

I nuovi elettrotreni della Circumvesuviana

Dott. Ingg. Arturo BORRELLI^(*), Flavio CICCARELLI^(**), Lucio FUSCO^(**)

1. Introduzione

Il presente articolo descrive le principali caratteristiche costruttive e prestazionali del nuovo materiale rotabile in dotazione a Circumvesuviana s.r.l. Tale materiale, che inizialmente coesisterà con quelli in esercizio dal 1972 e dal 1990, si contraddistingue completamente da essi per le molteplici soluzioni innovative adottate riguardanti sia la parte meccanica che gli equipaggiamenti di trazione e frenatura, in linea con gli attuali criteri di progetto.

L'equipaggiamento di trazione è di tipo elettronico (inverter e motori asincroni trifase). In particolare, il sistema frenante è realizzato in modo da privilegiare la frenatura elettrodinamica a recupero. Il design del convoglio è stato curato da Pininfarina.

2. Considerazioni preliminari

2.1. Descrizione del veicolo

I nuovi elettrotreni per la Ferrovia Circumvesuviana, realizzati congiuntamente da AnsaldoBreda - Firema, sono costituiti da complessi bloccati a tre casse (M1-M2-M3) con articolazioni a giostra, impernata su un carrello comune a due casse contigue [1,2].

Ogni *Unità di Trazione* (U.d.T.) è bidirezionale e presenta un unico pantografo di tipo asimmetrico ubi-

cato sulla cassa M1, analogamente alle U.d.T. delle due serie precedenti; inoltre, essa è equipaggiata con quattro carrelli, dei quali tre sono motori a comando individuale e uno è soltanto portante, con la seguente disposizione (fig. 1):

- ◆ due carrelli motori (denom. CV 4) ai due estremi dell'U.d.T. (casse M1 e M3);
- ◆ un carrello motore (denom. CV 5) in corrispondenza della giunzione M2-M3;
- ◆ un carrello portante (denom. CV 6) in corrispondenza della giunzione M2-M1.

La disposizione motorica è perciò asimmetrica rispetto all'intero complesso. Tutti i carrelli sono dotati di sospensione secondaria pneumatica autolivellante.

Le porte di accesso sono automatiche, ad azionamento elettrico e servoassistite.

Le testate estreme lato cabine di guida (M1, M3) sono provviste di accoppiatori (figg. 2-3) per l'aggancio automatico integrale onde comporre insieme più U.d.T. a comando multiplo nelle fasce orarie di punta; tale soluzione è già adottata con gli ETR esistenti.

In considerazione dell'ampio bacino di utenza servito da Circumvesuviana s.r.l., nel quale sono previsti servizi a breve oppure a lungo percorso, gli elettrotreni in oggetto sono attrezzati alcuni con 42 ed altri con 72 posti a sedere (fig. 4). Dato il tipo di esercizio metropolitano/suburbano gli elettrotreni sono privi di toilette.

La parte meccanica dei veicoli è stata realizzata da Firema Trasporti S.p.A., mentre l'equipaggiamento di trazione è stato realizzato da AnsaldoBreda S.p.A.

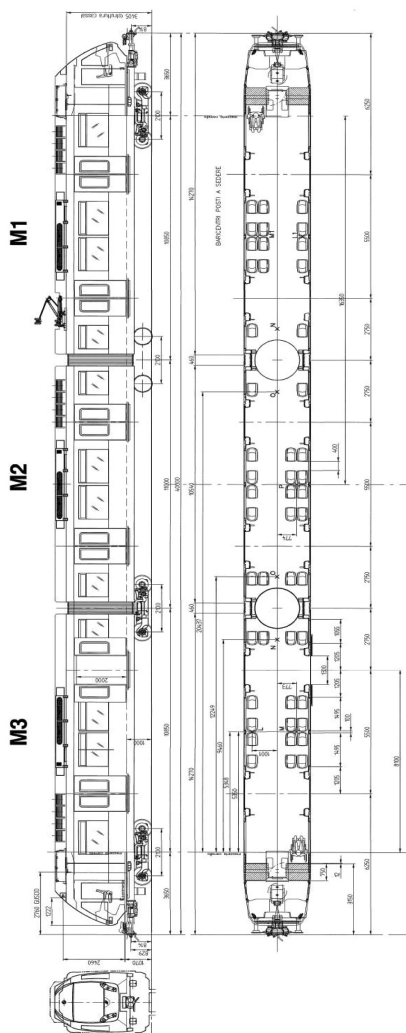


Fig. 1 - Figurino dell'elettrotreno Circumvesuviana. Unità tipo.

^(*) Direttore Operativo - Circumvesuviana s.r.l. - Napoli.

^(**) Collaboratore esterno - Dipartimento di Ingegneria Elettrica - Università degli Studi di Napoli "Federico II".



Fig. 2 – Foto laterale e frontale dell'elettrotreno.



Fig. 3 – Foto dell'aggancio automatico.



Fig. 4 – Foto degli interni.

2.2. Confronto con gli ETR delle serie precedenti

Dal punto di vista strutturale il nuovo complesso ripropone lo schema di principio delle due serie precedenti (1972 e 1990) [3] costituiti anch'essi da tre casse unite tra loro mediante articolazioni a giostra e con quattro carrelli, due estremi e due centrali, questi ultimi comuni rispettivamente a due casse contigue. Anche questi modelli presentano lunghezza massima, misurata agli accoppiatori, pari a 40 m. Una prima differenza significativa riguarda sia il

numero sia la disposizione dei motori di trazione. Infatti, nei due suddetti modelli si hanno solo due motori per complesso, posizionati longitudinalmente sotto le casse di estremità, e collegati ai due carrelli centrali mediante trasmissione cardanica, i carrelli di estremità essendo soltanto portanti (assi motori accoppiati; rodiggio 2BB2).

Invece, la configurazione adottata sul nuovo ETR conferisce ad esso un maggior peso aderente migliorando le prestazioni anche sulle tratte più acclivi.

L'altra differenza rilevante riguarda l'aspetto "azionamento"; infatti, il nuovo ETR rientra nel filone dell'Elettronica di Potenza essendo provvisto di regolazione ad inverter (IGBT) che consente l'impiego di motori asincroni trifase, in accordo con l'attuale orientamento progettuale ed operativo dei mezzi di trazione ferroviari.

I modelli precedenti, invece, sono eserciti a logica elettromeccanica ossia con avviamento reostatico e motori a corrente continua accoppiabili in serie o parallelo, più l'indebolimento di campo in corrispondenza del collegamento parallelo.

2.3. Criteri progettuali

Il progetto dell'elettrotreno, il cui obiettivo è quello di offrire all'utenza una qualità di trasporto decisamente superiore agli standard precedenti, è stato impostato con riferimento ai seguenti aspetti.

Interfaccia con i passeggeri

Notevole attenzione è stata posta nella cura degli ambienti interni con soluzioni di ampia visibilità, luminosità, e massimo comfort (6 pass/m²).

E' inoltre garantita una comoda e rapida accessibilità, ottenuta grazie ai vestiboli molto ampi, al numero di porte per fiancata e all'incarrozzamento a raso rispetto alle banchine di stazione.

Interfaccia con il personale di servizio

Analoga attenzione è stata posta nel definire l'ambiente di lavoro del personale di macchina realizzando una cabina di guida studiata secondo criteri ergonomici per garantire le migliori condizioni di comfort e di condotta (fig. 5). Infatti, oltre ad un adeguato impianto di climatizzazione, è stato studiato e messo a punto un nuovo banco di manovra avente un unico manipolatore (marcia/frenatura), in linea con le più recenti realizzazioni nel settore.

Disposizione degli ambienti interni e degli equipaggiamenti

Questa è stata studiata in modo tale da garantire una buona abitabilità

TRAZIONE ELETTRICA



Fig. 5 - Foto del posto di guida.

lità ed una visuale completa lungo tutto il treno (ottenuta attraverso ampi intercomunicanti) onde migliorare le condizioni di sicurezza di viaggio per i passeggeri, e ottenere facili spostamenti degli stessi nelle varie vetture consentendo così un più agevole controllo da parte del personale di servizio.

Equipaggiamento elettrico di trazione ed ausiliari

Esso è realizzato con tecnologia ad IGBT e con componenti ad elevata integrazione, altamente affidabile; tale tecnologia consente la riduzione degli ingombri e dei pesi.

Frenatura elettrodinamica

È prevista la frenatura a recupero di energia consentendo, soprattutto su tratte con frequenti fermate, un notevole risparmio energetico.

Carrelli motori a totale aderenza

Questa caratteristica consente un miglior sfruttamento dell'aderenza in avviamento su tratte acclivi in tutte le condizioni ambientali.

Impianto di condizionamento

Un gruppo condizionatore, completamente ridondato per ogni elemento dell'UdT, garantisce un elevato livello di comfort soddisfacente anche in caso di avaria ad uno di essi.

Le caratteristiche principali e le prestazioni del nuovo materiale rotabile sono riassunte nelle tabelle 1-2-3-4.

Le prestazioni in trazione, conseguibili dall'UdT, sono state valutate sulla tratta "Pioppaino-Ponte della

TABELLA 1

CARATTERISTICHE GENERALI DELLE U.d.T.

Rodiggio	Bo - Bo - 2 - Bo
Scartamento	950 mm
Passo	2100 mm
Diametro ruote	760 mm
Composizione	= [M1 - M2 - M3] =
Accoppiatori	Automatici - montati su barre ad assorbimento di energia
Azionamento	Inverter V.S.I. ad IGBT con motori asincroni trifase
Sistemi di frenatura: - Elettrodinamico - Pneumatico - Stazionamento	Con recupero di energia in linea e reostatico; elettropneumatico/di soccorso/di emergenza + pattini a molla + sistema di antipattinaggio
Totale posti in piedi (6 pass./m ²)	397
Totale posti a sedere	48
Totale posti per diversamente abili	2

TABELLA 2

DIMENSIONI FONDAMENTALI DEL CONVOGLIO

Lunghezza totale (compreso l'accoppiatore)	40000 mm
Larghezza cassa	2650 mm
Larghezza in corrispondenza soglia porta	≈ 2730 mm
Altezza filo superiore dell'imperiale dal piano del ferro	3405 mm
Altezza del filo superiore veicolo fuori tutto	3854 mm

TABELLA 3

MASSE DELLA U.d.T.

Massa in ordine di marcia (veicolo vuoto + 2/3 scorte)	63000 kg
Massa a carico normale (con posti a sedere occupati)	66600 kg
Massa a carico massimo	94000 kg

Persica" (linea Torre Annunziata-Sorrento), con riferimento alle seguenti condizioni operative:

- max differenza diametro ruote tra assili dello stesso carrello motore pari a 2 mm;
- composizione con passeggeri seduti + 4 passeggeri/m²;
- massa convenzionale per ciascun passeggero: 70 kg;
- ruote media usura;
- tensione nominale di catenaria 1,5 kV;
- pendenza max: ±2 ‰;
- velocità consentita dalla linea: 95 km/h.

Invece, le prestazioni in frenatura sono state valutate con riferimento alle seguenti condizioni:

- piano e rettilineo;
- binario asciutto e pulito;
- composizione con passeggeri seduti + 6 passeggeri/m²;
- massa convenzionale per ciascun passeggero pari a 70 kg;
- ruote nuove diametro 760 mm.

TABELLA 4

PRESTAZIONI DELLA U.d.T.

Velocità massima	120 km/h
Potenza massima ai cerchioni	1,02 MW
Sforzo massimo ai cerchioni (6 motori)	119 kN fino a 47 km/h
Accelerazione media (0-50 km/h)	1,20 ms ⁻² (± 5%)
Accelerazione media (0-90 km/h)	0,9 ms ⁻² (± 5%)
Accelerazione residua (90 km/h)	0,4 ms ⁻²
Accelerazione residua (120 km/h)	0,15 ms ⁻²
Decelerazione media da 80 km/h (a carico massimo)	1,105 ms ⁻²
Decelerazione media da 120 km/h (a carico massimo)	1,1 ms ⁻²
Decelerazione massima da 80 km/h (a carico massimo)	1,18 ms ⁻²
Spazio di arresto da 80 km/h (a carico massimo)	223 m
Spazio di arresto da 120 km/h (a carico massimo)	505 m

3. Struttura meccanica

3.1. Descrizione generale delle casse

Le tre casse (due di estremità e una centrale) che costituiscono l'intero complesso sono di tipo classico ossia realizzate con estrusi di alluminio

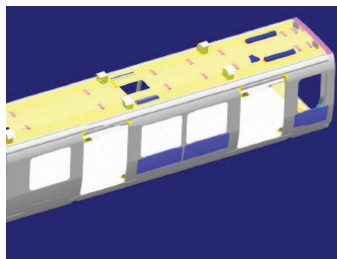


Fig. 6 - Vista d'insieme del telaio e della struttura comparto viaggiatori.

saldati in senso longitudinale (fig. 6) [1,2,4].

