_2 ”.

La cancellazione completa è una condizione non raggiungibile nella realtà perché implicherebbe un valore infinito dei guadagni “ K_p ” e “ K_d ” del regolatore PD descritto dalla (12).

Dal punto di vista applicativo il valore dei guadagni del regolatore è limitato da problemi di stabilità dell'anello di regolazione e quindi la cancellazione della dinamica del quadro è necessariamente parziale ($0 < \alpha, \beta, \gamma < 1$ e $\alpha=\beta=\gamma$).

7.4. Controllo dell'attuatore e della servo-valvola

L'algoritmo di controllo descritto dalla (12) richiede l'uso di un attuatore “controllato in forza”, capace di erogare una forza nota con una buona risposta dinamica.

$$\begin{bmatrix} -(c_2 + (1-\beta)c_1) & c_2 & -(k_2 + (1-\gamma)k_1) & k_2 \\ \frac{c_2}{(1-\alpha)m_1} & \frac{-c_2}{(1-\alpha)m_1} & \frac{k_2}{(1-\alpha)m_1} & \frac{-k_2}{(1-\alpha)m_1} \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{-c_2}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{-k_2}{m_2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -(c_2 + c_1) & c_2 & -(k_2 + k_1) & k_2 \\ \frac{c_2}{m_1} & \frac{-c_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{-k_2}{m_1} \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{-c_2}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{-k_2}{m_2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ x_1 \\ x_2 \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ u \\ u \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\left\{ u_c = \frac{c_2 \alpha}{1-\alpha} (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - \underbrace{\frac{c_1 (\alpha-\beta)}{1-\alpha} \dot{x}_1}_{c_1} + \underbrace{\frac{k_2 \alpha}{1-\alpha} (x_2 - x_1)}_{k_2} - \underbrace{\frac{k_1 (\alpha-\gamma)}{1-\alpha} x_1}_{k_1} \right\} \text{ se } \alpha = \beta = \gamma \Rightarrow u_c = \underbrace{\frac{c_2 \alpha}{1-\alpha} (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \frac{k_2 \alpha}{1-\alpha} (x_2 - x_1)}_{\text{Regolatore PD}}$$

SCIENZA E TECNICA

$$M_2(s, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{(1-\alpha)m_1m_2s^4 + (m_2((1-\beta)c_1+c_2)+(1-\alpha)m_1)s^3 + ((1-\gamma)k_1+k_2)m_2 + (1-\beta)c_1c_2 + k_2(1-\alpha)m_1}{((1-\alpha)m_1s^2 + ((1-\beta)c_1+c_2)s + (1-\gamma)k_1+k_2)s^2} \quad (13)$$

$$\Rightarrow \lim_{\substack{\alpha \rightarrow 1 \\ \beta \rightarrow 1 \\ \gamma \rightarrow 1}} M_2(s, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{(c_2s^3 + k_2s^2)m_2}{c_2s^3 + k_2s^2} = m_2$$

Nel prototipo T2006 tale attuatore è un cilindro oleodinamico.

Trascurando attriti ed altri fenomeni irrilevanti rispetto alle forze in gioco, la forza esercitata "F" risulta proporzionale alla differenza di pressione tra le due camere del cilindro secondo la (14).

$$F = A\Delta p \quad (14)$$

A = Area pistone

Δp = diff. pressione tra camere

Affinché la forza "F" erogata dall'attuatore sia uguale alla " u_c " comandata dal sistema di controllo del pantografo, si deve controllare la differenza di pressione " Δp " tra le due camere del cilindro.

In figura 11 si riporta uno schema in cui sono rappresentati i componenti utilizzati per controllare la forza dell'attuatore ed i loro collegamenti con il resto del sistema di controllo del pantografo.

L'alimentazione delle due camere del cilindro viene controllata utilizzando una servo-valvola proporzionale 4/3 di tipo "Q" [22], con una banda passante valutabile in 160-180 Hz.

