

Una metodologia di calcolo integrato del sistema di trazione a 2×25 kV, 50 Hz

Applicazione alla valutazione degli effetti della frenatura a recupero in una tratta AV/AC

An integrated methodology for 2x25 kV, 50 Hz traction system calculation

Evaluation of the regenerative braking effects in a HS/HC railway line

Prof. Ing. Alfonso CAPASSO(), Dott. Ing. Marco CIUCCIARELLI(*), Stefano LAURIA(*)*

SOMMARIO - L'articolo descrive una metodologia di calcolo integrata che, simulando il traffico ferroviario, consente di analizzare il comportamento degli impianti di trazione elettrica a 2×25 kV, 50 Hz. La metodologia effettua l'analisi elettrica multiconduttore del circuito di trazione utilizzando il software ATP-EMTP (Alternative Transient Program-ElectroMagnetic Transient Program) e pertanto rende possibile calcolare, per il sistema elettrico in esame, anche i transitori elettromagnetici e tutti i possibili regimi di guasto. Le analisi illustrate nel presente articolo fanno riferimento all'applicazione della metodologia in questione allo studio del funzionamento in regime permanente di una tratta ferroviaria AV/AC, con particolare attenzione agli effetti elettrici ed energetici della frenatura a recupero operata dai treni.

1. Introduzione

Il sistema di elettrificazione ferroviaria a 2×25 kV, 50 Hz adottato in Italia per le nuove tratte AV/AC garantisce, come noto, eccellenti prestazioni in termini di potenzialità, di affidabilità e flessibilità di esercizio, oltre ad una sostanziale riduzione dei disturbi elettromagnetici di tipo indotto rispetto ad altre elettrificazioni ferroviarie in c.a. La configurazione tipica di una tratta ferroviaria alimentata dal sistema 2×25 kV, 50 Hz è rappresentata nello schema di fig. 1; la peculiare struttura ed il principio sono oggetto di numerose descrizioni nella letteratura tecnica nazionale e pertanto in questa sede se ne citano alcune per opportuno riferimento [1][2][3].

La complessità circuitale degli impianti di trazione elettrica a 2×25 kV richiede, per un'accurata valutazione delle grandezze elettriche significative sia in fase di progettazione che di verifica, l'utilizzo di mezzi di calcolo au-

SUMMARY - The paper describes an integrated calculation methodology which, by simulating railway traffic, allows analysis of the performance of 2x25 kV 50 Hz electric traction systems. This methodology performs a multiconductor electrical analysis of the traction circuit utilising ATP-EMTP software (Alternative Transient Program-ElectroMagnetic Transient Program) and therefore additionally allows calculation of electromagnetic transients and all possible failure regimes. The analyses presented refer to the application of the methodology in question to the study of a high speed railway line section in steady-state operation, with particular emphasis on the electrical and energetic effects of train regenerative braking.

1. Introduction

It is well known that the 2×25 kV, 50 Hz railway supply system in use in Italy for new High Speed/High Capacity lines ensures an outstanding performance in terms of operation capacity, reliability and flexibility as well as a substantial reduction in induced type electromagnetic interference compared to other A.C. railway supply systems in use. Fig. 1 shows the typical configuration of the 2x25 kV-50 Hz railway supply system; its peculiar structure and principle are often described in national technical literature, and therefore the present paper cites the most relevant descriptions for reference [1][2][3].

The circuit complexity of the 2×25 kV electric traction systems, requires use of computer tools capable of solving very complex mathematical models in order to evaluate the significant electrical parameters during the design and verification phase. Since specialised software solutions for power supply system analysis were not fully suited to the

(*) Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Elettrica.

(*) Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Elettrica.

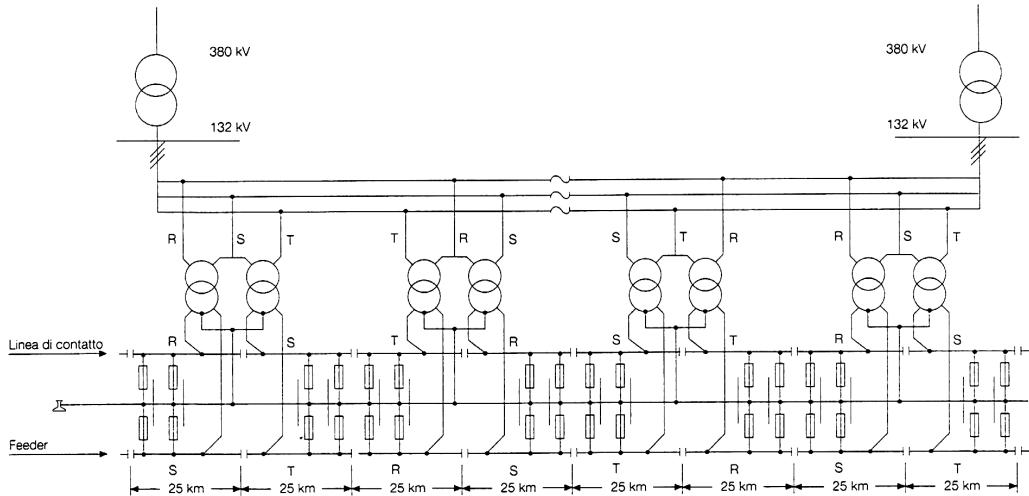


Fig. 1 – Schema generale sistema 2x25 kV, 50 Hz (da [1]). General configuration of the 2x25 kV-50 Hz system (from [1]).

tomatico capaci di risolvere modelli matematici anche molto complessi. Poiché le soluzioni software specializzate per l'analisi dei sistemi di potenza risultavano in generale non pienamente idonee all'analisi dei sistemi ferroviari elettrificati, sono state proposte soluzioni software dedicate. La mole dei calcoli, conseguente anche alla necessità di simulare i diversi possibili scenari di traffico, ha suggerito in alcuni casi il ricorso a semplificazioni consistenti nella simmetrizzazione del sistema elettrico [4] e/o nella riduzione del numero dei conduttori [5-7] [11]. Il modello multiconduttore proposto in [8] [9], includendo la conduttranza trasversale distribuita della rotaia e trascurando solo gli accoppiamenti capacitivi e le correnti a vuoto degli autotrasformatori ottiene risultati notevolmente precisi, anche se la complessità del metodo cresce con il numero dei treni nella tratta.

La rappresentazione completa multiconduttore adottata in [10] per l'analisi dell'interazione con il sistema elettrico di potenza (dissimmetrie, guasti) in specifiche condizioni di esercizio, appare efficacemente applicabile anche allo studio dei regimi elettrici che si conseguono nel circuito di trazione, in relazione alle potenze risultanti dalle condizioni di traffico simulate. Attualmente infatti il continuo incremento delle potenzialità di calcolo ha ridotto drasticamente la necessità di soluzioni semplificate, essendo possibile calcolare il regime permanente di reti aventi migliaia di nodi in tempi dell'ordine del secondo.

Ad oggi, il mercato offre alcune soluzioni software specializzate nell'analisi dei sistemi di trazione elettrica che però spesso risultano poco flessibili e quindi difficilmente adattabili alle diverse esigenze progettuali; inoltre la natura "chiusa" dei pacchetti software commerciali rende difficile la verifica delle metodologie di calcolo e dei risultati.

analysis of electrified railway systems, custom designed software has been developed. The quantity of calculations required, due to the need to simulate various possible traffic scenarios, in some cases suggested drastically simplifying the electric system by a symmetrisation [4] and / or by reducing the number of conductors [5-7][11].

The multiconductor model proposed in [8] and [9] includes the rail distributed shunt conductance and only neglects the capacitive couplings and the autotransformer no-load currents thus giving quite precise results despite the method complexity increases with the number of trains within the line section.

Under specific operating conditions, the complete multiconductor model adopted in [10] for analysis of the interaction with the electric supply system (dissymmetry, faults), also appears to be suitably applicable to the study of electrical regimes attained in the traction circuit as a consequence of traction power demand in the simulated traffic conditions. Currently, in fact, the continuous increase in computational power potentiality has drastically reduced the requirement for simplified solutions since it is possible to calculate the steady-state condition of networks with thousand of nodes in the order of just a few seconds. Nowadays, some specialised software solutions for the analysis of electric traction systems available on the market, often lack flexibility and therefore cannot be adapted to the various design requirements; in addition, the "closed" characteristics of this type of commercial software package makes verifying the simulation methodologies and results a difficult task.

An objective was therefore set to develop a software solution capable of reliably and accurately calculating 2x25

Ci si è dunque posti l'obiettivo di sviluppare una soluzione software per il calcolo degli impianti di trazione elettrica a 2×25 kV, 50 Hz affidabile ed accurata, in grado di evidenziare agevolmente tutte le grandezze elettriche di possibile interesse, che fosse interfacciabile con l'output tipico dei simulatori del traffico ferroviario per analizzare scenari elettromeccanici anche molto complessi.

2. Il software EMTP-IERSS

Per la simulazione ed il calcolo elettrico del sistema 2×25 , 50 Hz la scelta è ricaduta sul programma ATP-EMTP, ben noto a livello internazionale e di fatto universalmente accessibile, "intorno" al quale è stato realizzato ex novo un software dedicato, denominato EMTP-IERSS (EMTP Interface for Electric Railway Systems Simulation). Va osservato che ATP-EMTP, ormai riconosciuto a livello internazionale tra i più affidabili software di simulazione dei sistemi elettrici di potenza, è stato già utilizzato per alcune analisi di fenomeni elettrici specifici (guasti, sovrattensioni) a livello progettuale, per le tratte AV.

Tuttavia l'applicazione diretta del software suddetto alle linee ferroviarie risulta complessa, sia per quanto concerne la creazione dei modelli circuituali equivalenti, sia soprattutto per l'estrazione ed il processamento dei risultati, cosicché un utilizzo volto ad analisi parametriche, e/o simulazioni di numerosi scenari di traffico, risulta praticamente improponibile.

È stata perciò messa a punto una struttura software che, avvalendosi di ATP-EMTP come nucleo risolutore, gestisce le fasi di automazione, controllo, post-processing e presentazione dei risultati (fig. 2).

La complessa struttura cui si è pervenuti, denominata EMTP-IERSS (EMTP Interface for Electric Railway Systems Simulation) gestisce l'intera simulazione elettromeccanica, il processamento e la presentazione dei risultati, interfacciando in ambiente Microsoft Windows tre software preesistenti:

- un simulatore di traffico ferroviario;
- ATP-EMTP;
- Matlab.

Il simulatore di traffico, realizzato in ambiente Excel tramite macro VBA, calcola istante per istante la potenza richiesta al pantografo da ogni singolo treno in un dato scenario di traffico in un certo intervallo di tempo; il programma tiene conto tra l'altro del "caricamento" della linea (cadenzamento dei treni su ciascuna via e separazione temporale dell'ingresso dei treni sulle due vie del tratto elettrificato oggetto della simulazione, denominata "sfasamento" da qui in poi).

ATP-EMTP viene utilizzato come solutore della rete elettrica, con funzionalità aggiuntive di load-flow fornite dallo stesso EMTP-IERSS; si utilizzano infine specifiche applicazioni di Matlab per il tracciamento automatico dei

kV, 50 Hz electric traction systems, easily highlighting electrical values of possible interest, which could also be interfaced with the typical output of railway traffic simulators in order to analyse even complex electromechanical scenarios.

2. The EMTP-IERSS package

The ATP-EMTP program, well known internationally as well as universally accessible, was chosen for simulation and electrical calculation of the 2×25 , 50 Hz system; a new customised software was developed around this software called EMTP-IERSS (EMTP Interface for Electric Railway Systems Simulation). It should be noted that ATP-EMTP, nowadays recognised at an international level as being amongst the most reliable electric power system simulation software programs, has already been utilised at a design stage, for analysis of some types of specific electrical phenomena (faults, overvoltages) on high speed railway lines. However, the direct application of the above mentioned software program to railway lines is a complex task, with regards to the development of equivalent circuit models and, above all, with regards to pulling and processing of results; consequently its utilisation for parametric analysis purposes and / or simulation of several traffic scenarios, becomes practically impossible.

