



La grande stagione degli azionamenti ferroviari

The great season of railway electronic drives

Morris BRENNA^()
Luigi MORISI^(**)*

Sommario - L'articolo traccia in una panoramica d'insieme le tappe percorse dagli azionamenti elettronici per veicoli ferroviari, dai primi passi degli anni '70 alla progressiva diffusione fino alla totale affermazione dei giorni nostri, mettendo in evidenza il confrontarsi di soluzioni tecnologiche molto diverse, in aspra competizione tra di loro. Alternative non solo riferite alla scelta dei circuiti di potenza (inverter a tensione impressa o a corrente impressa, convertitori monostadio o bistadio, a due livelli o a tre livelli), ma anche il tipo di motori elettrici di trazione (sincroni o asincroni, a semplice o a doppia stella), i sistemi di raffreddamento dei convertitori di potenza (ad olio, ad acqua naturale o deionizzata). Grande influenza ebbero poi l'evoluzione dei componenti elettronici di potenza (tiristori, GTO, IGBT) e quella dei componenti e dei circuiti dell'elettronica di controllo dei convertitori (dalla logica cablata ai microprocessori). Le conclusioni mostrano le differenze tra la situazione di allora e la fase attuale della tecnologia.

1. Introduzione

Si può dire che la grande avventura degli azionamenti elettronici in campo ferroviario inizi negli anni '70, con lo sviluppo dell'elettronica di potenza e le prime applicazioni alla trazione dei rotabili ferroviari.

Come vedremo da questa pur sintetica esposizione, si è trattato di un periodo caratterizzato da un grande fervore nella ricerca e sperimentazione di soluzioni innovative, che vede intrecciarsi le attività dei grandi gruppi industriali europei del settore con la spinta a rinnovarsi delle società ferroviarie, senza dimenticare i costruttori di componenti, che hanno svolto in questo contesto un ruolo meno appariscente, ma di grande importanza.

In Italia (ma anche in Belgio, caratterizzato anch'esso dall'alimentazione della rete a 3 kV cc), ci si orienta per più di un decennio verso le soluzioni a chopper (prototipo E444.005, locomotive E633 e quindi E652, elettromo-

Summary - The article provides an overview of the steps taken by electronic drives for railway vehicles, from the first steps of the '70s to the gradual diffusion up to the total affirmation of today, highlighting the confrontation of very different technological solutions, in fierce competition between them. Alternatives not only referring to the choice of power circuits (voltage-source or current-source inverters, single-stage or two-stage converters, two-level or three-level), but also the type of electric traction motors (synchronous or induction, single or double star), the cooling systems of power converters (oil, natural or deionised water). The evolution of power electronic components (thyristors, GTO, IGBT) and that of the components and the electronic control circuits for the converters (from the wired logic to the microprocessors) had great influence. The conclusions show the differences between the situation at the time and the current phase of technology.

1. Introduction

We can say that the great adventure of electronic drives in the railway field began in the '70s, with the development of power electronics and the first applications for traction of rolling stock.

As we will see from this brief presentation, this was a period characterised by great fervour in the research and experimentation of innovative solutions, which sees the activities of the large European industrial groups in the sector intertwined with the push to renew the railway companies, without forgetting component manufacturers, that played a less prominent but very important role in this context.

In Italy (but also in Belgium, also characterised by the railway network supplied at 3 kV dc), we are moving for more than a decade towards chopper solutions (E444.005 prototype, E633 locomotives and then E652, Ale724 electric power car, etc.), thus maintaining the direct current motors, no longer regulated by means of a stepped rheostat,

^(*) Politecnico di Milano - Dipartimento di Energia.

^(**) Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani.

^(*) Politecnico di Milano - Department of Energy.

^(**) Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani.

trici Ale724, ecc.), mantenendo quindi i motori a corrente continua, non più regolati a mezzo di un reostato escludibile a gradini ma con un alimentatore elettronico lineare, per l'appunto un chopper.

Nei paesi a prevalente alimentazione alternata, principalmente Germania (a 15 kV 16,7 Hz) e Francia (dove gran parte della rete è a 25 kV 50 Hz), ci si orienta invece verso i motori in corrente alternata, ma con soluzioni molto diverse l'una dall'altra.

2. Il chopper in Italia

In Italia il sistema di alimentazione elettrica della rete ferroviaria si era da tempo stabilmente orientato verso la corrente continua a 3 kV, sperimentata fin dalla fine degli anni '20 e che aveva progressivamente soppiantato l'alimentazione trifase. I primi esperimenti di azionamenti elettronici furono quindi a chopper: celeberrima la "Tartaruga elettronica" E444.005 (Figg. 1 e 2) [1], sviluppata dal Tecnomasio Italiano Brown Boveri fin dai primi anni '70, applicando un azionamento full chopper ad un esemplare della serie di locomotive veloci E444. La riuscita di questo progetto va ascritta alla genialità e alla costanza dell'ing. Lorenzo LANZAVECCHIA, che guidava il nutrito gruppo di tecnici che componevano il dipartimento di elettronica. Un altro prototipo, sviluppato dalla Ercole Marelli, vedeva invece la presenza del chopper solo per realizzare l'esclusione continua del reostato di avviamento (shunt chopper); questo progetto non ebbe seguito.

La prima serie di locomotive con questo tipo di azionamento furono però le E633/632 a sei assi, con tre carrelli monomotori, ordinate da FS nel 1979 e progettate per la parte elettrica dal TIBB e per la parte meccanica dalla FIAT e costruite per la serie da diversi costruttori. Fu una vicenda particolarmente sofferta per problemi di affidabilità: ovviamente si scontava la complessità dei circuiti sia della parte di potenza che delle apparecchiature di controllo, così come la non eccelsa affidabilità dei componenti, sia di quelli attivi che di quelli passivi. Ma, come detto sopra, si manifestava soprattutto una mancanza di esperienza di tutto il settore ferroviario su come affrontare non solo la fase progettuale, ma anche la realizzazione costruttiva e poi la manutenzione delle apparecchiature elettroniche. Non a caso, una volta "fattesi le ossa", le successive serie di locomotive diedero maggiori soddisfazioni [2].

Un percorso pressoché analogo veniva compiuto nel campo delle elettromotrici (le ALe724, poi le Ale582, e così via).

La realizzazione in serie di locomotive con azionamento a chopper proseguì fino all'inizio degli anni '90 con la serie E652, potenziata e più affidabile rispetto alle E633. Poi la maggiore semplicità del motore asincrono, anche riguardo alle necessità di manutenzione, prese il sopravvento anche in Italia, così come era avvenuto negli altri paesi europei.

but with a linear electronic power supply, precisely a chopper.

In countries with predominantly alternating current power supply, mainly Germany (15 kV 16.7 Hz) and France (where most of the network is 25 kV 50 Hz), they are instead moving towards AC motors, but with very different solutions one from the other.

2. The chopper in Italy

In Italy the electricity supply system of the railway network had long since been steadily oriented towards 3 kV direct current, experimented since the late '20s and which had gradually replaced the three-phase supply. The first experiments with electronic drives were therefore using choppers: the very well known "Electronic Turtle" E444.005 (Figs. 1 and 2) [1], developed by the company Tecnomasio Italiano Brown Boveri (TIBB) since the early '70s, applying a full chopper drive to a model of the E444 fast locomotive series. The success of this project must be ascribed to the genius and constancy of the engineer Lorenzo LANZAVECCHIA, who led the large group of technicians that made up the electronics department. Another prototype, developed by Ercole Marelli, instead saw the presence of the chopper only to implement the continuous exclusion of the starter rheostat (shunt chopper); this project had no continuation.

However, the first series of locomotives with this type of drive was the six-axle E633/632, with three single-motor bogies, ordered by FS in 1979 and designed by TIBB for the electrical part and for the mechanical part by FIAT and built for the series by different manufacturers. It was a particularly painful affair due to reliability problems: obviously the complexity of the circuits of both the power part and the control equipment was paid, as well as the not excellent reliability of the components, both active and passive. But, as mentioned above, there was most of all a lack of experi-



(Fonte - Source: foto TIBB)

Fig. 1 - Locomotiva E444.005.

Fig. 1 - E444.005 Locomotive.