La relazione (15), ottenuta nell'ipotesi di comportamento lineare della valvola [22, 23, 24, 25], descrive la dipendenza che lega la portata " q " alla posizione del cassetto " x " ed alla differenza di pressione " Δp " tra le camere.

$$q = h_x x - h_p \Delta p \quad (15)$$

Un segnale in corrente 0-40mA viene utilizzato per comandare la posizione del cassetto " x " e quindi la portata di olio " q " fornita/scaricata alle camere del cilindro. La risposta della valvola al segnale di comando in corrente viene approssimata dalla (16), una funzione di trasferimento del secondo ordine [22, 23, 24, 25]

$$x(s) = i(s) \frac{k_v}{\omega_v^2 + 2\zeta\omega_v s + s^2} \quad (\text{funzione di trasferimento valvola}) \quad (16)$$

Combinando la (15) e la (16) si ottiene la (17) che lega direttamente la portata erogata dalla valvola alla corrente di comando.

$$q = i(s) \frac{h_x k_v}{\omega_v^2 + 2\zeta\omega_v s + s^2} - h_p \Delta p \quad (17)$$

La stessa portata " q " può essere calcolata tenendo conto della velocità con cui si sposta il cilindro, delle perdite per trafileamento, della comprimibilità dell'olio nelle camere del cilindro.

In questo modo si ottiene la funzione di trasferimento (18).

$$q(s) = \underbrace{Asy(s)}_{\substack{\text{portata donata} \\ \text{alla velocità del} \\ \text{pistone}}} + \underbrace{h_2 \Delta p(s)}_{\substack{\text{trafileamenti} \\ \text{della compressibilità} \\ \text{dell'olio}}} + \underbrace{\frac{v_o}{2E_b} s \Delta p(s)}_{\substack{\text{volume camera} \\ \text{pistone a metà corsa}}} \quad (18)$$

v_o = volume della camera (pistone a metà corsa)

y = pos. pistone; E_b = Bulk Modulus; h_2 = coeff. di trafileamento;

Imponendo l'uguaglianza delle portate calcolate con la (17) e la (18) si ottiene la (19) che lega direttamente la differenza di pressione tra le camere al segnale di comando dalla valvola ed alla velocità "sy" del pistone.

$$\Delta p = G(s) = i(s) \frac{h_x k_v}{\omega_v^2 + 2\zeta\omega_v s + s^2} \left(\frac{h_2}{(h_1 + h_2) + s \frac{v_o}{2E_b}} - \frac{A}{(h_1 + h_2) + s \frac{v_o}{2E_b}} \right) sy(s) = G_1(s)i(s) - G_2(s)sy(s) \quad (19)$$

$G_1(s)$ = dipendenza della pressione dal comando apertura valvola

$G_2(s)$ = dipendenza della pressione dalla velocità del pistone (disturbo di portata)

v_o = volume camera

E_b = modulo di Bulk

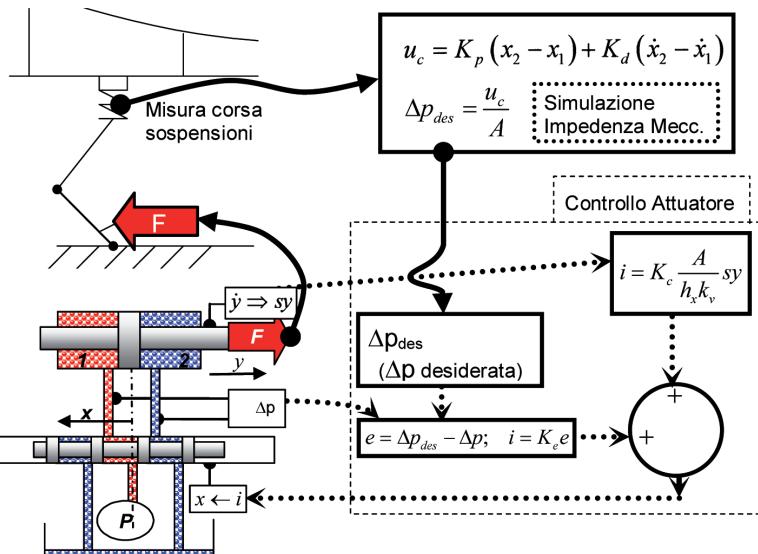


Fig. 11 - Principali elementi costituenti il sistema di attuazione: il cilindro, la servo-valvola, l'algoritmo per il controllo in forza dell'attuatore.