A software architecture which uses ATP-EMTP as a central solver, has been therefore developed to manage automation phases, control, result post-processing and presentation (fig. 2).

The complex structure obtained, named EMTP-IERSS (EMTP Interface for Electric Railway Systems Simulation) totally manages electromechanical simulation, processing and presentation of results interfacing within a Microsoft Windows environment with three pre-existing software programs:

- a railway traffic simulator;
- ATP-EMTP;
- Matlab.

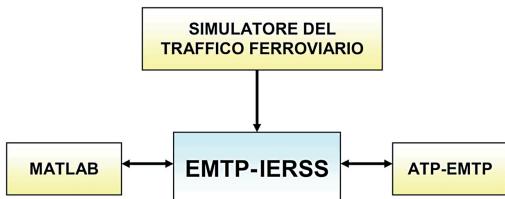


Fig. 2 – Diagramma a blocchi della struttura software elaborata.
Block diagram of the EMTP-IERSS package.

grafici relativi alle grandezze elettriche significative.

La struttura di EMTP-IERSS è stata realizzata in ambiente Microsoft Excel e consiste essenzialmente di numerose macro, cioè codici eseguibili scritti in linguaggio VBA (Visual BASIC for Application). Ciò consente di sviluppare in un unico file una struttura basata sulla creazione di numerosi database in cui memorizzare i dati ed i risultati elaborati dalle macro, per poi poterli controllare, post-processare ed eventualmente archiviare.

L'ambiente VBA ha permesso di costruire agevolmente interfacce utente per migliorare la gestione dell'intero software, ma soprattutto ha dimostrato una notevole velocità di accesso ai database e ai file. Le fasi del calcolo possono essere riassunte in:

- i - interfacciamento con il simulatore di traffico;
- ii - calcolo load-flow in ambiente ATP-EMTP;
- iii - estrazione dei risultati.

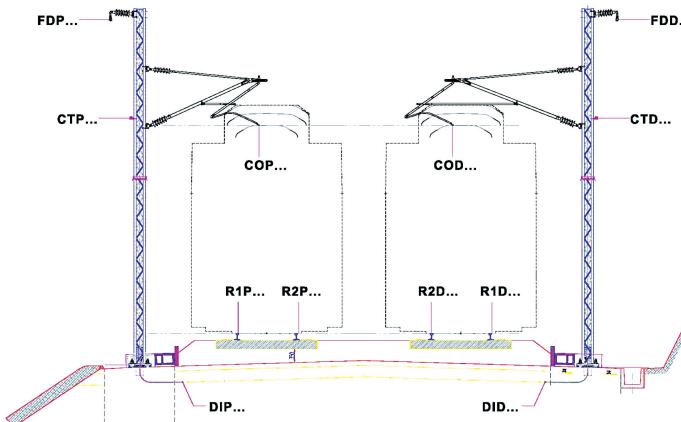


Fig. 3 - Sezione trasversale della linea AV/AC 2x25 kV in rilevato. *Embankment cross-section of the 2x25 kV-50 Hz line.*

3. Modellizzazione ATP-EMTP del sistema

Il circuito elettrico equivalente alla linea ferroviaria 2x25 kV, 50 Hz a due vie (fig. 3) contiene, in una generica sezione, 14 conduttori tra rotaie (R1P, R2P, R1D, R2D), corde di terra (CTP, CTD), dispersori lineari (DIP, DID), feeders (FDP, FDD), funi portanti e fili di contatto veri e propri (COP, COD); ad intervalli regolari si hanno poi varie connessioni trasversali equipotenziali tra conduttori posti nominalmente al potenziale di terra.

Il modello di linea multiconduttore è dunque basato su una cascata di multipoli a parametri concentrati (fig. 4), equivalenti ad un tratto di linea di 250 m (le diverse connessioni equipotenziali sono effettuate su multipli di questa distanza, per esempio 750 m o 1500 m), calcolati tramite il codice EMTP.

The traffic simulator, developed in an Excel environment using macros, calculates the power drawn on the pantograph by each single train in a specified traffic scenario and within a certain time interval, step by step; the program also takes into account the line traffic (train headway along the up and down-line, starting time delay between up-line and down-line train fleets - referred to as time-shift from here on).

ATP-EMTP is utilised as the electrical network's solver routine, with additional load-flow functionality supplied by the EMTP-IERSS; finally, specific Matlab applications are used for the automatic plotting of graphs relating to the most significant electrical values.

The EMTP-IERSS structure was developed in a Microsoft Excel environment and essentially consists of several macros, in other words executive codes written in VBA (Visual BASIC for Application).

This allows development, in a single file, of a structure based on the creation of several databases where data and results obtained from the macros can be saved for checking, post-processing and possibly archiving.

The VBA environment allowed quick development of client interfaces for improvement of the entire software but most notably it showed a very high database and file access speed. The calculation phases can be summarised as:

- i - interfacing with the traffic simulator;
- ii - ATP-EMTP based load flow calculations;
- iii - pulling of results.

3. ATP-EMTP modelling of the electric supply system

The equivalent electric circuit of a two-track 2x25 kV-50 Hz high-speed/high-capacity railway line is composed of 14 conductors in a given section (fig. 3), namely rails (R1P, R1D, R2P, R2D), overhead ground wires (CTP, CTD), buried linear grounding conductors (DIP, DID), feeders (FDP, FDD), messenger wires and contact wires (COP, COD). Grounded conductors are also bonded at regular intervals by means of equipotential connections.

Multiconductor line model consists of cascaded lumped-parameter Pi-circuits (fig. 4), each one representing a 250 m line section (equipotential bonding connections occur at multiples of 250 m, i.e. 750 and 1500 m) that is solved with a specific EMTP code.

The adoption of a lumped-parameters "Pi" model is widely justified, for steady-state power frequency analyses, by the short length of the single line element with re-

L'adozione di un modello "pigreco" a costanti concentrate è ampiamente giustificato dall'esigua lunghezza del singolo elemento di linea rispetto alle varie lunghezze d'onda a 50 Hz della linea (6000 km per i conduttori aerei, fino a 94 km per le rotaie), e dallo studio di regimi permanenti a frequenza costante.

Per la geometria dei conduttori sono state prese in considerazione le quattro sezioni tipo:

- rilevato/trincea;
- viadotto;
- galleria naturale;
- galleria artificiale.

L'aver simulato la fune portante ed filo di contatto con un unico conduttore equivalente posizionato ad una quota intermedia rispetto al piano del ferro, consente di ridurre il sistema a 12 conduttori; le frecce delle funi portanti, trefoli e feeder sono riferite da una temperatura di 55°C.

In questo contesto, rivestono particolare importanza i modelli adottati per le rotaie ed il dispersore lineare. La prima è rappresentata con un conduttore cilindrico equivalente, non ferromagnetico, di diametro di 220 mm (sezione cilindrica avente lo stesso perimetro della rotaia 60 UNI), tenendo quindi conto in maniera adeguata dell'influenza dell'effetto pelle a 50 Hz su resistenza ed induttanza della rotaia. Per quanto attiene alla conduttanza trasversale, stante l'inclusione della rotaia in un modello di linea di trasmissione con i conduttori generalmente isolati da terra, se ne è tenuto conto con resistenze lineari concentrate, connesse in derivazione verso terra agli estremi dei singoli tratti da 250 m. La rappresentazione adottata è largamente adeguata alla maggioranza delle situazioni reali che possono presentarsi nei circuiti di trazione elettrica [12], eccetto casi di scarso isolamento delle rotaie dal suolo (ad es. $g=10 \text{ S/km}$), terreni altamente resistivi (ad es. $\rho=4000 \Omega\text{m}$). I collegamenti equipotenziali della fune e del dispersore lineare (collegati ogni 50-60 m ai pali di sospensione della catenaria) sono simulati ogni 250 m; ogni 750 m (tre multipoli in cascata) si realizza l'effettivo collegamento tra le corde di terra delle due vie.

Sono stati altresì simulati nel circuito equivalente:

- i - le connessioni induttive, ogni 1500 m;
- ii - i trasformatori ed autotrasformatori, adottando modelli standard, in base ai rispettivi dati di targa;

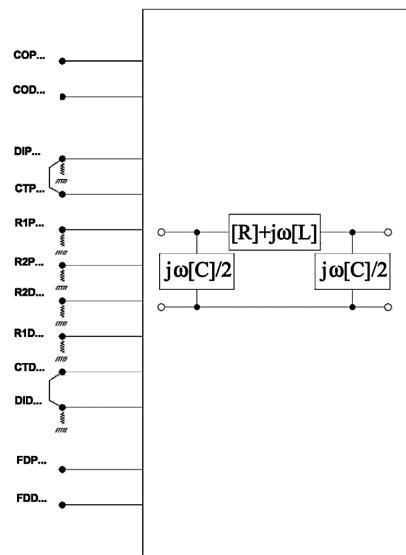


Fig. 4 - Schema di circuito "nominal pi" e multipolo equivalente.
Synthetic representation of a "nominal Pi" circuit and the "equivalent multipole".

spect to the different 50 Hz wavelengths of the railway line, ranging from 6000 km for the overhead conductors to 94 km for the rails.

As far as conductor arrangement is concerned the following 4 typological sections have been taken into consideration:

- embankment/cutting;
- viaduct;
- natural tunnel;
- artificial tunnel.

Messenger wires and contact wires were replaced by a single equivalent conductor, suitably located, thus reducing the equivalent circuit complexity to 12 conductors; sags of messenger wires, overhead ground wires and feeders were calculated for a temperature of 55 °C. Particularly important

is the model implemented for rails and buried linear grounding conductors. Each single rail is represented by an equivalent non-ferromagnetic cylindrical conductor of 220 mm diameter (i.e. the perimeter of a UNI 60 rail), of which the internal impedance accounts satisfactorily for the 50 Hz skin effect of the rail. Shunt conductance, being the running rails included in a transmission line model with conductors usually insulated from ground, was simulated by linear lumped resistances connected to ground at the ends of each 250 m Pi-circuit. The adopted representation is widely accepted in most real cases that can be found in the electric traction circuits [12], with the exception of some specific situations where rails are poorly insulated from ground (i.e. $g=10 \text{ S/km}$) or in case of high resistivity soil ($\rho=4000 \Omega\text{m}$).

The equipotential connections between overhead ground wires and buried linear grounding conductors (they are connected to the contact line masts every 50-60 meters) are simulated at 250 m intervals; overhead ground wires running along the up and down lines are bonded every 750 m (three cascaded Pi-circuits). The following elements have been moreover included in the equivalent circuit:

- i - inductive connections every 1500 m;
- ii - transformers and autotransformers, represented by standard models according to the relevant rating values;
- iii - train itself, represented as a lumped impedance connected between contact wire and rails at one

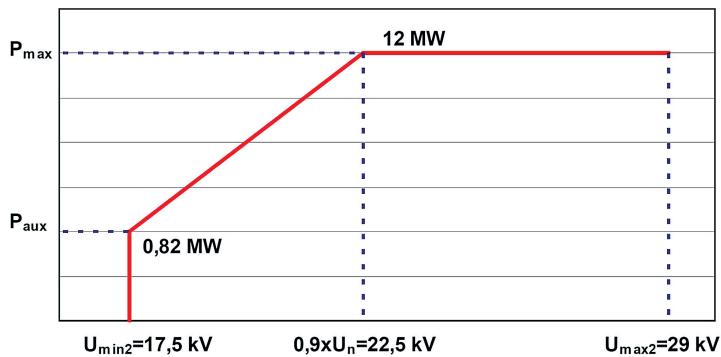


Fig. 5 – Curva limite Tensione-Potenza in trazione relativa all'intero treno ETR500 AV.
Active power demand - pantograph voltage limit curve of the ETR500AV train (traction).

iii - il treno, rappresentato con un'impedenza concentrata disposta tra filo di contatto e rotaie, in corrispondenza dei nodi terminali di uno dei multipoli di linea; il valore di impedenza, calcolato da EMTP-IERSS (v. oltre) può assumere qualsiasi argomento riproducendo l'assorbimento o l'immersione di potenza attiva e/o reattiva in rete. L'approssimazione nella posizione del treno è contenuta in ± 125 m.