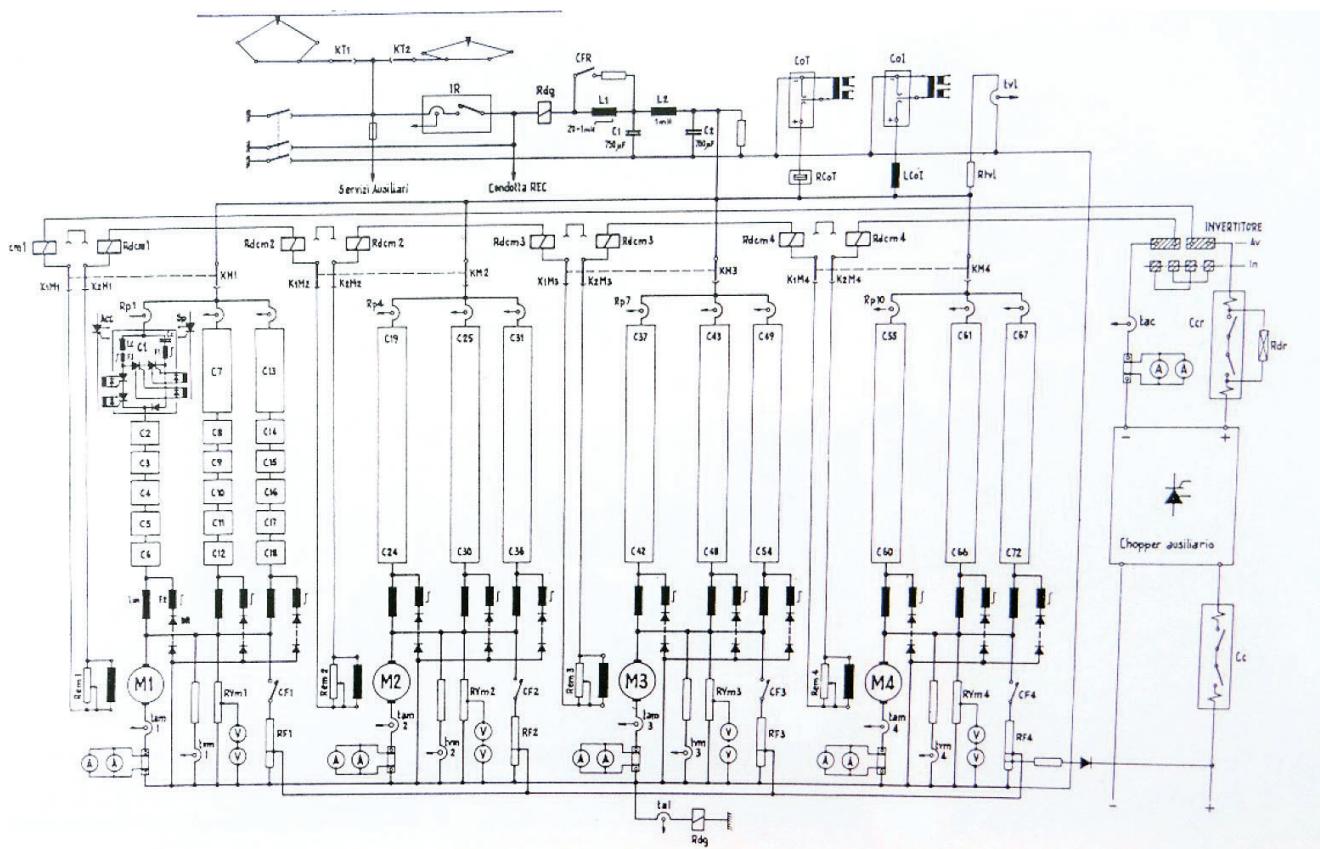


Fig. 2 - Schema dei circuiti di trazione della E444.005.
Fig. 2 - Diagram of the traction circuits of the E444.005.

3. Sincroni o asincroni?

I primi passi dell'applicazione dell'elettronica negli azionamenti ferroviari vedono due momenti chiave in Germania ed in Francia. In Germania è la Brown Boveri tedesca a sviluppare, già nella prima metà degli anni '70, dei prototipi di azionamento elettronico, di tipo inverter di tensione (o a tensione impressa) con motori asincroni, applicandoli su prototipi di locomotive Diesel-elettriche (Fig. 3). A queste seguiranno poi diverse applicazioni, inizialmente sempre per mezzi diesel, in particolare locomotive di manovra per uso industriale, cui seguiranno poi le locomotive di grande potenza della DB serie E120 e i prototipi e la prima serie dei treni ICE [3], [4].

A questo filone progettuale si aggancia anche la consociata italiana (Tecnomasio Italiano Brown Boveri), che nel '79 acquisisce da FS un ordine di locomotive diesel elettriche (D145.2000) per servizi di manovra e linea, dotate di inverter e motori asincroni. In seguito il TIBB utilizzerà inverter simili anche per i prototipi di ETR500, dove per la prima volta si realizza l'accoppiamento con motori asincroni a doppia stella. In parallelo all'ordine al TIBB, le FS emettono anche un ordine a FIAT per le locomotive D145.1000, con inverter e motori asincroni sviluppati dalla Elettromeccanica Parizzi.

ence of the whole railway sector on how to tackle not only the design phase, but also the construction and then the maintenance of electronic equipment. Not surprisingly, after gaining experience, the subsequent series of locomotives gave more satisfaction [2].

An almost similar path was taken in the field of electric power cars (the ALe 724, then the Ale 582, and so on).



(Fonte - Source: foto BBC Henschel)

Fig. 3 - Locomotive DE2500.

Fig. 3 - DE2500 locomotives.

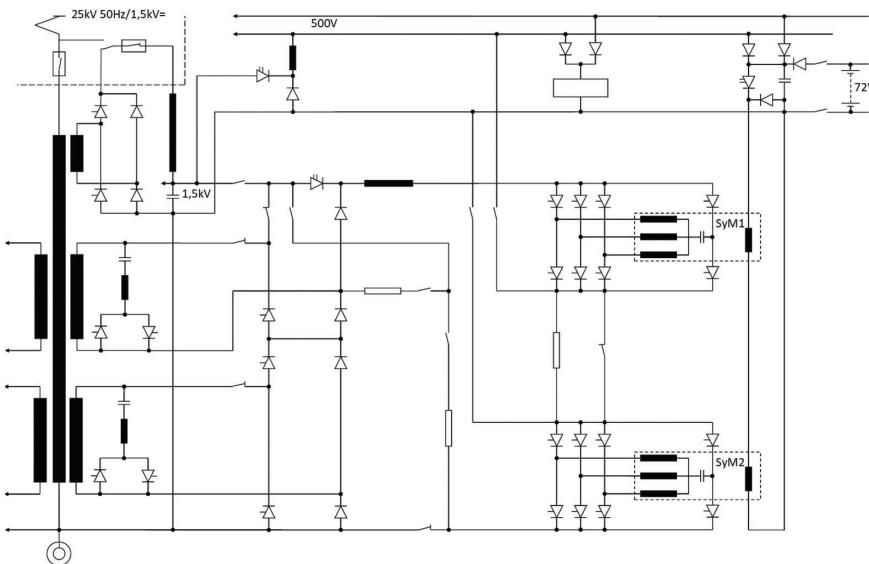


Fig. 4 - Schema del circuito di trazione della motrice del treno TGV Atlantique.

Fig. 4 - Diagram of the traction circuit of the TGV Atlantique train.

In Francia invece, dopo la prima serie di treni TGV, i TGV Sud Est, realizzati da Alstom con convertitori controllati e motori in corrente continua, seguono numerosi mezzi (TGV Atlantique [5], locomotive Sybic ed altri) che vedono al convertitore associati dei motori sincroni (Fig. 4), secondo quello che rimarrà lo standard Alstom per diversi anni.

Nel testo [6] del prof. Francesco PERTICAROLI^{(1), (2)}, viene sinteticamente descritta la caratteristica del sistema con motori sincroni: "L'azionamento trifase sincrono con circuito intermedio a corrente continua si basa sul principio della regolazione della frequenza statorica di un motore trifase, ma, essendo questo sincrono, il complesso elettronico di conversione viene notevolmente semplificato rispetto alle soluzioni asincrone".

Questo sistema appare quindi come una tappa intermedia rispetto al sistema di inverter con motori asincroni, più performante in prospettiva.

4. Tensione impressa o corrente impressa?

Con qualche ritardo, anche altre grandi società, come AEG e Siemens, si cimentano nello sviluppo di convertitori elettronici per gli azionamenti di trazione, entrambe prevedendo l'uso di motori asincroni, ma per l'AEG ali-

The production in series of chopper-driven locomotives continued until the early '90s with the E652 series, enhanced and more reliable than the E633. Then the greater simplicity of the induction motor, also with regard to the need for maintenance, also gained the upper hand in Italy, as had happened in other European countries.

