

Una metodologia per correlare la qualità del contatto pantografo-catenaria al contenuto armonico della corrente captata. Il caso della captazione multipla

A methodology for correlating the quality of the pantograph-catenary contact with the harmonic content of the current collected. A case of multiple current collection

Dott. Ingg. Giuseppe BUCCA(*), Andrea COLLINA(*), Renato MANIGRASSO(*),
Ferdinando MAPELLI(*), Davide TARSITANO(*)

SOMMARIO - È noto che quando la catenaria di alimentazione è meccanicamente perturbata si possono sviluppare archi elettrici al contatto catenaria-pantografo. La variazione della tensione di alimentazione dovuta alla caduta di tensione ai morsetti dell'arco produce armoniche di corrente che possono disturbare i circuiti di binario degli impianti di segnalamento. Il fenomeno risulta particolarmente vistoso quando, ad esempio, si usano due pantografi in presa dato che il secondo affronta le perturbazioni della catenaria indotte dal passaggio del primo pantografo. L'entità del peggioramento della captazione dipende da numerosi fattori (quali le caratteristiche meccaniche della catenaria e dei pantografi, la distanza tra i pantografi, la velocità del veicolo...), mentre le conseguenze di questo peggioramento sul contenuto armonico della corrente captata dipendono dal tipo di filtraggio della corrente e dal sistema di controllo dell'azionamento di trazione.

Il presente lavoro intende fornire al progettista di azionamenti ferroviari una metodologia di calcolo preliminare del contenuto armonico della corrente captata che consenta di determinare le modifiche più opportune da apportare al filtro di ingresso e/o al sistema di controllo. La metodologia proposta verrà applicata nella valutazione della risposta di un tipico apparato di protezione dagli effetti indesiderati delle armoniche nel caso della captazione multipla che si realizza per un convoglio in composizione doppia (quale si può presentare quando si voglia potenziare l'offerta di trasporto).

SUMMARY - It is a well known fact that when the catenary supply system is mechanically disturbed, electric arcs may develop on contact between the catenary and the pantograph. The variation in supply voltage, due to the voltage drop across the arc, generates current harmonics which can disturb the signalling system's track circuits. This phenomenon is particularly noticeable in double pantographs operation since the second pantographs finds catenary disturbed by the passing of the first pantograph. The deterioration of the quality of the current collection depends on numerous factors (the mechanical characteristics of the catenary and pantographs for example, the distance between pantographs, vehicle speed etc.), whilst the effects of this worsening in harmonic content of the current collected depend on the type of current filtering and the traction driving control system.

The current study aims to equip the railway drive designer with a preliminary calculus methodology of the harmonic content of the current collected allowing identification of the most appropriate changes to be made to the input filter and/or the control system. The proposed methodology is applied to the evaluation of the response of a typical protection apparatus from undesired effects of the harmonics in case of multiple collection implemented for a double unit vehicle (as can be the case where an increase in transport supply is required).

Lista dei simboli - Symbol legend

BPS	Banco prova striscianti <i>Collector bench tests</i>
F_c	Forza verticale di contatto tra striscante e filo di contatto <i>Vertical contact force between collector and contact wire</i>

F_l	Forza longitudinale di contatto tra striscante e filo di contatto <i>Longitudinal contact force between collector and contact wire</i>
G	Generatore del BPS <i>BPS generator</i>

(*) Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica.

(*) Polytechnic of Milan, Department of Mechanics.

i_a	Corrente captata <i>Current collected</i>
i'_a, i'_b, i'_c	Sistema di correnti trifase generate dal generatore G del BPS <i>Three-phase current system generated by the generator G of the BPS</i>
i_c	Corrente del generatore ideale di corrente (modello azionamento del veicolo) <i>Current of the ideal current generator (vehicle driving model)</i>
i_t	Corrente alternata sinusoidale del circuito del BPS <i>BPS circuit sinusoidal alternating current</i>
i^*	Valore iniziale della corrente d'arco <i>Initial arc current value</i>
i_a^*	Corrente normalizzata di arco <i>Normalised arc current</i>
IR	Interruttore rapido <i>High speed switch</i>
l	Distanza tra i due pantografi in presa nella condizione di doppia captazione <i>Distance between two coupled pantographs under double collection conditions</i>
l_c	Lunghezza di campata della catenaria <i>Catenary span length</i>
L, C	Induttanza e capacità del filtro di ingresso dell'azionamento del veicolo <i>Inductance and capacity of the vehicle drive input filter</i>
PA	Apparato di protezione dagli effetti indesiderati delle correnti armoniche <i>Apparatus for protection against the undesired effects of harmonic currents</i>
P^*	Potenza assorbita dall'azionamento del veicolo <i>Vehicle drive power demand</i>
R_c	Resistenza elettrica al contatto tra strisciante e filo di contatto <i>Electric resistance on contact between collector and contact wire</i>
R_t, L_t	Resistenza e induttanza del reattore trifase del BPS <i>BPS three-phase reactor resistance and inductance</i>
R'_t, L'_t	Resistenza e induttanza del reattore monofase del BPS <i>BPS single-phase reactor resistance and inductance</i>
t	Tempo <i>Time</i>
t_a	Istante di tempo al quale l'attuatore pneumatico ha portato i due elettrodi alla distanza voluta x (prove di arco) <i>Instant of time in which the pneumatic actuator brings the two electrodes to the required distance x (arc tests)</i>

t_b	Istante di tempo al quale si estingue l'arco elettrico (prove di arco) <i>Instant of time in which the electric arc extinguishes (arc tests)</i>
t_0	Istante di tempo al quale l'attuatore pneumatico inizia a distanziare i due elettrodi (prove di arco) <i>Instant of time in which the pneumatic actuator starts to distance the two electrodes (arc tests)</i>
T_p	Periodo di attraversamento del singolo pantografo <i>Crossing time period of the single pantograph</i>
T_{rif}	Coppia di riferimento all'azionamento del veicolo <i>Vehicle drive reference torque</i>
T_0	Periodo temporale di oscillazione del filo di contatto <i>Contact wire oscillation time period</i>
T_{rif}^*	Coppia di riferimento imposta dal macchinista <i>Reference torque imposed by driver</i>
u_t	Velocità di avanzamento del veicolo – velocità del flusso d'aria che investe la zona di contatto tra strisciante e filo di contatto <i>Vehicle running speed – air flow speed impacting the contact zone between slipper and contact wire</i>
v_a	Tensione d'arco – caduta di tensione tra pantografo e catenaria <i>Arc voltage– voltage drop between pantograph and catenary</i>
v_c	Tensione ai capi del condensatore del filtro C <i>C filter capacitor terminal voltage</i>
v_{cn}	Valore nominale della tensione sul condensatore del filtro C <i>C filter capacitor nominal voltage value</i>
v_s	Caduta di tensione v_a quando $i_a^* = 1$ <i>Voltage drop v_a when $i_a^* = 1$</i>
v_o	Caduta di tensione v_a quando $i_a^* = 0$ <i>Voltage drop v_a when $i_a^* = 0$</i>
V	Tensione di catenaria <i>Catenary voltage</i>
x	Distanza tra l'ultimo strisciante a contatto e il filo di contatto <i>Distance between the last collector in contact and the contact wire</i>
\bar{Z}	Impedenza del reattore trifase del BPS <i>BPS three-phase reactor impedance</i>
Ω	Velocità angolare dei motori <i>Engine angular velocity</i>

1. Introduzione

La qualità della captazione influisce sul funzionamento dell'azionamento elettrico di un convoglio ferroviario e ne può compromettere la regolarità di marcia. La velocità di percorrenza è, di norma, il parametro più importante agli effetti della qualità della captazione. Infatti, al crescere della velocità, aumentando le componenti dinamiche della forza di contatto tra striscianti e catenaria, aumentano le probabilità di distacco tra i due elettrodi con la relativa formazione di archi elettrici [1,2].

In casi particolari la qualità della captazione può peggiorare anche a velocità relativamente basse. Questo fenomeno si manifesta, ad esempio, nel caso di captazione con più pantografi perché i pantografi successivi al primo incontrano una catenaria meccanicamente perturbata. Analisi numeriche condotte da vari autori (ad esempio [3,4,5]) mostrano che il peggioramento si aggrava quando la distanza tra i pantografi in presa è prossima alla lunghezza di campata della catenaria (o ad un suo multiplo). La regolarità della distanza dei pantografi e la coincidenza del periodo di transito dei pantografi con il periodo di oscillazione della catenaria conduce ad una condizione assimilabile ad una risonanza.

Un altro parametro che influenza la qualità della captazione è il valore del tiro del filo di contatto che, nel caso delle catenarie per linee ordinarie delle classi A/B, con velocità massima di esercizio pari rispettivamente a 160 e 200 km/h, è decisamente inferiore rispetto ai valori utilizzati nelle linee per alta velocità.

In questo lavoro si presenta una metodologia per valutare gli effetti del degrado della captazione sul contenuto armonico della corrente captata (è noto che un elevato contenuto armonico può compromettere la regolarità di marcia in seguito all'intervento dei sistemi di protezione del segnalamento) e si indica una tipica applicazione della metodologia. Per conseguire questi risultati si sono svolti i seguenti passi:

- i) si è messo a punto un modello matematico per individuare l'evoluzione temporale delle grandezze meccaniche che definiscono il contatto catenaria/pantografo (numero di pantografi in presa, forza al contatto per ogni strisciante in presa, distanza tra l'ultimo strisciante in presa e la catenaria nel caso di perdita di contatto...) in funzione della velocità del convoglio (quando siano state definite le caratteristiche meccaniche dei componenti interagenti);
- ii) si è definito un modello matematico dell'azionamento elettrico valido nell'arco temporale limitato in cui si manifestano i disturbi al contatto. Verrà mostrato che il modello proposto richiede la conoscenza: a) (nel caso di almeno uno strisciante in presa) della resistenza elettrica al contatto tra ogni strisciante del pantografo e la catenaria e b) (nel caso di distacco) della caratteristica esterna del bipolo arco elettrico (e cioè del legame tensione/corrente ai poli dell'arco) che si manifesta tra catenaria e pantografo;

1. Introduction

The quality of current collection affects the operation of the electric drive of a railway vehicle and may compromise its normal running. Running speed, is by norm the most important parameter in terms of the effects on collection quality. As speed increases, increasing the dynamic components of the contact force between collectors and catenary, the probability of contact loss increases with consequent formation of electric arcs [1,2].

In some cases the quality of collection can deteriorate even at relatively low speeds. This phenomenon occurs, for example, in case of collection with several pantographs since the pantographs following the first one encounter a mechanically disturbed catenary. Numerical analysis conducted by various authors (for example [3,4,5]) show that deterioration, increases when the distance between coupled pantographs is close to the span length of the catenary (or to a multiple of it). The regularity of the distance between pantographs and the coincidence of the transit period of the pantographs with the catenary's oscillation period leads to a condition which resembles a resonance.

Another parameter which influences the quality of collection is the contact wire's tension value which, in case of catenaries for class A/B ordinary lines, with a top operating speed of 160 and 200 Km/h respectively, is significantly lower than values used in high speed lines.

This study presents a methodology for the evaluation of the effects of collection deterioration on the harmonic content of the current collected (it is well known that an elevated harmonic content may compromise regular running following activation of signalling protection systems) and illustrates a typical application for this methodology. In order to achieve these results the following steps were followed:

- i) a mathematical model was developed to identify the time evolution of the mechanical values defining the catenary/pantograph contact (number of pantographs in contact, the contact force of each coupled collector, the distance between the last collector in contact and the catenary in the case of loss of contact...) as a function of the vehicle's running speed (when the mechanical characteristics of interacting components have been defined);
- ii) a mathematical model was developed for the electrical drive valid during the limited time period within which contact disturbance occurs. It shall be explained that the proposed model required knowledge of: a) (in the case of contact loss at least one coupled collector) the electrical contact resistance between each of the pantograph's collectors and the catenary and b) (in case of) of the external characteristics of the bipolar electric arc (and, that is, of the voltage/current relation at the poles of the arc) which occurs between catenary and pantograph;

- iii) si sono definite, mediante opportune sperimentazioni, le grandezze sopra indicate, necessarie al modello matematico dell'azionamento elettrico;
- iv) si è abbinato il modello elettrico dell'azionamento a quello meccanico del sistema catenaria/pantografo in modo da poter studiare le interazioni tra i due sistemi;
- v) si è applicato il pacchetto informatico così costituito al caso di due treni appaiati, ovvero di un convoglio in composizione doppia, (su linee ordinarie delle classi A/B) in modo da valutare lo spettro della corrente captata al variare della velocità del convoglio e da ottenere indicazioni in merito alle reazioni di un tipico apparato di protezione dei circuiti di binario degli impianti di segnalamento.

Le operazioni ora descritte sono rappresentate graficamente nella fig. 1 (limitatamente ai primi quattro punti): il modello matematico per lo studio dell'interazione catenaria/pantografo fornisce il valore istantaneo della forza al contatto F_c e, nel caso di distacco, la distanza x tra l'ultimo strisciante a contatto e la catenaria al variare della velocità u_t del convoglio. Il modello elettrico si avvale di queste grandezze meccaniche per individuare, in conformità ai risultati delle sperimentazioni, la resistenza al contatto R_c o la tensione ai morsetti dell'arco v_a . Utilizzando questi dati il modello elettrico fornisce, in uscita, le correnti i_{a1} , i_{a2} ... dei pantografi presenti.

- iii) The above stated values, necessary for the mathematical model of the electric drive, were defined by means of proper tests;
- iv) The electrical drive model was paired to the mechanical model of the catenary/pantograph system in order to study the interaction between the two systems;
- v) The package so developed was applied to the case of two trains, in other words of a double unit vehicle, (on class A/B ordinary lines) in order to assess the collected current's spectrum as a function of the vehicle's speed and to obtain in relation to the reactions of a typical track circuit signalling system protection apparatus.

The operations hereby described are illustrated graphically in fig. 1 (with exclusive reference to the first four points): the mathematical model for the study of catenary/pantograph interaction provides the instant value of the contact force F_c and, in case of contact loss the distance x between the last collector in contact and the catenary as a function of the variation of the vehicle's speed u_t . The electrical model relies on these mechanical values to calculate the contact resistance R_c or the voltage drop v_a across the arc in conformance with experimental results. By means of these data, the electrical model supplies, in output, the currents i_{a1} , i_{a2} ... of the pantographs.

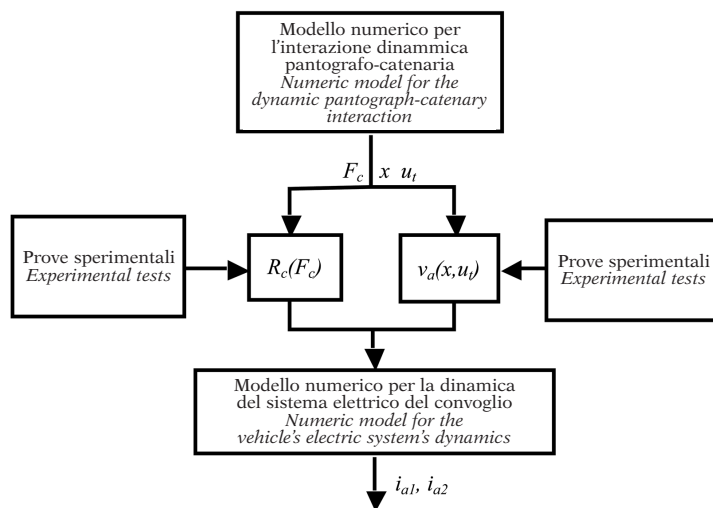


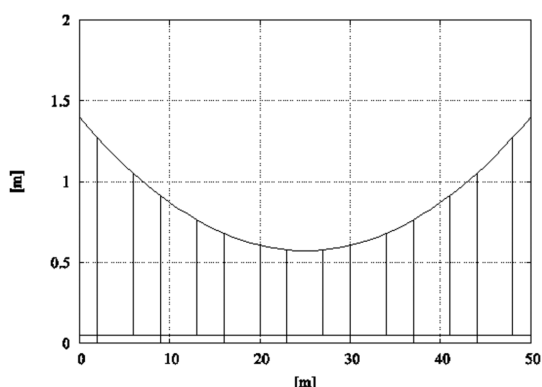
Fig. 1 - Schema della procedura elettromeccanica per lo studio degli effetti della captazione sull'interferenza con le correnti codificate del sistema di segnalamento (F_c = forza di contatto; x = distanza tra strisciante e filo di contatto nel caso di distacco tra i due corpi; u_t = velocità del convoglio; R_c = resistenza elettrica al contatto; v_a = tensione d'arco; i_{a1} , i_{a2} = correnti di trazione che fluiscono sulle rotaie e che possono interferire con le correnti codificate del sistema di segnalamento). Electromechanical procedure diagram for the study of the effects of collection on interference with the coded currents of the signalling system (F_c = contact force; x = distance between slipper and contact wire in case of detachment; u_t = vehicle running speed; R_c = electric contact resistance; v_a = arc voltage; i_{a1} , i_{a2} = traction currents flowing on the tracks and that may interfere with the signalling system's coded currents).