Nelle zone di estremità, corrispondenti alle cabine di guida (fig. 7), la cassa presenta un frontale in materiale composito predisposto per alloggiare le cabine.

Per quanto riguarda il telaio, la soluzione prospettata prevede un pavimento centrale realizzato a partire da estrusi longitudinali a doppia parete; le dimensioni della cassa e degli estrusi permettono di ottenere il pavimento con 4 estrusi anziché 5 come per gli ETR delle serie precedenti, semplificando la costruzione.

Allo stesso modo sono stati ridotti da 4 a 3 gli estrusi necessari a realizzare le coperture dell'imperiale. La trave portante è formata da due grandi estrusi trasversali e da due estrusi longitudinali a cavallo della piastra di fissaggio della ralla.

La trave di articolazione (fig. 8) è costituita da un grande estruso cui viene flangiata l'articolazione inferiore. Questa è formata da un gruppo integrato provvisto di doppio snodo sferico e ralla di collegamento al carrello. Lo snodo e la ralla sono solidali alla cassa centrale e il collegamento è ottenuto mediante un elemento metallico di supporto, di grandi dimensioni. La cassa di estre-

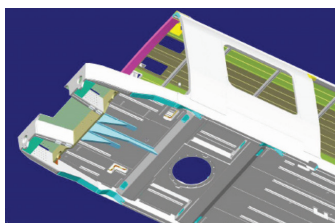


Fig. 7 - Vista d'insieme del sottotelaio della cassa di estremità (lato accoppiatore automatico).

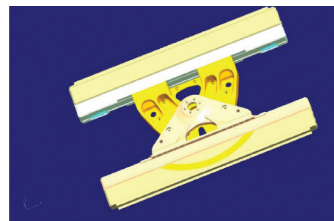


Fig. 8 - Vista d'insieme della trave di articolazione.

mità, sempre mediante un supporto imbullonato alla trave di articolazione, poggia sullo snodo sferico.

Il pavimento superiore, girevole in corrispondenza dello snodo, completa il gruppo stesso. Sull'asse di articolazione, all'altezza dell'imperiale, un puntone elastico e un ammortizzatore provvedono a mantenere l'allineamento della cassa di estremità nelle varie condizioni di esercizio.

La cassa di estremità è provvista di trave di testa, rinforzata posteriormente da setti longitudinali, ed è dimensionata per reagire ai carichi di compressione dell'accoppiatore automatico e di *re-railing*. Quest'ultimo è effettuato azionando una coppia di martinetti all'intersezione fra trave di testa e longherone.

Anteriormente alla suddetta trave (ai lati dell'accoppiatore) il telaio possiede due parti sporgenti sulle quali vengono flangiati i due assorbitori d'urto. Essi sono dotati all'estremità mobile di piastre antisormonto.

Il macchinista viene protetto dagli urti mediante una struttura posta tra la testata in vetroresina e il banco di manovra: essa dà supporto anche alla parte in vetroresina in corrispondenza del bordo inferiore del parabrezza ed è collegata con il telaio. Anche la parte superiore della cabina è rinforzata in modo da poter conferire un adeguato supporto al bordo superiore del parabrezza.

3.1.1 Descrizione generale della struttura cabina di guida

Il reparto "cabina", rappresentato in fig. 9, è interamente realizzato in materiale composito, prevalentemen-



Fig. 9 - Vista d'insieme della cabina.

te vetroresina, ed è imbullonato alla parete di divisione con il comparto viaggiatori. La protezione ai carichi orizzontali è assicurata da una robusta traversa posta immediatamente al di sotto del filo inferiore parabrezza. Essa è ancorata al telaio in modo da trasferire i carichi previsti dalla norma (300 kN distribuiti); la parte superiore prevede un robusto ancoraggio del parabrezza tale da resistere ai carichi orizzontali previsti (150 kN).

3.2. Carrelli

3.2.1. Carrelli motori e portanti

I carrelli (fig. 10) sono dimensionati per una velocità massima di 120 km/h. Ogni unità di trazione è equipaggiata con 3 carrelli motore e 1 carrello portante. Essi sono stati progettati in modo da ottenere le migliori prestazioni in rapporto ai seguenti parametri:

- elevato comfort di marcia (stabilità garantita, a ruote usurate, fino a 120 km/h + 10%);
- massima sicurezza in ogni condizione di esercizio;
- elevata affidabilità;
- riduzione di peso;
- riduzione e facilitazione degli inter-

venti manutentivi.

Entrambi i tipi di carrelli, progettati conformemente alle prescrizioni della pr EN13749, hanno il maggior numero possibile di parti identiche. Infatti, essi si differenziano solo per la presenza o meno del motore e riduttore; in particolare tutti i dischi freno sono montati esternamente alle ruote [2,5,6,7].

3.2.2. Dati tecnici principali

- Passo:	2100 mm
- Scartamento:	950 mm
- Diametro ruote a nuovo:	760 mm
- Diametro ruote (max. usura):	700 mm
- Velocità massima:	120 km/h
- Massa del carrello motore (stimata):	6300 kg
- Massa del carrello portante (stimata):	4360 kg

3.2.3. Componenti principali dei carrelli

Telaio

Il telaio è articolato per compen-

sare le irregolarità e le differenze di altezza del binario, minimizzando in questo modo la perdita di carico delle ruote, per conferire al veicolo una eccellente stabilità di marcia che viene valorizzata anche da una ottimale scelta delle rigidità delle sospensioni primaria e secondaria.

Il telaio (fig. 11) è costituito da due semitelai uniti mediante un giunto sferico che permette il movimento relativo tra di loro (articolazione).

L'asse di articolazione passa per la mezziera trasversale del carrello quindi, nel caso di superamento di uno sghembo di binario, le reazioni vincolari alla rotazione dei semitelai sono indipendenti dal senso di marcia del carrello.

Anche le due traverse centrali sono costituite da un profilato scatolato, opportunamente sagomato e saldate da un lato ad un longherone, nel quale è inserita la sede per la sistemazione del giunto sferico.

I due longheroni presentano all'estremità le sedi per la sistemazione delle "boccole elastiche" portanti il cuscinetto a cartuccia e la sospensione primaria. Tali sedi sono costituite da un settore posto sul longherone e da un altro settore separabile dal primo e collegato ad esso mediante bulloni e sono realizzate e lavorate in modo da essere separabili onde consentire una facile rimozione dell'assile.

Il giunto sferico ha le seguenti caratteristiche:

- ◆ non necessita di manutenzione nell'intervallo tra 2 revisioni generali e non è necessario usare alcun lubrificante durante il montaggio e il servizio;
- ◆ presenta alta capacità di carico ed elevata resistenza agli impatti dovuti al carico, alta resistenza all'usura, mancanza di avanzamen-

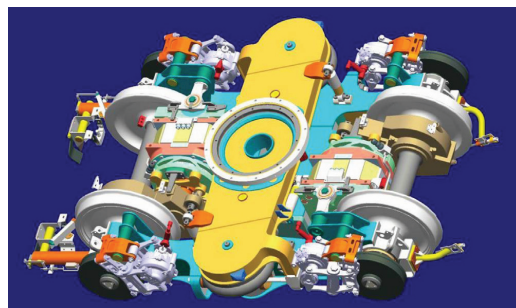


Fig. 10 - Vista d'assieme del carrello motore.

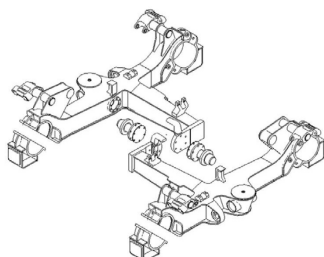


Fig. 11 - Vista d'insieme del telaio.

to a scatti. Il cuscinetto è precaricato e non gode di gioco radiale, di conseguenza esso offre una buona resistenza ai carichi alternati ed alle vibrazioni. Il telaio, completamente saldato, viene sottoposto ad un trattamento termico di distensione per eliminare le sollecitazioni interne residue causate dal processo di saldatura.

Il trattamento di distensione è realizzato con il seguente ciclo termico:

- riscaldamento da una temperatura iniziale di 200°C con gradiente termico di 50° C/h;
- riscaldamento a regime a 600 °C (+20 °C/-0 °C) per la durata di 3÷4 ore;
- raffreddamento con discesa della temperatura con gradiente termico di 50° C/h;
- estrazione dal forno ad una temperatura non superiore a 200 °C±250 °C;
- proseguimento del raffreddamento in aria calma con temperatura dell'aria ≥20 °C.

Dopo questo trattamento vengono controllate le tolleranze di costruzione. Il telaio deve essere in grado di sopportare tutte le sollecitazioni statiche e di fatica provocate dai carichi di progetto verticali, laterali e longitudinali; inoltre, tali carichi sono dimensionati per la sicurezza in modo da rispettare i requisiti pr EN 13749.

Il telaio è provvisto di supporti ed attacchi per i seguenti componenti:

- motore e gruppo riduttore;
- gruppi pneumatici per freno a disco;

- aste di trazione;
- arresto superiore cassa/carrello;
- tampone trasversale;
- dispositivo cacciapietre (1° asse del carrello motore estremo);
- dispositivo ungibordo (1° asse dei carrelli motore estremo);
- ugelli per sabbie (su ciascuna ruota di ogni carrello, salvo il primo asse dei carrelli motori estremi).

Il telaio è stato calcolato e dimensionato tramite Analisi FEM secondo la norma pr EN 13749 e la Circolare Ministeriale n. 199 del 19/02/1958; compresi anche tutti i supporti principali; sono stati usati i seguenti codici di calcolo MSC PATRAN 2004 ed MSC NASTRAN 2004.

L'integrità strutturale ed il corretto dimensionamento dei carrelli, motori e portante, è stata controllata da test statici e a fatica eseguiti sul telaio carrello completo; tutti i carichi di progetto sono stati opportunamente simulati con attuatori idraulici.

Assile

L'assile del tipo pieno è realizzato in acciaio EA4T secondo le norme UIC 811-1 e pr EN 13261. Inoltre esso è stato calcolato in base alle norme EN 13104 "Powered Axles, Design Guides" e EN 13103 "No-Powered Axles, Design Guides" e tenendo in considerazione la Norma UNI 8350 per quanto applicabile.

Ciascun assile è equipaggiato con ruote monoblocco in acciaio R7T conformi alla norma UIC 810-1 (fig. 12); anche il profilo della ruota è realizzato in accordo alla F.G.C.G. vel. N1.

Sull'assile sono montati i cuscinetti del tipo a cartuccia a rulli conici (fig. 13) e lubrificati con grasso; questo tipo di cartuccia è ben collaudata in quanto già usata con successo per i carrelli della Metropolitana di Madrid e della Metropolitana di Copenhagen.

I cuscinetti sono calcolati per una durata di 2.000.000 km e dovranno garantire una percorrenza di 400.000 km prima di effettuare la revisione completa di essi. Sull'assile viene anche montato il distanziale che porta ad una estremità la ruota fonica e dall'altra un anello per il contatto radiale del dispositivo di messa a terra.

Sospensione primaria

La sospensione primaria è costituita da un elemento elastico in gomma opportunamente sagomato per permettere dei valori di rigidità diversi in funzione delle tre direzioni (longitudinale, verticale ed assiale), ciò al fine di ottimizzare la stabilità di marcia, l'aggressività nei confronti dell'armamento ed il comfort di marcia. L'isteresi della gomma (circa il 5%) è sufficiente ad eliminare la trasmissione delle vibrazioni.

La massa gravante sulla primaria differisce a seconda dei carrelli:

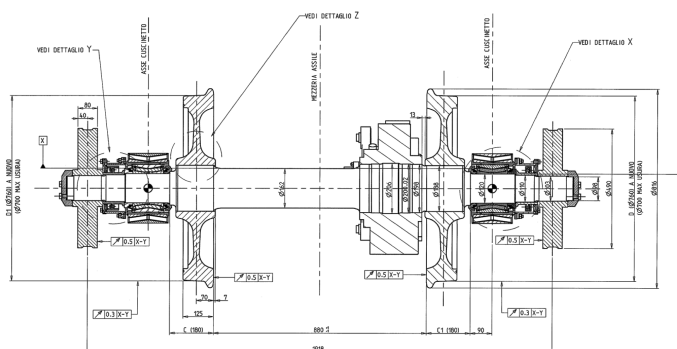


Fig. 12 - Sezione dell'assile di carrello motore secondo un piano longitudinale.