3. Synchronous or asynchronous?

The first steps in the application of electronics drives in railway see two key moments in Germany and France. Already in the first half of the '70s, in Germany the German Brown Boveri developed prototypes of electronic drive, of the voltage inverter type (or voltage-source) with induction motors, applying them on prototypes of Diesel-electric locomotives (Fig. 3). These

were followed by various applications, initially always for diesel vehicles, in particular shunting locomotives for industrial use, followed by the high-power locomotives of the DB E120 series and the prototypes and first series of ICE [3], [4] trains.

The Italian subsidiary (Tecnomasio Italiano Brown Boveri) also joins this line of design, which in 1979 acquired an order for diesel electric locomotives (D145.2000) from FS for shunting and line services, provided with inverters and induction motors. Later TIBB will use similar inverters also for the ETR500 prototypes, where for the first time the coupling with double star induction motors is implemented. In parallel to the order to TIBB, FS also issued an order to FIAT for the D145.1000 locomotives, with inverters and induction motors developed by the company Elettromeccanica Parizzi.

In France, on the other hand, after the first series of TGV trains, the South East TGVs, built by Alstom with controlled converters and DC motors, are followed by numerous vehicles (TGV Atlantique [5], Sybic locomotives and others) which see the synchronous motor associated with the converter (Fig. 4), according to what will remain the Alstom standard for several years.

In the text [6] of prof. Francesco PERTICAROLI^{(1), (2)}, the system's characteristic with synchronous motors is briefly

⁽¹⁾ Titolare del corso di Trazione Elettrica presso il Politecnico di Milano fino al 2004.

⁽²⁾ Nota di Luigi MORISI: Dopo essere stato il mio insegnante di Trazione Elettrica, il prof. PERTICAROLI, all'epoca anche dirigente del Tecnomasio Italiano Brown Boveri, fu all'origine della mia assunzione al TIBB nel 1969 e mio capo ufficio per diversi anni.

⁽¹⁾ Owner of the Electric Traction course at the Politecnico di Milano until 2004.

⁽²⁾ Note by Luigi MORISI: After being my Electric Traction teacher, prof. PERTICAROLI, at that time also manager of Tecnomasio Italiano Brown Boveri, was at the origin of my recruitment at TIBB in 1969 and my office head for several years.

OSSERVATORIO

mentati da una propria versione di inverter a tensione impressa, per Siemens invece con inverter di corrente (o a corrente impressa) (Fig. 5).

Sempre nel testo del prof. PERTICAROLI si legge a proposito del sistema a corrente impressa: “*Questo sistema è sempre bistadio, in quanto l'invertitore di corrente ha esclusivamente il compito di commutare ciclicamente, alla frequenza f, la corrente impressa I_d da una fase all'altra del motore asincrono, svolgendo le funzioni di un commutatore statico. Il complesso invertitore-motore asincrono equivale da questo punto di vista a un motore a collettore. Il convertitore di ingresso deve svolgere, oltre alla funzione di raddrizzatore quando l'alimentazione è in corrente alternata, quella di regolatore, applicando al circuito intermedio induttivo una tensione opportunamente regolata, in modo da fornire al motore la corrente I_d desiderata.*

Questo tipo di inverter si manifesta più adatto ad applicazioni per trazione leggera (tram, metropolitane), piuttosto che per la grande potenza. Come già detto nel paragrafo precedente per il sistema con motori sincroni, anche il sistema a corrente impressa appare come una tappa intermedia di un approccio graduale verso la maggiore complessità del sistema di inverter con motori asincroni.

Alla fine saranno gli inverter a tensione impressa a prevalere per il maggior numero di applicazioni realizzate, scelta che diviene definitiva allorquando vengono disponibili i componenti di potenza GTO (Gate Turn Off), che consentono notevolissime semplificazioni circuituali.

5. Due livelli o tre livelli?

Come abbiamo visto, il dibattito tra i sostenitori di sincroni, asincroni, tensione impressa, corrente impressa, si sviluppa con grande acutezza e vede come protagonisti gruppi industriali diversi, principalmente tedeschi e francesi. Ma non mancano anche dibattiti all'interno dello stesso gruppo industriale.

Un chiaro esempio è costituito dal sistema di inverter a tensione impressa, ma a tre livelli, sviluppato negli anni '80 dalla Brown Boveri svizzera e applicato sulle locomotive "lok2000" [7] (SBB serie 460, Figg. 6 e 7). La casa di Baden, certamente desiderosa di distinguersi dalla controllata tedesca, che utilizzava inverter a due livelli, si

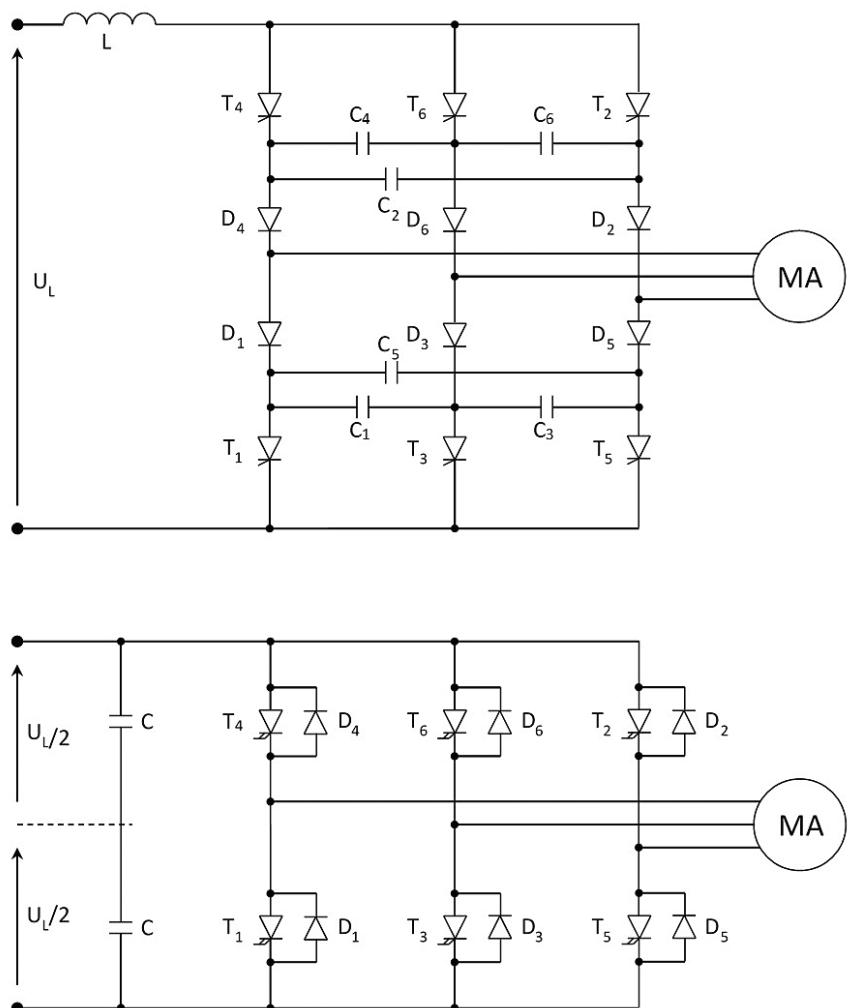


Fig. 5 - Confronto tra inverter a corrente impressa (sopra) e tensione impressa (sotto).

Fig. 5 - Comparison of current-source (above) - voltage-source inverters (below).

described: “The three-phase synchronous drive with direct current intermediate circuit is based on the principle of the stator frequency regulation of a three-phase motor, but, being this synchronous, the electronic conversion system is considerably simplified compared to induction motor solutions”.

This system therefore appears as an intermediate step compared to the inverter system with induction motors, which in perspective is more performing.

4. Voltage-source or current-source?

With some delay, other large companies, such as AEG and Siemens, are also engaged in the development of electronic converters for traction drives, both involving the use of induction motors, but for AEG powered by its own version of voltage-source inverter, for Siemens instead with current inverter (or current-source) (Fig. 5).

orientò nel suo progetto di punta verso questa versione a tre livelli, in grado di approssimare meglio la forma sinusoidale, riducendo il contenuto armonico, ma a spese di una complessità circuitale e di un numero di componenti probabilmente eccessivo per una locomotiva alimentata in corrente alternata. Si noti che questa soluzione si sarebbe attagliata perfettamente ad una locomotiva alimentata in corrente continua, per la possibilità di realizzare in questo modo un inverter direttamente collegato alla linea.