4. Implementazione del calcolo di load-flow

Benché nella rappresentazione "elettrica" del convoglio l'input sia rappresentato dal valore di potenza attiva fornita dal simulatore di traffico, l'algoritmo di load-flow tiene in conto l'effettiva caratteristica P-V, che definisce la relazione tra tensione al pantografo e potenza massima; nelle figg. 5 e 6 sono riportati i due casi di trazione e frenatura a recupero con riferimento ad un treno ETR 500. Per la frenatura, in fig. 6 si è indicata con 'Caso 1' la caratteristica standard utilizzata nella maggior parte delle simulazioni; le varianti marcate 'Caso 2' e 'Caso 3' si riferiscono ad alcune delle simulazioni del §6.

La rappresentazione elettrica dei treni secondo le potenze attiva e reattiva assorbite (costanti o meno in un certo intervallo di valori della tensione al pantografo) ne rende non lineare l'impedenza equivalente ed impone, per la soluzione della rete elettrica, il ricorso ad appositi algoritmi iterativi di

end of a Pi-circuit; the complex impedance evaluated by EMTP-IERSS can have any argument, allowing to reproduce a four-quadrant operation in the (P,Q) plane; as the impedance can only be connected at the Pi-circuit ends, the simulated position of the train along the line is affected by a ± 125 m approximation.

4. Load-flow implementation

Although the input for the train "electric" modelling is represented by the active power value as given by traffic simulator, the load-flow algorithm takes into account the real P-V limit curve that defines the relation between active power demand and pantograph voltage. figs.5 and 6 show respectively the two cases of traction and recovery braking for an ETR500 train. As far as braking is concerned, the standard curve implemented in most simulations is named "Case 1" in fig. 6 while "Case 2" and "Case 3" variations refer to some of the simulations detailed in §6.

Train electric modelling by means of active and reactive power demands (constant or variable in a defined range of the pantograph voltage) makes the equivalent impedance non-linear thus requiring the utilisation of specific iterative load flow algorithms for the solution of the electric network non-linear equations. Radial operation of the 2x25 kV-50 Hz system suggested the utilisation of a specific load flow algorithm for the electric network solution (a linear network with the exception of the loads, that

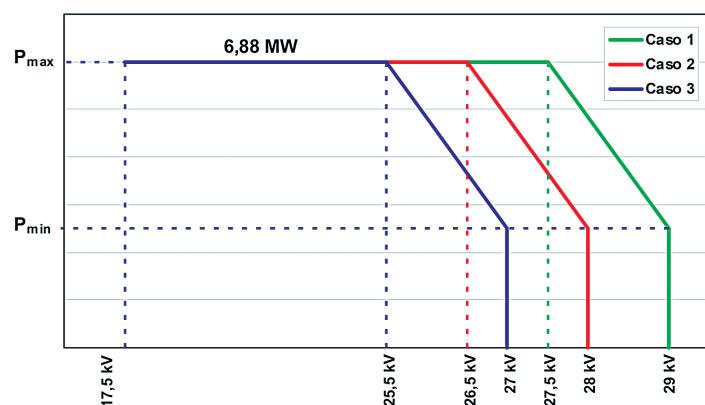


Fig. 6 – Curva limite tensione-potenza in frenatura a recupero, relativa all'intero treno ETR500 AV ('Caso 1': caratteristica standard, 'Caso 2' e 'Caso 3' varianti, cfr. §7). Active power demand-pantograph voltage limit curve of the ETR500AV train (braking phase) ('Case 1': standard characteristics, 'Case 2' and 'Case 3' modified characteristics, see §6)

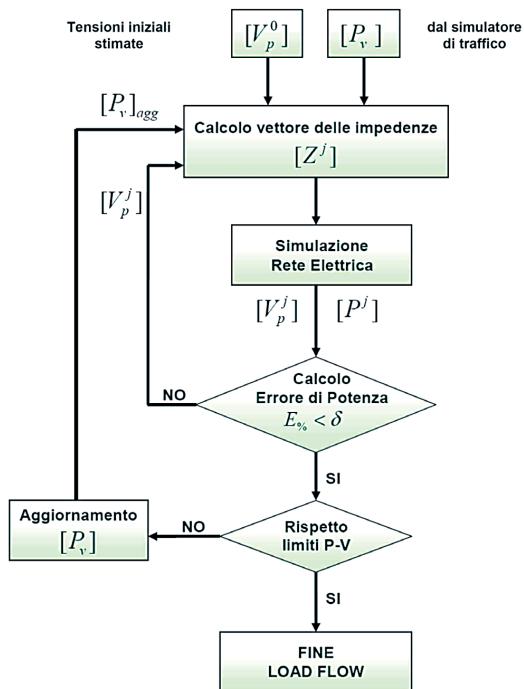


Fig. 7 – Schema logico della procedura di Load-Flow. *Flow-chart of the implemented load flow algorithm.*

“load-flow”. L'esercizio radiale del sistema 2×25 kV ha suggerito il ricorso ad un load-flow in cui la rete (lineare all'interno dei carichi, cioè dei treni) viene risolta varian-
do progressivamente le impedenze equivalenti rappre-
sentative dei treni, in base ai valori di tensione ottenuti nelle
iterazioni precedenti, fino a convergenza (nella variante
comunemente impiegata nelle reti di distribuzione, e de-
nominata talora “ Y_{bus} ”, si variano le iniezioni nodali di cor-
rente equivalenti ai carichi). Il corrispondente algoritmo è
riportato in fig. 7. La procedura iterativa prevede tolle-
ranze massime dello 0.5% rispetto ai vincoli di potenza atti-
va forniti dal simulatore di traffico.

L'algoritmo prescelto è estremamente robusto, risul-
tando sempre convergente fino al limite di caricabilità della linea; si presta inoltre ad una facile implementazio-
ne utilizzando come solutore la routine di inizializzazione di ATP-EMTP. Come mostrato in fig. 7, il software propo-
sto calcola il valore iniziale del vettore delle impedenze.
Ad ogni iterazione, ATP-EMTP funge soltanto da solutore (blocco funzionale “Simulazione Rete Elettrica”) di una
rete elettrica lineare ma multiconduttore e dissimmetrica,
con carichi ad impedenza costante ricalcolati ad ogni pas-
so dalla procedura iterativa.

is the trains); network solution is achieved by iteratively adjusting the train equivalent impedances, according to the voltage values calculated in the preceding calculation step, till reaching the convergence; (a modification of the previous algorithm, often named “ Y_{bus} ” and commonly used in the distribution network, considers the variation of the nodal current injections equivalent to the loads). The relevant algorithm is illustrated in fig. 7. That iterative procedure accepts maximum tolerances of 0.5% with respect to the active power constraints set by the traffic simulator.

The adopted algorithm is very robust, achieving always convergence up to the physical loadability limit of the line; in addition it can be easily implemented by using the ATP-EMTP initialization (phasor) routine as network solver. As shown by flow-chart in fig. 7, the proposed software calculates the initial value of the impedance vector while the ATP-EMTP core software solves iteratively a multiconductor and unsymmetrical linear network, the constant impedance loads being recalculated in each single step of the iterative procedure. Load-flow algorithm is endowed with an outer control loop (fig. 7) taking into account the real traction characteristics of figs. 5 and 6; this loop modifies the active power constraint of a given train when the pantograph voltage is such to impose a voltage-dependant behaviour of power demand instead of a constant power behaviour.

An early experimental verification of the EMTP-IERSs software was carried out by comparing the simulation re-
sults with some power, energy and voltage measurements in the Chivasso ESS. Despite the low sampling frequency of the available fixed instrumentation it was possible to verify the good match, in terms of energy demand, with the calculation results.

5. Application to the study of the Torino-Novara HS/HC railway line

The EMTP-IERSs calculation procedure was applied to the operation simulation of the high-speed/high-capacity railway line sub-section Torino-Novara, part of the overall project of the Torino-Milano HS connection, about 125 km in length. The Torino-Novara sub-section, covering a distance of about 91 km almost completely outdoor, was put in operation on February 2006. The analysis here proposed refers to the 2x25 kV-electrified line section be-
tween the Torino POC (AC/DC separation Point) at km 2.250 and the starting point, at km 84.000, of both the No-
vara Node interconnection and the connecting section with the 3 kV d.c. system, of which the relevant POC (AC/DC separation Point) is located at km 85.300.

Fig. 8 shows the single-line diagram of the 25 kV-50 Hz power supply system under normal operating condition, including the specific location of ESSs and PAPs (Paral-
leling and Auto-Transformation Posts) along the Torino-
Novara high-speed/high-capacity railway line.

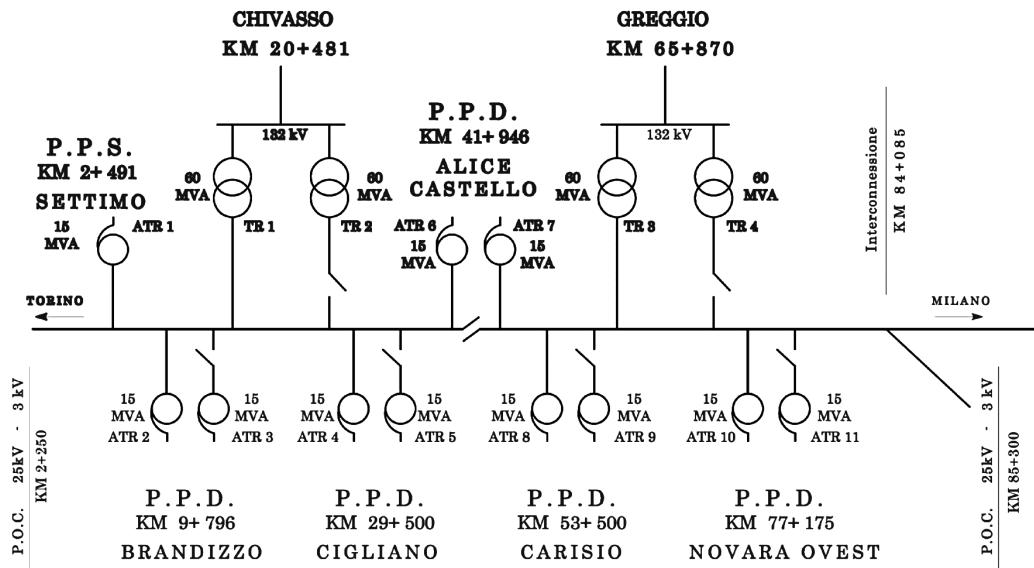


Fig. 8 – Schema unifilare di alimentazione, lato 2x25kV, della tratta AV/AC Torino-Novara. Single-line power supply diagram of the 2x25 kV – 50 Hz HS/HC Torino-Novara railway line.

Per tener conto delle effettive caratteristiche di trazione degli ETR mostrate nelle figg. 5 e 6, l'algoritmo di load-flow è dotato di un ciclo di controllo esterno al ciclo principale (cfr. fig. 7), che modifica il vincolo di potenza relativo ad un dato treno qualora la tensione al pantografo assuma valori tali da imporlo il funzionamento a potenza dipendente dalla tensione anziché costante.

