

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Specialistica in  
Ingegneria Meccanica



## **IL FENOMENO DELL'ARCO ELETTRICO NELLE LINEE PER L'ALTA VELOCITÀ FERROVIARIA**

Relatore: Prof. Dario Zaninelli

Tesi di Laurea di:  
TORA MARTA  
786932

Anno Accademico 2013/2014

*Per prima cosa, voglio ringraziare il Professor Zaninelli,  
e l'Ingegnere Brenna  
per l'aiuto e il supporto regalatomi in questi mesi.*

*Ringrazio mia zia Giulietta,  
per avermi sempre esortata a lottare con tutte le forze.*

*Ringrazio Liana e Iolanda,  
per tutto quello che mi hanno insegnato.  
Ringrazio Cristina, Veronica e Giacomo  
per esserci sempre stati.*

*Ringrazio mia mamma e mio papà  
per il sostegno e l'amore  
con cui mi hanno sempre accompagnata nella vita.*

*Infine ringrazio Stefano  
per essere la mia persona.*

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1. I sistemi elettrici per i trasporti</b>	<b>2</b>
1.1. Il contesto industriale	2
1.1.1. La trazione elettrica e la trazione diesel	3
1.1.2. La captazione della corrente	3
1.1.3. L'alimentazione dei sistemi ad alta velocità	5
1.1.4. I treni utilizzati	8
1.1.5. La linea aerea per la trazione elettrica	9
1.1.5.1. La linea aerea e il circuito di terra	9
1.1.5.2. I supporti per la catenaria	11
1.1.5.3. La poligonazione	13
1.1.5.4. La tensione e il meccanismo di tensionamento	13
1.1.5.5. La freccia	13
1.1.6. Il pantografo	14
1.1.7. La qualità della captazione	15
1.2. Il contesto scientifico	16
1.2.1. I circuiti elettrici	16
1.2.2. I sistemi a n gradi di libertà	17
1.2.3. La soluzione delle equazioni di moto	18
<b>2. Le linee AV/AC</b>	<b>21</b>
2.1. Le linee AV/AC a 2x25 kV – 50 Hz	21
2.1.1. Il sistema di alimentazione	21
2.1.2. Le sottostazioni elettriche	23
2.1.3. I posti ausiliari	25
2.1.4. I punti singoli	29
2.1.5. I posti di servizio	30
2.1.6. L'alimentazione dei servizi ausiliari e delle utenze di linea	30
2.2. L'analisi del sistema 2x25 kV – 50 Hz	32
2.2.1. Il principio di funzionamento teorico	32
2.2.2. Il funzionamento reale	33
2.3. Il sistema di segnalamento	36
2.3.1. Automatic Train Protection	37
2.3.2. Blocco automatico a correnti codificate: BAcc	37
2.3.3. SCMT	38
2.3.4. Sistema di segnalamento per l'alta velocità: ERTMS	38
2.4. Power Quality	38

<b>3. La modellizzazione dinamica del contatto catenaria pantografo</b>	<b>41</b>
3.1. Il modello dinamico della catenaria	41
3.2. Il modello dinamico del pantografo	47
3.3. Le equazioni del sistema catenaria pantografo	49
3.4. L'applicazione del controllo attivo al pantografo	52
3.4.1. Le equazioni del sistema controllato	53
3.4.2. L'analisi di stabilità del sistema catenaria pantografo	54
3.5. L'integrazione delle equazioni	56
3.6. L'irregolarità delle infrastrutture	59
3.6.1. Il disturbo introdotto dall'irregolarità del binario	60
3.6.2. Il disturbo introdotto dall'irregolarità della catenaria	65
3.6.3. La presenza di entrambi i disturbi	68
<b>4. L'arco elettrico</b>	<b>74</b>
4.1. Il meccanismo di formazione dell'arco elettrico	74
4.2. Il sistema di prova dell'arco elettrico	77
4.2.1. Il dispositivo di guida del filo di contatto	78
4.2.2. Il dispositivo di movimentazione del pantografo	78
4.2.3. Il sistema di controllo	79
4.2.4. I parametri della linea di contatto e dello strisciante del pantografo	80
4.3. L'esperimento sull'arco	81
4.3.1. Le proprietà elettriche dell'arco	81
4.3.2. La forma dell'arco elettrico	81
4.4. Analisi e discussione dei risultati	82
4.4.1. Analisi della tensione d'arco	82
4.4.2. Analisi della corrente d'arco	85
4.4.3. Durata dell'arco	86
4.5. Simulazione numerica e modello analitico del fenomeno	87
4.6. Impatto dell'arco sulle componenti	89
4.6.1. Impatto sul trasformatore principale	89
4.6.2. Impatto sulla linea di contatto e sullo strisciante	90
<b>Conclusioni</b>	<b>93</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>94</b>

## Introduzione

In Italia, come nel resto dei Paesi più sviluppati del Mondo, sono entrate in servizio, negli ultimi anni, le nuove linee ad Alta Velocità che presentano caratteristiche del tutto innovative rispetto alle linee storiche. Per questo motivo, anche se sono già entrati in piena funzione, questi moderni sistemi sono ad oggi ampiamente studiati per cercare di risolvere alcuni dei problemi che si sono manifestati durante il loro esercizio.

Nel presente lavoro si è quindi pensato di analizzare uno dei principali problemi che affligge le linee in AV, ovvero il fenomeno dell'arco elettrico.

Nel capitolo introduttivo verrà affrontato un discorso generale sulla trazione elettrica e sui requisiti fondamentali da conoscere per proseguire nella lettura del lavoro.

In seguito viene affrontata l'analisi del sistema dal punto di vista elettrico: si presenta la soluzione impiantistica adottata nelle nuove linee AV/AC italiane, compresa la verifica della ripartizione delle correnti fra i vari rami del sistema. Si presenta inoltre brevemente il nuovo sistema di segnalamento europeo ERTMS e le problematiche legate alla Power Quality per una corretta alimentazione dei dispositivi di segnale.

Nel terzo capitolo viene invece descritto il sistema dal punto di vista meccanico, e in particolare si analizza l'interazione tra pantografo e catenaria. Il sistema pantografo-catenaria riveste infatti, un ruolo fondamentale nell'esercizio dei sistemi ferroviari a trazione elettrica, e in particolar modo in quelli ad alta velocità. Comportamenti dinamici inadeguati di pantografo e catenaria influiscono negativamente sul contatto fra gli striscianti e il filo di contatto, limitando la velocità massima di esercizio del treno e dando luogo al sopra citato fenomeno dell'arco elettrico.

Nel quarto capitolo viene infine descritto il fenomeno: i motivi della sua formazione, lo studio delle grandezze fisiche che lo caratterizzano e le conseguenze che questo comporta sul sistema sul quale agisce.

# 1. I sistemi elettrici per i trasporti

## 1.1 Il contesto industriale

Si definisce trazione ferroviaria l'insieme dei vari sistemi sperimentati ed attuati, nel corso degli anni, allo scopo di trainare treni di veicoli sulle ferrovie; alcuni sono rimasti sperimentali, altri si sono consolidati e hanno continuato a svilupparsi sino ai giorni nostri.

I primi sistemi ad essere utilizzati sono stati quelli a trazione animale con cavalli o buoi, impiegati inizialmente per il trasporto di merci, ma in seguito anche per quello delle persone attraverso le antiche tranvie cittadine. Agli inizi dell'Ottocento in Inghilterra, venne utilizzata per la prima volta la trazione a vapore, grazie allo sviluppo del motore a vapore che andò a sostituire meccanicamente il cavallo per il traino dei convogli di carrelli e carrozze. Questo consentì la rapida diffusione delle ferrovie in tutto il mondo a cavallo tra il XIX e il XX secolo. Come combustibile per l'alimentazione delle caldaie venne utilizzato soprattutto il carbone fossile, ma in alcune aree del mondo anche il carbone di legna, la legna in pezzi e successivamente l'olio combustibile e la nafta. Venne sperimentata anche l'alimentazione a gas metano, subito abbandonata a causa di gravi incidenti. Dagli inizi del XX secolo infine, si è progressivamente sviluppato un ulteriore tipo di trazione basato sull'uso di motori elettrici. Tale sistema, definito di trazione elettrica, è ad oggi quello tecnologicamente più evoluto e caratterizza tutte le attuali ferrovie ad alta velocità di recente realizzazione. Le ragioni che hanno portato alla sua affermazione risiedono in una maggiore affidabilità ed economicità, in un minor inquinamento ambientale e infine in un recupero di energia nelle discese e nelle fasi di rallentamento e frenatura.

Per quanto riguarda l'Italia, inizialmente lo sviluppo di questi sistemi di trasporto venne frenato da fattori negativi quali l'accidentata orografia della nostra penisola e, soprattutto, la divisione politica e l'influenza politica straniera che indirizzava le scelte tecnologiche e di percorso delle linee secondo interessi diversi da quelli delle popolazioni che tali strutture avrebbero potuto servire. Tuttavia, alla fine del XIX secolo l'Italia, prima in Europa, cercò di sostituire la trazione a vapore con quella elettrica allo scopo di migliorare il comfort e la qualità del viaggio per i passeggeri. Lo sviluppo dei binari raggiunse il suo massimo prima della metà del XX secolo, ma a partire dagli anni Cinquanta vennero attuate politiche di soppressione di impianti, da molti oggi giudicate controproducenti e inopportune.

L'inizio del XXI secolo è stato caratterizzato dalla ripresa del programma di sviluppo delle linee, soprattutto di quelle ad alta velocità con i relativi collegamenti con l'Europa. La filosofia attualmente adottata nella progettazione è quella alta velocità/alta capacità anche per il trasporto pesante di merci speciali, con interconnessioni frequenti alla rete

ferroviaria classica e soprattutto con il passaggio definitivo dall'alimentazione elettrica a corrente continua a 3000 Volt a quella a corrente alternata a 25 kV. Si tratta di una scelta epocale che se da una parte le rende più versatili, moderne ed interoperabili, d'altro canto ne aumenta considerevolmente i costi di costruzione.

La rete delle ferrovie italiane ammonta, al 30 Giugno 2013, a 24.278 km di tratte di proprietà statale gestite dalla società Rete Ferroviaria Italiana, di cui 1.342 km sono linee per treni ad alta velocità. A queste vanno sommate quasi 3.000 km di proprietà regionale gestite da altre società di capitali pubblici e privati.

### **1.1.1 La trazione elettrica e la trazione diesel**

Prima di addentrarci nell'analisi dei sistemi elettrici per i trasporti dobbiamo capire il perché tale tipo di trazione sia preferibile rispetto a quella diesel. I vantaggi della trazione elettrica sono numerosi, citiamo qui i più importanti:

- Grande capacità di sovraccarico;
- Possibilità di installare elevate potenze unitarie e quindi maggiore spazio da poter dedicare a passeggeri e loro comfort. In particolare si possono adottare due soluzioni: una locomotiva in testa e una in coda nella quale sono concentrati tutti gli apparati e le attrezzature che servono per la trazione come avviene per esempio nella TAV, oppure una serie di elettromotrici nelle quali le apparecchiature sono posizionate sul tetto o sotto la carrozza che vengono utilizzate contemporaneamente per la movimentazione del treno come avviene su Italo e nelle Metropolitane.
- Elevate prestazioni raggiungibili in termini di accelerazioni/decelerazioni, senza danneggiare i motori;
- Trasporto di grossi volumi in un unico viaggio;
- Indipendenza da un'unica fonte in quanto l'energia elettrica viene generata utilizzando svariate fonti primarie;
- Assenza di gas di scarico;
- Riduzione della rumorosità in quanto si sente solo il rumore provocato dall'accoppiamento ruota-rotaia;

### **1.1.2 La captazione della corrente**

I moderni treni possono captare la corrente elettrica o da una terza rotaia o da una linea di trazione.

La terza rotaia è situata in mezzo o di fianco alle due rotaie su cui transita il treno. Il treno forma un contatto elettrico con la rotaia mediante un pattino che striscia su di essa. Spesso la terza rotaia è coperta da un isolante per proteggere eventuali lavoratori sui binari: in questo caso, il pattino dei treni è progettato in modo da strisciare sulla superficie laterale o inferiore della rotaia, consentendo così l'utilizzo della copertura isolante sulla superficie superiore. Esempi di sistemi funzionanti con la terza rotaia sono

la metropolitana di New York, quella di Londra, la U-Bahn di Vienna o la Metropolitana di Brescia in Italia. La linea M1 di Milano ha la particolarità di funzionare non solo a terza rotaia, ma anche con una quarta rotaia centrale per il ritorno negativo di corrente. La terza rotaia viene utilizzata anche su ferrovie ordinarie, come sulle S-Bahn di Berlino e Amburgo e su alcune linee nel Regno Unito.

La terza rotaia è un'alternativa alle linee aeree elettrificate che funzionano mediante pantografi posti sui treni, e presenta alcuni vantaggi tra cui quello di accettare una sagoma limite ridotta in altezza rispetto ai sistemi a linea aerea: ciò rende possibile un consistente risparmio nei costi di costruzione soprattutto nel caso di linee con frequenti gallerie. Risulta anche più economico l'impianto globale per la maggior semplicità non richiedendo infatti palificazioni, catenarie e sistemi di tesatura del filo. Permette senza eccessivi problemi anche il prelievo di fortissime correnti istantanee, cosa importante nel caso di traffico elevato come nelle metropolitane e suburbane.

Tuttavia dalla captazione da terza rotaia si passò per sicurezza alla captazione a linea aerea che è quella oggi universalmente usata. L'adozione della linea aerea incrementò l'energia trasmessa e la velocità, migliorò la sicurezza allontanando le parti in tensione dalle persone, ed inoltre semplificò parecchio la captazione in corrispondenza degli scambi e dei passaggi a livello; il nuovo sistema, però, determinò, come già detto, l'incremento della sagoma limite (e quindi delle relative opere d'arte come ponti e gallerie), e un generalizzato aumento dei costi per pali, sostegno e tensione dei fili, ecc.

I mezzi di trazione ferroviaria che prelevano la corrente dalla linea di contatto utilizzano un pantografo o altri tipi di apparecchi che connettono la linea col mezzo. Il circuito della corrente si conclude con il "ritorno" della corrente al sistema di generazione realizzata spesso attraverso le rotaie di corsa del mezzo stesso. Nel caso di mezzo senza rotaie metalliche (come nel caso dei filobus) il ritorno avviene con un secondo filo: in tal caso la doppia linea aerea è nota come bifilare. Lo schema seguito in genere dalla corrente è quello rappresentato in Figura 1.1.

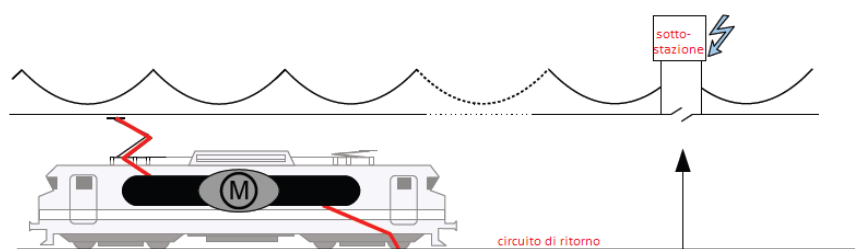


Figura 1.1 - Schema di circolazione della corrente elettrica

La qualità della captazione della corrente è un fattore da tenere adeguatamente sotto controllo poiché influisce pesantemente sulla qualità della trazione. Per permettere un contatto continuo ottimale, anche con elevate velocità del mezzo, occorre che il filo segua il percorso del mezzo stesso ed abbia una distanza abbastanza uniforme rispetto al livello della rotaia; questo è tanto più importante quanto più è



veloce il mezzo, dato che altrimenti le brusche variazioni di livello del filo potrebbero far staccare il pattino di presa ed interrompere l'alimentazione. Dunque catenaria e pantografo sono i due attori principali che influenzano la potenza di un treno: nel corso del tempo per entrambi si sono susseguite delle evoluzioni e quindi sono disponibili in molte forme. Nei prossimi capitoli proveremo a spiegare le loro attuali configurazioni per i mezzi viaggianti ad alta velocità.

### **1.1.3 L'alimentazione dei sistemi ad alta velocità**

A partire dagli anni settanta vi è stato uno sviluppo dei vari sistemi ferroviari mondiali con l'obiettivo principale di ridurre i tempi di percorrenza. Nel 1964, in Giappone fu costruito il primo servizio ferroviario a 220 km/h sulla linea Tokyo-Osaka, mentre nel 1975, fu costruita in Europa la prima linea ad alta velocità destinata a collegare Parigi e Lione in meno di due ore. In seguito, grazie ai risultati ottenuti anche il resto dell'Europa si è spinta in questa direzione. Si è così cominciato a parlare di treni ad alta velocità, cioè di treni in grado di muoversi a velocità elevate e maggiori di 200 km/h. Il record di velocità è stato conquistato nel 1990 dal TGV francese (515 km/h), mentre un treno sperimentale a levitazione magnetica giapponese ha toccato i 581 km/h.

Per quanto riguarda l'utilità dei treni ad alta velocità, gli studi effettuati hanno identificato nel collegamento diretto tra due grandi città la migliore utilizzazione di questo tipo di treni che necessitano di poter effettuare il minor numero possibile di fermate intermedie per non perdere la loro caratteristica principale.

Allo scopo di potenziare e rendere competitiva la rete ferroviaria italiana nel 1991 è nata la TAV S.p.A., società con lo scopo di costruire nuove linee veloci dedicate.

L'esercizio ferroviario ad alta velocità pone al sistema d'alimentazione elettrica una serie di problemi, legati fondamentalmente all'elevata potenza assorbita ed alla captazione di corrente. La potenza impiegata aumenta rispetto alle linee storiche a causa di maggiori velocità raggiunte, maggiori resistenze aerodinamiche, masse superiori, richieste di comfort superiori, per potenze totali richieste dell'ordine di 8-12 MW/treno. Oltre all'adeguato dimensionamento degli impianti fissi d'alimentazione per quanto attiene potenze installate, cadute di tensione, riscaldamento dei conduttori, intervento selettivo delle protezioni, nell'AV assume importanza fondamentale la captazione di corrente, che investe tutta una serie di problemi di natura meccanica ed elettrica, con ripercussioni sull'esercizio e la manutenzione.

Dal punto di vista elettrico fondamentale risulta la scelta della tensione di alimentazione  $V$ , dalla quale dipendono il valore di corrente  $I$  che deve captare il pantografo, la sezione della linea di contatto, il tipo e il numero di striscianti. Sotto questo punto di vista il sistema in c.c. per il quale la tensione nominale è finora limitata a 3 kV, non è certamente favorito. L'assorbimento di 12 MW corrisponde a correnti di linea dell'ordine di 4 kA per treno e di 2 kA per locomotiva: quest'ultima intensità è ritenuta un limite per un pantografo, nell'esercizio ad AV. Occorrono quindi due pantografi in presa per ciascun convoglio, con archetti relativamente pesanti; Il secondo

pantografo, trovando la linea già fortemente perturbata, lavora però in condizioni peggiori del primo. Le sperimentazioni condotte recentemente con due pantografi in presa hanno dimostrato che la captazione è soddisfacente fino a 270-280 km/h, ma che sopra questo limite il secondo pantografo, pur avendo ancora a 300 km/h una percentuale di distacchi contenuta, è soggetto a notevoli azioni dinamiche. La velocità di 300 km/h è attualmente ritenuta "normale" per l'AV, e si pensa addirittura di raggiungere livelli più elevati: appare quindi chiaro come il sistema a 3 kV c.c. non possa essere considerato idoneo a garantire, con i necessari margini, un traffico di forte intensità ad AV.

In questa situazione sono favoriti i sistemi ad alta tensione (AT), che consentono in primo luogo un maggior distanziamento fra le sottostazioni di trazione ed un alleggerimento della catenaria, in sostanza un minor costo degli impianti fissi. Alta tensione significa, per ora, corrente alternata monofase (c.a.m.), adottata all'estero per tutte le linee o reti ad AV, con tensioni di 15 kV oppure di 25 kV. Ai vantaggi insiti nel trasporto dell'energia ad alta tensione, la corrente alternata aggiunge, nel campo della trazione, quelli della facilità ed economicità della riduzione della tensione a bordo, mediante il trasformatore, e della semplicità e affidabilità dei sistemi di protezione, a terra e a bordo. La riduzione delle correnti a valori dell'ordine delle centinaia di ampere facilita inoltre il problema della captazione, sia perché, con l'alleggerimento dell'archetto, migliora il comportamento dinamico del sistema pantografo/catenaria, sia perché si richiede un solo pantografo in presa per ciascun treno.

In Italia, il sistema di trazione elettrica (TE) scelto per le nuove linee ad Alta Velocità/Alta Capacità è del tipo 2 x 25 kV - 50 Hz (catenaria alla tensione alternata di +25 kV, feeder parallelo alla linea alla tensione di -25 kV collegati tra loro per mezzo di autotrasformatori funzionanti alla frequenza di 50 Hertz). Ad oggi è questa la soluzione ingegneristica ritenuta migliore in assoluto sia per la potenza sviluppabile lungo linea (fino a 2 MW/km) che per la capacità circuitale di minimizzare le esposizioni ai campi elettromagnetici. Il sottosistema energia del sistema AV/AC viene alimentato tramite allacciamenti diretti con stazioni ad Altissima Tensione (380 – 220 kV) della rete elettrica nazionale (RTN). Gli allacciamenti sono realizzati attraverso un insieme di apparecchiature dedicate ("stallo") sulla sbarra ad altissima tensione (AAT), tramite un autotrasformatore di elevata potenza (250 MVA), con il secondario alla tensione di 150 o 132 kV (in funzione della zona geografica italiana di riferimento) su di una sbarra dedicata per RFI, dalla quale è derivato successivamente l'elettrodotto di proprietà RFI che alimenta direttamente una sottostazione elettrica (SSE) alla medesima tensione primaria di 150 o 132 kV. Lo schema di alimentazione delle varie sottostazioni elettriche che alimentano la linea ad alta velocità (denominato "entra - esci") possiede la ridondanza delle alimentazioni conferendo al sotto sistema energia un'affidabilità complessiva estremamente elevata.

Le sottostazioni elettriche che alimentano la linea ad alta velocità sono dislocate lungo la linea stessa ad una distanza di circa 48 km l'una dall'altra. Tali sottostazioni prelevano energia dagli elettrodotti solamente su due fasi e trasformano l'energia prelevata per tramite di due trasformatori monofase di potenza nominale 60 MVA (di cui uno riserva dell'altro) con il primario a 150 o 132 kV e il secondario collegato da un

capo a +25 kV dall'altro a -25 kV (da qui la denominazione 2x25 kV). L'inserzione bifase viene ciclata sul sistema di linea e quindi senza possibilità di funzionamento in parallelo.

Una difficoltà particolare dei sistemi di trazione monofase deriva dal fatto che, come noto, un prelievo monofase squilibra la rete di alimentazione trifase, rendendo dissimmetrico il sistema delle tensioni. Se tale dissimmetria supera un certo limite, si possono avere eccessivi riscaldamenti e malfunzionamenti sulle macchine del fornitore di energia e sugli apparecchi degli altri utenti. Per garantire il contenimento di questo squilibrio si deve cercare di prelevare da tutte e tre le fasi e di garantire la massima continuità di esercizio, obiettivo raggiunto utilizzando lo schema a V con due trasformatori identici i cui primari vengono collegati in maniera alternata nelle sottostazioni. Ciascuno dei due trasformatori alimenta un lato della linea di contatto di circa 25 km, corrispondente, alla potenza specifica nominale di linea, ad un assorbimento di circa 25 MW.

E' da notare inoltre che le SSE si comportano come utenze elettriche reversibili. Infatti qualora un treno circolante restituisca in linea energia di recupero (dovuta a frenata) e questa non venga contestualmente assorbita sulla linea stessa da un altro carico mobile, tale energia può essere restituita sulla linea primaria alimentante (a meno ovviamente delle perdite della linea stessa).

Tra due SSE successive sono previsti 3 posti intermedi di autotrasformazione di potenza installata pari a 2x15 MVA, che svolgono anche la funzione di parallelo pari/dispari, e di cui quello centrale è anche posto di sezionamento.

La Figura 1.2 mostra la ripartizione ideale (in assenza di cadute di tensione in linea e negli autotrasformatori) delle correnti, nel caso di 3 celle (cella = sezione tra due autotrasformatori) e con il treno al centro della 3ª cella.