2. Mathematical model for the study of mechanical interaction of the catenary/pantograph

Researchers of the Department of Mechanics developed a model, over the years, for the simulation of the dynamic interaction between pantograph and catenary capable of reproducing phenomena which occur during interaction between pantograph and catenary even at frequencies higher than 100 Hz. The model was validated with experimental results obtained during line tests [6]. The numeric model provides useful information for design and optimisation of overhead lines, for the analysis of the interaction between different pantographs and catenaries, for the evaluation of performance of a possible active control for pantographs or, as in the case of this study, to better understand the mechanical phenomena caused by the interaction of several coupled pantographs and the catenary. The overhead line (fig. 2) (see publications [6,7]) is modelled by means of ten-

2. Modello matematico per lo studio dell'interazione meccanica catenaria/pantografo

I ricercatori del Dipartimento di Meccanica hanno sviluppato negli anni passati un modello per la simulazione dell'interazione dinamica tra pantografo e catenaria in grado di riprodurre i fenomeni che intervengono durante l'interazione pantografo-catenaria anche a frequenze maggiori di 100 Hz. Il modello è stato validato con risultati sperimentali ottenuti durante prove in linea [6]. Il modello numerico fornisce utili informazioni per la progettazione e l'ottimizzazione delle linee aeree, per l'analisi dell'interazione tra differenti pantografi e catenarie, per la valutazione delle prestazioni di un eventuale controllo attivo per pantografi o, come nel caso del presente lavoro, per meglio comprendere i fenomeni meccanici dovuti all'interazione tra più pantografi in presa e la catenaria. La linea aerea (fig. 2) (si vedano le pubblicazioni [6,7]) è modellata attraverso elementi trave tesati, mentre i pendini sono rappresentati come elementi non lineari. Per quest'ultimi, si considera nel modello la curva caratteristica non lineare forza-spostamento ricavata sperimentalmente.



	Filo di contatto Contact wire	Fune portante Catenary wire
Sezione Cross-section	2 x 100 mm ²	120 mm ²
Tesatura Cross-section	2 x 7.5 kN	10.75 kN

a)

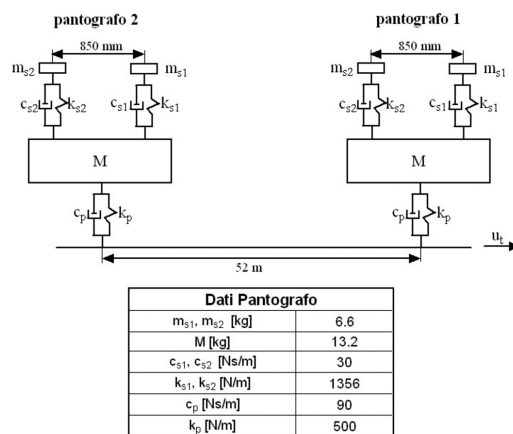
Il pantografo (figg. 2 e 3) è schematizzato considerando la massa concentrata del quadro, mentre gli archetti sono modellati considerando i loro modi rigidi e deformabili usando l'approccio modale. Il modello del contatto è basato sul "penalty method" [8], tarato in modo da rappresentare adeguatamente il contatto monolatero tra strisciante e filo di contatto.

Il programma di calcolo che si avvale del modello pri-

sionato beam elements, whilst the droppers are represented as non linear elements. For the latter, the model considers the non linear characteristic in terms of force-displacement curve obtained experimentally.

The pantograph (figg. 2 and 3) is illustrated taking into account the concentrated mass of the frame, whilst the current collector bows are modelled taking into account their rigid and deformation modes using the modal approach. The contact model is based on the "penalty method" [8], set in order to represent the single sided contact between collector and contact wire.

The calculus program which relies on the above mentioned model was utilised to simulate collection for a train configuration with two coupled pantographs (fig. 4). In particular, various simulations were conducted at different train speeds u , for a system composed of two pantographs with graphite collectors and a Type A catenary with two tensioned contact wires with a tensile strength equal to a 7.5 kN. The two pantographs were considered at a distance of $l = 52$ m., which is very close to span length l_c (supposing $l_c = 50$ m.). This configuration is



b)

Fig. 2 – a) schema e principali dati della linea aerea considerata; b) schema e principali dati del pantografo considerato. a) diagram and main data of the overhead line considered; b) diagram and main data of the pantograph considered.

very similar to that of suburban trains with a fixed composition employed in regional service, in the case of use in double composition. The line's diagram schematization includes 16 spans for a total length of 800 m.

The results of the numerical simulations show that the contact wire uplift of the first pantograph induces a motion which significantly disturbs the contact between the catenary and the second pantograph. Consequently

ma indicato è stato utilizzato per simulare la captazione per una configurazione del treno con due pantografi in presa (fig. 4). In particolare, sono state eseguite diverse simulazioni a differenti velocità u_t del treno per un sistema composto da due pantografi con striscianti in grafite e una catenaria tipo A con due fili di contatto tesi con un tiro pari a 7.5 kN. I due pantografi sono stati considerati ad una distanza di $l = 52 \text{ m}$, che è molto vicina alla lunghezza l_c di campata della catenaria (si è supposto $l_c = 50 \text{ m}$). Tale configurazione è molto simile a quella di alcuni treni suburbani a composizione fissa utilizzati nel servizio regionale, nel caso di utilizzo in composizione doppia. La schematizzazione della linea comprende 16 campate per una lunghezza totale di 800 m.

I risultati delle simulazioni numeriche mostrano che il primo pantografo produce un innalzamento del filo di contatto che dà origine ad un moto che disturba significativamente il contatto tra la catenaria e il secondo pantografo. Ne consegue un aumento della percentuale di distacco del secondo pantografo. La percentuale di distacco, come da Specifica Tecnica RFI 74D [9], è calcolata come rapporto tra la somma delle durate dei distacchi in un periodo di osservazione (misura o simulazione) e la durata del periodo di osservazione stesso.

Nella fig. 5 è riportato un confronto tra gli innalzamenti del filo di contatto al passaggio dei due pantografi per tre velocità ($u_t = 110, 130$ e 150 km/h) per una sezione di filo a metà campata (fig. 5a) e sotto sospensione (fig. 5b). Come è possibile notare, il passaggio del secondo pantografo provoca generalmente un incremento dell'innalzamento del filo di contatto; in particolare, per la sezione a metà campata, le ampiezze di oscillazione permangono a valori elevati anche dopo il passaggio del treno.

Il fenomeno che si osserva è principalmente legato al fatto che la distanza tra i due pantografi è molto simile alla lunghezza di campata. Questo comporta che il periodo temporale di oscillazione del filo di contatto T_o è molto vicino allo sfasamento temporale del passaggio dei due pantografi, come è possibile dedurre dalla fig. 5c (che riporta l'andamento temporale dell'innalzamento del filo di contatto per una sezione in mezzera campata nel caso di velocità del veicolo pari a 130 km/h). Inoltre, il periodo di attraversamento del singolo pantografo T_p è prossimo al periodo di oscillazione del filo T_o ; quest'ultima condizione è causa della condizione di massima introduzione di energia nel sistema catenaria durante il contatto tra secondo pantografo e filo, in quanto la forza trasmessa al filo dal secondo pantografo è in fase con lo spostamento del filo stesso prodotto dal passaggio del primo pantografo.

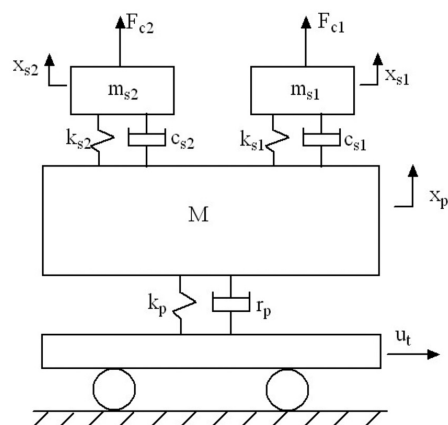


Fig. 3 - Schematizzazione del pantografo considerato nel modello numerico. Diagram of the pantograph considered in the numerical model.

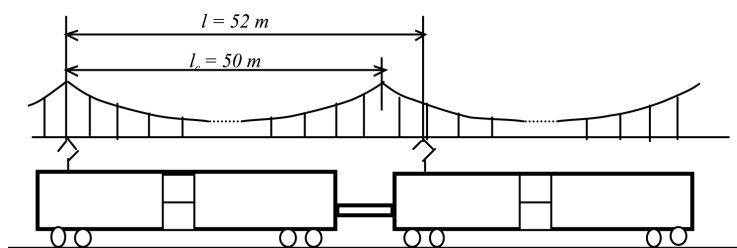


Fig. 4 - Caso oggetto di studio: catenaria di tipo A con campata di lunghezza $l_c = 50 \text{ m}$, convoglio di due treni con distanza dei pantografi $l=52 \text{ m}$. Case object of study: Type A catenary with span length $l_c = 50 \text{ m}$, a vehicle of two trains with distance between pantographs $l=52 \text{ m}$.

an increase in the percentage incidence of detachment of the second pantograph occurs. The percentage of contact loss as per Technical Specification RFI 74D [9], is calculated as the ratio between the sum of contact loss duration over the observation period (measurement or simulation) and the duration of the observation period itself.

Fig. 5 shows a comparison between contact wire uplift upon passing of the two pantographs for three speed values ($u_t = 110, 130$ e 150 km/h) for a cross-section of wire in mid span (fig. 5a) and under suspension (fig. 5b). As it is possible to note, the passing of the second pantograph generally induces a higher contact wire uplift; in particular, at mid span, the oscillation magnitudes remain at high values even after the train has passed.

The observed phenomenon is mainly related to the fact that the distance between the two pantographs is similar to the span length. This determines an oscillation time period of the contact wire T_o which is very close to the time

Le figg. 6, 7 e 8 riportano i risultati delle simulazioni rispettivamente per le velocità di 110, 130 e 150 km/h in termini di andamento spaziale (preferibile all'andamento temporale in quanto è possibile correlare l'andamento della forza di contatto con la geometria e quindi la posizione delle sospensioni e dei pendini lungo la catenaria), spettro e istogramma delle forze di contatto dei due pantografi. L'analisi degli andamenti spaziali delle forze dei due pantografi mostra come, per tutte e tre le velocità considerate, il secondo pantografo presenta le variazioni di forza maggiori.

I contributi in frequenza delle forze per i due pantografi sono gli stessi, ma i moduli di tali contributi sono sempre maggiori per il secondo pantografo, a conferma

shift of the passing of the two pantographs, as it can be inferred from fig. 5c (which shows the time progress of the contact wire uplift at mid span in case of vehicle running speed equal to 130 km/h). Moreover, the crossing time of the single pantograph T_p is close to the oscillation period of the wire T_0 ; the latter condition is cause of the condition of maximum energy input in the catenary system during the contact between the second pantograph and wire, due to the fact that the force transmitted to the wire by the second pantograph is in phase with the wire's movement itself, produced by the passing of the first pantograph.

Figures 6, 7 and 8 show results of simulations for, re-

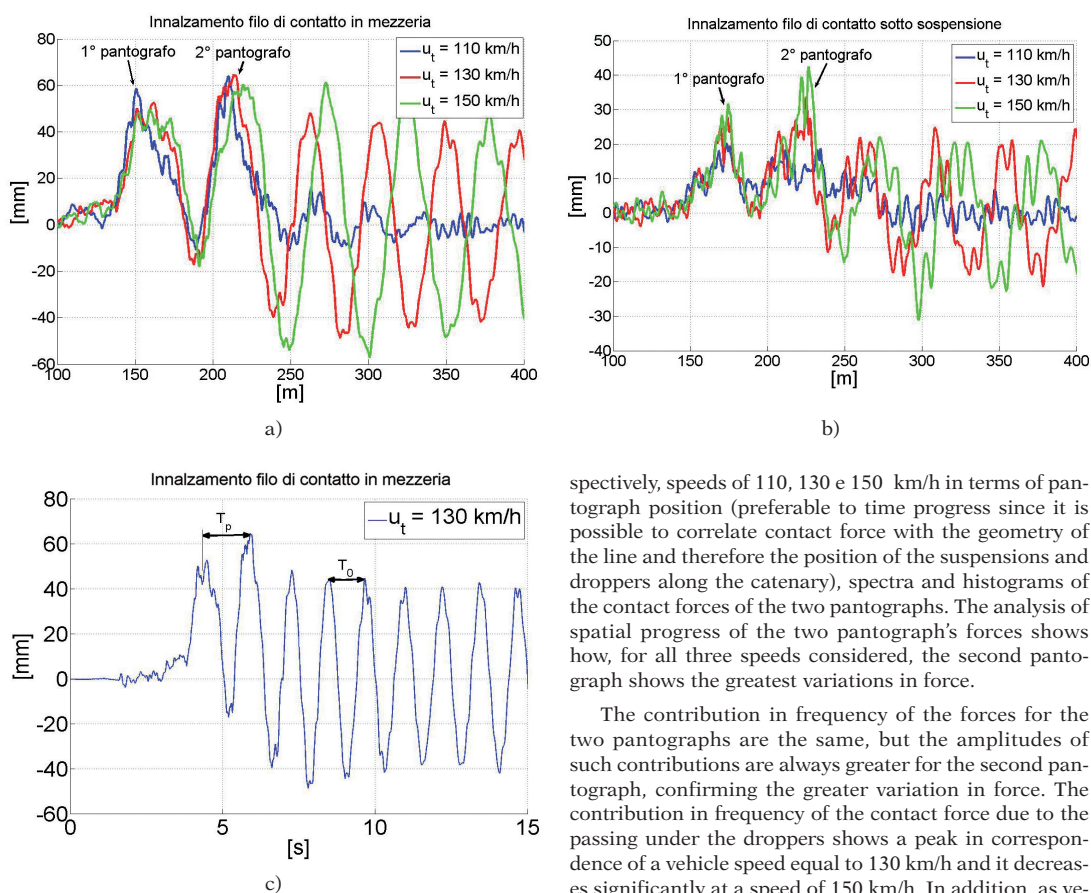


Fig. 5 - Innalzamento del filo di contatto al passaggio dei due pantografi in funzione della posizione lungo la linea: a) sezione in mezzzeria campata; b) sezione sotto sospensione e c) andamento temporale dell'innalzamento del filo per una sezione in mezzzeria campata ($u_t = 130$ km/h). Contact wire uplift upon passing of the two pantographs as a function of position along the line: a) mid span cross-section; b) cross-section under suspension and c) time progress of wire uplift for a mid span cross-section ($u_t = 130$ km/h).

spectively, speeds of 110, 130 e 150 km/h in terms of pantograph position (preferable to time progress since it is possible to correlate contact force with the geometry of the line and therefore the position of the suspensions and droppers along the catenary), spectra and histograms of the contact forces of the two pantographs. The analysis of spatial progress of the two pantograph's forces shows how, for all three speeds considered, the second pantograph shows the greatest variations in force.

