



## Ipotesi su varianti a sistemi di alimentazione per filovie

### *Hypotheses on modifications of power systems for trolleybuses*

Sig. Flavio MENOLOTTO<sup>(\*)</sup>

#### 1. Premessa

Le linee di contatto degli impianti tranviari e filoviari italiani sono per lo più eserciti a 600 V c.c. (i più recenti a 750 V c.c.) tensione in uso da più di un secolo che mediava diverse esigenze, quali apparecchiature di conversione semplici, convenienza nel trasporto, motori di trazione ed apparecchiature di regolazione funzionali ed affidabili e sicurezza per persone e cose, sia per guasti sui veicoli che sulle linee di contatto.

L'espansione delle città nel secolo scorso favorì la realizzazione di tranvie e filovie extraurbane: in alcuni casi vennero esercitate a tensioni superiori consentendo di ridurre le cadute di tensione in linea ed il numero delle sottostazioni con risparmio sui costi di impianto.

Sono esistite linee miste urbane-extraurbane con mezzi bitensione 600-1200 V c.c., quali le tramvie Milano-Vaprio, Milano-Vimercate, Torino-Orbassano-Giaveno, Torino-Venaria Reale, Torino-Pianezza, la filovia Torino-Rivoli e le filovie extraurbane di Verona.

Negli ultimi 20-30 anni si è assistito ad un incremento della potenza specifica di tram e filobus, con migliori prestazioni in accelerazione ma con l'aumento dei relativi consumi energetici, anche per la presenza di sistemi di condizionamento aria a bordo.

Più in particolare nel campo filoviario si è arrivati a potenze di 120-150 kW per mezzi da 12 m, fino ai 180-250 kW per i filosnodati da 18 m, con correnti medie che vanno, grosso modo, dai 160 ai 330 A, che possono aumentare all'avviamento fino a 400 A. Alcuni esempi esteri di filosnodati a 3 casse da 25 m hanno potenze nominali di ben 320 kW.

Negli impianti filoviari attuali sono necessarie diverse sottostazioni elettriche di conversione c.a./c.c. (SSE), derivate dalla normale rete di distribuzione di energia elettrica trifase a Media od Alta Tensione, per alimentare le linee di contatto ai canonici valori di 600 V c.c. (minima

#### 1. Introduction

*The contact lines of Italian tram and trolleybus systems are mostly operated at 600 V d.c. (the latest ones at 750 V d.c.) voltage in use for more than a century that conciliated between different needs, such as simple conversion equipment, convenience in transportation, traction motors and functional and reliable adjustment equipment and safety for people and things, both for breakdowns on vehicles and on contact lines.*

*The expansion of the city in the last century favoured the implementation of tramways and suburban trolleybuses: in some cases they were operated at higher voltages, allowing to reduce the voltage drop in the line and the number of substations with system cost savings.*

*Mixed urban-suburban lines have existed with 600-1200 V d.c. dual voltage vehicles, such as the Milan-Vaprio, Milan-Vimercate, Turin-Orbassano-Giaveno, Turin-Venaria Reale, Turin-Pianezza tramways, the Turin-Rivoli trolley line and the suburban trolleybus lines of Verona.*

*Over the past 20-30 years there has been an increase in the specific power of trams and trolleybuses, with better acceleration performance but with increase of energy consumption, also due to the presence of air conditioning systems on board.*

*More specifically in the trolleybus field the power of 120-150 kW was reached for 12 m vehicles, up to 180-250 kW for 18 m articulated trolleybuses, with average currents ranging roughly from 160 to 330 A, which can increase to 400 A at start up. Some foreign examples of articulated trolleybuses with 3 x 25 m carbodies have nominal capacities of 320 kW.*

*Current trolleybus systems require several AC/DC conversion power substations (ESS), derived from the normal three-phase electricity distribution network with Average or High Voltage, to power contact lines with the conventional values of 600 V d.c. (minimum 450 V – maximum 750 V)*

<sup>(\*)</sup> Impiegato presso Enel Distribuzione Spa.

<sup>(\*)</sup> Employed by Enel Distribuzione Spa.

## OSSERVATORIO

450 V – massima 750 V) o, per impianti più recenti, a 750 V c.c. (minima 500 V - massima 900 V).

In funzione dei mezzi impiegati e della tipologia di servizio (frequenza corse) le SSE, con potenza installata in genere tra i 500 kVA ed 1 MVA, sono poste ogni 3-5 km circa per linee con filobus da 12 m, per ridursi ogni 2-3 km per linee servite da filosnodati, fino ad arrivare a 1-2 km per linee con corse molto frequenti (ogni 3-4') attrezzate con corsie preferenziali (busvie o BRT).

Per evitare che nei momenti di massimo carico vi siano forti cadute di tensione sulle linee di contatto, tali da ridurre le prestazioni dei filobus (specie nelle tratte alle estremità), si ricorre sia all'aumento della tensione di esercizio di 50-100 V rispetto alla nominale che ad una rete di distribuzione di cavi sotterranei, i feeder, che corrono lungo i tracciati delle linee aeree e che alimentano le medesime.

La linea aerea bifilare, nei due sensi di marcia, sospesa a sostegni ha costi medi intorno ai 500.000 €/km [1], che si possono ridurre per linee ancorate ai muri di immobili: le linee elettriche in cavo sotterranee, i feeder, hanno costi sui 50.000-60.000 €/km.

I costi di realizzazione delle SSE partono dai 500.000 € circa l'una con possibili sovracosti legati alla tipologia dei fabbricati (normale od interrata) ed alla loro posizione (zone centrali o periferiche).

Il campo di impiego dei moderni filobus, tale da consentire costi di esercizio simili, o di poco superiori, ad autobus, è su linee di trasporto di superficie a media frequentazione con filosnodati, fino a 1500-2000 passeggeri/ora per senso di marcia, con corse frequenti (da 4 a 10') e percorrenze annuali dai 50.000 km in su per ogni mezzo [2] [3].

In tali casi i soli costi infrastrutturali possono variare dai 600.000 €/km (SSE ogni 3 km) agli 800.000 €/km per busvie (SSE ogni 2 km e 100.000 €/km per attrezzaggio corsie) [4].

Le SSE inciderebbero indicativamente il 15 al 25% sul totale dei costi. Altri costi (opere d'arte, riqualificazione urbanistica, ecc.) non vengono qui presi in considerazione.

### 2. Proposta di impianto a corrente continua

Potendo adottare per nuove filovie, o per il potenziamento e riqualificazione di impianti attuali, *tensioni doppie delle attuali, 1500 V c.c.*, si avrebbero migliori prestazioni del sistema: a parità di condizioni le correnti sarebbero dimezzate. Mantenendo gli stessi valori di cadute di tensione percentuali in linea si potrebbero dimezzare il numero di sottostazioni elettriche e ridurre l'estensione delle reti di feeder.

Dal punto di vista normativo non vi sarebbero particolari restrizioni, nella norma EN 50122-1 (CEI 9-6) [5] si danno prescrizioni su sistemi di alimentazione con con-

*or, for more recent systems at 750 V d.c. (minimum 500 V - maximum 900 V).*

*According to the vehicles used and the type of service (frequency of rides) the ESSs, with installed power typically between 500 kVA and 1 MVA, are placed approximately every 3-5 km for 12 m trolleybus lines, decreasing every 2-3 km on lines served by articulated trolleybuses, up to 1-2 km for lines with very frequent travel (every 3-4') equipped with fast tracks (bus lines or BRT).*

*To avoid high voltage drops on the contact lines during maximum load, such as to impair the performance of trolleybuses (especially in end sections), we resort both to increased operating voltage of 50-100 V compared to nominal voltage and to a distribution network of underground cables, feeders, which run along the overhead lines routes and feed the same.*

*The two-wire overhead line, in both directions, suspended on supports has average costs of around 500.000 €/km [1], which can be reduced for lines anchored to the walls of buildings: cable underground power lines, feeders, have costs ranging from 50.000-60.000 €/km.*

*The ESSs implementation costs start from about € 500.000 each with possible additional costs linked to the type of buildings (normal or underground) and their position (central or peripheral areas).*

*The field of application of modern trolleybuses, allowing similar operating costs, or slightly higher, with respect to buses, is on average frequency surface transport lines with articulated trolleybuses, up to 1500-2000 passengers per hour per direction of travel, with frequent rides (from 4 to 10') and annual distance covered from 50.000 km upwards for each vehicle [2] [3].*

*In such cases the infrastructure costs alone can vary from 600.000 €/km (ESS every 3 km) to 800.000 €/km for bus lines (ESS every 2 km and 100.000 €/km for lane set-up) [4].*

*The ESS would indicatively have an impact ranging from 15% to 25% on the total costs. Other costs (works of art, urban redevelopment, etc.) are not taken into account here.*

### 2. Proposal for Direct Current system

*Being able to adopt double voltages (of 1500 V d.c.) for new trolleybuses, or for the expansion and upgrading of existing systems, compared to current ones, the system would have better performance: on equal terms currents would be halved. Maintaining the same voltage drop percentage values on the line the number of electrical substations could be halved and the size of feeder networks could be reduced.*

*From a regulatory point of view there would be no particular restrictions, in the EN 50122-1 (CEI 9-6) [5] standard requirements are given on power systems with return conductors, including trolleybus ones, referring to systems with a rated voltage not exceeding 1500 V d.c. [6].*

## OSSERVATORIO

duttori di ritorno, tra cui quelli filoviari, riferendosi ad impianti con tensione nominale non superiore a 1500 V c.c. [6].

Per quanto riguarda i filoveicoli, a parte la scelta tra una tensione nominale di 600 o 750 V c.c. presente nella norma CEI 9-4 [7], si prescrive una tensione massima dei sistemi di trazione a bordo di filoveicoli di 1500 V c.c. (banda III) [8].

Visto che in generale le linee di contatto bifilari hanno entrambi i conduttori di contatto isolati, con sistemi a doppio isolamento o con isolamento rinforzato, si propone un sistema dove il conduttore di contatto positivo sia esercito ad una tensione *positiva* di 750 V verso terra, mentre quello negativo sia esercito ad una tensione *negativa* di 750 V, sempre verso terra: tra i due conduttori avremo una tensione di 1500 V c.c.: sarebbe definibile come un sistema di *alimentazione duale* a  $\pm 750$  V c.c.