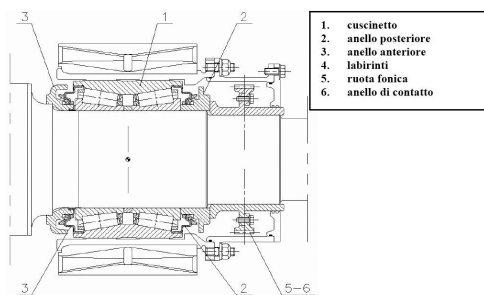


Fig. 13 - Particolare della sezione della boccola e relativi cuscinetti.

CV4 M1	m = 6616 kg
CV4 M3	m = 6603 kg
CV5	m = 5440 kg
CV6	m = 5929 kg

Sospensione secondaria

La sospensione secondaria, realizzata con 2 molle pneumatiche, è posta fra trave oscillante e telaio (fig. 14).

La presenza delle valvole di livellamento, su ogni molla pneumatica, permette di mantenere costante l'altezza del pavimento ad ogni variazione di carico; esse sono montate sulla trave oscillante e sono vincolate al telaio del carrello tramite un collegamento snodato.

La molla pneumatica è equipaggiata internamente con tamponi in gomma, i quali agiscono da sospen-

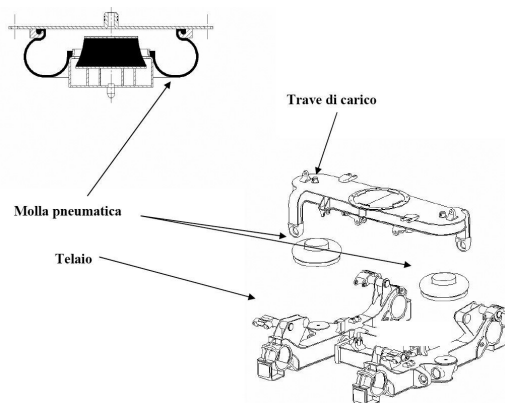


Fig. 14 - Sospensione secondaria.

sione di soccorso in caso di avaria della sospensione pneumatica vera e propria.

Infine, la sospensione secondaria è integrata da ammortizzatori di tipo idraulico (trasversali e verticali) montati tra la trave oscillante ed il telaio del carrello.

Trave oscillante

La trave oscillante (fig. 15) è un elemento scatolato, realizzato con lamiere piegate e sagomate. Il materiale adoperato è acciaio S355J2G3. Essa è sottoposta allo stesso trattamento termico di distensione impiegato per il telaio.

Il collegamento alla cassa, per tutti i carrelli (motori e portanti), è realizzato attraverso una ralla (fig. 16) precaricata a semplice corona di sfere a quattro contatti; questo tipo di ralla permette la trasmissione di forze sia di trazione che di compressione nelle 3 direzioni.

La trazione e la trasmissione dei carichi longitudinali (trazione e frenatura) tra telaio e trave oscillante, è assicurata da due apposite aste di trascinamento (fig. 17) che collegano il telaio del carrello

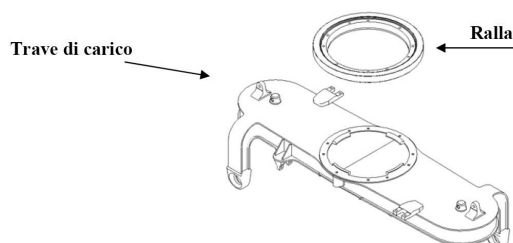


Fig. 15 - Trave oscillante.

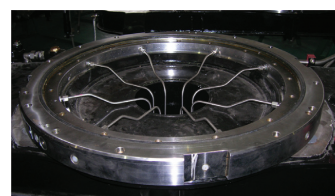


Fig. 16 - Fotografia della ralla (sono visibili i condotti radiali di lubrificazione).

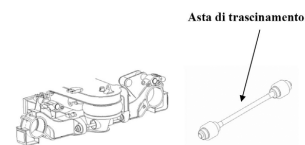


Fig. 17 - Particolare dell'asta di trascinamento.

Tampone trasversale

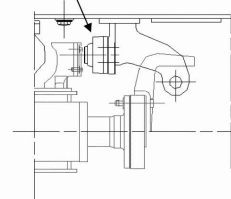


Fig. 18 - Particolare del tampone trasversale.

alla trave oscillante stessa; le aste sono montate con cuscinetti elastici alle estremità.

I movimenti trasversali tra la trave oscillante (la quale non può traslare rispetto alla cassa) ed il carrello sono smorzati da tamponi trasversali in gomma (fig. 18).

TRAZIONE ELETTRICA

Limitatori rotazione carrello

Sulla traversa di carico è previsto un dispositivo che limita la rotazione fra carrello e struttura cassa in caso di svio.

Gruppo motoriduttore

Ogni carrello motore è dotato di due motori asincroni trifase, montati trasversalmente ed autoventilati; per la descrizione del motore si rimanda al capitolo ad esso dedicato.

I motori di trazione di costruzione AnsaldoBreda sono montati elasticamente sul telaio del carrello e sono collegati alla trasmissione attraverso un accoppiamento elastico di tipo flangiato alla carcassa del riduttore. L'albero motore è collegato al pignone del riduttore tramite un apposito giunto a denti bombati per compensare i movimenti dell'assile in quanto il riduttore è calettato sull'assile ed è semisospeso al telaio del carrello.

Il gruppo motoriduttore è fissato al carrello nel seguente modo: un supporto elastico collega il motore (nel lato posteriore dello stesso) al telaio del carrello e la carcassa del motore è collegata, attraverso due piastre, a quella del riduttore; infine una bielletta collega la carcassa del riduttore al telaio carrello mediante calettamento forzato del gruppo motoriduttore sull'assile.

I movimenti dell'assile dovuti alla primaria ed i possibili disallineamenti sono compensati attraverso il giunto elastico di collegamento della trasmissione al motore di trazione.

La trasmissione è del tipo ad ingranaggi ad assi paralleli a dentatura elicoidale. I dati tecnici caratteristici sono i seguenti:

- Potenza nominale: 170 kW
- Velocità continuativa: 2078 giri/1'
- Carico max per asse: 12500 kg
- Peso gruppo, compreso giunto a denti, olio e biella di reazione: max 330 kg

Gli ingranaggi hanno dentatura elicoidale con ampi angoli di inclina-

zione dell'elica ed elevata qualità di lavorazione della forma del dente in modo da garantire un funzionamento regolare e tranquillo, con un minimo di carico dinamico sul dente e soprattutto una ridotta rumorosità.

Essi sono lubrificati per sbattimento d'olio. Per assicurare un'adeguata fornitura di lubrificante ai componenti ad alta velocità in entrambe le direzioni di rotazione, è previsto un serbatoio di olio (capacità ~ 4,5 l) posto direttamente al di sotto di questi componenti.

Il collegamento fra motore e trasmissione è realizzato con un giunto a denti bombati, formato di due parti. Queste parti sono costituite da una scatola contenente una dentatura dritta interna e un mozzo a dentatura bombata che si coniuga con la prima dentatura portata dalla scatola. Le due parti sono poi chiuse attraverso bulloni ed il giunto è riempito di grasso.

Tale tipo di giunto è in grado di compensare disallineamenti assiali, angolari e di parallelismo fra motore e trasmissione.

La trasmissione è poi a sua volta collegata rigidamente al motore attraverso 4 elementi elastici, bloccati da altrettanti bulloni.

Freni

Ogni carrello, sia motore che portante, è equipaggiato con 4 dischi freno auto ventilati di diametro 490 mm e spessore 80 mm e relativo gruppo freno per assile, in posizione esterna alle ruote.



Fig. 19 – Foto del gruppo freno.

Il gruppo freno (fig. 19) è montato su un supporto del telaio carrello, mentre il disco è calettato direttamente sull'assile.

Ogni carrello è dotato di 2 freni di stazionamento (con sblocco manuale dall'esterno) i quali agiscono su entrambi gli assili. Il freno di stazionamento è dotato di pistoncini a molla che agiscono sulle pinze del freno.

Lo stazionamento si ottiene disaccoppiando le apposite valvole della B.C.U. (Brake Control Unit). L'effetto è quello di trattenere un veicolo a pieno carico (6 passeggeri/m²) su pendenza del 35‰, per almeno un'ora, oppure un veicolo a tara sulla stessa pendenza, per un tempo illimitato.

Le prestazioni di frenatura si ottengono tramite il freno meccanico elettropneumatico agente in maniera coordinata alla frenatura elettrodinamica; il veicolo non è dotato di freno a pattini.

Dispositivo ungibordo ugello sabbie e cacciapietre

L'asse posteriore dei carrelli di estremità e tutti gli assi dei carrelli intermedi sono provvisti di sabbie a comando pneumatico agenti sempre sugli assi 3, 5 e 7 senso marcia e tali assi sono provvisti di 2 ugelli per ciascuna sabbiera, la quale è alimentata da un serbatoio posto sottocassa. L'ugello sparge la sabbia sui binari per effetto dell'aria compressa inviata nelle sabbie stesse. In questo modo è possibile aumentare il coefficiente d'aderenza ruota-rotaia quando questo presenta valori ridotti (es. binario estremamente bagnato) o quando sia necessaria una frenata d'emergenza.

Sul primo asse dei carrelli di estremità (carrelli motore) sono montati:

- 2 dispositivi ungibordo.

Questi sono di tipo a stick (solido); in tal modo viene lubrificata la zona del bordino, che è appunto quella a contatto con la rotaia quando il veicolo è in curva, e che permette la guida del carrello; ogni stick è composto da 3 cartucce. Questo contatto è particolarmente usurante per il bor-

TRAZIONE ELETTRICA

dino e spesso è causa di fastidiosi stridii: il dispositivo agisce nella riduzione di entrambi questi aspetti.

- 2 cacciapietre;
- 2 captatori per ATP (Automatic Train Protection).

4. Equipaggiamento elettrico

4.1. Generalità sull'azionamento di trazione

L'azionamento del convoglio è costituito da tre inverter ognuno dei quali alimenta due motori di trazione; in caso di guasto un convertitore di potenza può essere sezionato. Il servizio, quindi, non viene interrotto grazie ai restanti convertitori [1,2,8].

I convertitori di trazione (fig. 20) sono alimentati direttamente dalla catenaria, e garantiscono frenature elettriche reostatiche oppure, quando possibile, a recupero d'energia.

Partendo da un ingresso in tensione continua (linea) e ricevendo i segnali di comando e di impostazione provenienti dal veicolo, il convertitore genera le forme d'onda alternate atte a regolare sia la trazione che la frenatura dei motori asincroni. Durante la frenatura, il convertitore gestisce l'energia cinetica dei motori, consentendone il recupero in linea e/o la dissipazione su un apposito reostato.

Il convertitore è costituito da due sezioni principali: inverter trifase e chopper di frenatura. Entrambe ven-

gono governate dalla medesima unità di controllo *Traction Control Unit* (T.C.U.) fisicamente integrata all'interno del convertitore stesso.

Le tre fasi dell'inverter ed il chopper di frenatura sono realizzati utilizzando 4 moduli di potenza identici, ognuno dei quali è configurato come fase di inverter tramite due *IGBT* di ultima generazione. L'equipaggiamento di trazione è completato dal reostato di frenatura e dall'induttanza di filtro linea esterni.

Il convertitore, montato sottocassa (fig. 21), è costituito da un telaio portante fissato al veicolo nel quale vengono inseriti, in modo indipendente, i 4 moduli di potenza. L'aspetto modulare agevola e velocizza le operazioni di manutenzione rendendo possibile la sostituzione di ogni singolo modulo (evitando la necessità di ricovero e sosta dell'intero complesso). L'utilizzo di un modulo unificato sia per il chopper che per l'inverter consente inoltre l'ottimizzazione delle scorte nel magazzino ricambi.

Un vano facilmente accessibile è situato al centro del telaio ed è soli-



Fig. 21 – Particolare della disposizione moduli sottocassa: 1) telaio portante; 2) vano apparecchi; 3) moduli di fase.

dale ad esso (fig. 21); al suo interno sono contenuti l'unità di controllo (con le relative schede singolarmente estraibili), le apparecchiature elettromeccaniche (contattori di sezionamento e precarica), i trasduttori di tensione e di corrente, i connettori AT e BT di interfaccia al veicolo.

Le carpenterie dei moduli di potenza e del vano apparecchi sono progettate per soddisfare il grado di protezione IP55.

Il calore generato dai moduli di fase viene smaltito tramite 4 dissipatori in alluminio i quali sono raffreddati sfruttando unicamente gli effetti del flusso d'aria generato dal moto del veicolo; non sono pertanto previsti motoventilatori di raffreddamento.

4.2. Azionamento di trazione: parte elettrica di potenza

Lo schema di principio dell'azionamento è presentato in fig. 22.