5. Applicazione allo studio della tratta AV/AC Torino-Novara

La procedura di calcolo EMTP – IERSS è stata applicata alla simulazione del funzionamento della tratta AV/AC Torino–Novara, che fa parte del progetto globale del collegamento Torino–Milano, complessivamente lungo 125 km; la sub-tratta, attivata nel febbraio del 2006, copre una distanza di circa 91 km quasi completamente all'aperto. L'analisi svolta in questo lavoro si riferisce al tratto a 2x25 kV che si estende dal POC (Posto di confine c.c./c.a.) lato Torino, ubicato al km 2,250, fino al km 84,000 dove è presente l'interconnessione con il nodo di Novara ed il collegamento al sistema 3 kV c.c. mediante POC al km 85,300 circa.

La fig. 8 mostra lo schema generale di alimentazione del circuito di trazione in normale esercizio ed il posizionamento lungo la linea delle SSE e dei PPD.

In condizioni di normale esercizio nelle SSE è in servizio un solo trasformatore che alimenta entrambi i circuiti di trazione a monte e a valle della SSE stessa. Nel

Under normal operation conditions only one 60 MVA transformer per ESS supplies both the traction circuits north and south of the ESS itself. In all PAPs only one autotransformer is in operation with the exception of the Alice Castello PAP where a phase change occurs, requiring the operation of both autotransformers being one connected to the north traction circuit and the other to the south circuit.

Analysis results here presented refer to one of many simulated traffic scenarios, namely the scenario with 15 minutes train headway and 0 minutes time-shift between trains entering the line at the two opposite ends. As shown by the train path of fig. 9, this turns to have at most two trains on each track at any given instant.

Figure 10 shows, versus time, the overall active power and energy demand for the traffic scenario under consideration, whereas figs. 11 and 12 respectively show the active power demand and the pantograph voltage of a given train (TAD in fig. 9) running the up-line from Settimo T. to the Novara Ovest interconnection.

It is moreover obviously possible to achieve other quantities such as power and current values in the different PAPs; in general the program can access and evaluate all the electrical quantities of the supply system. As an exemplification of the achievable output variety, fig. 13 shows the active power demand and losses of TR3 transformer in the Greggio ESS, whereas fig. 14 shows the track voltage at the TAD train location, measured with respect to the voltage of the system reference node, that is the remote ground.

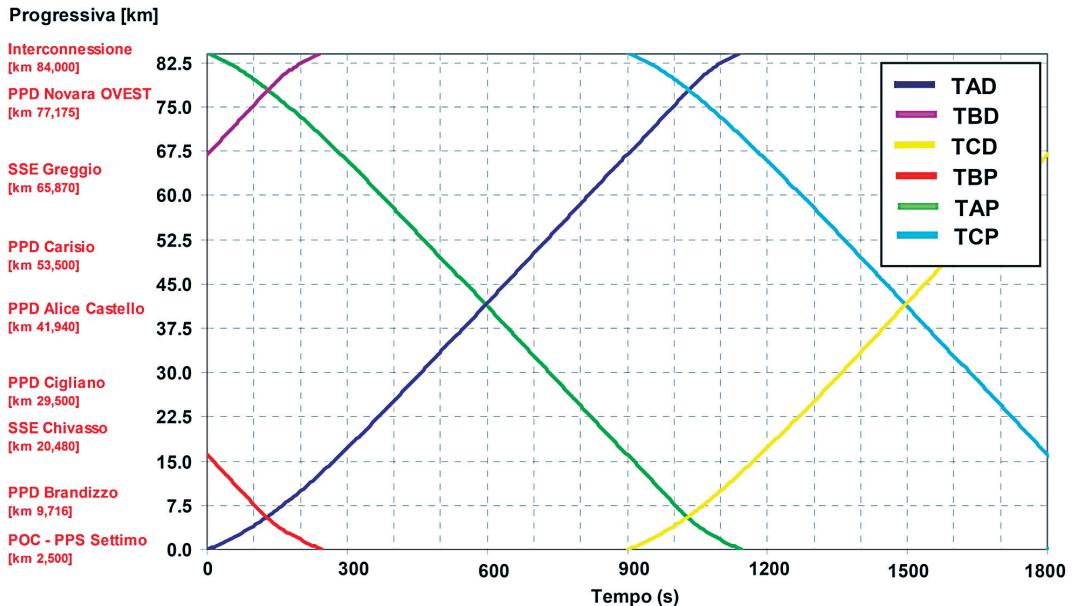


Fig. 9 – Orario grafico relativo allo scenario di riferimento (cadenzamento 15 minuti, sfasamento 0 minuti). *Train Path for the reference traffic scenario (15 minutes headway, 0 minutes time-shift).*



Fig. 10 – Potenza ed energia complessivamente richieste nello scenario di riferimento (cadenzamento 15 minuti, sfasamento 0 minuti). *Overall power ed energy demands for the reference traffic scenario (15 minutes headway, 0 minutes time-shift).*

PPS di Settimo ed in tutti i PPD è in servizio un unico autotrasformatore, con l'eccezione del PPD di Alice Castello dove è effettuato il cambio fase e dunque è necessario mantenere in servizio due autotrasformatori collegati uno al circuito di trazione a monte e l'altro a quello del PPD.

Per la presentazione dei risultati dell'analisi effettuata si fa riferimento ad uno dei numerosi casi simulati ed in particolare allo scenario con cadenzamento a 15 minuti e sfasamento pari a 0 minuti. Tale scenario prevede la presenza contemporanea al massimo di 2 treni su ciascun binario; in fig. 9 è mostrato il corrispondente orario grafico.

In fig. 10 sono mostrate la potenza attiva e la corrispondente energia assorbita nel tempo; le figg. 11 e 12 illustrano rispettivamente gli andamenti della potenza assorbita e della tensione al pantografo per un generico treno che percorre la sub-tratta dal POC di Settimo T. fino all'interconnessione di Novara Ovest (treno TAD in fig. 9).

È ovviamente possibile ricavare andamenti relativi ad altri elementi fissi, come le potenze e le correnti nei vari PPD e PPS; più in generale, il programma consente di accedere a tutte le grandezze elettriche relative al circuito di trazione. A titolo di esempio della pluralità di informazioni ricavabili si riportano in fig. 13 la potenza attiva assorbita e le perdite del trasformatore TR3 nella SSE Greggio, ed in

6. Analysis of regenerative braking effects

The regenerative braking advantages are well known in the subway traction field, due to extensive studies and a long dated-back operation experience (see for instance [13]). The frequent starting/stopping cycles consequent to the presence of numerous stations, together with the line planimetric and altimetric characteristics, imply that during rush hours the average recovered energy can even reach 15-20% of total consumption.

In high-speed railway lines, differently from subway lines, braking phases only occur at the end of the line sections or at the line junctions/interconnections, also as a consequence of low line slopes, very large curve radii and an almost complete absence of intermediate stops. The energy balance of regenerative braking in high-speed railways has been then largely overlooked, attention being mostly focused on savings deriving from running optimization [14].

6.1 Effects of line traffic

The EMTP-IERS software package allows to evaluate all traffic-related issues when studying regenerative

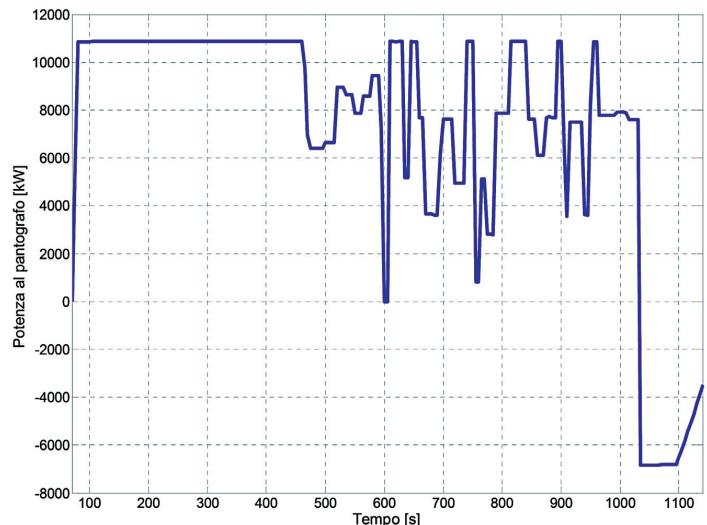


Fig. 11 – Potenza al pantografo del treno TAD di fig. 9, in funzione del tempo. Active power demand at pantograph of train TAD of Figure 9 vs. time.

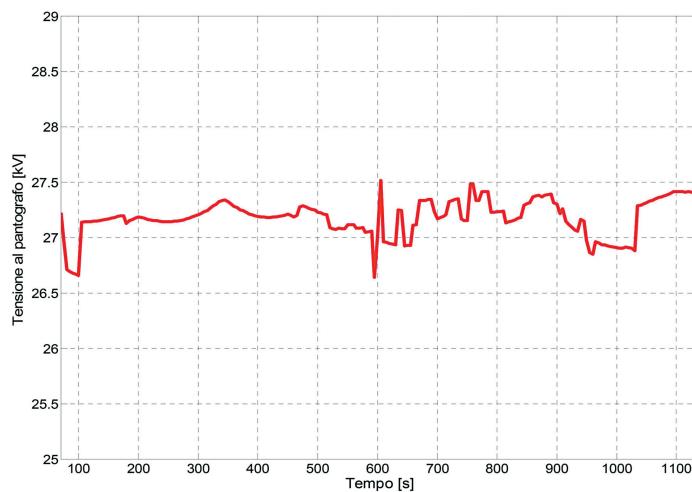


Fig. 12 – Tensione al pantografo del treno TAD di fig. 9, in funzione del tempo. Pantograph voltage for train TAD of Figure 9 vs. time.

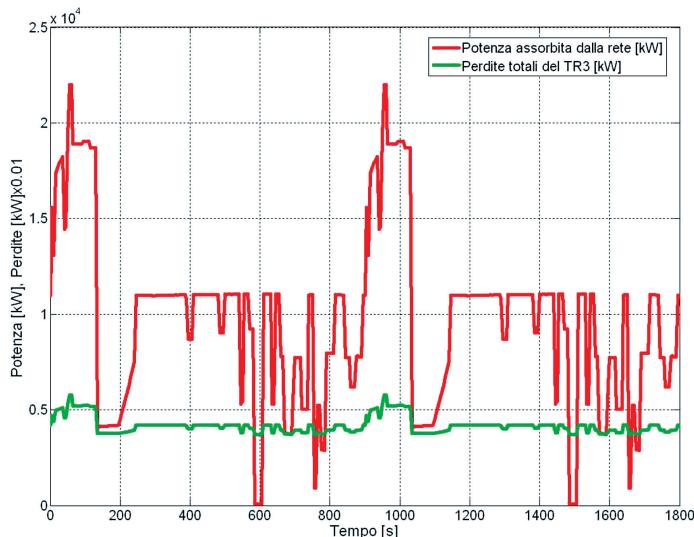


Fig. 13 – Potenza attiva assorbita e perdite del trasformatore TR3, SSE Greggio.
Active power demand and losses of transformer TR3, Greggio ESS.

fig. 14 la tensione della rotaia in corrispondenza della posizione del treno TAD, rispetto al potenziale del nodo di riferimento del sistema, coincidente con la terra lontana.

6. Effetti della frenatura a recupero

I vantaggi associati alla frenatura a recupero sono ben noti nell'ambito degli impianti di trazione metropolitana, per i numerosi studi effettuati e l'esperienza d'esercizio ormai acquisita da molti anni (cfr. ad es. [13]). Le frequenti fasi di accelerazione e frenatura, legate alla presenza di numerose stazioni, unitamente alle caratteristiche planovaltimetriche tipiche dei tracciati, comportano percentuali medie di energia recuperata che possono raggiungere valori dell'ordine del 15÷20% nelle ore di maggior traffico.

