



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

ELABORATO FINALE

**ALIMENTAZIONE IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE A
FREQUENZA $16 \frac{2}{3}$ Hz PER LA TRAZIONE ELETTRICA**

RELATORE: Prof. ROBERTO TURRI

LAUREANDO: CARLO SIMONETTO

*ANNO ACCADEMICO
2010 / 2011*

SOMMARIO

In questo elaborato si analizza nel dettaglio il sistema di alimentazione in corrente alternata monofase a frequenza $16 \frac{2}{3}$ Hz per la trazione elettrica, valutandone gli aspetti storici, la situazione attuale e i possibili sviluppi futuri, anche comparandolo ai sistemi di alimentazione concorrenti.

Si da inoltre ampio spazio al caso particolare rappresentato dal principale operatore del sistema suddetto, cioè le ferrovie tedesche (DB AG).

INDICE DEGLI ARGOMENTI

CAPITOLO 1 :

STORIA DELLA TRAZIONE ELETTRICA IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE

1.1 *Il periodo antecedente alla prima guerra mondiale - 4*

1.2 *Il periodo tra le due guerre mondiali - 7*

1.3 *Dal secondo dopoguerra ai giorni nostri - 8*

1.4 *L'avvento dell'elettronica di potenza (e del motore asincrono trifase) in mezzi circolanti su reti a frequenza ferroviaria - 9*

1.5 *L'ascesa di mezzi e sistemi per l'alta velocità - 11*

1.6 *La situazione attuale - 13*

CAPITOLO 2:

TECNICHE E TECNOLOGIE DELLA TRAZIONE ELETTRICA

2.1 *Funzioni basilari della trazione elettrica - 14*

2.2 *Tipologie di sistemi di alimentazioni per la trazione elettrica - 15*

2.3 *Il perché (storico) della scelta della frequenza ridotta rispetto a quella industriale nei sistemi a corrente alternata monofase - 17*

2.4 *Confronto attuale tra i due sistemi in corrente alternata monofase - 18*

2.5 *Struttura di una rete di alimentazione per la trazione elettrica*

2.5.1 *La generazione della potenza - 22*

2.5.2 *La distribuzione della potenza - 24*

CAPITOLO 3:

NELLO SPECIFICO DEL SISTEMA IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE A 16 2/3 HZ PER LA TRAZIONE ELETTRICA

3.1 *La generazione di potenza - 26*

3.2 *Tipologie di reti di alimentazione di sistemi per la trazione - 27*

3.3 Tipologie di convertitori

3.3.1 I convertitori rotanti - 30

3.3.2 I convertitori statici - 33

3.4 I diversi tipi di linee aeree di contatto - 37

CAPITOLO 4:

STRUTTURA DELLA RETE DI ALIMENTAZIONE A FREQUENZA 16 2/3 Hz PER LA TRAZIONE FERROVIARIA DELLE FERROVIE FEDERALI TEDESCHE

4.1 La generazione di potenza - 43

4.2 Trasmissione dell'energia e alimentazione delle linee di contatto - 44

4.3 La tipica sottostazione

4.3.1 Funzioni e tipologie standardizzate - 46

4.3.2 Gli apparati AT all'aperto - 48

4.3.3 Gli apparati MT in interno - 51

4.3.4 L'alimentazione dei servizi ausiliari di sottostazione - 54

4.3.5 La protezione - 56

4.3.6 Lo SCADA - 59

4.3.7 Edifici principali e strutture di supporto - 62

4.4 Le linee di contatto e i relativi circuiti - 63

4.5 Sistemi di protezione delle linee di contatto

4.5.1 Generalità - 70

4.5.2 Le varie tipologie

4.5.2.1 La protezione dalle alte correnti - 72

4.5.2.2 La protezione distanziometrica a due stadi - 73

4.5.2.3 La distinzione tra le correnti di esercizio e le correnti di corto circuito - 75

4.5.2.4 La protezione da sovraccarico termico - 76

4.5.2.5 *La protezione di sostegno - 78*

4.5.3 *La localizzazione del guasto - 79*

4.6 *Conduttori di ritorno e sistemi di messa a terra*

4.6.1 *Connessioni tra binari e tra rotaie - 80*

4.6.2 *Circuiti di occupazione del binario, cammino di ritorno della corrente e messa a terra di trazione - 83*

4.6.3 *Connessioni di terra delle strutture in cemento - 87*

4.7 *Il controllo delle reti di potenza*

4.7.1 *Generalità - 88*

4.7.2 *Unità locali di controllo e linee per il controllo remoto - 90*

4.7.3 *Tecnologia di controllo remoto dello SCADA - 91*

4.7.4 *Nodi della rete di controllo remoto e centri ausiliari di controllo -92*

4.7.5 *Centri principali di controllo - 93*

4.7.6 *Centri di controllo delle reti di trasmissione e centro di controllo dell'intera rete di potenza -94*

CAPITOLO 5:

L'USO DELLA FREQUENZA FERROVIARIA NELLE LINEE AD ALTA VELOCITÀ - 95

APPENDICE - 101

GLOSSARIO DEI TERMINI TECNICI E/O FERROVIARI - 139

BIBLIOGRAFIA - 144

RINGRAZIAMENTI - 145

1 STORIA DELLA TRAZIONE ELETTRICA IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE

1.1 Il periodo antecedente alla prima guerra mondiale

Non appena i costruttori di equipaggiamenti per la trazione elettrica riuscirono nella produzione di sistemi affidabili e sufficientemente validi tali da poter rimpiazzare la trazione a vapore, la questione di una generale elettrificazione delle linee ferroviarie divenne imperante.

Si capì fin da subito che il sistema in corrente continua a bassa tensione, usato nell'alimentazione delle corte linee tranviarie cittadine, non era ugualmente indicato per l'alimentazione di lunghe linee ferroviarie extraurbane e con carichi pesanti.

Qualora l'alimentazione in corrente continua a bassa tensione fosse stata scelta si ponevano essenzialmente due tipi di problemi, dapprima la necessità di un gran numero di sottostazioni a bassa potenza unitaria e non ultimo il problema di elevate cadute di tensione ed elevate correnti circolanti al fine di fornire al sistema l'elevata potenza richiesta per far muovere un treno.

L'uso della corrente alternata, sia per la distribuzione che per la trazione, recava invece innegabili vantaggi, seppur non esente da problemi.

Infatti inizialmente problematiche tecniche ne impedirono o limitarono fortemente l'applicazione. Si giunse perciò ad un sistema misto, con l'uso della corrente alternata per la generazione distribuzione e della corrente continua per la trazione.

Le innovazioni che resero possibili il suddetto sistema misto furono i convertitori rotanti che resero possibile la conversione in sottostazioni distribuite da sistemi polifase ad alta tensione in corrente alternata, tipici della generazione e della distribuzione, a sistemi a bassa tensione in corrente continua, ideali per la trazione e l'uso della terza rotaia quale luogo di captazione della corrente (elevata) da parte del mezzo ferroviario, captazione che risultava meno problematica con la terza rotaia appunto.

Nonostante l'uso del sistema misto AC/DC fosse tecnicamente fattibile, non si dimostrò economicamente vantaggioso.