La vita di questa soluzione non si esaurisce con questa applicazione: lo schema a tre livelli si ritroverà anni dopo anche in alcune applicazioni realizzate da Alstom.

6. Motori a doppia stella

Il sogno di realizzare una soluzione con inverter direttamente collegato alla linea alimentata in corrente continua, che presenta numerosi vantaggi (in sintesi, riduzione del numero di componenti per l'assenza del chopper di ingresso, eliminazione del filtro intermedio e della necessità di metterlo a punto in accordo con il filtro d'ingresso, assenza del controllo del convertitore d'ingresso), venne realizzato negli anni '90 dal TIBB, nel frattempo divenuto ABB, riprendendo un concetto introdotto qualche anno prima con i prototipi dell'ETR500, già citati (ETRx500 e ETRy500) [8], [9].

Allora si era trattato di una soluzione dettata dalla necessità di realizzare i prototipi in tempi brevissimi (per consentire le sperimentazioni connesse alla marcia ad alta velocità, che rappresentavano ovviamente lo scopo principale da perseguire), utilizzando quindi i sottosistemi già disponibili, rappresentati in questo caso dagli inverter impiegati per le locomotive diesel e prodotti, come già detto, da BBC Mannheim. Dato che si trattava di inverter in grado di essere alimentati da una tensione intermedia limitata (1400 V), si creò quindi uno schema che collegava ciascun inverter ad una delle due stelle in cui era stato diviso l'avvolgimento di statore dei motori di trazione (Fig. 8).

Anche disponendo di inverter basati sull'uso dei GTO da 4,5 kV che si erano ormai resi disponibili, si ripresentò l'occasione di utilizzare questo particolare schema: tenendo conto della necessità di utilizzare questi componenti non oltre 2,8 kV per ragioni di armoniche, non sarebbe stato possibile alimentare l'inverter direttamente dalla rete elettrica a 3 kV, che, come sappiamo, raggiunge dei valori massimi di tensione di 4000 V (e anche oltre). Questo divenne possibile collegando appunto i due inverter ciascuno ad una delle due stelle dei motori di trazione.

Questo schema, pur nato in Italia, piacque talmente in sede di gruppo (ormai divenuto ABB), da essere adottato a quel tempo come soluzione standard per la corrente continua. Questo fatto ebbe in realtà anche un risvolto non completamente positivo: dato che il primo ordine di locomotive acquisite nel gruppo era quello delle E412 delle FS, il gruppo impose, nonostante si trattasse di lo-



(Fonte - Source: Foto ABB)

Fig. 6 - Locomotiva 460.

Fig. 6 - Locomotive 460.

Still about the current-source system the text of prof. PERTICAROLI reads: "This system is always two-stage, since the current inverter has the exclusive task of cyclically switching, at frequency f, the impressed current I_d from one phase to another of the induction motor, performing the functions of a static switch. From this point of view, the induction motor-inverter unit is equivalent to a dc commutator motor. In addition to the rectifier function when the power supply is in alternating current, the input converter must perform that of regulator, by applying a suitably regulated voltage to the inductive link circuit, so as to supply the motor with the desired I_d current".

This type of inverter proves to be more suitable for light rail applications (trams, metros), rather than for heavy rail. As already mentioned in the previous paragraph for the system with synchronous motors, the current-source system also appears as an intermediate step of a gradual approach towards the greater complexity of the inverter system with induction motors.

At the end, the voltage-source will prevail for the greater number of applications made, a choice that becomes definitive when the GTO (Gate Turn Off) high power semiconductor devices are available, which allow quite considerable circuit simplifications.

5. Two level or three-level?

As we have seen, the debate between the supporters of synchronous, induction, voltage-source, current-source, develops with great sharpness and sees different industri-

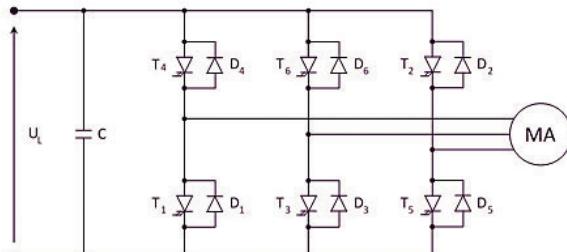
OSSERVATORIO

comotive bitensione 3/15 kV, di modificare in questo modo lo schema previsto in origine (un classico convertitore a due stadi con il primo stadio a chopper – 4 quadranti sotto la rete a c.a. – e il secondo stadio ad inverter, soluzione più adatta per un mezzo bitensione).

al groups as protagonists, mainly German and French. But there are also debates within the same industrial group.

A clear example is the three-level, voltage-source inverter system developed in the '80s by the company Swiss Brown

Inverter a due livelli



Inverter a tre livelli

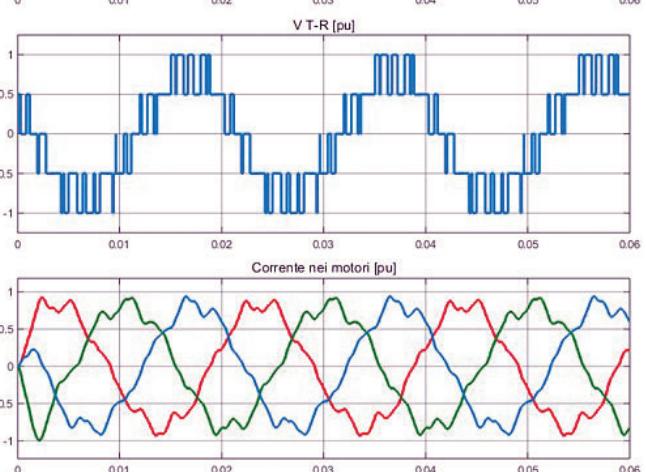
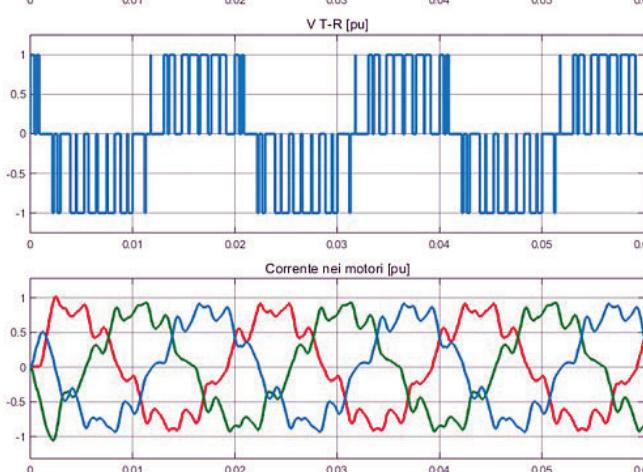
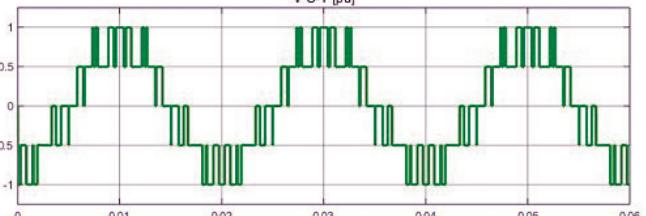
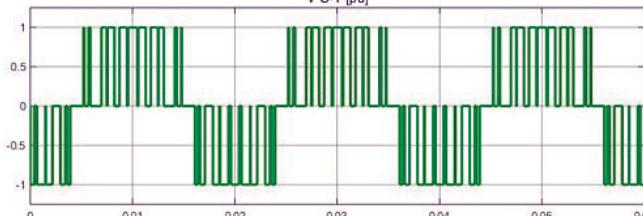
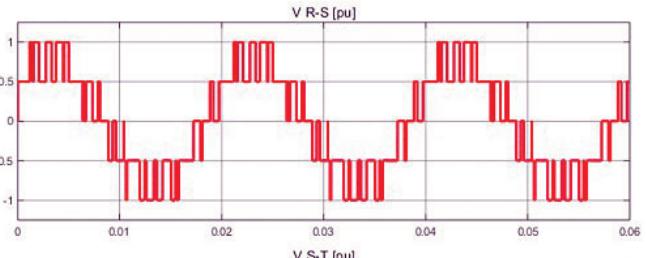
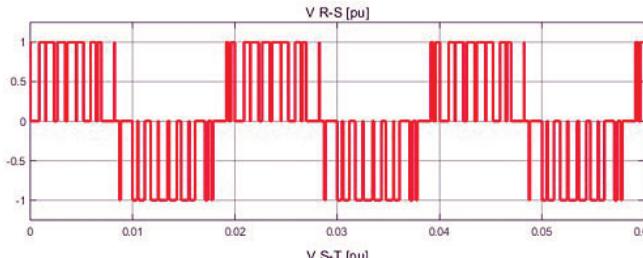
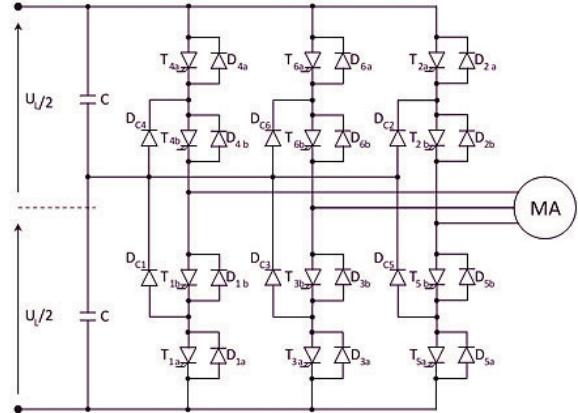