The contribution in frequency of the forces for the two pantographs are the same, but the amplitudes of such contributions are always greater for the second pantograph, confirming the greater variation in force. The contribution in frequency of the contact force due to the passing under the droppers shows a peak in correspondence of a vehicle speed equal to 130 km/h and it decreases significantly at a speed of 150 km/h. In addition, as vehicle speed gradually increases, the contribution in frequency due to passing under suspension increases, also due to the contact force of the first pantograph. All these considerations allow us to explain the progress of the histograms from which it is possible to additionally infer information relative to the contact loss percentage for the

della maggiore variazione di forza. Il contributo in frequenza della forza di contatto dovuto al passaggio sotto i pendini presenta un massimo in corrispondenza della velocità del veicolo pari a 130 km/h e si attenua notevolmente alla velocità di 150 km/h. Inoltre, man mano che aumenta la velocità del veicolo, aumenta, anche per la forza di contatto del primo pantografo, il contributo in frequenza dovuto al passaggio sotto sospensione. Tutte queste considerazioni consentono di spiegare l'andamento degli istogrammi da cui è possibile dedurre anche l'informazione relativa alla percentuale di distacco per i due pantografi nei tre casi considerati (tabella 1).

TABELLA 1 - TABLE 1

PERCENTUALE DI DISTACCHI PER I DUE
PANTOGRAFI AL VARIARE DELLE VELOCITÀ
DI AVANZAMENTO DEL TRENO - PERCENTAGE
OF DETACHMENTS FOR THE TWO PANTOGRAHS
AS A FUNCTION OF THE VARIATION
IN TRAIN RUNNING SPEED

	Percentuale di distacchi <i>Percentage of detachments</i>	
	1° pantografo <i>1st pantograph</i>	2° pantografo <i>2nd pantograph</i>
$u_t = 110 \text{ km/h}$	0%	0%
$u_t = 130 \text{ km/h}$	0%	1.2%
$u_t = 150 \text{ km/h}$	0.04%	0.32%

Per la velocità di 110 km/h, per entrambi i pantografi non si ha distacco. Nel caso di velocità del treno pari a 130 km/h, il primo pantografo presenta una percentuale di distacchi nulla, mentre il secondo è caratterizzato da un'elevata percentuale di distacco, che è causa di una cattiva qualità di captazione. La cattiva qualità di captazione è da imputare al negativo effetto dinamico del passaggio sotto i pendini sulla forza di contatto, come risulta dall'analisi dello spettro della forza di contatto. L'ulteriore incremento di velocità produce una percentuale di distacco non nulla anche sul primo pantografo mentre la percentuale di distacco sul secondo pantografo si riduce a 0.32%. In tal caso, l'analisi spettrale delle forze di contatto mostra come la causa della cattiva qualità di captazione sia da imputare all'effetto dinamico sulla forza di contatto del passaggio sotto sospensione. Come valore limite superiore indicativo di riferimento della percentuale di distacco, si può assumere lo 0.1%, come indicato nella Specifica Tecnica [9], per la classe A di catenaria.

Un'altra grandezza in uscita dal modello numerico, importante per l'analisi degli effetti provocati dalla cattiva qualità di captazione sulle correnti codificate del segnalamento, è la distanza x tra lo strisciante e il filo di

two pantographs in the three cases considered (table 1).

For a speed of 110 Km/h, contact loss does not occur for both pantographs. In case of a train running speed equal to 130 Km/h, the first pantograph shows a percentage of contact loss of 0%, whilst the second is characterised by a high percentage of contact loss. The bad collection quality is caused by the dynamic effect of passage under the droppers, as proved by the spectrum analysis of the contact force. The additional increase in speed produces a contact loss percentage also on the first pantograph whilst the contact loss percentage on the second pantograph falls to 0.32%. In such case, the spectrum analysis of the contact forces shows how the dynamic effect on the contact force of the transit under suspension is the cause of bad current collection quality. A value of 0.1% may be assumed for the upper reference limit of the detachment percentage, as reported in the Technical Specification [9] for the Class A catenary.

Another numeric model output parameter which is important for the analysis of the effects induced by bad collection quality on the coded signalling currents, is the distance x between the collector and the contact wire during detachment. This parameter will be used to calculate the contact voltage drop during contact loss using the model described below. As an example, the time progress of the maximum distance between the two current-collector of the second pantograph and the contact wire in case of a train running speed equal to 130 km/h is illustrated in fig. 9 (which shows that the detachment of the two current-collector bows of the same pantograph is not always simultaneous).

3. Mathematical model for the study of the electric system's dynamics

The electric system's dynamics, limited to the brief time interval within which a sharp deterioration in collection occurs, has been studied by means of the model shown in fig. 10. It is therefore assumed that the train proceeds at a speed u_t and that electric drive is supplied, via the input filter LC , by a 3 kV d.c. voltage catenary and it is equipped with a protection system (PA) against undesired effects of harmonic contents capable of having an effect either on the drive controller (in terms of reducing its performance) or by opening the IR switch (in case the effects are persistent).

The dynamic voltage drop across the contact was modelled using a voltage generator v_a variable in relation to the current collection time progress. The complete drive is represented by the ideal current generator i_c for which the following requirements apply.

For the purpose of modelling, a torque-controlled traction drive was assumed in addition to the reference torque value T_{rif}^* , set by the driver and maintained constant during the transient object of the study. It was additionally assumed, based on previous experiences (see [10]), that the

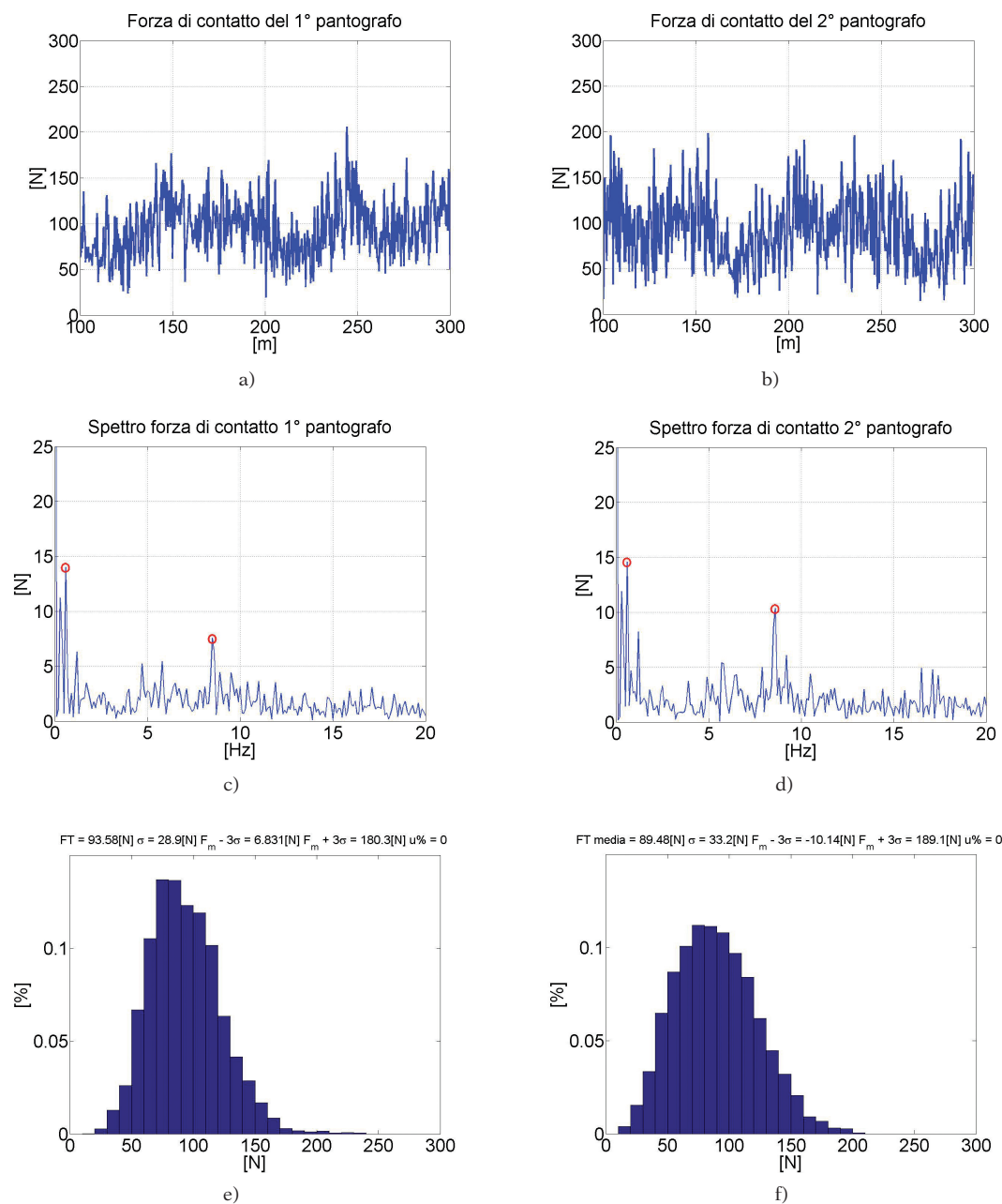


Fig. 6 - Risultati della simulazione a velocità pari a 110 km/h: a) e b) Andamento della forza di contatto del primo pantografo e del secondo pantografo in funzione della posizione del treno; c) e d) Spettro delle forze di contatto dei due pantografi; e) ed f) Istogrammi delle forze di contatto dei due pantografi. *Simulation results at a speed equal to 110 km/h: a) and b) Progress of the contact force of the first and second pantograph as a function of the train's position; c) and d) Spectra of the two pantographs' contact forces; e) and f) Histograms of the two pantographs' contact forces.*

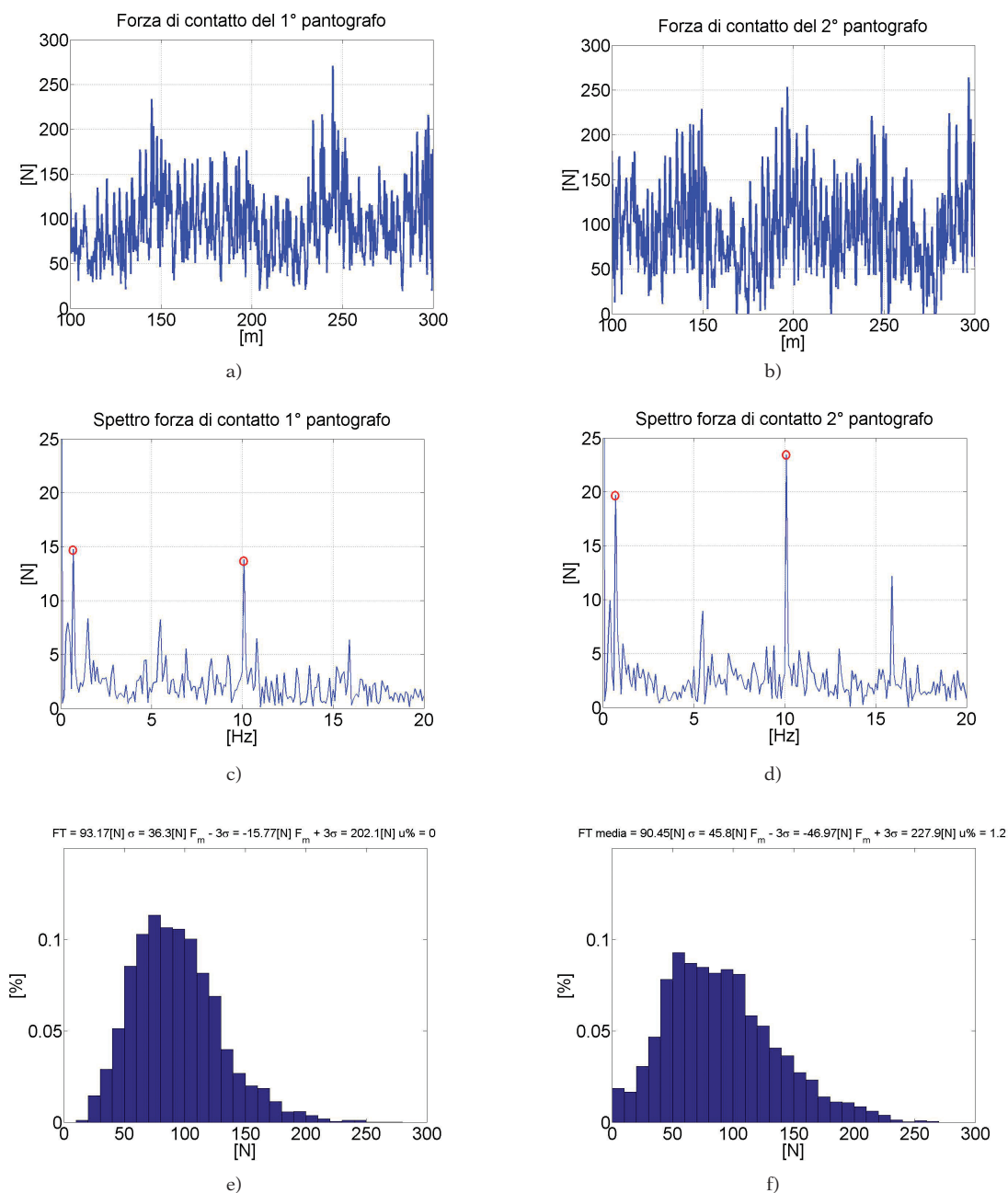


Fig. 7 - Risultati della simulazione a velocità pari a 130 km/h: a) e b) Andamento della forza di contatto del primo pantografo e del secondo pantografo in funzione della posizione del treno; c) e d) Spettro delle forze di contatto dei due pantografi; e) ed f) Istogrammi delle forze di contatto dei due pantografi. *Simulation results at a speed equal to 130 km/h: a) and b) Progress of the contact force of the first and second pantograph as a function of the train's position; c) and d) Spectra of the two pantographs' contact forces; e) and f) Histograms of the two pantographs' contact forces.*