Con il sistema trifase delle industrie Ganz e Brown-Boveri poco indicato all'uso generale per la limitazione della tensione a valori di 3000/4000 V e quello dell'alimentazione in corrente continua ad alta tensione la da venire, lo sviluppo dell'alimentazione a corrente alternata monofase per l'elettrificazione di ferrovie su lunghe distanze ricevette una spinta decisiva.

Segnaliamo il motore asincrono monofase di B.J. Arnold e il motore a collettore in corrente alternata di Lamme.

Agli inizi del '900 l'alimentazione in corrente alternata monofase di motori a collettore divenne uno standard.

Negli USA si era soliti trovare un'alimentazione in corrente a 11 kV e 25 Hz con linea aerea.

Talora erano presenti sistemi a 6.6 kV AC e 650 V CC in terza rotaia (quest'ultimo specie nella penetrazione delle ferrovie nei grandi agglomerati urbani), ma il passaggio da un sistema elettrico ad un altro risultava comunque economicamente più vantaggioso che uno da trazione vapore a trazione elettrica.

In Europa il lancio del "nuovo" sistema di alimentazione avvenne a 15 kV e 16 2/3 Hz nel 1908 sulla costruenda linea del Loetschberg delle ferrovie federali svizzere nel tratto Spiez - Frutigen.

La linea del Loetschberg rappresenta una pietra miliare della trazione elettrica, in quanto prima linea espressamente costruita per essere esercita in trazione elettrica e durante la sua costruzione fu un importante terreno di test riguardanti la trazione elettrica.

La stessa inoltre affermò la trazione elettrica in corrente alternata monofase in Europa e i suoi parametri di alimentazione divennero poi lo standard (e lo sono tuttora con soli piccoli aggiustamenti) in Svizzera e in paesi come Austria, Germania, Svezia e Norvegia.

Al suo completamento avvenuto nel 1913 con l'apertura della galleria del Loetschberg vide il

transito di talune delle locomotive più potenti dell'epoca, come la CC delle industrie Oerlikon e la successiva Be 5/7 sempre di Oerlikon.

La CC, sviluppata a partire da test comparativi del 1910 tra due progetti per una macchina da 2000 CV, l'uno tedesco e l'altro svizzero (sempre di Oerlikon), montava nella cassa due grossi motori a collettore in corrente alternata collegati tramite bielle a due gruppi di 6 ruote.

La Be 5/7 (rodiggio 1E1) presentava 2 motori alloggiati nella cassa da 933 kW ciascuno ed era in grado di trainare dal peso di 330 tonnellate su un gradiente di 1/37 a 50 km orari.

Sempre le industrie Oerlikon, grazie ai contributi fondamentali dei suoi dipendenti Hans Behn-Eschenburg e Emil Huber-Stockar, furono le protagoniste nel biennio 1904-1905, quindi in data antecedente alla costruzione della linea del Loetschberg, di importanti esperimenti, autofinanziati, volti a dimostrare la superiorità della trazione in corrente alternata monofase su quella a vapore, sulla linea da Seebach a Wettingen in Svizzera.

Furono testate due locomotive, profondamente diverse nella tecnica.

La prima era alimentata a 15 kV 50 Hz (prima nel mondo a frequenza industriale) e attraverso due trasformatori di bordo 15000/700 V per un totale di 500 kVA veniva alimentato un motore asincrono accoppiato ad un generatore in corrente continua da 400 kW a 600 V.

Tale generatore a sua volta alimentava (con possibilità di variazione della tensione di alimentazione) due motori di trazione da 150 kW ciascuno montati uno per ciascun carrello a 4 ruote.

La trasmissione del moto avveniva tramite bielle.

Nonostante un buon funzionamento del motore, il peso della locomotiva ritenuto eccessivo a fronte della modesta potenza fornita, le perdite nella conversione (soprattutto a locomotiva ferma) affossarono tale progetto.

La seconda locomotiva presentava invece motori a collettore in corrente alternata sviluppati da Huber-Stockar e Behn-Eschenburg nel loro lavoro alla Oerlikon.

La tensione di alimentazione era 15 kV 15 Hz (la frequenza progenitrice dei 16 2/3), poi ridotta a bordo a 700 V.

I due motori, montati uno per carrello (rodiggio BB) con trasmissione del moto alle ruote tramite bielle, venivano alimentati a tensione variabile con gradini di 35 V, avevano una velocità nominale di rotazione di 650 giri/min (massima 1000 giri/min corrispondente a locomotiva marciante a 60 km/h) e sviluppavano nel complesso una potenza di 360 kW a fronte del peso della locomotiva di 42 tonnellate.

Una terza locomotiva sviluppata da Siemens, con rodiggio A1A-A1A, trasmissione del moto a ingranaggi, fu consegnata nel 1907.

Ciascun motore a collettore a corrente alternata a 15 Hz forniva 165 kW.

Tale locomotiva poteva essere allestita anche con un rodiggio C-C per una potenza totale di circa 1000 kW, facendo intravedere per un futuro vicino il traguardo dei 2000 kW.

Se la Svizzera, con le ferrovie federali, ebbe un ruolo predominante per l'affermazione in Europa della trazione in corrente alternata monofase a frequenza ridotta (rispetto a quella industriale) nel periodo pre-bellico, vari furono gli esperimenti e le prove anche in altri paesi e/o altre amministrazioni ferroviarie, sia che la scelsero come standard anche attuale (Germania e Austria) sia dove fu un'esperienza temporanea (Francia e Gran Bretagna).

In Germania furono eseguiti test comparativi per definire gli standard di tensione e frequenza con il risultato di orientarsi su un valore il più ridotto possibile (rispetto a quello industriale) di frequenza in quanto si adattava meglio al funzionamento con motori a collettore.

Definita tale scelta, il motore a collettore assunse una posizione dominante rispetto al motore a repulsione.

La frequenza ridotta al filo di contatto poté essere ottenuta in sottostazioni dotate di gruppi conversione rotanti e alimentate da centrali a frequenza superiore.

Lo standard a 25 Hz favorito da AEG che inizialmente era adottato nella maggior parte delle linee

elettrificate della Germania del tempo diventò sempre più marginale rispetto a quello a 15 Hz con l'elettrificazione di nuove linee nel periodo pre-bellico.

Segnaliamo in particolare l'elettrificazione nel 1909 dei 25 km della linea Dessau - Bitterfeld, linea che divenne un importante luogo di test.

Su tale linea furono testate ben 15 tipi di locomotive, per il servizio viaggiatori e per il servizio merci, tra le quali figura la locomotiva classe B52 numero 10502 dotata di motori a repulsione.

I test sulla Dessau - Bitterfeld contribuirono ulteriormente a imporre lo standard a 15 kV in corrente alternata monofase e l'uso di motori a collettore, sempre in alternata.

La linea montana della Slesia sempre in Germania, così come quelle delle ferrovie retiche in Svizzera ebbero il ruolo di dimostrare la bontà del sistema su terreni "difficili" dopo la prima esperienza del Loetschberg.

In Gran Bretagna l'affermazione del sistema fu frenata da motivi essenzialmente economici.

La London, Brighton & South Coast Railway che aveva puntato sullo schema a 6.6 kV 25 hz di fabbricazione AEG per l'elettrificazione delle proprie linee si trovò nelle condizioni di essere assorbita nella Southern Railway che invece aveva nell'alimentazione in corrente continua a bassa tensione il proprio cavallo di battaglia.