Diversamente dalle linee metropolitane, nelle tratte AV le fasi di frenatura si trovano esclusivamente in uscita dalle tratte o nelle interconnessioni, anche per effetto delle modeste pendenze e degli elevati raggi di curvatura del tracciato e della pratica assenza di fermate in linea. Tale circostanza ha determinato sinora uno scarso approfondimento delle possibili implica-

braking in a.c. traction systems, taking into account all the electromechanical aspects characterizing this phenomenon. The reference case in fig. 9 (15-minutes headway and 0-minutes time-shift) makes it possible to verify that the positions of two different trains within the line and the possible simultaneous occurrence of braking and acceleration phases have a significant influence on this phenomenon.

The consideration of both the traction supply system diagram of the Torino-Novara line section (fig. 8) and the Train Path of fig. 9, reveals that only two trains, TAD and TBP, fall inside the line section from Settimo T. POC (AC/DC separation Point) to Chivasso ESS, between $t=70$ s and $t=180$ s; in particular train TAD running the down line is in traction phase while train TBP running the up-line is in braking phase. Paralleling connections between tracks allow the exchange of the excess braking energy between the Up and Down lines and make the line fully receptive in terms of braking energy recovery capability. Fig. 15 shows both power demand and pantograph voltage increase of the TAD train, that is in regenerative braking phase between $t=1030$ s and $t=1140$ s, anyway respecting the limit curve of fig. 6.

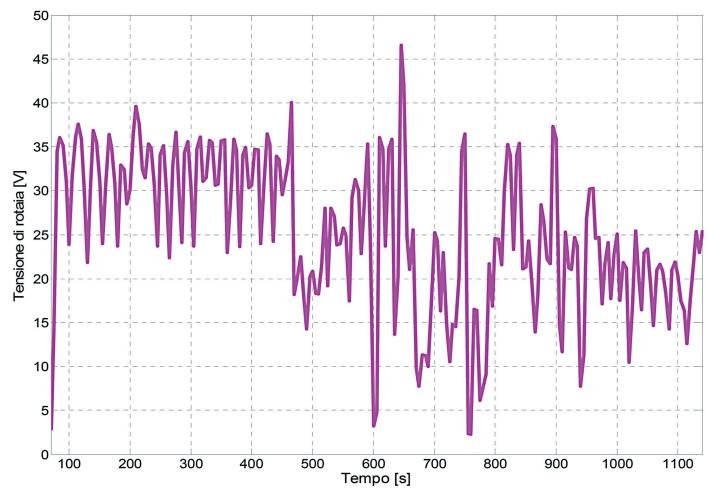


Fig. 14 – Tensione di rotaia in corrispondenza del treno TAD di fig. 9, in funzione del tempo. Track voltage at the TAD train location, vs. time.

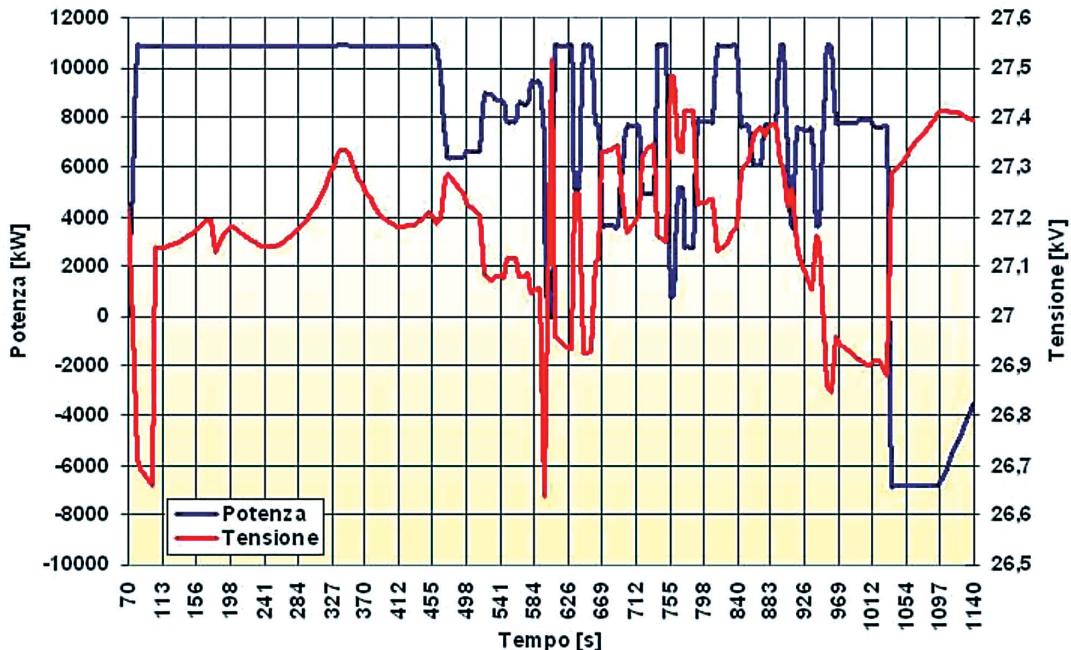


Fig. 15 – Tensione e potenza al pantografo del treno TAD nello scenario di riferimento. Pantograph active power demand and voltage of the TAD train (base case).

zioni energetiche associate alla frenatura, e ha di fatto circoscritto l'attenzione prevalentemente ai possibili risparmi conseguibili attraverso l'ottimizzazione della marcia [14].

6.1. Influenza del traffico

Il software sviluppato è stato utilizzato per analizzare gli effetti della frenatura a recupero negli impianti di trazione elettrica in corrente alternata, tenendo conto di tutti gli aspetti elettromeccanici che entrano in gioco in questo tipo di fenomeno. Prendendo in esame il caso di riferimento di fig. 9 (cadenzamento a 15 minuti e sfasamento a 0 minuti) è possibile verificare il ruolo fondamentale che assume nel fenomeno la posizione reciproca dei due treni presenti nella tratta e la coincidenza temporale delle differenti fasi del moto (accelerazione e frenatura). Considerando lo schema TE della tratta (fig. 8) unitamente all'orario grafico mostrato in fig. 9 è possibile constatare che tra gli istanti $t=70$ s e $t=180$ s, sono contemporaneamente presenti

A parametric analysis was subsequently performed on the HS/HC Torino-Novara line section by varying both train headway and time-shift between up-line and down-line train fleet, in order to evaluate the influence of main traffic parameters on the recovered energy amount. The

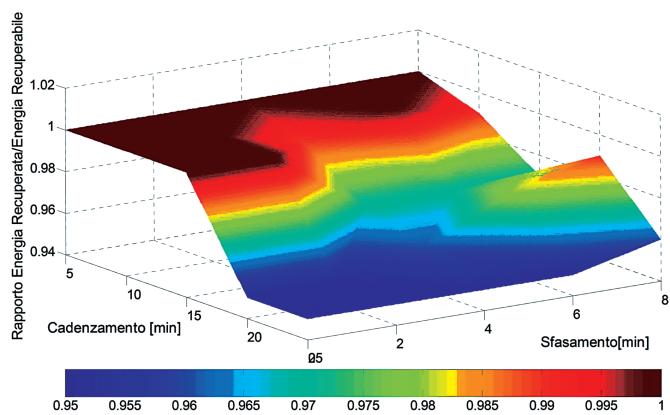


Fig. 16 - Andamento del rapporto tra energia recuperata ed energia recuperabile. Recovered energy/recoverable energy ratio as a function of traffic parameters (headway and time-shift).

nel tratto di linea compreso tra il POC di Settimo T. e la SSE di Chivasso i due treni TAD e TBP; in particolare, il treno TAD è in fase di trazione mentre quello sul binario pari (TBP) è in frenatura. Il trasferimento dell'energia di frenatura da un binario all'altro è reso possibile dai collegamenti di parallelo che rendono la linea completamente ricettiva. La fig. 15 mostra, oltre alla potenza assorbita, l'innalzamento della tensione al pantografo del treno TAD in frenatura a recupero, nel rispetto della curva limite di fig. 6, tra gli istanti $t=1030$ s e $t=1140$ s.

Un'analisi dell'influenza dei principali parametri legati al traffico ferroviario sull'entità dell'energia recuperabile è stata eseguita variando sia il cadenzamento dei treni che lo sfasamento temporale degli ingressi dei treni sulle due vie. La fig. 16 mostra in maniera sintetica il risultato dello studio parametrico condotto sulla tratta AV Torino-Novara. Il rendimento energetico della frenatura a recupero (energia recuperata/energia recuperabile), tracciato in funzione delle due variabili di traffico, rappresenta di fatto un parametro indicativo della ricettività della rete, considerando come energia recuperabile la variazione di energia cinetica del treno fornita dal simulatore di traffico, al netto del rendimento di conversione. Nelle figg. 17 e 18 sono mostrate le sezioni della superficie di fig. 16 che visualizzano il rendimento energetico della frenatura in funzione rispettivamente del solo sfasamento (cadenzamento 15 minuti) e del solo cadenzamento (con sfasamento 0 minuti). Quando la linea è scarsamente ricettiva per effetto del maggiore intervallo di cadenzamento, la tensione al pantografo può raggiungere il limite oltre il quale la potenza rigenerata viene dissipata in parte reostaticamente (cfr. fig. 6), dando luogo alle riduzioni del rendimento energetico evidenziate in fig. 16. Tale riduzione è funzione non solo delle condizioni di traffico ma è notevolmente influenzata anche dal profilo planimetrico della tratta; nel caso in esame, dove il profilo non presenta particolari asperità, né fermate intermedie, il rendimento energetico non scende sotto il valore di 0,95. Infine la tabella 1 riporta i valori delle principali grandezze elettriche degli scenari elettromeccanici ottenuti variando di 5' i cadenzamenti tra i treni (da 5' a 25') e di 2' (da 0 a 8') gli sfasamenti. L'energia recuperabile a seconda delle diverse condizioni di traffico risulta compresa tra il 4% e l'8% dell'energia totale richiesta dai treni.

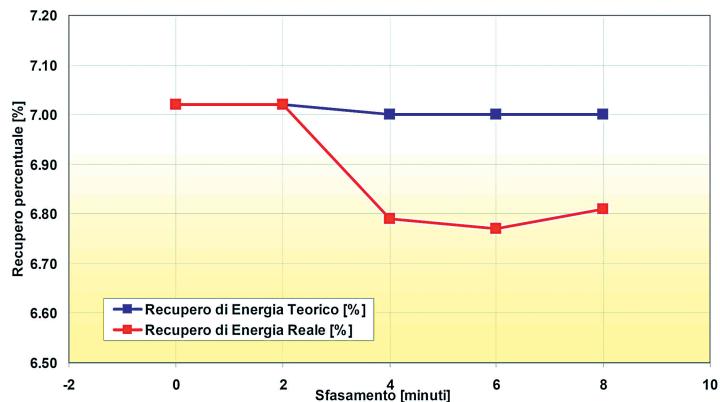


Fig. 17 – Confronto tra recupero teorico ed effettivo, in funzione dello sfasamento tra le due vie (cadenzamento a 15 minuti). *Comparison between theoretical and actual (simulated) energy recovery as a function of time-shift (15 minutes headway).*

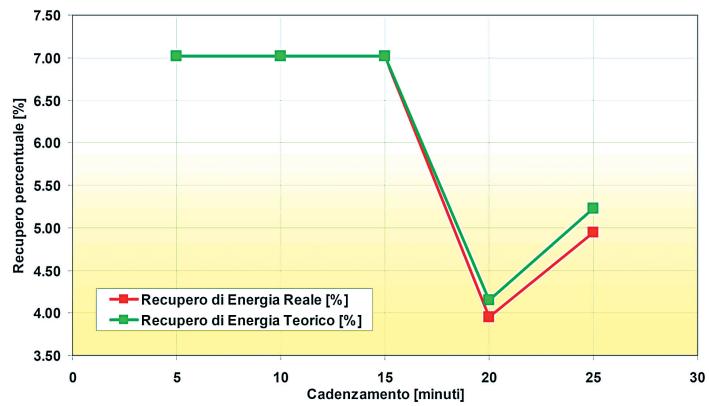


Fig. 18 - Confronto tra recupero teorico ed effettivo, in funzione del cadenzamento dei treni (sfasamento a 0 minuti). *Comparison of theoretical and actual (simulated) energy recover as a function of train headway (0 minutes time-shift).*

parametric analysis results are synthetically shown in fig. 16, where the regenerative braking efficiency (recovered energy/theoretically recoverable energy), a significant measure of the line receptivity, is plotted as a function of both traffic variables (headway and time-shift), being the theoretically recoverable energy equal to train kinetic energy variation as given by traffic simulator, net of conversion efficiency.