In virtù della (19), la legge di controllo utilizzata per controllare “ Δp ” risulta essere la (20) in cui è possibile evidenziare due parti ben distinte del regolatore visibili anche nello schema di fig. 11.

Un anello in retroazione fornisce un contributo proporzionale alla differenza tra pressioni desiderate e misurate.

Un contributo proporzionale alla velocità del pistone compensa approssimativamente le variazioni di pressioni indotte dagli spostamenti del cilindro. Tale contributo può essere modificato variando il valore del guadagno “ K_c ”

$$i = \underbrace{K_c e}_{\substack{\text{retro-azione sulla} \\ \text{pressione}}} + \underbrace{K_c \frac{A}{h_s k_v} sy}_{\substack{\text{compensazione della} \\ \text{velocità pistone}}} \quad (20)$$

$e = \Delta p_{des} - \Delta p$; Δp_{des} = riferimento di pressione desiderata = $\frac{u_c}{A}$;

$$\frac{A}{h_s k_v} \approx \frac{G_2(s)}{G_1(s)}; 0 \leq K_c \leq 1 \quad \begin{cases} K_c = 0 \Rightarrow \text{nessuna compensazione} \\ K_c = 1 \Rightarrow \text{compensazione massima} \end{cases}$$

8. Conclusioni e sviluppi futuri

In questa prima parte sono stati presentati i principali criteri e le metodologie che hanno guidato la progettazione del pantografo T2006 con particolare attenzione al sistema di attuazione e controllo che è risultato essere uno degli elementi più decisivi per la messa a punto di un sistema capace di garantire prestazioni e affidabilità in condizioni ambientali difficili.

Si è trattato di un'attività che ha richiesto l'ottimizzazione di diversi aspetti e che si è conclusa con la realizzazione di un progetto esecutivo, la cui realizzazione è stata affidata a Fabbrica Machinale SRL, società specializzata nella prototipazione di soluzioni avanzate di automazione sita a Navacchio (PISA). La costruzione del prototipo è stata completata a luglio 2005.

Le successive attività sperimentali di messa a punto del prototipo e calibrazione degli algoritmi di controllo ha impegnato i ricercatori del dipartimento di Energetica Sergio Stecco fino alla primavera del 2007.

Nella seconda parte di questo lavoro saranno illustrati i risultati ottenuti durante le attività sperimentali svolte presso i laboratori del fornitore e di TRENITALIA nell'ambito del collaudo e della messa a punto del sistema. Particolare attenzione sarà rivolta alle procedure utilizzate per la identificazione delle caratteristiche del prototipo e la messa a punto di procedure semplici e ripetibili per la calibrazione del sistema di controllo.

BIBLIOGRAFIA

[1] M. PAPI, E. MINGOZZI, A.G. VIOLI, O. BRUNO, A. LANDI, L. SANI, “La captazione di corrente e l’interazione pan-

tografo-catenaria: Parte I: Metodologie delle misure per il controllo della qualità” Ingegneria Ferroviaria, v. 55, n. 4, aprile 2000, p. 149.

[2] KLUZOWSKI, BURCKHARDT, “Einrichtung zur Messung der Kontaktkraft zwischen Fahrdraht und Stromabnehmer. Left bracket Installation for the Measurement of Contact Force Between Contact Wire and Current Collector right bracket” Elektrische Bahnen, v. 47, n. 5, May 1976, pp. 112-114.

[3] P. DELFOSSE, B. SAUVESTRE, “Measurement of contact pressure between pantograph and catenary”, French Railway Review, v. 1, n. 6, Dec. 1983, pp. 497-506.

[4] A. COLLINA, S. BRUNI, “Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction”, Vehicle System Dynamics, v. 38, n. 4, October 2002, pp. 261-291.

[5] B. SIMEON, M. ARNOLD, “Coupling DAEs and PDEs for simulating the interaction of pantograph and catenary”, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, v. 6, n. 2, June 2000, pp. 129-44.