Le linee in alternata vennero convertite in continua e solo negli anni '50 si ritornò a parlare di corrente alternata per la trazione ferroviaria in Gran Bretagna.

In Francia le ferrovie del sud condussero una serie di esperimenti con alimentazione in corrente alternata monofase a 16 2/3 Hz e tensione di 12 kV con locomotive di diverse tipologie.

In questo caso tutto fu bloccato dagli eventi bellici al cui termine l'alimentazione in corrente continua a 1.5 kV prese il sopravvento.

1.2 Il periodo tra le due guerre mondiali

Per alimentare le prime linee di trazione elettrica che ricordiamo essere isolate tra di loro, le varie compagnie di trasporto ferroviario procedettero alla costruzione e al mantenimento di taluni impianti di produzione di energia elettrica.

Citiamo la centrale idroelettrica di Kochel (Walchensee dal 1924) in Germania per l'alimentazione delle linee della Baviera, l'impianto termoelettrico di Muldenstein, sempre in Germania, per l'alimentazione delle linee della Prussia Centrale e l'impianto idroelettrico di Porjus in Svezia per l'alimentazione della Kiruna Railway.

Si consideri il fatto che le prime ferrovie a trazione elettrica potevano considerarsi economicamente vantaggiose solo se alimentate da centrali idroelettriche.

Talune furono costruite dallo stato come scelta strategica per promuovere l'economia dell'area.

Su altre, come la linea del Loetschberg e del Sempione, la trazione elettrica non aveva alternativa, ma lì l'energia da idroelettrico era ampiamente disponibile.

Nonostante la trazione elettrica rappresentasse un successo ingegneristicamente parlando, si era ben distanti dall'affermare la stessa anche dal punto di vista economico anche in luoghi dove l'energia elettrica veniva prodotta usando il carbone.

Con la ripresa generalizzata dell'elettrificazione delle varie linee negli anni '20 del 20° secolo si pensò ad un cambio di strategia, da singoli impianti di produzione per alimentare singole linee a reti alimentanti diverse linee e alimentate da vari impianti di produzione, in analogia a quanto avveniva già per la rete civile nazionale a frequenza industriale.

E' del periodo la costruzione della linea 2x55 kV di trasmissione e distribuzione nella Germania meridionale.

Mentre nel 1942 avvenne a Saalfeld in Turingia la giunzione tra la rete della Baviera e quella della Germania centrale .

Per quanto riguarda invece la costruzione o la conversione di linee ferroviarie allo standard 15 kV 16 2/3 hz segnaliamo il caso della linea del Sempione tra Svizzera e Italia, linea di valico di 23 km attraverso il tunnel del Sempione terminata ed elettrificata in corrente alternata trifase a 3 kV 16 Hz e poi convertita in monofase, uniformandosi al resto dello rete svizzera, nel 1930.

1.3 Dal secondo dopoguerra ai giorni nostri (con particolare riferimento al caso tedesco)

Al termine della seconda guerra mondiale le ferrovie statali tedesche (DB) velocemente ripristinarono l'operatività elettrica in Baviera e nel Baden-Württemberg, così come ripresero l'elettrificazione di nuove linee.

Nei primi anni '50 furono investite da una scelta cruciale per il proseguo della trazione a 16 2/3 Hz. Parliamo dell'infuocato dibattito che sorse intorno all'elettrificazione del sistema di trasporto rapido dell'area della Ruhr per cui poteva prospettarsi un'alimentazione a frequenza industriale di cui i test sulla linea dell'Höllental avevano provato la fattibilità.

Sia per ragioni di continuità che di opportunità di un più facile controllo dei parametri delle proprie linee, le DB scelsero di mantenere il sistema di alimentazione a frequenza ferroviaria e anzi espansero ulteriormente le linee di trasmissione e interconnessione a 110 kV.

Molti anni dopo anche le nuove linee ad alta velocità avrebbero seguito tale schema.

Più complessa fu la situazione nella parte orientale della Germania, divenuta zona di occupazione sovietica nell'immediato dopoguerra e poi Repubblica Democratica Tedesca.

Conseguentemente al completo smantellamento degli apparati di trazione elettrica nel 1946, le locomotive e i vari componenti delle centrali elettriche e delle sottostazioni furono riaffidati alle DR, successori della ferrovie del Reich nella GDR solo nel 1956.

Nel tempo trascorso, l'amministrazione sovietica delle ferrovie aveva condotto dei test sulla linea del Workuta in Siberia.

Tuttavia gli esperimenti non condussero ad una espansione del sistema "tedesco" in Unione Sovietica (fu scelta l'alimentazione a 50 Hz).

Nella Germania centro-meridionale (Weimar – Leipzig – Dresda - Chemnitz) la vecchia dorsale centrale fu ristrutturata.

Mentre per l'elettrificazione negli anni '70 delle linee settentrionali per Berlino e da lì sul Baltico Le DR scelsero la conversione ripartita con convertitori rotanti sincro-sincro a frequenza fissa su una base strettamente economica, dato il loro basso costo iniziale.

Bisogna dire che non era una novità assoluta nel panorama della conversione, infatti già Norvegia e Svezia l'avevano scelta negli anni '30 per l'alimentazione di linee ferroviarie passanti in aree scarsamente popolate.

Seppur dal basso costo iniziale, tale tecnologia si rivelò non economicamente valida nel lungo periodo in quanto, per evitare correnti di circolazione, le sezioni di alimentazione dei treni non potevano essere longitudinalmente accoppiate, il che comportava, per rendere il più possibile affidabile il sistema, una grande quantità di convertitori posti a riserva e quindi un alto di convertitori nel suo complesso.

Conseguentemente alla riunificazione della Germania nel 1990 fu deciso l'abbandono della conversione ripartita, sebbene per gradi.

Inizialmente si procedette all'allacciamento dell'area berlinese alla dorsale centrale presso Wolfsburg e Dessau, poi fu il turno delle altre linee isolate a Bebra e Saalfeld.

La linea Prenzlau - Anklam passò allo schema con autotrasformatori nel 2000 cosicché da rimpiazzare in maniera costi-effettiva i vecchi convertitori ripartiti.

Sottolineiamo che per quanto riguarda il panorama mondiale, nel 1997 la trazione in corrente alternata monofase a 16 2/3 Hz era presente su circa 33000 km di linee ferroviarie, pari al 18% dell'intera estensione delle ferrovie nel mondo di 182000 km.

Un buon numero anche se minoritario rispetto a quello della trazione in corrente continua e in secondo luogo rispetto a quello della trazione in corrente alternata monofase a frequenza industriale.

1.4 L'avvento dell'elettronica di potenza (e del motore asincrono trifase) in mezzi circolanti su reti a frequenza ferroviaria

Negli anni '60 il progresso dell'elettronica allo stato solido rese possibile combinare il controllo mediante inverter di motori trifasi con la rettificazione della corrente di linea alternata monofase, il tutto montato a bordo della locomotiva.

Successivamente ad una fase pionieristica portata avanti in particolare dalle industrie Brush in Inghilterra, la palla passò Brown-Boveri, nel cuore della regione (quella centro-nord europea) feudo dell'alimentazione in corrente alternata monofase a frequenza ferroviaria.

Lo sviluppo di un sistema per il controllo della velocità dei motori asincroni trifasi iniziò nel 1965 presso lo stabilimento Brown-Boveri di Mannheim in Germania.