Figs 17 and 18 show the cross-sections of the surface in fig. 16 representing the braking efficiency curves versus time-shift (for a 15-minutes headway) and respectively versus headway (for a 0 minutes time-shift). When line receptivity is low due to a higher headway, pantograph volt-

TABELLA 1 – TABLE 1

QUADRO RIASSUNTIVO DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE
SUMMARY OF PERFORMED SIMULATIONS RESULTS

| N° | Cad. Headway [min] | Sfas. Phase displacement [min] | Energia totale richiesta dalle SSE <i>Overall Energy Demand of the ESSs</i> [MWh] | Energia totale assorbita dai treni <i>Overall Energy demand of the trains</i> [MWh] | Rendimento di trasmissione <i>Transmission efficiency</i> RE [%] | Energia recuperata <i>Recovered energy</i> [%] | Energia recuperabile <i>Recoverable energy</i> [%] | Rapporto en. recuperata/ recuperabile <i>Recovered/recoverable energy ratio</i> |
|----|--------------------------|---|--|--|---|---|---|--|
| 1 | 5 | 0 | 28.2 | 28.0 | 99.20 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 2 | 10 | 0 | 14.2 | 14.0 | 98.87 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 3 | 15 | 0 | 9.5 | 9.3 | 98.57 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 4 | 20 | 0 | 8.0 | 7.9 | 98.39 | 4.0 | 4.2 | 0.95 |
| 5 | 25 | 0 | 6.4 | 6.3 | 98.10 | 5.0 | 5.2 | 0.95 |
| 6 | 5 | 2 | 28.2 | 28.0 | 99.19 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 7 | 10 | 2 | 14.2 | 14.0 | 98.84 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 8 | 15 | 2 | 9.5 | 9.3 | 98.55 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 9 | 20 | 2 | 7.7 | 7.6 | 98.34 | 4.1 | 4.3 | 0.95 |
| 10 | 25 | 2 | 6.0 | 5.9 | 97.99 | 5.3 | 5.5 | 0.95 |
| 11 | 5 | 4 | 28.2 | 28.0 | 99.17 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 12 | 10 | 4 | 14.2 | 14.0 | 98.84 | 6.9 | 7.0 | 0.99 |
| 13 | 15 | 4 | 9.5 | 9.4 | 98.49 | 6.8 | 7.0 | 0.97 |
| 14 | 20 | 4 | 7.4 | 7.2 | 98.28 | 6.2 | 6.5 | 0.96 |
| 15 | 25 | 4 | 5.7 | 5.5 | 97.88 | 5.6 | 5.9 | 0.95 |
| 16 | 5 | 6 | 28.2 | 28.0 | 99.19 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 17 | 10 | 6 | 14.2 | 14.0 | 98.85 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 18 | 15 | 6 | 9.5 | 9.4 | 98.51 | 6.8 | 7.0 | 0.97 |
| 19 | 20 | 6 | 7.3 | 7.1 | 98.25 | 6.4 | 6.6 | 0.98 |
| 20 | 25 | 6 | 5.5 | 5.4 | 97.85 | 5.8 | 6.1 | 0.95 |
| 21 | 5 | 8 | 28.2 | 28.0 | 99.16 | 7.0 | 7.0 | 1.00 |
| 22 | 10 | 8 | 14.2 | 14.0 | 98.85 | 7.0 | 7.0 | 0.99 |
| 23 | 15 | 8 | 9.5 | 9.4 | 98.52 | 6.8 | 7.0 | 0.97 |
| 24 | 20 | 8 | 7.1 | 7.0 | 98.26 | 6.6 | 6.7 | 0.99 |
| 25 | 25 | 8 | 5.4 | 5.3 | 97.82 | 7.9 | 8.3 | 0.96 |

L'analisi parametrica mostra inoltre che, per cadenzamenti fino a 15 minuti, come nel caso di riferimento, la tratta risulta ricettiva indipendentemente dallo sfasamento tra i treni, e l'energia recuperata non viene praticamente mai riversata nella rete AT attraverso le sottostazioni, intrinsecamente reversibili. Con cadenzamenti superiori a 20 minuti, invece, la ricettività della rete si riduce notevolmente; in questo caso infatti non sono mai presenti treni in fasi di moto opposte sullo stesso binario ed il trasferimento dell'energia di frenatura è unicamente possibile tra treni su binari differenti elettricamente connessi. Per tale trasferimento, con cadenzamenti superiori a 20 minuti, lo sfasamento degli ingressi in tratta assume una importanza ancora più significativa, perché può determinare o meno la presenza contemporanea di due treni in fasi opposte di moto nella medesima semitiratta. In queste condizioni di traffico dunque, l'energia di recupero, solo casualmente assorbita dall'eventuale treno sul binario op-

age could reach the limit beyond which the regenerative braking energy is partially dissipated on rheostats (see fig. 6), leading to a decrease in the energetic efficiency as shown in fig. 16.

This decrease is influenced by both traffic conditions and planimetric and altimetric characteristics of the line section; in the present case, characterised by the absence of intermediate stops and by a mainly flat and straight layout, braking efficiency is always greater than 0.95. Table 1 finally reports the main results of simulations performed by varying the headway by 5-minute increments in the (5-25) minutes range, as well as by varying the time-shift by 2-minute increments in the (0-8) minutes range. Overall recovered energy is comprised between 4% and 8% of overall train demand according to the different traffic conditions.

This parametric analysis also shows that receptivity is

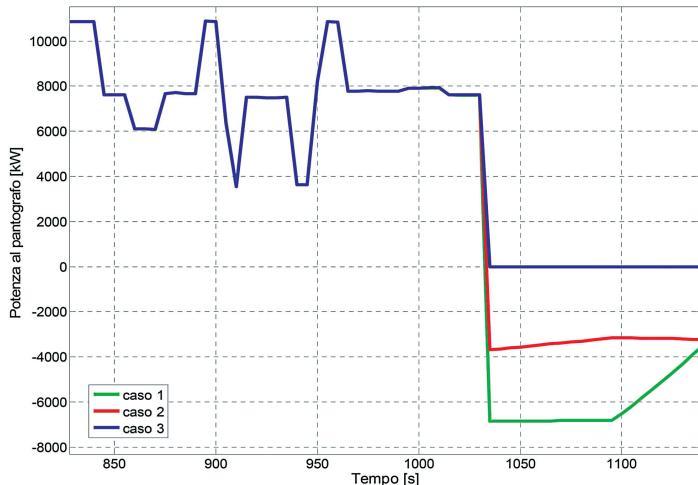


Fig. 19 - Dettaglio della potenza al pantografo del treno TAD di fig. 9, in funzione del tempo, per le tre caratteristiche in frenatura di fig. 6. Active power demand at the pantograph of TAD train versus Time, for the three different braking curves of fig. 6.

posto, viene principalmente riversata nella rete AT, ovviamente al netto delle perdite e dell'energia dissipata reostaticamente per limitare le tensioni al pantografo.

6.2. Influenza delle tensioni in linea

Va osservato che la caduta di tensione associata ai transiti di potenza nelle linee di trazione in c.a., specie nelle condizioni di iniezione di potenza (a $\cos\phi=1$) determinate dalla frenatura a recupero, diversamente dal caso di sistemi di trasmissione in AT è influenzata apprezzabilmente dalla resistenza dei conduttori (non trascurabile rispetto alla reattanza), con conseguenti sensibili variazioni del valore efficace delle tensioni lungo la linea. In presenza di valori elevati di tensione a vuoto nella SSE ed in condizioni di scarso traffico, potrebbero conseguirsi innalzamenti della tensione al pantografo del treno in frenatura prossimi ai limiti massimi ammessi (29 kV), con conseguenti rischi di interventi intempestivi dei dispositivi di protezione per massima tensione dei pantografi di altri treni entranti nella tratta.

Un possibile provvedimento potrebbe essere rappresentato dalla modifica della curva limite P-V in frenatura ('Caso 1' in fig. 6), riducendone la tensione di taglio U_{max1} e la tensione limite U_{max2} . Allo scopo di valutare gli effetti di tali modifiche sulla caratteristica di frenatura a recupero, sono state effettuate alcune simulazioni nel medesimo scenario elettromeccanico utilizzando le altre due caratteristiche di frenatura in fig. 6, ottenute riducendo di 1 kV ('Caso 2') e, rispettivamente 2 kV ('Caso 3') i valori di U_{max1} e U_{max2} rispetto alla curva standard.

unaffected by the time-shift as long as the headway does not exceed 15 minutes, being all the recovered energy used in the railway line (i.e. drawn by other trains) without any feedback to the HV network through the ESSs. For headways exceeding 20 minutes, receptivity falls sharply, because in this case there are no trains with opposite running phases (acceleration and braking) along the same line, being the braking energy transfer only possible between trains running the two different electrically connected lines.

As far as this energy transfer is concerned, for headways greater than 20 minutes, the time-shift of the train entrances in the up-line and down-line is even more important as it can influence the possible contemporary presence of two trains on the same sub-section in opposite running phases.

The recovered energy, when not occasionally drawn by the train running the opposite line, is fed back into the HV supply network, obviously net of line losses and rheostatic dissipation energy limiting the pantograph voltages).

6.2. Influence of line voltages

Voltage drops associated to power flows in a.c. traction lines, especially during regenerative braking when train power factor is approximately close to unity ($\cos\phi=1$), are significantly affected, differently from the HV transmission system case, by line resistance (not negligible with respect to line reactance) with consequent variations of the line voltage r.m.s. value.

For high no-load voltage values in the ESS and low traffic conditions, pantograph voltage of the braking train could rise up to the maximum allowable limit (29 kV) possibly causing undue trips of pantograph maximum voltage protection relays of other trains entering the same line section.

In principle, the standard train braking P-V curve ('Case 1' in fig. 6) could be modified by reducing the knee voltage U_{max1} and the limit voltage U_{max2} . The effects of such modifications on the recovery braking characteristics have been here evaluated by simulating the same 'base' traffic scenario with the two other braking characteristics of Figure 6, as achieved by reducing the U_{max1} and U_{max2} values by either 1 kV ('Case 2' in fig. 6) or 2 kV ('Case 3').