Fig. 7 - Confronto due livelli – tre livelli.
Fig. 7 - Comparison of two-level and three-level.

Il vero impiego come inverter diretto in locomotive alimentate in c.c. si ebbe invece nelle locomotive E464 (Figg. 9 e 10), locomotive dotate di una potenza continua di 3 MW (3,5 MW orari), che rappresentarono il massimo dell'ottimizzazione nello sfruttare le potenzialità del componente utilizzato per l'inverter di potenza (i già citati GTO da 4,5 kV e 3 kA). Questo traguardo è testimoniato dall'enorme successo di queste locomotive, dotate di una discreta potenza ma particolarmente economiche sia come prezzo di acquisto che come costi di manutenzione: in un seguito di serie costruttive protrattesi per oltre 20 anni ne vennero realizzate più di 700 unità, il massimo mai raggiunto presso FS (più esattamente 718 unità per FS e 10 per FER) [10].

Va aggiunto un ulteriore particolare delle E464 che contribuì a raggiungere il massimo di economicità e semplicità costruttiva: il beneficio della semplificazione ottenibile con l'inverter diretto si sarebbe fortemente attenuato se si fosse reso necessario raddoppiare gli inverter per garantire la marcia anche in situazioni degradate, quale il guasto di uno dei due inverter. L'effetto di ridondanza si realizzò invece in modo più semplice ed economico, utilizzando in caso di guasto, come sostegno della tensione, in luogo dell'inverter non più attivo, un ramo di reostato di frenatura, sistema certamente spartano ma efficace in condizioni degradate.

7. I sistemi di raffreddamento dei convertitori: aria, olio, acqua naturale o acqua deionizzata?

Un elemento importante nell'evoluzione degli azionamenti elettronici nella trazione ferroviaria riguarda i metodi di raffreddamento del convertitore di potenza. Il tradizionale impiego dell'aria forzata ha sempre rappresentato un problema rilevante per l'affidabilità e la manutenzione, mentre l'uso di pannelli radianti per uno smaltimento naturale era possibile solo per potenze non elevate. D'altra parte l'uso di un raffreddamento con CFC (freon) venne ben presto interdetto per ragioni ecologiche.

Nei Paesi che utilizzano il sistema in corrente alternata per l'alimentazione della rete, la presenza del trasformatore principale, raffreddato in olio, indusse ad estendere questo metodo di raffreddamento anche al convertitore di trazione (è questo il caso delle già citate locomotive 460 della SBB, ma a causa dell'utilizzo di questo tipo di convertitore nelle motrici della prima serie di treni ETR500 troviamo il raffreddamento in olio anche su questi mezzi di FS).

Boveri and applied to the "lok2000" locomotives [7] (SBB series 460, Figs. 6 and 7). The Baden company, certainly eager to distinguish itself from the German subsidiary, which used two-level inverters, turned towards this three-level version in its flagship project, able to better approximate the sinusoidal shape, reducing the harmonic content, but to the expense of a circuit complexity and a probably excessive number of components for an alternating current powered locomotive. It should be noted that this solution would have been perfectly suited to a dc powered locomotive, due to the possibility of creating an inverter directly connected to the line.

The life of this solution did not end with this application: the three-level scheme will be found years later also in some applications created by Alstom.

6. Double star motors

The dream of creating a solution with an inverter directly connected to the dc-powered line, which has numerous advantages (in summary, a reduction in the number of components due to the absence of the input chopper, the elimination of the intermediate filter and the need to fine-tune it in accordance with the input filter, absence of the input converter control), came true in the '90s by TIBB, in the meantime it had become ABB, taking up a concept introduced a few years earlier with the already mentioned ETR500 prototypes (ETRx500 and ETRY500) [8], [9].

At that time it was a solution dictated by the need to create prototypes in a very short time (to allow experi-

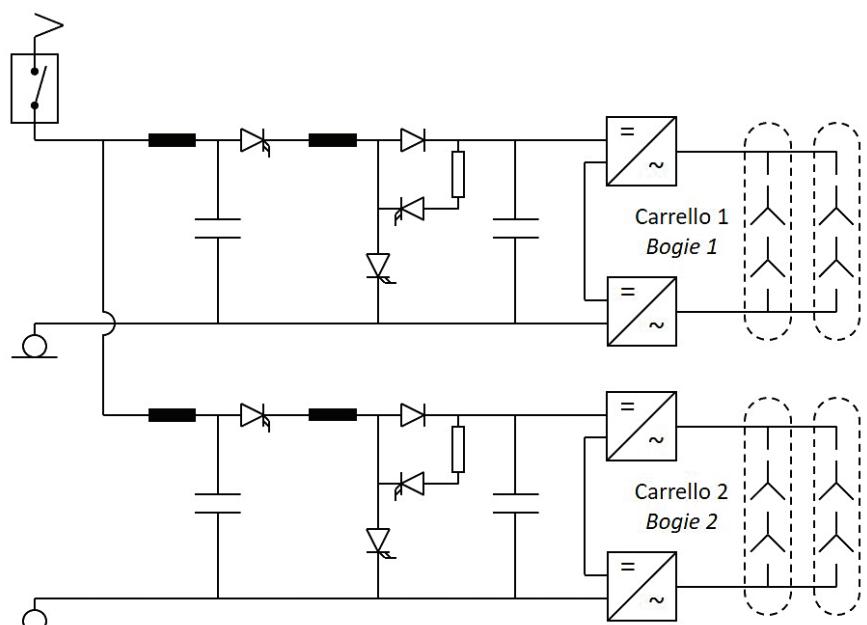


Fig. 8 - Schema del circuito di trazione delle motrici dei treni ETRx500 e ETRY500.

Fig. 8 - Diagram of the traction circuit of the ETRx500 and ETRY500 trains.



(Fonte - Source: foto archivio FS Italiane)

Fig. 9 - Locomotiva E464.

Fig. 9 - E464 locomotive.

A partire dagli anni '90 si preferì sviluppare dei sistemi di raffreddamento ad acqua, anche qui però con due metodi in alternativa; acqua naturale o acqua deionizzata. Nel primo caso si doveva provvedere ad isolare il radiatore, che va a contatto con l'acqua, rispetto al potenziale del semiconduttore (ormai stabilmente GTO); è quanto si trova ad esempio nei convertitori delle locomotive E464 delle FS e in generale sulle applicazioni ABB. Con l'acqua deionizzata l'isolamento non era necessario, ma si doveva ospitare a bordo uno scambiatore a resina deionizzante e un sistema di controllo della conducibilità dell'acqua. È quanto realizzato sulle locomotive E402B e sulla seconda serie di treni ETR500, con convertitore Ansaldo.

8. L'evoluzione dei componenti di potenza: dai tiristori ai GTO agli IGBT

L'evoluzione della tecnica dei convertitori di trazione si accompagna a quella dei componenti, che, come vedremo in seguito, segue dinamiche proprie, trainate dai principali mercati di sbocco.