Tale sistema a  $\pm 750$  V c.c. può essere realizzato nella maniera più semplice mettendo a terra il centro stella dell'avvolgimento secondario del trasformatore di trazione nella SSE (fig. 1) così da vincolare il sistema di alimentazione ed avere le tensioni verso terra equilibrate.

Più complesso è lo schema con trasformatori a due avvolgimenti secondari, uno a stella e l'altro a triangolo che alimentano ponti raddrizzatori di Graetz a reazione dodecafase connessi in serie, con una messa a terra di funzionamento sul punto comune (fig. 2).

Per SSE alimentate da reti MT in genere non sarà necessario creare un impianto di messa a terra dedicato, potrà essere collegato al relativo impianto di messa a terra generale. Generalmente tale messa a terra è unica per ogni SSE e si usa sezionare le linee di contatto per evitare di mettere in parallelo le SSE per limitare le correnti vaganti tra le medesime.

### 2.1. La sicurezza

I sistemi filoviari hanno una sicurezza *passiva*, grazie al doppio isolamento (od isolamento rinforzato) sia delle linee di contatto che degli apparati a bordo dei filoveicoli, ed *attiva*, affidata a dispositivi di protezione sia in partenza delle linee di contatto dalle SSE che a bordo dei filoveicoli, per risolvere guasti per cortocircuiti e/o per dispersione verso terra, corredati di apparati di richiusura automatica dopo guasti temporanei e sistemi di controllo dell'isolamento.

Nella valutazione dei rischi si han-

*As regards trolley vehicles, besides the choice between a rated voltage of 600 or 750 V d.c. in the CEI 9-4 [7] standard, a maximum voltage of 1500 V d.c. for traction systems aboard trolley vehicles is prescribed. (band III) [8].*

*Since in general both contact conductors of two-wire contact lines are insulated, with double insulation or reinforced insulation systems, a system is proposed where the positive contact conductor is operated at a positive voltage-to-ground of 750 V, while the negative one is operated at a negative voltage-to-ground of 750 V: between the two conductors we will have a voltage of 1500 V d.c.: it could be defined as a dual power supply system at  $\pm 750$  V d.c.*

*This system at  $\pm 750$  V d.c. can be implemented in the easiest way putting the neutral point of the secondary winding of the traction transformer in the ESS to the ground (fig. 1) so as to constrain the power system and have balanced voltages-to-ground.*

*The diagram with the two secondary windings transformers is more complex, one star and the other triangle that feed twelve-phase Graetz rectifier bridges connected in series, with operation grounding on the common point (fig. 2).*

*Generally a dedicated earthing system does not need to be created for ESSs powered by MT networks, it can be*

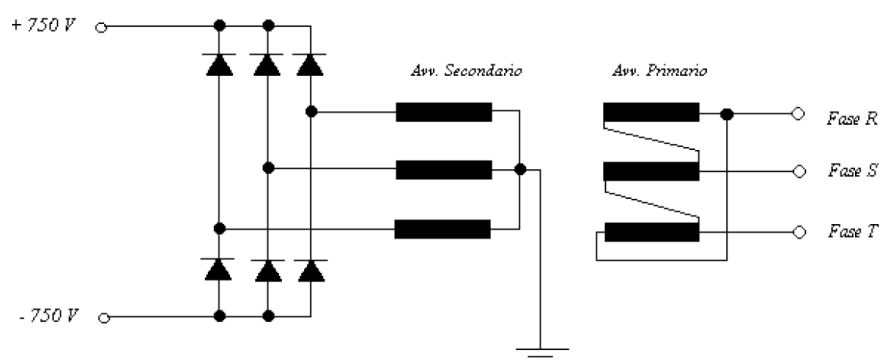


Fig. 1 - Schema di principio del sistema alimentazione duale  $\pm 750$  V c.c.  
Fig. 1 - Diagram of the  $\pm 750$  V d.c. dual power system.

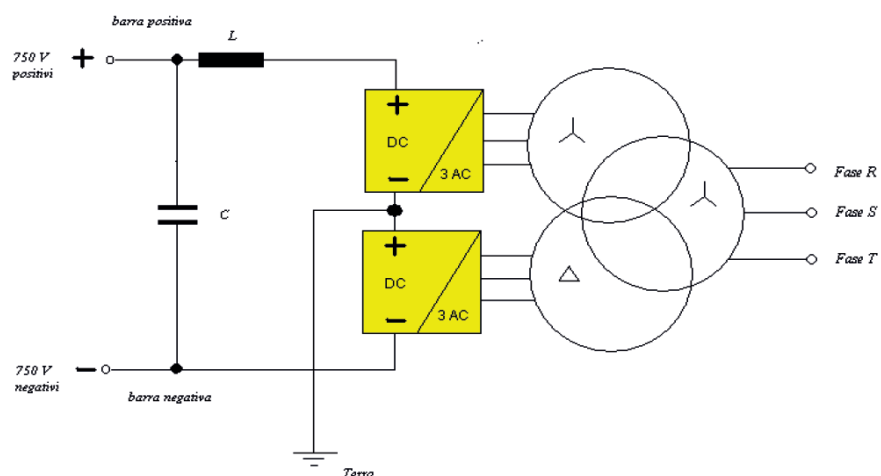


Fig. 2 - Schema con trasformatori a 2 avvolgimenti secondari.  
Fig. 2 - Diagram with 2 secondary windings transformers.



## OSSERVATORIO

no maggiori probabilità che parti sporgenti di altri veicoli entrino in contatto con le linee di contatto con conseguenti cortocircuiti o caduta a terra di un conduttore.

Si considera anche lo scarrucolamento di un'asta di un filobus che entra in contatto con un sostegno, tirante od una massa metallica, che viene messa in tensione tramite l'equipaggiamento elettrico dello stesso filobus, visto che l'altra asta rimane vincolata all'altro conduttore di contatto.

Rischi ben minori possono venire dal cedimento di isolatori di una linea di contatto, con circolazione di corrente a terra tramite il sostegno della linea aerea o su un tirante, che il guasto a terra dell'equipaggiamento elettrico di un filobus, ambedue a doppio isolamento od isolamento rinforzato.

Nei casi in cui vengano individuate delle masse che possono andare in tensione per guasto vanno adottati diversi metodi di protezione (messa a terra con diodo di blocco, con scaricatori, ecc.) che non devono far superare i valori di tensioni di contatto secondo la norma EN 50122-1 [9].

I dispositivi di protezione per guasti a terra sono basati sul principio del rilievo delle correnti differenziali od omopolari.

In impianti convenzionali a 600 o 750 V c.c. nel caso che vi sia una massa in tensione per guasto dal conduttore positivo le protezioni sono efficaci per guasti a bassa resistenza: ad esempio con una resistenza totale di guasto di 5 k $\Omega$  si avrà una corrente differenziale di circa 100 mA alla tensione minima di 500 V (reti nelle condizioni di massimo carico e nei punti più lontani dalle SSE). Guasti con resistenze superiori sarebbero difficilmente rilevabili in quanto la corrente di guasto può essere dello stesso ordine di grandezza delle correnti di dispersione, valore variabile secondo molti fattori (grado di umidità aria, stato isolanti, estensione della rete alimentata, numero mezzi in circolazione, ecc.).

Ancor più problematico è il rilevamento di guasti a terra sui conduttori negativi per via del potenziale verso terra contenuto (50-100 V), riferendosi all'esempio cui sopra con una tensione di 100 V avremo una corrente differenziale di soli 20 mA.

Un provvedimento per evitare tensioni di contatto pericolose sui conduttori negativi potrebbe essere il dimensionamento delle reti in maniera che nelle peggiori condizioni (massimo carico e lontani dalle SSE) non si superino i 120 V verso terra, ossia il limite di tensione per tempi permanenti come da norme EN 50122-1 [10].

Eventuali dispersioni sarebbero però dei punti deboli che potrebbero evolvere in cortocircuiti.

Nel sistema proposto a  $\pm 750$  V c.c. siccome la tensione verso terra non cambia, rispetto ai sistemi abituali non vi sono maggiori rischi per persone e cose: oltre a poter rilevare i guasti a terra sui conduttori positivi si possono rilevare quelli su conduttori negativi nel momento in cui si verificano ed interrompere l'alimentazione.

*connected to its general earthing system. This grounding is usually single for each ESS and contact lines are sectioned to avoid putting the ESSs in parallel to limit circulation currents between the same.*

### 2.1. Safety

*Trolleybus systems have passive safety, thanks to the double insulation (or reinforced insulation) both of the contact lines and of equipment on board the trolley vehicles, and active safety, entrusted to protection devices both at the start of contact lines from ESSs and aboard trolley vehicles, to resolve breakdowns due to short-circuits and/or ground leakage, with automatic reclosing equipment after temporary failure and isolation control systems.*

*In risk assessment, it is more likely that protrusions from other vehicles come into contact with the contact lines resulting in short-circuits or fall to the ground of a conductor.*

*The slipping of a trolley of a trolleybus that comes in contact with a support, anchoring wire or a metal mass that is put under voltage by the electrical equipment of the same trolleybus is also considered since the other trolley remains bound to the other contact conductor.*

*Very minor risks can result from the failure of insulators of a contact line, with ground current circulation through the support of the overhead line or on an anchoring wire, than a ground fault of the electrical equipment of a trolleybus, both with double insulation or reinforced insulation.*

*In cases where masses are identified that can go under voltage due to failure, different methods of protection should be adopted (earthing with blocking diode, with dischargers, etc.) that must not allow exceeding the contact voltage values in accordance with EN 50122-1 [9] standard.*

*Protection devices for ground faults are based on the detection principle of differential or homopolar currents.*

*In conventional 600 or 750 V d.c. systems in the event that there is a mass under voltage due to failure of the positive conductor protections are effective for low-resistance faults: for example with a total failure resistance of 5 k $\Omega$  there will be a differential current of about 100 mA at a minimum voltage of at least 500 V (networks in conditions of maximum load and at the furthest points from the ESSs). Failures with higher resistances are difficult to detect because the fault current can be of the same order of magnitude of leakage currents, a variable value according to many factors (degree of air humidity, insulators condition, extension of the powered network, number of vehicles running, etc.).*

*Detection of ground faults on negative conductors is even more problematic due to the reduced ground potential (50-100 V), referring to the example above with a voltage of 100 V there will be a differential current of just 20 mA.*

*A measure to prevent dangerous contact voltages on negative conductors could be the sizing of networks in such a way that under the worst conditions (maximum load and*

## OSSERVATORIO

Inoltre a parità potenza di un gruppo di conversione si ha il dimezzamento della massima corrente di guasto per cortocircuito rispetto ai sistemi abituali, con minori sollecitazioni a tutti gli elementi di impianto e filoveicoli guasti oltre agli elementi di impianto attraversati dalla corrente di guasto.