Figs. 19 and 20 show, for the three considered cases, the active power demand and, respectively, the relevant pantograph voltage of train TAD, with a particular attention to the braking time-window. Cut of the allowable

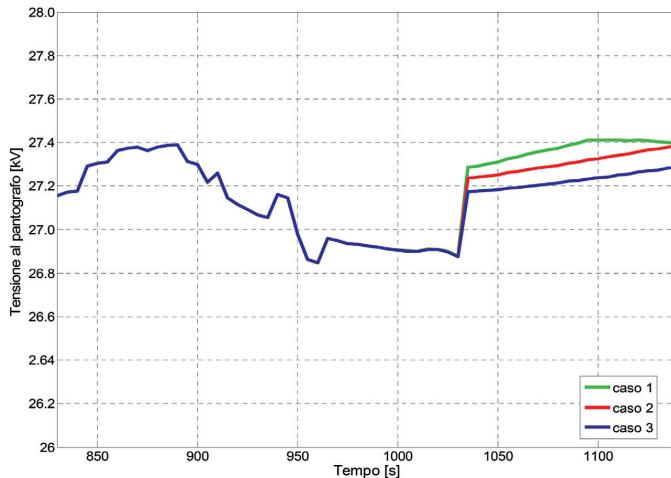


Fig. 20 - Dettaglio tensione al pantografo del treno TAD di fig. 9, in funzione del tempo, per le tre caratteristiche in frenatura di fig. 6. *Pantograph voltage of TAD train versus Time, for the three different braking curves of fig. 6.*

In fig. 19 è riportata la potenza attiva assorbita dal treno TAD nei tre casi considerati, con particolare attenzione alla fase in cui si verifica la frenatura; la fig. 20 mostra i corrispondenti andamenti temporali della tensione al pantografo. È immediato osservare che, a fronte di un lieve decremento della tensione al pantografo (non superiore a 1%), il taglio delle tensioni ammissibili per la frenatura riduce fortemente (fino ad annullarla) la potenza resa dal treno e quindi il recupero di energia. La tabella 2 mostra come l'aliquota di energia recuperata scenda dal 100% del caso base ('Caso 1') al 70% (in corrispondenza della curva 'Caso 2') fino a zero (curva 'Caso 3').

braking voltages, while causing only a slight reduction (less than 1%) in the pantograph voltage strongly reduces the power reinjection from the braking train and then the recovered energy. Simulation results presented in Table 2 show that the recovered energy amount drops from 100% ('Case 1') to 70% ('Case 2') till to 0 ('Case 3').

Simulation results show that the modification of the braking limit curve under light load conditions determines a huge reduction of regenerable energy, against a small reduction of pantograph voltages. In order to reduce line voltages in light load conditions without compromising energy recover, the supply system can be operated with slightly lower no-load supply voltages in the ESSs, while keeping the "nominal" limit P-V braking curves.

The real effect of this measure was verified by simulating the 'base' electro-mechanical scenario and setting at 26.5 kV the ESSs no-load voltages ('Case 4' in

Table 2). Case 4 of Table 2 shows that lower no-load voltages in the ESSs turn into an increase of the ESSs overall energy demand, if compared with Case 1 results, as a consequence of the reduction (around 3%) of the 25 kV transmission efficiency; on the other hand, regenerative braking achieves 100% energy recovery while line voltages are kept fully compliant with the European Interoperability Technical Specification limits [15].

6.3. Influence of the traction supply system configuration (switching arrangements) on the network receptivity

TABELLA 2 – TABLE 2

RISULTATI ENERGETICI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE
ENERGY-RELATED RESULTS OF THE SIMULATIONS

| Curva P-V simulata in frenatura (cfr. fig. 6) <i>P-V simulated curve under braking condition (see figure 6)</i> | | Caso 1 <i>Case 1</i> | Caso 4 <i>Case 4</i> | Caso 2 <i>Case 2</i> | Caso 3 <i>Case 3</i> |
|--|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Energia totale richiesta dalle SSE <i>Overall energy demand of the ESSs</i> | [MWh] | 9,47 | 9,82 | 9,76 | 10,11 |
| Energia totale assorbita dei treni <i>Overall energy demand of the running trains</i> | [MWh] | 9,33 | 9,33 | 9,63 | 9,99 |
| Energia totale recuperata <i>Overall recovered energy</i> | [MWh] | 0,65 | 0,65 | 0,36 | 0,00 |
| Energia totale recuperabile <i>Overall recoverable energy</i> | [MWh] | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 |
| Rendimento di trasmissione RE <i>Transmission efficiency</i> | [%] | 98,57 | 95,02 | 98,61 | 98,69 |
| Recupero di energia reale <i>Real energy recovery</i> | [%] | 7,02 | 7,02 | 3,74 | 0,00 |
| Recupero di energia teorico <i>Theoretical energy recovery</i> | [%] | 7,02 | 7,02 | 6,80 | 6,56 |

Results of the above illustrated parametric analysis are obviously related to the simulated traction supply configuration as the closure of the SSE neutral sections and the utilisation of only one supply transformer, (fig. 8), make the traction circuit electrically continuous along half the line length (that is about 50 km); the energy injected by braking trains can thus be drawn by other "electrically near" trains. This network configuration makes the railway line capable or partially capable to directly use the braking energy, even for a

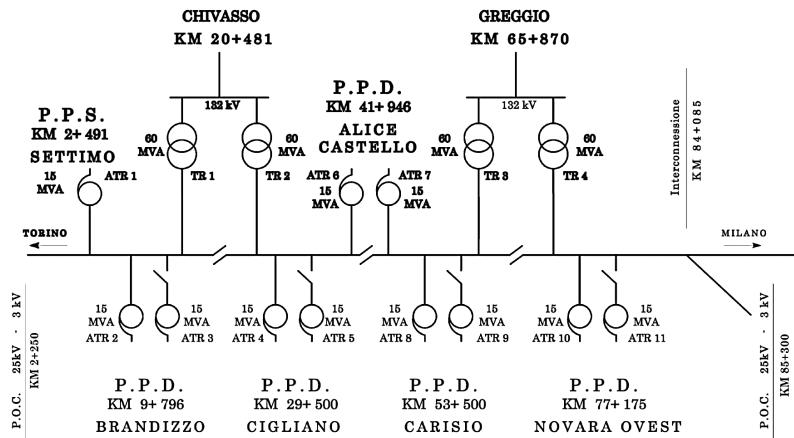


Figura 21 - Schema di alimentazione TE della tratta nel caso di 2 TR in servizio in ogni SSE. *Traction supply single-line diagram – configuration with two transformers operating in each ESS.*

I risultati delle simulazioni mostrano che la modifica della curva limite di frenatura in condizioni di basso carico determina una drastica riduzione dell'energia recuperabile, a fronte di un minimo contenimento delle tensioni ai pantografi.

Una strada percorribile per ridurre i livelli di tensione senza penalizzare l'entità del recupero appare quella di esercire i sistemi con tensioni a vuoto nelle SSE leggermente più basse, mantenendo le curve limite P-V in frenatura "nominali". Per verificare gli effetti di tale provvedimento è stata effettuata la simulazione dello scenario elettromeccanico di riferimento impostando le tensioni a vuoto delle SSE a 26,5 kV ('Caso 4' di tabella 2). Dalla tabella si evince che nel Caso 4 la riduzione della tensione in SSE provoca, rispetto al Caso 1, un leggero aumento dell'energia totale richiesta dalle SSE, conseguente all'abbassamento del rendimento di trasmissione del sistema a 25 kV (intorno al 3%); a fronte di ciò si consegue il risultato di recuperare tutta l'energia di frenatura, mantenendo comunque le tensioni sulla catenaria compatibili con i limiti imposti dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità a livello Europeo [15].

6.3. Influenza della configurazione dello schema TE sulla ricettività della rete

I risultati dell'analisi parametrica condotta sono ovviamente legati allo schema di alimentazione TE in quanto la chiusura dei tratti neutri delle SSE e l'utilizzo di un solo trasformatore (fig. 8), rende la catenaria elettricamente connessa per metà tratta (circa 50 km), con la possibilità per i treni in recupero di trasferire energia a treni che sono elettricamente "vicini". Tale configurazione rende di

train separation distance of about 50 km. It can then guarantee, for train headways below 20 minutes, a sufficient traction demand that makes the braking energy transmission back to the HV network not necessary.

An energetic analysis of regenerative braking effects has been considered quite interesting; in particular the above illustrated results have been compared with the results achieved with a different traction circuit configuration where the ESSs are operated with their neutral section in "open" position and both the transformers in operation.

In this specific case the traction supply line is subdivided into 4 electrically independent sections which can not directly exchange any braking energy. Table 3 shows the comparison of the energy-related simulation results for the two supply configurations, considering a 15-minutes headway and a time-shift between trains on the opposite lines (up and down) varying from 0 up to 8 minutes. The energetic parameters differences reveal to be small but anyway significant of the actual electromechanical phenomena.

In cases 3 and 8 of Table 3, relevant to time-shifts of 0 and 2 minutes respectively, the two configurations yield the same results, as the train running the up-line (in braking phase) and the train running the down line (in traction phase) are located within the same line section (supplied by the transformer TR1 in the Chivasso ESS). When the time-shift is increased up to 4-8 minutes, the two trains falls within two different line sections, supplied by different transformers (namely TR1 and TR2 of Chivasso ESS), so that they cannot exchange any braking energy that is anyway fed back to the HV supply system through the ESS.

The absence of other loads (trains in traction phase) within the same line section makes the pantograph voltage of the braking train to exceed the standard limits thus imposing the rheostatic dissipation of part of the braking energy. This kind of analysis, also applicable to the Novara-side line sub-sections, explains the recovered energy reduction with respect to those case studies where the SSE neutral sections are operated in "closed" position (cases 13, 18 and 23 of Table 3).

Line operation with the ESS "neutral sections" in "open" position implies the subdivision of the line into electrically independent sections thus sharply reducing, being identical the traffic condition, the capability to transfer the braking train recoverable energy to the trains in traction phase.

SCIENZA E TECNICA

fatto la linea ricettiva, o parzialmente ricettiva, anche con treni distanti circa 50 km assicurando, per cadenzamenti inferiori a 20 minuti, una densità di carico sufficiente a rendere non necessario il trasferimento dell'energia di frenatura direttamente sulla rete AT attraverso le SSE.

È apparso di interesse eseguire l'analisi energetica sugli effetti della frenatura a recupero, confrontando i risultati sopra illustrati con quelli conseguiti adottando una diversa configurazione dello schema TE ed in particolare quello che prevede l'esercizio delle SSE con tratto neutro aperto e i due trasformatori in servizio (fig. 21).

La linea di alimentazione TE presenta in questo caso 4 sezioni elettriche, elettricamente disaccoppiate con l'impossibilità del trasferimento dell'energia di frenatura dall'una all'altra. La tabella 3 mostra il confronto dei risultati nelle due configurazioni TE per un cadenzamento dei treni di 15 minuti e sfasamento variabile da 0 a 8 minuti. Come si può notare le differenze dei parametri energetici sono di modesta entità ma comunque presenti ed esplicative dei fenomeni elettromeccanici che si verificano.

In particolare nei casi 3 e 8 (tabella 3), relativi a sfasamenti di 0 e 2 minuti, nulla cambia tra le due configurazioni, in quanto il treno sul binario pari (in frenatura) e quello sul binario dispari (in trazione) si trovano entrambi sulla medesima sezione di linea alimentata dal TR1 della SSE di Chivasso. Sfasando ulteriormente le partenze (4-8 minuti) i 2 treni si trovano in due sezioni differenti, alimentate rispettivamente dal TR1 e TR2 della SSE di Chivasso; questo impedisce il trasferimento diretto da un treno all'altro dell'energia di frenatura che viene dunque riversata nella rete AT attraverso la SSE. La mancanza di un carico direttamente connesso alla catenaria (treno in trazione) implica un innalzamento sopra i limiti della tensione al pantografo del treno in frenatura e ciò impone la dissipazione reostatica di parte dell'energia di frenatura. Tale analisi, ovviamente estendibile anche alle semitratte lato Novara, spiega dunque la riduzione dell'energia recuperata rispetto al caso in cui il tratto neutro delle SSE sia esercito chiuso (casi 13, 18, 23).