4.2.1. Inverter

L'inverter, del tipo trifase a tensione impressa (VSI), è collegato alla linea di alimentazione (1500 V) a valle del filtro rete e svolge funzioni di alimentazione e controllo dei motori asincroni trifase di trazione. La ben nota configurazione base dell'inverter

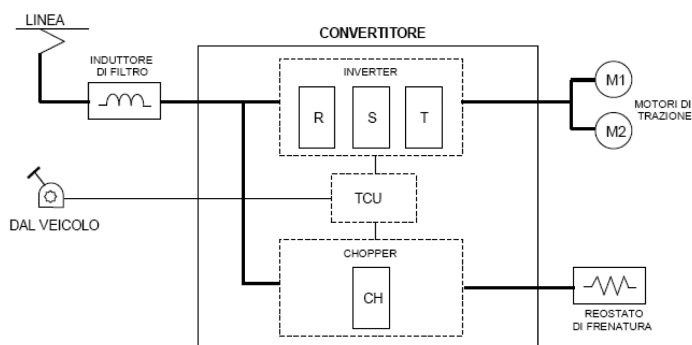


Fig. 20 – Schema a blocchi dell'azionamento di bordo.

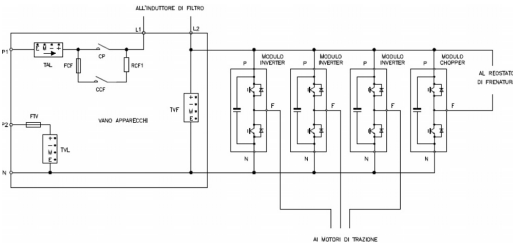


Fig. 22 - Schema circuitale dell'azionamento di trazione.

a ponte trifase con 6 dispositivi di interruzione ad IGBT è rappresentata in fig. 23.

Ognuno dei tre rami di inverter è costituito da un proprio modulo di fase indipendente nel quale trovano impiego due IGBT di ultima generazione (3300 V/1200 A).

Gli impulsi di pilotaggio, generati dalla TCU e condizionati dalla *gate unit* (unità di pilotaggio interna ad ogni modulo), fanno commutare gli IGBT alternativamente dallo stato di interdizione a quello di conduzione generando, tramite opportune tecniche di modulazione PWM, le forme d'onda di uscita desiderate.

Una serie di trasduttori elettrici rileva in tempo reale i valori di tensione e corrente in ingresso e uscita dal convertitore, ed insieme ai trasduttori termici (termocoppie) e tachimetrici (pick-up) consente alla TCU di regolare l'alimentazione dei motori e di gestire le protezioni necessarie. Gli IGBT sono dimensionati per soddisfare le prestazioni elettriche richieste in termini di tensione, corrente e frequenza di commutazione, nel rispetto delle massime temperature operative di giunzione.

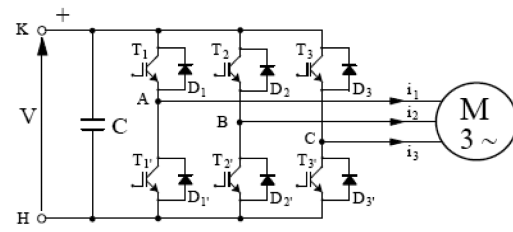


Fig. 23 - Schema circuitale dell'inverter trifase monostadio.

Il convertitore è progettato in modo da non richiedere la presenza dei circuiti di snubber (convertitore *snubberless*). Questo tipo di soluzione comporta i seguenti vantaggi:

- maggiore compattezza

e leggerezza;

- assenza di questi dispositivi di tipo dissipativo, il che migliora il rendimento;
- ogni fase inverter è costituita dai semiconduttori di potenza IGBT (montati su di un dissipatore), dall'elettronica di pilotaggio, dai condensatori di filtro;
- non è previsto il collegamento di IGBT in serie e/o parallelo fra loro.

In particolare, quest'ultima condizione elimina i problemi che possono derivare da eventuali disuniformi ripartizioni della corrente (componenti in parallelo) o della tensione (componenti in serie) a tutto vantaggio dell'affidabilità del convertitore.

A differenza dei tiristori che richiedono un pilotaggio tramite amplificatori di corrente, per gli IGBT è sufficiente l'applicazione di tensione al gate (+15V per l'accensione, -15V per lo spegnimento). Questa caratteristica contribuisce alla riduzione dell'ingombro del convertitore ed incrementa l'affidabilità dei circuiti di pilotaggio.

Le grandezze in ingresso e uscita inverter sono riassunte nelle tabelle 5 e 6

La frequenza di commutazione degli IGBT è molto elevata, così da poter generare una forma d'onda d'uscita con un basso contenuto armonico: ciò riduce drasticamente le pulsazioni di coppia a bassa velocità.

TABELLA 5

INGRESSO INVERTER

Tensione nominale	1500 V
Tensione massima	1800 V
Tensione minima	1000 V
Potenza massima	572 kW
Potenza media	240 kW
Potenza apparente di dimensionamento ^(*)	1400 kVA
Rendimento	> 97%

^(*) Tale potenza è stata calcolata con la formula $A = 3 V I_{eff}$ dove V è la tensione concatenata in onda quadra e I_{eff} è la corrente efficace massima di fase (700 A).

TABELLA 6

USCITA INVERTER

Tensione concatenata (valore di picco max)	1800 V
Tensione concatenata (valore efficace max)	1326 V
Potenza massima	763 kVA
Potenza media	294 kVA
Frequenza fondamentale massima	160 Hz
Frequenza fondamentale (pass. onda quadra)	59,5 Hz (1500 V)
Frequenza commutazione max in PWM	300 Hz
Alimentazione b.t. ^(*)	24 V d.c.

^(*) In comune con il chopper.

4.2.2. Modulo di fase

Un modulo inverter include:

- 2 IGBT 3300 V/1200 A;
- 2 condensatori di filtro da 2200 V/750μF;
- 1 connessione multistrato a bassa induttanza;
- 1 dissipatore in alluminio (per IGBT e resistenze);
- 1 assieme di pilotaggio;

TRAZIONE ELETTRICA

- 1 termostato;
- 1 termoresistenza;
- 1 trasduttore di corrente di fase;
- 2 resistenze di scarica filtro;
- 3 isolatori passanti AT (P, F, N);
- 1 connettore BT (U).

Il circuito elettrico di alta tensione del modulo inverter (fig. 24) ha come componenti principali due IGBT connessi in configurazione a semiponte (IGBT superiore e IGBT inferiore). Ogni IGBT è corredato da un diodo di ricircolo collegato in antiparallelo, per cui il modulo può essere utilizzato indifferentemente sia come fase di un inverter che di chopper.

Ogni modulo contiene due condensatori di filtro (CF1 e CF2) da 750 μ F cadauno connessi in parallelo e direttamente collegati agli IGBT tramite un bus bar (connessione multistrato a bassa induttanza).

L'utilizzo della connessione multistrato e di condensatori a bassa induttanza consente di minimizzare le sovratensioni ai capi degli IGBT durante lo spegnimento; di conseguenza non sono necessari ulteriori circuiti di protezione. Infine, ai capi dei condensatori sono collegate due resistenze di scarica (R1 e R2).

Per il rilievo della corrente di fase viene impiegato un trasduttore attivo

ad effetto Hall (TA). I componenti che generano calore (IGBT e resistenze di scarica) sono fissati ad un dissipatore in alluminio la cui temperatura viene misurata tramite una termoresistenza al platino PT100.

Le protezioni termiche del modulo sono affidate ad un termostato (diagnostica termoswitch) applicato al centro del dissipatore e tarato in modo da proteggere gli IGBT in ogni condizione di malfunzionamento. Infatti, allorquando il termostato rileva una sovratemperatura sui radiatori inverter, informa la TCU che a sua volta predispone una diminuzione di prestazione.

Il pilotaggio degli IGBT è realizzato da un assieme di schede che riceve i segnali direttamente dalla TCU e svolge le seguenti funzioni:

- alimentazione integrata e isolamento galvanico dei segnali provenienti dalla TCU (essi portano i punti gate-emettitore degli IGBT a +15V per l'accensione o a -15V per lo spegnimento);
- controllo della sequenza di pilotaggio tra IGBT superiore e inferiore (riconoscono gli impulsi accensione/spegnimento tra semifase alta e bassa, regolano il minimo Ton e Toff ed il tempo morto tra semifase alta e bassa);
- amplificazione dei segnali di pilotaggio;

- diagnostica e protezioni (tengono costantemente sotto controllo i parametri elettrici degli IGBT, trasmettendo un segnale diagnostico al controllo in caso di guasto).

Tutti i componenti elettronici impiegati per la realizzazione del modulo inverter sono contenuti in una carpenteria di

alluminio con grado di tenuta IP55, adatta per impieghi all'esterno.

4.2.3. Chopper di frenatura

Il chopper di frenatura è del tipo *step down* ed è utilizzabile su linee di alimentazione con tensione nominale pari a 1500 V. Esso è realizzato mediante l'impiego di un quarto modulo (opportunamente pilotato) identico ai tre che costituiscono le fasi inverter (fig. 24), ottenendo come già detto un'effettiva unificazione dei componenti di potenza, a beneficio delle scorte di parti di ricambio; in questo caso l'IGBT inferiore è utilizzato come valvola parzializzatrice, mentre il diodo in antiparallelo dell'IGBT superiore è utilizzato per il ricircolo del carico.

Quando il chopper entra in funzione, gli impulsi di pilotaggio generati dalla TCU e condizionati dalla *gate unit* fanno commutare l'IGBT superiore alternativamente dallo stato di interdizione allo stato di conduzione in modo da parzializzare opportunamente (tramite regolazione del duty cycle) la tensione di linea ai capi del reostato. In tal modo, durante la frenatura elettrica, la parte dell'energia restituita dai motori e non recuperabile in rete (corrispondente ad un incremento della tensione di linea) viene dissipata sul relativo reostato.

Le caratteristiche del chopper sono riassunte in tabella 7.

TABELLA 7

USCITA CHOPPER

Tensione (valore di picco max)	1800 V
Duty cycle (valore minimo)	2%
Duty cycle (valore massimo)	98%
Potenza massima	645 kW
Potenza media (relativa al profilo di carico)	87 kW
Frequenza di commutazione	300 Hz
Alimentazione b.t. ^(*)	24 V d.c.

^(*) In comune con il chopper.

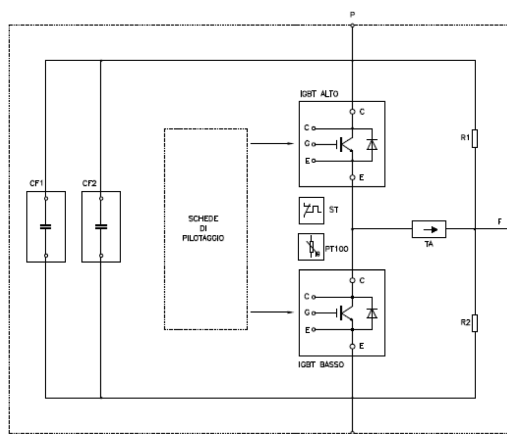


Fig. 24 – Particolare del modulo di fase inverter.

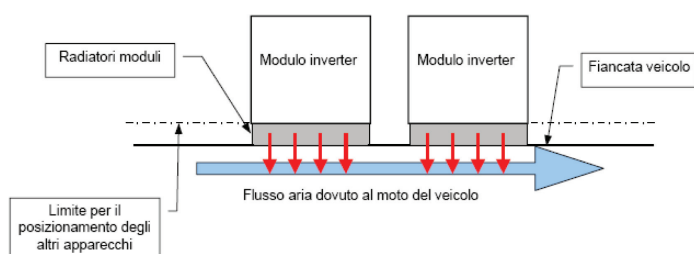


Fig. 25 – Particolare del raffreddamento moduli.

4.2.4. Raffreddamento dei moduli di fase

Il convertitore di trazione/frenatura è costituito da quattro moduli gemelli completamente sigillati (IP56), tre per l'inverter (uno per fase) ed uno per il chopper di frenatura. Questo sistema di montaggio dei componenti elettronici, protetto da polvere ed acqua, consente un miglioramento in termini di affidabilità e di manutenibilità.

I singoli moduli sono raffreddati in aria naturale sfruttando il moto del veicolo (*raffreddamento assistito dal moto*) (fig. 25).

Durante il funzionamento in potenza del convertitore, i quattro moduli producono una quantità di calore (generato in prevalenza dalle perdite degli IGBT) che viene scambiato con l'ambiente all'esterno tramite i relativi dissipatori. Gli IGBT sono allocati in un contenitore compatto ed isolato; i moduli di ogni fase inverter e del chopper sono montati diretta-

mente su un radiatore alettato di alluminio con interposizione di compound termoconduttore che ha il compito di migliorare lo scambio termico.