Potranno essere scelti interruttori extrarapidi per la corrente continua, in esecuzione bipolare, con minor potere di interruzione.

Le protezioni differenziali permettono di poter individuare anche il doppio guasto a terra contemporaneo sui conduttori, tranne che nel caso di guasti con identico valore di resistenza, eventualità poco probabile.

Nel caso di guasti a terra franchi con valori di resistenza di guasto molto ridotti vi sarebbe una circolazione di corrente sul punto comune di messa a terra del sistema ridotta a circa la metà di quello di cortocircuito.

Un deciso miglioramento potrebbe essere realizzato inserendo una resistenza  $R$  sul punto comune si messa a terra (fig. 3) così da limitare le correnti di guasto a terra a pochi A.

Si avrebbe grande riduzione della potenza nel punto di guasto e conseguenti minori rischi per persone e cose, e riduzione che il rischio evolva in un cortocircuito.

Per un buon coordinamento delle protezioni va evitato che le SSE siano in parallelo fra loro.

### 2.2. Precedenti e sviluppi

Nell'ambito della trazione elettrica ferroviaria sistemi di alimentazione duale sono stati usati in alcuni casi, in special modo per l'alimentazione di veicoli su monorotaie: in Italia è stato utilizzato nella monorotaia di Italia '61 a Torino, a  $\pm 600$  V c.c.

Nell'ambito della trazione filoviaria vi sono sistemi ad alimentazione duali variabili tra i  $\pm 1100$  V c.c. ed i  $\pm 1300$  V c.c. (2200 - 2600 V c.c.) per un'applicazione particolare in ambito minerario, la trazione elettrica ausiliaria per autocarri da miniera, detti *dumper*, dalle considerevoli dimensioni e con portate dai 300 t fino a 500 t, equipaggiati con un motore Diesel della potenza da circa 2000 kW fino a 3500 kW e trasmissione elettrica alle ruote posteriori, con motori nei mozzi: rispetto a mezzi simili hanno la possibilità di essere anche alimentati da una linea aerea bifilare tramite una coppia di pantografi.

Sviluppata inizialmente in America, è utilizzata in alcune grandi miniere a cielo aperto nell'Africa meridionale per il trasporto del materiale estratto su lunghe rampe in salita at-

far from ESSs) 120 V to the ground are not exceeded, i.e. the voltage limit for permanent time as per EN 50122-1 [10] standard.

Any leakage would however be a weakness that might evolve in short circuits.

In the proposed system at  $\pm 750$  V d.c. since the ground voltage does not change, there are not greater risks for people and things compared to the usual systems: in addition to detecting ground faults on positive conductors those on negative conductors can be found when they occur and power supply can be interrupted.

Furthermore with the same power of a conversion group the halving of the maximum fault current for short-circuit is obtained compared to the usual systems, with less stress on all failed system elements and trolley vehicles and on system elements crossed by fault current.

High-speed bipolar circuit breakers for direct current can be chosen, with less breaking capacity.

Differential protections can also allow identifying the double contemporary ground fault on the conductors, except in the case of failures with the same resistance value, a hardly unlikely possibility.

In the case of free ground faults with very low fault resistance values there would be a current circulation on the common grounding point of the system cut down to about half that of a short-circuit.

A definite improvement could be achieved by inserting an  $R$  resistance on the common grounding point (fig. 3) so as to limit the ground failure currents to a few As.

There would be a great power reduction at the point of failure and consequent lower risks for persons and things, and reduction of the risk evolving in a short circuit.

For good coordination of protections it should be avoided that the ESSs are in parallel with each other.

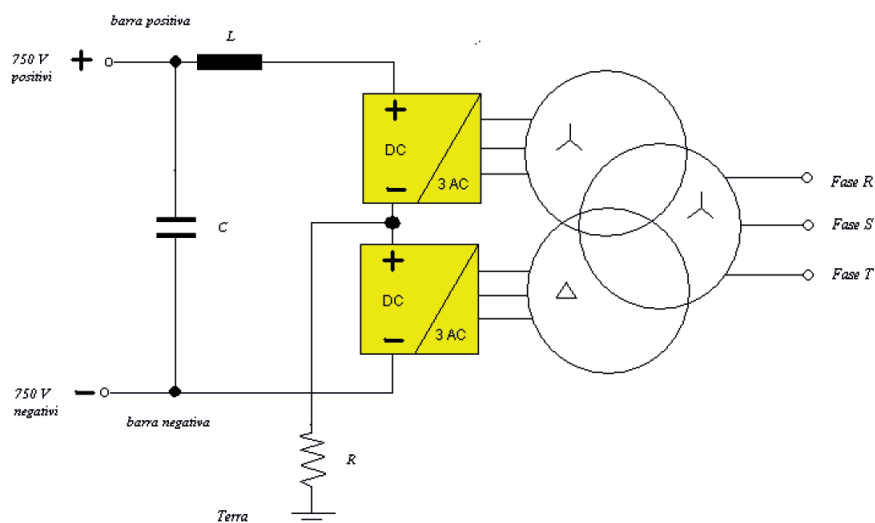


Fig. 3 - Schema SSE con resistenza limitatrice.  
Fig. 3 - ESS diagram with limiting resistance.

## OSSERVATORIO

trezzate con linee di contatto: pur con un certo costo di impianto si hanno sensibili riduzioni dei costi energetici e maggiori velocità operative [11].

Sulla scorta di queste esperienze recentemente è stato proposto un sistema con filocarri ibridi, dove la coppia di pantografi, una volta sotto la linea aerea bifilare, può alzarsi automaticamente e spostarsi lateralmente lungo la corsia stradale e mantenendo il contatto con essa [12].

Sono iniziate le sperimentazioni in Germania e si ipotizza di attrezzare alcuni tratti autostradali in America (Los Angeles e Long Beach) mentre in Svezia si ipotizza una filovia da 90 km su una strada statale per il trasporto di minerali nel nord del paese con complessi di veicoli da 25 m al posto di una molto più costosa ferrovia [13].

### 2.3. Costi

A parità di condizioni con i sistemi abituali il sistema proposto a  $\pm 750$  V c.c. non introduce maggiori costi sulle linee aeree di contatto, visto che la tensione verso terra non cambia.

Si può ridurre il numero dei feeder, che in impianti convenzionali incidono intorno al 10% sul totale dei costi infrastrutturali: riducendoli del 50% si avrebbe una riduzione di circa il 5% dei costi infrastrutturali.

Per le SSE non vi sarebbero riduzioni dei costi per la parte impiantistica, visto che non cambierebbe la potenza totale installata, ma dimezzando il loro numero si avrebbero dei risparmi sulla realizzazione dei fabbricati di servizio, spesso di difficoltosa ubicazione in aree fortemente urbanizzate.

I costi di tali fabbricati non sono facilmente quantificabili (posizione, vincoli, prezzi terreno a mercato o su espropri, tipologia fabbricato (tradizionale od interrata): indicativamente quello per SSE da 1 MVA si può stimare in 50.000 € ( $100 \text{ m}^2 - 5.000 \text{ €/m}^2$ ) e quello del terreno sui 10.000 € ( $1000 \text{ €/m}^2$ ) per un totale di 60.000 €, pari circa al 12% del costo totale della SSE.

Non si introduce nessun aggravio di costo per i filoveicoli: pur con una tensione doppia di esercizio non si hanno problemi per l'equipaggiamento di trazione a doppio isolamento, stante la bontà dei materiali ora utilizzati, derivati da azionamenti già impiegati in rotabili alimentati a tale tensione (molte reti ferroviarie a scartamento normale e ridotto, in elettromotrici metropolitane, ecc.), sia per i sistemi a chopper e motori a c.c. che per i moderni azionamenti con inverter e motori asincroni trifasi: in un ambito di tensioni fino a 1500 V c.c. gli azionamenti ad IGBT ormai hanno delle criticità legate più che altro ad alte correnti che ad alte tensioni, per cui con correnti dimezzate hanno un funzionamento più sicuro ed affidabile.

Per la riqualificazione di filoveicoli a 600-750 V c.c. andrebbe sostituito l'intero impianto di servizio e di trazione, che sarebbe conveniente per veicoli di recente costruzione.