I primi componenti utilizzati, ad es. per i chopper in Italia o per le prime versioni di inverter in Germania, sono i tiristori, che quindi portano con sé la necessità dei circuiti di spegnimento forzato.

Ben più semplici risultano gli schemi dei convertitori all'apparire dei GTO, che rappresentano un elemento di sicuro successo per le applicazioni realizzate.

Un ulteriore passo si ha con gli IGBT che, grazie soprattutto alla minore potenza richiesta per la commutazione on-off e off-on, permettono di semplificare i circuiti di comando e controllo. Tuttavia all'inizio soffrono per le limitate potenze unitarie, che impongono un gran numero di rami in parallelo per raggiungere il livello di potenza richiesto nella grande trazione. Le prime applica-

ments related to high-speed travel, which obviously represented the main purpose to be pursued), thus using the subsystems already available, represented in this case by the inverters used for diesel locomotives and products, as already mentioned, by BBC Mannheim. Since these were inverters capable of being powered by a limited intermediate voltage (1400 V), a scheme was thus created that connected each inverter to one of the two stars into which the stator winding of the traction motors had been divided (Fig. 8).

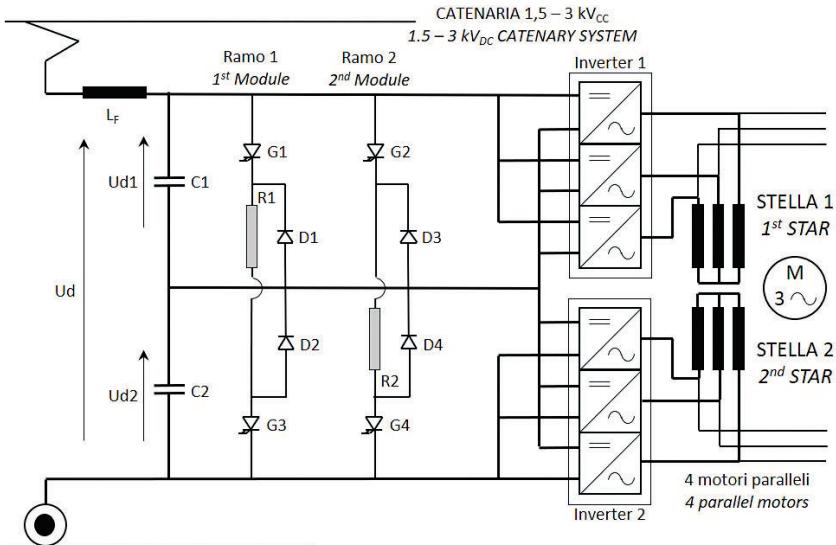
Even having inverters based on the use of the 4.5 kV GTOs which had by now become available, the opportunity arose to use this particular scheme: taking into account the need to use these components no more than 2.8 kV for reasons of harmonics, it would not have been possible to power the inverter directly from the 3 kV power grid, which, as we know, reaches maximum voltage values of 4000 V (and even more). This became possible by connecting the two inverters each to one of the two traction motor stars.

This scheme, although created in Italy, was so popular in the group (now ABB) that it was adopted at that time as a standard solution for direct current. This fact also had an aspect that was not completely positive: given that the first order of locomotives acquired in the group was that of the E412s of the FS, the group imposed, despite the fact that they were dual voltage 3/15 kV locomotives, to modify in this way the originally planned scheme (a classic two-stage converter with the first chopper stage - 4 quadrants in the AC configuration - and the second inverter stage, the most suitable solution for dual voltage vehicle).

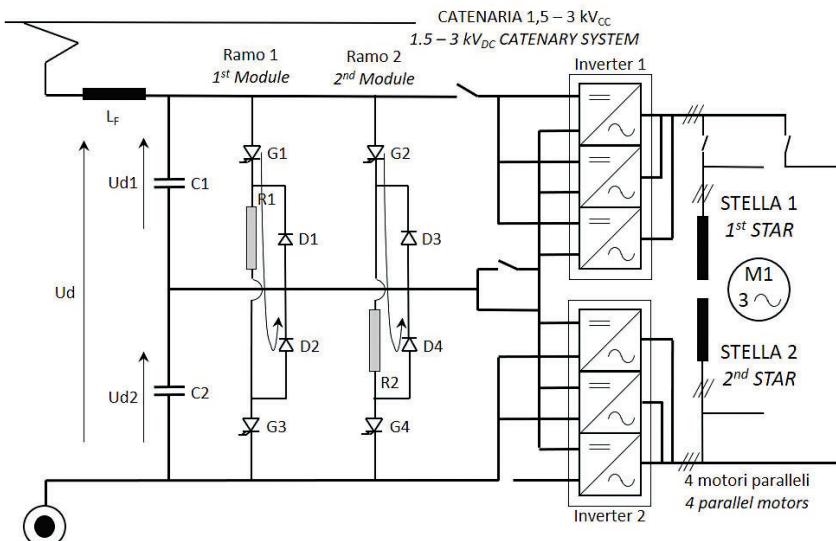
The real use as a direct inverter in dc-powered locomotives came instead with the E464 locomotives (Figs. 9 and 10), locomotives equipped with a continuous power of 3 MW (3.5 MW hourly-power), which represented the maximum optimisation in exploiting the potential of the component used for the power inverter (the aforementioned 4.5 kV and 3 kA GTOs). This milestone is witnessed by the enormous success of these locomotives, which have a fair amount of power but are particularly economical both in terms of purchase price and maintenance costs: more than 700 units were built in a series of construction projects that lasted for over 20 years, the maximum ever reached at FS (more precisely 718 units for FS and 10 for FER) [10].

A further detail of the E464 should be added, which helped to achieve maximum cost-effectiveness and constructive simplicity: the benefit of the simplification achievable with the direct inverter would have been greatly attenuated if it had become necessary to double the inverters to guarantee operation even in degraded situations, such as the failure of one of the two inverters. The redundancy effect was instead realised in a simpler and more economical way, using in case of failure, as support of the voltage, instead of the no longer active inverter, a branch of braking resistor, certainly a basic system but effective in degraded conditions.

OSSERVATORIO



Circuito di trazione della locomotiva E464, configurazione per alimentazione 3 kV_{CC} e 1,5 kV_{CC}
Traction circuit for the Italian locomotive E464: 3 kV_{DC} and 1.5 kV_{DC} configuration



Circuito di trazione della locomotiva E464, configurazione con inverter superiore escluso
Traction circuit for the Italian locomotive E464: configuration with the upper inverter excluded

Fig. 10 - Schema del circuito di trazione della E464 in condizioni normali e con un inverter escluso.

Fig. 10 - Diagram of the E464 traction circuit in normal conditions and with one inverter excluded.

zioni avvennero quindi nell'ambito della trazione leggera. Attualmente sono impiegati anche nei convertitori a quattro quadranti (4Q) creando strutture modulari [11] (Fig. 11).

9. L'evoluzione nell'elettronica di controllo: dalla logica cablata ai microprocessori

Un'evoluzione analoga, anch'essa fondamentale, si

7. Converter cooling systems: air, oil, natural water or deionised water?

An important element in the evolution of electronic drives in railway traction concerns the cooling methods of the power converter. The traditional use of forced air has always been a significant problem for reliability and maintenance, while the use of radiant panels for natural dissipation was only possible for low power levels. On the other hand, the use of CFC (freon) for cooling was soon banned for ecological reasons.

In countries that use the alternating current system to supply the network, the presence of the main oil-cooled transformer induced to extend this cooling method also to the traction converters (this is the case of the already mentioned 460 SBB locomotives, but due to the use of this type of converter in the motors of the first series of ETR500 trains we find oil cooling also on these FS vehicles).

Starting from the '90s, however, it was preferred to develop water cooling systems, but here again with two alternative methods; natural water or deionised water. In the first case, the radiator, which comes into contact with water, had to be isolated from the semiconductor potential (now GTO); this is what is found for example in the converters of the FS E464 locomotives and in general on ABB applications. Insulation was not necessary with deionised water, but a deionising resin exchanger and a water conductivity control system had to be stored on board. This is what was done on the E402B locomotives and on the second series of ETR500 trains, with the Ansaldo converter.

8. Evolution of power components: from thyristors to GTOs to IGBTs

The evolution of the traction converters technology is accompanied by that of the components, which, as we will see later, follows its own dynamics, driven by the main outlet markets.

The first components used, e.g. for the choppers in Italy or for the first versions of inverters in Germany, are the thyristors, which therefore carry with them the need for commutation circuits.