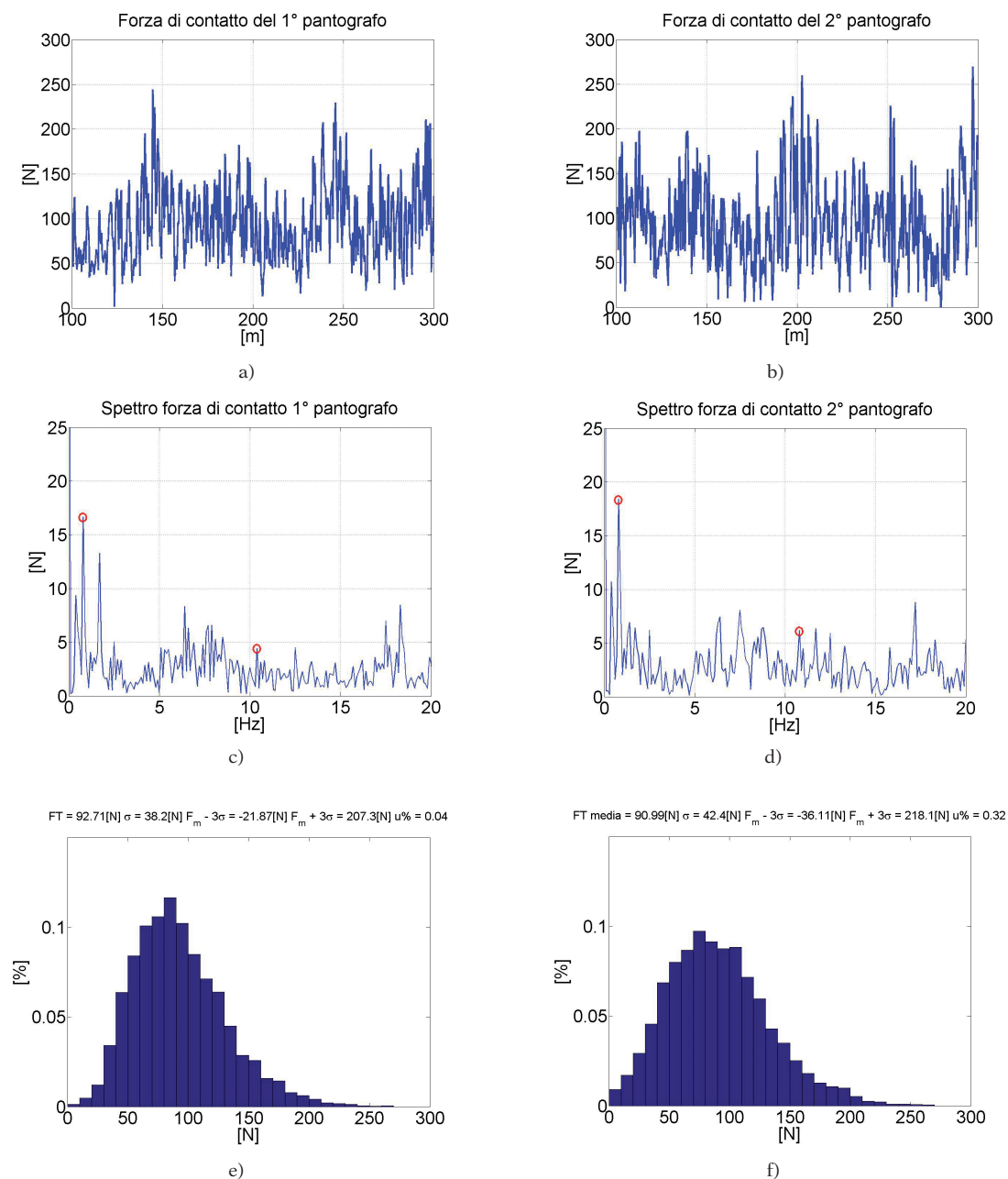


Fig. 8 - Risultati della simulazione a velocità pari a 150 km/h: a) e b) Andamento della forza di contatto del primo pantografo e del secondo pantografo in funzione della posizione del treno; c) e d) Spettro delle forze di contatto dei due pantografi; e) ed f) Istogrammi delle forze di contatto dei due pantografi. *Simulation results at a speed equal to 150 km/h: a) and b) Progress of the contact force of the first and second pantograph as a function of the train's position; c) and d) Spectra of the two pantographs' contact forces; e) and f) Histograms of the two pantographs' contact forces.*

contatto durante il distacco. Tale grandezza verrà usata per calcolare, attraverso il modello nel seguito descritto, la caduta di tensione al contatto durante il distacco. A titolo d'esempio, si riporta in fig. 9 l'andamento temporale della distanza massima tra i due archetti del secondo pantografo ed il filo di contatto nel caso di velocità del treno pari a 130 km/h (la figura mostra che il distacco dei due archetti di uno stesso pantografo non è sempre contemporaneo).

3. Modello matematico per lo studio della dinamica del sistema elettrico

La dinamica del sistema elettrico, limitatamente al breve intervallo di tempo in cui si manifesta un brusco deterioramento della captazione, è stata studiata attraverso il modello mostrato in fig. 10. Si ammette quindi che il treno proceda alla velocità u_t e che l'azionamento elettrico sia alimentato, tramite il filtro di ingresso LC , da una catenaria a tensione $V = 3 \text{ kV cc}$ e sia dotato di un apparato di protezione PA dagli effetti indesiderati delle correnti armoniche in grado di agire o sul controllore dell'azionamento (nel senso di ridurne le prestazioni) oppure (nel caso che gli effetti siano persistenti) aprendo l'interruttore IR.

La caduta dinamica di tensione al contatto è stata modellata con un generatore di tensione v_a variabile in relazione alla evoluzione temporale della captazione di corrente. L'intero azionamento è rappresentato dal generatore ideale di corrente i_c per il quale valgono le precisazioni nel seguito esposte.

Agli effetti della modellazione si è ammesso che l'azionamento di trazione sia controllato in coppia e che il riferimento di coppia T_{rif}^* , imposto dal macchinista, sia mantenuto costante durante il transitorio oggetto di studio. Si ammette ancora, in base a precedenti esperienze (si veda la [10]), che il controllore sia progettato in modo da variare automaticamente il riferimento di coppia T_{rif} al variare della tensione v_c ai morsetti del condensatore C in conformità alla 1a), dove v_{cn} è il valore nominale della tensione sul condensatore. La 1a), trascurate le perdite, implica che la potenza P^* assorbita dall'azionamento (ai morsetti di C), vari come indicato nella 1b), dove Ω è la velocità angolare dei motori.

$$\begin{aligned} \text{a) } T_{rif} &= T_{rif}^* (v_c / v_{cn}) \\ \text{b) } P^* &= T_{rif} \Omega = T_{rif}^* (v_c / v_{cn}) \Omega = v_c i_c \\ \text{c) } i_c &= T_{rif}^* \Omega / v_{cn} \end{aligned} \quad (1)$$

In effetti, in assenza di questo provvedimento, la coppia erogata dall'azionamento sarebbe costante e pari a T_{rif}^* e questo comporterebbe, essendo costante la velocità angolare Ω dei motori di trazione durante i transitori esaminati, che la potenza P^* assorbita dall'azionamento sarebbe costante. Ne consegue che la corrente i_c erogata dal condensatore tenderebbe a crescere quando si riduce v_c contribuendo così a ridurre ulteriormente tale tensione.

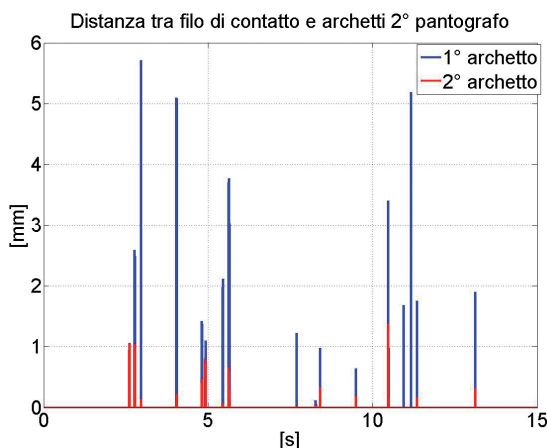


Fig. 9 - Andamento nel tempo della distanza massima tra i due archetti del secondo pantografo ed il filo di contatto durante il distacco nel caso di velocità del treno pari a 130 km/h. Time progress of the maximum distance between the two current-collector bows of the second pantograph and the contact wire during detachment in case of a train running speed equal to 130 km/h.

controller be designed in order to automatically vary the torque reference value T_{rif} upon variation of voltage v_c to the terminals of capacitor C in conformity to 1a), where v_{cn} is the nominal value on the capacitor. 1a) implies that, ignoring losses, power P^* demanded by the drive (on the terminals of C), varies as shown in 1b), where Ω is the motor angular velocity.

$$\begin{aligned} \text{a) } T_{rif} &= T_{rif}^* (v_c / v_{cn}) \\ \text{b) } P^* &= T_{rif} \Omega = T_{rif}^* (v_c / v_{cn}) \Omega = v_c i_c \\ \text{c) } i_c &= T_{rif}^* \Omega / v_{cn} \end{aligned} \quad (1)$$

In fact, in absence of this measure, the torque produced by the drive would be constant and equal to T_{rif}^* and this would determine, being the traction engines' angular velocity constant Ω during the transients examined, that power P^* demanded by the drive would be constant. It follows that the current i_c delivered by the capacitor would tend to increase when v_c decreases thus contributing to further reduce such voltage.

Thanks however to the measure taken in 1a) (or to other similar or more complex ones, see [11]) the cause of instability hereby outlined is removed because the current demanded by drive remains constant upon variation of v_c and equal to that shown in 1c). In conclusion, based on the previously outlined hypotheses, the entire drive is modelled with a current generator equal to that shown in 1c) (if the criteria employed for the dampening of the filter capacitor oscillations are different to that above described it is necessary to represent the drive with a different circuit equivalent

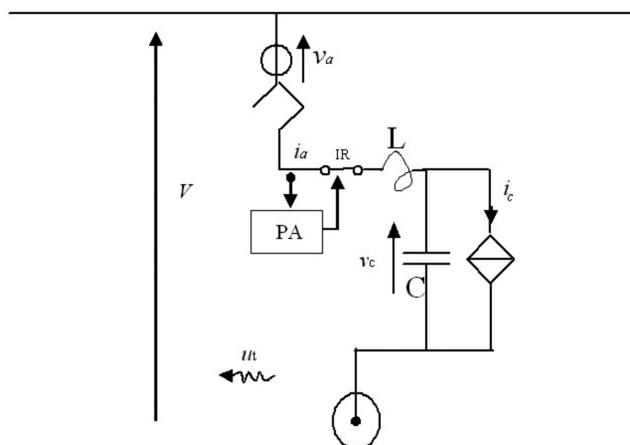


Fig. 10 - Modello dinamico ridotto (valido nell'intorno temporale di un brusco peggioramento della captazione) del sistema elettrico di un treno: v_a = caduta di tensione tra catenaria e pantografo; i_a = corrente captata; L, C = filtro di ingresso; v_c = tensione di ingresso dell'azionamento; i_c = generatore di corrente equivalente dell'azionamento. *Reduced dynamic model (valid in the short time period following a sharp collection deterioration) of a train's electrical system: v_a = voltage drop between catenary and pantograph, i_a = collected current; L, C = input filter; v_c = drive input voltage; i_c = current generator equivalent to drive.*

Grazie, invece, al provvedimento indicato nella 1a) (o di altri simili, oppure più complessi, si veda la [11]) la causa di instabilità ora delineata viene rimossa perché la corrente assorbita dall'azionamento è costante al variare di v_c e pari a quella indicata nella 1c). In conclusione, con le ipotesi prima indicate, l'intero azionamento viene modellato con un generatore di corrente pari a quella indicata nella 1c) (se i criteri impiegati per lo smorzamento delle oscillazioni del condensatore di filtro sono diversi da quello sopra descritto occorre rappresentare l'azionamento con un diverso circuito equivalente agli effetti esterni, ma questo non modifica la metodologia proposta).

Quanto all'apparato di protezione PA, si ammette che esso debba proteggere un sistema di segnalamento basato su blocchi codificati di correnti a 50Hz. In questo caso, tipicamente, PA sarà dotato di un filtro passa banda (ad esempio nella banda di frequenze tra 47 Hz e 52 Hz) e genererà un segnale che (secondo modalità concordate tra il Gestore dell'infrastruttura ed il Gestore del trasporto) riduca le prestazioni del treno quando la corrente filtrata superi un primo limite (ad esempio 0,8 A) ed apra l'interruttore IR quando la corrente filtrata superi un limite più alto (ad esempio 1 A) per una durata opportuna di tempo (ad esempio 2,5 s).

Per quanto riguarda, infine, la caduta di tensione al contatto v_a la modellazione, in base alle sperimentazioni presentate nel successivo paragrafo 4.2, è diversa in relazione al fatto che vi sia o no un effettivo contatto tra catenaria ed almeno uno strisciante del generico pantografo j

to the external effects, but this does not change the methodology proposed).

As regards the protection system (PA), it is assumed that it should protect a signalling system based on 50Hz coded current blocks. In this case, typically, PA will be equipped with a pass band filter (for example in the frequency band between 47 Hz and 52 Hz) and will generate a signal which (according to modes agreed between the Infrastructure Operator and the Transport Operator) will reduce the performance of the train when the filtered current exceeds a first limit (for example 0.8 A) and opens the IR switch when the filtered current exceeds a higher limit (for example 1 A) for an appropriate time period (for example 2.5 sec.).

Finally, as regards the voltage drop on contact v_a , the modelling, based on experimentation presented in the following paragraph 4.2, is different in relation to the fact that an actual contact between catenary and at least one collector of the vehicle's generic pantograph j may take place or not. In the first case, the contact voltage between a collector and a catenary was calculated assimilating the contact itself to a resistor R_c as a function of the contact force F_c . If both collectors of the pantograph j are in contact the voltage v_{aj} is modelled as shown in the report (2) (where i_{aj} is the current collected by the pantograph j) because the collectors are in parallel.

$$v_{aj} = \frac{R_{c,j1}(F_{c,j1}) \cdot R_{c,j2}(F_{c,j2})}{R_{c,j1}(F_{c,j1}) + R_{c,j2}(F_{c,j2})} i_{aj} \quad (2)$$

In order to understand the scale of values it is necessary to consider that, for the pantograph utilised in the experimentation presented in the following paragraph 4.2, with a current $i_a = 200$ A and a speed $u_t = 100$ km/h the values specified in (3) apply.

$$\begin{cases} R_c = -(0.0042 \cdot F_c + 0.142) [\text{Ohm}] & \text{per } 0 < F_c \leq 30 \text{ N} \\ R_c = 0.019 [\text{Ohm}] & \text{per } F_c > 30 \text{ N} \end{cases} \quad (3)$$

Starting from the instant in which the last collector loses contact, an electric arc occurs and the voltage between catenary and pantograph is modelled by means of the external characteristic of the electric arc bipin-terminal (voltage v_a at the arc terminals as a function of the arc current i_a , of the distance x between the arc poles and speed u_t of the air which impacts upon the arc itself).

The external characteristic's model was identified experimentally by means of the modes discussed in the following paragraph 4.2.

del convoglio. Nel primo caso la tensione al contatto tra uno strisciante e la catenaria è stata calcolata assimilando il contatto stesso ad un resistore con resistenza R_c funzione della forza di contatto F_c . Se entrambi gli striscianti del pantografo j sono a contatto la tensione v_{aj} viene modellata come è indicato nella relazione (2) (dove i_{aj} è la corrente captata dal pantografo j) perché gli striscianti sono in parallelo.

$$v_{aj} = \frac{R_{c,j1}(F_{c,j1}) \cdot R_{c,j2}(F_{c,j2})}{R_{c,j1}(F_{c,j1}) + R_{c,j2}(F_{c,j2})} i_{aj} \quad (2)$$

Per cogliere gli ordini di grandezza occorre considerare che, per il pantografo impiegato nella sperimentazione presentata nel successivo par. 4.2, con una corrente $i_a = 200$ A e una velocità $u_t = 100$ km/h valgono i valori precisati nella (3).

$$\begin{cases} R_c = -(0.0042 \cdot F_c + 0.142) \text{ [Ohm]} & \text{per } 0 < F_c \leq 30 \text{ N} \\ R_c = 0.019 \text{ [Ohm]} & \text{per } F_c > 30 \text{ N} \end{cases} \quad (3)$$

A partire dall'istante in cui l'ultimo strisciante perde il contatto si manifesta un arco elettrico e la tensione tra catenaria e pantografo viene modellata tramite la caratteristica esterna del bipolo arco elettrico (tensione v_a ai morsetti dell'arco in funzione della corrente d'arco i_a , della distanza x tra i poli dell'arco e della velocità u_t dell'aria che investe l'arco stesso).

Il modello della caratteristica esterna è stato individuato sperimentalmente con le modalità discusse nel successivo paragrafo 4.2.

4. Prove sperimentali

Per lo studio dei fenomeni fisici, le prove sperimentali sono fondamentali sia per ottenere i valori dei principali parametri che caratterizzano il fenomeno oggetto di studio in base al modello adottato, sia per completare e/o validare il modello numerico stesso creato per riprodurre il fenomeno reale.

Lo scopo di questa parte del lavoro è lo studio della caduta di tensione tra catenaria e pantografo sia nel caso di contatto tra le due parti, sia nel caso di distacco e conseguente generazione di un arco elettrico.

Nel seguito la caduta di tensione verrà modellata tramite un opportuno resistore quando vi sia contatto tra le due parti. In proposito nei successivi paragrafi 4.1 e 4.2 si descriverà il banco prova striscianti utilizzato per eseguire l'identificazione sperimentale della resistenza elettrica al contatto. Il successivo paragrafo 4.3 presenterà poi il dispositivo realizzato per studiare la caratteristica esterna dell'arco tra catenaria e pantografo impiegata per rappresentare la caduta di tensione v_a nel caso di distacco.