### 2.2. Background and development

*In the context of railway electric traction dual power supply systems were used in some cases, especially for powering vehicles on single rails: it was used in Italy in the Italy '61 single rail in Turin, at  $\pm 600$  V d.c.*

*Within the trolleybus traction line there are dual power supply systems ranging from  $\pm 1100$  V d.c. and  $\pm 1300$  V d.c. (2200 - 2600 V d.c.) for a particular application in the mining sector, the auxiliary electric traction for mining trucks, called dumpers, with considerable dimensions and with capacities ranging from 300 t up to 500 t, equipped with a Diesel engine power from about 2000 kW to 3500 kW and electrical transmission to the rear wheels, with motors in hubs: compared to similar vehicles they can also be powered by a two-wire overhead line through a pair of pantographs.*

*Developed initially in America, it is used in some large opencast mines in southern Africa for the transport of extracted material over long uphill ramps equipped with contact lines: although with some plant cost there are sensitive energy cost savings and increased operational speed [11].*

*On the basis of these experiences a system with hybrid trolley trucks was recently proposed, where the pair of pantographs, once under the two-wire overhead line, can automatically rise and move sideways along the street lane keeping contact with it [12]*

*Trials started in Germany and some motorway stretches in America (Los Angeles and Long Beach) are supposed to be equipped while in Sweden a 90 km trolley line is hypothesised on a state highway for transporting minerals in the north of the country with combinations of 25 m vehicles instead of a much more expensive railway [13].*

### 2.3. Costs

*On equal terms with the usual systems, the proposed system at  $\pm 750$  V d.c. does not introduce higher costs on the contact overhead line, since voltage to the ground does not change.*

*The number of feeders can be reduced, which in traditional plants affect around 10% of the total infrastructure costs: reducing them by 50% there would be a reduction of about 5% of infrastructure costs.*

*With regards to ESSs there would be no cost reductions for the plant engineering, since the total power installed would not change, but halving their number would generate savings on the implementation of the service buildings, often with a difficult location in strongly urbanised areas.*

*The costs of such buildings are not easily quantifiable (position, constraints, market land prices or on expropriations, building typology (traditional or inground): approximately that for 1 MVA ESSs can be estimated at 50.000 € ( $100 \text{ m}^2 - 5.000 \text{ €/m}^2$ ) and that for the land about 10.000 € ( $1000 \text{ €/m}^2$ ) for a total of € 60.000, amounting approximately to 12% of the total cost of the ESS.*



## OSSERVATORIO

Il sistema di alimentazione proposto a  $\pm 750$  V c.c., sarebbe un'evoluzione dei sistemi abituali in corrente continua con migliori prestazioni e sicurezza, specie per linee servite da filosnodati, ancor più con quelli di 25 m di lunghezza.

Le sole uniche riduzioni di costo sarebbero nel numero dei feeder e per la realizzazione dei fabbricati delle SSE: con riferimento a quanto indicato nella premessa e nel paragrafo precedente i costi medi infrastrutturali per linee servite da filosnodati si possono ridurre a circa 560.000 €/km e 750.000 €/km per busvie, circa il 6% in meno rispetto ad impianti abituali.

### 3. Proposta di impianto a corrente alternata monofase

L'ipotesi di alimentazione duale a  $\pm 750$  V c.c. può essere trasferita in sistemi a corrente alternata monofase, con i due conduttori di contatto eserciti singolarmente a 500 V c.a. verso terra.

Tra i due conduttori vi sarebbero 1000 V c.a. e sarebbe definibile come un sistema di alimentazione duale a 500-0-500 V c.a.

Sono evidenti i vantaggi dei sistemi di trazione a corrente alternata monofase, applicata con successo nella trazione ferroviaria, prima a 15 kV a frequenza ridotta e poi a 25 kV a frequenza industriale, spesso adottata in paesi, specie quelli in via di sviluppo, che decidono di elettrificare le loro reti ferroviarie.

Le SSE risultano molto semplificate rispetto ai sistemi a corrente continua, composte come sono da semplici trasformatori con componenti simili a quelli della normale produzione civile ed industriale, a differenza della componentistica per trazione a 600 e 750 V c.c. destinata ad impianti e mezzi tranviari e filoviari: pur con numerose aziende a livello mondiale è in un mercato di nicchia.

Dal punto di vista normativo non vi sarebbero particolari restrizioni, sempre nella norma EN 50122-1 (CEI 9-6) [5] si danno delle prescrizioni su sistemi di alimentazione con conduttori di ritorno, tra cui quelli filoviari, riferendosi ad impianti con tensione nominale non superiore a 1000 V c.a. [5].

La norma EN 50163, rivolta a tranvie e ferrovie, prevede sistemi di alimentazione in c.a. solo a 15 e 25 kV, ma ammette varianti nazionali per reti secondarie od aree ben definite [14].

Per quanto riguarda i filoveicoli, a parte la scelta tra una tensione nominale di 600 o 750 V c.c. presente nella norma CEI 9-4 [7] si prescrive una tensione massima di sistemi di trazione a bordo di filoveicoli di 1000 V c.a. (banda III) [8].

Tale sistema duale a 500-0-500 V c.a. potrebbe essere realizzato con semplici trasformatori monofasi per trazione con presa centrale connessa a terra (fig. 4).

*No extra cost is added for the trolley vehicles: even with a dual operating voltage there are no problems for the double insulation traction equipment, given the good quality of materials now used, resulting from drives already used in rolling stock powered with this voltage (many standard and reduced track gauge railway networks, in metropolitan electromotives, etc.) both for chopper and d.c. motors and for modern drives with inverter and asynchronous three-phase motors: in a context of voltages up to 1500 V d.c. IGBT drives now have critical issues related mostly to high currents rather than high voltages, therefore they have a safer and more reliable operation with halved currents.*

*For the requalification of trolley vehicles at 600-750 V d.c. the entire service and traction system should be replaced which would be convenient for newly built vehicles.*

*The  $\pm 750$  V d.c. power system proposed would be an evolution of the normal d.c. systems with improved performance and safety, especially for routes served by articulated trolleybuses, even more so with the 25 m long ones.*

*The only cost reductions would be the number of feeders and for the construction of ESS buildings: with reference to the indications given in the introduction and in the previous paragraph, the average infrastructure costs for routes served by articulated trolleybuses can be reduced to about 560.000 €/km and 750.000 €/km for bus lines, about 6% less than customary systems.*

### 3. Proposal for a single-phase AC system

*The hypothesis of dual power supply at  $\pm 750$  V d.c. can be transferred to single-phase a.c. systems, with two conductors operated individually at 500 V a.c. to the ground.*

*Between the two conductors there are 1000 V a.c. and would be defined as a 500-0-500 V a.c. dual power system.*

*There are obvious advantages of single-phase a.c. traction systems, successfully applied in railway traction, first at 15 kV at reduced frequency and then at 25 kV at industrial frequency.*

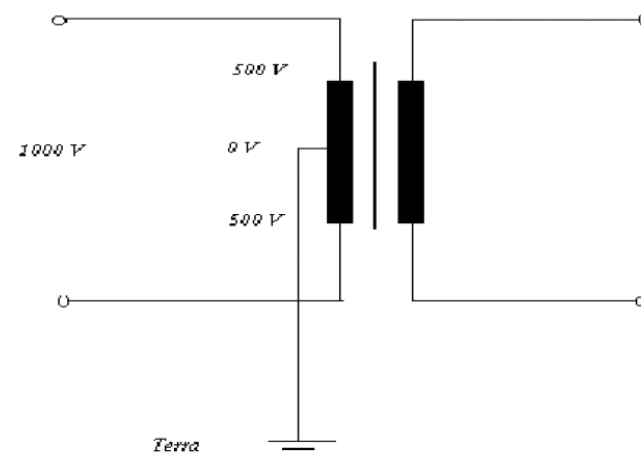


Fig. 4 - Schema sistema alimentazione duale 500-0-500 V c.a.  
Fig. 4 - 500-0-500 V a.c. dual power system diagram.

## OSSERVATORIO

Visto che nei sistemi abituali a 600 o 750 V c.c. le linee di contatto hanno entrambi i conduttori isolati, nel sistema proposto si ha la stessa sollecitazione dielettrica degli isolanti.

A bordo dei mezzi per l'alimentazione dei servizi di bordo possono essere impiegati semplici trasformatori in luogo di più costosi convertitori elettronici.

Raddrizzando la c.a. si potranno alimentare in c.c. i consueti impianti di trazione a doppio isolamento (chopper e motori c.c. – inverter e motori c.a. trifasi) ed eventualmente stabilizzare con ponti controllati.

### 3.1. Vantaggi

#### Linee di contatto

1. Visto che la sollecitazione dielettrica del sistema proposto in c.a. è lo stesso che per i sistemi abituali in c.c. potranno essere impiegati gli stessi materiali senza aggravii di costo.
2. Semplificazione della messa a terra di masse che potrebbero andare in tensione per guasto, evitando le messa a terra con diodo di blocco, scaricatori, ecc. tipiche della c.c.

#### SSE

1. Uso di semplici trasformatori monofasi in luogo dei più costosi complessi trasformatori-ponti di conversione, senza quindi la relative apparecchiature accessorie, con notevole risparmio di costi e di spazi occupati dai fabbricati, diventando simili a normali cabine di distribuzione di energia elettrica con costi medi per una SSE da 1 MVA sui 50.000 €.
2. Impiego di interruttori per correnti alternate, che possono essere scelti secondo varie tipologie (a contatti in aria a soffio magnetico, a camere in SF<sub>6</sub> o sotto vuoto) dove per tutti si sfrutta la capacità di interrompere l'arco con il passaggio a zero della corrente ogni semiperiodo, sia nel servizio normale che in caso di cortocircuiti. Ciò comporta, rispetto all'interruttore extrarapido usato nei sistemi in corrente continua, minori costi, ingombri ed affidabilità superiori, grazie all'uso di apparecchiature derivate dalla normale produzione civile ed industriale.
3. Impiego di semplici, robusti ed economici TA e TV per le misure di tensioni e correnti, in luogo dei più costosi trasduttori di tensione e corrente usati nei sistemi in c.c.
4. Gli effetti delle eventuali correnti vaganti avrebbero effetti molto ridotti rispetto a quelli dei sistemi in c.c.
5. I problemi di corrosione delle giunzioni sarebbero ben minori rispetto a quelli dei sistemi in c.c.