Cinque anni di lavoro ebbero come risultato un sistema sufficientemente valido per test su locomotiva.

L'apparato fu montato sulla locomotiva diesel elettrica 202 002-2 recentemente costruita dalla Thyssen-Henschel.

La locomotiva, con tecnologia a tiristori, presentava un motore diesel alimentante un alternatore trifase la cui uscita veniva poi rettificata e successivamente riconvertita in alternata trifase per alimentare i motori.

Questa prima locomotiva fu usata in una prima intensiva serie di test.

Test ampiamente supportati (anche economicamente) non solo dall'amministrazione ferroviaria tedesca ma anche dalle imprese private del settore e dal mondo accademico, fattore di merito data la lunghezza dei test e del programma di sviluppo che non si prospettava certo breve.

La scelta di una locomotiva diesel-elettrica come primo prototipo non fu casuale.

All'epoca il possibile fenomeno di interferenza tra il convertitore di bordo e la linea di contatto, oltre agli apparati di segnalamento, era difficilmente controllabile.

Problema divenuto di minore entità nel 1974 (anche se non completamente risolto) quando modificando il primo prototipo si pervenne alla seconda versione della locomotiva.

Rimossi il motore diesel e l'alternatore e sostituiti con zavorra, la locomotiva veniva alimentata direttamente dalla linea aerea a 15 kV 16 2/3 Hz.

Dato l'elevato ingombro dell'insieme sistema di controllo dei motori - unità di soppressione delle interferenze, il primo (controllore a quattro quadranti) venne alloggiato in una carrozza appoggio assieme al trasformatore.

Anche il pantografo per la captazione della corrente dalla linea aerea era montato sulla carrozza appoggio.

La locomotiva di rodiggio Co-Co, dal peso di 80 tonnellate e potenza di 1550 kW venne testata con successo al traino di pesanti treni merci dando buoni risultati in particolare per quanto riguarda il controllore a quattro quadranti e i motori asincroni trifasi ben funzionanti in un ampio campo di velocità.

La stessa dimostrò anche la fattibilità della frenatura elettrica a recupero.

Il sistema Brown-Boveri si dimostrò anche efficace per quanto riguarda la soppressione delle interferenze con gli impianti fissi.

Unici nei del sistema la necessità di una manutenzione costante e le dimensioni, il peso e la complessità dello stesso visto nel suo insieme.

Dato il successo dei prototipi, si pensò all'applicazione delle nuove tecnologie a locomotive prodotte in serie.

Il risultato fu la nuova locomotiva E120 che iniziò i suoi servizi nel 1979.

Dal peso di 84 tonnellate, rodiggio Bo-Bo e potenza di 5600 kW, fu concepita per il traino di qualunque treno tra quelli effettuati dalle DB, in una parola come locomotiva universale.

Poteva quindi trainare ad esempio un treno merci di 2200 tonnellate a 80 km/h con una pendenza del 5% o un treno passeggeri di 550 tonnellate a 200 km/h con una pendenza del 2.5%, il tutto

sembra cambiare il rapporto di trasmissione.

Durante un test raggiunse i 230 km/h, nuovo record di velocità per una locomotiva con motori trifase.

Iniziali problemi di interferenza con gli impianti fissi furono risolti mediante tuning dei circuiti dell'apparato di controllo.

Sospinti dalla concorrenza di altre imprese costruttrici ferroviarie come la AEG, l'ABB-Henschel sviluppò anche l'evoluzione della E120, l'E121.

L'E121 era basata su due particolari locomotive della classe 120, la 120-004 (a tiristori) e la 120-005 (a GTO).

La 121 presentava circuiti con GTO e controllo a microprocessore e sviluppava 6400-7000 kW di potenza e una velocità di 230 km/h.

Riguardo l'uso di GTO anziché tiristori è importante sottolineare quanto essi abbiano contribuito alla riduzione dei componenti di un inverter per trazione e quindi ad aumentare l'affidabilità dello stesso.

Se nel 1970 l'inverter contava 96 tiristori e 48 diodi, lo stesso nel 1987 contava 6 GTO e diodi, una riduzione di componenti del 92%.

Comparando l'unità 004 a tiristori e la 005 a GTO, la seconda aveva il 17% dei semiconduttori, il 66% del peso dei sistemi elettronici, il 50% del volume degli stessi, l'apparato di controllo poteva trattare il 55% in più di potenza presentando il 40% in meno di perdite.

Se le locomotive della classe 120 potevano essere dichiarate un successo ingegneristicamente parlando, era il concetto di universalità che non convinceva del tutto le DB.

Ad un bando delle stesse per il rinnovo del parco motore negli anni '90, le varie case costruttrici risposero col concetto di modularità.

Cioè partendo da una base comune si giungeva ad una famiglia di locomotive semplicemente variando gli allestimenti che in ogni caso erano perfettamente intercambiabili.

Primo esempio di locomotiva costruita secondo il sistema modulare fu la 12X di AEG, di rodiggio Bo-Bo, peso 84 tonnellate, potenza continuativa di 6400 kW (massima di 7200 kW nel breve periodo) e velocità massima di 250 km/h.

Susseguenti alla AEG, anche SLM lanciò la sua Lok 2000, Krauss-Maffei / Siemens la locomotiva classe 127 "Europrinter" (da 6400 kW di potenza in configurazione Germania ma interoperabile, seppur a potenza lievemente ridotta), ABB la Eco 2000.

Le DB procedettero all'ordine di tutti i modelli tranne la Lok 2000 che invece fu scelta oltre dalle ferrovie federali svizzere anche da quelle norvegesi per i servizi di rango.

Facciamo notare che la modularità ha inoltre portato alla costruzione di locomotive per così dire "ibride", con componentistica anche della casa costruttrice concorrente e ciò è spesso sfociato in una effettiva collaborazione tra le stesse.

Se parliamo di utilizzo di sistemi elettrici equivalenti delle maggiori imprese di produzione di componentistica elettrica in combinazione con i componenti meccanici delle principali imprese di produzione del settore meccanico, possiamo citare i componenti ABB presenti anche nelle produzioni SLM, Krauss-Maffei, ecc.

Un'ulteriore conseguenza della costruzione modulare fu inoltre la sempre maggior presenza di mezzi interoperabili tra varie amministrazioni ferroviarie e vari sistemi di alimentazione.

1.5 L'ascesa di mezzi e sistemi per l'alta velocità

Verso gli anni '60 nel mondo si cominciò a parlare con insistenza di trasporto ferroviario ad alta velocità e le applicazioni non tardarono a giungere, seppur in forme diverse da paese a paese. In Francia e Giappone si puntò da subito su linee speciali isolate dalle linee tradizionali e percorse da elettrotreni rapidi.

Tale caratteristica divenne lo standard in tutti i maggiori network mondiali per il trasporto ad alta velocità, ma solo negli anni futuri.

Altre amministrazioni avevano puntato inizialmente su veicoli alquanto tradizionali (locomotiva trainante un numero variabile di carrozze) che percorrevano linee tradizionali ad una velocità più elevata grazie a particolari accorgimenti.

Rientrano in questa casistica le ferrovie federali di quella che allora era la Germania Ovest.

Sono del 1965 i primi quattro prototipi della locomotiva classe E03 (poi E103).

La locomotiva, sorta dalla collaborazione tra l'ufficio centrale di progettazione delle ferrovie federali, Siemens e Rheinstahl-Henschel, presentava rodiggio Co-Co e alimentazione a 15 kV 16 2/3 Hz.