Nel sottocassa i moduli sono posizionati in modo che il radiatore alettato si affacci sul fianco del veicolo. L'aria esterna, grazie al moto di questo, lambisce la superficie esterna delle alettature provvedendo al raffreddamento dei moduli, attraverso una azione di estrazione di aria dall'interno delle alette (*effetto Venturi*).

Per non ostacolare questo meccanismo di raffreddamento, tutti gli apparecchi vengono collocati rispetto ai moduli inverter in posizione leggermente arretrata, in modo da non disturbare i filetti di aria in corrispondenza delle alettature dei suddetti moduli. In ogni caso la loro temperatura è soggetta al controllo delle protezioni termiche di cui dispongono le fasi inverter ed il chopper.

In aggiunta ai termoswitch ogni radiatore è dotato di un sensore (termosonda PT100) per la rilevazione continua della temperatura; i segnali acquisiti da tali termosonde sono processati dall'unità di controllo trazione onde avere sempre un riscontro, durante il funzionamento, delle previsioni di progetto.

4.2.5. Motore di trazione

Ogni carrello motore è dotato di 2 motori di trazione di tipo asincrono trifase a gabbia; la loro costruzione, il sistema di isolamento ed i materiali impiegati sono tali da assicurare un'elevata affidabilità. Il calcolo meccanico di questi motori è stato sviluppato con l'ausilio del metodo ad elementi finiti (FEM) il quale metodo, attraverso l'analisi del comportamento elastico di strutture comunque complesse, consente di simulare il comportamento di una struttura ancor prima della fabbricazione.

Anche il calcolo elettromagnetico si avvale, per le verifiche, del metodo FEM; il che consente di ottimizzare il dimensionamento della macchina.

Nella tabella 8 sono riportati i principali dati tecnici e le prestazioni del motore di trazione, nella fig. 26 un disegno d'assieme del motore ed infine nella fig. 27 è mostrata la caratteristica elettromeccanica dell'azionamento di trazione nel suo complesso.

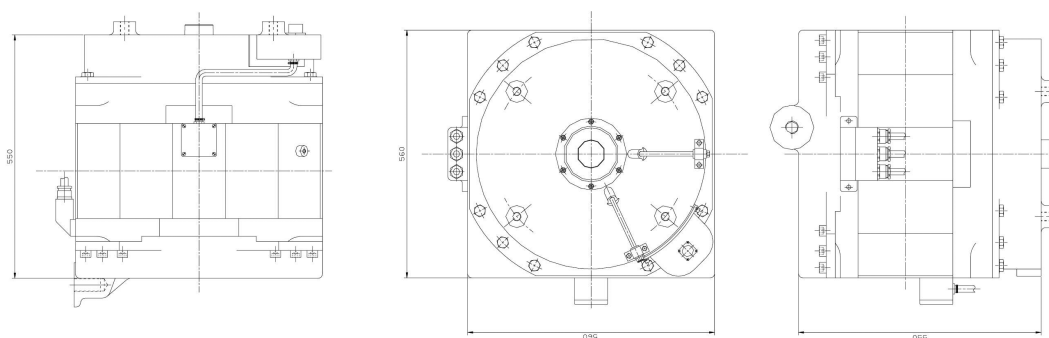


Fig. 26 – Disegno del motore di trazione.

TRAZIONE ELETTRICA

TABELLA 8

DATI TECNICI E PRESTAZIONI DEL MOTORE DI TRAZIONE

Tipo Motore	Asincrono Trifase
Numero Poli	4
Collegamento fasi	Stella
Tensione concatenata in onda quadra	1170 V c.a.
Frequenza massima di alimentazione	150 Hz
Classe Termica	IT 200
Potenza continuativa	170 kW
Corrente continuativa	105 A
Velocità	2078 giri/1'
Peso	715 kg

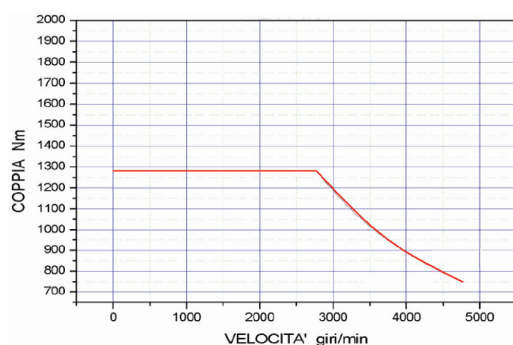


Fig. 27 – Caratteristica dell'azionamento di trazione.

Si riportano di seguito alcuni dati sulle caratteristiche delle parti principali del motore.

Carcassa

Il motore è privo di carcassa. La parte fissa è costituita dal pacco lamellare statorico, da tiranti in acciaio e dalle due flange pressapacco di estremità realizzate in lamiera di acciaio di spessore adeguato e dimensionate per sopportare le sollecitazioni dinamiche trasmesse attraverso le sospensioni e la trasmissione.

Pacchi lamellari statorico e rotorico

Essi sono costituiti da lamierini magnetici con bassa cifra di perdita, spessore 0,5 mm, isolati da ambo i lati e ricavati da un pezzo unico me-

diente tranciatura di precisione. Nei lamierini del pacco statorico sono previste cave aperte e una fila di fori di ventilazione assiale.

L'assemblaggio viene realizzato sotto pressa a mezzo tiranti e flange pressapacco, saldati elettricamente. Anche i lamierini del pacco rotorico hanno cave aperte, una fila di fori di ventilazione oltre ad un foro centrale per il calettamento dell'albero.

Avvolgimenti

Gli avvolgimenti sono concepiti con l'obiettivo di ridurre sensibilmente le perdite addizionali il cui effetto è molto sentito negli azionamenti di tipo elettronico. Il loro dimensionamento tiene conto delle condizioni di alimentazione (in particolare del contenuto armonico presente nella forma d'onda della tensione applicata).

L'avvolgimento di statore è realizzato con piattine di rame preisolate, mentre quello di rotore è una *gabbia di scoiattolo* a barre superficiali di rame+zirconio con sezione rettangolare. La resistenza meccanica delle testate dell'avvolgimento di statore viene assicurata da legature di ancoraggio.

Particolare cura è stata posta infine nella scelta dei materiali isolanti e nello studio del circuito di ventilazione.

Isolamento

L'avvolgimento di statore è costituito da piattine preisolate con nastri in kapton di tipo "Corona re-

sistente". L'isolamento è costituito da tre componenti principali:

- isolamento tra conduttori singoli (isolamento tra spire);
- isolamento degli avvolgimenti verso massa;
- isolamento di agglomerazione di tutti i materiali isolanti con resina mediante procedimento di impregnazione con vuoto e pressione (V.P.I.).

L'isolamento tra le spire è ottenuto realizzando l'avvolgimento con piattina di rame preisolata, nastri con kapton resistente all'effetto corona. Le singole bobine sagomate vengono isolate contro massa con nastri 2/3 sovrapposte di vetro mica poroso al silicone (spessore 0,12mm) rinforzato con legante aramidico per facilitarne l'applicazione.

La sistemazione dell'avvolgimento in cava avviene con una protezione verso massa costituita anch'essa da un involucro di kapton tipo H500 (spessore 0,125 mm), da un isolamento fondo cava costituito da uno spessore di Nomex 418, da un interstrato fra bobine costituito da uno spessore di Nomex micato 418 e un isolamento sotto chiavetta costituito da uno spessore di Nomex 410.

La chiavetta di chiusura della cava è realizzata con uno stratificato vetro epossidico, senza alogeni e autostinguente, di classe H.

L'avvolgimento montato nel pacco viene impregnato, mediante procedimento V.P.I., con resina poliesteremidica denominata SAV 84.

Il sistema di isolamento e impregnazione adottato conferisce, oltre che ottime caratteristiche isolanti (resistenza alle sovratensioni originate dalla commutazione forzata dei semiconduttori del convertitore di alimentazione ed ai gradienti di tensione localizzati nelle prime spire di ciascuna fase), anche una buona compattezza meccanica e permette un efficiente smaltimento del calore.

Albero

L'albero, in acciaio di qualità, è di-

TRAZIONE ELETTRICA

mensionato per trasmettere la coppia massima e per sopportare gli urti dinamici in esercizio con deformazioni contenute.

Cuscinetti

Il rotore è equipaggiato con cuscinetti a rotolamento; uno di essi è isolato ed entrambi sono lubrificati a grasso. I cuscinetti sono dotati di particolari labirinti per assicurare la tenuta del grasso.

Ventilazione

Il motore è autoventilato. L'aria aspirata da una ventola interna viene fatta fluire nella macchina assialmente attraverso fori ricavati nei pacchi di statore e rotore. Il sistema di prese d'aria sul veicolo è realizzato in modo da ridurre l'impolveramento e l'infiltrazione di acqua.

4.2.6. Filtro linea

Il filtro di linea del convertitore (comune alla sezione inverter e chopper) è di tipo *monocella* LC; i parametri del filtro sono: $L = 6\text{mH}$, $C_{\text{tot}} = 5,6\text{ }\mu\text{F}$.

L'induttanza è realizzata tramite un unico avvolgimento isolato in classe H e dimensionato per una corrente termica di 220 A. L'avvolgimento è contenuto in una carpenteria cilindrica d'acciaio esterna al convertitore e predisposta per il montaggio sottocassa del veicolo.

La capacità totale di filtro è costituita dal parallelo dei condensatori contenuti nei tre moduli inverter e nel modulo chopper. In ciascun modulo sono contenuti due condensatori al polipropilene da $700\text{ }\mu\text{F}/100\text{A}_{\text{ms}}$, per cui la capacità totale sarà: $700 \cdot 2 \cdot 4 = 5600\text{ }\mu\text{F}$.

4.2.7. Vano apparecchi

Questo comparto (fig. 21) contiene:

- schede TCU;
- 1 Trasduttore di tensione di linea (TVL);
- 1 Trasduttore di tensione di filtro (TVF);
- 1 Trasduttore di corrente di linea (TAL);
- 1 Contattore principale di filtro (CPF);
- 1 Contattore di carica filtro (CCF);
- 4 Resistenze di carica filtro (RCF);
- 1 Fusibile carica filtro (FCF);
- 1 Fusibile Trasduttore di filtro (FTV).

Il convertitore si interfaccia con l'ambiente esterno tramite isolatori passanti (alta tensione) e connettori circolari con innesto a baionetta (bassa tensione). Gli isolatori di alta

tensione sono disposti sui singoli moduli (collegamento al motore ed ai reostati di frenatura) e sul vano apparecchi (alimentazione dalla linea); i connettori circolari sono raggruppati anch'essi sul vano apparecchi.

4.3. Azionamento di trazione: parte elettrica di controllo (TCU)

L'Unità di Controllo Trazione (TCU) implementa il controllo del convertitore di potenza utilizzato per l'alimentazione dei motori di trazione. Essa svolge le seguenti funzioni fondamentali:

- riceve i comandi da eseguire;
- genera le forme d'onda necessarie al pilotaggio dei semiconduttori di potenza;
- rileva eventuali anomalie dei circuiti di potenza e di controllo attuando le protezioni opportune;
- trasmette alla unità di controllo del veicolo informazioni diagnostiche circa lo stato di funzionamento e/o anomalie ed eventi di guasto;
- trasmette ad una unità esterna (PTU) segnali digitali ed analogici per esigenze di sperimentazione e diagnostica avanzata.

Le figg. 28a) e b) riportano la vista frontale del modulo TCU ed uno schema a blocchi delle interconnessioni della TCU con l'ambiente esterno:

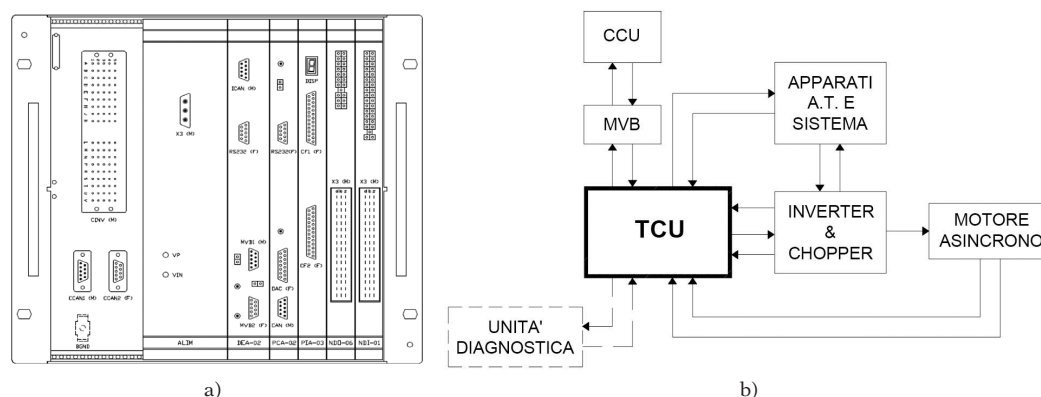


Fig. 28 - a) Vista frontale della TCU; b) Schema a blocchi delle sue interconnessioni con l'ambiente esterno.