4. Experimental tests

Experimental testing is fundamental for the study of physical phenomena, both as a means to obtain the values of the main parameters which characterise the phenomenon object of the study based on the model adopted, and as a means to complete and/or validate the numeric model itself, developed to reproduce the real phenomenon.

The aim of this part is to investigate the voltage drop between catenary and pantograph both in the case of contact between the two parts and in the case of detachment and consequent generation of an electric arc.

In the following paragraphs the voltage drop will be modelled by means of a suitable resistor when there is contact between the two parts. With regards to this point, the following paragraphs 4.1 and 4.2 describe the collector test bench employed to carry out the experimental identification of the electric contact resistance. The following paragraph 4.3 will then present the device developed to study the arc's external characteristic between catenary and pantograph employed to represent the voltage drop v_a in case of contact loss.

4.1. The Collector Test Bench

A fundamental parameter required to study the electromechanical contact between collector and wire is the electric contact resistance as a function of the contact force. For this aim, experimental tests were conducted utilising the Collector Test Bench (BPS), designed and developed by the researchers of the Department of Mechanics of the Polytechnic of Milan [12-14] in use since several years for study activities on collector and contact wire wear. The characteristics of the BPS have been previously outlined in this magazine in [12]. A summarised description of the test bench will however be provided below.

The BPS (fig. 11a, b) allows trials of pantograph collectors (or of a complete pantograph) up to a speed of 200 Km/h and with an electric current level on contact up to 1200 A in direct current (DC), 500 A in alternate current (AC) at 16_{2/3} Hz and 350 A in AC current at 50 Hz. The main element of the test bench is a fibreglass resin disc with a 4m diameter, rotating around its own vertical axis. The disc's circumference is coupled elastically to a contact wire. A 90kW asynchronous motor rotates the disc by means of a trapezoidal belt transmission system.

The pantograph collector is mounted by means of two suspensions on a platform which can move in a radial direction in relation to the fibreglass disc in order to reproduce the contact wire staggering effect.

A displacement-controlled hydraulic actuator allows setting of a static pre-load between the collector and contact wire.

A ventilation apparatus directs the airflow towards the

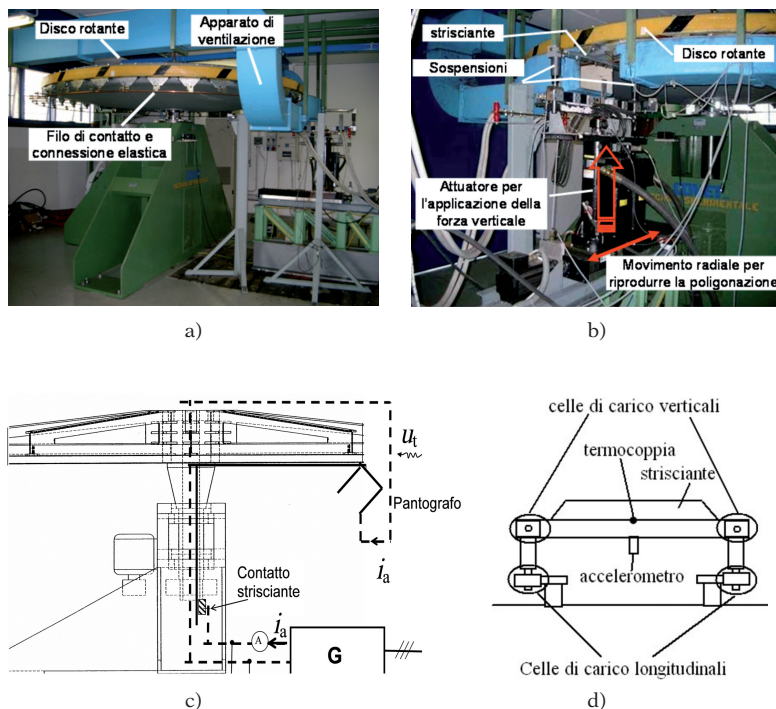


Fig. 11 - a, b) banco prova striscianti; c) circuito elettrico del banco; d) schema della disposizione dei sensori sullo strisciante. a, b) slipper test bench; c) bench electric circuit; d) diagram of sensor disposition over the slipper.

4.1. Il Banco Prova Striscianti

Un parametro fondamentale per studiare il contatto elettromeccanico tra striscianti e filo è la resistenza elettrica al contatto in funzione della forza di contatto. A tal fine, sono state eseguite prove sperimentali utilizzando il Banco Prova Striscianti (BPS), progettato e sviluppato dai ricercatori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano [12-14] in uso da diversi anni per attività di studio dell'usura degli striscianti e del filo di contatto. Le caratteristiche del BPS sono già state descritte in questa stessa rivista in [12]. Viene comunque di seguito riproposta in forma sintetica la descrizione del banco.

Il BPS (fig. 11a, b) permette di provare striscianti di pantografo (o un pantografo completo) fino alla velocità di 200 km/h e con un livello di corrente elettrica al contatto fino a 1200 A in corrente continua (c.c.), 500 A in corrente alternata (c.a.) 16_{2/3} Hz e 350 A in c.a. 50 Hz. L'elemento principale del banco prova è un disco in vetroresina di diametro pari a 4 m, rotante intorno al proprio asse verticale. Sulla circonferenza del disco è collegato elasticamente un filo di contatto. Un motore asincrono da 90 kW mette in rotazione il disco attraverso una trasmissi-

contact area at the same disc peripheral speed u_t in order to reproduce the thermal exchange between collector and airflow impacting on the pantograph.

The test bench electric diagram is illustrated in fig. 11c. The current i_a , supplied by the power supply G (and measured by the ammeter A), is transmitted by means of a collector contact (see the contact brushes/ring collector ensemble in fig. 11c) to a conductor (drawn as a continuous line in fig. 11c) that is integral with the disc's shaft. This conductor in the upper part of the disc branches out radially, in a symmetric way, within a bunch of conductors connected to the elastic suspensions of the contact wire.

The current is collected by one of the pantograph's collectors from which it is transmitted to a conductor, fixed in space, drawn as a dashed line in Figure 11c. This conductor passes through the hollow shaft of the disc closing at the power supply G (this constructional solution was preferred

as opposed to closing the current directly in output from the collector on G , in order to limit the electromagnetic emissions of the coil supplied by G). A voltmeter V measures the contact voltage v_a at the terminals of G , not including the voltage drop on the brushes.

Fig. 12 illustrates the electric diagram of the power supply G .

In order to generate a current on contact in AC (at 50 Hz or 16_{2/3} Hz) or in DC, a static low voltage converter is utilised. This is supplied by a three-phase industrial voltage (380 V – 50 Hz) which is converted into DC by means of a diode bridge and filtered with a capacitor filter. The direct voltage thus obtained is applied to a three-phase IGBT inverter. The three-phase inverter is capable of setting an AC or DC current on the circuit involving the collector by means of two control strategies and a circuit configuration change.

In case of AC (fig. 12a) the three-phase inverter is connected to a delta-connected three-phase reactance. The circuit, inclusive of the collector, is inserted into a side of the delta connection.

In order to set a sinusoidal AC current i_t of the desired

sione a cinghie trapezoidali.

Lo strisciante di pantografo è montato attraverso due sospensioni ad una piattaforma che si può muovere in direzione radiale rispetto al disco in vetroresina con lo scopo di riprodurre l'effetto della poligonazione.

Un attuttore idraulico, controllato in spostamento, permette di imporre il precarico statico tra lo strisciante ed il filo di contatto.

Un apparato di ventilazione voglia un flusso d'aria nella zona di contatto alla stessa velocità periferica u_t del disco al fine di riprodurre lo scambio termico tra lo strisciante e il flusso d'aria che investe il pantografo.

Lo schema elettrico del banco prova è riportato in fig. 11c. La corrente i_a , fornita dall'alimentatore G (e misurata dall'amperometro A), viene trasmessa mediante un contatto strisciante (si veda nella fig. 11c l'insieme spazzole/collettore ad anello) ad un conduttore (disegnato con linea continua nella fig. 11c) solidale con l'albero del disco. Questo conduttore nella parte superiore del disco si dirama radialmente, in modo simmetrico, in un insieme di conduttori ordinatamente collegati alle sospensioni elastiche del filo di contatto. La corrente viene captata da uno strisciante del pantografo (il contatto è investito da un getto di aria a velocità u_t) e da questo viene trasmessa ad un conduttore, fisso nello spazio, indicato con linea tratteggiata nella fig. 11c. Questo conduttore passa all'interno dell'albero (che è cavo) del disco e si richiude sull'alimentatore G (si è preferita questa soluzione costruttiva, piuttosto che chiudere direttamente la corrente in uscita dallo strisciante su G, allo scopo di limitare le emissioni elettromagnetiche della spira alimentata da G). Ai morsetti di G un voltmetro V misura la tensione v_a al contatto a meno della caduta di tensione alle spazzole.

Nella fig. 12 viene presentato lo schema elettrico dell'alimentatore G.

Per generare una corrente al contatto in c.a. (a 50 Hz o 16_{2/3} Hz) o in c.c. si utilizza un convertitore statico in bassa tensione. Esso è alimentato con una tensione industriale trifase (380 V – 50 Hz) che viene convertita in c.c. attraverso un ponte a diodi e filtrata con un filtro a condensatori. La tensione continua così ottenuta viene applicata ad un inverter trifase a IGBT. L'invertitore trifase mediante due strategie di controllo e un cambio di configurazione circuitale è in grado di imporre al circuito che coinvolge lo strisciante una corrente alternata o una corrente continua.

Nel caso della alternata (fig. 12a) l'inverter trifase è collegato ad una reattanza trifase connessa a triangolo. In

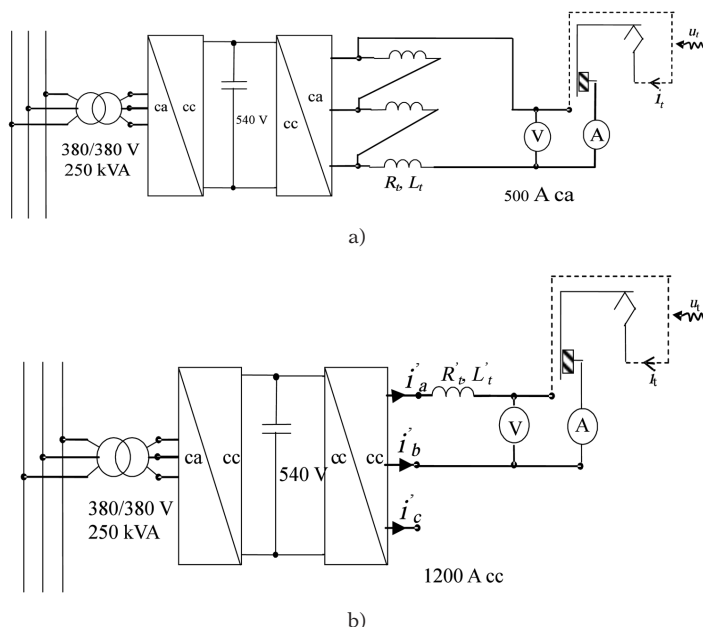


Fig. 12 - Struttura dell'alimentatore G: a) configurazione con uscita in c.a. (R_t , L_t rappresentano rispettivamente la resistenza e l'induttanza di una fase dell'induttore trifase); b) configurazione con uscita in c.c. Structure of the power supply G: a) configuration with an AC output (R_t , L_t respectively represent resistance and inductance of a single phase of the three-phase inductor); b) configuration with a DC output.

amplitude and frequency, a balanced three-phase current is set in the reactance connected to the inverter. Considering the contact impedance negligible in respect of the impedance \bar{Z} of a single phase of the three-phase reactor ($\bar{Z} = R_t + j\omega L_t$), setting a balanced three-phase line current system in the three-phase load corresponds to setting three balanced phase currents in the delta-connection sides (including the current of interest) ([13]).

The current control acts according to the well known vector control techniques and three-phase "Space Vector" type PWM modulation techniques commonly used in the industrial converter world [15].

The direct current case is managed by the generator G as a special case of alternating current. Considering direct current, in fact, as an alternating current with zero frequency and considering that there is an instant in the balanced three-phase current system i'_a, i'_b, i'_c in which $i'_a = -i'_b$ and $i'_c = 0$, the control will come into function setting a direct current equal and opposed between the phases a e b and equal to zero in phase c. This condition is a special case in a three-phase system. As the phase current is equal to zero in phase c, the circuit is modified as in fig.12b in which it is sufficient to employ a single phase reactance R'_t, L'_t , instead of a three-phase reactance, as a filtering load.

un lato del triangolo viene inserito il circuito comprensivo dello striscante.

Al fine di imporre una corrente alternata sinusoidale i_t di ampiezza e frequenza desiderata si agisce imponendo una corrente trifase equilibrata alla reattanza collegata all'inverter. Considerando trascurabile l'impedenza del contatto rispetto alla impedenza \bar{Z} di una fase del reattore trifase ($\bar{Z}=R_t+j\omega L_t$), imporre un sistema trifase equilibrato di correnti di linea al carico trifase corrisponde ad imporre tre correnti equilibrate di fase nei lati del triangolo (tra cui la corrente di interesse) ([13]).

Il controllo di corrente agisce secondo le ben note tecniche di controllo fasoriale e di modulazione PWM trifase di tipo "Space Vector" comuni nel mondo dei convertitori industriali [15].

Il caso della corrente continua è gestito dal controllo del generatore G come un caso particolare della corrente alternata. Infatti considerando la corrente continua come una alternata a frequenza nulla e considerando che esiste un istante nel sistema equilibrato di correnti trifase i'_a, i'_b, i'_c in cui $i'_a = -i'_b$ e $i'_c = 0$, il controllo agirà imponendo una corrente continua uguale ed opposta tra le fasi a e b e nulla nella fase c . Situazione che è un caso particolare di un sistema trifase. Essendo nulla la corrente nella fase c il circuito è modificato come in fig. 12b in cui è sufficiente impiegare come carico filtrante un reattore monofase R'_t, L'_t anziché trifase.

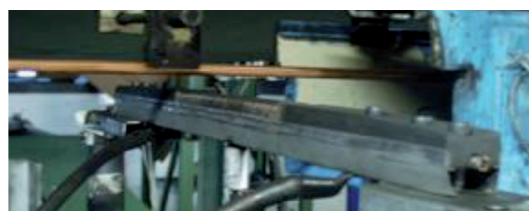
Il sistema di misura del BPS permette di misurare, oltre alla corrente i_a ed alla tensione al contatto v_a , anche le forze verticali F_c e longitudinali F_t al contatto e l'accelerazione verticale e la temperatura dello striscante durante la prova. Tali misure sono eseguite attraverso quattro cel-

The BPS's measuring system, as well as allowing measurement of current i_a and the contact voltage v_a , also allows measurement of the vertical and longitudinal contact forces F_c and F_t respectively and the vertical acceleration and collector temperature during the test. Such measurements are conducted through four load cells, an accelerometer and a thermocouple positioned according to the diagram shown in fig. 11d.

4.2. Experimental assessment of the electrical contact resistance

Several tests were conducted on the current collection test bench with the aim of identifying a relation between the electrical contact resistance R_c and the contact force F_c between collector and wire. In particular, these tests were performed in direct current (as the analysis of this issue concerns the Italian railway network which runs at 3 kV DC) on both graphite and Kasperovski collectors, composed of a main volume of graphite placed in a copper shell (fig. 13).

The tests were conducted varying the average contact force between collector and wire at the speed $u_t = 100$ Km/h and applying an electric contact current $i_a = 200$ A DC. During the tests, the vertical forces (according to the diagram illustrated in fig. 11d), the voltage v_a and the contact current i_a were measured. The electrical contact resistance was calculated as a ratio between contact voltage and current: $R_c = v_a / i_a$. The instant value of the electrical contact resistance calculated was therefore correlated to the contact force measured in correspondence with the same acquisition instant. The dispersion of experimental points is detailed in fig. 14.



a)



b)

Fig. 13 - a) Striscante in grafite; b) striscante Kasperovski. a) Graphite collector; b) Kasperovski collector.

le di carico, un accelerometro e una termocoppia disposte secondo lo schema riportato in fig. 11d.