Dotata di sei motori monofase a collettore, sospesi e trasmettenti il moto con giunti cardanici, forniva una potenza continuativa di 5950 kW, per un'ora di 6420 kW e per dieci minuti di 9000 kW.

Tale potenza consentiva alla locomotiva di raggiungere i 200 km/h, velocità toccata con regolarità durante i test sulla linea Monaco di Baviera - Ausburg, e di accelerare un treno di 8 carrozze da fermo alla velocità massima in soli 3 minuti.

Un'unità prototipo dotata di diverso rapporto di trasmissione poteva raggiungere i 250 km/h.

La locomotiva presentava inoltre la frenatura elettrica di tipo reostatico.

Se la progettazione era stata corale, lo era anche realizzazione.

Infatti le parti meccaniche provenivano da Henschel, Krauss-Maffei e Krupp, quelle elettriche da Siemens, AEG-Telefunken e Brown-Boveri.

Dal 1970 si passò alla costruzione delle unità di serie, unità che presentavano potenze ancora maggiori delle unità prototipo.

Rispettivamente 7440 kW per la potenza continuativa, 7780 kW per un'ora e 10400 kW per dieci minuti.

Valori molto elevati ma compatibili con l'alimentazione presente.

Se da un lato la locomotiva si dimostrava adeguata per l'esercizio a velocità sostenuta, problemi sorsero riguardo all'interazione tra la stessa e gli impianti fissi.

I problemi furono essenzialmente di due tipi.

Il primo era che un mezzo circolante a velocità elevata non si adattava più alla condotta tradizionale con segnalamento luminoso se non assistita.

Si procedette appunto alla realizzazione di un apparato di ripetizione a bordo delle indicazioni fornite dal sistema di segnalamento.

Lungo i binari veniva posto un cavo induttivo che trasmetteva le indicazioni date dal segnale alla locomotiva su cui era installato un computer che elaborava le stesse e calcolava la velocità ottimale che il treno avrebbe dovuto tenere per fermarsi in sicurezza al prossimo segnale impostato a via impedita.

La velocità così calcolata veniva trasmessa su un display in cabina di guida mentre il computer svolgeva anche la seconda funzione di controllore cioè, se la velocità effettiva del mezzo superava quella stabilita, attivava in maniera automatica la frenatura del treno.

Il secondo problema era il l'usura elevata del binario data dall'esercizio ferroviario a velocità sostenuta per mezzo di rotabili tradizionali (complesso locomotiva + carrozze).

Un problema che costrinse alla marcia a velocità sotto le effettive potenzialità dei mezzi per circa 10 anni, durante i quali un'attenta analisi dell'interazione locomotiva-binario, del complesso

carrello-ruota e dei sistemi di ammortizzazione e sospensione portò ad ottenere un'aggressività del treno nei confronti del binario notevolmente ridotta permettendo, anche con aggiornamenti del binario, la ripresa dei servizi a 200 km/h.

Come già accennato in precedenza la filosofia franco-nipponica riguardo ai trasporti ad alta velocità che prevedeva la costruzione e l'utilizzo di linee dedicate fu ben presto abbracciata anche da altre amministrazioni ferroviarie.

Negli anni '70 fu il turno delle ferrovie federali tedesche.

Esse concepirono un piano per l'ammodernamento del proprio network che si basava essenzialmente sull'aggiornamento delle linee esistenti e sulla costruzione di nuove linee dedicate, linee che avrebbero dovuto ospitare in futuro il treno ad alta velocità tedesco.

Il piano delle DB sfociò nei primi anni '80 nel piano federale per le infrastrutture di trasporto il quale autorizzava formalmente i lavori per l'innalzamento della velocità sulle linee storiche e la costruzione delle nuove linee dedicate, linee però concepite secondo il criterio dell'alta capacità piuttosto che pura alta velocità.

Alta capacità significava essere destinate sia al traffico veloce passeggeri col nuovo elettreno rapido tedesco ICE sia al traffico veloce merci, che però avrebbe viaggiato nelle ore notturne.

Le nuove linee vennero costruite con pendenza massima del 1.25%, raggio di curvatura medio di 7 km (minimo 5.1), furono dotate sia di apparati per la ripetizione a bordo dei segnali che del controllo radio della marcia dei treni e delle boe elettroniche di segnalamento.

L'alimentazione aerea a 15 kV 16 2/3 Hz secondo gli standard della nazione vide il debutto della corda Re250 appositamente sviluppata per i servizi ad alta velocità.

Il controllo radio fu pensato in congiunzione con la gestione centralizzata del traffico ferroviario che tramite le boe era in grado di seguire la marcia del treno in tempo reale.

Il programma tedesco, concepito come dal lungo calendario di ricerca, era strutturato per indagare le sei maggiori aree dell'ingegneria ferroviaria.

Le sei aree erano 1) interazione treno/binario;

2) tecnologia di bordo (freni, controlli, aerodinamica, ecc.);

3) progetto e costruzione degli impianti fissi;

4) sistemi di controllo e unificazione degli apparati di controllo e comunicazione;

5) alimentazione dei treni, compresa interazione pantografo/catenaria;

6) istanze ambientali come rumore, vibrazioni, inquinamento dell'aria ed

elettromagnetico nonché risposta umana al progetto ICE.

Il progetto prevedeva inoltre il ricorso a modelli matematici per l'analisi delle problematiche.

La validità dei modelli matematici venne poi testata su prototipi, dapprima in condizioni controllate, poi in aree di prova.

Fu così che nel 1982 si arrivò a parametri ben definiti per il nuovo treno ICE che doveva mostrare al mondo la competitività dell'industria ferroviaria tedesca oltre al più basilare compito di supportare adeguatamente la mobilità veloce in patria.

Il primo treno completo (unità di trazione e unità rimorciate) venne consegnato nel settembre del 1986 e già nel novembre dello stesso anno stabilì il nuovo record di velocità su rotaia in Germania, 317 km/h.

L'unità di trazione dal peso di 78 tonnellate (di cui 7.5 non sospese) e lunghezza di 20.8 m, rodiggio Bo-Bo era concepita per una velocità massima di 350 km/h e una potenza continuativa di 3640 kW (massima 4200 kW).

Lo sviluppo del treno ICE era tuttavia solo all'inizio cosa che col tempo lo rese un temibile concorrente del TGV francese e dello Shinkansen giapponese.

1.6 La situazione attuale

Al 2002 DB Energie (sussidiaria di DB Netze di DB AG, l'equivalente della RFI italiana) gestiva 7650 km di linee di trasmissione a 110 kV connesse a stazioni di conversione e centrali di produzione di proprietà.

Le linee di trasmissione sono messe a terra in maniera risonante attraverso bobine Petersen nelle 15 sottostazioni distribuite lungo la rete.

Nel 2003 ha preso servizio nell'impianto di Borken/Hessia il primo convertitore per spostamento del punto neutro e per il controllo delle correnti di terra (dovute al detuning dei circuiti risonanti ad opera delle capacità del circuito, della bobina Petersen per la prima e delle armoniche di corrente prodotte da veicoli a controllo elettronico per le seconde).