La TCU è collocata nel sottocassa all'interno di un contenitore posto nelle immediate vicinanze del convertitore di trazione, con grado di protezione IP 55, secondo le norme EN60529, tale da garantire una sufficiente circolazione di aria ed impedire la formazione di condensa evitando quindi processi di ossidazione.

Questa disposizione permette di minimizzare la lunghezza dei collegamenti con le schede di pilotaggio dei semiconduttori di potenza. Le TCU colloquiano con le centraline CCU tramite il bus MVB. La scelta di suddividere le elettroniche in CCU (logica di rotabile) e TCU (logica di azionamento), in accordo con le moderne architetture di regolazione, è originata dalla convenienza di svincolare il controllo degli azionamenti (generazione impulsi e gestione delle protezioni) dall'acquisizione e gestione dei segnali di «logica di veicolo» (comandi di cabina di guida e impianti di bordo), poiché caratterizzati da tempistiche completamente diverse.

Le principali funzioni svolte dalla TCU sono le seguenti:

1) *Elaborazione dei segnali analogici e gestione protezioni:*

Questo blocco (fig. 29) provvede all'acquisizione dei segnali tramite i

trasduttori tensione/corrente del circuito di potenza, al rilevamento di valori anomali e alla logica di protezione. I segnali analogici sono immediatamente convertiti in digitali per aumentare le prestazioni di rapporto segnale/rumore e sono poi inviati al controllo dell'inverter e del chopper.

Segnali connessi con le protezioni:

- *corrente massima di fase:* il rilevamento di una sovracorrente di fase, tramite i relativi trasduttori, comanda l'apertura dell'interruttore extrarapido;
- *sbilanciamento fasi:* se tra due correnti di fase è monitorato uno sbilanciamento, viene comandata anche in questo caso l'apertura dell'interruttore extrarapido;
- *sovratensione di filtro:* nel caso in cui la tensione dovesse superare la tensione massima dell'impianto, interviene il chopper di frenatura per 100 ms (in funzione di sfioratore). Nel caso la tensione continuasse ad aumentare, vengono dapprima bloccati gli impulsi alle fasi e, successivamente, è comandata l'apertura dell'interruttore extrarapido;
- *bassa tensione filtro:* nel caso la tensione dovesse scendere sotto il valore minimo dell'impianto è av-

viata la gestione del circuito di precarica filtro;

- *diagnostica schede di pilotaggio:* in caso di guasto ad una qualsiasi delle schede di pilotaggio, sono bloccati gli impulsi e viene aperto l'interruttore extrarapido;
- *diagnostica termoswitch:* rilevando una sovratemperatura sui radiatori inverter, viene informata la CCU, che gestisce una diminuzione di prestazione.

Ogni qualvolta viene comandata l'apertura dell'interruttore extrarapido, interviene il chopper di frenatura, per favorire la scarica dei condensatori di filtro. In parallelo ai condensatori sono comunque collegate in modo permanente delle resistenze che ne assicurano la scarica in un tempo inferiore a quello richiesto per la rimozione dei coperchi di accesso.

2) *Controllo inverter:*

Il controllo del motore asincrono è ad *orientamento di campo*, realizzato tramite calcolo diretto del flusso di rotore e adattamento on line dei parametri di motore.

I vantaggi di questa tecnica sono:

- elevate prestazioni in regime dinamico;
- indipendenza dalla variazione dei parametri del motore (legati alla temperatura);
- non è necessaria un'elevata precisione di misura della velocità del motore;
- controllo separato del flusso e della coppia di motore.

Come indicato nella fig 28 b), la centralina TCU riceve dalla CCU master il riferimento di sforzo trazione/frenatura e, in funzione del desiderato valore di flusso rotorico (che diminuisce nella zona di indebolimento), calcola le due componenti di corrente: la corrente diretta che controlla il flusso rotorico, e la componente in quadratura, che regola la coppia motorica, nel sistema di riferimento sincrono (fig. 30).

Partendo da queste correnti, l'al-

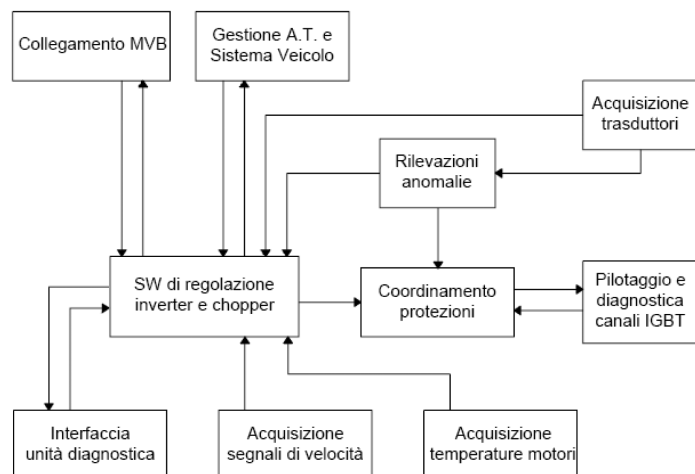


Fig. 29 – Schema a blocchi dell'elaborazione.

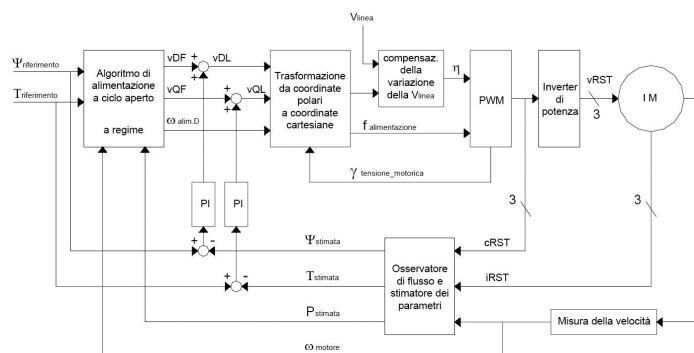


Fig. 30 – Schema del controllo ad orientamento di flusso.

goritmo di alimentazione a ciclo aperto calcola le componenti della tensione e la frequenza di alimentazione da imprimere agli avvolgimenti statorici. Poi, al fine di calcolare la tensione e la frequenza di uscita per il modulatore PWM, viene attuata la trasformazione da coordinate polari in coordinate cartesiane ed una compensazione delle variazioni della tensione di linea.

Uno stadio del controllo esegue poi: 1) il monitoraggio del flusso; 2) la ricezione dei segnali delle tre correnti di fase, della tensione di uscita, della velocità motorica e, tramite un filtro di Kalman, li elabora per generare in uscita il valore stimato di flusso e coppia.

Questi valori rilevati sono confrontati con quelli attesi, e quindi corretti tramite un regolatore proporzionale-integrale (uno per il flusso, l'altro per la coppia).

Partendo dalle ampiezze di tensione e di frequenza il modulatore PWM decide la forma d'onda delle tre fasi dell'inverter, e tali informazioni sono inviate alla logica di controllo dell'unità che genera gli impulsi agli IGBT di potenza. Il funzionamento del modulatore PWM è basato sulla modulazione vettoriale.

All'avviamento dell'inverter e alle basse frequenze di uscita della fondamentale, la frequenza di commutazione è tenuta costante; da ciò deriva un comando "asincrono" degli impulsi. All'aumentare della frequenza della

fondamentale viene impostata una tecnica di commutazione sincrona onde evitare oscillazioni subarmoniche.

Alle frequenze di uscita più elevate, per raggiungere la zona di deflussaggio, la transizione tra modulazione vettoriale e funzionamento in onda quadra, è realizzata linearmente mediante eliminazione graduale degli impulsi (di durata inferiore al tempo minimo di conduzione degli IGBT).

3) Controllo del chopper di frenatura:

Tale funzione controlla la frenatura elettrodinamica e la protezione contro le sovratensioni in ingresso. L'unità in questione rileva il valore della tensione in ingresso all'inverter tramite il blocco "segnali analogici e protezioni" insieme alla richiesta di sforzo frenante dalla CCU.

Un treno di impulsi, a frequenza fissa e duty-cycle variabile, è inviato alla logica di controllo dell'unità di generazione impulsi. Questo chopper viene acceso in frenatura elettrodinamica oppure in trazione per "tagliare" i picchi di sovratensione.

4) Logica di controllo della generazione impulsi:

Quest'unità genera la sequenza di comando ai singoli semiconduttori di potenza dell'inverter e del chopper, partendo dalle forme d'onda del modulatore PWM del controllo inverter e dal treno d'impulsi del controllo

chopper. Questi segnali sono inviati alla scheda di pilotaggio degli IGBT.

5) Rampe anti-jerk:

In risposta ad una transizione trazione / coasting / frenatura o ad una variazione del valore di prestazione, la TCU provvede ad aumentare/diminuire il livello di sforzo impostato secondo una rampa lineare che limiti il gradiente di accelerazione (jerk) al valore prefissato.

6) Funzione antislittante/anti pattinante:

La TCU esegue un controllo dello slittamento/pattinamento delle ruote per massimizzare le prestazioni del veicolo in tutte le condizioni di binario.

Si ha uno slittamento quando la TCU si trova in modalità trazione e la coppia motrice impressa dal motore all'asse è troppo alta per le condizioni di aderenza presenti.

Si ha un pattinamento quando la TCU si trova in modalità frenatura e la coppia frenante impressa dal motore all'asse è troppo alta per le condizioni di aderenza presenti.

Ogni ruota, in un certo istante, può trovarsi nello stato normale, nello stato "slittamento" o nello stato "pattinamento".

La rilevazione dello slittamento/pattinamento è basata sulla misura delle velocità ed accelerazioni delle singole ruote del veicolo che sono confrontate con prefissate soglie di riferimento.

Quando viene rilevato uno slittamento (risp. pattinamento) la coppia motrice (risp. frenante) viene ridotta per ripristinare l'aderenza ruota-binario. Dopo tale ripristino la coppia in opera viene nuovamente incrementata fino al valore richiesto.

L'algoritmo dell'antislittante/anti-pattinante è basato sulle seguenti funzioni:

- 1. Misura del diametro ruote.
- 2. Calcolo della velocità e dell'accelerazione del veicolo.

Uscita bassa tensione

Potenza nominale: 9 kW;

Tensione nominale: 24 V cc.

Alimentazione BT

Tensione nominale: 24 Vcc;

Campo di variazione;

Potenza assorbita in condizioni normali.

Con riferimento allo schema funzionale di fig. 31 si possono individuare le principali sezioni che compongono il convertitore e che sono di seguito riportate:

4.4.2. Filtro linea

Il filtro di linea è del tipo L-C monocella. L'induttore di filtro è costituito dalla coppia di induttori LF1A / LF1B che sono collegati in serie nel caso di 1500 V di linea ed in parallelo nel caso di 750 V. Per quanto riguarda la capacità equivalente del filtro notiamo che ciascun blocco di conversione è dotato di un condensatore principale di filtro (CFL1/CFL2) collegato in parallelo ad un condensatore di "commutazione" (CF11) e a una coppia di condensatori di ripartizione (CB1/CB2 oppure CB3 / CB4).

La capacità equivalente del filtro è pertanto il risultato del collegamento in serie o in parallelo delle capacità che equipaggiano ciascun blocco di conversione.

La configurazione degli elementi costituenti il filtro (che assicura la medesima risposta in frequenza del filtro sia a 1500 V che a 750 V) è effettuata tramite un opportuno blocco "cambiamento" che permette di effettuare in modo facile e sicuro l'adeguamento del convertitore alla tensione di linea disponibile. Per le applicazioni monofase gli elementi mobili del cambiamento sono bloccati nella configurazione relativa alla tensione di linea prevista. Questa soluzione permette di minimizzare pesi ed ingombri dei componenti costituenti il filtro stesso.

4.4.3. Sezione cc/ca del convertitore

Per sezione cc/ca del convertitore

si intende l'interfaccia tra il trasformatore di uscita TR1 e la coppia di inverter trifasi appartenenti a ciascun blocco di conversione.

Ogni inverter è costituito da sei IGBT (IP1/2/3 – IN1/2/3) raggruppati in tre moduli doppi. Ciascun modulo doppio contiene una "gamba di inverter" con due IGBT da 1700 V 200 A isolati a 6000 V verso massa. La frequenza di commutazione degli inverter è pari a 1500 Hz ed il criterio di modulazione adottato è quello sinusoidale. Ciascun inverter genera un sistema trifase di tensioni di alimentazione degli avvolgimenti primari del trasformatore TR1, modificando l'indice di modulazione in funzione del valore istantaneo della tensione presente ai capi del rispettivo condensatore di filtro linea. Di fatto, dovendo energizzare le linee treno di MT a 380 V costanti, l'inverter deve compensare le inevitabili cadute di tensione che si verificano sul trasformatore di uscita TR1 e sul filtro. La compensazione delle cadute di tensione è effettuata tramite un algoritmo che si avvale dei valori istantanei delle correnti erogate dagli inverter senza ricorrere pertanto a trasduttori sulle tensioni di uscita (regolazione ad anello aperto).