Esercire le linee con il tratto neutro di SSE aperto di fatto significa disattivare la catenaria in tratti elettricamente indipendenti e dunque, a parità di condizioni di traffico, ridurre sensibilmente la possibilità di trasferire l'energia recuperabile da treni in frenatura a treni in trazione. È ovvio che le differenze nei parametri energetici tra le due configurazioni TE, peraltro di entità limitata, sono rilevabili esclusivamente in condizioni di traffico elevato (cadenzamenti non superiori a 15 minuti); tuttavia la configurazione TE con tratti neutri di SSE chiusi appare sicuramente più idonea, in tutti i possibili scenari di traffico, a favorire condizioni di ricettività da parte di treni in trazione.

TABELLA 3 – TABLE 3

RISULTATI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE CON CADENZAMENTO A 15 MINUTI E TRATTI NEUTRI DI SSE APERTI
RESULTS OF SIMULATIONS WITH 15 MINUTES HEADWAY AND SSE 'NEUTRAL SECTIONS'
IN OPEN POSITION

| N° | Cad. Headway [min] | Stas. Time Shift [min] | Energia totale richiesta dalla SSE Overall energy demand of the SSEs [MWh] | Energia totale assorbita dai treni Overall energy demand of the trains [MWh] | Rendimento di trasmissione Transmission efficiency ref [%] | Energia recuperata Recovered energy [%] | | Energia recuperabile Recoverable energy [%] | | Rapporto en. recuperata/ recuperabile Recovered/recoverable energy ratio | |
|----|--------------------------|------------------------------|--|--|--|---|---------|---|---------|---|---------|
| | | | | | | 1TR/SSE | 2TR/SSE | 1TR/SSE | 2TR/SSE | 1TR/SSE | 2TR/SSE |
| 3 | 15 | 0 | 9.5 | 9.5 | 9.3 | 9.3 | 98.57 | 98.17 | 7.0 | 7.0 | 7.0 |
| 8 | 15 | 2 | 9.5 | 9.5 | 9.3 | 9.3 | 98.55 | 98.14 | 7.0 | 7.0 | 7.0 |
| 13 | 15 | 4 | 9.5 | 9.5 | 9.4 | 9.4 | 98.49 | 98.10 | 6.8 | 6.6 | 7.0 |
| 18 | 15 | 6 | 9.5 | 9.5 | 9.4 | 9.4 | 98.51 | 98.10 | 6.8 | 6.6 | 7.0 |
| 23 | 15 | 8 | 9.5 | 9.5 | 9.4 | 9.4 | 98.52 | 98.12 | 6.8 | 6.6 | 7.0 |

7. Conclusioni

La metodologia integrata descritta consente di poter applicare agevolmente alla simulazione ed al calcolo degli impianti di trazione elettrica a 2x25 kV, 50 Hz, il software ATP-EMTP, cioè uno strumento di fatto universalmente accessibile e di riconosciuta validità internazionale per il calcolo dei sistemi elettrici di potenza multiconduttore, comunque dissimmetrici, con possibilità di eseguire l'analisi della tratta ferroviaria anche in condizioni di guasto e di transitorio elettromagnetico.

La metodologia è stata applicata allo studio della tratta AV/AC Torino–Novara, con particolare attenzione alla valutazione degli effetti elettrici ed energetici associati alla frenatura a recupero operata dai treni. I risultati ottenuti hanno consentito di evidenziare l'influenza di alcuni parametri sull'entità dell'energia recuperata, quali: il cadenzamento dei treni, lo sfasamento temporale tra gli ingressi alle estremità della tratta, il valore della tensione a vuoto delle SSE, il valore della tensione massima al pantografo ammessa in frenatura e la configurazione dello schema di alimentazione lato 25 kV.

In particolare, lo studio parametrico ha mostrato la possibilità di conseguire recuperi quasi totali dell'energia di frenatura con risparmi energetici compresi tra il 4% e l'8% del fabbisogno totale. Le non trascurabili implicazioni energetiche associate alla frenatura inducono a svolgere ulteriori e più approfondite valutazioni su questa potenzialità del sistema alla quale a livello di trasporto ferroviario è stato sinora dato scarso rilievo. In particolare, con l'ausilio della procedura descritta, appare possibile, sulla base degli orari ferroviari, eseguire una valutazione realistica dell'energia media recuperabile nell'esercizio di tratte AV di valico o di tratte che utilizzano sistematicamente le interconnessioni previste lungo il tracciato.

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano l'Ing. Claudio SPALVIERI di RFI-Direzione Tecnica per la preziosa collaborazione fornita nel reperimento di dati ed informazioni necessarie per le simulazioni ed i confronti con i risultati sperimentali.

Differences in the energetic parameters concerning the two traction supply system configurations become obviously appreciable only in high traffic density conditions (train headway not greater than 15 minutes); the traction supply system configuration with ESS "neutral sections" in "closed" position is anyway better suited to the application of regenerative braking in all possible traffic scenarios, because of the relevant increase in the train receptivity.

7. Conclusions

The integrated methodology presented in this paper allows an easy and systematic application of the powerful and reliable ATP-EMTP software to the simulation of 2x25 kV-50 Hz traction power supply systems. The ATP-EMTP, a universally accessible and internationally recognised tool, is suitable for the calculation of multiconductor, symmetrical or unsymmetrical, electric power systems, both in steady-state and in transient conditions.

This methodology was applied to the analysis of the Torino–Novara HS/HC line section, with a particular focus on the electric and energetic effects of train regenerative braking. The achieved results allowed to show the influence of some specific parameters on the recovered energy amount, such as train headway, time-shift between train departures at the two opposite ends of the line, ESS no-load voltages, maximum allowed pantograph voltage under braking conditions and the 25 kV traction power supply scheme

In particular, the parametric study showed the possibility to achieve a nearly global recovery of braking energy, with savings between 4% and 8% of overall energy demand. The not negligible energetic implications of the regenerative braking phenomenon should suggest a deeper investigation about this system potentiality. The proposed procedure would allow a realistic evaluation, based on train paths, of the average recoverable energy in HS line sections, particularly in presence of mountain stretches or intermediate interconnections.

Acknowledgements

Authors thanks Eng. Claudio SPARVIERI of RFI Technical Direction for his valuable collaboration in field data collection activity.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] G. GUIDI BUFFARINI, E. MINGOZZI, V. MORELLI, "Criteri generali per l'alimentazione delle linee del sistema alta velocità italiano", AEI-Automazione Energia Informazione, vol. 8 n. 12, dicembre 1993, pp. 56-61.
- [2] G. GUIDI BUFFARINI, V. MORELLI, "Criteri di progetto del sistema di trazione elettrica 25 kV, 50 Hz, per le nuove linee ferroviarie italiane ad alta velocità", Ingegneria Ferroviaria, novembre 1994.
- [3] G. GUIDI BUFFARINI, A. COLLA, A. FUMI, "L'evoluzione degli impianti di trazione elettrica a 25 kV in Italia", Ingegneria Ferroviaria, gennaio 2009, pp. 9-32.
- [4] A. CAPASSO, N. CIACCIO, R. LAMEDICA, A. PRUDENZI, B. PERNICENI, "Un modello semplificato per il calcolo elettrico dei sistemi di trazione ferroviaria 2x25 kV-50 Hz", Ingegneria Ferroviaria, luglio 1995, pp. 473-487.

- [5] P. FIRPO, S. SAVIO, G. SCIUTTO, "SIAV: un codice di calcolo automatico per l'analisi elettrica del sistema ad alta velocità 2x25 kV-50 Hz", Atti della Conferenza "Sviluppo e prospettive dei trasporti elettrificati: ricerca e innovazione", Genova, 25-27 novembre 1992, pp. 171-181.
- [6] R.J. HILL, I.H. CEVIK, "On-line simulation of voltage regulation in autotransformer-fed AC electric railroad traction networks", IEEE Trans. on Vehicular Technologies, vol. 42 n. 3, august 1993, pp. 365-372.
- [7] A. MARISCOTTI, P. POZZOBON, M. VANTI, "Simplified modelling of 2x25 kV-50 Hz AT railway systems for the solution of low frequency and large-scale problems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 22 n. 1, january 2007, pp. 296-301.
- [8] G. GUIDI BUFFARINI, "Impostazione generale del calcolo elettrico delle linee di contatto della trazione a corrente alternata", Ingegneria Ferroviaria, agosto 1983, pp. 505-514.
- [9] G. GUIDI BUFFARINI, "Il calcolo elettrico del sistema di trazione monofase 2x25 kV-50 Hz", Ingegneria Ferroviaria, novembre 1994, pp. 505-514.
- [10] R. BENATO, R. CALDON, A. PAOLUCCI, "Algoritmo matriciale per l'analisi di una linea ferroviaria ad alta velocità e rispettiva rete di alimentazione", L'Energia Elettrica, vol. 75, n. 5, settembre-ottobre 1998, pp. 304-311.
- [11] G. COSULICH, T. GHIARA, "Progettazione e verifica degli impianti per l'alimentazione dei sistemi di trasporto elettrificati", Ingegneria Ferroviaria, luglio 2005, pp. 505-519.
- [12] G. LUCCA, "Propagazione di tensione e corrente lungo un binario: due modelli di calcolo a confronto", Ingegneria Ferroviaria, febbraio 2005, pp. 133-143.
- [13] A. ADINOLFI, R. LAMEDICA, C. MODESTO, A. PRUDENZI, S. VIMERCATI, "Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13 n. 4, october 1998, pp. 1536-1542.
- [14] H-S. WANG, "Control strategy for optimal compromise between trip time and energy consumption in a high-speed railway", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics - Part A, vol. 28, n. 6, november 1998, pp. 791-802.
- [15] Commissione Europea "Specifica tecnica di interoperabilità per il sottosistema «energia» del sistema ferroviario trans-europeo ad alta velocità", 2008/284/CE.

Sommaire

MÉTHODE INTÉGRÉE DE CALCUL POUR LE SYSTÈME DE TRACTION A 2X25 kV (50 Hz) - Application à l'évaluation des effets du freinage à récupération sur une ligne AV

L'article décrit une méthode intégrée de calcul qui, tout en simulant la circulation ferroviaire, permet d'analyser le comportement des systèmes de traction A 2x25 kV (50 Hz). La méthode effectue l'analyse électrique multiconducteur du circuit de traction en utilisant le logiciel ATP-EMTP (Alternative Transient Program-ElectroMagnetic Transient Program) et permet donc aussi de calculer, pour le système électrique en examen, les transitoires électromagnétiques et tous les régimes de panne possibles. Les analyses illustrées dans le présent article font référence à l'application de la méthode en question à l'étude du fonctionnement en régime permanent d'une ligne ferroviaire AV, une attention particulière étant accordée aux effets électriques et énergétiques du freinage à récupération effectué par les trains.

Zusammenfassung

BERECHNUNGSVERFAHREN FÜR DIE GESAMTEN TRAKTION- UND ENERGIEVERSORGUNGS SYSTEMEN 2-25 kV, 50 Hz – Bewertung der Wirkungen von Bremsung und Energierückgewinnung auf eine NBS.

Das integrierte Berechnungsverfahren analysiert das Benehmen der Energieversorgungssysteme 2-25 kV, 50 Hz mittels einer Simulation des Eisenbahnverkehrs. Die elektrische Analyse des mehrleitigen Traktionsystems benutzt das Software ATP-EMTP (Alternative Transient Program – Electromagnetic Transient Programm), was die Berechnung der elektromagnetischen Transitoria und aller möglichen Unfallzuständen ermöglicht. Die vorgestellten Beispiele sind mit der Berechnung eines ständigen Betriebs verbunden und das mit besonderer Aufmerksamkeit für die elektromagnetischen Folgerungen einer Rückgewinnungsbremsung im Fall von Hochgeschwindigkeitszügen.