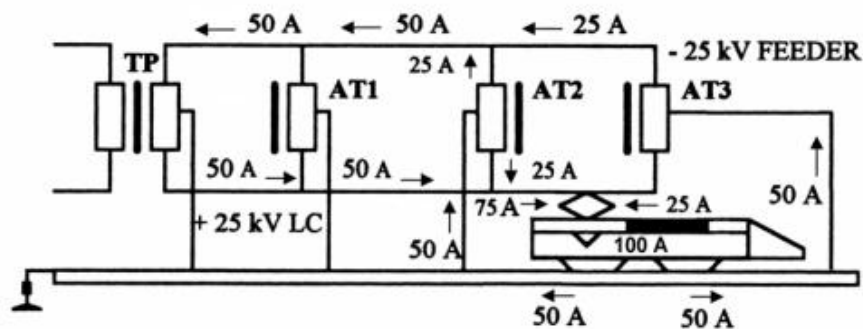


Figura 1.2 - Ripartizione ideale delle correnti

In questa situazione il carico viene alimentato in parti uguali dai 2 autotrasformatori adiacenti. Posta a 100 A la corrente assorbita dal locomotore, nella 3ª cella la corrente della linea di contatto proveniente da sinistra è di 75 A, pari alla somma dei 50 A forniti direttamente al carico e dei 25 A occorrenti per l'alimentazione a 50 kV dell'ultimo autotrasformatore; mentre quella proveniente da destra è di  $50 - 25 = 25$  A. Nelle prime due celle la corrente nel binario è nulla, mentre sulla linea di contatto e sul feeder le correnti sono uguali e di senso opposto e di valore pari alla metà della corrente assorbita

dal locomotore. Pertanto, l'energia è trasportata a 50 kV dalla linea bifase costituita dalla linea di contatto e dal feeder.

#### **1.1.4 I treni utilizzati**

I motori ed i servizi ausiliari dei moderni mezzi di trazione sono alimentati da convertitori elettronici di potenza pilotati da sistemi di controllo a microprocessore. Questa architettura consente di ottenere grandissimi vantaggi rispetto ai tradizionali mezzi di trazione elettromeccanici in termini di efficienza, riduzione di peso e volume, affidabilità e manutenibilità. La versatilità dei convertitori elettronici ha inoltre reso possibile la realizzazione economica di locomotive politensione, che consentono di superare la barriera all'integrazione del sistema ferroviario europeo rappresentato dalla disomogeneità dei sistemi di alimentazione presenti in Europa.

Lo sviluppo di un sistema europeo ad AV/AC comporta un intenso traffico internazionale di treni per passeggeri e merci, che devono quindi poter circolare senza vincoli su reti che sono dotate di diversi sistemi di alimentazione, condizione presente anche sul territorio italiano caratterizzato da linee storiche in corrente continua e linee AV/AC in corrente alternata. Le realizzazioni riguardanti il materiale rotabile differiscono tra loro in Europa, non solo a causa delle diverse tradizioni costruttive dei vari paesi, ma anche in conseguenza delle diverse situazioni socio-economiche e ambientali alle quali si devono adattare. Il materiale italiano ad alta velocità è prevalentemente costituito dall'ETR500 che è equipaggiato con due locomotive E404 con alimentazione a 3 kV<sub>cc</sub> e 25 kV<sub>ca</sub>. Le prestazioni di questo treno sono allineate con le altre realizzazioni europee del settore, con una potenza continuativa di 8,8 MW utilizzabile in tutto il campo di velocità da 90 a 300 km/h e con un elevato livello di comfort. Vi sono inoltre locomotive interoperabili che attualmente svolgono sia servizio passeggeri che merci in tutta Europa e che saranno destinate a sfruttare in pieno le linee AV/AC. Tali locomotive adottano schemi simili a quelli impiegati per l'ETR500.

L'ETR500 è il primo treno ad alta velocità a cassa non oscillante costruito in Italia: questo infatti non ha assetto variabile come i "Pendolini" in quanto tale tecnologia sarebbe risultata superflua poiché la morfologia della rete AV/AC di RFI in esercizio e di quella in costruzione non comporta raggi di curvatura troppo stretti. Il suo progetto partì negli anni ottanta per vedere la luce, con alcuni cambiamenti, negli anni novanta con la produzione in serie e l'utilizzo da parte di Trenitalia. Viene classificato spesso come elettrotreno, come indica la sigla ETR, ma non lo è in senso proprio poiché è composto da due locomotive E404 in doppia trazione simmetrica e da un numero variabile di carrozze intermedie (fino a 14 elementi, composizione comunque mai utilizzata in servizio) tra le due motrici. Ha un profilo aerodinamico filante ed è pressurizzato per evitare sgradevoli sbalzi di pressione per i passeggeri al momento dell'ingresso nei tunnel. La cassa è in lega di alluminio serie 7000 con l'imperiale in acciaio e i musetti in Kevlar.

Il suo progetto è stato sviluppato dal consorzio TREVI (TREno Veloce Italiano), costituito da Ansaldo, Breda, Fiat Ferroviaria, ABB Tecnomasio e Firema Trasporti,

ovvero il gotha italiano della produzione ferroviaria. La parte stilistica, ergonomica e lo studio degli ambienti interni è ad opera dell'azienda di progettazione italiana Pininfarina.

La locomotiva è provvista di due pantografi, uno per la catenaria a 3 kV<sub>cc</sub> e uno per la catenaria a 25 kV-50 Hz, collegati in parallelo; essendo ambedue isolati per i 25 kV possono essere impiegati, in condizioni di emergenza, per entrambi i sistemi di alimentazione. Un sensore di tensione abilita automaticamente la chiusura o dell'interruttore a 25 kV<sub>ca</sub> o dell'interruttore extrarapido a 3 kV<sub>cc</sub> in funzione del sistema di alimentazione presente, evitando così la possibilità di effettuare manovre errate da parte del personale di macchina. Inoltre il treno è dotato di una linea AT a 25 kV passante attraverso tutte le rimorchiate per consentire l'alimentazione delle due locomotive con un solo pantografo in presa. La motrice si configura automaticamente per il funzionamento sotto 3 kV<sub>cc</sub> o sotto 25 kV-50Hz nel modo seguente: dopo il sollevamento di uno dei due pantografi, il sistema riconosce, tramite un apposito sensore, la tensione di catenaria. Qualora venga riconosciuta la presenza della tensione continua e confermata con il selettore di catenaria dal personale di macchina, al comando di chiusura dell'interruttore di linea si ha la configurazione della motrice in cc e la chiusura dell'interruttore extrarapido. Qualora invece venga rilevata la presenza di tensione alternata, al comando di chiusura dell'interruttore di linea si ha la configurazione della motrice in ca e la chiusura dell'interruttore principale a 25 kV. Alla chiusura dell'interruttore di linea, indipendentemente dalla configurazione assunta dalla locomotiva, si ha l'avvio automatico dei convertitori del primo stadio e, successivamente, di quelli dei servizi ausiliari e del caricabatteria. Il cambio di configurazione viene attuato mediante opportuno combinatore.

### **1.1.5 La linea aerea per la trazione elettrica**

#### **1.1.5.1 La linea aerea e il circuito di terra**

Una linea di contatto è composta principalmente da un filo di contatto sospeso a dei pali. Tale cavo presenta una ridotta sezione rispetto alla sua lunghezza ed è costituito da materiali che uniscono una buona conduttività elettrica e una buona resistenza meccanica. Attualmente la maggior parte dei fili di contatto è realizzato in leghe di rame o stagno. Per quanto riguarda la disposizione della linea, essa può essere trasversale o longitudinale.

La disposizione trasversale è quella tipica di tram e filobus, è semplice ed economica, tuttavia il filo è sollecitato in modo non uniforme.

Invece la disposizione longitudinale, tipica dei treni, prevede, sovrapposto al filo di contatto un altro filo detto "catenaria" in treccia di rame, bronzo o acciaio zincato che ha lo scopo di mantenere parallelo al terreno il filo di contatto. Dalla catenaria partono a intervalli regolari dei fili verticali, i "pendini", che sono sufficientemente lunghi da sostenere il filo di contatto sempre alla stessa altezza. Il filo di contatto, tra un pendino e un altro, tende comunque ad assumere una curvatura verso il basso per effetto del

proprio peso, che tuttavia è molto limitata e non compromette il contatto tra il filo ed il collettore del mezzo. Oltre a questo sistema di fili, per mantenere il cavo il più rettilineo possibile, si utilizzano anche dei sistemi che suddividono la linea in tratti piuttosto brevi e ne mantengono un tiro limitando così le oscillazioni. Per l'alta velocità si è adottato il sistema a Y che offre una rigidità più regolare e diminuisce l'effetto dei pali.

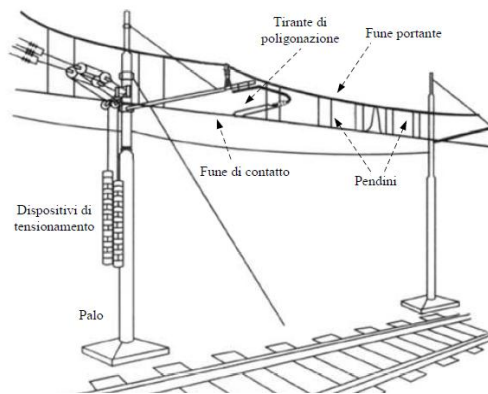


Figura 1.3 - Rappresentazione della catenaria

La elevazione in altezza della linea di contatto è un compromesso tra la limitazione dei costi nella costruzione delle opere legata alla ferrovia, poiché la linea più alta indurrebbe costruzione di pali più alti per il sostegno dei fili, ma anche gallerie di maggiori dimensioni o ponti di sovrappasso della ferrovia più alti; d'altra parte fili più bassi limiterebbero in altezza il transito di mezzi stradali ai passaggi a livello. Data la pericolosità del transito dei mezzi stradali ai passaggi a livello, di norma esistono barriere fisiche (portali metallici) che impediscono fisicamente l'accesso in zona del passaggio a livello ai mezzi stradali eccedenti in altezza. La tendenza attuale è comunque di eliminare i passaggi a livello (mediante la realizzazione di sottopassi o sovrappassi) per eliminare il rischio di pericolose collisioni dei mezzi stradali con la linea aerea di contatto.

Oltre a questi elementi sono presenti poi un feeder e un trefolo di ritorno e di terra. Il feeder, nei tratti di linea compresi tra un autotrasformatore e l'altro, nell'istante in cui in tali tratti transita un treno, contribuisce al ritorno della corrente, mentre costituisce prevalentemente il ritorno nelle tratte non occupate dal treno. Risulta montato direttamente sopra la sospensione con un isolatore portante. All'interno delle gallerie è sempre costituito da una conduttura aerea sostenuta da isolatori dello stesso tipo attaccati ai pendoli. Gli isolatori hanno le stesse caratteristiche di quelli della linea di contatto. Tutti i sostegni di ciascun binario sono collegati tra di loro alla sommità di un conduttore, il trefolo di terra, il quale ogni 1500 m circa è connesso al binario, tramite connessioni induttive, necessarie per le esigenze degli impianti di segnalamento. Tale conduttore esplica una triplice funzione: innanzitutto viene utilizzato come conduttore di ritorno per i servizi ausiliari lungo la linea, in quanto, in virtù della sua posizione prossima ai conduttori attivi della linea, attira una buona quota della corrente di ritorno, con riduzione di quella che si disperde nel terreno e conseguente diminuzione delle

interferenze. In secondo luogo è un conduttore di terra per la protezione contro il rischio di tensione sui sostegni, in quanto realizza un collegamento diretto dei sostegni al binario. Infine ha la funzione di protezione ceraunica, in quanto opera una efficace protezione contro le sovratensioni di origine atmosferica. I dispersori lineari sono realizzati in corda di rame e disposti parallelamente alle vie ad una certa profondità nel terreno in prossimità della base dei sostegni a essi collegati. Dal momento che i binari non sono isolati dal suolo, tali dispersori lineari, uno per ciascuno dei due binari, permette di aumentare la naturale conduttanza di dispersione del binario verso terra, in modo da diminuire i potenziali ritorno/terra e conseguentemente evitare il rischio di eccessive tensioni di contatto sia in esercizio normale sia in caso di guasto. Ai dispersori lineari vengono quindi connessi tutti i pali e le masse metalliche di apparecchiature posizionate lungo linea allo scopo di proteggere gli operatori dai contatti indiretti. Tale dispersore lineare riduce anche l'impedenza dei sostegni verso terra, precauzione importante ai fini della protezione contro le sovratensioni.

Per quanto riguarda le linee di contatto, sulla base delle potenze da trasmettere e dei limiti imposti alle cadute di tensione, la soluzione tendenzialmente adottata prevede una catenaria costituita in rame da 150 mm<sup>2</sup>, un filo di contatto in rame da 120 mm<sup>2</sup> entrambi alimentati a 25 kV, un feeder in alluminio-acciaio da 307 mm<sup>2</sup> alimentata a -25 kV. Infine il trefolo di terra, situato sulla sommità dei sostegni, in alluminio da 147,1 mm<sup>2</sup> e un trefolo di ritorno interrato con funzione di dispersore lineare in rame o alluminio da 95 mm<sup>2</sup>.

Le rotaie sono in acciaio di tipo 60 UNI. Tutti i sostegni di ciascun binario sono collegati tra loro dal trefolo di terra, il quale, ogni 1500 m circa è connesso al binario, tramite connessioni induttive, necessarie per il corretto funzionamento degli impianti di segnalamento. Le connessioni induttive sono dotate di due morsetti che vanno connessi uno per ciascuna rotaia, più una presa centrale collegata a terra. Esse sono dimensionate in maniera da funzionare da filtro passa basso. Infatti offrono bassa impedenza al passaggio della corrente di trazione a 50 Hz ed ostacolano il passaggio delle correnti di segnalamento in audiofrequenza.

### 1.1.5.2 I supporti per la catenaria

I pali servono per il sostegno della catenaria e di tutto il complesso dei cavi della linea aerea. La distanza tra due pali è variabile dai 27 m ai 63 m, a seconda della tipologia e dell'esposizione ai venti: infatti, nelle zone frequentemente esposte a violenti venti laterali, la distanza tra i sostegni è ridotta per evitare gravi danni a linea di contatto e pantografo. In genere sono posizionati a intervalli di 50-60 m in rettilineo.

I sostegni sono del tipo LS, normalmente usato per le elettrificazioni delle FS, con sospensione a puntone inclinato. Quelli all'aperto sono fissati ai blocchi di fondazione attraverso bulloni agenti su flangiatura e ciò sia per diminuire i tempi di montaggio sia per rendere possibile l'installazione direttamente sulle solette dei viadotti, che avranno delle apposite forature. In galleria invece sono previsti supporti penduli. L'altezza del filo di contatto sotto sospensione è di 5,35 m dal piano del ferro.

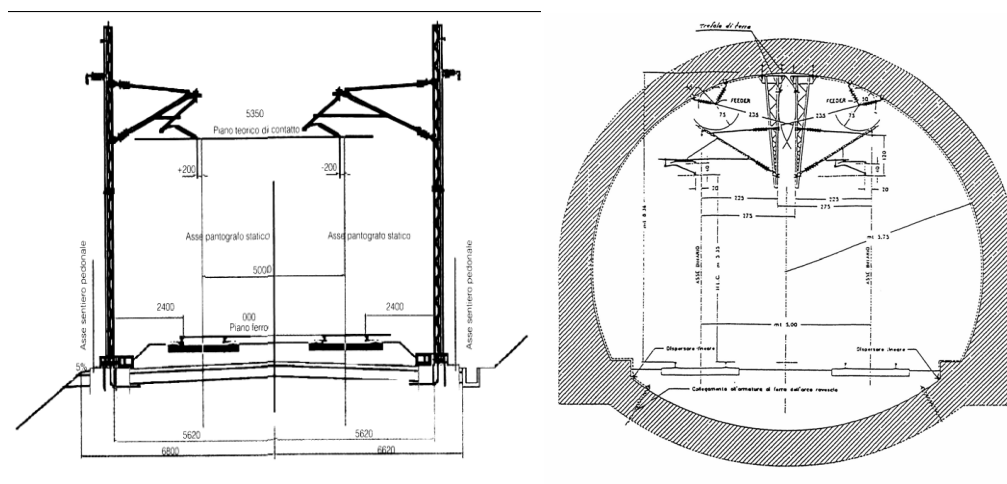


Figura 1.4 - Sezione trasversale all'aperto e in galleria

Affinché la catenaria sia la più regolare possibile, sia geometricamente che meccanicamente, il passaggio attraverso un palo non deve rappresentare un "punto duro": per questo viene utilizzata il sistema di sospensione. Quella adottata a puntone inclinato è fortemente innovativa: è realizzata in lega d'alluminio, con evidente risparmio nei pesi e conseguenti vantaggi per la migliore maneggevolezza sia nella posa in opera iniziale che nelle successive operazioni di manutenzione oltre, ovviamente, che migliori prestazioni dal punto di vista della corrosione e dell'installazione in ambienti aggressivi. La regolazione della configurazione è ottenuta mediante fori allineati che consentono di realizzare variazioni discrete della geometria, presentando minore difficoltà nel recupero di assestamenti e inesattezze di montaggio: a tal fine la differenza di assetto che si realizza tra due fori di regolazione successivi è tale da rientrare nei limiti di tolleranza. Tutti gli accoppiamenti fra i vari componenti sono realizzati mediante spine in acciaio inox e coppie di sicurezza, che consentono celerità d'installazione e insensibilità di serraggio. Sono stati eliminati pressoché totalmente collegamenti tramite bulloni.

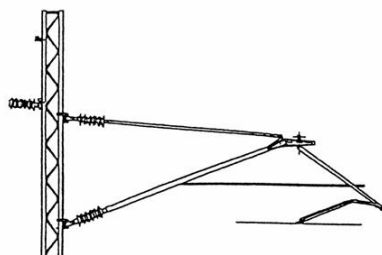


Figura 1.5 - Sospensione a puntone inclinato



### 1.1.5.3 La poligonazione

Come mostra la Figura 1.6, il filo di contatto assume una forma a zig-zag attorno all'asse del pantografo. Quando il treno è in movimento, il punto di contatto varia su tutta la larghezza dello strisciante e così facendo l'usura si distribuisce su un'area più grande.

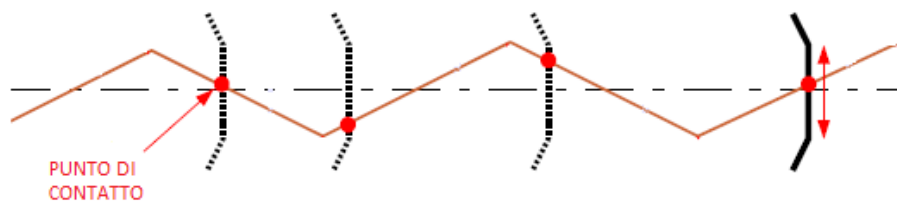


Figura 1.6 - Variazione del punto di contatto sul pantografo

### 1.1.5.4 La tensione e il meccanismo di tensionamento

Al conduttore è applicata una tensione con lo scopo di ridurre la freccia del filo di contatto e contemporaneamente per aumentare la velocità di propagazione delle onde nel filo di contatto. Essa può variare in funzione della dilatazione termica del cavo, motivo per cui, sulle grandi linee, un sistema di pulegge, denominato dispositivo di tensionamento regola la tensione assicurando una velocità di propagazione delle onde costante. Pertanto, la catenaria è segmentata in sezioni di circa 1400 m ai capi delle quali è posizionato tale dispositivo con lo scopo di garantire una tensione costante alla linea. Il passaggio da un tratto al successivo deve garantire una continuità elettrica e meccanica in modo tale da consentire una guida senza discontinuità del pantografo. Affinché questo sia garantito il filo di contatto nel nuovo tratto deve toccare il pantografo prima che quello del tratto precedente sia abbandonato. Il pantografo perciò si ritrova in alcuni punti chiamati tratte comuni, in contatto con più fili.

### 1.1.5.5 La freccia

In un tratto della linea di contatto la freccia deve assumere al massimo un valore di 1/1000 della lunghezza del tratto stesso. Questo valore è assunto poiché si verifica un miglioramento della qualità della cattura. I fili di contatto tedeschi, per esempio, sono costruiti con una freccia nulla nel tratto e il piano di contatto risulta perfettamente orizzontale.

### 1.1.6 Il pantografo

Il pantografo è il sistema di sospensione che permette al veicolo ferroviario la captazione dell'energia elettrica. È costituito da un cinematismo a doppio quadrilatero tramite tubolari o scatolati d'acciaio che conferiscono in particolare al quadrilatero superiore una significativa flessibilità.

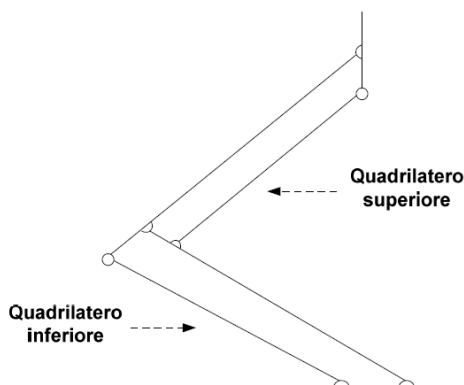


Figura 1.7 - Cinematismo del pantografo

Il cinematismo permette di ottenere un moto di pura traslazione verticale dell'asta verticale all'apice del quadrilatero superiore. Quest'asta è solitamente l'estremo inferiore della sospensione ed è quindi importante evitare che si sposti lateralmente per un corretto funzionamento della sospensione stessa. La struttura cinematica è completata dai due livelli di sospensione e dagli archetti. Alla base del quadrilatero inferiore è presente un attuatore pneumatico che solleva il quadrilatero stesso e fornisce il precarico statico, ossia la forza necessaria per garantire il contatto tra fune e strisciante. L'attuatore pneumatico è generalmente in parallelo ad uno smorzatore costituendo così la sospensione primaria. Il collegamento tra i due quadrilateri avviene tramite tre cerniere che collegano le rispettive aste: questa parte è comunemente detta naso. Il quadrilatero superiore è collegato agli archetti dal secondo livello di sospensione: l'estremo della sospensione appartenente al quadrilatero superiore è detto quadro, mentre l'estremo superiore sono gli archetti che ospitano gli striscianti. La sospensione secondaria è costituita solitamente da molle ad elica a passo variabile e generalmente non sono accoppiate ad uno smorzatore vero e proprio ma fungono esse da elemento smorzante. Gli archetti solitamente in acciaio o in lega leggera, hanno fissati gli striscianti, elementi realizzati con materiali resistenti agli agenti atmosferici, con basso coefficiente d'attrito e con buona conducibilità elettrica; nel tempo si sono succeduti vari tipi di materiali, in genere leghe a base di rame; oggi si cerca di utilizzare striscianti in grafite e rame sinterizzati, poiché risulta più semplice la manutenzione del pantografo rispetto a quella della catenaria.



Figura 1.8 - Pantografo ATR95

Nei mezzi di trazione ferroviaria, in genere, vengono montati due pantografi. Questo per evitare che, in caso di guasto del pantografo in uso, il treno venga immobilizzato: dunque è sufficiente escludere il pantografo guasto dal circuito facendolo abbassare e sostituirlo per l'alimentazione con l'altro pantografo facendolo sollevare. In Italia viene prescritto l'uso normale del pantografo posteriore rispetto al verso di marcia; infatti se fosse utilizzato quello anteriore, in caso di rottura dello stesso i frammenti potrebbero mettere fuori uso anche quello incontrato subito dopo.

### **1.1.7 La qualità della captazione**

La qualità della captazione di corrente è una garanzia di buon funzionamento di una linea commerciale e dipende dall'accoppiamento tra il pantografo e la catenaria: se il contatto è interrotto la potenza dei motori elettrici viene interrotta. Quando vi è separazione tra pantografo e filo si ha generazione di un arco, pertanto il numero di archi per secondo è un ottimo strumento di misura della qualità della captazione. La qualità della captazione dipende anche dalla condizione e dalla regolarità della catenaria. Se catenaria o pantografo hanno un difetto, la qualità della captazione sarà notevolmente degradata. Anche le condizioni meteorologiche possono influenzare la captazione: un forte vento può infatti provocare uno spostamento laterale del filo di contatto che sconvolge la dinamica tra pantografo e catenaria.