4.2. Determinazione sperimentale della resistenza elettrica al contatto

Sono state eseguite diverse prove al banco prova striscanti con lo scopo di ottenere una relazione tra la resistenza elettrica al contatto R_c e la forza di contatto F_c tra

As it can be noted, it is possible to highlight two areas. The first area (high values of F_c) is characterised by instant values of electrical contact resistance belonging to distributions with an average value which is constant or slightly decreasing in relation to the contact force. Such values are very low and do not influence the phenomena object of the present study. In case of the graphite collector, the first area is located in the interval of contact force values greater than 30 N, whilst in case of the Kasperovski collector it is

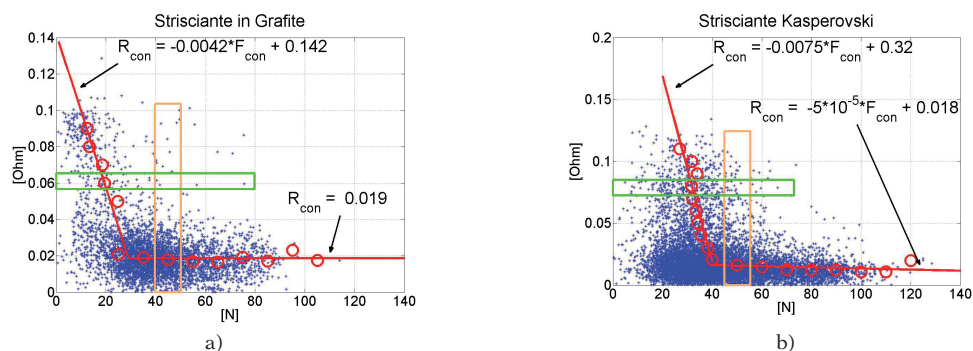


Fig. 14 - Resistenza elettrica al contatto in funzione della forza di contatto tra strisciante e filo di contatto: a) strisciante in grafite; b) strisciante Kasperovski. *Electrical contact resistance as a function of the contact force between slipper and contact wire: a) graphite collector; b) Kasperovski collector.*

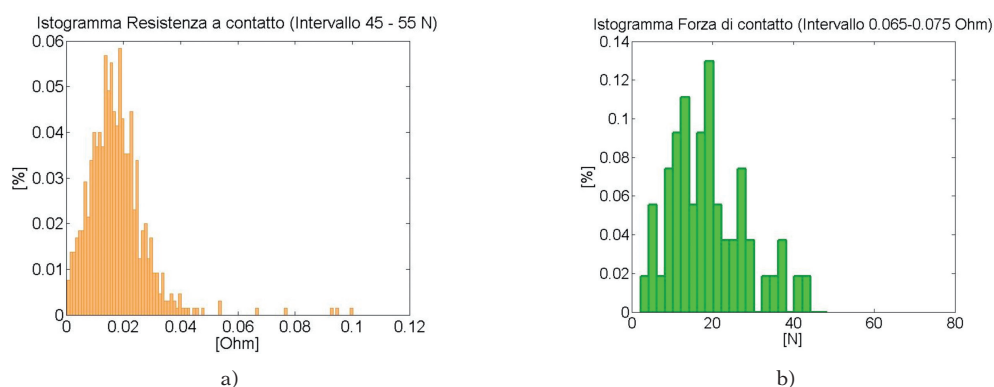


Fig. 15 - Strisciante in grafite: a) istogramma della variazione della resistenza elettrica al contatto nel sotto-intervallo 45-55 N di forza di contatto; b) istogramma della variazione della forza di contatto nel sotto-intervallo 0.065 – 0.075 Ohm di resistenza elettrica al contatto. *Graphite collector: a) histogram of the variation in electric contact resistance in the sub-interval 45-55 N of the contact force; b) histogram of the variation in contact force in the sub-interval 0.065 – 0.075 Ohm of electrical contact resistance.*

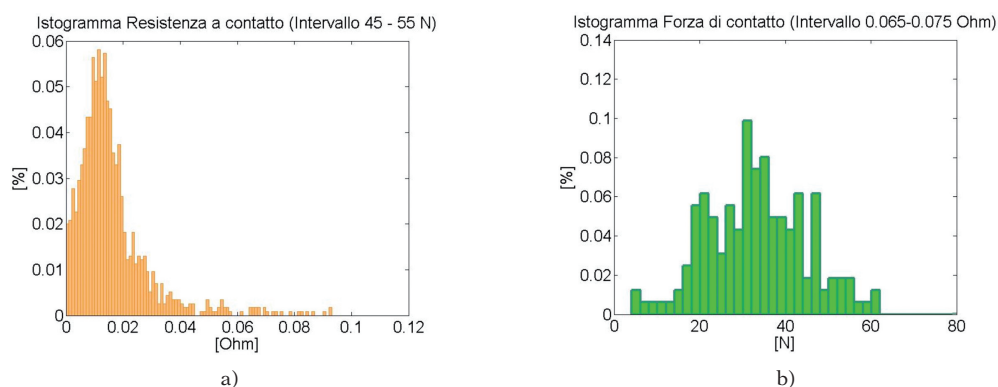


Fig. 16 - Strisciante Kasperovski: a) istogramma della variazione della resistenza elettrica al contatto nel sotto-intervallo 45-55 N di forza di contatto; b) istogramma della variazione della forza di contatto nel sotto-intervallo 0.065 – 0.075 Ohm di resistenza elettrica al contatto. *Kasperovski collector: a) histogram of the variation in electric contact resistance in the sub-interval 45-55 N of the contact force; b) histogram of the variation in contact force in the sub-interval 0.065 – 0.075 Ohm of electrical contact resistance.*

strisciante e filo. In particolare, tali prove sono state eseguite in corrente continua (in quanto l'analisi del problema riguarda la rete ferroviaria italiana a 3 kV c.c.) su striscianti in grafite e su striscianti Kasperovski, composti da un volume principale di grafite posto in un involucro di rame (fig. 13).

Le prove sono state eseguite variando la forza di contatto media tra strisciante e filo alla velocità $u_t = 100$ km/h e applicando una corrente elettrica al contatto $i_a = 200$ A c.c. Durante le prove sono state misurate le forze di contatto verticali (secondo lo schema riportato in fig. 11d), la tensione v_a e la corrente i_a al contatto. La resistenza elettrica al contatto è stata calcolata come rapporto tra la tensione e la corrente al contatto: $R_c = v_a / i_a$. Il valore istantaneo calcolato di resistenza elettrica al contatto è stato quindi correlato alla forza di contatto misurata in corrispondenza dello stesso istante di acquisizione. La dispersione dei punti sperimentali è stata riportata nella fig. 14.

Come è possibile notare si possono evidenziare due zone. La prima zona (alti valori di F_c) è caratterizzata da valori istantanei di resistenza elettrica al contatto appartenenti a distribuzioni con un valore medio costante o poco decrescente con la forza di contatto. Tali valori sono molto bassi e non influenti i fenomeni oggetto di studio del presente lavoro. Per lo strisciante in grafite la prima zona si trova nell'intervallo di valori di forza di contatto maggiori di 30 N, mentre per lo strisciante Kasperovski essa è relativa ai valori di forza di contatto maggiori di 40 N.

In questa prima zona i punti sperimentali sono stati raggruppati in sotto-intervalli di 10 N e per ognuno di essi è stato calcolato il valore medio della distribuzione statistica della resistenza elettrica al contatto. Per i due tipi di strisciante in grafite e Kasperovski, in fig. 15a e 16a si riporta a titolo di esempio la distribuzione dei valori nell'intervallo 45-55 N corrispondenti ai punti sperimentali evidenziati nel rettangolo verticale delle fig. 14a e b. La variabilità dei valori di resistenza elettrica è associabile alla dinamica locale del contatto tra strisciante e filo.

I valori medi calcolati, indicati nelle fig. 14a e b con cerchi rossi, sono quindi stati utilizzati per ottenere l'equazione della retta interpolante secondo il metodo dei minimi quadrati.

La seconda zona (bassi valori di F_c nelle fig. 14a e b) è caratterizzata da un andamento fortemente crescente della resistenza elettrica al contatto al diminuire della forza di contatto.

Diversamente dal caso della prima zona, per la seconda ($F_c < 30$ N o 40 N) si è suddiviso l'intervallo di variazione della resistenza elettrica al contatto in sotto-intervalli di 0.01 Ohm e per ogni sotto-intervallo è stato calcolato il valore medio della distribuzione statistica della forza di contatto. A titolo di esempio, nelle fig. 15b e 16b si riporta la distribuzione della forza di contatto nell'intervallo di valori di resistenza elettrica tra 0.065 e 0.075 Ohm. Anche in questo caso, i valori medi delle distribuzioni di ciascun

relative to the contact force values greater than 40 N.

In this first area, the experimental points were grouped in sub-intervals of 10 N and for each of them the average value of the statistical distribution of the electrical contact resistance was calculated. Figures 15a and 16a detail, for example purposes, the distribution in the interval values 45-55 N corresponding to the experimental points highlighted in the vertical rectangle of fig. 14a and b for the two types of graphite and Kasperovski collectors. The variability of the electrical resistance values can be associated to the local dynamics of the contact between collector and wire.

The average values calculated shown in figures 14a and b highlighted with red circles, were therefore used to obtain the equation for the interpolating straight line according to the method of minimum squares.

The second area (low values of F_c in figures 14a and b) is characterised by a strongly increasing progress of the electrical contact resistance as the contact force decreases.

Unlike the case of the first area, for the second area ($F_c < 30$ N or 40 N) the variation interval of the electrical contact resistance was divided into sub-intervals of 0.01 Ohm and for each sub-interval the average value of the contact force statistical distribution was calculated. As an example, figures 15b and 16b show the contact force distribution in the electrical resistance interval value between 0.065 and 0.075 Ohm. In this case also, the average values of distributions of each sub-interval were utilised to obtain the straight line interpolating equation according to the method of minimum squares.

In 3) the straight line interpolating equations for both above mentioned areas are reported; the straight lines are then illustrated in fig. 14.

As it is possible to note, for both areas the distributions show, though in the context of variability associated to the experimental conditions of local contact dynamics, a maximum value area to which it is possible to associate a representative value for each sub-interval.

4.3. Experimental determination of the external characteristic of the arc

When detachment (with train running at speed u_t) between catenary and pantograph occurs (with distance x in the order of millimetres between the last coupled collector and the catenary) an electric arc occurs, which is in series with the train power supply. In order therefore to be able to utilise the model in fig. 10 it is necessary to know the electric arc external characteristic (arc voltage v_a as a function of arc current i_a upon variation of x and u_t) and it is not possible to determine it using the collector test bench because with this apparatus (due to the inevitable imperfections of the wire suspensions) it is not possible to impose a pre-set and constant spacing x , between collector and contact wire.

sotto-intervallo sono stati utilizzati per ottenere l'equazione della retta interpolante secondo il metodo dei minimi quadrati.

Nella 3) sono riportate le equazioni delle rette interpolanti per entrambe le zone prima indicate; le rette sono poi state rappresentate nella fig. 14.

Come è possibile notare, per entrambe le zone, le distribuzioni mostrano, pur nella variabilità associata alle condizioni sperimentali di dinamica locale al contatto, una zona di massimo cui associare il valore rappresentativo di ciascun sottointervallo.

4.3. Determinazione sperimentale della caratteristica esterna dell'arco

Nel momento in cui (con treno che procede alla velocità u_t) si ha un distacco tra catenaria e pantografo (con distanza x dell'ordine dei millimetri tra l'ultimo strisciante in presa e la catenaria) si manifesta un arco elettrico, che risulta in serie alla alimentazione del treno. Per poter utilizzare allora il modello di fig. 10 occorre disporre della caratteristica esterna del bipolo arco elettrico (tensione d'arco v_a in funzione della corrente d'arco i_a al variare di x e di u_t) e questa non è determinabile avvalendosi del banco prova striscianti perché in tale apparato (per effetto delle inevitabili imperfezioni delle sospensioni del filo) non è possibile imporre un distanziamento x , prefissato e costante, tra strisciante e filo di contatto.

Si ammette nel seguito che la caratteristica esterna dell'arco che si manifesta in esercizio tra uno strisciante di pantografo, che procede alla velocità u_t , alla distanza x dal filo di catenaria, fisso e triangolato, è la stessa di quella che si manifesta tra due elettrodi fissi, di struttura corrispondente rispettivamente ad uno strisciante e ad un filo di contatto, a distanza x tra di loro, investiti da una corrente d'aria a velocità u_t .

In base a questa ipotesi è stato realizzato il dispositivo di misura della caratteristica esterna dell'arco presentato nella fig. 17. Il filo di contatto è collegato ad un attuatore pneumatico in grado di imprimergli uno spostamento x controllato rispetto ad uno strisciante sostenuto da celle di carico. I due elettrodi (filo di contatto/strisciante) vengono alimentati dal generatore G del banco prova striscianti prima presentato ed il banco così costituito è dotato di voltmetro ed amperometro con opportuna dinamica in grado di rilevare la caratteristica esterna oggetto di studio.

I transitori realizzati tramite il dispositivo ora presentato hanno il tipico andamento illustrato nella fig. 18:

- i due elettrodi, inizialmente a contatto (con forza di

It is below assumed that the arc's external characteristic occurring in operation conditions between a pantograph collector, running at a speed u_t at a distance x from the catenary wire, fixed and triangulated, is the same that occurs between two fixed electrodes, with a structure corresponding respectively to a collector and a contact wire, at a distance x from one another, impacted upon by an air current at a speed u_t .

Based on this hypothesis, a device for measuring the external characteristic of the arc was developed and is illustrated in fig. 17. The contact wire is connected to a pneumatic actuator capable of impressing a controlled displacement x with respect to a collector sustained by load cells. The two electrodes (contact wire/collector) are supplied by the generator G of the collector test bench outlined above and the bench so formed is equipped with voltmeter and ammeter with suitable dynamics capable of detecting the external characteristic object of the study.

The transients developed using the device hereby presented show the typical progress illustrated in fig. 18:

- The two electrodes, initially in contact (with a vertical contact force F_c measured by two load cells), are supplied by G with a current i^* and impacted upon by air at a speed u_t ;
- At instant t_0 the pneumatic actuator distances the two electrodes (between which an arc occurs) bringing them to the pre-set distance x at instant t_a ;

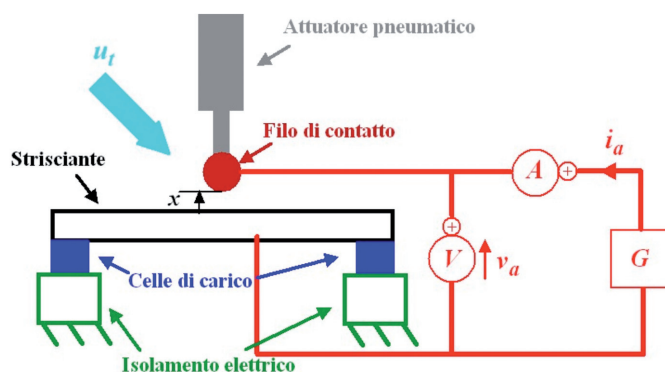


Fig. 17 - Dispositivo per la misura della caratteristica esterna dell'arco. Device for the measurement of the arc's external characteristic.

- In the time interval $t_a < t < t_b$ the arc evolves freely, until it self-extinguishes at instant t_b , in relation to its own external characteristic and the external characteristic of the generator G .

The tests were conducted setting the following test parameters: $i_a = 100, 200, 300$ A, $x = 1, 2, 3$ mm, $u_t = 100, 200, 300$ Km/h and recording the voltage v_a and the arc current i_a in the time interval $t_a < t < t_b$.

contatto verticale F_c misurata attraverso due celle di carico), sono alimentati da G con una corrente i^* ed investiti da aria a velocità u_i ;

- all'istante t_0 l'attuatore pneumatico distanzia i due elettrodi (tra i quali si manifesta un arco) portandoli alla distanza prefissata x all'istante t_a ;
- nell'intervallo di tempo $t_a < t < t_b$ l'arco evolve liberamente, fino ad estinguersi nell'istante t_b , in relazione alla sua caratteristica esterna ed alla caratteristica esterna del generatore G.