OSSERVATORIO

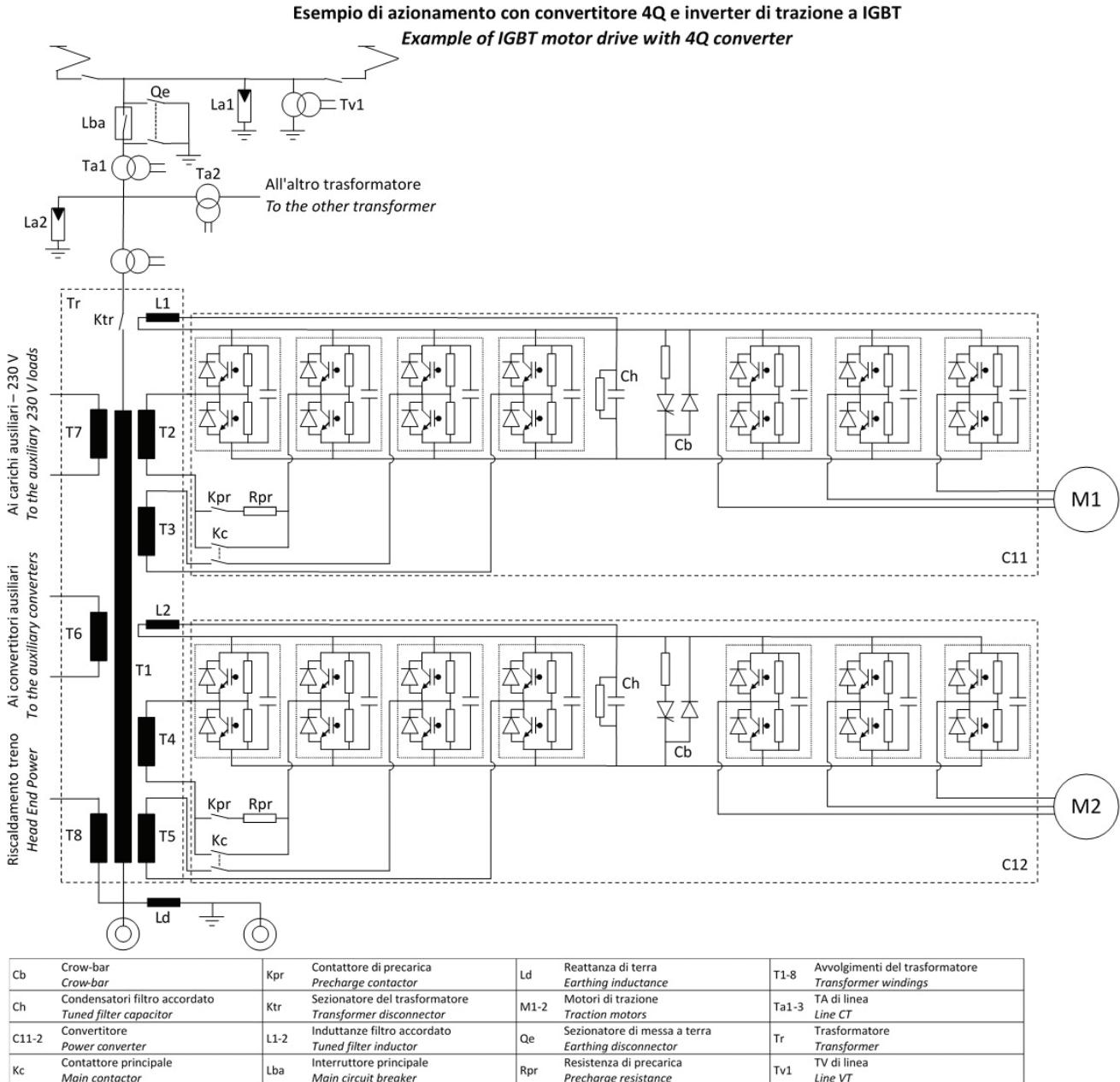


Fig. 11 - Schema di trazione con inverter a IGBT.

Fig. 11 - Traction diagram with IGBT inverter.

verifica parimenti nel campo dei componenti utilizzati per l'elettronica di controllo. Dalle prime realizzazioni degli anni '70, a logica cablata, alle schede elettroniche con microprocessori, che si cominciano ad utilizzare una decina di anni più tardi, la riduzione del numero di componenti è drammatica, così come l'aumento della capacità di calcolo.

Questo, unito alle misure di selezione dei componenti e dei sottoassiemi, che si impongono nei processi costruttivi, e ai provvedimenti di ridondanza, ha reso possibili dei livelli di affidabilità altrimenti impensabili.

Upon the appearance of the GTOs the schemes of the converters are much simpler, representing an element of sure success for the applications realised.

Another step is with the IGBTs that simplify the driving circuits, thanks to the lower power required for on-off and off-on switching. However at the beginning they suffer for the limited unitary powers, which impose a large number of branches in parallel to reach the level of power required in heavy rail. The first applications therefore took place in the area of light rail. Currently also in four-quadrant (4Q) converters IGBTs are used creating modular structures [11] (Fig. 11).

10. Il rapporto tra il mondo ferroviario e il mercato dei componenti

Una riflessione attenta merita il condizionamento esercitato sullo sviluppo degli azionamenti elettronici ferroviari dal particolare rapporto con il mercato dei componenti elettronici, sia di potenza che di segnale.

Le applicazioni ferroviarie si presentano sul mercato dei componenti di potenza come un utente debole, in quanto le quantità richieste nel ferroviario sono incompatibilmente inferiori rispetto agli azionamenti per gli usi industriali.

Lo stesso vale per i componenti elettronici di segnale utilizzati nelle apparecchiature di controllo, con quantità di diversi ordini di grandezza inferiori rispetto a quelle richieste nei prodotti di consumo.

Questo ha fatto sì che il mercato ferroviario non riuscisse mai ad influire sulle scelte di produzione delle società fornitrice dei componenti (uscita di produzione, immissione di nuovi componenti sul mercato e così via) e ha reso impossibile ogni tentativo di standardizzazione, che a quel punto si doveva rinviare solo a un livello superiore, di sottosistema anziché di componente.

Per contro, le applicazioni ferroviarie costituiscono un cliente molto esigente, in quanto portatrici di requisiti molto più stressanti rispetto agli impianti industriali per le diverse condizioni di impiego, escursioni di temperatura, vibrazioni, presenza di agenti esterni quali polvere, pioggia, neve, difficoltà di smaltimento del calore di raffreddamento e così via. Questo ha comportato per le applicazioni ferroviarie, dopo un primo periodo di risultati "difficili", la necessità di procedere ad una selezione di componenti molto stringente, fino a test condotti sul 100% dei componenti, ed una cura estrema nei processi di assemblaggio dei sottosistemi, con la realizzazione di prove intermedie, prima di quelle finali, svolte anche in camera termica per la verifica a caldo.

Questo particolare rapporto con il mercato dei componenti ha avuto effetti rilevanti in molti casi, determinando la sorte positiva o negativa di molti progetti.

Tra i casi più sfortunati, possiamo ricordare, a metà degli anni '80, i prototipi di locomotive E454 e E402A, basati i primi sull'uso, nel convertitore di potenza (a chopper), dei tiristori a conduzione inversa (RCT), mentre per le E402A l'inverter si basava sull'impiego di tiristori asimmetrici. L'uscita di produzione di entrambi questi tipi di componenti ne condizionarono infatti l'esito.

Ancora più pesante la situazione dei componenti delle logiche di controllo, ancor più critici da questo punto di vista. Ricordiamo a questo proposito l'infruttuoso tentativo di FS, sempre negli anni '80, di creare uno standard ferroviario sulla base del microprocessore Z80, uscito poco dopo dalla produzione.

Un caso invece positivo è rappresentato, come detto sopra, dalla locomotiva del tipo E464, per come il com-

9. Evolution in control electronics: from wired logic to microprocessors

A similar evolution, also fundamental, occurs equally in the field of the components used for the control electronics. From the first realisations of the '70s, with a wired logic, to the electronic circuit board with microprocessors, which begin to be used a decade later, the reduction in the number of components is dramatic, as is the increase in computing capacity.

This, together with the selection of components and modules, which are necessary in the construction processes, and the redundancy measures, allowed high reliability levels that were otherwise unthinkable.

10. Relationship between the railway world and the component market

The conditioning exercised on the development of railway electronic drives from the particular relationship with the market of both power and signal electronic components deserves careful reflection.