[6] L. DRUGGE, T. LARSSON, A. STENSSON, “Modelling and simulation of catenary-pantograph interaction”, Vehicle System Dynamics, v. 33, n. Suppl., 2000, pp. 490-501.

[7] E. MAESTRINI, D. CARILLO, C. BANI, “Introduction of Carbon Strips”, Maintenance Management 2005, Venezia, 14-15 Aprile 2005.

[8] G. GALEOTTI, M. GALANTI, S. MAGRINI, P. TONI, “Servo Actuated railway pantograph for high-speed running with constant contact force” Imech E, vol. 300, 1998.

[9] B. ALLOTTA, M. PAPI, L. PUGI, A.G. VIOLI, “Experimental Campaign on a servo actuated pantograph”, AIM 01, Como, Italy, July 2001.

[10] G. DIANA, F. FOSSATI, F. RESTA, A. COLLINA, “Active Control of high speed train pantograph”, III int. conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, Sept 1996.

[11] G. POETSCH, J. EVANS, R. MEISINGER, W. KORTUM, W. BALDAUF, A. VEITL, J. WALLASCHECK, “Pantograph/Catenary Vibration And Control”, Vehicle System Dynamics 28, (2/3), 1997, pp. 159-195.

[12] D.N O’CONNOR, S.D. EPPINGER, W.P. SEERING, D.N. WORMLEY, “Active Control of High-Speed Pantograph”, ASME Journal of Dynamic System Measurements and Control 119(1), March 1997.

[13] W. BALDAUF, R. BLASCHKO, W. BEHR, Ch. HEINE, M. KOLBE, “Development of an actively controlled, acoustically optimised single arm pantograph”, Proc of WCRR 2001 (World Congress on Railway Research), Koln 2001, pp. 54.

[14] Giampaolo MANCINI, Tiziano TADDEI, “Pantografi a controllo attivo per rotabili e linee interoperabili del sistema ferroviario europeo ad alta velocità”, Specifica Trenitalia S.p.A., Specifica tecnica n° 374683, versione 00 del 2 febbraio 2003.

[15] L. PUGI, B. ALLOTTA, A. RINDI, M. RINCHI, R. CHELI, "Progettazione e simulazione di un pantografo ferroviario dotato di sistemi di asservimento", 17th AIMETA Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Firenze, 11-15 Settembre 2005.

[16] A. FACCHINETTI, F. FOSSATI, F. RESTA, A. COLLINA, "Hardware in the loop test-rig for identification and control application on high speed pantographs", Shock and Vibration, v. 11, n. 3-4, 2004, pp. 445-456,

[17] G. DIANA, F. CHELI, F. RESTA, F. MIOTTO, "Controllo attivo nei pantografi per treni ad alta velocità (Active control in pantographs for high speed trains)", Ingegneria Ferroviaria, v. 51, n. 4, Aprile 1996, pp. 197-217.

[18] L. SCIAVICCO, B. SICILIANO, "Modelling and Control of Robot Manipulators", Mc Graw Hill ISBN 0-07-114726-8,

[19] D. KARNOPP, "Active damping in road vehicle suspension systems", Vehicle System Dynamics, v. 12, n. 6, Dec 1983, pp. 291-316.

[20] N. HOHENBICHLER, K. SIX, D. ABERL, "The benefit of skyhook control in high speed railway vehicles", Mechatronics 2006. 4th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Preprints, 2006, pp. 890-5,

[21] Rete Ferroviaria Italiana S.p.A. "Specifica Tecnica delle prove da eseguire per caratterizzare un pantografo", Codifica RFI/DC/TC.TE/ST TE 74-C.

[22] W.J. THAYER, "Transfer functions for MOOG Servovalves", Moog Technical Bulletin 103, 1965.

[23] G.G. LISINI, "Servomeccanismi", Editrice Tecnico Universitaria, Pisa 1973.

[24] H.E. MERRITT, "Hydraulic Control Systems", New York John Wiley and Sons, Inc. 1967.