Le prove sono state eseguite imponendo i seguenti valori dei parametri di prova: $i_a = 100, 200, 300$ A, $x = 1, 2, 3$ mm, $u_i = 100, 200, 300$ km/h e registrando tensione v_a e corrente i_a d'arco nell'intervallo di tempo $t_a < t < t_b$.

Nella fig. 19 sono riportati alcuni risultati sperimentali e precisamente la tensione d'arco v_a in funzione della corrente normalizzata d'arco i_a^* (per normalizzare la corrente per ogni prova si è assunto come corrente base il valore iniziale i^* della corrente d'arco: la corrente normalizzata impiegata nei successivi diagrammi è quindi $i_a^* = i_a / i^*$), con velocità del flusso d'aria $u_i = 100$ km/h e distanza x tra gli elettrodi pari rispettivamente a 1, 2 e 3 mm (si è constatato che la forza di contatto F_c esistente prima del distacco non influenza i fenomeni). Nella stessa figura è riportata, per ogni caso, la retta interpolante i punti sperimentali, ricavata con il metodo dei minimi quadrati: nel seguito si assume che questa retta costituisca il modello matematico della caratteristica esterna dell'arco.

Nella fig. 20 sono riportate le caratteristiche esterne, valutate facendo variare uno solo dei tre parametri i^* , x , u_i . È possibile notare che la velocità del flusso d'aria u_i è il parametro che (per valori superiori a 100 km/h) modifica la pendenza della retta interpolante in modo più significativo.

Sulla base dei risultati trovati viene proposto come modello matematico della caratteristica esterna dell'arco $v_a = v_a(i_a^*, x, u_i)$ la funzione indicata nella relazione (4), valida per $0 < i_a^* < 1$.

$$V_a = v_0(i^*, x, u_i) + [v_s - v_0(i^*, x, u_i)] i_a^* \quad (4)$$

In questa relazione v_s rappresenta il valore di v_a in corrispondenza di $i_a^* = 1$, mentre $v_0(i^*, x, u_i)$ è il valore di v_a per $i_a^* = 0$. Dalle prove sopra menzionate, impiegando il metodo dei minimi quadrati, si è ricavato che la tensione $v_0(i^*, x, u_i)$ si può esprimere come indicato nella 5) (dove i valori di i^* , x , u_i sono, rispettivamente, in A, mm e km/h):

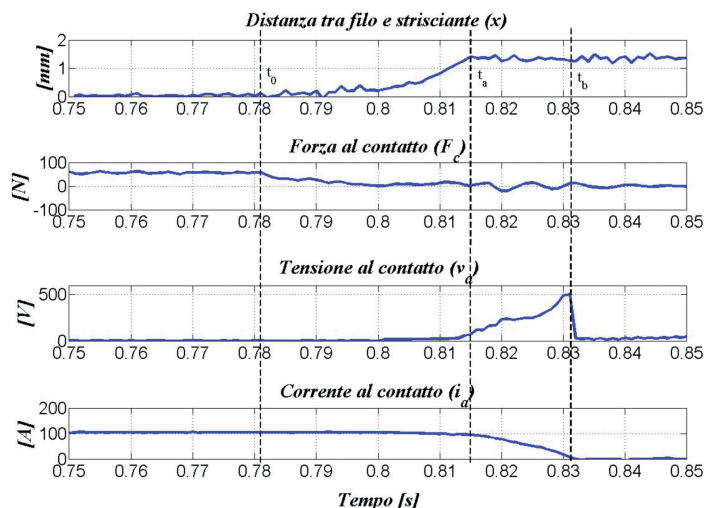


Fig. 18 - Andamenti temporali della distanza x tra striscante e spezzone di filo, della forza di contatto F_c , della tensione al contatto v_a e della corrente al contatto i_a durante una prova di generazione dell'arco elettrico. Time progress of the distance x between slipper and wire piece, of the contact force F_c , the contact voltage v_a and the contact current i_a during an arc generation test.

Fig.19 reports some experimental results and more precisely the arc voltage v_a as a function of the normalised arc current i_a^* (in order to normalise the current for each test the initial value i^* of the arc current was assumed as the base current: the normalised current employed in the following diagrams is therefore $i_a^* = i_a / i^*$), with speed of airflow $u_i = 100$ Km/h and distance x between electrodes equal to respectively 1, 2 and 3 mm (it was noted that the contact force F_c existing before detachment does not influence the phenomena). The same figure shows for each case, the straight line interpolating the experimental points, calculated with the minimum square method: it is assumed below that this straight line constitutes the mathematical model of the external characteristic of the arc.

Fig. 20 shows the external characteristics studied by varying only one of the three parameters i^* , x , u_i . It is possible to note that the airflow speed u_i is the parameter which (for values above 100 Km/h) changes the gradient of the interpolating straight line in the most significant way.

On the basis of results found, the function detailed in report (4) is proposed as a mathematical model of the external characteristic of the arc $v_a = v_a(i_a^*, x, u_i)$, valid for $0 < i_a^* < 1$.

$$V_a = v_0(i^*, x, u_i) + [v_s - v_0(i^*, x, u_i)] i_a^* \quad (4)$$

In this report v_s represents the value of v_a in correspondence of $i_a^* = 1$, whilst $v_0(i^*, x, u_i)$ is the value of v_a for $i_a^* = 0$. From the above mentioned tests, by utilising the

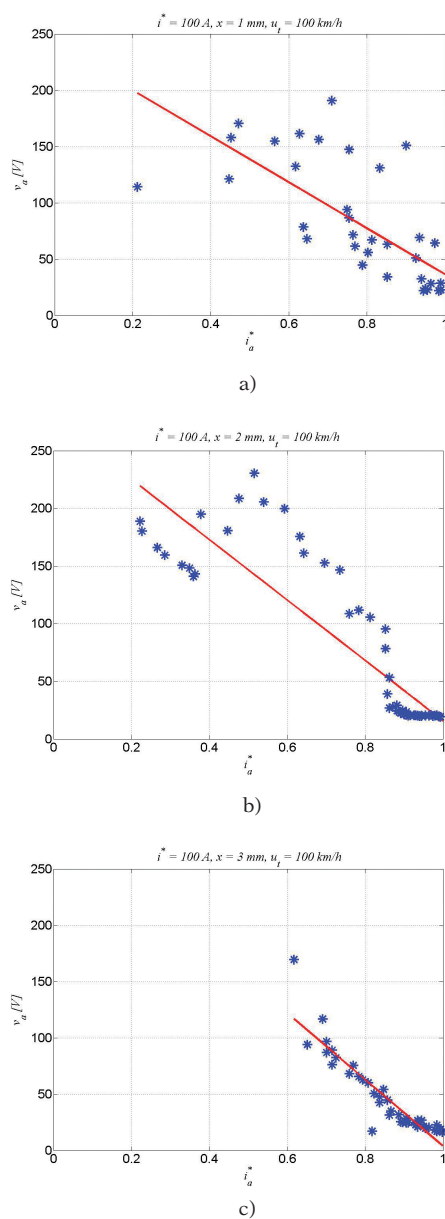


Fig. 19 - Andamento della tensione d'arco v_a al variare della corrente normalizzata i_a^* e corrispondente retta interpolante nel caso di corrente base $i^* = 100$ A, velocità del flusso $u_t = 100$ km/h distanza x tra strisciante e filo pari a 1 mm (a), 2 mm (b) e 3 mm (c). Progress of the arc voltage v_a upon variation of the normalised current i_a^* and corresponding interpolating straight line in case of base current $i^* = 100$ A, flow speed $u_t = 100$ Km/h, distance x between slipper and wire equal to 1 mm (a), 2 mm (b) and 3 mm (c).

minimum square method, it was established that the current v_0 (i^*, x, u_t) can be expressed as indicated in 5) (where values of i^*, x, u_t are, respectively, in A, mm and Km/h):

$$v_0(i^*, x, u_t) = 3u_t + 37x + 0.05i^* - 92 \quad (5)$$

The value v_s was calculated as the average value of the current values obtained in the nine cases analysed and reported in fig. 20 in correspondence of the current value $i_a^* = 1$. In this way it was found that $v_s \approx 15$ V.

The external characteristic was completed by adding a linear section representative of the arc's external characteristic discussed in paragraph 4) for high values of current ($1 < i_a^* < 5$): it was assumed that in this field of currents voltages decrease linearly until they drop to zero.

In conclusion fig. 21 shows the mathematical model of the arc voltage which is proposed for the preliminary calculations of the harmonic currents following the arcs caused by a sharp deterioration of current collection quality.

5. An application of the mathematical models proposed: current harmonics in a case of multiple current collection

The mathematical model of the electric system detailed in paragraph 3 (inclusive of the formulae for the contact resistance and the arc's external characteristic discussed in paragraph 4) was paired with the mathematical model of the pantograph-catenary interaction detailed in paragraph 2 thus obtaining a software package capable of providing the designer of the electric driving system with preliminary information on the harmonic content of the current collected when sharp variations in the quality of collection occur.

As an applied example, the software package was utilised to study the behaviour of the electric system constituted by the vehicle presented in Figure 22 (with $l = 52$ m., $V = 3$ kV d.c., $L = 35$ mH, $C = 1,8$ mF, $i^* = 163$ A, typical for a local transport train), using the hypotheses described in paragraph 2 (two pantographs with graphite collectors, catenary type A with two contact wires tensioned at a tensile strength of 7.5 kN).

With regards to the above, simulations were performed considering two different train speeds: 100 km/h and 130 km/h. Figures 23 and 24 show the time history of the current filtered through the pass band filter of the PA2 protection system of the second train respectively for train speeds of 100 km/h and 130 km/h. As it is possible to note, in the latter case, the second pantograph's filtered current exceeds the value of 0.8 A during the 15 seconds of the simulation considered. This result is due to the fact that (as shown in paragraph 2) the collection quality deteriorates when passing from a speed of 100 km/h to 130 km/h.

Fig. 25 illustrates the time history of the contact voltage drop for the second pantograph when the train speed

$$v_0(i^*, x, u_t) = 3u_t + 37x + 0.05i^* - 92 \quad (5)$$

Il valore di v_s è stato calcolato come valore medio dei valori di tensione ottenuti nei nove casi analizzati e riportati in fig. 20 in corrispondenza del valore di corrente $i_a^* = 1$. Si è trovato in questo modo che $v_s \approx 15$ V.

La caratteristica esterna è stata completata aggiungendo un tratto lineare rappresentativo della tensione d'arco per alti valori di corrente ($1 < i_a^* < 5$): si è assunto che in questo campo di correnti le tensioni diminuiscano linearmente fino ad annullarsi.

In conclusione la fig. 21 riporta il modello matematico della tensione d'arco che viene proposto per i calcoli preliminari delle correnti armoniche conseguenti agli archi dovuti ad un brusco peggioramento della qualità della captazione.

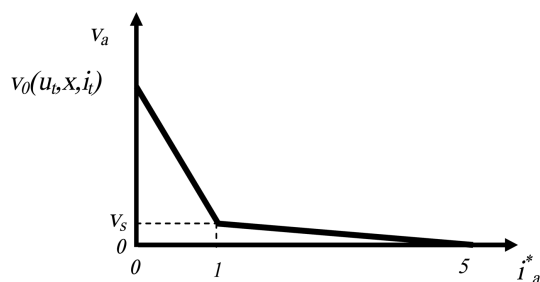


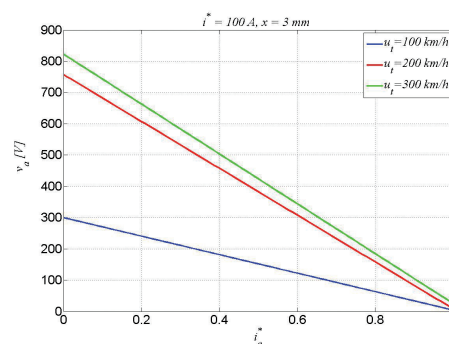
Fig. 21 - Caratteristica esterna semplificata dell'arco elettrico.
Simplified external characteristic of the electric arc.

5. Una applicazione dei modelli matematici proposti: armoniche di corrente in un caso di captazione multipla

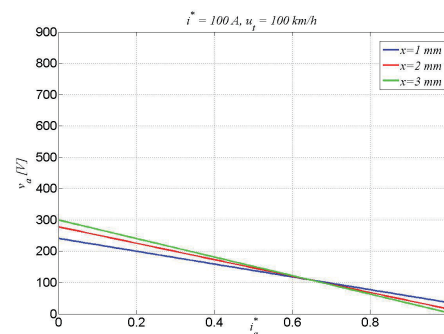
Il modello matematico del sistema elettrico presentato nel paragrafo 3 (completo delle espressioni della resistenza al contatto e della caratteristica esterna dell'arco discusse nel paragrafo 4) è stato abbinato al modello matematico dell'interazione pantografo-catenaria di cui al paragrafo 2 ottenendo in questo modo un pacchetto informatico in grado di fornire al progettista dell'azionamento elettrico informazioni preliminari sul contenuto armonico della corrente captata in presenza di brusche variazioni nella qualità della captazione.

Come esempio applicativo il pacchetto informatico è stato impiegato per studiare il comportamento del sistema elettrico costituito dal convoglio presentato nella fig. 22 (con $l = 52$ m, $V = 3$ kV c.c., $L = 35$ mH, $C = 1,8$ mF, $i^* = 163$ A, tipici di un treno per trasporto locale), con le ipotesi descritte nel paragrafo 2 (due pantografi con striscianti in grafite, catenaria tipo A con due fili di contatto tesati con un tiro pari a 7.5 kN).

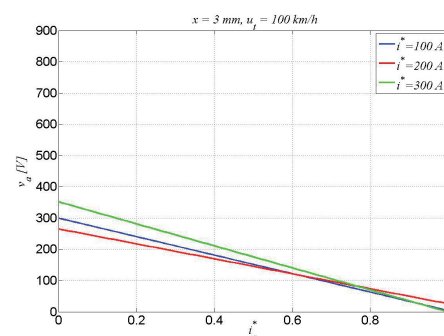
In proposito sono state eseguite delle simulazioni considerando due diverse velocità del treno: 100 km/h e 130



a)



b)



c)

Fig. 20 - Rette interpolanti i valori di tensione d'arco al variare della corrente normalizzata nel caso di: a) variazione della velocità del flusso d'aria; b) variazione della distanza tra striscante e filo di contatto; c) variazione della corrente nominale al contatto. Straight lines interpolating the arc voltage values upon variation of the normalised current in case of: a) variation of airflow speed; b) variation of the distance between slipper and contact wire; c) variation of the nominal contact current.

km/h. Le figg. 23 e 24 mostrano la storia temporale della corrente filtrata attraverso il filtro passa-banda del sistema di protezione PA2 del secondo treno rispettivamente per la velocità del treno di 100 km/h e per la velocità di 130 km/h. Come è possibile notare, nell'ultimo caso la corrente filtrata del secondo pantografo eccede il valore di 0.8 A durante i 15 secondi di simulazione considerati. Questo risultato è dovuto al fatto che (come si è mostrato nel paragrafo 2) la qualità di captazione peggiora passando dalla velocità di 100 km/h alla velocità di 130 km/h.

La fig. 25 riporta la storia temporale della caduta di tensione al contatto per il secondo pantografo quando la velocità del treno è pari a 130 km/h e la corrispondente distanza tra i due striscianti del secondo pantografo e il filo di contatto quando si ha il distacco.

Si nota che, in corrispondenza di un distacco contemporaneo dei due striscianti del secondo pantografo, si ha un incremento del modulo della corrente di trazione filtrata nel campo di frequenze $47 \div 52$ Hz e valori di caduta di tensione al contatto elevati. Nel caso simulato la regolarità di marcia sarebbe compromessa perché l'apparato di protezione PA ridurrebbe le prestazioni del veicolo (infatti la corrente filtrata supera il valore 0.8 A). In casi più critici, ma molto prossimi a quello simulato, l'apparato PA comanderebbe l'apertura dell'interruttore IR, bloccando così la corsa del convoglio.

6. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un modello elettromeccanico (insieme alle sperimentazioni che si sono rese necessarie per la definizione dei relativi parametri) in grado di quantificare le armoniche di corrente che si manifestano in presenza di un brusco peggioramento della qualità della captazione catenaria/pantografo. Il modello è stato applicato al caso di due pantografi in presa allo scopo di evidenziare che la modellistica proposta è in grado di fornire al progettista dell'azionamento di trazione soluzioni preliminari ad un problema fino ad ora non risolvibile in fase di progettazione: ottenere indicazioni sulla risposta dei dispositivi per la protezione degli impianti di segnalamento nelle condizioni più gravose di captazione, quando siano definiti i sistemi di protezione PA, di filtraggio e di controllo dell'azionamento. Si tratta di un problema evidenziato da precedenti esperienze progettuali [10] che in molti casi ha trovato soluzione tramite costose sperimentazioni in linea e/o sui circuiti di prova, a veicolo già costruito.

is equal to 130 km/h and the corresponding distance between the second pantograph's two collectors and the contact wire when detachment occurs.

In correspondence of a simultaneous detachment of the second pantograph's two collectors, an increase in the filtered traction current amplitude in the frequency field $47 \div 52$ Hz and high contact voltage drop values are observed. In the case simulated, regular running would be compromised because the protection system would impair performance of the vehicle (in fact the filtered current exceeds the value of 0.8 A). In more critical cases, yet very close to the case simulated, the protection system would command the opening of the IR switch, blocking the vehicle's running.

6. Conclusions

This study presents an electromechanical model (together with the experimentation necessary for the definition of relative parameters) capable of quantifying the current harmonics which occur in presence of a sharp deterioration of catenary/pantograph current collection quality. The model was applied to the case of two coupled pantographs with the aim of highlighting that the proposed modelling is capable of providing the traction drive designer with preliminary solutions to a problem which until now was not possible to resolve during the design phase: obtaining indications regarding feedback from signalling system protection devices in the most severe collection conditions, when the protection system, filtering and drive control systems are defined. This is a problem highlighted by previous design experiences [10] which in most cases was resolved by means of expensive in line experimentation and/or on test circuits using a fully built vehicle.

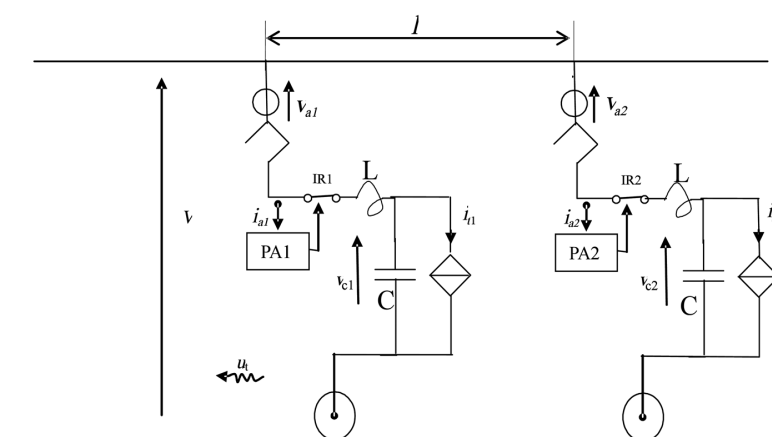


Fig. 22 - Esempio applicativo della modellistica elettromeccanica sviluppata nel presente lavoro.
Applied example of the electromechanical modelling developed for the present study.

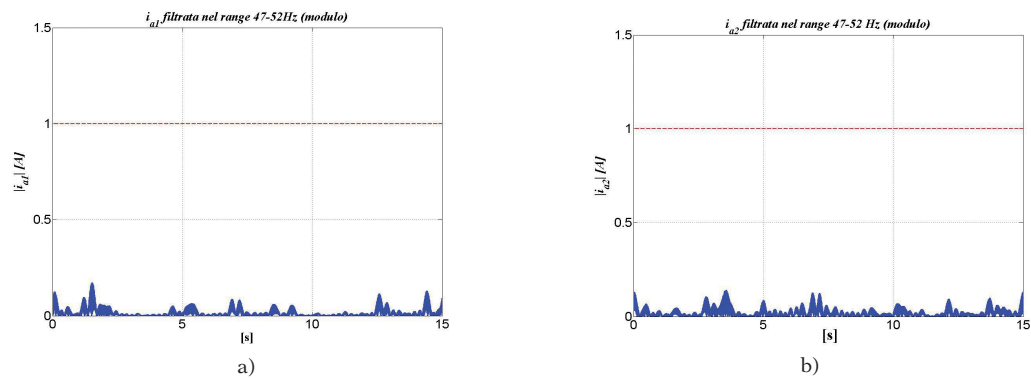


Fig. 23 - Corrente elettrica filtrata dal filtro passa-banda (47 – 52 Hz) quando la velocità del treno è $u_t = 100$ km/h: a) primo pantografo; b) secondo pantografo. *Electric current filtered by the pass band filter (47 – 52 Hz) when the train speed is $u_t = 100$ km/h: a) first pantograph; b) second pantograph.*

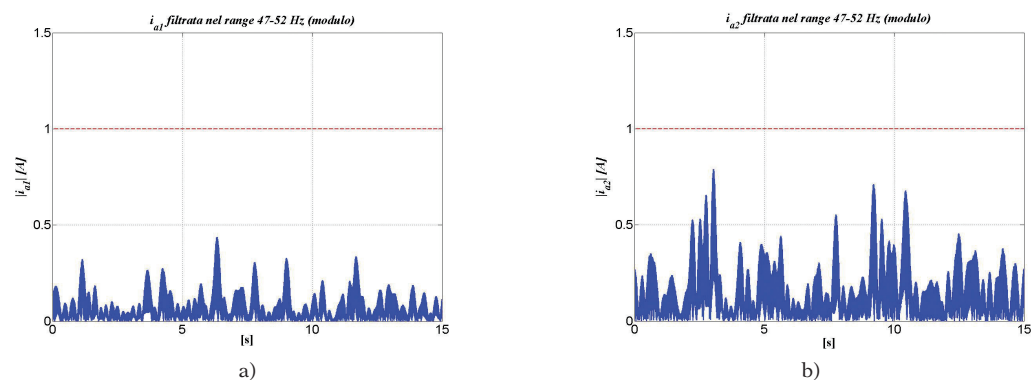


Fig. 24 - Corrente elettrica filtrata dal filtro passa-banda (47 – 52 Hz) quando la velocità del treno è $u_t = 130$ km/h: a) primo pantografo; b) secondo pantografo. *Electric current filtered by the pass band filter (47 – 52 Hz) when the train speed is $u_t = 130$ km/h: a) first pantograph; b) second pantograph.*

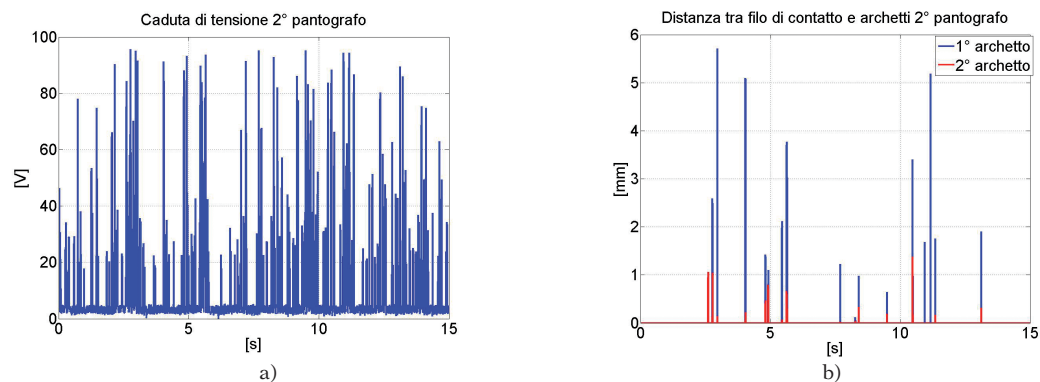


Fig. 25 - a) Caduta di tensione al contatto per il secondo pantografo ($u_t = 130$ km/h); b) distanza tra gli striscianti del secondo pantografo e il filo di contatto quando si ha distacco ($u_t = 130$ km/h). *a) Contact voltage drop for the second pantograph ($u_t = 130$ km/h); b) distance between the second pantograph's collectors and the contact wire when detachment occurs ($u_t = 130$ km/h).*

BIBLIOGRAFIA - REFERENCE

- [1] O. BRUNO, A. LANDI, E. MINGOZZI, M. PAPI, L. SANI, A.G. VIOLI, "La captazione di corrente e l'interazione pantografo-catenaria. I parte: metodologie delle misure per il controllo della qualità della captazione", *Ingegneria Ferroviaria* n. 4/2000, p. 149.
- [2] O. BRUNO, A. LANDI, E. MINGOZZI, M. PAPI, L. SANI, A.G. VIOLI, "La captazione di corrente e l'interazione pantografo-catenaria. II parte: Metodologie innovative non invasive per il rilevamento della qualità della captazione nelle catenarie a 3 kV", *Ingegneria Ferroviaria* n. 5/2000, p. 233.
- [3] K. MANABE, T. MORIKAWA, M. HIKITA, "On dynamics of overhead equipment and Multi-Pantograph system", *RTRI Quarterly report*, Vol.27, No.1, 1986.
- [4] K. MANABE, Y. FUJII, "Resonanzen des Oberleitungssystems bei Verwendung von mehreren Stromabnehmern sowie Gegenmaßnahmen", *Elektrische Bahnen* eb 88 (1990) 11 pp. 403-409, R. Oldenburg Verlag.
- [5] S. BRUNI, A. COLLINA, A. FACCHINETTI, "Interazione dinamica pantografo catenaria in presenza di più pantografi", *Atti del XV Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata*, Taormina, 26-29 settembre 2001, pagg. 1-10.
- [6] A. COLLINA, S. BRUNI, "Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 38 (n.4), pp. 261-291, 2002.
- [7] S. BRUNI, G. BUCCA, A. COLLINA, A. FACCHINETTI, S. MELZI, "Pantograph-catenary dynamic interaction in the medium-high frequency range", *XVIII IAVSD Symposium*, Japan, 2003.
- [8] K.J. BATHE, "Finite element procedures", Ed. Prentice Hall, 1996.
- [9] RFI-DTC/DNS/EE.ST TE 74 D, Specifica Tecnica.
- [10] A. FARINI, F. FUGA, R. MANIGRASSO, G. SUPERTI FURGA, "The aims and the control structure of the Italian Poly-current Pendolino", *EPE*, 1993.
- [11] R. MANIGRASSO, G. SUPERTI FURGA, E. TIRONI, A. FARINI, "Active filtering of traction drives fed by dc contact line", *EPE*, 1995.
- [12] G. DIANA, R. MANIGRASSO, M. BOCCIOLONE, F. MAPELLI, A. COLLINA, "Banco prova materiali per striscianti", *Ingegneria Ferroviaria* n. 3/2003, pp. 295-301.
- [13] G. DIANA, R. MANIGRASSO, B. PIZZIGONI, A. COLLINA, F.L. MAPELLI, "Dispositivo di conversione per convertire una energia che fluisce da una rete elettrica ad una macchina per prove elettromeccaniche su striscianti di pantografi di veicoli ferroviari", *Brevetto industriale MI2006A001591*.
- [14] M. BOCCIOLONE, G. BUCCA, A. COLLINA, F. MAPELLI, "A test rig for the comparative evaluation of the performance of collector strips", *Railway Engineering Conference*, London, UK, 2004.
- [15] R. MANIGRASSO, F.L. MAPELLI, M. MAURI, "Azionamenti Elettrici: Convertitori e Controllo", Vol. II, Ed. Pitagora, Bologna 2008.

Sommaire

UNE MÉTHODOLOGIE DE CORRÉLATION ENTRE LA QUALITÉ DU CONTACT PANTOGRAPHE-CATÉNAIRE ET LE CONTENU HARMONIQUE DU COURENT CAPTÉ. CAS DE LA CAPTATION MULTIPLE

Il est bien connu que lorsque la caténaire d'alimentation est perturbée de façon mécanique, des arcs électriques peuvent se développer au contact pantographe-caténaire. La variation de la tension d'alimentation due à la chute de tension entre les extrémités de l'arc génère des harmoniques de courant qui peuvent perturber les circuits de rail des systèmes de signalisation. Le phénomène est particulièrement évident, par exemple, lorsque l'on utilise deux pantographes en prise, car le deuxième pantographe se retrouve, dans cette situation, à affronter des perturbations de la caténaire enduites par le passage du premier pantographe. L'entité de la dégradation de la captation dépend de plusieurs facteurs (comme par exemple les caractéristiques mécaniques de la caténaire et des pantographes, la distance entre les pantographes, la vitesse du véhicule...), alors que les conséquences de cette dégradation sur le contenu harmonique du courant capté dépendent du type de filtrage du courant et du système de contrôle de l'enclenchement de la traction.

Le présent travail a pour but de fournir aux responsables des projets d'enclenchements ferroviaires une méthodologie de calcul préliminaire du contenu harmonique du courant capté qui permette de déterminer les modifications les plus opportunes à apporter au filtre en entrée et/ou au système de contrôle. La méthodologie proposée sera appliquée dans l'évaluation de la réponse d'un système typique de protection contre les effets indésirables des harmoniques, dans le cas de la captation multiple qui se réalise pour un véhicule ferroviaire en composition double (comme ce-la pourrait se présenter lorsque l'on veuille renforcer l'offre de transport).

Zusammenfassung

EIN VERFAHREN DAS DIE BERÜHRUNGSQUALITÄT DES STROMABNEHMERS UND DAS FREQUENZSPEKTRUM DES ABGENOMMENEN STROMS IN VERBINDUNG SETZT. DER FALL MIT MEHREREN GLEICHZEITIG FUNKTIONIERENDEN STROMABNEHMERN

Wenn eine Kettenfahleitung in Schwingung geriet, können elektrischen Lichtbogen zwischen Fahrdrabt und Schleifstück entstehen. Dadurch werden verschiedenen Störfrequenzen im Strom erzeugt, die die Gleisstromkreise in Signalanlagen stören können.

Als zwei Stromabnehmern gleichzeitig arbeiten, wird dieses Störphänomen besonders bemerkenswert, weil der zweite Stromabnehmer eine schon schwingende Oberleitung überfährt.

Die konsequente Stromabnahmeverschlechterung hängt von mehreren mechanischen Oberleitungsmerkmalen; die Folgerungen im Feld des Stromfrequenzspektrum hängen dagegen von der Eingangsfiltergestaltung und von der Regelungsweise des elektrischen Antriebs.

Das vorgestellte Verfahren erlaubt eine vorläufige Bestimmung des Stromfrequenzspektrums und dadurch die Anpassung der Eingangsfilter- und Antriebsregelung Parametern. Das Verfahren wird dafür zwecksmässig eingeführt und beispielsweise vorgestellt.

INFORMATIVA AI SOCI

Si comunica ai Sigg. Soci che sul sito internet del Collegio all'indirizzo www.cifi.it è attiva l'"**AREA SOCI**", che permette l'accesso ai dati personali.

L'Area Soci è soggetta a restrizioni di accesso, pertanto è necessario digitare il **login** e la **password** personale predefiniti dal CIFI che identificano in maniera univoca ogni Socio.

L'Area Soci permette di controllare e modificare i dati personali, segnalando al CIFI eventuali variazioni rispetto ai dati contenuti nella banca dati del Collegio.

Ciascun socio può rivolgersi presso la Segreteria Generale del Collegio ai n. **06/4882129 - FS 970/66825** o all'indirizzo e-mail: areasoci@cifi.it per richiedere il proprio identificativo di accesso.