Affinché il passaggio di corrente avvenga correttamente, la forza con cui il pantografo preme l'archetto contro la catenaria deve rimanere il più possibile costante e pari al valore di precarico statico assegnato in fase di progetto. Tuttavia la rigidità verticale della catenaria non risulta costante lungo lo sviluppo orizzontale della stessa, bensì assume un valore variabile con la posizione del pantografo lungo la campata, periodico nello spazio con periodo pari alla lunghezza della singola campata. A causa di tale rigidità variabile, il passaggio del pantografo sotto alla catenaria, a velocità diversa da zero, produce delle oscillazioni sia nella catenaria che nel pantografo, con conseguente variazione della forza di contatto. Man mano che cresce la velocità di

percorrenza, la variazione della forza di contatto aumenta per effetto dell'interazione dinamica tra il pantografo e la catenaria. Il rendimento della trasmissione di corrente diminuisce fino a risultare compromesso. Nel caso in cui la forza di contatto si annulli, con distacco del pantografo dalla linea, insorge il fenomeno dell'arco elettrico, gravemente dannoso per la linea stessa. L'interruzione di erogazione della corrente danneggia anche lo strisciante, provocando sia un incremento di usura, sia disturbi nell'azionamento. Per poter prevenire questo inconveniente, si possono ottimizzare le caratteristiche elastiche, viscosi ed inerziali del pantografo e della catenaria. In particolare risulterebbe vantaggioso alleggerire le masse del pantografo. Questo provvedimento è tuttavia limitato dalla resistenza meccanica e ad usura necessaria al materiale del pantografo nella zona di contatto, responsabile della conduzione di elevate correnti e soggetto all'usura per strisciamento. Il quadro del pantografo deve poi avere una propria resistenza, anche per ragioni legate alla sua deformabilità, limitando così la riduzione delle masse. Per quanto riguarda la catenaria, risulterebbe vantaggioso l'aumento della rigidità strutturale. Tuttavia questo provvedimento è del tutto irrealizzabile in quanto imporrebbe la sostituzione delle catenarie lungo le linee di percorrenza con costi insostenibili. Da qualche anno si è rivolta l'attenzione alla possibilità di controllare attivamente il pantografo, mediante uno o più attuatori montati a bordo delle motrici, in modo da non dover intervenire sulle infrastrutture ferroviarie e poter al contempo aumentare la potenziale velocità di marcia del rotabile.

## 1.2 Il contesto scientifico

### 1.2.1 I circuiti elettrici

Il movimento ordinato di cariche in una direzione, determina una corrente elettrica. In un conduttore filiforme viene definita come intensità della corrente elettrica, indicata con  $I$ , la quantità complessiva di carica  $q$  che fluisce attraverso una sezione qualsiasi del conduttore, nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ :

$$I = q / \Delta t$$

Questa espressione fornisce, in realtà, la corrente media nell'intervallo  $\Delta t$ : per avere la corrente istantanea, occorre considerare il limite per  $\Delta t \rightarrow 0$ :

$$i(t) = dq/dt$$

Se il flusso di cariche attraverso la sezione in esame si mantiene costante nel tempo, si è in presenza di una corrente continua. Si stabilisce convenzionalmente che la corrente fluisce dal punto a potenziale più alto verso quello a potenziale più basso, ossia si

assume come verso positivo della corrente quello concorde al movimento di cariche elettriche positive.

Collegando un generatore di tensione a un materiale conduttore, in quest'ultimo circolerà corrente. Il rapporto tra la tensione applicata a un conduttore e la corrente che circola in esso è costante. Questo coefficiente di proporzionalità viene denominato resistenza  $R$  ed è un parametro caratteristico del conduttore: esso misura la difficoltà che le cariche elettriche incontrano nell'attraversare il conduttore.

Si definiscono invece alternate, le correnti e le tensioni che variano sinusoidalmente nel tempo e che presentano dunque la seguente espressione:

$$i(t) = I \sin(\omega t + \varphi)$$

dove  $I$  rappresenta il valor medio,  $\omega$  la pulsazione del segnale e  $\varphi$  la fase iniziale del segnale.

Va inoltre osservato che il fenomeno del magnetismo naturale è dovuto al movimento ordinato di particelle cariche elementari a livello subatomico. Una corrente  $I$ , essendo un flusso ordinato di cariche elettriche in movimento, produce quindi un campo magnetico: fenomeni elettrici e magnetici sono strettamente correlati, al punto da arrivare per essi alla definizione di elettromagnetismo.

### 1.2.2 I sistemi a $n$ gradi di libertà

La metodologia per la scrittura delle equazioni di moto per sistemi discreti a corpi rigidi a più gradi di libertà può essere generalizzata adottando la tecnica definita "Multi-Body System Technique", molto adatta a essere implementata su calcolatore per lo studio dei sistemi a corpi rigidi tra loro mutuamente interconnessi.

Considerando un sistema a  $n$  gdl possiamo definire:  $\underline{x}$  il vettore delle  $n$  coordinate indipendenti che definiscono il moto generico del sistema e  $\underline{Y}$  il vettore delle  $m$  coordinate fisiche comode per definire le varie forme di energia che compaiono nelle equazioni di Lagrange. A questo punto si procede nel seguente modo:

- Definisco in funzione delle coordinate fisiche  $\underline{Y}$  e in forma matriciale, l'energia cinetica  $E_c$ , potenziale  $V$ , dissipativa  $D$  e il lavoro virtuale  $\delta^*L$  delle forze esterne attive;
- Definisco i legami tra le coordinate fisiche  $\underline{Y}$  e le coordinate indipendenti  $\underline{x}$  attraverso le matrici  $[\lambda]$  che rappresentano lo Jacobiano:

$$\underline{Y}(\underline{x}) = [\lambda] \underline{x}$$

- Esprimo le varie forme di energia in funzione delle variabili indipendenti e applico le equazioni di Lagrange che, in forma matriciale, assumono la seguente espressione:

$$\left\{ \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial E_c}{\partial \dot{x}} \right\} \right\}^T - \left\{ \frac{\partial E_c}{\partial x} \right\}^T + \left\{ \frac{\partial D}{\partial \dot{x}} \right\}^T + \left\{ \frac{\partial V}{\partial x} \right\}^T = \underline{Q}$$

In cui il termine  $\underline{Q}$  rappresenta un vettore colonna il cui generico  $i$ -esimo elemento  $Q_i$  coincide con il rapporto tra il lavoro virtuale  $\delta^* Li$  compiuto dalle forze attive dovuto al solo generico spostamento virtuale  $\delta^* x_i$  e lo spostamento stesso.

Seguendo questi passi si giunge alla forma finale dell'equazione di moto che risulterà del tipo:

$$[M]\ddot{x} + [R]\dot{x} + [K]x = \underline{Q}$$

### 1.2.3 La soluzione delle equazioni di moto

Partiamo inizialmente da una condizione semplificata: un sistema a  $n$  gradi di libertà in assenza di forzamento.

$$[M]\ddot{x} + [R]\dot{x} + [K]x = \underline{0}$$

La soluzione del sistema sarà nella forma:

$$x = \underline{X}e^{\lambda t}$$

che sostituita nell'equazione di moto porta a un sistema lineare omogeneo nell'incognita  $\underline{X}$ :

$$(\lambda^2[M] + \lambda[R] + [K]) \underline{X} = \underline{0}$$

Tale sistema ammette soluzione diversa dalla soluzione banale solo se il determinante della matrice dei coefficienti è nullo:

$$\det(\lambda^2[M] + \lambda[R] + [K]) = 0$$

Lo sviluppo del determinante porta a un polinomio completo di grado  $2n$  in  $\lambda$  che avrà soluzione in genere complesse. Quindi per sistemi a  $n$  gradi di libertà lo sviluppo analitico di tale polinomio caratteristico e il suo azzeramento risultano estremamente onerosi: si preferisce pertanto ricondurre il calcolo delle frequenze proprie e dei modi di vibrare a un problema di auto valori e auto vettori di una matrice.

Si considera quindi, accanto all'equazione di moto un'identità ausiliaria:

$$\begin{cases} [M]\ddot{x} + [R]\dot{x} + [K]x = \underline{0} \\ [M]\dot{x} = [M]\dot{x} \end{cases}$$

si esegue il seguente cambio di variabili:

$$\underline{z} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} \rightarrow \dot{\underline{z}} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \end{Bmatrix}$$

e si definiscono le matrici [B] e [C]:

$$[B] = \begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [M] \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} [R] & [K] \\ -[M] & [0] \end{bmatrix}$$

Viene così riscritto sinteticamente il sistema come:

$$[B]\dot{\underline{z}} + [C]\underline{z} = \underline{0}$$

$$\dot{\underline{z}} = [A]\underline{z}$$

$$[A] = -[B]^{-1}[C]$$

La cui soluzione è nella forma:

$$\underline{z} = \underline{Z}e^{\lambda t}$$

che sostituita nell'equazione:

$$([A] - \lambda[I])\underline{z} = \underline{0}$$

che ammette soluzione diversa dalla soluzione banale se il determinante della matrice dei coefficienti è nullo. I 2n valori di  $\lambda$  che annullano il determinante sono, per definizione gli auto valori della matrice [A].

Possiamo a questo punto risolvere il sistema forzato ipotizzando una forzante sinusoidale:

$$[M]\ddot{x} + [R]\dot{x} + [K]x = \underline{f}(t) = \underline{F}_0 e^{i\Omega t}$$

che presenta come integrale particolare:

$$\underline{x}_p = \underline{X}_p e^{i\Omega t}$$

che sostituito nell'equazione di moto restituisce:

$$(-\Omega^2[M] + i\Omega[R] + [K])\underline{X}_p = \underline{F}_0$$

$$[D(\Omega)]\underline{X}_p = \underline{F}_0 \rightarrow \underline{X}_p = [D(\Omega)]^{-1}\underline{F}_0$$

Per descrivere in maniera sintetica la risposta del sistema nel dominio delle frequenze si fa ricorso alla funzione di trasferimento armonico definita come:

$$H_{jk}(\Omega) = \frac{X_{pjk}(\Omega)}{F_{ok}(\Omega)}$$

cioè come rapporto tra la risposta del generico grado di libertà  $j$ -esimo e la generica forzante armonica applicata secondo il  $k$ -esimo grado di libertà del sistema.

La funzione di trasferimento armonico  $H_{jk}(\Omega)$  è, ovviamente, complessa, essendo genericamente complessa la risposta del sistema: tale funzione viene quindi generalmente rappresentata, in funzione della pulsazione della forzante  $\Omega$ , in modulo e fase come riportato a titolo di esempio in Figura 1.9.

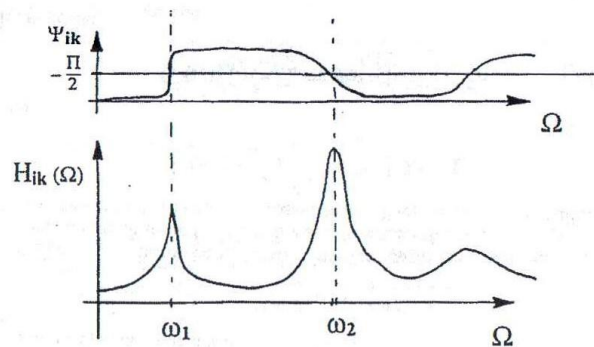


Figura 1.9-Sistema vibrante a  $n$  gdl: esempio di FDT armonica

Nei sistemi a  $n$  gradi di libertà smorzati e forzati, quando la pulsazione  $\Omega$  della forzante coincide con una delle pulsazioni proprie del sistema  $\omega_i$ , si avrà un aumento delle ampiezze a regime che però, a differenza dei sistemi non smorzati, non raggiungeranno valori infiniti.



## 2. Le linee AV/AC

### 2.1 Le linee AV/AC a 2x25 kV – 50 Hz

Abbiamo già accennato, nel capitolo introduttivo come si sia scelto per le nuove linee AV/AC la corrente alternata monofase. Questo tipo di alimentazione consente il raggiungimento di alcuni obiettivi fondamentali per la trazione elettrica:

- la possibilità di elevare il livello di tensione delle linee di contatto, riducendo quindi i valori delle correnti da captare, e contemporaneamente di assicurare i valori più opportuni per l'alimentazione degli azionamenti e dei convertitori di bordo attraverso il semplice utilizzo di trasformatori;
- la possibilità di mantenere unifilare la linea di contatto;
- il collegamento diretto con la rete industriale;
- l'aumento della potenza specifica della linea;

L'esigenza di poter ulteriormente sfruttare l'economia della trasmissione a tensione elevata, senza dover introdurre un livello di tensione eccessivo sulle linee di contatto, ha condotto allo studio e allo sviluppo del sistema 2x25 kV che, utilizzando un sistema a tre livelli di tensione (linea di contatto, binario e alimentatore cosiddetto "negativo") consente di trasmettere la potenza a 50 kV e di renderla disponibile ai treni alla tensione di 25 kV.

#### 2.1.1 Il sistema di alimentazione

Il sistema di alimentazione provvede al trasporto, alla trasformazione e alla distribuzione dell'energia elettrica dai punti di consegna in Alta Tensione fino ai carichi mobili (treno) e fissi (posti periferici PPF). L'architettura del sistema di alimentazione è condizionata fundamentalmente dal dover limitare gli squilibri provocati sulla rete in alta tensione dal prelievo di energia in monofase tipico della transizione elettrica 25 kV-50 Hz, e dall'esigenza di dare la massima continuità di esercizio alle sottostazioni elettriche (SSE). Tali squilibri possono essere molto dannosi per i generatori, i motori e per le altre utenze trifasi a causa della dissimmetria delle tensioni che ne deriva. Viene definito un coefficiente di dissimmetria:

$$K=P_m/P_{cc}$$

con  $P_{cc}$  potenza di corto circuito della rete trifase nel punto di prelievo della potenza monofase  $P_m$ . La presenza di motori trifasi industriali determina la necessità di avere valori del coefficiente  $K$  inferiori all'1% in servizio continuo e all'1,5% per pochi minuti.

Per far fronte a tale problematica, riducendo il carico equivalente monofase  $P_m$  della rete trifase ed utilizzando trasformatori tutti identici, lo schema delle sottostazioni del sistema 2x25 kV presenta l'uso di trasformatori monofasi inseriti a V, alternando il collegamento fra le diverse fasi. Dal momento che le SSE vengono allacciate a fasi diverse della rete trifase AT, nasce la necessità di suddividere la linea ferroviaria in settori alimentati a tensioni  $U$  non in fase tra loro; i settori devono perciò essere separati da sezionamenti con tratto neutro. Per ottimizzare la distribuzione del carico di trazione sulle tre fasi RS-ST-TR della rete primaria, i collegamenti dei trasformatori sono stabiliti in modo che nei settori neutri di linea le tensioni si succedano secondo la sequenza di ordine 3 con una differenza di potenziale ai capi di ciascun tratto neutro pari a  $\Delta U = \sqrt{3} U = 42,5 \text{ kV}$ , oppure secondo la sequenza di ordine 6 con una minore differenza di potenziale  $\Delta U = U$ .

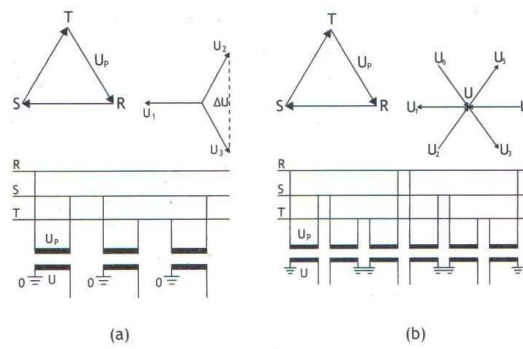


Figura 2.1 - Configurazione del sistema di alimentazione con sequenza di ordine 3 (a) e 6 (b)

L'alimentazione avviene attraverso linee primarie a 132 kV che collegano le stazioni elettriche appartenenti alla RTN (Rete di Trasmissione Nazionale) alle SSE (Sottostazioni Elettriche) degli impianti di trazione attraverso trasformatori 380/132 kV.

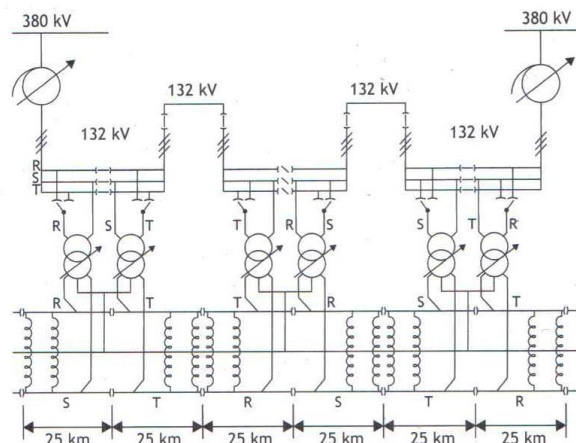


Figura 2.2 - Alimentazione primaria

Per le linee AV/AC sono stati utilizzati per la maggior parte sostegni a ridotto impatto ambientale in acciaio zincato, rastremati e poligonali.

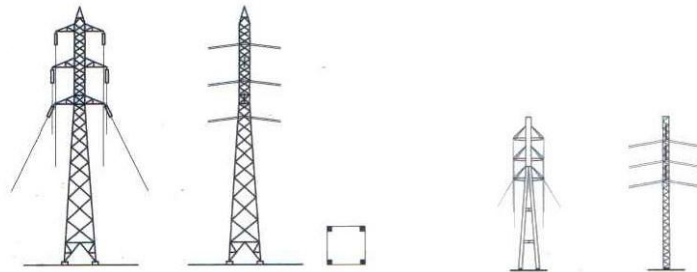


Figura 2.3 - Traliccio tradizionale e traliccio compatto

Questo tipo di sostegno, avendo le fasi più ravvicinate rispetto alla linea tradizionale, ha una reattanza inferiore con conseguente maggiore capacità di trasmissione e un impatto elettromagnetico sensibilmente inferiore. Nel caso delle nuove linee AV/AC si cerca dunque di fare ricorso all'uso di sostegni a ridotto impatto ambientale per le linee aeree primarie al fine di garantire la tutela dell'ambiente ed un'elevata affidabilità, a vantaggio di:

- un basso impatto visivo;
- una fascia di asservimento ridotta;
- una limitata occupazione del suolo;
- fondazioni piccole;
- minori danni e disturbi all'ambiente in fase di costruzione;
- ridotti campi elettrici e magnetici;

Nelle aree urbanizzate, infine, si cerca di realizzare il più possibile tronchi in cavo, al fine di rendere meno visibile ed ingombrante la linea.

### 2.1.2 Le sottostazioni elettriche

Le sottostazioni elettriche situate agli estremi della linea sono collegate mediante un elettrodotto a 132 kV alle più vicine stazioni della rete di trasmissione nazionale 380 kV, attraverso un autotrasformatore dedicato 380/132 kV. Tutte le sottostazioni lungo la linea ferroviaria sono collegate fra loro con un elettrodo sempre a 132 kV in "entra ed esce". Tale configurazione presenta il vantaggio di consentire un'alimentazione bilaterale di ciascuna SSE e di trasferire lo squilibrio di carico ad un nodo di potenza di corto circuito relativamente elevata, essendo quest'ultimo esercito alla tensione di 380 kV. La doppia interconnessione con la rete di trasmissione consente di avere un elevato livello di continuità di esercizio. Le SSE per le linee AV/AC presentano una potenza installata di 120 MVA, ripartita in due unità di trasformazione da 60 MVA secondo lo schema di Figura 2.4 e sono poste fra loro a una distanza di circa 50 km.

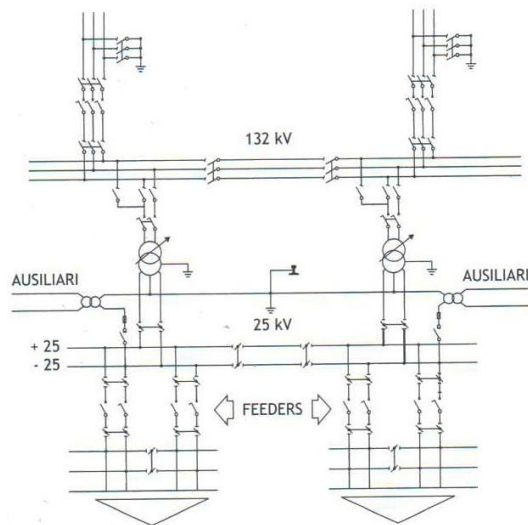


Figura 2.4 - Schema elettrico semplificato di una SSE 2x25 kV

I due trasformatori di sottostazione sono connessi alla linea primaria AT secondo l'inserzione a "V". Questa strategia di collegamento permette che il prelievo di potenza avvenga su coppie di fasi differenti ogni 25 km, allo scopo di compensare l'inevitabile squilibrio di carico sulla rete primaria.

La potenza specifica, intesa come rapporto tra la potenza totale installata nelle sottostazioni e la lunghezza della linea di competenza, risulta dell'ordine di 1-2 MW/km, a fronte di valori decisamente inferiori per le linee storiche. La specifica di base emessa da FS stabilisce che la linea "deve essere in grado di sostenere la circolazione di treni da 12 MW impostati alla velocità di 300 km/h distanziati di 5 minuti senza alcun limite ma con margini di potenzialità". Ciò corrisponde a una potenza specifica nominale, complessivamente sui due binari, di oltre 1 MW/km. Al fine di realizzare il margine di potenzialità del 100%, raggiungendo così la potenzialità massima di 2 MW/km, con il funzionamento di un singolo trasformatore come riserva all'altro, la taglia dei trasformatori presenti in SSE è stata assunta pari a 60 MVA. La configurazione dell'impianto di una SSE è tale che per condizione di manutenzione o disservizi di un gruppo di trasformazione si possa intervenire senza mettere fuori servizio la SSE. In questo caso i trasformatori hanno possibilità di sovraccarico del 50% per 15 minuti e del 100% per 5 minuti.

Il rapporto di trasformazione è 132/55 kV con l'avvolgimento di bassa tensione suddiviso in due sezioni da 27,5 kV. Per il sistema a 25 kV, i valori limite per il pantografo ammessi per l'alimentazione della linea di contatto dalla normativa IEC e CEI vigente sono:

- valore massimo permanente 27,5 kV (+10%), 29 kV per 5 minuti;
- valore minimo permanente 19 kV (-24%), 17,5 kV per 10 minuti;
- variazione di frequenza  $\pm 1$  Hz ( $\pm 2\%$ );

Al fine di consentire al treno di fornire le massime prestazioni, la progettazione del sistema di alimentazione è stata concepita in modo che, ad eccezione di tratti molto limitati, ai pantografi sia presente una tensione superiore a 22 kV.

### 2.1.3 I posti ausiliari

Come già detto, in esercizio normale è previsto il cambio della coppia di fasi di alimentazione sia tra i due gruppi di una SSE sia tra i gruppi corrispondenti alimentanti ciascun tratto di linea tra due SSE. Pertanto la linea di contatto deve essere sezionata sia in corrispondenza della SSE sia a metà della tratta di circa 50 km. Allo scopo di poter spostare i sezionamenti e meglio ripartire il carico in caso di condizioni anormali come il fuori servizio parziale o totale di una SSE, i sezionamenti sono realizzati anche a metà di ciascuna semi-tratta di circa 25 km e tenuti normalmente cortocircuitati.

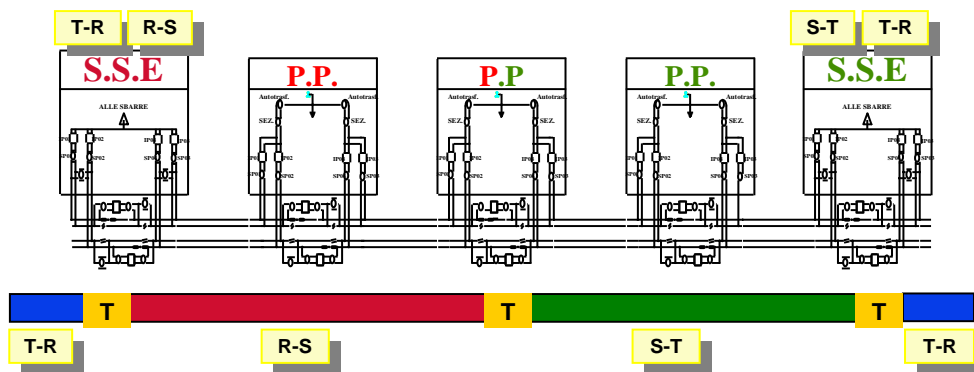


Figura 2.5- Schema di alimentazione della linea aerea

Inoltre lungo linea si trovano i “Posti Ausiliari”, classificabili in:

- Posto di Parallelo Doppio o Semplice (PPD o PPS), che ha la funzione di realizzare il parallelo tra l'alimentazione del binario pari e quella del binario dispari e lo scambio di potenza tra linea di contatto e feeder;
- Posto di Origine Catenaria (POC), che ha lo scopo di mantenere la separazione meccanica ed elettrica tra due condutture alimentate da due sistemi completamente diversi, quali il sistema in corrente alternata 2x25 kV 50 Hz e quello in corrente continua a 3 kV;
- Posto di Sottosezionamento ( PSS) e Posto di Sottosezionamento e Protezione (PSSP), che realizzano la separazione elettrica di due condutture di zone elettriche diverse, alimentate però con la medesima tensione di fase;

Tutti questi posti ausiliari implicano quindi, con diverse modalità, la separazione elettrica, oltre che meccanica, delle condutture. I tatti neutri di PPD o di SSE ed i POC, sono simmetrici lungo la linea di contatto, ovvero hanno uguale struttura sia sul binario pari che sul dispari, mentre i PSS sono il più delle volte ubicati su uno soltanto dei due binari.