Le linee di trasmissione tedesche a 16 2/3 Hz sono pure connesse ai network isofrequenziali dei paesi confinanti, a Zirl e Salisburgo per quanto riguarda l'Austria e a Etzwilen con la rete svizzera tramite trasformatore a prese multiple per il controllo dei flussi di potenza (sottolineiamo che la suddetta rete è a tensione diversa, 132 kV e francamente a terra).

All'anno 2000 il livello energetico delle reti pubbliche interconnesse a 50 Hz della Germania era di 575 TWh/a, ben 50 volte quello delle reti per trazione.

Però la totale potenza installata di tutti i veicoli di trazione era sette volte la totale potenza installata di generazione.

Gli ultimi generatori a frequenza ferroviaria dalla potenza di 110 MW per la copertura dei carichi di base nei nuovi stati entrati a far parte della federazione tedesca (cioè quelli appartenenti alla vecchia DDR) sono stati costruiti a Kirchmöser vicino a Berlino e Schkopau in Sassonia.

Già dagli anni '50 in poi, infatti, erano stati installati diversi convertitori rotanti alimentati dalla rete pubblica per il controllo dei picchi di potenza richiesta anche se gli stessi lavoravano a costi simili a quelli delle centrali specifiche per l'alimentazione ferroviaria.

Dal 1995 quindi si usano convertitori statici, più costo-effettivi.

Per quanto riguarda le linee aeree a 15 kV, esse coprono una distanza di 19100 km e l'85% del traffico ferroviario.

Esse sono alimentate dalle linee di trasmissione a 110 kV attraverso 178 sottostazioni dalla potenza nominale compresa tra 20 e 40 MW ciascuna distanti l'una dall'altra dai 20 ai 100 km.

Durante l'esercizio regolare le sezioni sono longitudinalmente e lateralmente accoppiate, cosa che innalza enormemente la qualità della tensione e permette un uso agevole dell'energia da frenatura a recupero dei veicoli.

Brevi tratti di proprietà delle ferrovie federali sono esercitati in corrente continua, ci si riferisce alle metropolitane di Amburgo e Berlino.

Inoltre una stazione di compensazione centralizzata delle correnti reattive del treno metropolitano classe 420 a controllo di fase è stata installata presso la stazione Pasing di Monaco di Baviera.

La compensazione è tuttora usata anche in altri stati, come ad esempio la Norvegia che usa la compensazione serie per migliorare la qualità della tensione nelle lunghe linee in aree scarsamente popolate.

2 TECNICHE E TECNOLOGIE DELLA TRAZIONE ELETTRICA

2.1 Funzioni basilari della trazione elettrica

La trazione elettrica si pone come primo principio il trasporto in maniera sicura di persone e cose con l'ausilio di linee elettriche per la trazione stessa.

Obiettivo dell'alimentazione elettrica per la trazione ferroviaria è quello di assicurare l'operatività dei veicoli elettrici ferroviari in maniera continua, affidabile e sicura.

L'alimentazione elettrica per la trazione comprende il totale degli impianti fissi necessari per l'esercizio ferroviario a corrente elettrica e si suddivide in più aree, quali la generazione, la trasmissione, l'alimentazione delle linee di contatto e l'esercizio delle stesse, il modo attraverso il quale i veicoli elettrici assorbono l'energia elettrica.

Tra le amministrazioni che usano la frequenza di 16 2/3 Hz per la trazione ferroviaria citiamo la Germania dove la trasmissione avviene tramite linee a 110 kV AC e la distribuzione per mezzo di sottostazioni alimentate dalle suddette linee di trasmissione e alimentati le linee aeree di contatto.

L'alimentazione attraverso linee di contatto dei veicoli, che si configurano come utilizzatori mobili, rappresenta la sostanziale differenza tra i sistemi per la trazione elettrica e la pubblica fornitura di energia elettrica.

Le linee aeree di contatto, la terza rotaia e altri sistemi a sbarra conduttrice sospesa sono tutti esempi particolari di linea di contatto.

Per venire incontro a specifici requisiti che rendono la trazione per l'esercizio ferroviario affidabile, in particolare alle linee di contatto vengono applicati tre criteri:

- al pantografo del veicolo elettrico si richiede una fornitura di energia elettrica senza soluzione di continuità;
- sempre al pantografo deve essere presente una tensione rispettante specifici e riconosciuti parametri di qualità;
- la rete energetica ferroviaria deve essere in grado di assorbire con continuità un'eventuale presenza di energia immessa in rete da veicoli elettrici a seguito di frenatura elettrica (cioè veicoli dotati e utilizzanti frenatura elettrica a recupero).

Va anche tenuto in conto che il tipico carico elettrico ferroviario differisce di molto da quello della pubblica rete non solo perché fortemente tempo-dipendente ma anche variabile con continuità per quando riguarda il suo posizionamento.

2.2 Tipologie di sistemi di alimentazioni per la trazione elettrica

I sistemi di alimentazione delle linee di contatto per la trazione elettrica si dividono essenzialmente in due famiglie, una che comprende i vari sistemi in corrente continua, l'altra quelli in corrente alternata monofase.

I principali sistemi per l'esercizio ferroviario a media e lunga percorrenza presenti nel mondo sono perciò:

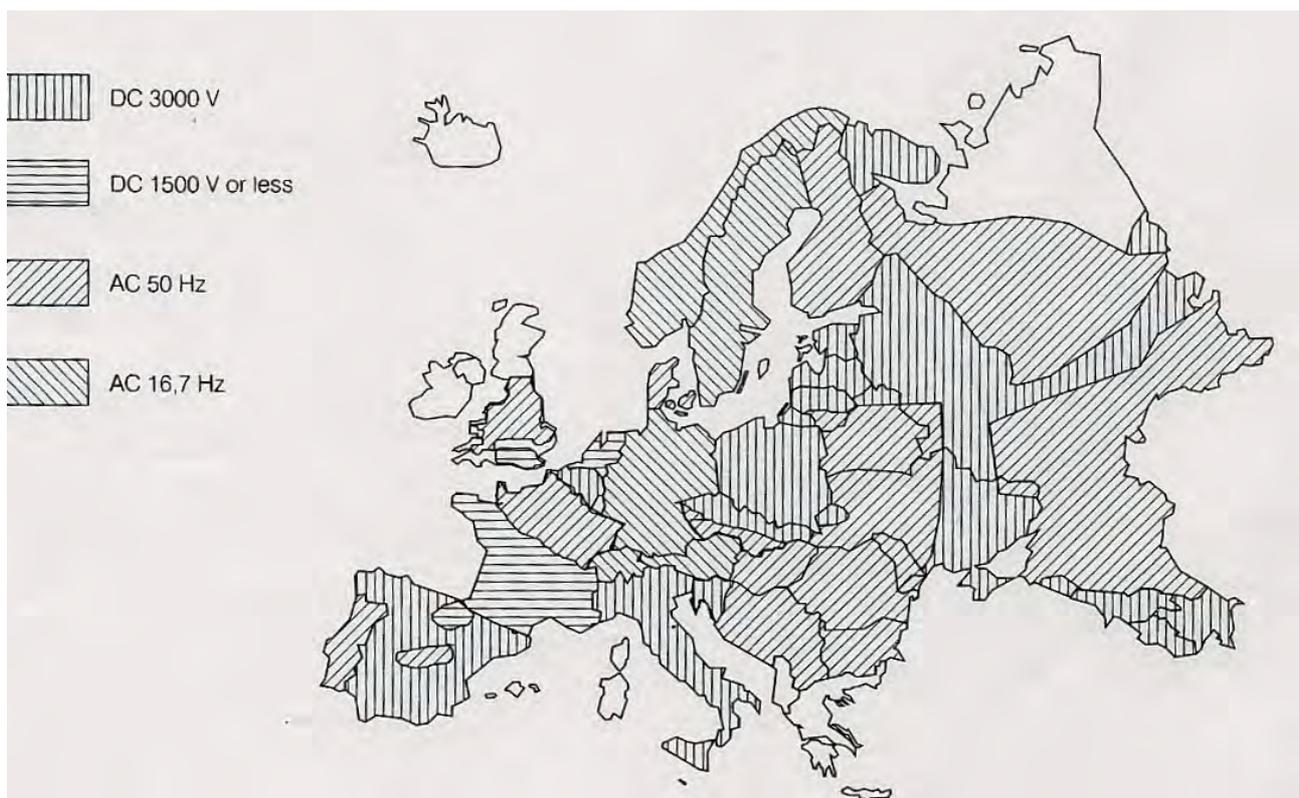
- in corrente continua a tensione di 1.5 kV;
- in corrente continua a tensione di 3 kV;
- in corrente alternata monofase a tensione di 15 kV e frequenza 16 2/3 Hz;
- in corrente alternata monofase a tensione di 25 kV e frequenza 50 Hz.