Il trasformatore di uscita TR1 si rende necessario per:

- garantire l'isolamento galvanico tra linea cc e linea trifase MT;
- assicurare l'uscita a 380 V nella condizione di linea bassa (500 V ai morsetti di ciascun blocco di conversione) con l'adozione di un opportuno rapporto spire;
- sommare i contributi energetici provenienti dai due blocchi di conversione assicurando al tempo stesso una corretta ripartizione delle tensioni continue sui condensatori del filtro linea (linea a 1500 V e blocchi in serie).

Le modalità di pilotaggio degli IGBT omologhi sono identiche.

4.4.4. Filtro di uscita

Il filtro di uscita si rende necessario per eliminare i fronti di commutazione tipici della modulazione PWM

dell'inverter che si osservano ai morsetti del trasformatore.

Il filtro è costituito da:

- due terne di induttori monofasi (LR1/S1/T1 e LR2/S2/T2) collegati in serie a ciascun primario del trasformatore TR1;
- la reattanza dispersa del trasformatore che si somma alle precedenti induttanze;
- una terna di condensatori (CR/S/T) collegati a stella e derivati dai morsetti di secondario del trasformatore TR1.

Per ottimizzare il dimensionamento del filtro di uscita conviene elevare il più possibile la frequenza di commutazione dell'inverter vista dal filtro, poiché l'aumento della frequenza di lavoro del filtro consente, a pari distorsione armonica sulla tensione di uscita, di ridurre le dimensioni degli elementi reattivi costituenti il filtro stesso. L'adozione delle induttanze monofasi a monte del trasformatore ha consentito la riduzione della rumorosità del trasformatore stesso in virtù della riduzione del contenuto armonico della corrente magnetizzante.

4.4.5. Sezione cc/cc del convertitore (caricabatterie)

Per sezione cc/cc del convertitore si intende l'interfaccia tra il trasformatore monofase TR2 e la coppia di inverter monofasi appartenenti a ciascun blocco di conversione.

Ciascun inverter monofase è costituito da due IGBT (IP1A/IN1A) raggruppati in un modulo doppio, identico a quello utilizzato per l'inverter trifase, in associazione con la coppia di condensatori di ripartizione CFA/B ovvero CFC/D realizzando una topologia di conversione a presa centrale.

I pilotaggi degli IGBT IP1A/IN1A di entrambi gli inverter monofasi sono sincroni (frequenza di commutazione pari a 6 kHz) e gli impulsi di tensione disponibili ai loro morsetti di uscita sono applicati ai primari del trasformatore TR2, necessario per

garantire l'isolamento galvanico tra linea cc e linea BT.

Gli impulsi di tensione disponibili ai morsetti secondari del trasformatore TR2 sono resi unidirezionali dal raddrizzatore costituito dai diodi D1A/B e D2A/B. Dovendo generare una tensione cc costante è necessario correlare la durata degli impulsi al valore istantaneo della tensione di linea.

Per ridurre l'ondulazione sulla tensione di uscita del caricabatteria è previsto un filtro LC costituito da due induttori e dal condensatore di uscita CFU; si tenga presente che la frequenza dell'ondulazione in uscita dal raddrizzatore è pari a 12 kHz.

4.4.6. Gate unit

I circuiti di accensione e spegnimento degli IGBT, di seguito indicati come Gate-Units, hanno il compito sia di fornire gli adeguati impulsi di comando per i semiconduttori, sia per allontanarli dalla condizione di saturazione in caso di corto circuito, sia per forzarne lo spegnimento in caso di tensione di alimentazione dei circuiti di gate troppo bassa.

I segnali di pilotaggio degli IGBT sono trasferiti alle Gate-Units tramite segmenti di fibre ottiche al fine di garantire il necessario isolamento galvanico tra il sistema di controllo del convertitore e gli IGBT, assicurando al tempo stesso una elevata immunità ai disturbi elettromagnetici.

Poiché le Gate Units hanno facoltà di autonomo intervento sugli impulsi di pilotaggio degli IGBT e non vi sono retroazioni tra esse e la regolazione è necessario prevedere circuiti atti a riconoscere l'eventuale attuazione del blocco impulsi da parte della generica Gate Unit. La funzione descritta è affidata ai quattro trasduttori a barra passante TA1, TA2, TA3, TA4 i quali in condizioni normali sono attraversati da correnti primarie identiche e contrapposte.

In caso di blocco impulsi attuato da una delle Gate Units, il circuito magnetico del trasduttore è interessato dal flusso generato dalla forza ma-

gnomotrice che nasce per l'azzerramento della corrente erogata dalla fase dell'inverter cui appartiene la Gate Unit in allarme. La variazione di impedenza del circuito secondario del trasduttore dovuta alla saturazione del suo nucleo magnetico è individuata dall'apparato di regolazione che estende poi il blocco impulsi a tutto il convertitore attuando così la procedura di protezione.

In fig. 32 è presentata la vista d'insieme del convertitore.

4.4.7. Layout

I due convertitori sono installati longitudinalmente nel sottocassa dei veicoli di estremità (M1 e M3) e la fig. 32 permette di identificarne i principali blocchi mettendo in evidenza il fatto che la carpenteria è suddivisa in due zone principali:

- zona con grado di tenuta IP65 che ospita la componentistica elettronica;
- zona semplicemente segregata, e in diretto contatto con l'aria ambiente, atta ad ospitare i componenti magnetici del convertitore.

Il transito dei cavi dalla zona a tenuta a quella semplicemente segregata è attuato tramite idonei passacavi.

I componenti magnetici ospitati nell'omonimo vano sono realizzati con isolamento integrale che li rende idonei al superamento della prova di tensione applicata con il componente immerso in acqua. Il layout del convertitore è stato studiato per ottimizzare l'accessibilità, dal sottocassa del veicolo, a tutti i suoi sottoassiemi.

L'interfacciamento elettrico di potenza del

convertitore con il veicolo è realizzato tramite piastre a tre morsetti.

L'interfacciamento elettrico di bassa tensione è realizzato tramite connettore Harting,

L'interfacciamento con il bus MVB è realizzato tramite connettori a vaschetta direttamente collegati al pannello di regolazione; il passaggio dei cavi è realizzato tramite un "falso connettore" Harting che garantisce l'ermeticità del transito dei cavi e dei relativi connettori a vaschetta attraverso la parete del convertitore.

5. Prove e verifiche significative

Nel corso della costruzione dei rotabili, sebbene la fornitura dei materiali sia avvenuta in regime di assicurazione della qualità da parte dei vari Produttori, particolare cura ed attenzione è stata posta nell'esecuzione delle prove "di tipo" sui principali componenti e delle prove "di prestazioni" sull'intero veicolo.

Prove di tipo (eseguite presso i rispettivi fornitori o in qualche caso presso centri prova esterni):

- gruppi statici di alimentazione degli impianti ausiliari;
- carpenteria casse (prove estensimetriche);

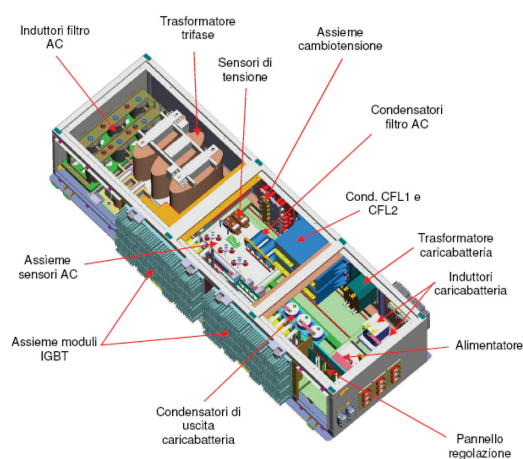


Fig. 32 – Vista d'insieme del convertitore.

TRAZIONE ELETTRICA

- reostati di frenatura;
- mantice intercomunicante;
- porte passeggeri;
- accoppiatore;
- climatizzatore comparto;
- climatizzatore cabina;
- dischi freno;
- impianto freno EPAC;
- motori di trazione;
- gruppo trattamento aria (moto-compressore);
- ruota monoblocco;
- pantografo;
- carrelli (prove estensimetriche statiche e di fatica accelerata);
- riduttore;
- sospensioni ed elementi elastici in genere;
- parabrezza;
- finestrini;
- sedile passeggeri;
- extrarapido;
- porta macchinista.

Prove di prestazioni (il veicolo sottoposto a test è stato l'ETR 201 ovvero la testa di serie presso l'impianto di Ponticelli o laddove necessario in linea):

- verifica del peso per asse a tara ed a carico massimo;
- verifica del comportamento in presenza di sgembo di binario (prova statica);
- verifica delle prestazioni in trazione e frenatura a carico massimo ed a tara (accelerazioni, jerk, anti-pattinante/antislittante, spunto e frenatura sulla massima pendenza ecc.);
- rilievi fonometrici;
- rilievi emissione campi elettromagnetici (compatibilità elettromagnetica);
- rilievo consumi energetici;
- prove di tipo sistema diagnostico di bordo;
- illuminazione interna;

- climatizzazione (in riscaldamento e raffreddamento);
- ATP/SCMT;
- registrazione statica degli eventi.

Particolarmente significativi sono stati i risultati ottenuti dalle prove atte a verificare i consumi energetici del veicolo ed il recupero di energia in linea. Tali prove hanno riguardato:

- la misura della potenza e dell'energia assorbita con veicolo fermo;
- la misura della potenza e dell'energia quando il treno percorre una tratta tipo;
- la capacità da parte del veicolo di poter restituire energia alla linea durante una frenatura,
- compatibilmente con le condizioni di ricettività della linea. A questo scopo la prova sulla
- tratta tipo è stata effettuata di giorno;
- la verifica delle misure effettuate e la comparazione di queste con il sistema di misurazione dell'energia a bordo; infatti a tale scopo sono stati appositamente installati nel veicolo dei contatori di energia. Essi si interfacciano col sistema di comando e controllo e di diagnostica, ovvero con l'unità intelligente la quale acquisendo e trasmettendo le informazioni e i comandi, gestisce il funzionamento della maggior parte dei dispositivi presenti sul treno.

Inoltre, i contatori visualizzano sul display IDU (Interfacing Diagnostic Unit), presente in cabina di guida, l'entità di alcune grandezze elettriche di interesse, in particolare dell'energia assorbita o recuperata per un tempo prefissato.

Le prove sono state condotte su un tratto della linea in condizioni di:

- rotaie asciutte e pulite;
- tensione di linea al valore nominale: 1500 V;
- tratta in piano: pendenza compresa nel campo $\pm 2 \text{ ‰}$ (per le prove su tratta tipo);

- condizioni di carico: tara;
- diametro ruote nuove: 760 mm.

Per la misura della potenza e dell'energia, si è utilizzato un opportuno programma installato su di un Personal Computer ed interfacciato con la regolazione "azionamento 1" (TCU1) di bordo, in modo da scaricare in tempo reale i segnali provenienti dai trasduttori delle grandezze elettriche di interesse. A tal fine è stato infatti installato un trasduttore di corrente di linea, il quale acquisisce il segnale della TCU1 e lo trasferisce al PC, allo scopo di poter calcolare la potenza e l'energia assorbita, utilizzando le acquisizioni di tensione e corrente di linea nel tempo. La Norma di riferimento è la CEI EN 50125 [9].

Nella prima parte è stata misurata la potenza e l'energia del veicolo a tara, fermo su binario antistante il deposito di Ponticelli Officina:

- 1) Si è partiti da una condizione di veicolo fermo, con pantografo basso, batterie scaricate di almeno 100Ah, impianto pneumatico scarico.
- 2) È stato predisposto il sistema di misura per la registrazione della potenza assorbita dalla linea (tensione e corrente di linea). La registrazione è stata inizializzata nel momento dell'abilitazione del treno.
- 3) E' stato abilitato il veicolo e si è verificato che fossero attivi tutti gli impianti di bordo, ed in particolare:
 - a. gruppi statici e caricabatterie;
 - b. condizionamento;
 - c. compressore principale;
 - d. luci interne ed esterne;
 - e. ATP, EPAC, Porte;
 - f. IR chiuso ed azionamenti disposti in coasting.
- 4) Il veicolo è stato mantenuto abilitato per 1 ora.