## Posto di Parallelo Doppio e Semplice

Tra due SSE consecutive si trovano tre posti di parallelo pari/dispari ed autotrasformazione (PP), distanziati in genere 10-15 km. I posti di parallelo, semplici o doppi, hanno la funzione di realizzare il parallelo tra l'alimentazione del binario pari e del binario dispari, sia per quanto riguarda la linea di contatto che per l'alimentazione negativo (feeder) e sono attrezzati con due autotrasformatori da 15 MVA 50/25 kV necessari per trasformare l'energia proveniente dal sistema a 50 kV, costituito dalla linea di contatto e dall'alimentatore negativo, all'impianto di trazione 25 kV.

Il singolo PPD è costituito da due moduli identici, uno per ciascun lato del sezionamento, costituiti dall'autotrasformatore collegabile, a mezzo di interruttori di manovra bipolari, alla linea di contatto e al feeder sia del binario pari che del binario dispari. Dalla sbarra del feeder di ciascun modulo è derivato un trasformatore monofase 25/0,24 kV per i servizi ausiliari. I PPS presentano invece un unico modulo.

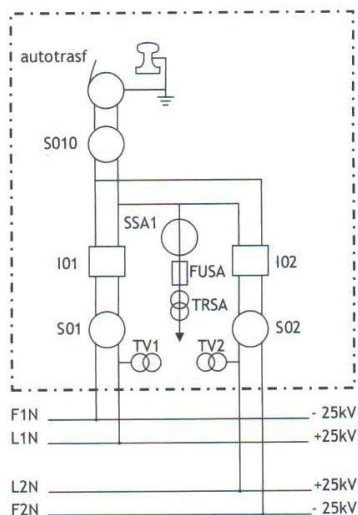


Figura 2.6- Posto di autotrasformazione e parallelo

Il PPD centrale, ovvero quello posizionato a metà tra due SSE, viene esercito in condizioni normali con il tratto neutro aperto, in quanto i due tronchi di linea vengano alimentati dalle due SSE in questione e quindi con fasi diverse. In questo caso l'impianto ha la configurazione di un "Posto di parallelo e sezionamento tra alimentazioni di fase diversa" e sono funzionanti sia il parallelo a sinistra che quello a destra del tratto neutro.

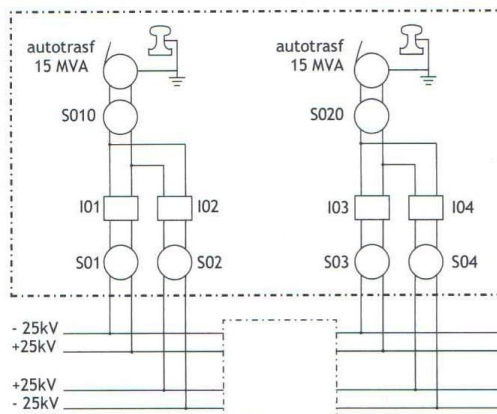


Figura 2.7- Posto di autotrasformazione e sezionamento

Il PPD più vicino alla SSE viene invece esercito normalmente con il tratto neutro chiuso, in quanto deve stabilire la continuità, ovvero trasmettere l'alimentazione dal tronco adiacente alla SSE e direttamente alimentato da questa, a quello non alimentato direttamente da alcuna SSE. In questo caso l'impianto ha la configurazione di un "Posto di solo parallelo con possibilità di sezionamento in caso di necessità".

I sezionamenti sono realizzati con doppio spazio d'aria e breve tratto intermedio non alimentato, tratto tampone. Il treno deve impegnare il tratto tampone senza assorbire corrente in modo da evitare l'innesco di un arco al passaggio tra conduttura alimentata e tratto tampone.

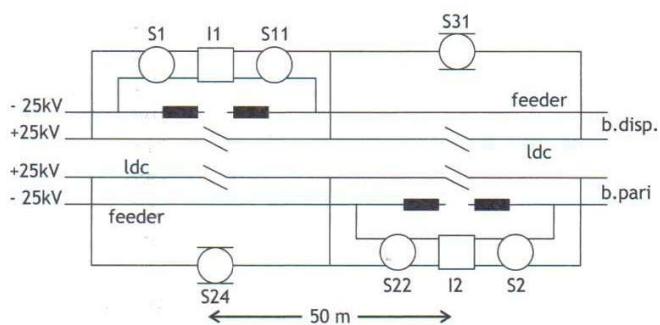


Figura 2.8- Posto di sezionamento su linea a doppio binario

Una variante del PPD è costituita dal "Posto di Parallelo Semplice" (PPS), che ha lo scopo di richiudere i feeder alla fine dei tratti elettrificati a 2x25 kV e normalmente è ubicato nelle immediate vicinanze dei posti di confine elettrico. In questo caso l'autotrasformatore è uno solo e viene contemporaneamente realizzato il parallelo pari/dispari dei feeder e della linea di contatto.

## Posto di confine elettrico fra linee AV/AC e linee storiche

Il posto di confine elettrico, noto con il nome di Posto di Origine Catenaria (POC), ha lo scopo di mantenere la separazione meccanica ed elettrica tra due sezioni alimentate da due sistemi completamente diversi ed incompatibili, quali sono il sistema in corrente alternata a  $2 \times 25 \text{ kV } 50 \text{ Hz}$  ed il sistema in corrente continua a  $3 \text{ kV}$ . Il POC è fondamentalmente costituito da:

- Unità trasformatore-separatore (TS);
- Unità filtri;
- Dispositivi di protezione;

Al fine di posizionare in maniera ottimale il POC vero e proprio rispetto alle unità TS e Filtri, è necessario tenere in considerazione, oltre alle caratteristiche tecniche funzionali, il passaggio di treni molto lunghi che devono essere contenuti nel tratto neutro in modo da evitare il corto circuito contemporaneo di due giunti consecutivi. La distanza ottimale risulta quindi essere compresa tra gli 800 e i 1000 m. la zona di confine deve essere naturalmente percorsa a pantografo abbassato per la necessità di dover effettuare il cambio pantografo per adattarsi alle differenze meccaniche delle due linee.

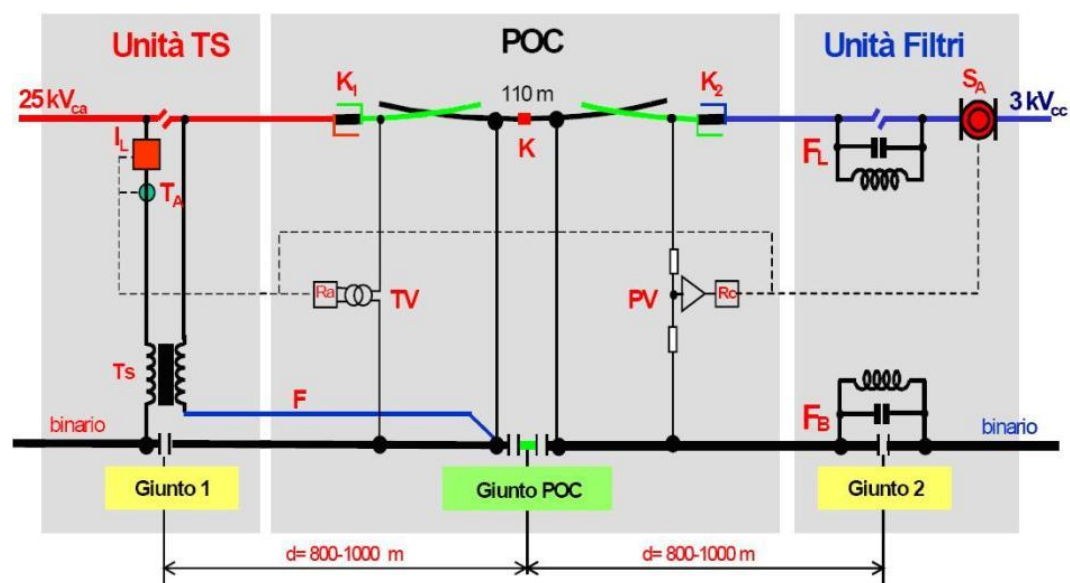


Figura 2.9- Schema funzionale del POC su binario di interconnessione

L'unità trasformatore-separatore costituisce il lato  $25 \text{ kV}$  del posto di confine elettrico. Il trasformatore dell'unità è stato studiato per alimentare a  $25 \text{ kV}_{ca}$  un tratto di linea, della lunghezza di un chilometro circa, elettricamente indipendente dal restante sistema a  $25 \text{ kV}_{ca}$  grazie alla presenza di un giunto isolato (Giunto1) che realizza due sezioni elettricamente indipendenti del binario.

L'unità filtri, lato  $3 \text{ kV}_{cc}$ , da collegare sia alla linea di contatto che al circuito di ritorno (binario) del ramo interconnesso, realizza separatamente la continuità elettrica dei conduttori della linea di contatto, relativi alle due regolazioni automatiche delle



rotaie in corrispondenza del Giunto<sup>2</sup> e al contempo impedisce il passaggio di correnti alternate pericolose per il segnalamento. L'unità filtri relativa a ciascun binario comprende essenzialmente due filtri, funzionalmente analoghi, costituiti da una reattanza induttiva e da un condensatore in parallelo, accordati in modo da assicurare l'attenuazione dei disturbi a 50 Hz interessanti la linea di contatto ed il binario.

Gli appositi dispositivi di protezione sono collegati, in corrispondenza della zona di confine, fra linee di contatto e binario. Tali dispositivi sono comandati da appositi riduttori di misura, composti essenzialmente da un trasformatore di tensione da esterno a 25 kV ed un partitore di tensione a 3 kV protetto in apposito contenitore a tenuta stagna.

Il tratto neutro centrale garantisce solo la continuità meccanica della linea di contatto e del binario e deve essere percorso per inerzia, non potendo essere alimentato per alcuna necessità. Nel caso sfortunato in cui un locomotore dovesse fermarsi all'interno di tale tratto, lo stesso deve essere rimosso via traino per mezzo di un locomotore diesel.

#### **Posto di Sottosezionamento e Posto di Sottosezionamento e Protezione**

Sia il posto di sottosezionamento (PSS) che il posto di sottosezionamento e protezione (PSSP) realizzano la separazione elettrica di due sezioni di zone elettriche diverse, alimentate però con la medesima fase. In questo caso manca il tratto neutro ed il posto si riduce alla sovrapposizione delle due condutture in questione.

Il PSS viene impiegato ogni qualvolta occorra separare elettricamente una sezione di piena-linea da un Posto di Servizio. È equipaggiato con un sezionatore bipolare telecomandato che collega elettricamente tra loro le due sezioni della linea di contatto e le due del feeder. Tale sezionatore è normalmente tenuto chiuso per assicurare la continuità elettrica delle due condutture.

Il PSSP, che dal punto di vista della disposizione meccanica delle condutture è uguale al PSS, viene impiegato come protezione di linea ed è equipaggiato con un interruttore ed un sezionatore bipolari o unipolari a seconda dei casi.

#### **2.1.4 I punti singolari**

Di fondamentale importanza risultano essere i punti singolari, ovvero quei punti dove avvengono i sezionamenti della linea di contatto per svariati motivi. Tra questi ricordiamo i più problematici, ovvero:

- I punti di sezionamento per il cambio fase;
- I punti di sezionamento per il POC;

In queste zone, il manifestarsi del fenomeno dell'arco elettrico non comporta solo dei danneggiamenti nelle parti in contatto tra loro, ovvero pantografo e linea, ma anche dei danneggiamenti degli apparati elettronici lungo la linea. Questo è quello che capita ad

esempio in galleria nei punti di sezionamento dovuti al cambio fase mostrato nell'immagine sottostante.



Figura 2.10 – Sezionamento per il cambio fase

### **2.1.5 I posti di servizio**

All'interno di ciascun tronco di linea, ogni 24 km circa, si trovano i Posti di Servizio. Dal momento che la distanza tra i tratti neutri è di circa 12 km, ne deriva che i posti di servizio hanno cadenzamento dimezzato rispetto ai tratti neutri. Sono classificabili in:

- Posti di Comunicazione (PC), distanti tra loro circa 24 km, che permettono il passaggio dei treni da un binario all'altro e sono costituiti da due comunicazioni pari/dispari;
- Posti di Movimento (PM) che servono per il collegamento tra i binari di corsa con i binari di precedenza e ricovero. Sono distanti tra loro circa 48 km e sono ubicati in coincidenza dei PC.
- Posti di Interconnessione (PJ) che permettono l'interconnessione delle linee in corrente alternata con quelle storiche. Dai deviatori lato corrente alternata si diparte la linea di interconnessione a 25 kV, priva di feeder, il cui collegamento con la linea alimentata a 3 kV avviene, a valle dei deviatori stessi, tramite il POC. I PJ naturalmente non hanno un cadenzamento fisso.

### **2.1.6 L'alimentazione dei servizi ausiliari e delle utenze di linea**

Le due linee monofase a tensione 25 kV costituite dai feeder rappresentano la sorgente primaria di alimentazione per i servizi ausiliari e le utenze di linea. Nelle sottostazioni, da ciascuna estremità del conduttore di sbarra feeder è derivato un

trasformatore monofase 25/0,24 kV da 50 kVA per l'alimentazione dei servizi ausiliari di SSE. I servizi ausiliari sono alimentati da uno dei due trasformatori.

Il feeder costituisce anche l'alimentazione per tutte le utenze disposte lungo la via. In particolare, l'intera tratta è stata suddivisa in sottotratte in cui sono stati posizionati singoli posti di trasformazione su palo. Il sistema 2x25 kV-50Hz permette di disporre di energia elettrica derivandosi semplicemente dal feeder attraverso trasformatori da palo protetti da fusibile e sezionatore. Sono alimentati da questa fonte gli impianti di illuminazione, gli impianti di forza motrice, gli impianti di emergenza, gli impianti di segnalamento, il riscaldamento dei deviatori, le stazioni radio base del GSM-r e l'unità di acquisizione dati per la diagnostica della linea. L'alimentazione da feeder rende dunque disponibile l'energia in qualunque punto lungo la linea, ma introduce possibili problematiche inerenti la qualità dell'energia fornita, in quanto il feeder può essere facilmente soggetto a disturbi presenti in linea essenzialmente causati dai treni oltre che a frequenti manovre di distacco.

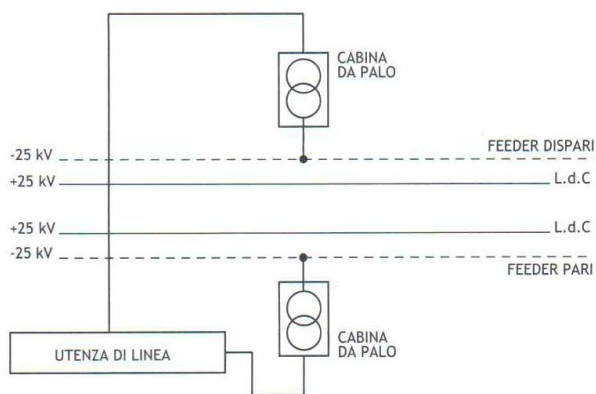


Figura 2.11- Posti di trasformazione lungo linea

Dal momento però che tale alimentazione interessa utenze essenziali, risulta evidente la necessità, per ragioni di sicurezza, di rendere minimo il periodo di fuori servizio in caso di anomalia sulla linea di alimentazione principale. Al fine di garantire la continuità di alimentazione delle utenze essenziali è necessario prevedere una sorgente di alimentazione di riserva, oltre che batterie tampone per le utenze essenziali.

Ciascuna utenza interessata presenta dei carichi che possono essere divisi in utenze normali, privilegiate ed essenziali. Utenze normali sono ad esempio l'illuminazione non di emergenza e forza motrice, gli ausiliari, le Unità Acquisizione Dati monitoraggio (UAD) ed il riscaldamento dei deviatori. Un'utenza privilegiata è ad esempio il condizionamento, mentre sono utenze essenziali gli impianti segnalamento, telecomunicazione, trazione elettrica, le luci di sicurezza, l'antincendio, gli ausiliari, l'automazione e la diagnostica e manutenzione.

## 2.2 L'analisi del sistema 2x25 kV-50 Hz

Le linee AV/AC italiane di più recente costruzione, caratterizzate dall'elevata richiesta di potenza da fornire, adottano lo schema di alimentazione 2x25 kV-50 Hz, che permette di realizzare una trasmissione a tensione elevata senza introdurre un livello di tensione eccessivo sulle linee di contatto. Tale soluzione infatti utilizza un sistema con tre livelli di tensione (linea di contatto, binario, alimentatore) consentendo di trasmettere potenza alla tensione nominale di 50 kV e rendendola disponibile ai treni alla tensione nominale di 25 kV.

### 2.2.1 Il principio di funzionamento teorico

Presentiamo ora il principio di funzionamento con la ripartizione ideale delle correnti di un sistema 2x25 kV-50 Hz. Nelle sottostazioni un trasformatore abbassatore, dotato di presa centrale connessa a terra, alimenta due conduttori, la linea di contatto a tensione 25 kV ed il feeder a tensione -25 kV, cioè alla tensione nominale di 25 kV ma in opposizione di fase rispetto a quella della linea di contatto. Lungo il tracciato, gli autotrasformatori 50/25 kV, dotati anch'essi di presa centrale connessa a terra, ripartiscono la corrente assorbita dal convoglio fra il feeder e la linea di contatto. I settori di linea compresi tra un apparecchio di trasformazione ed il successivo sono denominati celle. Ipotizzando nulle le cadute di tensione sui trasformatori e su tutti i conduttori, si può ricavare la ripartizione ideale della corrente di trazione nel caso di linea costituita da tre celle con treno al centro della terza.

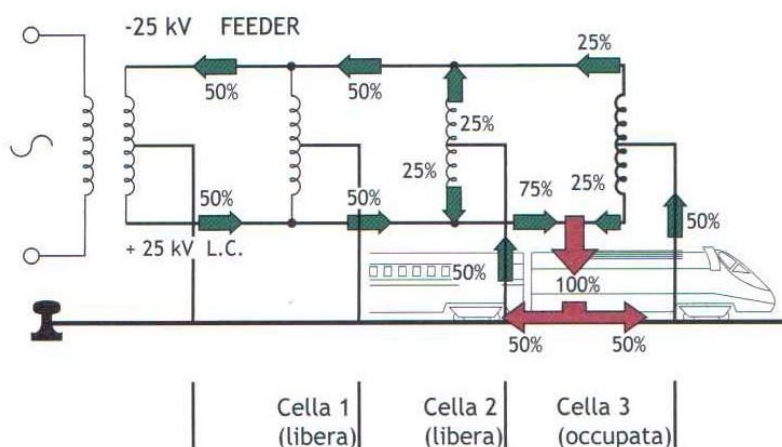


Figura 2.12 Principio di funzionamento del sistema ideale

Al fine di ricavare la ripartizione della corrente, si comincia a valutare la corrente assorbita dal treno supposta pari a 100 A. Tale corrente torna attraverso il binario dividendosi in due parti uguali e pari a 50 A, questi ultimi vengono a loro volta ripartiti in

due parti uguali dagli autotrasformatori in modo che il treno riceva un'alimentazione bilaterale sulla linea di contatto. Nella cella non occupata dal treno, la corrente nella linea di contatto e nel feeder è pari alla metà di quella assorbita dal treno, mentre nel binario è nulla. Il ritorno della corrente in questa cella quindi non interessa il binario, eliminando il problema delle interferenze ai circuiti di binario e riducendo il disturbo indotto verso i conduttori paralleli.

Infine il sistema 2x25 kV, utilizzando un sistema con tre livelli di tensione, consente di trasmettere potenza a 50 kV e renderla disponibile ai treni alla tensione di 25 kV. In tal modo è possibile un maggiore distanziamento delle SSE.

### 2.2.2 Il funzionamento reale

Con riferimento al caso del sistema 2x25 kV, per determinare la ripartizione delle correnti è stato reso il sistema passivo e si considera solamente l'azione del treno, modellizzato tramite un generatore ideale di corrente.

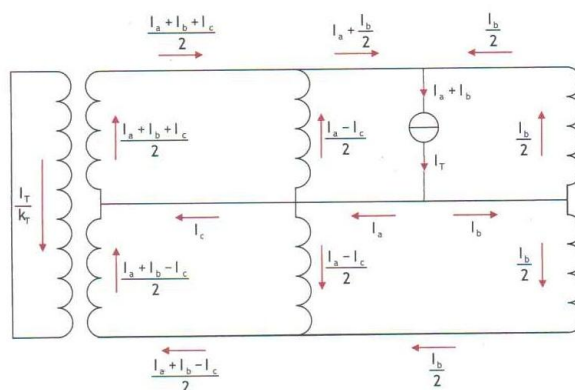


Figura 2.13- Ripartizione delle correnti nel sistema reso passivo

La determinazione delle componenti  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ , sarà data dal rispetto delle leggi di Kirchhoff alle tensioni considerando diversi accoppiamenti tra le maglie. Le condizioni di funzionamento possibili sono il funzionamento 2x25 kV, in cui si avrà il funzionamento degli autotrasformatori, ed il funzionamento a 25 kV, che comporta invece l'esclusione degli autotrasformatori e del feeder, alimentando il treno dalla linea di contatto con ritorno dalle rotaie in tutte le direzioni attraverso un semiavvolgimento del trasformatore di SSE. Di conseguenza nel funzionamento a 25 kV la potenza trasmissibile è metà di quella del 2x25 kV. La ripartizione delle correnti di Figura 2.13 può essere quindi vista come somma di una componente riconducibile al funzionamento del sistema 2x25 kV ideale e una al funzionamento come sistema 25 kV semplice come evidenziato in Figura 2.14.

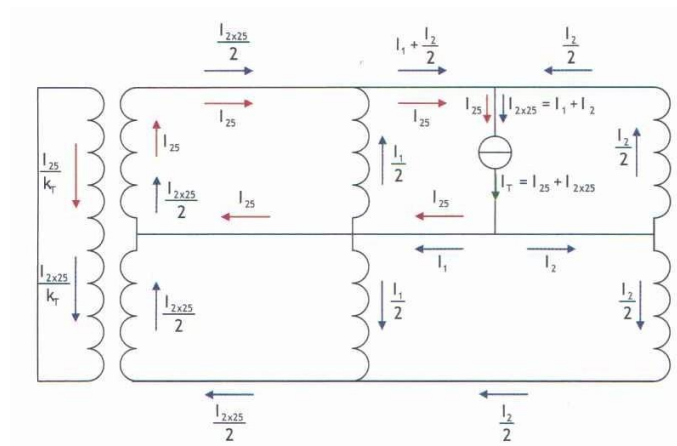


Figura 2.14- Ripartizione delle correnti per il sistema 2x25kV/25kV

Possiamo a questo punto definire dei coefficienti:

- $\gamma$  rappresenta la quota di funzionamento come sistema 2x25 kV rispetto alla totale alimentazione del treno. Sarà quindi importante che questo coefficiente sia prossimo all'unità in modo da avvicinarsi il più possibile al funzionamento ideale.
- $\alpha$  rappresenta invece la ripartizione verso i due PPD e quindi è proporzionale alla quota di alimentazione bilaterale del sistema 2x25 kV. Al contrario del coefficiente  $\gamma$  che è tendenzialmente costante,  $\alpha$  è fortemente influenzato dalla posizione del treno

Risulta quindi:

$$I_{tot} = I_{2x25} + I_{25}$$

$$I_{2x25} = \gamma I_{tot} = I_1 + I_2$$

$$I_{25} = (1 - \gamma) I_{tot}$$

$$I_1 = \alpha I_{2x25}$$

$$I_2 = (1 - \alpha) I_{2x25}$$

Il problema dello studio della ripartizione delle correnti si riconduce quindi alla determinazione dei coefficienti  $\alpha$  e  $\gamma$ .

Utilizzando le leggi di Kirchhoff, dopo aver calcolato le induttanze di servizio dei vari conduttori che tengano conto dei mutui accoppiamenti in relazione all'effettiva ripartizione di correnti, si perviene a un sistema di equazioni che presentano come incognite i coefficienti  $\alpha$  e  $\gamma$  che determinano le ripartizioni delle correnti. Poiché le equazioni del sistema sono non lineari, si procede alla sua risoluzione per via numerica avvalendosi dell'ausilio di programmi di calcolo. Si ottiene così la seguente ripartizione:

$$\gamma = 0.9538$$

$$\alpha = 0.5009$$

Dai valori ottenuti si può notare come il sistema non si discosti molto dal funzionamento 2x25 kV ideale, caratterizzato da  $\gamma=1$  e  $\alpha=0.5$ . Tali risultati sono stati confermati dalle simulazioni su dei modelli e poi a loro volta validati dalle misure sperimentali condotte sulla linea. Tuttavia, mediante le analisi condotte, è possibile notare che la tensione di corto circuito dell'autotrasformatore influenza notevolmente la ripartizione delle correnti. Difatti all'aumentare dell'impedenza di corto circuito la corrente tende sempre di più a ripartirsi secondo uno schema 25 kV tradizionale, andando ad interessare il binario anche nelle celle non occupate dal treno. Per questo motivo la tensione di corto circuito degli autotrasformatori utilizzati negli impianti risulta piuttosto bassa ed esattamente pari a 1 %.