#### Filoveicoli

1. Impiego di interruttori principali per correnti alternate, con i vantaggi sopra citati.

*trial frequency, often adopted in countries deciding to electrify their railway networks, particularly developing ones.*

*ESSs are very simplified compared to the d.c. systems, composed as they are of simple transformers with similar components to those of normal civil and industrial production, unlike traction components at 600 and 750 V d.c. for tramway and trolley line transport means and systems: although with numerous companies worldwide it is in a niche market.*

*From a regulatory point of view there would be no particular restrictions, again in the EN 50122-1 (CEI 9-6) [5] standard, requirements are given on power systems with return conductors, including trolleybus ones, referring to systems with a rated voltage not exceeding 1000 V a.c. [5].*

*Standard EN 50163, addressed to tramways and railways provides a.c. power systems at 15 and 25 kV only, but allows national modifications for secondary networks or well-defined areas [14].*

*As regards trolley vehicles, besides the choice between a rated voltage of 600 or 750 V d.c. in the CEI 9-4 [7] standard, a maximum voltage of 1000 V a.c. for traction systems aboard trolley vehicles is prescribed. (band III) [8].*

*This dual system at 500-0-500 V a.c. could be achieved with simple single-phase transformers for traction with central outlet with ground connection (fig. 4).*

*Considering that in 600 or 750 V d.c. customary systems, contact lines have both the conductors insulated, the proposed system has the same dielectric insulators stress.*

*Simple transformers can be used instead of more expensive electronic converters for powering on board services,*

*Rectifying the a.c. the customary double insulation traction systems can be powered in d.c. (choppers and d.c. motors – inverters and three-phase a.c. motors) and possibly stabilised with controlled bridges.*

### 3.1. Advantages

#### Contact lines

1. *Given that the proposed system's dielectric stress in a.c. is the same as for normal d.c. systems the same materials can be used without any extra cost.*
2. *Simplification of grounding of the masses that could go under voltage due to failure, avoiding earthing with blocking diode, dischargers, etc. typical of d.c.*

#### ESS

1. *The use of simple single-phase transformers instead of more expensive complex transformer-conversion bridges, without the related accessory equipment, with considerable savings of cost and spaces occupied by buildings, becoming similar to normal electricity distribution cabinets with average costs for 1 MVA ESS of about € 50.000.*
2. *Use of switches for alternating currents, which can be chosen according to different types (with magnetic blower air contacts, with SF<sub>6</sub> or vacuum chambers)*



## OSSERVATORIO

2. Impiego di semplici, robusti ed economici TA e TV, con i vantaggi sopra citati.
3. Per la captazione dell'energia dalla linea di contatto, il citato passaggio a zero della corrente ogni semiperiodo fa sì che l'arco dovuto al momentaneo distacco dello strisciante a pattino dalla linea abbia durate minori (e conseguenti minori temperature localizzate nell'area dell'arco) quindi meno dannoso rispetto ai sistemi in c.c.
4. Impiego di semplici e robusti trasformatori per l'alimentazione dei servizi ausiliari rispetto ai corrispondenti convertitori elettronici usati nei sistemi a c.c., da cui si possono ottenere in uscita varie tensioni separate galvanicamente dalla linea di contatto, alcune per poi essere raddrizzate, per alimentare i vari apparati di bordo. Potrebbero anche essere impiegati dei trasformatori stabilizzatori statici, senza parti in movimento, che si ispirano a sistemi di controllo con reattori saturabili [15].
5. Possono essere usati negli impianti di bordo semplici motori monofasi ad induzione e svariate apparecchiature (termoconvettori, lampade, caricabatteria, condizionatori, ecc.) sempre derivate dalla normale produzione civile.
6. Non si introduce nessun aggravio di costo per gli apparati di trazione a doppio isolamento: dopo il raddrizzamento, ed eventuale stabilizzazione, della tensione di linea da 1000 V c.a. si otterrebbe al massimo una tensione di circa 1400 V c.c., quindi inferiore a quanto stabilito nella norma CEI 9-4 (banda III) [8].
7. I problemi di corrosione delle giunzioni sarebbero ben minori.

### 3.2. Svantaggi

#### Linee di contatto

1. L'induttanza delle linee di contatto provoca un aumento delle cadute di tensione sulle linee di contatto: in caso di cortocircuiti ciò diventa un vantaggio, contribuendo a limitare le correnti di guasto. Per un singolo tratto di linea di contatto bifilare con conduttori da 100 mmq con la canonica distanza di 60 cm tra i fili di contatto si avrebbe una reattanza chilometrica di circa 0,61 ohm/km: la resistenza chilometrica sarebbe di circa 0,36 ohm/km.
2. Lo sfasamento tra tensione e corrente provoca aumenti delle correnti in linea, con conseguenti cadute di tensione sulle linee di contatto, ora limitato in quanto l'uso di ponti di conversione, semplici o controllati, non introducono grandi sfasamenti.

#### SSE

1. Pur con una tensione di circa il 30-40% maggiore rispetto agli abituali sistemi a 600 o 750 V c.c. le maggiori cadute di tensione in linea per la reattanza chilo-

*where the ability to stop the arc with zero current crossing every half period is exploited for everyone, both in normal service and in case of short circuits. Compared to the high speed circuit breaker used in d.c. systems, this involves lower costs, higher reliability and reduced dimensions thanks to the use of equipment derived from normal civil and industrial production.*

3. *Use of simple, robust and economical Current Transformers and Voltage Transformers for measuring of voltages and currents, instead of more expensive voltage and current transducers used in d.c. systems*
4. *The effects of any stray currents would have very limited effects compared to those of d.c. systems*
5. *Corrosion problems of the joints would be far less than those of d.c. systems.*

#### Trolley vehicles

1. *Use of main switches for alternating currents, with the benefits mentioned above.*
2. *Use of simple, robust and economical Current Transformers and Voltage Transformers, with the benefits mentioned above.*
3. *For the collection of energy from the contact line, the quoted zero crossing of current every half period causes the arc due at temporary contact loss of the shoe contact-strip pan from the line to have shorter duration (and consequent lower temperatures located in the arc area) hence less damaging compared to d.c. systems*
4. *Use of simple and robust transformers for the power supply of ancillary services compared to the corresponding electronic converters used in d.c. systems, from which different output voltages can be obtained galvanically separated from the contact line, some to be later rectified, in order to power the various on-board equipment. Static stabiliser transformers can also be used, with no moving parts, which are inspired by control systems with reactors that can be saturated [15].*
5. *Simple single-phase induction motors and various appliances (convectors, lamps, battery chargers, air conditioners, etc.) always derived from normal civil production.*
6. *There is no extra cost for the double insulation traction equipment: after rectifying, and possible stabilisation, of the 1000 V a.c. line voltage, a voltage of approximately 1400 V d.c. would be obtained at the most hence less than as set forth in standard CEI 9-4 (band III) [8].*
7. *Corrosion problems of joints would be far less.*

### 3.2. Disadvantages

#### Contact lines

1. *The contact line inductance causes an increase in voltage drops on contact lines: in case of short-circuits this becomes an advantage, helping to limit the fault currents. For a single two-wire contact line stretch with*

## OSSERVATORIO

metrica non permetterebbero una riduzione del numero di SSE

2. Il prelievo di notevoli carichi monofasi, tipici di tali sistemi di trazione, provoca squilibri di carico sulle linee di alimentazione trifasi delle SSE, con conseguenti dissimmetrie nelle tensioni nelle reti, da contenersi nel 4 %. Per mitigare tali problemi si adotta l'inserzione dei singoli trasformatori monofasi per la trazione ciclicamente sulle fasi R-S S-T e T-R da reti trifasi ben dimensionate: di conseguenza non sarebbe possibile il parallelo delle SSE tramite le linee di contatto, per cui sulle stesse vanno inseriti dei brevi tratti neutri, cosa che richiede un'attenzione aggiuntiva per gli autisti dei filobus.

### Filoveicoli

1. Apparentemente l'uso di trasformatori per l'alimentazione degli apparati di trazione sarebbe un vantaggio in quanto si può ridurre la tensione ed adottare apparati e motori a semplice isolamento impiegati su tram, con ampia scelta, riducendo drasticamente la componentistica a doppio isolamento, limitata ai trasformatori, TA e TV di misura, interruttori principali ed i trolley.
2. I vantaggi della separazione galvanica (maggior affidabilità, riduzione disturbi emessi, maggior insensibilità a sovratensioni su linee e riduzione delle correnti capacitive di dispersione) mal bilanciano l'aumento di peso dei veicoli (circa 400-500 kg) che comporta una riduzione dei passeggeri trasportati e dello spazio a bordo.

### 3.3. Sicurezza

Analogamente al sistema a tensione duale  $\pm 750$  V c.c. il sistema proposto a 500-0-500 V c.a. permetterebbe il rilevamento per guasti a terra su entrambi i due conduttori, per basse resistenze di guasto, grazie alla simmetria delle tensioni verso terra e nel momento in cui si ha il cedimento dell'isolamento, con l'uso di economiche protezioni di massima corrente omopolare, che permettono anche di poter individuare anche il doppio guasto a terra contemporaneo sui conduttori, tranne il nel caso di guasti con identico valore di impedenza, eventualità poco probabile.

Nei casi di guasti di breve durata  $< 0,3''$  si hanno tensioni massime di contatto maggiori per la corrente alternata rispetto a quella continua [16] quindi minore pericolosità.

Ad esempio una massa che va in tensione per guasto a terra alla tensione piena di 500 V non è pericolosa se si interrompe l'alimentazione entro  $0,3''$

Similmente al sistema precedente proposto in c.c. la massima corrente di guasto franca a terra sarebbe la metà di quella di cortocircuito tra i conduttori, ma è possibile ridurla fino a pochi A inserendo una resistenza sul

*100 sq. mm conductors, with 60 cm canonical distance between the contact wires, there would be a kilometric reactance of about 0.61 ohm/km: the kilometric resistance would be about 0.36 ohms/km.*

2. *The phase shift between voltage and current causes increases in line currents with associated voltage drop on the contact lines, limited now since the use of simple or controlled conversion bridges, does not introduce large phase shifts.*

### ESS

1. *Even with a voltage about 30-40% higher than the usual 600 or 750 V d.c. systems, the main line voltage drops due to kilometric ballast would not allow a reduction in the number of ESSs.*
2. *The current collection due to substantial single-phase loads, typical of such traction systems, causes load imbalance on three-phase ESS power supply lines, resulting in asymmetry in network voltages, to keep under 4%. To mitigate these problems the introduction of individual single-phase transformers for traction is adopted cyclically in phases R-S S-T and T-R from well dimensioned three-phase networks: consequently parallel ESSs would not be possible via the contact lines, therefore short neutral sections must be introduced on the same which requires additional attention for drivers of trolleybuses.*

### Trolley vehicles

1. *The use of transformers to power traction equipment would apparently be an advantage as it can reduce voltage and adopt engines and equipment with simple insulation used on trams, with a broad choice, drastically reducing the double insulation components, limited to transformers, measuring Current Transformers and Voltage Transformers, main switches and trolleys.*
2. *The advantages of galvanic isolation (increased reliability, reduced noise emission, higher immunity to surges on lines and reduction of capacitive leakage currents) do not balance well the vehicle weight increase (about 400-500 kg) that involves a decrease in passengers carried and space on board.*

### 3.3. Safety

*Similarly to the 750 V  $\pm$  d. c. dual voltage system the 500-0-500 V a.c. system proposed would allow tracking ground faults on both the two conductors, for low failure resistances, due to the symmetry of the voltage-to-ground and when there is insulation failure, using economic protections of maximum homopolar current, which also allow identifying the contemporary double earth fault on the conductors, except in the case of failures with the same impedance value, an unlikely eventuality.*

*In the case of short-term failures  $< 0,3''$  there are greater maximum contact voltages for alternating current compared to direct current [16] hence less danger.*

## OSSERVATORIO

collegamento di messa a terra del sistema, inoltre per il corretto funzionamento delle protezioni vale il criterio che ogni SSE non sia in parallelo con altre SSE.