Nella tabella 9 si riassumono i risultati di tale prova.

Nella seconda parte sono state effettuate una serie di prove in linea atte a verificare il consumo di energia

TRAZIONE ELETTRICA

TABELLA 9

RISULTATI PROVA CON VEICOLO FERMO

Potenza massima assorbita durante l'abilitazione	131,58 kW
Potenza al termine dell'ora	47,20 kW
Energia totale assorbita Misurata nell'ora di test	42,42 kWh
Potenza media assorbita nell'ora di prova $P_{med} = E_{ass-mis} / 1h$	42,42 kW
Corrente di linea massima	82,4 A
Corrente a regime	27,9 A
Tensione di linea media durante la prova	1648,4 V
Energia totale assorbita presentata in IDU	39,9 kWh

con veicolo circolante su una tratta tipo. E' doveroso precisare che l'entità del recupero dell'energia messa a disposizione da un treno in frenatura è però subordinato ad una serie di fattori, dipendenti sia dalla struttura fisica della linea di trazione (ad es. le sue caratteristiche topologiche, la localizzazione delle sottostazioni di alimentazione e rispettive caratteristiche di carico, le caratteristiche degli azionamenti di bordo), sia dal modo in cui viene esercita la linea stessa (lo stato dei convogli che si spostano lungo la linea, il numero dei convogli, la loro posizione sul tracciato, il distanziamento reciproco, etc...).

Tali prove sono state eseguite con tutti gli azionamenti inseriti; inoltre, allo scopo di valutare il comportamento del veicolo in caso di recupero dell'energia in rete, le prove sono state eseguite in orario diurno ed in presenza di traffico in linea in conformità alla norma CEI EN 50388 [10].

La tratta tipo considerata è stata "Ercolano-S.Giorgio a Cremano".

1) per evitare interventi indebiti del

sistema di segnalamento, si è provveduto ad escludere l'ATP;

2) si è predisposto il sistema di misura per la registrazione della potenza assorbita dalla linea (tensione e corrente di linea). La registrazione è stata iniziata nel momento in cui è stata comandata la trazione;

3) il veicolo è partito dalla condizione di "fermo e sfrenato" ed il macchinista ha eseguito una partenza con la leva di trazione a massimo riferimento;

4) sono state eseguite le seguenti manovre, compatibilmente con le condizioni della linea:

a) accelerata al massimo riferimento;

b) quando il rotabile si è trovato ad una velocità di 90 km/h, il manipolatore è stato portato in coasting;

c) il veicolo è stato lasciato in coasting per pochi secondi;

d) è stata eseguita una frenatura di servizio a fondo con il manipolatore al massimo riferimento di frenatura (non emergenza).

5) nel caso in cui, durante la marcia si fossero verificati degli slitta-

TABELLA 10

RISULTATI DELLE PROVE EFFETTUATE

Potenza massima assorbita durante l'accelerazione	1771 kW	
Energia totale assorbita misurata durante tutta l'accelerazione (integrazione della sola potenza positiva)	9,15 kWh	
Energia restituita alla linea misurata durante la frenatura (integrazione della sola potenza negativa)	4,77 kWh	
Potenza media assorbita nella prova	294 kW	
Corrente di linea massima in fase di accelerazione	1052 A	
Tensione di linea minima in fase di accelerazione	1530 V	
Tensione di linea massima durante la fase di frenatura	1773 V	
Energia assorbita nel tempo di prova misurata da IDU	8,7 kWh	
Energia restituita nel tempo di prova misurata da IDU	4,9 kWh	
	Valore rilevato	Valore atteso
Efficienza del recupero di energia: $Eff\% = E_r / E_{tot-a} \times 100$	51.20%	> 30 %(*)
Errore percentuale sulla misurazione dell'energia assorbita $Err-a\% = 100 \times (E_{a-IDU} - E_{a-mis}) / E_{a-mis}$	4.90%	< 10 %
Errore percentuale sulla misurazione dell'energia restituita: $Err-r\% = 100 \times (E_{r-IDU} - E_{r-mis}) / E_{r-mis}$	-2.8 %	< 10 %

(*) Il valore è orientativo perché è condizionato dalla ricettività della linea di alimentazione al momento della prova.

menti, sarebbe stato necessario annullare la prova e ripeterla.

I vantaggi associati alla frenatura rigenerativa sono notevoli nell'ambito delle linee di trazione metropolitane, in cui le frequenti fasi di accelerazione e frenatura abbinate alla presenza di numerose fermate e alle caratteristiche tipiche dei tracciati, comportano percentuali medie di energia che studi effettuati affermano di poter raggiungere valori del 15-20% nelle ore di punta [11,12].

I risultati di tale prova si riassumono nella tabella 10.

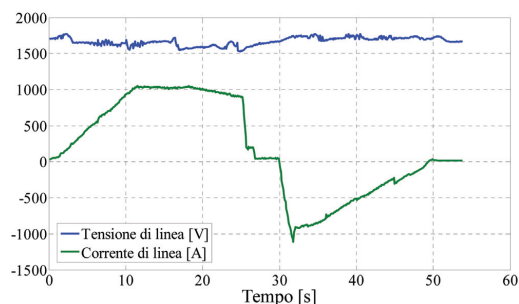


Fig. 33 – Tensione al pantografo, corrente totale di linea.

Occorre premettere che, trattandosi di una prova su una tratta tipo effettuata durante l'esercizio ordinario e in presenza delle serie precedenti di elettrotreni (tutti dotati di frenatura reostatica), non sono state condotte delle analisi sui principali parametri legati al traffico ferroviario e all'entità dell'energia recuperabile, come il cadenzamento dei convogli e lo sfasamento temporale.

Di conseguenza non è stato possibile condurre una campagna di misure in modo da stimare un rendimento medio della frenatura a recupero con riferimento alle diverse condizioni di traffico e di assorbimento da parte della linea di contatto.

Nella fattispecie, il valore rilevato di efficienza del recupero pari al 51% è relativo alla particolare prova effettuata nelle condizioni sopra citate. Infatti un tale valore è giustificato dalla circostanza che la linea si è trovata in condizioni di elevata capacità di assorbimento, data la contemporanea presenza di elettrotreni puramente dissipativi sia sul binario pari che dispari; il trasferimento dell'energia di frenatura è reso possibile dai collegamenti di parallelo esistenti tra le rispettive linee di contatto.

Nel seguito si riportano gli andamenti temporali di tensione di linea e corrente di linea (fig. 33) e del relativo diagramma di marcia ed accelerazione (fig. 34). Come si vede dai diagrammi, il convoglio è stato portato fino alla velocità massima di 90 km/h effettuando pochi secondi di coasting, per poi procedere ad una frena-

ture con arresto, il tutto in un tempo di circa 50 s. Dal diagramma della tensione al pantografo, essendosi condizioni di elevata capacità di assorbimento, si evince che durante la frenatura essa aumenta fino a circa 1770 V senza superare il limite dei 1800 V, oltre il quale la potenza rigenerata viene in parte dissipata reostaticamente dando luogo a riduzioni del rendimento energetico. La fig. 35 riporta la potenza assorbita/restituita dal treno e le relative energie calcolate per il tempo entro cui è stata effettuata la prova.

6. Conclusioni

L'entrata in servizio dei nuovi elettrotreni, denominati Metrostar, costituisce una tappa significativa nell'evoluzione della Circumvesuviana che già vanta una lunga tradizione nel trasporto su ferro e che serve un bacino di utenza con estensione regionale.

Il salto di qualità è rappresentato dal fatto che questi mezzi di trazione impiegano appieno le risorse offerte dall'Elettronica di Potenza. In primo luogo l'azionamento è del tipo inverter+motore asincrono trifase laddove il parco veicoli

esistente è ancora di tipo reostatico. Ciò si traduce in una maggiore versatilità di esercizio soprattutto dal punto di vista manutentivo, e in una maggiore ergonomia operativa.

In secondo luogo, grazie a questo tipo di azionamento è stato possibile affrontare in modo concreto il problema della frenatura elettrica a recupero e le sue possibili applicazioni, in considerazione dei benefici ottenibili sul piano energetico e in particolare per le ricadute sulla componente economica dell'Impresa ferroviaria.

In particolare i risultati delle prove condotte hanno mostrato, con riferimento alle condizioni di esercizio contestuali alle serie già esistenti di elettrotreni, la possibilità di conseguire recuperi abbastanza elevati con notevoli risparmi energetici.

Per quanto riguarda gli aspetti economici, intesi come costi di acquisto e di manutenzione, l'unico dato

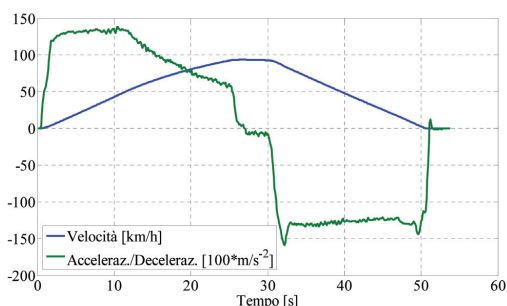


Fig. 34 - Velocità ed accelerazione/decelerazione sulla tratta considerata.

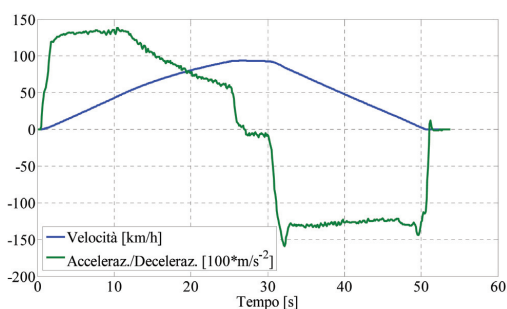


Fig. 35 – Potenza di linea ed energie durante la prova sulla tratta considerata.

TRAZIONE ELETTRICA

attualmente disponibile è quello relativo alla prima di queste due voci il cui ordine di grandezza è di circa € 4 M/ETR.

I costi di manutenzione ordinaria, invece, non sono al momento computabili, dato che nessuno degli ETR in oggetto ha ancora completato il primo ciclo manutentivo dell'ordine di 80.000 km. Tuttavia, il piano manutentivo prevede i seguenti intervalli:

10.000 km; 20.000 km; 40.000 km; 80.000 km.

Relativamente ai guasti, è ancora in essere la garanzia contrattuale.

Fonte delle Figure:

1÷5 Circumvesuviana

6÷18 Firema Trasporti;

19÷35 AnsaldoBreda;

Gli autori ringraziano l'Ing. Gian-

lorenzo IOVINO (Circumvesuviana s.r.l.) per il prezioso supporto fornito durante la stesura di questo lavoro.

Inoltre, ringraziano l'Ing. Francesco CASTELLACCI (Firema) e l'Ing. Raffaele EVANGELISTA (AnsaldoBreda) per l'autorizzazione concessa al fine di pubblicare le figure degli schemi meccanici ed elettrici nonché di grafici, inerenti la trattazione svolta.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Documenti Circumvesuviana s.r.l..
- [2] Documenti AnsaldoBreda – Firema.
- [3] U. PACI, M. DI MATTEO, “*Elettrotreno snodato a 3 elementi ETR 200*”, Ingegneria Ferroviaria n.8/1995 pp. 627-634.
- [4] UNI EN 12663. Applicazioni ferroviarie - Requisiti strutturali delle casse dei veicoli ferroviari.
- [5] UNI EN 13749. Applicazioni ferroviarie - Rodiggio e carrelli.
- [6] UNI EN 13013-4 e 13260-1-2. Applicazioni ferroviarie – Sale montate e carrelli.
- [7] UNI EN 13298. Applicazioni ferroviarie – Componenti della sospensione.
- [8] CEI EN 50155. Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Equipaggiamenti elettronici utilizzati su materiale rotabile.
- [9] CEI EN 50125. Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filotranviarie, metropolitane - Prove del materiale rotabile dopo il completamento della costruzione e prima dell'entrata in servizio.
- [10] CEI EN 50388. Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Alimentazione elettrica e materiale rotabile - Criteri tecnici per il coordinamento tra alimentazione elettrica (sottostazione) e materiale rotabile per ottenere l'interoperabilità.
- [11] A. ADINOLFI, V. DI MARIO, R. LAMEDICA, A. PRUDENZI, “*La linea B della metropolitana di Roma: una campagna di misure per la valutazione del recupero dell'energia frenatura*”, Ingegneria Ferroviaria n. 3/1997 pp. 85-102.
- [12] A. CAPASSO, M. CIUCCIARELLI, S. LAURIA, “*Una metodologia di calcolo integrato del sistema di trazione a 2x25 kV, 50 Hz – Applicazione alla valutazione degli effetti di frenatura a recupero in una tratta AV/AC*”, Ingegneria Ferroviaria n. 11/2009 pp. 979-1000.