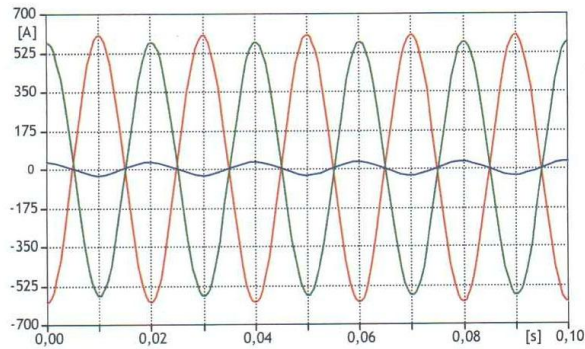
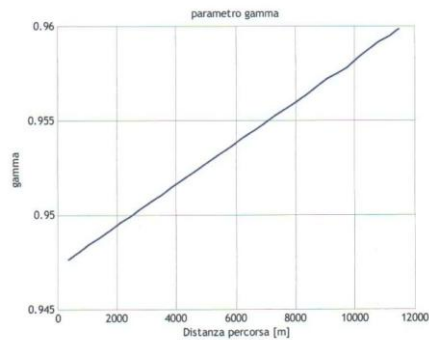
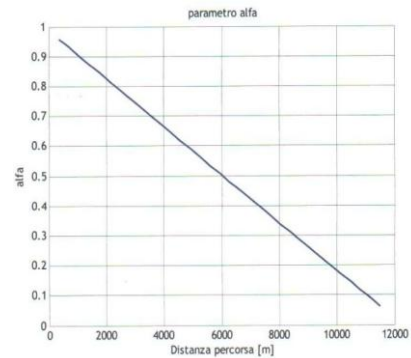


Figura 2.15- Risultati delle simulazioni relative alle correnti nella Idc(rosso), feeder(verde) e binario(blu)

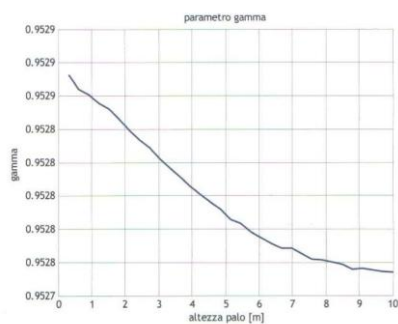
È stata anche valutata la dipendenza dei parametri alfa e gamma dal movimento del treno e dalla variazione di posizione del feeder. Si può notare che, con l'avvicinarsi del treno alla fine della cella, il parametro gamma tende al valore unitario, tipico del funzionamento ideale. Il parametro alfa invece varia tra 1 e 0 con lo spostamento del treno dall'inizio alla fine della cella. Per quanto riguarda la posizione del feeder si può osservare come questa non modifichi praticamente la ripartizione della corrente tra i vari conduttori.



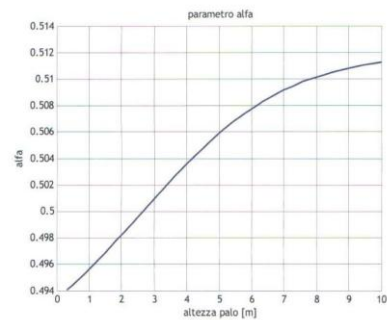
$\gamma$  in funzione della distanza percorsa



$\alpha$  in funzione della distanza percorsa



$\gamma$  in funzione della posizione del feeder



$\alpha$  in funzione della posizione del feeder

Figura 2.16- Andamento dei parametri

Dall'analisi condotta si può evincere come il sistema 2x25 kV-50 Hz permetta un funzionamento efficace anche al variare delle diverse configurazioni che il sistema può assumere rispetto alla tipologia di territorio da percorrere. Lo schema elettrico adottato permette il funzionamento del sistema, e quindi l'alimentazione dei treni, anche nella configurazione 25 kV-50 Hz semplice, ossia in caso di fuori servizio degli autotrasformatori nei posti di parallelo intermedi, innalzando così il livello generale di affidabilità.

### 2.3 Il sistema di segnalamento

La bassa aderenza disponibile nella circolazione ferroviaria e quindi le ridotte decelerazioni raggiungibili in frenatura, comportano una regolamentazione della marcia dei treni piuttosto restrittiva e controllata. Lo sviluppo tecnologico del periodo attuale ha consentito l'introduzione di alcune importanti innovazioni nella gestione in sicurezza della circolazione ferroviaria, tra cui le novità più rilevanti riguardano lo sviluppo di sistemi automatici che consentono di proteggere la guida del macchinista e quindi il treno da eventuali eccessi di velocità, superamento di segnali a via impedita o di



mancato rispetto di condizioni restrittive. Nell'ambito di queste tecnologie sono stati adottati sistemi quali il blocco automatico a correnti codificate (BAcc) oppure sistemi di comando e controllo della marcia dei treni (SCMT, Vigilante, ERTMS/ETCS).

Il BAcc è stato il primo sistema installato sulla rete italiana in grado di inviare direttamente a bordo le informazioni necessarie alla condotta in sicurezza del treno e consentire un innalzamento della velocità massima oltre i 150 km/h, riportando in cabina di guida l'informazione sul numero di sezioni di blocco libere disponibili per il treno istante per istante.

Il sistema di controllo della marcia del treno (SCMT) è il sistema di protezione automatica scelto attualmente per la rete storica italiana ad elevato traffico e per il parco rotabile ammesso a circolazione sulla rete stessa al fine di incrementare il livello di sicurezza del trasporto. Il controllo della marcia del treno è attuato in ogni momento durante la corsa, in funzione delle condizioni imposte dai segnali, della velocità massima consentita dalla linea e da quella ammessa per il materiale rotabile.

### **2.3.1 Automatic Train Protection**

I sistemi Automatic Train Protection hanno principalmente lo scopo di integrare il sistema di segnalamento di linea e di bordo in modo da aiutare il macchinista, che riceve le informazioni direttamente sul display all'interno della cabina di comando, a rispettare le indicazioni dei segnali. Inoltre, per garantire la presenza vigile del macchinista, viene inserito un dispositivo di bordo, denominato "Vigilante", che verifica in modo continuo e a treno in movimento la presenza vigile dell'agente di condotta al posto di guida. Il sistema Automatic Train Protection può anche essere usato in combinazione con il cosiddetto "Automatic Train Operation" (ATO), che controlla il mezzo automaticamente alle fermate e alle ripartenze, senza interventi da parte del guidatore. La combinazione dei due sistemi prende il nome di "Automatic Train Control" (ATC).

### **2.3.2 Blocco automatico a correnti codificate: BAcc**

La sicurezza ferroviaria coinvolge una moltitudine di problematiche che si verificano nel sistema, tra queste riveste una grande importanza il distanziamento dei treni in linea. Per questo motivo la linea viene divisa in un certo numero di sezioni di blocco (sdb) delimitate agli estremi da posti di blocco (PB) in cui trovano sede le apparecchiature di controllo e comando dei segnali e distanziate a seconda della distanza minima di frenatura e delle tecnologie di blocco usate. Il sistema BAcc consente la trasmissione di informazioni sullo stato delle sezioni di blocco, mediante l'utilizzo di correnti codificate lungo il circuito di binario permettendo inoltre di comandare la frenatura rapida nel caso in cui il convoglio dovesse superare un segnale non permissivo, mediante la ripetizione dei segnali nella cabina di guida del convoglio.

### **2.3.3 SCMT**

A bordo dei rotabili e lungo le linee della rete ferroviaria nazionale è in fase di installazione un nuovo sistema di sicurezza denominato “Sistema di Controllo Marcia Treno” (SCMT), con il quale viene introdotto l’utilizzo della ripetizione discontinua dei segnali, oltre al già collaudato Blocco Automatico a Correnti Codificate. Il sistema SCMT attua la protezione della marcia del treno, istante per istante, rispetto alle condizioni imposte dai segnali, alla velocità massima consentita dalla linea in condizioni normali e di degrado, alla velocità massima ammessa dal materiale rotabile e ai rallentamenti e riduzioni di velocità. Il sistema SCMT dunque realizza il controllo delle velocità di marcia dei treni rispetto ai dati gestiti ed interviene, interrompendo la trazione ed inserendo automaticamente la frenatura pneumatica, in caso di violazione dei vincoli imposti.

### **2.3.4 Sistema di segnalamento per l’Alta Velocità: ERTMS**

Le esigenze di interoperabilità dei convogli ferroviari fra i diversi Paesi europei hanno richiesto l’adozione di soluzioni tecnologiche avanzate nella costruzione delle nuove linee ferroviarie AV/AC. Soluzioni innovative sono state impiegate sia negli impianti di trazione elettrica sia negli impianti di segnalamento. Le soluzioni impiegate nei sistemi di segnalamento e controllo presentano le innovazioni più spinte: le esigenze di interoperabilità hanno richiesto l’adozione a livello europeo del nuovo standard ERTMS (European Rail Traffic Management System) basato, non più su sistemi a correnti codificate, ma su sistemi a onde radio di tipo GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railways). Questo sistema è stato creato ex novo per superare i limiti dei sistemi proprietari dei diversi costruttori e impiegati nei vari Paesi, oltre che per creare un sistema da tutti condiviso e presente sui convogli ferroviari. Questo permette così la libera circolazione in ambito europeo dei treni appartenenti a diversi operatori che rispettino le regole descritte nelle Specifiche Tecniche di Interoperabilità.

## **2.4 La Power Quality**

I nuovi dispositivi statici utilizzati nelle attuali linee AV/AC hanno portato i sistemi elettrici a prestazioni e a semplicità di gestione sempre più elevate, ma per contro si sono verificati problemi collaterali per nulla trascurabili quali i disturbi armonici. Al fine di rispettare le normative vigenti ed evitare di creare problemi sulla funzionalità dei componenti del sistema elettrico oppure generare operazioni non corrette nel sistema di segnalamento a cui è delegato il controllo del traffico, è necessario poter prevedere i disturbi armonici presenti nel sistema di alimentazione.

L'accoppiamento elettromagnetico fra una sorgente di disturbo ed un generico sistema vittima, si manifesta ogni qualvolta si verifica una interazione tra il campo elettromagnetico generato dalla sorgente e il sistema vittima, in modo da avere tra di essi un trasferimento di energia tale da alterare le caratteristiche fisiche e/o prestazionali del sistema disturbato.

- **Fenomeni di interferenza di tipo condotto:** fenomeni di interferenza di questo tipo sono causati dalla condivisione da parte di sorgente e vittima di uno o più conduttori. Con riferimento all'ambito ferroviario, la conduzione riguarda principalmente il problema delle correnti a 50 Hz dell'AV disperse nel terreno, che possono incanalarsi sulle rotaie delle linee storiche soprattutto nei tratti di continuità tra i binari delle interconnessioni e degli imbocchi, ovvero in prossimità dei posti di confine elettrico tra i due sistemi di trazione. Entrambi i sistemi di alimentazione presenti risulterebbero danneggiati da una reciproca interferenza e dalla presenza quindi di una corrente non propria, alterando in tal modo le condizioni di funzionamento. In particolare, è necessario evitare la presenza di armoniche provenienti dal lato 25 kV nel tratto di linea alimentato in corrente continua, le quali provocherebbero una perturbazione del funzionamento del sistema di segnalamento e ripetizione a bordo. Al fine di evitare i disturbi sopra descritti, le zone di interconnessione devono essere dotate del posto di confine elettrico in modo da isolare le due linee da una penetrazione di corrente sia continua che alternata a 50 Hz.
- **Fenomeni di interferenza di tipo indotto:** l'accoppiamento induttivo avviene quando il flusso di induzione magnetica associato alla corrente della sorgente si concatena con un secondo sistema. Una linea di trazione elettrica è una sorgente di interferenze elettromagnetiche in quanto può produrre f.e.m. indotte sui conduttori posti nelle vicinanze ed in misura maggiore in quelli paralleli alla linea stessa. Un esempio di disturbo indotto nel dominio considerato è quello che si verifica nei parallelismi ravvicinati fra la linea AV elettrificata in corrente alternata e la linea storica. In questo caso il circuito di binario della linea storica è soggetto al disturbo indotto dalla corrente di trazione a 50 Hz. In tal caso il sistema di segnalamento viene protetto dai disturbi indotti modificando la frequenza delle correnti codificate: il sistema viene alimentato a una frequenza di 83.3 Hz in modo che, il funzionamento degli impianti di terra e di bordo, non sia soggetto a perturbazioni da parte delle forze elettromotrici indotte.
- **Fenomeni di interferenza di tipo capacitivo:** l'accoppiamento capacitivo è causato dalla generazione di campi di tipo elettrostatico e si verifica quando una sorgente di campo elettrico presenta una capacità parassita non trascurabile verso il circuito vittima, imprimendo su questo ultimo tensioni di disturbo indesiderate. Questa modalità di accoppiamento si realizza in caso di linee ferroviarie adiacenti tra la catenaria della linea disturbante ed i conduttori presenti nella linea disturbata. Uno dei possibili rimedi è quello di aumentare la

distanza fra la sorgente e la vittima, oppure di installare una schermatura con almeno un'estremità connessa a terra.

- **Fenomeni di interferenza di tipo irradiato:** in presenza di campi elettromagnetici rapidamente variabili, le dimensioni elettriche del sistema vittima e la sua distanza dalla sorgente possono risultare confrontabili o maggiori della lunghezza d'onda del campo magnetico disturbante, pertanto l'accoppiamento tra sorgente e vittima va analizzato considerando il campo elettromagnetico irradiato e i meccanismi di propagazione che lo caratterizzano. L'emissione elettromagnetica in radiofrequenza è causata dall'arco che si manifesta in seguito ai distacchi del pantografo, quando questo è in assorbimento di corrente. Il distacco del pantografo avviene frequentemente, soprattutto alle alte velocità, a causa della elasticità non uniforme della linea di contatto, delle vibrazioni indotte in essa da altri mezzi oppure a causa di manovre accidentali di abbassamento del pantografo. Pur trattandosi di archi di brevissima durata la natura fortemente non lineare dell'arco richiama correnti deformate con spettri in radiofrequenza che causano emissioni radiate.
- **Campi elettromagnetici all'interno del treno:** all'interno del treno sono presenti campi magnetici: nel caso di alimentazione in corrente continua questi sono solamente causati dai sistemi di azionamento e da quelli ausiliari, invece nel caso di alimentazione in alternata il campo magnetico a bordo del treno è prodotto prevalentemente dalle correnti della linea di trazione che investe tutte le aree del treno. La struttura esterna del treno è costituita da leghe di alluminio aventi proprietà schermanti molto modeste per il campo magnetico a bassa frequenza e si ha che il campo prodotto dalla linea di trazione potrebbe penetrare all'interno del convoglio senza subire forti attenuazioni ed investire i passeggeri, di conseguenza bisogna valutare anche questo aspetto nella progettazione dei convogli. Dal momento che non ci sono molti rimedi contro il campo magnetico, risulta fondamentale prevenirne la formazione. A tal proposito, nella progettazione dei treni assumono molta importanza i convertitori sia di trazione che per i servizi ausiliari, i quali devono essere disposti in modo da attenuare il più possibile i campi elettromagnetici nelle aree in cui sono presenti i passeggeri ed il personale di manovra.

### 3. La modellizzazione dinamica del contatto pantografo catenaria

#### 3.1 Il modello dinamico della catenaria

La catenaria è costituita, come abbiamo visto, da due conduttori, la fune portante ed il filo di contatto. La fune portante sostiene il filo di contatto attraverso i pendini e, a sua volta, viene sospesa ai pali di sostegno attraverso le sospensioni. La fune portante ed il filo di contatto vengono schematizzati come due travi tesate, vincolate agli estremi mediante appoggio, di densità omogenea, dotate di rigidità flessionale e sottoposte a tiro costante. Il collegamento della fune portante ai pali di sostegno, realizzato attraverso le sospensioni, viene schematizzato mediante elementi elastici concentrati. Allo stesso modo vengono schematizzati i pendini, attraverso i quali il filo di contatto viene sostenuto dalla fune portante.

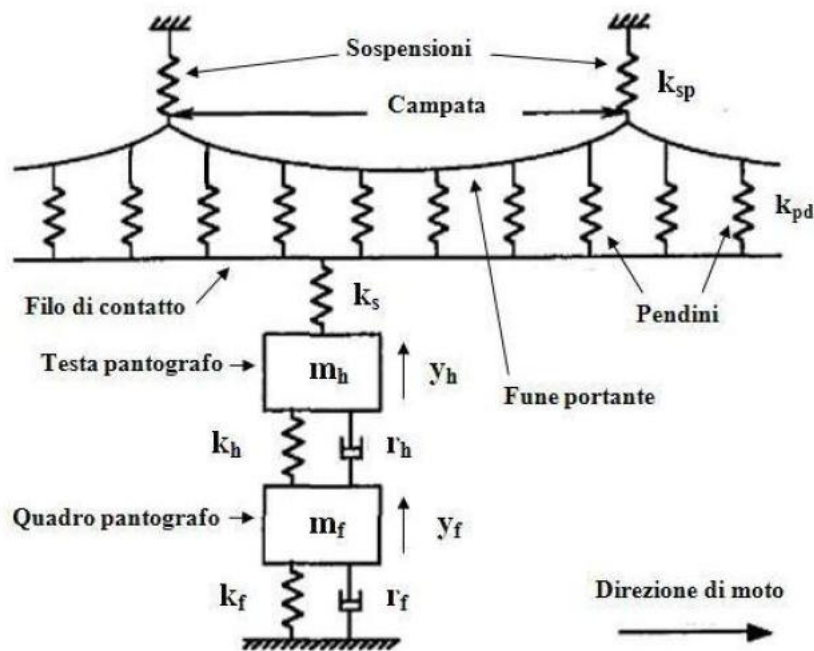


Figura 3.1 - Schematizzazione interazione pantografo catenaria

Lo schema complessivo è quello rappresentato in Figura 3.1 che riporta anche la schematizzazione del pantografo a masse concentrate a due gradi di libertà. Si considera il passaggio sotto la catenaria di un unico pantografo, a singolo archetto. Il vincolo tra la

testa del pantografo e il filo di contatto della catenaria viene introdotto attraverso una rigidità concentrata. Il vincolo descritto risulta unilatero in quanto il filo di contatto e la testa del pantografo possono solo scambiare tra loro una forza di compressione.

Poiché, come abbiamo visto la fune portante e il filo di contatto sono schematizzabili come due travi, cerchiamo di ricavare le equazioni di una trave snella vincolata agli estremi mediante appoggio. Nella nostra descrizione ci riferiremo, come mostrato in Figura 3.2, a una trave snella lunga  $L$ , di massa per unità di lunghezza  $\rho$ , rigidità flessionale  $EJ$ , soggetta a un tiro  $S$ , e vincolata agli estremi mediante appoggi. Si vuole ricavare lo spostamento trasversale dell'asse neutro della trave  $W(\xi, t)$ .

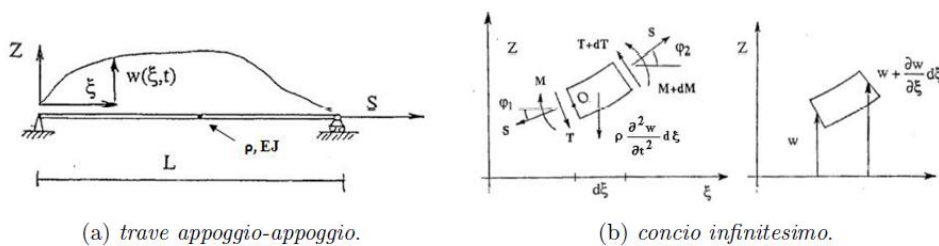


Figura 3.2 - Trave appoggio appoggio

Partiamo per la definizione dell'equazione della trave da un equilibrio alla rotazione rispetto al polo  $O$ , mostrato in Figura 3.2 b:

$$M - (M + dM) + \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} d\xi \frac{d\xi}{2} - (T + dT)d\xi = 0$$

trascurando gli infinitesimi di ordine superiore otteniamo:

$$T = -\frac{dM}{d\xi} \tag{a}$$

Scriviamo ora un equilibrio alla traslazione verticale:

$$-T - \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} d\xi + T + dT - S \sin \varphi_1 + S \sin \varphi_2 = 0$$

essendo gli angoli  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  piccoli per ipotesi e considerando che

$$\varphi_1 = \frac{\partial W}{\partial \xi}$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial \xi} d\xi$$

risulta:

$$\frac{\partial T}{\partial \xi} - \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + S \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} = 0 \quad (b)$$

Considerando inoltre l'equazione della linea elastica per la trave:

$$M = EJ \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} \quad (c)$$

Sostituendo l'equazione (a) nell'equazione (b) e ricordando (c) si ottiene:

$$EJ \frac{\partial^4 W}{\partial \xi^4} - S \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} + \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0 \quad (d)$$

L'equazione (d) risulta un'equazione differenziale lineare del quarto ordine la cui soluzione definisce la funzione  $W(\xi, t)$ , che per trave vincolata agli estremi e in caso stazionario assume la forma:

$$W(\xi, t) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k(t) \sin\left(\frac{k\pi\xi}{L}\right) \quad (e)$$

L'equazione (e) esprime lo spostamento trasversale della trave come combinazione lineare di una funzione variabile nel tempo e una nello spazio. La funzione sinusoidale  $k$ -esima rappresenta la forma del  $k$ -esimo modo di vibrare della trave, mentre il coefficiente  $A_k$  rappresenta la  $k$ -esima coordinata modale del  $k$ -esimo modo di vibrare della trave.

Nella costruzione del modello dinamico della catenaria, si limita il numero di modi considerati per ogni fune, ad un certo valore  $N_m$ , e riscrivendo la soluzione in notazione matriciale risulta:

$$W(\xi, t) = \underline{\varphi(\xi)}^T \underline{q}(t) \quad (1.6)$$

dove  $\underline{\varphi(\xi)}$  risulta essere:

$$\underline{\varphi(\xi)} = \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\pi}{L}\right) \\ \dots \\ \dots \\ \sin\left(\frac{k\pi}{L}\right) \\ \dots \\ \dots \\ \sin\left(\frac{N_m\pi}{L}\right) \end{pmatrix}$$

Nella risoluzione di problemi dinamici mediante approccio modale, la scelta del numero di modi da considerare avviene in modo tale che la frequenza dell'ultimo modo considerato superi di più del doppio la massima frequenza presente nello spettro della forzante del sistema. In questo caso invece, la scelta del numero di modi per fune da considerare viene fatta secondo un diverso criterio. Infatti il sistema catenaria

pantografo non è propriamente forzato dall'esterno, bensì è la variabilità spazio/temporale della rigidità del sistema ad indurre delle vibrazioni. Viene quindi fatta una considerazione relativa al numero di elementi elastici concentrati presenti nel sistema. Considerando la fune portante, essa è vincolata a terra mediante due sospensioni che delimitano le singole campate della catenaria. Inoltre essa è vincolata mediante 18 pendini al filo di contatto. Il numero di modi minimo da considerare per la fune portante deve essere tale per cui la forma modale del modo a più elevata frequenza abbia un nodo in ogni punto in cui è presente una rigidità concentrata. Data la particolare disposizione dei pendini e delle sospensioni, si può dimostrare che il modo a frequenza più bassa, tale che abbia un nodo ovunque sia presente un elemento elastico concentrato, risulta  $2 N_{pd}$ , dove  $N_{pd}$  è il numero di pendini presenti nella catenaria. Dati i 18 pendini presenti nel modello di catenaria sviluppato, il numero di modi da considerare risulta  $N_m=36$ . Avendo considerato  $N_m$  gradi di libertà per la fune portante e  $N_m$  gradi di libertà per il filo di contatto, la catenaria avrà  $2N_m$  frequenze proprie.