[25] M. JELALI, A. KROLL, "Hydraulic Servo Systems", Modelling, Identification & Control, Springer, 2003.

Sommaire

PROJET ET EXPÉRIMENTATION PRÉLIMINAIRE DU SYSTÈME D'AMORTISSEMENT ACTIFS / SEMI ACTIFS DU PANTOGRAPHE T2006 - Première partie - Projet

Objet de ce travail est la description d'un projet de recherche et développement ayant pour objectif l'amélioration de la captation entre pantographe et caténaire à travers la réalisation d'un pantographe mécatronique, basé sur le principe innovateur de la réduction de la masse apparente, en utilisant un système asservis piloté par des logiques de contrôle opportunes. Le pantographe, dénommé T2006, a été réalisé dans une optique de démonstrateur ouvert sur lequel pourvoir vérifier des théories et des solutions innovatrices, aussi au plus bas niveau d'automatisme, orientées à l'amélioration de l'interaction entre pantographe et caténaire dans les différentes conditions d'emploi. Le système de contrôle permet d'émuler aussi le comportement des composantes semi actives à amortissement variable. Il est possible donc, en utilisant une seule configuration pour le test, d'expérimenter aussi une version semi active du pantographe, tout en l'optimisant en fonction de la vitesse et des caractéristiques de la ligne aérienne.

Le travail est développé en deux parties: dans la première on décrit les critères et les méthodes qui ont guidé le projet, dans la deuxième les résultats obtenus grâce à l'expérimentation effectuée dans les laboratoires du fournisseur.

Summary

DESIGN AND PRELIMINARY TEST OF THE ACTIVE/SEMI-ACTIVE SPRING SYSTEM OF THE T2006 PANTOGRAPH – Part I - Design

This paper describes a research and development project whose aim is to improve the current collection at the pantograph-catenary contact by means of the implementation of a mechatronic pantograph. Its operation is based on the innovative principle of apparent-mass reduction and uses a logic-controlled interlocked system. This pantograph, named T2006, has been conceived as an open test-bed on which to verify innovative theories and solutions, even lower automation level solutions, aiming to improve the pantograph-catenary interaction in the different operation conditions. Moreover the control system allows to emulate the behaviour of variable damping semi-active components. It is then possible, with a unique test configuration, to verify a semi-active version of the pantograph and to optimise it with respect to the speed and the line characteristics.

This work is composed of two parts: the former describes design criteria and methodologies, the latter presents the results that have been achieved by the supplier test lab.

Inhaltsübersicht

ENTWURF UND TESTPHASE DES AKTIVEN/SEMIAKTIVEN FEDERUNGSSYSTEMS DES STROMABNEHMERS T2006 - Teil I – Das Projekt

Das vorliegende Papier beschreibt ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt, das es sich zum Ziel gesetzt hat, die Stromabnahme am Kontaktpunkt zwischen Stromabnehmer und Oberleitung durch die Umsetzung eines mechatronischen Stromabnehmers zu verbessern. Dieser Stromabnehmer stützt sich auf das innovative Prinzip der Reduzierung der scheinbaren Masse und verwendet ein logisch gesteuertes Interlocksystem. Dieser Stromabnehmer, der die Bezeichnung T2006 trägt, wurde als offener Prüfstand entwickelt, um innovative Theorien und Lösungen testen zu können, sogar mit einem niedrigeren Automatisierungsniveau, im Bestreben, die Interaktion zwischen Abnehmer und Oberleitung unter verschiedenen betrieblichen Bedingungen zu verbessern. Darüber hinaus simuliert das Kontrollsysteem das Verhalten von variablen semi-aktiven Dämpfungskomponenten. Auf diese Weise kann mithilfe einer einzigartigen Prüfkonfiguration die semiaktive Version des Stromabnehmers geprüft werden und diese auf der Grundlage der Streckengeschwindigkeit und -merkmale optimiert werden.

Die vorliegende Arbeit umfasst zwei Teile: Der erste Teil beschreibt die Projektkriterien und -methoden, der zweite hingegen stellt die Ergebnisse vor, die im Testlabor des Produzenten erzielt worden sind.