Sono presenti linee alimentate in corrente alternata monofase a 12.5 kV 25 Hz e 25 kV 60 Hz (USA) nonché in corrente continua a 600/750 V .

Le ultime sono lo standard per quanto riguarda l'esercizio di linee di trasporto di massa urbane e suburbane.

Alla fine del 1997 nel mondo erano presenti 182000 km di linee ferroviarie elettrificate per la lunga e media percorrenza, di cui:

- circa 20000 km, 11% del totale, di linee DC 1.5 kV;
- circa 70000 km, 38% del totale, di linee DC 3 kV;
- circa 33000 km, 18% del totale, di linee AC 15 kV 16 2/3 Hz;
- circa 60000 km, 33% del totale, di linee AC 25 kV 50 Hz.



Diffusione dei vari sistemi di alimentazione delle linee ferroviarie in Europa

Sistemi di alimentazione delle linee ferroviarie presenti in Europa in conformità alla direttiva EN 50 163

Tensione di alimentazione	Un [V]	Umin2 [V]	Umin1 [V]	Umax1 [V]	Umax2 [V]	Umax3 [V]
DC 600 V	600		400	720	770	1015
DC 750 V	750		500	900	950	1269
DC 1.5 KV	1500		1000	1800	1950	2538
DC 3 KV	3000		2000	3600	3900	5075
AC 15 KV 16 2/3 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24311
AC 25 KV 50 Hz	25000	17500	19000	27250	29000	38746

Un : tensione nominale di alimentazione

Umin2 : minima tensione non permanente, ammessa per 10 minuti

Umin1 : minima tensione permanente ammessa

Umax1 : massima tensione permanente ammessa

Umax2 : massima tensione non permanente, ammessa per 5 minuti

Umax3 : massima tensione non permanente, ammessa per 20 millisecondi

2.3 Il perché (storico) della scelta della frequenza ridotta rispetto a quella industriale nei sistemi a corrente alternata monofase

Riconosciuta per la trazione ferroviaria l'adeguatezza del motore a collettore con eccitazione serie che presentava un curva coppia/velocità di tipo iperbolico e perciò estremamente favorevole, il secondo passo fu la combinazione di tale tipo di motore con l'alimentazione dello stesso a corrente alternata che permetteva una facile variazione della tensione della stessa mediante trasformatore. L'uso di un motore a collettore alimentato a corrente alternata monofase a frequenza industriale poneva però altri tipi di problematiche, non risolvibili con le tecnologie dell'epoca. Ricordiamoci che siamo nella prima parte del '900.

Le problematiche erano essenzialmente tre.

Innanzitutto l'usura del collettore.

Il collettore di un motore, qualora alimentato con una corrente a 50 Hz, presentava una forte usura a causa della tensione indotta che sappiamo essere frequenza dipendente.

Poi le interferenze.

Cablaggi che correvano paralleli al sistema di alimentazione per la trazione subivano un'interferenza di tipo induttivo di valore elevato e proporzionale alla frequenza delle corrente nel sistema di trazione.

Da ultimo l'elevata asimmetria delle tensioni nella rete trifase a 50 Hz che alimentava direttamente quella monofase per la trazione presentandosi come un carico squilibrato.

Solo molto più avanti, con i grossi progressi nel campo dell'elettronica di potenza, l'alimentazione a frequenza industriale ha preso il sopravvento tanto da essere il sistema preferito da quei paesi che solo recentemente hanno scelto di elettrificare le loro linee ferroviarie.

Ciò nonostante il sistema a 15 kV 16 2/3 Hz ha dato prova, e lo fa tuttora, di essere in grado di coprire grosse richieste di potenza rivelandosi particolarmente adatto per le linee ad alta velocità e alta capacità.

2.4 Confronto attuale tra i due sistemi in corrente alternata monofase

Usando la frequenza industriale anziché quella ferroviaria ridotta, gli ingenti costi di una generazione e conversione separata, nonché trasmissione separata potrebbero essere eliminati. Si presentano però altre problematiche.

A frequenza tripla risulta opportuno elevare la tensione di un fattore $\sqrt{3}$, da 15 a 25 kV, avendo correnti circolanti ridotte dello stesso fattore, comparabili cadute di tensione, a parità di catenaria e distanziamento delle sottostazioni.

L'induttanza per unità di lunghezza si mantiene sui 1.2 - 1.5 mH/km nel caso di linea a semplice binario, sui 0.75 - 0.91 mH/km nel caso di linea a doppio binario.

Usando però una catenaria alla medesima altezza sul piano del ferro, la maggior tensione alla linea di contatto richiede una maggior spazio per l'isolamento in aria, il che si traduce in un abbassamento del livello del tetto dei veicoli di circa 25 cm, tradotto si richiede l'utilizzo di veicoli dalla sagoma ridotta, con tutti i problemi che la cosa produce.

Il problema principale, tuttavia, è quello del prelievo monofase da rete trifase a media tensione che per ragioni di costo sarebbe la scelta preferibile.

Si presenta perciò un'asimmetria nelle correnti circolanti nella rete trifase che, facendo ricorso alla teoria delle componenti simmetriche, può essere vista come un terna diretta di correnti associata ad una inversa della medesima ampiezza.

Tale sequenza inversa di correnti induce una sequenza di tensioni nelle impedenze interne della linea trifase pure inversa che si traduce in un campo contro-rotante nelle altre macchine a campo magnetico rotante connesse alla rete trifase.

Tali macchine tendono perciò a sviluppare tutta una serie di inconvenienti, come coppie frenanti, oscillazioni elevate di coppia a frequenza doppia della rete e perdite resistive ingenti.

Questi inconvenienti risultano particolarmente accentuati in quanto nei motori asincroni trifase presentano scorrimento $2 - s$ ($s \ll 1$) per quanto riguarda per la sequenza inversa e il campo contro - rotante, con la sola reattanza di dispersione a limitare la corrente.