A questo punto si possono esprimere le forme quadratiche dell'energia della catenaria, seguendo l'approccio che porta alle equazioni di Lagrange. Si vogliono infatti descrivere le oscillazioni del sistema catenaria pantografo, nel passaggio di quest'ultimo sotto alla catenaria. Si esprime dapprima l'energia cinetica della catenaria, ricordando che la fune portante ed il filo di contatto vengono schematizzati come travi tesate con vincoli di appoggio agli estremi. Le simulazioni effettuate mediante tale schematizzazione perdono di validità nei pressi degli appoggi. Nella realtà, agli estremi della fune è presente una sospensione mentre nel modello è presente un appoggio ovvero una sospensione di rigidità infinita. Tuttavia la rigidità  $k_{sp}$  risulta molto elevata in direzione verticale ed inoltre si considera un numero di tre campate in modo da alleggerire il peso dell'ipotesi semplificativa, relegando così alle zone prossime agli appoggio eventuali transitori presenti nelle simulazioni, risultanti dalla semplificazione. Per gli scopi della presente trattazione l'assunzione fatta sui vincoli di appoggio è valida.

### Energia cinetica della catenaria

Siano  $W_p(\xi, t)$  e  $W_c(\xi, t)$  gli spostamenti trasversali rispettivamente della fune portante e del filo di contatto, considerando un elemento infinitesimo  $d\xi$  di entrambi, l'energia cinetica risulta:

$$E_c = \frac{1}{2} \dot{q}_p(t)^T \left( \rho_p \int_0^L \underline{\varphi} \underline{\varphi}^T d\xi \right) \dot{q}_p(t) + \frac{1}{2} \dot{q}_c(t)^T \left( \rho_c \int_0^L \underline{\varphi} \underline{\varphi}^T d\xi \right) \dot{q}_c(t)$$

Si può dimostrare che:

$$\rho \int_0^L \underline{\varphi} \underline{\varphi}^T d\xi = \frac{\rho L}{2} [I] = [m]$$

Raggruppiamo ora i gradi di libertà della catenaria in un vettore:



$$\underline{q} = \begin{pmatrix} q_p \\ q_c \end{pmatrix}$$

e definiamo le matrici di estrazione  $[E_p]$  ed  $[E_c]$ :

$$\underline{q}_p = [E_p] \underline{q}$$

$$\underline{q}_c = [E_c] \underline{q}$$

Sostituendo quanto detto nella definizione di  $E_c$  risulta:

$$E_c = \frac{1}{2} \underline{\dot{q}}^T ( [E_p]^T [m_p] [E_p] + [E_c]^T [m_c] [E_c] ) \underline{\dot{q}} = \frac{1}{2} \underline{\dot{q}}^T [M] \underline{\dot{q}} \quad (1.7)$$

### Energia potenziale della catenaria

L'energia potenziale risulta composta da un contributo gravitazionale e da un contributo elastico. Il contributo gravitazionale non compare nelle equazioni di moto in quanto si descrivono le oscillazioni del sistema nell'intorno della sua configurazione di equilibrio statico. L'energia potenziale elastica della catenaria è costituita dai contributi del tiro e della rigidezza flessionale della fune portante e del filo di contatto e dai contributi degli elementi elastici concentrati ovvero le sospensioni ed i pendini.

L'energia potenziale legata al tiro della fune risulta pari al lavoro compiuto dal tiro  $T$  per effetto dell'allungamento della fune associato allo spostamento trasversale  $W(\xi,t)$ .

$$V_{TIRO} = \frac{1}{2} \underline{q}_p^T \left( \int_0^L T_p \underline{\varphi}' \underline{\varphi}'^T d\xi \right) \underline{q}_p + \frac{1}{2} \underline{q}_c^T \left( \int_0^L T_c \underline{\varphi}' \underline{\varphi}'^T d\xi \right) \underline{q}_c$$

Ipotizzando il tiro costante si può dimostrare che:

$$T \int_0^L \underline{\varphi}' \underline{\varphi}'^T d\xi = T \frac{\pi^2}{2L} [I^2] = [k_{TIRO}]$$

Ricordandoci delle matrici di estrazione:

$$V_{TIRO} = \frac{1}{2} \underline{q}^T ( [E_p]^T [k_{TIROp}] [E_p] + [E_c]^T [k_{TIROc}] [E_c] ) \underline{q} = \frac{1}{2} \underline{q}^T [K_{TIRO}] \underline{q}$$

L'energia potenziale elastica legata alla rigidezza flessionale della catenaria risulta pari al lavoro compiuto dal momento flettente per effetto della rotazione delle sezioni della trave associata allo spostamento trasversale  $W(\xi,t)$ .

$$V_{FLES} = \frac{1}{2} \underline{q}_p^T \left( \int_0^L EJ_p \underline{\varphi}'' \underline{\varphi}''^T d\xi \right) \underline{q}_p + \frac{1}{2} \underline{q}_c^T \left( \int_0^L EJ_c \underline{\varphi}'' \underline{\varphi}''^T d\xi \right) \underline{q}_c$$

ipotizzando la rigidezza flessionale costante si può dimostrare che:

$$EJ \int_0^L \underline{\varphi'' \varphi''^T} d\xi = EJ \frac{\pi^4}{2L^3} [I^4] = [k_{FLES}]$$

Ricordandoci delle matrici di estrazione:

$$V_{FLES} = \frac{1}{2} \underline{q}^T ( [E_p]^T [k_{FLESp}] [E_p] + [E_c]^T [k_{FLESc}] [E_c] ) \underline{q} = \frac{1}{2} \underline{q}^T [KFLES] \underline{q}$$

Definiamo ora l'energia potenziale elastica degli elementi elastici concentrati quali i pendini (pd) e le sospensioni (sp). Tratteremo la scrittura estesa dell'equazione per i pendini, per le sospensioni si procede analogamente.

$$V_{pd} = \frac{1}{2} \underline{\Delta l_{pd}}^T [kk_{pd}] \underline{\Delta l_{pd}}$$

$$[kk_{pd}] = k_{pd} [I]_{Npd=18}$$

$$[kk_{sp}] = k_{sp} [I]_{Nsp=2}$$

definiamo il vettore  $\underline{\Delta l_{pd}}$ :

$$\begin{aligned} \Delta l_{pdi} &= W_p(\xi_{pd}, t) - W_c(\xi_{pd}, t) = \underline{\varphi(\xi_{pdi})^T} \underline{q_p} - \underline{\varphi(\xi_{pdi})^T} \underline{q_c} \\ &= \underline{\varphi(\xi_{pdi})^T} ( [E_p] - [E_d] ) \underline{q} \end{aligned}$$

$$\underline{\Delta l_{pd}} = \begin{pmatrix} \underline{\varphi(\xi_{pd1})^T} \\ \dots \\ \underline{\varphi(\xi_{pdi})^T} \\ \dots \\ \underline{\varphi(\xi_{pdNpd})^T} \end{pmatrix} ( [E_p] - [E_d] ) \underline{q} = [A_{pd}] \underline{q}$$

per il vettore  $\underline{\Delta l_{sp}}$ :

$$\Delta l_{spi} = -W_p(\xi_{pd}, t) = -\underline{\varphi(\xi_{spi})^T} \underline{q_p} = -\underline{\varphi(\xi_{pdi})^T} ( [E_p] ) \underline{q}$$

$$\underline{\Delta l_{sp}} = \begin{pmatrix} \underline{\varphi(\xi_{sp1})^T} \\ \dots \\ \underline{\varphi(\xi_{spi})^T} \\ \dots \\ \underline{\varphi(\xi_{spNsp})^T} \end{pmatrix} ( [E_p] ) \underline{q} = [A_{sp}] \underline{q}$$

Dunque risulta:

$$V_{pd} = \frac{1}{2} \underline{q}^T [\Lambda_{pd}]^T [kk_{pd}] [\Lambda_{pd}] \underline{q} = \frac{1}{2} \underline{q}^T [K_{PD}] \underline{q}$$

$$V_{sp} = \frac{1}{2} \underline{q}^T [\Lambda_{sp}]^T [kk_{sp}] [\Lambda_{sp}] \underline{q} = \frac{1}{2} \underline{q}^T [K_{SP}] \underline{q}$$

Quindi complessivamente risulta:

$$V = \frac{1}{2} \underline{q}^T ([K_{TIRO}] + [K_{FLES}] + [K_{PD}] + [K_{SP}]) \underline{q} = \frac{1}{2} \underline{q}^T [K] \underline{q}$$

### Smorzamento della catenaria

Scriviamo ora in forma quadratica la funzione dissipativa che esprime lo smorzamento strutturale proprio della catenaria (nella schematizzazione non abbiamo considerato la presenza di elementi smorzanti concentrati). Si esprime lo smorzamento strutturale attraverso la matrice di dissipazione [R] come combinazione delle matrici di massa e rigidezza della catenaria:

$$[R] = \alpha[M] + \beta[K]$$

In realtà la matrice risulta proporzionale alla sola matrice di massa ( $\beta \approx 0$ ) e risulta quindi:

$$D = \frac{1}{2} \dot{\underline{q}}^T [R] \dot{\underline{q}}$$

### Equazione di Lagrange della catenaria

Per ora non è stato scritto il lavoro delle forze esterne agenti sulla catenaria, infatti, finché non viene introdotta nel modello la forza di contatto scambiata tra il filo di contatto e la testa del pantografo, non vi sono azioni esterne agenti sulla catenaria. L'equazione di Lagrange risulta allora essere:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial E_c}{\partial \dot{\underline{q}}} \right) \right)^T - \left( \frac{\partial E_c}{\partial \underline{q}} \right)^T + \left( \frac{\partial D}{\partial \dot{\underline{q}}} \right)^T + \left( \frac{\partial V}{\partial \underline{q}} \right)^T = \left( \frac{\delta^* L}{\partial \underline{q}} \right)^T$$

Otteniamo così l'equazione che descrive la dinamica della catenaria:

$$[M] \ddot{\underline{q}} + [R] \dot{\underline{q}} + [K] \underline{q} = \underline{0}$$

### 3.2 Il modello dinamico del pantografo

Il pantografo viene schematizzato, nella forma più semplice, come un sistema a masse concentrate, lineare, a due gradi di libertà: la traslazione verticale della massa della testa del pantografo e la traslazione verticale del quadro del pantografo.

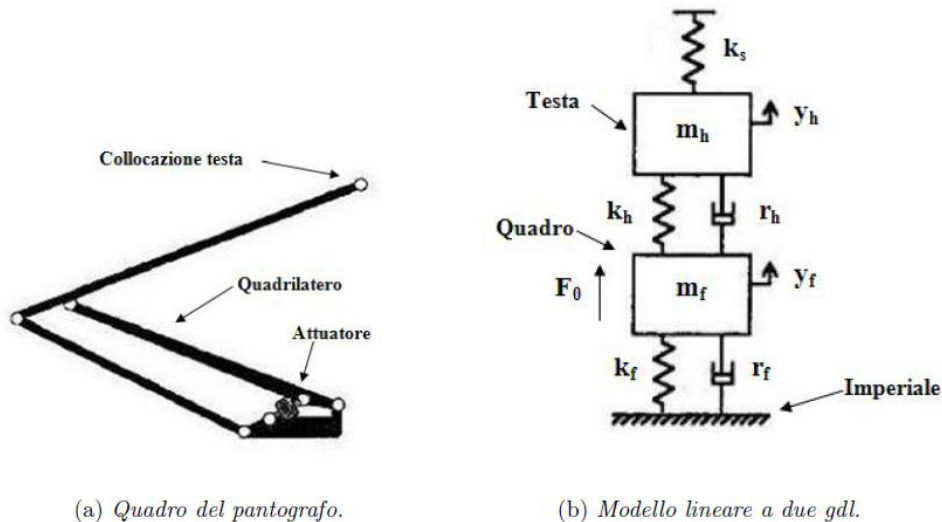


Figura 3.3 - Schematizzazione pantografo

Il modello del pantografo potrebbe essere complicato considerandone la cinematica non lineare. Il quadro del pantografo è infatti costituito da un quadrilatero articolato. Per simulare la dinamica di interazione tra la catenaria ed il modello non lineare di pantografo sarebbe necessario ricavare istante per istante, tramite metodi del tipo Newton-Raphson, la disposizione del cinematismo non lineare del quadro. Nel presente lavoro non si considera la non linearità del pantografo. Le equazioni di moto del pantografo che si ricavano sono linearizzate nell'intorno della posizione di equilibrio statico dello stesso. Tale schematizzazione è il risultato di indagini di identificazione dei parametri del pantografo fatte sperimentalmente su banco prova. Si decide così di considerare i soli gradi di libertà del pantografo legati ai moti rigidi della testa e del quadro, anche se all'aumentare delle frequenze forzanti non sarebbe possibile considerare rigidi quadro e archetto del pantografo. Si scrivono quindi direttamente le equazioni di moto, linearizzate in partenza, del pantografo disaccoppiato dalla catenaria, in forma matriciale. I due gradi di libertà  $y_h$  ed  $y_f$  vengono raccolti in un vettore  $\underline{y}$ .

$$[M_{pt}]\underline{\ddot{y}} + [R_{pt}]\underline{\dot{y}} + [K_{pt}]\underline{y} = \underline{Q}$$

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_h \\ y_f \end{pmatrix} \quad \underline{Q} = \begin{pmatrix} 0 \\ F_0 \end{pmatrix}$$

$$[M_{pt}] = \begin{bmatrix} m_h & 0 \\ 0 & m_f \end{bmatrix} \quad [R_{pt}] = \begin{bmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{bmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{bmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{bmatrix}$$

$F_0$  è la forza di precarico statico che viene applicata al quadro del pantografo, attraverso il circuito pneumatico presente a bordo della motrice, affinché l'archetto venga spinto contro il filo di contatto.

### 3.3 Le equazioni del sistema catenaria pantografo

La catenaria ed il pantografo sono stati considerati fino ad ora due sistemi disaccoppiati. In realtà essi interagiscono attraverso la forza di contatto con cui l'archetto del pantografo spinge contro il filo di contatto della catenaria. Per accoppiare quindi le equazioni di moto dei due sistemi andiamo ad esplicitare il lavoro virtuale compiuto dalla forza di contatto nello spostamento relativo tra il filo di contatto e la testa del pantografo.

$$\delta^* L = F_c \delta(W_c(\xi_{pt}, t) - y_h) = k_s (y_h - W_c(\xi_{pt}, t)) \delta(W_c(\xi_{pt}, t) - y_h)$$

Raggruppando i gradi di libertà di catenaria e pantografo in un vettore  $\underline{z}$  e ricordandoci le matrici di estrazione:

$$\delta^* L = k_s \underline{z}^T \left( [E_{yy}]^T [E_y]^T - [E_{qq}]^T [E_c]^T \underline{\varphi}(\xi_{pt}) \right) \left( \underline{\varphi}(\xi_{pt})^T [E_c] [E_{qq}] - [E_y] [E_{yy}] \right) \delta \underline{z}$$

$$\underline{z} = \begin{pmatrix} q \\ y \end{pmatrix}$$

$$y_h = [E_y] \underline{y} \quad \underline{y} = [E_{yy}] \underline{z} \quad \underline{q} = [E_{qq}] \underline{z}$$

Dalle quali si ottiene:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\delta^* L}{\delta \underline{z}} \right)^T &= k_s \left( [E_{qq}]^T [E_c]^T \underline{\varphi}(\xi_{pt}) - [E_{yy}]^T [E_y]^T \right) \left( [E_y] [E_{yy}] - \underline{\varphi}(\xi_{pt})^T [E_c] [E_{qq}] \right) \underline{z} \\ &= [KK_{eqv}(\xi_{pt})] \underline{z} \end{aligned}$$

La componente lagrangiana della forza di contatto genera un termine di rigidezza equivalente funzione della posizione del pantografo sotto alla catenaria  $\xi_{pt}$ . Poiché però il pantografo scorre sotto la catenaria con una velocità  $V$ ,  $\xi_{pt} = Vt$ , quindi la matrice  $[KK_{eqv}]$  risulta essere tempo variante, così come il sistema di equazioni che descrive il sistema catenaria pantografo.

Prima di introdurre il lavoro virtuale della forza di contatto si dispone di due insiemi di equazioni disaccoppiate tra loro:

$$\begin{cases} [M]\ddot{q} + [R]\dot{q} + [K]q = \underline{0} \\ [M_{pt}]\ddot{y} + [R_{pt}]\dot{y} + [K_{pt}]y = \underline{Q} \end{cases}$$

Che raggruppate danno:

$$\begin{pmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [M_{pt}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [R] & [0] \\ [0] & [R_{pt}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K_{pt}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{0} \\ \underline{Q} \end{pmatrix}$$

$$[MM]\ddot{z} + [RR]\dot{z} + [KK]z = \underline{QQ}$$

Introducendo la componente lagrangiana sul sistema della forza di contatto scambiata tra catenaria e pantografo otteniamo:

$$[MM]\ddot{z} + [RR]\dot{z} + [KK]z = \underline{QQ} + [KK_{eqv}]z$$

$$[MM]\ddot{z} + [RR]\dot{z} + ([KK] - [KK_{eqv}])z = \underline{QQ}$$

$$[MM]\ddot{z} + [RR]\dot{z} + [KK^*(t)]z = \underline{QQ}$$

Avendo ricavato le equazioni di moto del sistema completo, si può procedere alla loro integrazione nel tempo. Per fare questo è indispensabile conoscere il valore dei parametri descrittivi il sistema. Faremo riferimento ai valori riportati nella tabella sottostante:

Grandezze catenaria	Simbolo	Valore
Lunghezza complessiva	$L$	196.6 m
Lunghezza singola campata	$l$	65.5 m
Distanza tra i pendini	$l_{pd}$	10.92 m
Rigidezza alle sospensioni	$k_{sp}$	$1.251 \times 10^7 \text{ N m}^{-1}$
Rigidezza dei pendini	$k_{pd}$	$1.75 \times 10^8 \text{ N m}^{-1}$
Tensione della fune portante	$T_p$	9340 N
Tensione del filo di contatto	$T_c$	12000 N
Densità lineare della fune portante	$\rho_p$	$0.2722 \text{ kg m}^{-1}$
Densità lineare del filo di contatto	$\rho_c$	$0.955 \text{ kg m}^{-1}$
Rigidezza flessionale della fune portante	$EJ_p$	81.53 N m <sup>2</sup>
Rigidezza flessionale del filo di contatto	$EJ_c$	121.62 N m <sup>2</sup>
Fattore di smorzamento	$\alpha$	$0.02 \text{ s}^{-1}$
Numero di modi, per fune, considerati	$N_m$	20
Grandezze pantografo		
Massa testa	$m_h$	9.1 kg
Massa quadro	$m_f$	17.2 kg
Rigidezza collegamento testa filo di contatto	$k_s$	$8.23 \times 10^4 \text{ N m}^{-1}$
Rigidezza tra testa e quadro	$k_h$	$7 \times 10^8 \text{ N m}^{-1}$
Rigidezza tra quadro ed imperiale	$k_f$	$0 \text{ N m}^{-1}$
Smorzamento tra testa e quadro	$r_h$	$130 \text{ N s m}^{-1}$
Smorzamento tra quadro ed imperiale	$r_f$	$30 \text{ N s m}^{-1}$
Preacarico statico applicato al quadro	$F_0$	90 N

Tabella 3.1- Dati del sistema pantografo catenaria

La soluzione delle equazioni viene affrontata con l'ausilio del software di calcolo MATLAB che offre diversi algoritmi per l'integrazione di sistemi di equazioni differenziali ordinarie. In particolare si possono utilizzare due differenti approcci risolutivi:

- Approccio con matrice di stato tempo variante: si riscrive il sistema in forma di stato

$$\begin{cases} [MM]\ddot{\underline{z}} = -[RR]\dot{\underline{z}} - [KK^*(t)]\underline{z} + \underline{QQ} \\ [MM]\dot{\underline{z}} = [MM]\dot{\underline{z}} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\underline{z}} \\ \underline{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[MM]^{-1}[RR] & -[MM]^{-1}[KK^*(T)] \\ [I] & [0] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\underline{z}} \\ \underline{z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [MM]^{-1}\underline{QQ} \\ \underline{0} \end{pmatrix}$$

$$\underline{QQ} = \begin{pmatrix} \underline{0}_{2Nm \times 1} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} F_0 = \underline{C} F_0 \quad \underline{x} = \begin{pmatrix} \dot{\underline{z}} \\ \underline{z} \end{pmatrix} \quad \underline{B}$$

$$= \begin{pmatrix} [MM]^{-1}\underline{C} \\ \underline{0} \end{pmatrix} \quad u = F_0$$

$$\dot{\underline{x}} = [A(t)]\underline{x} + \underline{B} u$$

In questo caso la matrice di stato ricavata è funzione del tempo, quindi durante l'integrazione del sistema ad ogni passo è necessario aggiornare la matrice di stato.

- Approccio con matrice di stato costante: si riscrive la componente lagrangiana in maniera da lasciare la parte dipendente dal tempo separata dalle altre componenti

$$\delta^*L = F_c \delta(W_c(\xi_{pt}, t) - y_h) = F_c \left( \underline{\varphi}(\xi_{pt})^T [E_c][E_{qq}] - [E_y][E_{yy}] \right) \delta \underline{z}$$

$$\left( \frac{\delta^*L}{\delta \underline{z}} \right)^T = \left( [E_{qq}]^T [E_c]^T \underline{\varphi}(\xi_{pt}) - [E_{yy}]^T [E_y]^T \right) F_c$$

$$\begin{aligned} [MM]\ddot{\underline{z}} + [RR]\dot{\underline{z}} + [KK]\underline{z} &= \underline{QQ} + \left( [E_{qq}]^T [E_c]^T \underline{\varphi}(\xi_{pt}) - [E_{yy}]^T [E_y]^T \right) F_c \\ &= \underline{C}F_0 + \underline{D}(\xi_{pt})F_c \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\underline{z}} \\ \underline{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[MM]^{-1}[RR] & -[MM]^{-1}[KK(T)] \\ [I] & [0] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\underline{z}} \\ \underline{z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [MM]^{-1}\underline{C} \\ \underline{0} \end{pmatrix} F_0$$

$$+ \begin{pmatrix} [MM]^{-1}\underline{D} \\ \underline{0} \end{pmatrix} F_c$$

$$\dot{\underline{x}} = [A]\underline{x} + \underline{B}u + \underline{B}_1(t)F_c$$

In questo caso la matrice di stato risulta essere costante, mentre la componente lagrangiana della forza di contatto  $\underline{B}_1(t)$  risulta funzione del tempo. Bisogna tuttavia, in questo caso, fornire al solutore, istante per istante, il valore della forza di contatto  $F_c$ , funzione dei gradi di libertà del sistema.

### 3.4 L' applicazione del controllo attivo al pantografo

La rigidità variabile della catenaria incontrata dal pantografo durante la marcia del treno, innesca un fenomeno oscillatorio che coinvolge la forza di contatto scambiata tra il filo di contatto e lo strisciante. Nel caso il pantografo si muovesse a velocità pressoché nulla sotto alla catenaria, i gradi di libertà dello stesso si disporrebbero secondo la diversa configurazione di equilibrio statico derivante dalla rigidità locale della catenaria. Man mano che la velocità aumenta, il pantografo, dotato di un'inerzia non nulla, non riesce a spostarsi seguendo la variazione di rigidità della catenaria. Anche la catenaria, dotata di caratteristiche inerziali, viscosi ed elastiche, quando è soggetta ad un carico, verso l'alto, viaggiante a velocità diversa da zero, comincia ad oscillare. Il pantografo e la catenaria, nel momento in cui il treno marcia ad una velocità diversa da zero, cominciano dunque ad oscillare inducendo la variazione della forza di contatto attorno al valore di progetto. All'aumentare della velocità di marcia del treno, la forza di contatto oscilla sempre più vistosamente. L'oscillazione della forza di contatto risulta quindi un fenomeno dinamico di interazione tra il pantografo e la catenaria indotto dalla variabilità della rigidità della catenaria lungo il proprio sviluppo che si manifesta quando il pantografo scorre sotto alla catenaria a velocità non nulla. Per tentare di contrastare questo fenomeno, si può pensare di introdurre nel modello costruito precedentemente l'applicazione del controllo attivo del pantografo. Viene applicata una forza di controllo al quadro, in anello chiuso, prodotta da un attuatore operante tra l'imperiale della motrice ed il quadro del pantografo. L'attuatore viene considerato ideale. Esso agisce in parallelo al circuito pneumatico presente a bordo della motrice che fornisce il precarico statico.