Ciò permette anche l'alimentazione del trasformatore monofase di una SSE su una fase diversa da quelli delle SSE adiacenti, equilibrando il carico sulle reti MT di distribuzione.

Lo schema di una SSE può diventare come in fig. 5.

Si può indicare un valore di resistenza limitatrice di  $100\ \Omega$  con una corrente di guasto a terra massima di soli 5 A, ipotizzando una tensione verso terra sui conduttori di contatto di 500 V.

Tale valore di resistenza è stato scelto di valore molto superiore all'impedenza di diversi km di linea aerea, così che l'impedenza dell'anello di guasto sia prevalentemente resistiva, ma non troppo elevato per evitare di rendere difficoltoso l'intervento delle protezioni omopolari con resistenze di guasto medie.

### 3.4. Campi magnetici

La legislazione attuale ha recepito le direttive europee in materia, con la legge quadro sui campi elettromagnetici ed il successivo decreto sui limiti di esposizione alla popolazione. Per i campi magnetici generati da linee elettriche a 50 Hz, nei confronti della popolazione sono stati dati 100  $\mu\text{T}$  massimi di emissione, con un valore medio giornaliero di 10  $\mu\text{T}$ , ridotto a 3  $\mu\text{T}$  per nuovi impianti e nei confronti di asili, scuole, ospedali.

L'espressione generale per la determinazione del campo magnetico intorno ad una linea bifilare è:  $B = 0,2 * d * I / D^2$  dove B è il campo magnetico ( $\mu\text{T}$ ), d è la distanza tra i conduttori (m), I è la corrente di linea (A) e D è la distanza (m) dalla linea bifilare del punto di cui si vuole determinare il valore di campo magnetico: espressione verificata con numerose prove.

Ipotizzando di trovarci a 5 metri da una linea di contatto bifilare esercita con il sistema duale 500-0-500 V in corrente alternata, con il trasporto di una potenza di 500 kW si avrebbe con una corrente di 500 A, valore limite per conduttori da 120 mm<sup>2</sup>: nel punto considerato avremmo un campo magnetico di 2,4  $\mu\text{T}$ , supposta una distanza dei conduttori di 60 cm.

Nonostante la grande variabilità di carico tipica della trazione elettrica, in condizioni normali di esercizio il campo magnetico medio giornaliero si può ritenere che sia ben al di sotto del valore di qualità di 3  $\mu\text{T}$  e che non si superi mai il valore massimo di 100  $\mu\text{T}$ , nemmeno in caso di cortocircuiti.

Tali valori bassi di campo emesso denotano che i disturbi irradiati siano di bassa entità, come pure potenziali indotti, ed eventuali correnti, su masse metalliche e linee in parallelismo, rispettando quindi le norme sulla compatibilità elettromagnetica.

*For example, a mass that goes under voltage due to earth fault with a voltage of 500 V is not dangerous if power is interrupted within 0.3".*

*Similarly to the previous system proposed in d.c., the maximum ground fault current would be half that of short circuits between conductors, but it can be reduced up to just a few As introducing a resistance on the system's grounding connection. Furthermore for the proper functioning of protections the criteria that every ESS is not in parallel with other ESSs is valid.*

*This also allows feeding of the single-phase transformer of an ESS on a different phase from that of adjacent ESSs, balancing the load on the MT distribution networks.*

*The diagram of an ESS can become as in fig. 5.*

*A limiting resistance value of  $100\ \Omega$  can be specified with a maximum earth current fault of only 5 A, assuming a voltage-to-ground on contact wires of 500 V.*

*This resistance value was chosen with a much higher value than the impedance of several km of overhead line, so that the impedance of the fault ring is mostly resistive, but not too high to avoid making the intervention of homopolar protections with average failure resistance difficult.*

### 3.4. Magnetic fields

*The current legislation has transposed the European directives on the subject, with the framework law on electromagnetic fields and the subsequent decree on population exposure limits. For magnetic fields generated by power lines at 50 Hz, 100  $\mu\text{T}$  maximum emission was given with respect to the population, with a daily average value of 10  $\mu\text{T}$ , reduced to 3  $\mu\text{T}$  for new systems and with respect to kindergartens, schools, hospitals.*

*The general expression for the determination of the magnetic field around a two-wire line is:  $B = 0.2 * d * I / D^2$ , where B is the magnetic field ( $\mu\text{T}$ ), d is the distance between the conductors (m), I is the line current (A) and D is*

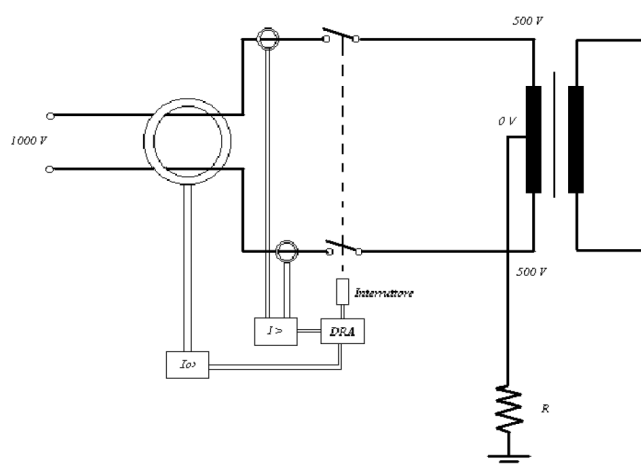


Fig. 5 - Schema SSE con resistenza limitatrice.  
Fig. 5 - ESS diagram with limiting resistance.



## OSSERVATORIO

Con i sezionamenti sulle linee di contatto che impediscono i paralleli tra le SSE, l'alimentazione a sbalzo ed evitando di mettere in parallelo i conduttori omologhi nelle linee a 2 sensi di marcia, si ha la certezza di avere in ogni singola tratta correnti identiche sui 2 conduttori di contatto, così da avere il minor campo magnetico emesso.

Altra conseguenza positiva dell'impiego della resistenza limitatrice di guasto è che le tensioni indotte per parallelismo verso masse metalliche e linee di telecomunicazione in caso di guasto a terra sarebbero contenute, in analogia a linee esercite con neutro isolato (rif. Norma CEI 103-6): al contrario tali impianti non sarebbero esercibili, le tensioni indotte sarebbero elevate e fuori norma.

Da prove reali si è rilevato che in una massa metallica isolata (tubo, conduttore, ecc.), sottoposta ad un campo magnetico di 1  $\mu\text{T}$  in parallelismo ad una linea percorsa da corrente, è indotta una tensione longitudinale di circa 5 V al km circa, valore molto basso: secondo le Norme CEI 103-6 non vi sono pericoli se si induce una tensione massima di 60 V per tempi  $>1$  s per un parallelismo di 300 m in ambito urbano.

Ai capi di un conduttore, o massa metallica, lungo 1 km, non collegato a terra agli estremi e sottoposto ad un campo magnetico di 2,4  $\mu\text{T}$  indotto da una parallela linea di contatto bifilare a 500-0-500 V in corrente alternata, si potrebbe stimare di avere una tensione massima di circa 12 V, comunque entro la norma in discussione CEN TC 219 WG 1.

### 3.5. Precedenti ed attualità

L'impiego in Italia di sistemi di trazione a corrente alternata monofase sono stati sporadici senza alcun seguito: sono da citare la Tramvia del Verbano Omegna-Fondotoce-Verbania che funzionò dal 1910 fino al 1946, esercita a 2 kV c.a. e frequenza ridotta a 15 Hz, con il materiale realizzato per la tramvia sopraelevata milanese dell'Esposizione Universale del Sempione nel 1906.

Particolare era l'esercizio delle tranvie extraurbane di Padova con linee a 6 kV c.a. e veicoli bitensione per percorrere i tratti urbani a 600 V in corrente continua.

Nell'ambito filoviario non si sono trovate applicazioni pratiche di impianti a corrente alternata monofase: in alcune miniere in Scandinavia sono impiegati *dumper* bi-modali da galleria alimentati da linee di contatto trifasi a 690 V c.a.

### 3.6. Costi

A parità di condizioni con i sistemi abituali il sistema proposto a 500-0-500 V c.a. non introduce maggiori costi sulle linee aeree di contatto, visto che la tensione verso terra con cambia, come pure per le reti di feeder, visto che le prestazioni del sistema sono simili.