Perciò si richiede che nel punto di accoppiamento tra la rete monofase per la trazione elettrica e la rete trifase pubblica l'ampiezza U_i della tensioni in sequenza inversa non ecceda l'1% nel lungo periodo o il 3% nel breve della tensione nominale.

U_i è legata alla tensione nominale U_n , alla potenza apparente nominale monofase S_{nm} e alla potenza apparente trifase di corto-circuito $Stcc$ dalla relazione $U_i = S_{nm} * U_n / Stcc$

$Stcc$ è a sua volta esprimibile come U_n^2 / X_t , dove X_t rappresenta la reattanza associata alla rete trifase.

Basti pensare che nel 50% dei punti di connessione con la rete nazionale a 110 kV di un paese fortemente industrializzato come la Germania, con situazioni peggiori in altri paesi, il valore di $Stcc$ è inferiore ai 5 GVA, per capire che quello dell'asimmetria non è un problema da poco.

Si cerca perciò di allacciare la rete di trazione a punti a potenza di corto-circuito la più alta possibile, ad esempio reti pubbliche a 220/380 kV, oltre all'allacciamento di sottostazioni adiacenti a coppie di fasi diverse realizzando una compensazione a livello di insieme, dell'asimmetria nelle reti pubbliche.

Allacciamento a coppie di fasi differenti in sottostazioni adiacenti significa sfasamento della tensione e della corrente in una sezione di linea di contatto alimentata da una sottostazione rispetto a quella alimentata dalla sottostazione adiacenti.

Ciò richiede il non collegamento elettrico tra sezioni adiacenti con tratto neutro che deve essere percorso dal veicolo senza assorbire potenza (a pantografo abbassato o più spesso ad interruttore generale di bordo aperto) con complicazione evidente dell'esercizio ferroviario e dei mezzi.

Non collegamento elettrico tra le sezioni significa pure uso forzato dell'alimentazione a sbalzo rinunciando a quella bilaterale in uso invece nelle linee alimentate a frequenza ferroviaria, oltre a quelle in corrente continua, la quale ha innegabili vantaggi per quanto riguarda la qualità della

tensione e l'affidabilità del sistema.

In effetti al fine di garantire il servizio in maniera continua, un numero di trasformatori superiore di più del 60% (fino al 300% in linee isolate ad alta velocità) rispetto alle linee a frequenza ferroviaria deve essere in servizio o pronto ad entrare in servizio qualora le circostanze lo richiedessero.

La cosa si traduce in una compensazione del basso costo dell'energia (circa 0.03 €/kWh) con il considerevole costo della potenza installata.

L'esborso di capitale per la realizzazione e la gestione dei due sistemi è circa uguale ma quello a frequenza industriale presenterebbe costi annuali superiori del 5% , almeno nelle condizioni della Germania.

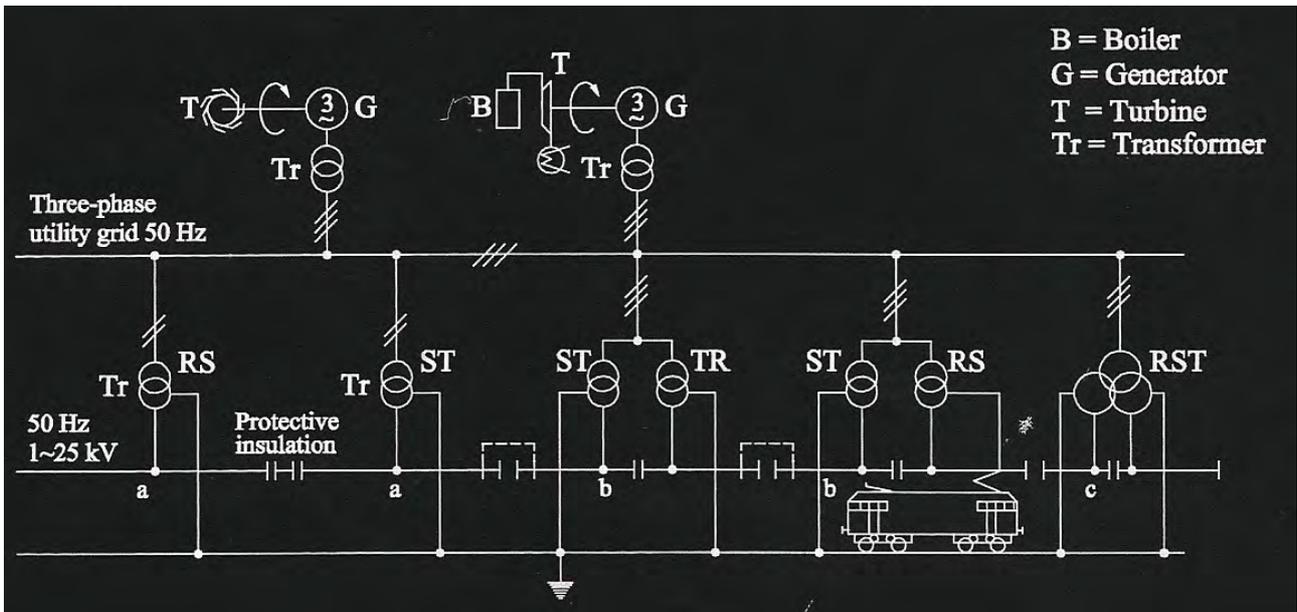
Inoltre in molti casi viene inibito l'utilizzo dell'energia prodotta da frenatura a recupero, vanificando uno dei principali vantaggi dati dal montaggio di motori asincroni trifase, con la conseguenza di dover installare a bordo reostati di frenatura e chopper.

Nelle linee a forte domanda di potenza può essere usata pure una sorta di compensazione attiva in impianti appositi.

L'asimmetria perciò, attraverso i numerosi espedienti messi in atto per ridurre la stessa e gli effetti che ne derivano, riduce i margini di risparmio ottenuti dall'assenza di generazione, conversione e trasmissione dedicati tipici dell'alimentazione a frequenza ferroviaria.

Comparazione dei sistemi a 16 2/3 Hz e 50 Hz

Sistemi a 16 2/3 Hz	Sistemi a 50 Hz
Tensione nominale 15 kV	Tensione nominale 25 kV, richiesti veicoli più bassi
Trasformatore principale e reattori di regolarizzazione della forma d'onda pesanti	Equipaggiamento di bordo più leggero
Generazione di potenza richiedente complessi macchinari speciali	Terna inversa di tensioni sul lato trifase da limitare all'1% della tensione nominale, richiesto punto di accoppiamento ad alta potenza di corto-circuito e/o compensazione dell'asimmetria
Catenaria longitudinalmente e trasversalmente accoppiata	Separazione di fase (tranne che a 380 kV)
Costo dell'energia sopra i 0.03 €/kWh; Miglior controllo dei picchi di potenza e dei guasti	Notevole costo della potenza installata, fornitore unico dell'energia elettrica
Numero di sottostazioni 100%	Numero di sottostazioni 160%
Potenza trasformata 100%	Potenza trasformata 160%, 400% per linee isolate ad alte prestazioni
Piena capacità di utilizzo dell'energia da frenatura a recupero (con veicoli con convertitori a quattro quadranti)	Limitata capacità di utilizzo dell'energia da frenatura a recupero
Esborso di capitale 100%	Esborso di capitale 100%
Costo annuale 100%	Costo annuale 105%



Tipico schema di alimentazione a 50 Hz