Per un'analisi in prima battuta, possiamo considerare l'equazione del pantografo svincolato dalla catenaria come modello di riferimento: si ha però lo svantaggio di non considerare alcuna informazione sul comportamento statico o dinamico della catenaria.

$$[M_{pt}]\ddot{\underline{y}} + [R_{pt}]\dot{\underline{y}} + [K_{pt}]\underline{y} = \underline{C}_{pt}(F_0 + f_c)$$

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_h \\ y_f \end{pmatrix} \quad \underline{C}_{pt} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad f_c = -(G_1 \quad G_2 \quad G_3 \quad G_4) \begin{pmatrix} \dot{y}_h \\ \dot{y}_f \\ \bar{y}_h \\ \bar{y}_f \end{pmatrix}$$



$$[M_{pt}] = \begin{bmatrix} m_h & 0 \\ 0 & m_f \end{bmatrix} \quad [R_{pt}] = \begin{bmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{bmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{bmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{bmatrix}$$

dove  $\bar{y} = y - y_{rif}$  con  $y_{rif}$  che rappresentano i riferimenti per la retroazione rispettivamente dello spostamento della testa del pantografo e dello spostamento del quadro del pantografo. Il sistema di controllo, infatti, si inserisce in parallelo alla situazione nella quale viene applicato un carico statico  $F_0$  al quadro del pantografo. Tale carico viene applicato al quadro affinché la testa del pantografo spinga contro il filo di contatto. Nel caso in cui il pantografo sia fermo sotto alla catenaria in una certa posizione  $\xi$ , per effetto del carico  $F_0$  applicato al quadro, i gradi di libertà del pantografo si spostano verso l'alto delle quantità  $y_{hrif}(\xi)$  ed  $y_{frif}(\xi)$ , funzione della variabile  $\xi$ , data la variabilità della rigidezza statica della catenaria. Se il sistema di controllo avesse riferimento nullo sullo spostamento della testa e del quadro, tenderebbe a riportare i gradi di libertà del pantografo a quota zero, eliminando il precarico con cui la testa spinge contro il filo di contatto. Risulta quindi necessario fornire un riferimento per le retroazione degli spostamenti. In generale, i riferimenti sono calcolati come gli spostamenti dei gradi di libertà del pantografo quando al quadro del pantografo viene applicata la forza  $F_0$  e questo si trovi in una posizione opportunamente scelta sotto alla catenaria.

### 3.4.1 Le equazioni del sistema controllato

Il sistema di controllo sintetizzato prevede la retroazione di tutto lo stato del sistema semplificato, ovvero le velocità e gli spostamenti dei due gradi di libertà del pantografo. Per testare l'algoritmo di controllo, la forza di controllo viene applicata sul modello completo di catenaria e pantografo sviluppato. Si vuole ora mettere in evidenza l'effetto di tale retroazione sulle equazioni del sistema catenaria pantografo.

$$[M_{pt}]\ddot{\underline{y}} + [R_{pt}]\dot{\underline{y}} + [K_{pt}]\underline{y} = \underline{C}_{pt}(F_0 + f_c)$$

Considerando il secondo membro di questa equazione, si esplicita l'espressione della forza di controllo:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} (F_0 + f_c) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} F_0 - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \left( (G_1 \quad G_2) \begin{pmatrix} \dot{y}_h \\ \dot{y}_f \end{pmatrix} + (G_3 \quad G_4) \begin{pmatrix} \bar{y}_h \\ \bar{y}_f \end{pmatrix} \right) = \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} (F_0 + G_3 y_{hrif} + G_4 y_{frif}) - \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ G_1 & G_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{y}_h \\ \dot{y}_f \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ G_3 & G_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_h \\ y_f \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Sostituendo il tutto nell'equazione del pantografo ricaviamo:

$$[M_{pt}]\underline{\ddot{y}} + \left( [R_{pt}] + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ G_1 & G_2 \end{pmatrix} \right) \underline{\dot{y}} + \left( [K_{pt}] + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ G_3 & G_4 \end{pmatrix} \right) \underline{y} \\ = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} (F_0 + G_3 y_{hrif} + G_4 y_{frif})$$

$$[M_{pt}]\underline{\ddot{y}} + [R_{pt}^*]\underline{\dot{y}} + [K_{pt}^*]\underline{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} (F_0 + G_3 y_{hrif} + G_4 y_{frif})$$

L'applicazione della forza di controllo in anello chiuso modifica le matrici di smorzamento e di rigidità del pantografo rendendole non simmetriche. L'attuatore infatti agisce tra il quadro del pantografo e l'imperiale della motrice e vengono retroazionati anche lo spostamento e la velocità della testa del pantografo. Inoltre il sistema di controllo risulta essere non collocato: vengono infatti retroazionati gli stati di un grado di libertà sul quale non agisce direttamente la forza di attuazione. Essendo il sistema non collocato, è necessario studiare la stabilità del sistema controllato. Inoltre si è visto come il riferimento non nullo sulla posizione dei gradi di libertà del pantografo produca due termini forzanti equivalenti che si vanno a sommare alla forza  $F_0$ . Senza tali termini il sistema di controllo tenderebbe ad allontanare il pantografo dal filo di contatto.

L'equazione globale del sistema pantografo-catenaria risulta:

$$\begin{cases} [M]\underline{\ddot{q}} + [R]\underline{\dot{q}} + [K]q = \underline{0} \\ [M_{pt}]\underline{\ddot{y}} + [R_{pt}^*]\underline{\dot{y}} + [K_{pt}^*]\underline{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} (F_0 + G_3 y_{hrif} + G_4 y_{frif}) \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [M_{pt}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\ddot{q}} \\ \underline{\ddot{y}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [R] & [0] \\ [0] & [R_{pt}^*] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\dot{q}} \\ \underline{\dot{y}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K_{pt}^*] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q \\ y \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} (F_0 + G_3 y_{hrif} + G_4 y_{frif})$$

$$[MM]\underline{\ddot{z}} + [RR_c]\underline{\dot{z}} + [KK_c]z = \begin{pmatrix} 0_{2Nm \times 1} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} (F_0 + G_3 y_{hrif} + G_4 y_{frif})$$

A questo punto si può introdurre la forza di contatto come fatto precedentemente, attraverso i due differenti procedimenti illustrati.

### 3.4.2 L'analisi di stabilità del sistema catenaria pantografo

Per quanto riguarda il sistema passivo, ci ricordiamo dell'equazione descrivente il sistema:

$$[MM]\underline{\ddot{z}} + [RR]\underline{\dot{z}} + ([KK] - [KK_{eqv}])z = \underline{QQ}$$

La matrice  $[KK_{eqv}]$  deriva dall'esplicitazione del lavoro virtuale compiuto dalla forza di contatto: poiché il collegamento tra la testa del pantografo e il filo di contatto è schematizzato attraverso un elemento elastico concentrato di rigidità  $k_s$  e non vi è alcuno smorzatore in parallelo alla rigidità, lo spostamento del pantografo altera la sola matrice di rigidità del sistema. Poiché la matrice di rigidità del sistema complessivo varia con la sola posizione del pantografo sotto alla catenaria, gli autovalori del sistema non dipendono dallo stato di moto del pantografo, ovvero non dipendono da quanto veloce il pantografo transiti sotto alla catenaria, bensì dalla sola posizione nella quale esso si trovi.

Si consideri la generica configurazione nella quale il pantografo si trovi in una certa posizione sotto alla catenaria. Le equazioni di moto che si sono ottenute, separatamente, per la catenaria e il pantografo, hanno un comportamento sicuramente stabile. Le rispettive matrici di massa, smorzamento e rigidità sono simmetriche e definite positive per definizione. Queste sono infatti le matrici associate alle forme quadratiche corrispondenti all'energia cinetica, alla funzione dissipativa e all'energia elastica. Lo stesso può dirsi del sistema catenaria pantografo con il pantografo in una generica posizione rispetto alla catenaria. In conclusione il sistema catenaria pantografo nel caso passivo è sempre stabile. La matrice di rigidità complessiva che risulta dall'introduzione del forzamento, è anch'essa simmetrica e definita positiva, qualsiasi sia la posizione del pantografo sotto alla catenaria. Gli autovalori del sistema catenaria pantografo cambieranno per ogni posizione del pantografo sotto alla catenaria ma rimarranno sempre tutti a parte reale negativa. Il sistema catenaria pantografo risulta quindi un sistema parametrico funzione della posizione del pantografo sotto alla catenaria che risulta stabile per ogni valore assunto dal parametro di dipendenza.

Nel momento in cui al pantografo applico una forza di controllo in anello chiuso, che di fatto altro non è che una forza di campo, gli autovalori del sistema vengono alterati. Poiché il sistema di controllo risulta essere non collocato, i guadagni del controllore rendono non simmetriche le matrici di rigidità e smorzamento del pantografo, rendendo non simmetriche le matrici complessive di rigidità e smorzamento del sistema catenaria pantografo. Se la matrice di rigidità di un sistema meccanico non risulta simmetrica, il campo di forze posizionali è non conservativo e si può instaurare un'instabilità dinamica di tipo flutter. Se poi la matrice di rigidità fosse anche non definita positiva, il sistema andrebbe incontro ad instabilità statica di tipo divergenza. Infine se la matrice di smorzamento risultasse non simmetrica, il campo di forze non sarebbe dissipativo e potrebbe dare origine ad instabilità dinamica, mentre se risultasse non definita positiva, il sistema sarebbe soggetto ad instabilità dinamica.

Dato l'elevato numero di gradi di libertà del sistema, per verificare che la forza di controllo introdotta sul sistema non dia origine ad instabilità, si procede ad uno studio degli autovalori del sistema. Affinché il sistema controllato sia stabile è necessario che, per ogni posizione del pantografo sotto alla catenaria, tutti gli autovalori abbiano parte reale negativa. Si discretizza la lunghezza della catenaria in un certo numero di posizioni  $N$ , nelle quali vengono calcolati gli autovalori del sistema:

$$\det(\lambda_k [I] - A(\xi_{ark})) = 0$$

$$[A(t)] = \begin{pmatrix} -[MM]^{-1}[RR_c] & -[MM]^{-1}[KK_c^*(t)] \\ [I] & [0] \end{pmatrix}$$

$$\xi_{ar} = (0, \Delta\xi, \dots, k\Delta\xi, \dots, L)$$

$$\Delta\xi = \frac{L}{N-1}$$

Si individua a questo punto la parte reale dell'autovalore a parte reale massima tra gli auto valori  $\lambda_k$ , calcolati per il pantografo in funzione della posizione:

$$\alpha_k = \max [Re (\lambda_k)]$$

In questo modo si ottiene un profilo della massima parte reale dell'insieme degli auto valori in funzione della posizione considerata lungo lo sviluppo della catenaria. Se tale profilo rimane minore o uguale a zero lungo l'intero sviluppo della catenaria il sistema controllato risulta stabile.

Ipotizziamo un tipo di controllo a guadagni costanti. Viene utilizzato un algoritmo di ottimizzazione per individuare l'insieme di guadagni del controllore tale da minimizzare una funzione obiettivo dipendente da alcuni parametri legati alla forza di contatto. Poichè si è interessati a ridurre la variazione della forza di contatto, si sceglie di correlare la funzione obiettivo alla deviazione standard della forza di contatto. Emerge così una struttura dei guadagni che garantisce delle buone prestazioni nella riduzione dell'oscillazione della forza di contatto, sia in termini di deviazione standard, sia in termini di valori massimo e minimo:

$$G_1=0 \text{ Ns/m}, \quad G_2=1700 \text{ Ns/m}, \quad G_3=-300000 \text{ N/m}, \quad G_4=300000 \text{ N/m}$$

### 3.5 L' integrazione delle equazioni

Viene simulata l'interazione della catenaria con il pantografo, mediante le equazioni ricavate sopra. Vengono confrontati il sistema passivo ed il sistema controllato, nel caso in cui venga applicata al pantografo, una forza di controllo in anello chiuso, ottenuta mediante i guadagni ricavati nel paragrafo precedente. Si ricorda che la componente statica della forza  $F_0$  viene fornita al quadro attraverso il circuito pneumatico presente a bordo della motrice, mentre l'attuatore fornisce al quadro la sola forza di controllo. Per l'integrazione delle equazioni dobbiamo definire una condizione iniziale  $x_0$

$$\underline{x}_0 = \begin{pmatrix} 0_{4Nm+2x1} \\ y_{ho} \\ y_{fo} \end{pmatrix} \quad y_{ho} = y_{hrif} = 1.09 \cdot 10^{-3} m \quad y_{fo} = y_{frif} = 1.40 \cdot 10^{-2} m$$

Lo stato iniziale  $\underline{x}_0$  è calcolato ricavando il vettore di stato quando il pantografo è sotto all'appoggio del filo di contatto e sul quadro viene applicata la forza  $F_0$ . In questo modo si riduce il transitorio iniziale in quanto in gradi di libertà del pantografo sono, ad inizio integrazione, in una posizione sollevata che garantisce il precarico statico. Il transitorio non può essere del tutto eliminato in quanto il pantografo, all'istante iniziale, passa da una zona dove la catenaria è infinitamente rigida ad una zona dove la catenaria possiede rigidità finita. Vengono inoltre riportati i valori dei riferimenti per la retroazione della testa e del quadro del pantografo: risulta che questi possano venire calcolati in una qualsiasi posizione del pantografo rispetto alla catenaria, e quindi per comodità si fanno coincidere i riferimenti con le posizioni iniziali dei due gradi di libertà del pantografo.

Vengono ora prese in considerazione tre diverse velocità di marcia del treno,  $V=135$  km/h,  $V=170$  km/h e  $V=225$  km/h. Nella tabella sottostante sono riportati i risultati relativi alle accelerazioni della testa, del quadro del pantografo, alla forza di contatto, alla forza di controllo, alla corsa dell'attuatore, alla velocità relativa degli estremi dell'attuatore ed alla potenza dell'attuatore. La corsa dell'attuatore viene calcolata come spostamento relativo degli estremi dell'attuatore rispetto alla posizione assunta ad inizio integrazione ovvero, la corsa dell'attuatore, all'istante iniziale, è assunta essere nulla.

<b>V=150 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h [m/s^2]$	$\ddot{y}_f [m/s^2]$	$F_{co} [N]$	$F_{ctr} [N]$	$\Delta l [m]$	$\dot{\Delta} l [m/s]$	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.07E+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	1.26E+0	9.56E-1	2.03E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	3.84E+0	2.51E+0	1.35E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-2.89E+0	-1.73E+0	5.08E+1	-	-	-	-
<b>V=150 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h [m/s^2]$	$\ddot{y}_f [m/s^2]$	$F_{co} [N]$	$F_{ctr} [N]$	$\Delta l [m]$	$\dot{\Delta} l [m/s]$	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.04E+1	-	5.79E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	1.95E+0	2.08E+0	1.92E+1	3.48E+1	2.80E-2	1.31E-1	4.47E+0
<b>Max</b>	5.64E+0	5.94E+0	1.43E+2	9.21E+1	9.96E-2	2.84E-1	2.37E+1
<b>Min</b>	-4.68E+0	-4.97E+0	4.10E+1	-9.38E+1	1.40E-2	-3.27E-1	-1.72E-1
						1	
<b>V=180 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h [m/s^2]$	$\ddot{y}_f [m/s^2]$	$F_{co} [N]$	$F_{ctr} [N]$	$\Delta l [m]$	$\dot{\Delta} l [m/s]$	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.09E+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	3.46E+0	2.51E+0	3.91E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	1.01E+1	6.00E+0	2.13E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-1.21E+1	-6.71E+0	1.07E+1	-	-	-	-
<b>V=180 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h [m/s^2]$	$\ddot{y}_f [m/s^2]$	$F_{co} [N]$	$F_{ctr} [N]$	$\Delta l [m]$	$\dot{\Delta} l [m/s]$	P [W]

<b>Media</b>	-	-	9.05+1	-	6.14E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	2.06E+0	2.15E+0	2.07E+1	3.60E+1	3.20E-2	1.76E-1	7.48E+0
<b>Max</b>	5.40E+0	5.68E+0	1.48E+2	7.76E+1	1.08E-1	2.93E-1	2.78E+1
<b>Min</b>	-5.04E+0	-5.49E+0	4.79E+1	-1.01E+2	1.17E-2	-4.75E-	-2.44E+1
						1	
<b>V=235 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	$F_{co}$ [N]	$F_{ctr}$ [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta} l$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.05+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	4.34E+0	2.25E+0	3.90E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	1.21E+1	4.73E+0	2.04E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-9.55E+0	-6.20E+0	-1.12E+1	-	-	-	-
<b>V=235 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	$F_{co}$ [N]	$F_{ctr}$ [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta} l$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.01E+1	-	6.27E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	2.48E+0	2.65E+0	2.45E+1	4.42E+1	2.79E-2	1.87E-1	9.01E+0
<b>Max</b>	7.30E+0	7.74E+0	1.59E+2	1.36E+2	1.04E-1	3.28E-1	4.12E+1
<b>Min</b>	-6.16E+0	-6.58E+0	1.79E+1	-1.23E+2	1.68E-2	-4.33E-	-2.76E+1
						1	

Tabella 3.2 - Risultati della simulazione relativa ai guadagni riportati in 2.3

Per  $V = 150\text{km/h}$  il sistema di controllo fornisce delle prestazioni leggermente migliori del sistema passivo per quanto riguarda la deviazione standard della forza di contatto. Tuttavia i valori massimo e minimo peggiorano rispetto al caso passivo. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che il set di guadagni utilizzato è stato sintetizzato per  $V = 235\text{km/h}$ . D'altra parte, le caratteristiche della forza di contatto nel caso passivo sono tali da non rendere necessario l'intervento del sistema di controllo. Quest'ultimo è progettato in modo da agire in parallelo al sistema pneumatico che fornisce il semplice carico  $F_0$  applicato al quadro del pantografo. In questo modo, è possibile attivare il sistema di controllo oltre una certa velocità di marcia del treno. Per  $V = 180\text{km/h}$  e  $V = 235\text{km/h}$  il sistema di controllo fornisce delle prestazioni migliori rispetto al sistema passivo, sia in termini di deviazione standard, sia in termini di valori massimo e minimo della forza di contatto. Le prestazioni richieste al sistema di attuazione, in termini di forza di controllo e potenza dell'attuatore, risultano essere leggermente superiori per la velocità  $V=235\text{km/h}$ , come è normale aspettarsi. Oltre la velocità  $V = 180\text{km/h}$  è sicuramente conveniente l'attivazione del sistema di controllo. Per migliorare ulteriormente le prestazioni del sistema di controllo si potrebbero individuare diversi set di guadagni per diversi intervalli di velocità considerati. Il sistema di controllo, infatti, può memorizzare le diverse serie di guadagni ed utilizzare quella corrispondente alla velocità di marcia del treno.

In Figura 3.4 vengono riportati, in forma grafica, i risultati relativi alla forza di contatto. I risultati riportati in tabella vengono calcolati nel tratto di catenaria che comprende la seconda metà della prima campata, la seconda campata e la prima metà della terza campata. In questo modo non vengono considerati i dati ottenuti nelle zone prossime agli appoggi, inevitabilmente alterati dagli effetti di bordo dovuti alla presenza degli

appoggi della fune portante e del filo di contatto. In questo modo, inoltre, si evita di considerare gli effetti del transitorio ad inizio simulazione. Dai dati relativi al sistema passivo, per le diverse velocità considerate, si vede come l'oscillazione della forza di contatto aumenti all'aumentare della velocità di marcia del treno. Si vedano infatti il valore massimo, il valore minimo e la deviazione standard della forza di contatto. Già per una velocità  $V=170$  km/h, la forza di contatto minima, risulta prossima a zero. Per  $V=225$  km/h il sistema passivo non riesce a mantenere il contatto. Dai dati relativi al sistema attivo si vede come il sistema controllato migliori le cifre relative alla forza di contatto. Il valore massimo e la deviazione standard della forza di contatto vengono diminuiti, mentre il valore minimo viene aumentato, per tutte e tre le velocità di interesse. Ovviamente l'effetto del controllo è più apprezzabile all'aumentare della velocità di marcia del treno: per le alte velocità l'applicazione del sistema di controllo evita il distacco del pantografo. L'utilizzo del sistema di controllo attivo, applicato al pantografo, mostra come, almeno in via teorica, sia possibile aumentare la potenziale velocità di marcia del treno.

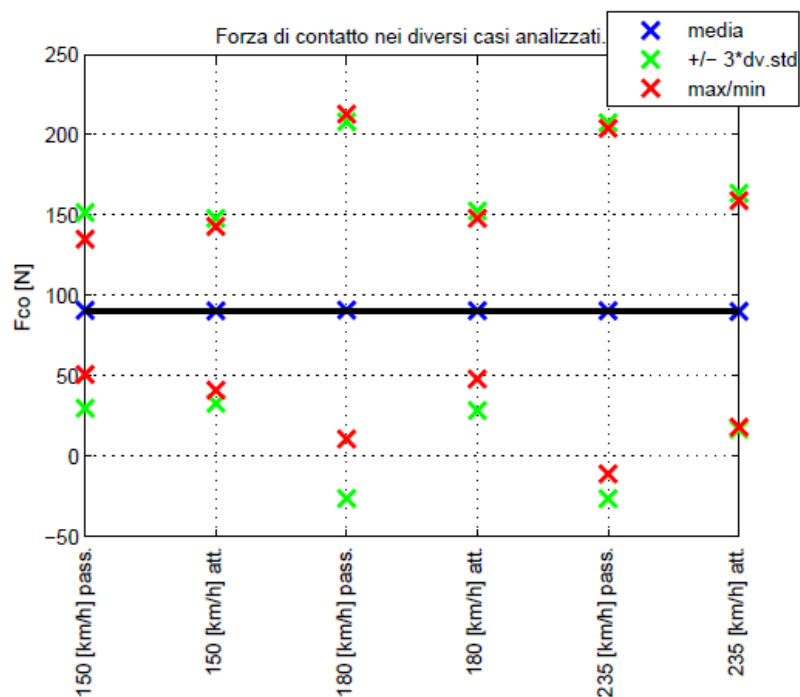


Figura 3.4 - Risultati della simulazione della forza di contatto per i guadagni riportati in 2.3

## 3.6 L'irregolarità delle infrastrutture

I modelli di simulazione del contatto catenaria pantografo riportati fino ad ora non considerano alcuni fattori che influenzano l'interazione della catenaria con il pantografo durante la marcia del treno.

Ad esempio il pantografo e la catenaria sono immersi nell'aria: il pantografo subisce quindi le forze aerodinamiche risultanti dal suo moto relativo rispetto all'aria e legate al suo profilo geometrico; anche la fune portante ed il filo di contatto, in caso di forte vento possono essere eccitati da fenomeni aeroelastici.

Inoltre l'imperiale, su cui è montato il quadro del pantografo, oscilla sia in direzione verticale che trasversale rispetto al senso di marcia, a causa delle irregolarità del binario che mettono in vibrazione la cassa del treno.

Infine il profilo della catenaria non risulta privo di irregolarità: esiste un'inevitabile errore con cui la catenaria viene posizionata lungo una linea ferroviaria, peraltro, anche nel caso in cui il posizionamento fosse perfetto, la subsidenza del terreno non rigido ed il conseguente spostamento dei pali di sostegno per le sospensioni della catenaria produce inevitabilmente un'irregolarità di posa della catenaria.

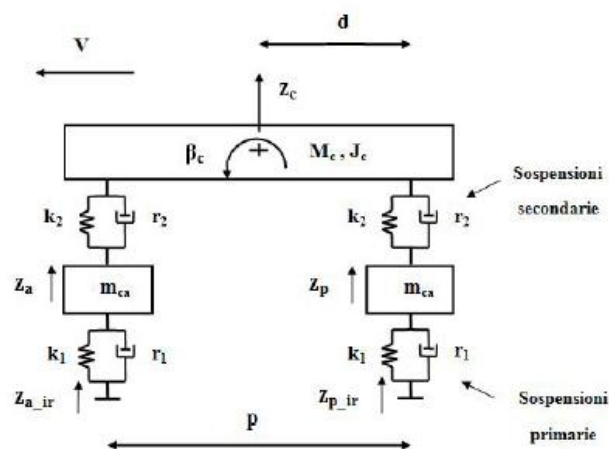
### 3.6.1 Il disturbo introdotto dall'irregolarità del binario

Il binario di un generico tratto di rettilineo non è mai perfettamente rettilineo: ognuna delle rotaie presenta delle irregolarità nel proprio profilo. Il binario viene posto su una massicciata di materiale incoerente detto ballast che in fase di costruzione della linea ferroviaria viene stabilizzato dinamicamente e lasciato assestare affinché non assuma una configurazione stabile. Dopo un certo periodo di esercizio, a causa del ripetuto passaggio dei rotabili e della subsidenza del terreno, il profilo delle rotaie tende a deviare rispetto a quello imposto in fase di messa in opera o a valle della manutenzione. L'irregolarità del binario viene descritta, attraverso la norma ORE 80/2/79, come un fenomeno random, stazionario ed ergodico, descritto attraverso la propria densità di potenza spettrale. È quindi possibile ricavare i profili delle due rotaie in funzione della variabile  $\xi$  o in funzione del tempo. Questa irregolarità dei binari comporta la nascita di vibrazioni che si manifestano sull'imperiale del rotabile, laddove è montato il quadro del pantografo. Nota la vibrazione verticale dell'imperiale si potrà introdurre il disturbo dalla parte del quadro del pantografo sotto forma di spostamento di vincolo impresso.