*the distance (m) from the two-wire line of the point of which one wants to determine the magnetic field value: expression verified by many trials*

*Assuming we are at 5 metres from a two-wire contact line operated by a 500-0-500 V a.c. dual system, carrying a power of 500 kW we would have a current of 500 A, limit value for 120 mm<sup>2</sup> conductors: at the point considered we will have a magnetic field of 2.4  $\mu\text{T}$ , mg assuming a distance of the conductors of 60 cm.*

*Despite the large load variability typical of electric traction, under normal operating conditions the average daily magnetic field can be considered to be well below the quality value of 3  $\mu\text{T}$  and that it does not exceed the maximum value of 100  $\mu\text{T}$ , even in case of short circuits.*

*These low field values emitted indicate that radiated disturbances are of low magnitude, as well as induced potential, and any current on metallic masses and lines in parallel, thus respecting the norms on electromagnetic compatibility.*

*With contact line sectioning that prevents parallels between ESSs, single-side power supply and avoiding putting corresponding wires in parallel on lines with 2 directions of travel, we are sure to have identical currents on the 2 contact conductors in each individual stretch, so as to have the least magnetic field emitted.*

*Another positive consequence of using fault limiting resistance is that voltages induced by parallelism to metal parts and telecommunication lines in case of failure on the ground would be contained, in analogy to lines operated with isolated neutral (ref. CEI 103-6 standard): conversely these systems could not be operated, induced voltages would be high and not within the standard.*

*From actual trials it was found that in an insulated metallic mass (pipe, conduit, etc.) subjected to a magnetic field of 1  $\mu\text{T}$  in parallel to a line crossed by current, longitudinal voltage of about 5 V per km is induced, a very low value: according to standard CEI 103-6 there are no dangers if a voltage not exceeding 60 V for a time of  $>1$  s is induced for a 300 m parallelism in urban areas.*

*To the heads of a metallic conductor, or metal mass, 1 km long, not earthed at the ends and subjected to a magnetic field of 2.4  $\mu\text{T}$  induced by a parallel two-wire line contact at 500-0-500 V in a.c. we could estimate having a maximum voltage of approximately 12 V, however within the standard CEN TC 219 WG 1 up for discussion.*

### 3.5. Background and news

*Use in Italy of traction systems with single-phase alternating current was sporadic with no result: the Tramway of Verbano Omegna-Fondotoce Verbania should be mentioned - which ran from 1910 until 1946, operated at 2 kV a.c. and frequency reduced to 15 Hz, with the material produced for the elevated tramway in Milan of the Simplon Universal Exhibition in 1906.*

*The operation of suburban tramways in Padua was pe-*

## OSSERVATORIO

Per quanto riguarda le SSE il loro numero sarebbe sostanzialmente simile a quello di sistemi abituali, ma con costi pari a circa solo 1/10, circa 50.000 € e spazi ridotti ad 1/3 (circa 30 m<sup>2</sup>) diventando come normali cabine di distribuzione di energia.

Per quanto riguarda i filoveicoli, pur con i vantaggi citati non si avrebbe una grande riduzione del loro costo.

Con riferimento alla premessa, i costi infrastrutturali possono ridursi indicativamente a 510.000 €/km per linee servite da filosnodati e 620.000 di €/km per busvie: riduzioni di costi tra il 15 ed il 22% rispetto a sistemi abituali.

### 4. Proposta di impianti ad alta tensione

I sistemi di alimentazione duale proposti in c.c. e c.a. risponderebbero alle norme elettrotecniche generali e di trazione come sistemi di I categoria, ossia con tensione nominale del sistema non superiore a 1000 V c.a. e 1500 V c.c. ed impieghi in ambiti urbani e suburbani.

Negli impianti filoviari abituali la tensione tra i conduttori e quella del conduttore positivo verso terra sono grosso modo simili per via del conduttore negativo messo a terra e con corretti dimensionamenti della rete, in analogia ad impianti tranviari.

Nei sistemi ad alimentazione duale proposti la tensione verso terra dei conduttori è di circa il 50%: volendo sfruttare questa particolarità non sarebbe fuori luogo considerare dei sistemi di alimentazione duale ad alta tensione con tensioni di terra entro i sistemi di I categoria, ossia  $\pm 1500$  V c.c. e 1000-0-1000 V c.a., rispettando tutte le questioni relative alla sicurezza in caso di guasti a terra.

Le tensioni tra i conduttori (3000 V c.c. e 2000 V c.a.) li pongono nei sistemi di II categoria, che comportano maggiori distanze di sicurezza da parti in tensione (franchi minimi) e gradi di isolamento superiori in impianti e linee di contatto rispetto a quelli abituali, con relativi incrementi di costi.

Più in particolare il sistema duale a 1000-0-1000 V c.a. abbina i vantaggi del sistema duale a  $\pm 750$  V c.c. (ottime prestazioni, riduzione numero di feeder e SSE) con quelli del sistema duale a 500-0-500 V c.a. (riduzione costi SSE).

L'adozione del trasformatore di trazione nei filoveicoli da svantaggio diventa invece necessario per ridurre le tensioni a bordo entro i 1000 V c.a. secondo la norma CEI 9-4 (banda III) [8] riducendo al minimo la componentistica a doppio isolamento con conseguente riduzione delle correnti capacitive di dispersione: si avrebbe un incremento di costo dei filoveicoli.

Va posta attenzione ai regimi di guasto a terra, dove le masse che possono andare in tensione possono facilmente superare le massime tensioni di contatto, vista la ten-

culiar with 6 kV a.c. lines and dual voltage vehicles to run along urban sections at 600 V in d.c.

Within the trolley line no practical applications of single-phase a.c. systems were found: bimodal gallery dumpers are used in some mines in Scandinavia powered by 690 V a.c. three-phase contact lines.

### 3.6. Costs

On equal terms with the usual systems the system proposed at 500-0-500 V a.c. does not introduce higher costs on the contact overhead lines, since voltage to ground does not change, as well as for feeder networks, since the system performance is similar.

As regards ESSs their number would be substantially similar to that of customary systems, but with costs amounting to only 1/10, about 50.000 € and spaces reduced by 1/3 (around 30 m<sup>2</sup>) becoming as normal power distribution cabins.

As for the trolley vehicles although with the above-mentioned benefits there would not be a large reduction of their cost.

With reference to the preamble, infrastructure costs can be reduced approximately to 510.000 €/km for routes served by articulated trolleybuses and 620.000 €/km for bus lines: cost reductions between 15 and 22% compared to customary systems.

### 4. Proposal of high-voltage installations

Dual power systems available in d.c. and a.c. would respond to electrotechnical general and traction rules as category I systems, i.e. with rated system voltage not exceeding 1000 V a.c. and 1500 V d.c. and employable in urban and suburban areas.

In customary trolleybus systems voltage between wires and that of the positive wire to the ground are roughly similar due to the negative grounded wire and with correct dimensioning of the network, similarly to tramway systems.

In the proposed dual-feed systems the voltage to the ground of conductors is about 50%: wanting to exploit this feature it would not be inappropriate to consider high voltage dual power systems with voltages to ground within category I systems, i.e.  $\pm 1500$  V DC and 1000-0-1000 V AC, complying with all issues relating to safety in the event of ground faults.

Voltages between conductors (3000 V DC and 2000 V AC) put them in category II, involving greater safety distances from live parts (minimum free spaces) and higher degrees of insulation in facilities and contact lines compared to customary ones, with related cost increases.

More specifically, the 0-1000-1000 V AC dual system combines the advantages of the  $\pm 750$  V DC dual system (excellent performance, reduced number of feeders and ES-

## OSSERVATORIO

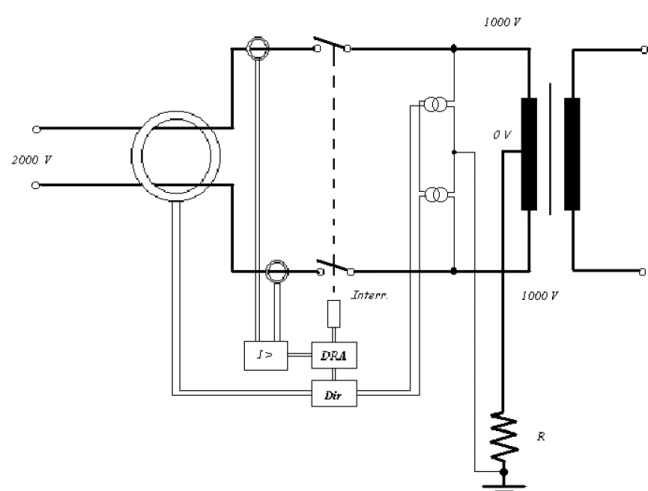


Fig. 6 - Schema di principio con protezioni direzionali.  
Fig. 6 - Diagram with directional protections.

sione verso terra dei conduttori di 1000 V. Riducendo il tempo di eliminazione del guasto i limiti di tali tensioni di contatto possono alzarsi, ma occorrono sistemi di protezioni più sensibili e tempestivi rispetto alle protezioni omopolari.

Una soluzione può essere rappresentata dall'impiego di protezioni direzionali di terra, che rilevano sia la tensione di squilibrio verso terra (od omopolare) che la corrente omopolare ma anche il loro sfasamento, secondo lo schema di principio in fig. 6.

In regime di guasto a terra la resistenza limitatrice R, ad es.  $100\Omega$  di valore elevato rispetto all'impedenza omopolare di linea, rende l'anello di guasto prevalentemente resistivo, per cui la tensione omopolare e la corrente omopolare sono in fase fra loro.

La protezione direzionale di tipo wattmetrico sarà in grado di rilevare i guasti con maggiore sensibilità rispetto a normali protezioni omopolari.

Ad esempio potrebbe essere rilevata una corrente di guasto di 50 mA a cui corrisponde una resistenza di guasto di  $20\text{ k}\Omega$  alla tensione di 1000 V.

Si riporta in fig. 7 uno schema di principio di una SSE equipaggiata con protezioni direzionali di terra, dove si può avere la selezione certa di una tratta guasta su quelle in uscita da una SSE con grande sensibilità e tempestività, minimizzando l'estesa di tratte guaste.

Per una miglior comprensione dello schema sono stati omessi i TA e protezioni I>.

Ss) with those of the 500-0-500 V AC dual system (ESS cost reduction).

The adoption of the traction transformer in trolley vehicles from disadvantage instead becomes necessary to reduce voltages on board within 1000 V AC according to standard CEI 9-4 (band III) [8] minimising double insulation components resulting in reduced capacitive leakage currents: there would be an increase in cost of trolley vehicles.

Attention should be paid to ground fault regimes, where masses that can go live can easily exceed the maximum contact voltages, given the voltage-to-ground of 1000 V conductors. Reducing the elimination time of the failure such contact voltages limits can rise, but more sensitive and timely protection systems are needed than homopolar protections.