Railway applications present themselves as a weak user on the market of power components, as the quantities required in railway are incomparably lower compared to drives for industrial uses.

The same applies to the switching signal electronic components used in control equipment, with quantities of several orders of magnitude lower than those required in consumer products.

This meant that the railway market never succeeded in influencing the production choices of the component supplying companies (production output, placing new components on the market and so on) and made any attempt at standardisation impossible, which at that point had to be referred only to a higher subsystem level, rather than component.

On the other hand, railway applications are a very demanding customer, as they carry much more stressful requirements than industrial system due to the different conditions of use wide, temperature range, vibrations, presence of external agents such as dust, rain, snow, difficulty dissipating of cooling heat and so on. For rail applications, after an initial period of "hard" results, this led to the need to proceed with a very stringent selection of components, up to tests conducted on 100% of the components, and extreme care in the subsystems assembly processes, with the performance of intermediate tests, before the final ones, carried out also in the thermal chamber for thermal verification.

This particular relationship with the component market in many cases has had significant effects, determining the positive or negative fate of many projects.

Among the most unfortunate cases, we can remember the E454 and E402A locomotives prototypes, in the mid-'80s, the first based on the use, in the power converter (chopper), of the reverse conducting thyristors (RCT), while for the E402A the inverter was based on the use of asymmetric thyristors. The production discontinuation of both these types of components in fact conditioned the outcome.

ponente di potenza utilizzato nel convertitore ad inverter (i GTO da 4,5kV 3kA) si attaglia perfettamente all'impiego.

In ogni caso, il progresso continuo dei semiconduttori e la loro limitata permanenza sul mercato sta condizionando anche la vita utile dei materiali rotabili che, a meno di cospicue operazioni di revamping, soffrono di un'obsolescenza più precoce rispetto ai vecchi mezzi con azionamenti elettromeccanici.

11. Conclusioni

Da tempo si può ritenere che quella che abbiamo chiamato "la grande stagione degli azionamenti ferroviari" sia conclusa, nel senso che non si assiste più a quelle che un tempo erano vere e proprie battaglie ideologiche tra opposte fazioni. Tutti gli schemi sopracitati sono ora disponibili per tutti e si tratta solo di scegliere lo schema e i componenti che meglio realizzano i requisiti richiesti per la specifica applicazione.

Con questo l'esercente ferroviario si può più facilmente dedicare alla propria "mission" di trasporto, regolare e affidabile, senza essere fuorviato da incombenze di sperimentazione che un tempo appassionavano sì i tecnici ferroviari, ma preoccupavano non poco gli esercenti.

Ciononostante, sul mercato stanno apparendo nuove tipologie di semiconduttori che potrebbero avere un notevole impatto anche nel settore ferroviario. Si possono citare i semiconduttori basati sul carburo di silicio SiC (Silicon Carbide) o sul nitruro di gallio GaN (Gallium Nitride) che, grazie alle elevate frequenze di commutazione e alle minori perdite, consentono di ottenere una riduzione significativa dei pesi e degli ingombri dei convertitori e dei componenti elettromeccanici come induttori e condensatori, nonché l'introduzione di nuovi schemi di circuiti comprendenti trasformatori ad alta frequenza più leggeri ed efficienti di quelli tradizionali. Lo sviluppo di questi componenti è legato al settore degli azionamenti elettrici per l'automotive che si prevede avrà uno sviluppo notevole nell'immediato futuro. Un mercato di massa come quello dell'automotive è di sicuro stimolo per la ricerca di nuove soluzioni più efficienti ed economiche di cui anche il settore ferroviario potrà beneficiare.

The situation of the control logics components is even more serious, even more critical from this point of view. In this regard, we recall the unsuccessful attempt by FS, again in the '80s, to create a railway standard based on the Z80 microprocessor, whose production was discontinued shortly after.

A positive case is instead represented, as mentioned above, by the E464 locomotive, as the power component used in the inverter converter (the 4.5kV 3kA GTOs) is perfectly suited for use.

In any case, the continuous progress of the semiconductors and their limited permanence on the market is also affecting the useful life of rolling stocks which, unless there are substantial revamping operations, suffer a more precocious obsolescence than the old electromechanical drives.

11. Conclusions

It has long been believed that what we called "the great railway electronic drives season" is over, in the sense that we no longer see what were once real ideological battles between opposing factions. All the above schemes are now available for everyone and it is only a matter of choosing the scheme and the components that best fulfil the requirements needed for the specific application.

With this the railway operator can more easily dedicate itself to its regular and reliable transport "mission", without being led astray by experiments that were once passionate for railway technicians, but worried the operators a lot.

Nevertheless, new types of semiconductors are appearing on the market that could have a significant impact also in the railway sector. We can mention semiconductors based on silicon carbide SiC or on gallium nitride GaN which, thanks to the high switching frequencies and to the lower losses, allow obtaining a significant reduction in the weights and sizes of the converters and electromechanical components such as inductors and capacitors, as well as the introduction of new circuit diagrams comprising lighter and more efficient high-frequency transformers than traditional ones. The development of these components is linked to the electric drives sector for the automotive industry, which is expected to develop considerably in the near future. A mass market such as the automotive one is certainly a stimulus for the research of new, more efficient and economic solutions that the railway sector will also be able to benefit from.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] D. PISCAGLIA, M. CAVAGNARO, "La locomotiva elettronica a chopper E444.005 delle FS", Ingegneria Ferroviaria gennaio 1976.
- [2] AA.VV., "Le locomotive del Tecnomasio - Itinerario nella storia della trazione ferroviaria italiana attraverso 1000 locomotive", novembre 1994.
- [3] W. TEICH, "Drehstromantriebstechnik für Schienenfahrzeuge", BBC Mannheim 1986.
- [4] A. STEIMEL, "Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience", 2008 Oldenburg Industrieverlag GmbH.

OSSERVATORIO

- [5] F. LACÔTE, "La nouvelle génération de matériel à grande vitesse de la SNCF, le matériel TGV Atlantique", Revue Générale des Chemins de Fer, dicembre 1986.
- [6] F. PERTICAROLI, "Sistemi elettrici per i trasporti. Trazione elettrica", Casa Editrice Ambrosiana, Seconda Edizione, 2005.
- [7] W. BOHLI, F. STEINMANN, "Die Umrichterlokomotiven mit GTO-Thyristoren und Mikroprozessorsteuerung für die Schweizer Bahnen", ZEV-Glaser's Annalen 111, Heft novembre-dicembre 1987.
- [8] L. MORISI, "L'azionamento elettrico delle motrici del treno ad alta velocità ETR500 delle Ferrovie dello Stato", Ingegneria Ferroviaria, gennaio-febbraio 1988.
- [9] D. ZANINELLI, "Sistemi elettrici per l'alta velocità ferroviaria", Ed. Polipress, novembre 2010.
- [10] S. MANTERO, A. STABILE, D. CARILLO, "Il sistema di controllo della locomotiva E464: caratteristiche di funzionamento e verifica delle prestazioni", Ingegneria Ferroviaria, aprile 2001.
- [11] M. BRENNA, F. FOIADELLI, D. ZANINELLI, "Electrical Railway Transportation Systems", Wiley-IEEE Press, 2018.

**La qualità
è il nostro viaggio quotidiano.**

ISOTRACK la divisione trasporti di **Isoil Industria SpA**, con la sua gamma di Prodotti e Servizi offre **soluzioni di qualità**, e da oltre vent'anni è protagonista nei più importanti progetti ferroviari.

LE NOSTRE APPLICAZIONI

- Treni ad Alta Velocità, Regionali e Mezzi d'Opera
- Trasporto urbano su rotaia (metropolitane e tram) e su gomma (autobus)
- Sistemi di sicurezza a bordo dei veicoli fino a SIL4

SERVIZI DI QUALITÀ

- Riparazione qualificata della nostra strumentazione
- Aggiornamento firmware dei display da banco
- Qualifica dei prodotti per sistemi Ready-to-Use
- Supporto e consulenza per applicazioni specifiche

Cinisello B. - MI (Italy)
tel. +39 0264027.1
www.isoil.com
isotrack@isoil.it

ISOIL INDUSTRIA
Le soluzioni che contano

EXPO Ferroviaria 2019
VI ASPETTIAMO PRESSO
Pad. 1 - STAND F113

1928-2018 60 YEARS OF MEASUREMENT.