A solution can be represented by the use of directional ground protections that detect both voltage-to-ground imbalance (or homopolar) and homopolar current but also their displacement, according to the diagram in fig. 6.

In the ground fault regime the limiting resistance R, e.g.  $100\Omega$ , with high value compared to the homopolar line impedance, makes the fault ring mostly resistive, whereby the homopolar voltage and homopolar current are in phase with each other.

The wattmeter directional protection will be able to detect failures with greater sensitivity than normal homopolar protections.

For example, a fault current of 50 mA could be measured to which a fault resistance of  $20\text{ k}\Omega$  at 1000 V voltage.

Fig. 7 shows a diagram of an ESS equipped with directional ground protections, where one can have the reliable selection of a damaged section on those outbound from an ESS with great sensitivity and timeliness, minimising the extent of faulty sections.

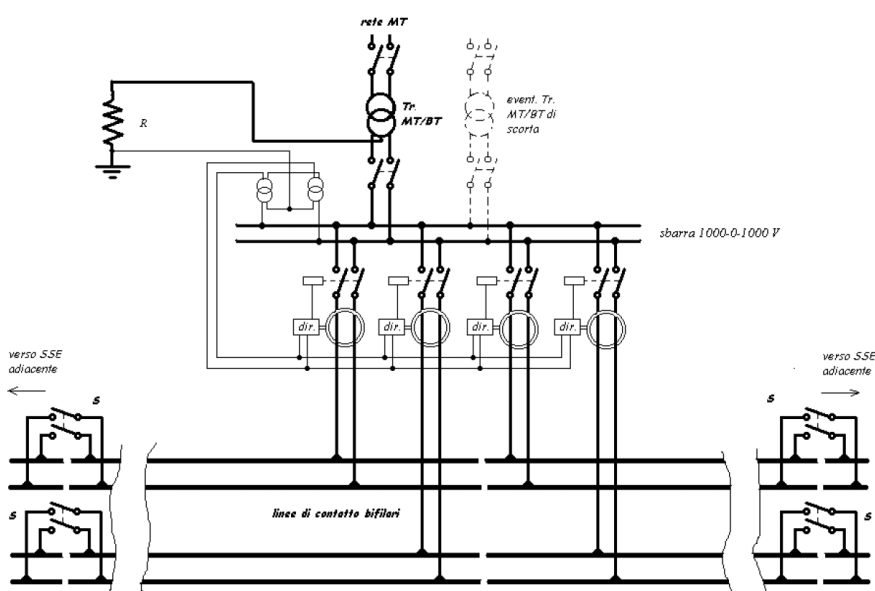


Fig. 7 - Schema di principio SSE con protezioni direzionali con 4 uscite.  
Fig. 7 - ESS diagram with directional protections with 4 outputs.



## OSSERVATORIO

I sezionatori S di confine tra le 4 tratte servite da una SSE e le adiacenti possono essere chiusi in caso di guasto di un trasformatore.

### 5. Considerazioni finali

Qualsiasi proposta tesa a migliorare dei sistemi deve essere valutata globalmente nei vari aspetti tecnici ed economici, sia per l'acquisto che nella manutenzione.

Queste proposte potrebbero essere prese in considerazione ed analizzate approfonditamente con il coinvolgimento di esperti, normatori, rappresentanti di ditte costruttrici e di imprese di trasporto.

Il sistema di alimentazione duale a  $\pm 750$  V in corrente continua ha indubbiamente maggiori prestazioni rispetto ai sistemi abituale a 600 o 750 V c.c., con il dimezzamento delle SSE, riduzioni del numero di feeders e costi infrastrutturali minori del 6% circa.

Il sistema di alimentazione duale 500-0-500 V in corrente alternata ha prestazioni simili a quelli abituali a 600-750 V c.c., ma grazie alla maggior semplicità delle SSE si avrebbero dei costi infrastrutturali minori del 15-22% circa.

Per quanto riguarda i filoveicoli non si hanno sostanziali riduzioni di costi, visto che la tipologia degli apparati di trazione e servizi non cambiano: a favore del sistema in c.a. si ha componentistica dalle prestazioni migliori e costi minori (interruttori, TA, TV) oltre all'impiego di trasformatori in luogo dei convertitori per l'alimentazione dei servizi ausiliari.

Il sistema di alimentazione duale 1000-0-1000 V in corrente alternata riunisce i pregi e minimizza i difetti di entrambi, pur con l'adozione a bordo dei mezzi di trasformatori per l'alimentazione degli apparati di trazione e maggiori costi su linee ed impianti che diventano di II categoria.

#### Ringraziamenti

Prof. FINZI e GALAVERNA (Università di Genova), Ing. BOZZETTI (ex ATM Milano), Ing. Horst SCHAFFER (segr. Sez. filobus UITP), Prof. UBALDINI Politecnico di Milano, ASSTRA.

*For a better understanding of the diagram the Current Transformers the and I> protections were omitted.*

*The S boundary isolating switches between the 4 sections served by an ESS and the adjacent ones can be closed in the event of failure of a transformer.*

### 5. Final considerations

*Any proposal aimed at improving the systems must be assessed globally in the various technical and economic aspects, for both the purchase and the maintenance.*

*These proposals could be taken into account and analysed in detail with the involvement of experts, regulators, representatives of manufacturers and transport companies.*

*The  $\pm 750$  V direct current dual power system has undoubtedly increased performance compared to standard 600 or 750 V DC systems, with the halving of ESSs, reductions in the number of feeders and infrastructural costs less than approximately 6%.*

*The dual 500-0-500 V alternating current power system has performance similar to 600-750 V d.c. customary ones, but thanks to the greater simplicity of the ESSs, infrastructure costs would be less than approximately 15-22%.*

*With regard to the trolley vehicles there are no substantial cost reductions, since the type of traction equipment and services do not change: in favour of the AC system we have components with better performance and lower costs (switches, Current Transformers, Voltage Transformers) in addition to the use of transformers in lieu of converters to power auxiliary services.*

*The 1000-0-1000 V alternating current dual power system brings together the strengths and minimises the weaknesses of both, although with the adoption of transformers for the power supply of the traction equipment on board the vehicles and higher costs on lines and systems that become category II.*

#### Acknowledgements

*Prof. FINZI e GALAVERNA (Università di Genova), Ing. BOZZETTI (ex ATM Milano), Ing. Horst SCHAFFER (segr. Sez. filobus UITP), Prof. UBALDINI Politecnico di Milano, ASSTRA.*

## BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] M. KUTZNER, "Trolley – What was achieved by barnim bus GmbH", Atti della conferenza "Trolley Final Conference", Szeged (H), Gennaio 2013, pag. 19, [http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user\\_upload/download/final\\_conference/TROLLEY\\_Final\\_Conference\\_Presentations\\_BBG.pdf](http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user_upload/download/final_conference/TROLLEY_Final_Conference_Presentations_BBG.pdf)
- [2] AAVV, "Trolleybus intermodal Compendium", Trolley project, 2013, pagg. 29-31, [http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user\\_upload/download/TROLLEY\\_WP4\\_Intermodal\\_Compendium\\_60dpi.pdf](http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user_upload/download/TROLLEY_WP4_Intermodal_Compendium_60dpi.pdf)
- [3] M. WOŁEK, E. CZERMA SKI, "TROLLEY – 4.1.10. Transport mode efficiency model", Atti della conferenza "TROLLEY

## OSSERVATORIO

- Final Conference”, Szeged (H), Gennaio 2013, pagg. 7-12, [http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user\\_upload/download/final\\_conference/TROLLEY\\_Final\\_Conference\\_Presentations\\_Uni\\_Gdansk\\_2.pdf](http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user_upload/download/final_conference/TROLLEY_Final_Conference_Presentations_Uni_Gdansk_2.pdf)
- [4] C. CARNEVALI, R. GENOVA, M. MAZZUCHELLI, G. PRIANO, *“Innovazione, ricerca e sviluppo nel settore del TPL per i sistemi su gomma: esperienze europee e vetture fuel cell”*, Atti della conferenza *“1° Convegno gomma nel trasporto passeggeri”*, 2014, Roma, pagg. 3-4 [http://www.asstra.it/eventi/anno\\_in\\_corso/convegni-e-seminari/gennaio/-convegno-sistema-gomma-nel-trasporto-passeggeri.html](http://www.asstra.it/eventi/anno_in_corso/convegni-e-seminari/gennaio/-convegno-sistema-gomma-nel-trasporto-passeggeri.html)
- [5] EN 50122-1 (CEI 9-6) Applicazioni ferroviarie - Installazioni fisse - Parte 1: Provvedimenti di protezione concernenti la sicurezza elettrica e la messa a terra.
- [6] EN 50122-1 sezione 4.4.
- [7] CEI 9-4 Impianti elettrici nei filoveicoli - Requisiti di sicurezza e guida per la presentazione delle offerte – sez. 1.1.01 e sez.1.2.05.
- [8] CEI 9-4 sezione 1.2.06.
- [9] EN 50122-1 sezione 7.3 tabelle nn. 4 e 5.
- [10] EN 50122-1 sezione 7.3.3.
- [11] Collegio ingegneri minerari sudafricani <http://www.sacea.org.za/.%5Cdocs%5CTROLLEY%20ASSIST%20TO%20OPTIMISE%20HAULING%20CYCLES%20WITH%20ELECTRIC%20TRUCKS%20.pdf>
- [12] Siemens <http://www.industry.usa.siemens.com/verticals/us/en/mining/mining-drive-process-solutions/Documents/siemens-ehighway-en.pdf>
- [13] Siemens [http://www.siemens.com/innovation/apps/pof\\_microsite/\\_pof-fall-2012/\\_html\\_en/electric-trucks.html](http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-fall-2012/_html_en/electric-trucks.html)
- [14] EN 50163 introduzione pag. 2.
- [15] Magtech <http://www.magtech.no/index.aspx?id=1720&mid=1720>.
- [16] EN 50122-1 sezione 7.3 tabelle nn. 4 e 5 – sezione 7.2 tabelle nn. 2 e 3.