La vibrazione generata dall'irregolarità del profilo del binario viene filtrata da due stadi di sospensione di cui è dotata la matrice: il primo stadio di sospensione è costituito dall'insieme di elementi elastici e smorzanti che collegano le sale ai carrelli della motrice, il secondo stadio di sospensione è costituito dall'insieme di elementi elastici e smorzanti che collegano i carrelli alla cassa. Per modellizzare il tutto si assume lo schema di Figura 3.5. La motrice schematizzata è dotata di quattro gradi di libertà, lo spostamento verticale della cassa  $z_c$ , il beccheggio della cassa  $\beta_c$ , lo spostamento verticale del carrello



anteriore  $z_a$ , lo spostamento verticale del carrello posteriore  $z_p$ . Il singolo carrello possiede solo il grado di libertà di spostamento verticale e non quello di beccheggio. Dunque le due sale appartenenti ad un carrello vengono considerate come un'unica sala. L'irregolarità del binario viene trattata come spostamento di vincolo imposto per le sale,  $z_{air}$  e  $z_{pir}$ . Il pantografo è montato ad una distanza  $d$  dal baricentro della cassa. Si vogliono scrivere le equazioni di moto per il sistema descritto e procedere all'integrazione delle stesse, considerando come termine forzante l'irregolarità del binario, espressa in forma di vincolo impresso. Integrate le equazioni, si ricava lo spostamento verticale dell'imperiale della cassa all'altezza della posizione del pantografo, per poi utilizzarlo come spostamento di vincolo impresso agente sul pantografo dalla parte del quadro, nel modello completo catenaria pantografo sviluppato precedentemente.



Dati del modello		
massa cassa	$M_c$	37 600 kg
momento d'inerzia al beccheggio della cassa	$J_c$	$2.196 \times 10^6 \text{ kg m}^2$
massa telaio carrello	$m_{ca}$	2590 kg
rigidezza sospensione primaria	$k_1$	$4.544 \times 10^6 \text{ N m}^{-1}$
rigidezza sospensione secondaria	$k_2$	$9.262 \times 10^5 \text{ N m}^{-1}$
smorzamento sospensione primaria	$r_1$	$5 \times 10^4 \text{ N s m}^{-1}$
smorzamento sospensione secondaria	$r_2$	$6.87 \times 10^4 \text{ N s m}^{-1}$
passo per l'attacco dei carrelli	$p$	19 m
distanza del pantografo dal baricentro cassa	$d$	9.5 m

Figura 3.5 - Modello dinamico a mezzo veicolo e dati modello

E' necessaria però una precisazione: a rigore, la dinamica di catenaria e pantografo e la dinamica del rotabile non potrebbero essere descritte separatamente, in quanto questi due sistemi interagiscono tra loro attraverso gli elementi che li collegano. Sarebbe quindi necessario aggiungere alle equazioni del modello di catenaria pantografo quelle del modello a mezzo veicolo ottenendo un sistema dinamico avente come gradi di libertà quelli del modello catenaria pantografo più i gradi di libertà del modello a mezzo veicolo. La cassa, d'altra parte, possiede una massa di diversi ordini di grandezza

superiore alla massa del pantografo e le forze che il pantografo scarica sulla cassa sono trascurabili rispetto alle azioni dinamiche agenti sulla cassa a causa dell'irregolarità del binario. Per tale ragione si può risolvere a priori la dinamica della cassa attraverso il modello a mezzo veicolo e successivamente utilizzare i risultati ottenuti per caratterizzare lo spostamento di vincolo imposto all'imperiale della motrice, nella simulazione della dinamica del sistema catenaria pantografo.

Le equazioni del modello a mezzo veicolo vengono scritte linearizzate:

$$[M]\underline{\dot{z}} + [R]\underline{\dot{z}} + [K]\underline{z} = [D]\underline{\dot{z}}_{ir} + [C]\underline{z}_{ir}$$

$$\underline{z} = \begin{pmatrix} z_c \\ \beta_c \\ z_a \\ z_p \end{pmatrix} \quad \underline{z}_{ir} = \begin{pmatrix} z_{air} \\ z_{pir} \end{pmatrix}$$

$$[M] = \begin{pmatrix} M_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{ca} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{ca} \end{pmatrix} \quad [R] = \begin{pmatrix} 2r_2 & 0 & -r_2 & -r_2 \\ 0 & \frac{p^2}{2}r_2 & \frac{p}{2}r_2 & -\frac{p}{2}r_2 \\ -r_2 & \frac{p}{2}r_2 & r_1 + r_2 & 0 \\ -r_2 & -\frac{p}{2}r_2 & 0 & r_1 + r_2 \end{pmatrix}$$

$$[K] = \begin{pmatrix} 2k_2 & 0 & -k_2 & -k_2 \\ 0 & \frac{p^2}{2}k_2 & \frac{p}{2}k_2 & -\frac{p}{2}k_2 \\ -k_2 & \frac{p}{2}k_2 & k_1 + k_2 & 0 \\ -k_2 & -\frac{p}{2}k_2 & 0 & k_1 + k_2 \end{pmatrix}$$

$$[D] = r_1 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [C] = k_1 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Per effettuare i calcoli dobbiamo ricordare che l'irregolarità della sala posteriore ha lo stesso andamento di quella anteriore ma è sfasata nello spazio di una quantità pari al passo della motrice.

Una volta integrate le equazioni del sistema si può ricavare la vibrazione sull'imperiale all'altezza del collegamento del quadro del pantografo come:

$$z_i(t) = z_c(t) \pm d\beta_c(t)$$

I risultati vengono schematizzati in Figura 3.6.

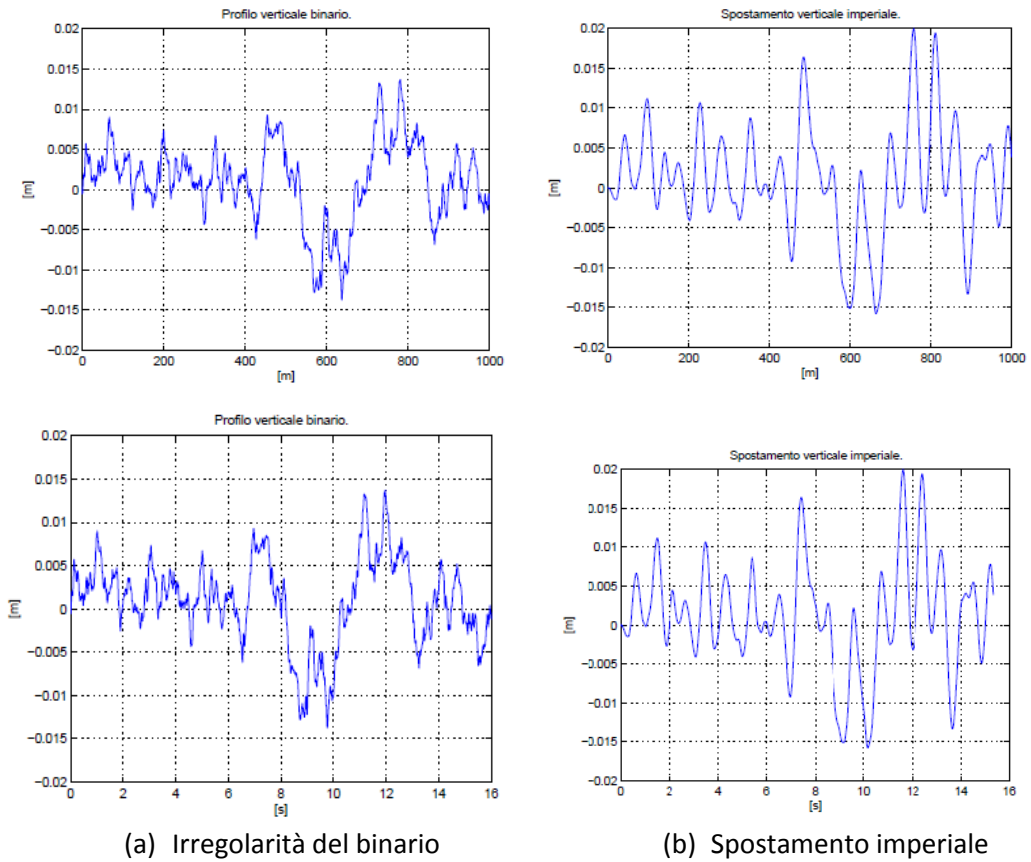


Figura 3.6 - Risultati della simulazione dinamica del modello a mezzo veicolo per  $V=235$  km/h

Il moto verticale dell'imperiale diventa quindi uno spostamento di vincolo imposto come nella schematizzazione di Figura 3.7 che introduce un forzamento sul pantografo dalla parte del quadro.

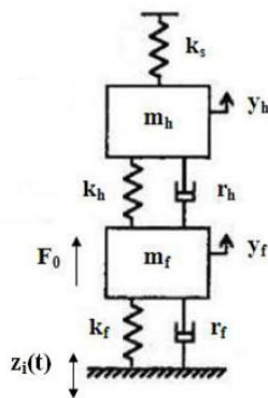


Figura 3.7 - Irregolarità dell'imperiale agente sul pantografo

L'effetto dello spostamento di vincolo imposto viene quindi introdotto nelle equazioni descrittive la dinamica del pantografo:

$$[M_{pt}]\underline{\ddot{y}} + [R_{pt}]\underline{\dot{y}} + [K_{pt}]\underline{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}(F_0 + f_c) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}(r_f \dot{z}_i + k_f z_i)$$

A questo punto viene simulata la dinamica del sistema catenaria pantografo per due differenti velocità di marcia del treno, V=180 km/h e V=235 km/h. Prima della simulazione vengono ricavati lo spostamento e la velocità verticali dell'imperiale della motrice in corrispondenza dell'altezza di montaggio del pantografo per entrambe le velocità di marcia considerate. Viene poi simulata la dinamica del sistema catenaria pantografo introducendo lo spostamento di vincolo impresso dell'imperiale. I risultati della simulazione sono riportati nella tabella sottostante.

<b>V=180 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.07E+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	3.52E+0	2.53E+0	3.90E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	1.01E+1	5.92E+0	2.11E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-1.21E+1	-6.00E+0	9.76E+0	-	-	-	-
<b>V=180 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.06E+1	-	6.38E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	2.07E+0	2.16E+0	2.06E+1	3.60E+1	3.13E-2	1.75E-1	7.56E+0
<b>Max</b>	5.46E+0	5.64E+0	1.47E+2	7.82E+1	1.18E-1	3.19E-1	2.81E+1
<b>Min</b>	-5.01E+0	-5.47E+0	4.68E+1	-1.02E+2	7.76E-3	-4.83E-1	-2.34E+1
						1	
<b>V=235 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.02E+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	4.15E+0	2.18E+0	3.68E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	1.20E+1	4.58E+0	2.00E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-9.29E+0	-5.91E+0	-4.19E+0	-	-	-	-
<b>V=235 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.01E+1	-	6.51E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	2.47E+0	2.65E+0	2.39E+1	4.36E+1	2.78E-2	1.84E-1	8.82E+0
<b>Max</b>	7.30E+0	7.82E+0	1.57E+2	1.39E+2	1.14E-1	3.23E-1	3.80E+1
<b>Min</b>	-6.16E+0	-6.54E+0	1.63E+1	-1.21E+2	1.75E-2	-4.50E-1	-2.91E+1
						1	

Tabella 3.3- Risultati della simulazione

Dai risultati riportati in tabella si vede che per entrambe le velocità di marcia considerate l'algoritmo di controllo testato è in grado di migliorare il contatto tra la catenaria e il pantografo. Il valore di deviazione standard ed il valore massimo della forza

di contatto vengono diminuiti mentre il valore minimo viene aumentato. La vibrazione dell'imperiale non si manifesta in maniera significativa nei dati delle simulazioni. L'irregolarità del binario non incide significativamente sui dati del sistema: bisogna infatti ricordare che l'irregolarità introdotta dal binario viene filtrata una prima volta dal sistema di sospensioni della cassa della motrice manifestandosi quindi sull'imperiale. Successivamente il disturbo presente sull'imperiale viene ulteriormente filtrato dai due stadi di sospensione del pantografo.

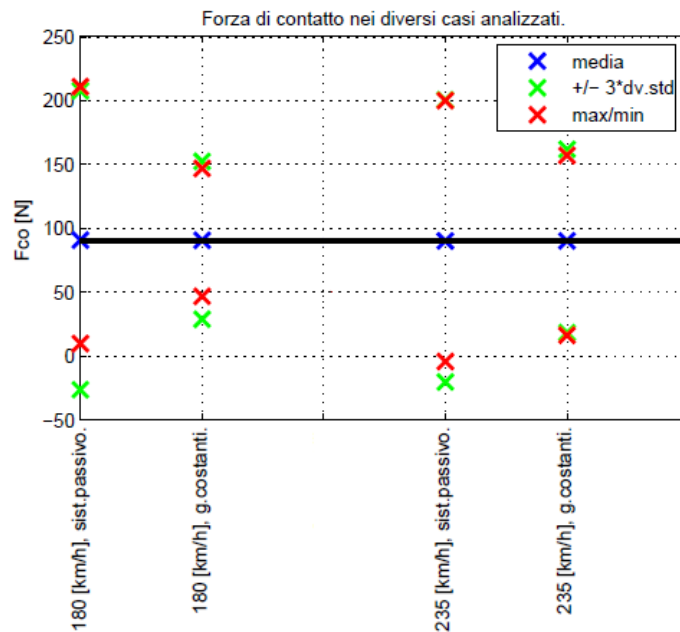


Figura 3.8 - Risultati della simulazione relativi alla forza di contatto

### 3.6.2 Il disturbo introdotto dall'irregolarità della catenaria

Questo disturbo è essenzialmente dovuto all'inevitabile errore con cui viene posta in sede la catenaria durante l'elettrificazione di una linea ferroviaria ed allo spostamento dei pali di sostegno dovuto alla subsidenza del terreno.

Così come è stato fatto con l'irregolarità del binario, conviene descrivere il fenomeno mediante un approccio sperimentale. L'irregolarità della catenaria viene assunta come un fenomeno random, stazionario ed ergodico, descritto attraverso la propria densità di potenza spettrale. Attraverso campagne sperimentali condotte sulle linee ferroviarie, viene ricavata una correlazione sperimentale tramite la quale è possibile riprodurre un profilo di irregolarità avente la stessa densità di potenza spettrale di quella reale. Ottenuta la PSD, è possibile ricavare il profilo verticale della catenaria nello spazio e nel tempo.

L'effetto dell'irregolarità della catenaria sul sistema viene introdotto considerando lo spostamento del filo di contatto nel punto di contatto con la testa del pantografo come la somma dello spostamento stesso del filo più lo spostamento dovuto al profilo di

irregolarità nel punto considerato. Per introdurre l'irregolarità nelle equazioni di moto è necessario riscrivere il lavoro virtuale compiuto dalla forza di contatto tra catenaria e pantografo nello spostamento del filo di contatto rispetto alla testa del pantografo. Il lavoro virtuale risulta quindi essere:

$$\begin{aligned}\delta^*L &= F_c \delta (W_c(\xi_{pt}, t) + z_l(\xi_{pt}) - y_h) = \\ &= k_s (y_h - W_c(\xi_{pt}, t) - z_l(\xi_{pt})) \delta (W_c(\xi_{pt}, t) + z_l(\xi_{pt}) - y_h)\end{aligned}$$

dove  $z_l(\xi_{pt})$  è lo spostamento dovuto al profilo di irregolarità.

Raggruppando i gradi di libertà del sistema e introducendo le matrici di estrazione risulta:

$$\begin{aligned}\delta^*L &= k_s \left( ([E_y][E_{yy}] - \underline{\varphi}(\xi_{pt})^T [E_c][E_{qq}]) \underline{z} \right. \\ &\quad \left. - z_l(\xi_{pt}) \right) \left( (\underline{\varphi}(\xi_{pt})^T [E_c][E_{qq}] - [E_y][E_{yy}]) \delta \underline{z} + \delta z_l(\xi_{pt}) \right) \\ \underline{z} &= \begin{pmatrix} q \\ y \end{pmatrix}\end{aligned}$$

$$\underline{q}_c = [E_c] \underline{q} \quad y_h = [E_y] \underline{y} \quad \underline{y} = [E_{yy}] \underline{z} \quad \underline{q} = [E_{qq}] \underline{z}$$

I termini in  $\delta z_l(\xi_{pt})$  in realtà possono essere eliminati: il profilo di irregolarità viene infatti considerato come uno spostamento imposto che si somma allo spostamento del filo di contatto nel punto di contatto e non è quindi un grado di libertà del sistema. Ne ricaviamo quindi:

$$\begin{aligned}\left( \frac{\delta^*L}{\delta \underline{z}} \right)^T &= k_s \left( [E_{qq}]^T [E_c]^T \underline{\varphi}(\xi_{pt}) \right. \\ &\quad \left. - [E_{yy}]^T [E_y]^T \right) \left( ([E_y][E_{yy}] - \underline{\varphi}(\xi_{pt})^T [E_c][E_{qq}]) \underline{z} - z_l(\xi_{pt}) \right) \\ &= [KK_{eqv}(\xi_{pt})] \underline{z} + \underline{D}(\xi_{pt}) z_l(\xi_{pt})\end{aligned}$$

Il lavoro virtuale associato alla forza di contatto, nel caso sia presente l'irregolarità del filo di contatto della catenaria, è composta da due termini: il primo,  $[KK_{eqv}(\xi_{pt})] \underline{z}$ , coincide con quello ricavato precedentemente in assenza di disturbi e rappresenta il termine che rende parametrico il sistema catenaria pantografo in funzione della posizione del pantografo rispetto alla catenaria ed accoppia il sistema della catenaria con quello del pantografo; il secondo,  $\underline{D}(\xi_{pt}) z_l(\xi_{pt})$ , permette di introdurre l'irregolarità del filo di contatto nel sistema dinamico catenaria pantografo. Il profilo di irregolarità della catenaria agisce come uno spostamento di vincolo impresso, il cui effetto sul sistema è espresso dalla sua componente lagrangiana. Questo vettore è funzione della posizione del pantografo sotto la catenaria o alternativamente dell'istante di simulazione.

Si introduce quanto ricavato nelle equazioni del sistema dinamico catenaria pantografo:

$$[MM]\ddot{\underline{z}} + [RR]\dot{\underline{z}} + [KK^*(t)]\underline{z} = \begin{pmatrix} 0_{2Nm \times 1} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} F_0 + \underline{D}(t)z_l(t)$$

Rispetto all'equazione dinamica ricavata per il caso privo di irregolarità, a secondo membro è presente un termine funzione del tempo o della posizione del pantografo che esprime la componente lagrangiana dell'irregolarità della catenaria sul sistema catenaria pantografo.

Viene ora simulata la dinamica del contatto tra catenaria ed il pantografo quando è presente l'irregolarità del filo di contatto per due velocità del treno, V=180 km/h e V=235 km/h. si riportano nella tabella sottostante i risultati relativi a tale simulazione.

<b>V=180 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.10E+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	3.58E+0	2.50E+0	3.97E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	1.13E+1	5.92E+0	2.09E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-1.18E+1	-6.60E+0	1.05E+1	-	-	-	-
<b>V=180 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.06+1	-	6.05E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	2.15E+0	2.18E+0	2.14E+1	3.66E+1	3.23E-2	1.77E-1	7.53E+0
<b>Max</b>	5.90E+0	6.11E+0	1.47E+2	8.54E+1	1.15E-1	3.08E-1	3.00E+1
<b>Min</b>	-5.51E+0	-5.29E+0	3.84E+1	-9.80E+1	4.21E-3	-4.79E-1	-2.54E+1
						1	
<b>V=235 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.06E+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	4.50E+0	2.25E+0	4.08E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	1.35E+1	4.83E+0	2.19E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-1.12E+1	-6.16E+0	-2.88E+1	-	-	-	-
<b>V=235 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.01E+1	-	6.18E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	2.73E+0	2.69E+0	2.65E+1	4.48E+1	2.82E-2	1.87E-1	9.35E+0
<b>Max</b>	8.54E+0	7.75E+0	1.73E+2	1.36E+2	1.10E-1	3.33E-1	4.52E+1
<b>Min</b>	-8.08E+0	-7.34E+0	5.11E+0	-1.34E+2	1.18E-2	-4.43E-1	-3.40E+1
						1	

Tabella 3.4 - Risultati della simulazione

Nel sistema passivo è evidente come l'irregolarità della catenaria peggiori il contatto tra catenaria stessa e pantografo, soprattutto per quanto riguarda la forza di contatto. L'effetto è ovviamente più marcato con l'aumento della velocità. Nel caso attivo si

ottengono delle prestazioni peggiori, in termini di forze di contatto, rispetto al caso privo di irregolarità.

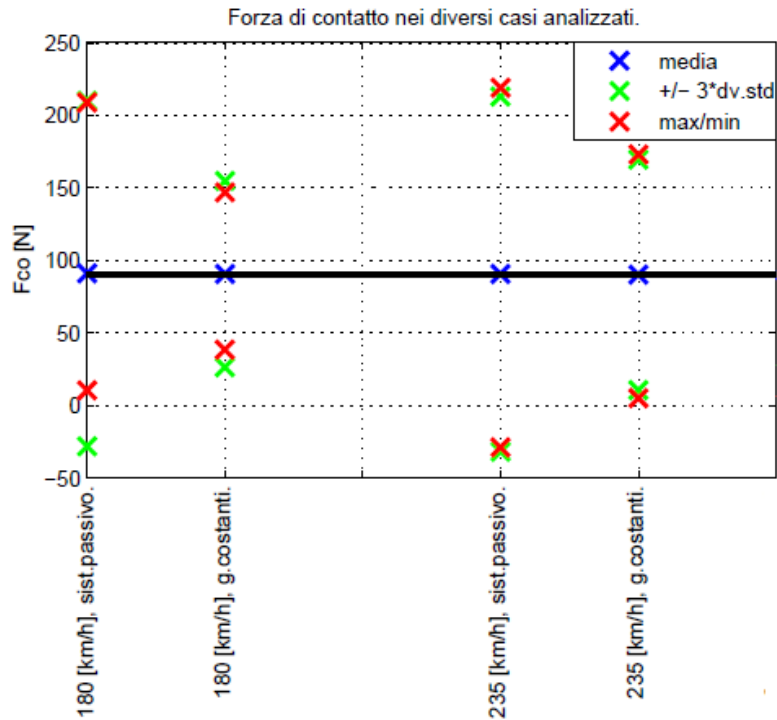


Figura 3.9 - Risultati della simulazione relativi alla forza di contatto

### 3.6.3 La presenza di entrambi i disturbi

Sono state ricavate le equazioni del sistema catenaria pantografo nel caso in cui siano presenti le vibrazioni dell'imperiale e l'irregolarità del filo di contatto della catenaria. Vogliamo ora scrivere le equazioni del sistema catenaria pantografo nel caso siano presenti entrambi i disturbi sul sistema: la scrittura di queste ultime viene fatta attraverso la sovrapposizione degli effetti dei due disturbi considerati. Riportiamo le equazioni descriventi il sistema passivo e attivo nelle tabelle sottostanti.



---

Equazioni del sistema

---

$$[MM]\ddot{\underline{z}} + [RR]\dot{\underline{z}} + [KK^*(t)]\underline{z} = \underline{C}F + \underline{D}(t)z_i \quad [MM] = \begin{pmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [M_{pt}] \end{pmatrix}$$

$$[RR] = \begin{pmatrix} [R] & [0] \\ [0] & [R_{pt}] \end{pmatrix} \quad [KK^*(t)] = \begin{pmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K_{pt}] \end{pmatrix} - [KK_{eqv}(t)]$$

$$[KK_{eqv}(t)] = k_s([E_{qq}]^T[E_c]^T\underline{\varphi}(t) - [E_{yy}]^T[E_y]^T)([E_y][E_{yy}] - \underline{\varphi}(t)^T[E_c][E_{qq}])$$


---

Sistema passivo, assenza di irregolarità

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 \quad \underline{D}(t) = \underline{0}$$


---

Sistema passivo, vibrazione dell'imperiale

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + r_f \dot{z}_i + k_f z_i \quad \underline{D}(t) = \underline{0}$$


---

Sistema passivo, irregolarità della catenaria

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 \quad \underline{D}(t) = k_s([E_{yy}]^T[E_y]^T - [E_{qq}]^T[E_c]^T\underline{\varphi}(t))$$


---

Sistema passivo, entrambe le irregolarità presenti

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + r_f \dot{z}_i + k_f z_i$$

$$\underline{D}(t) = k_s([E_{yy}]^T[E_y]^T - [E_{qq}]^T[E_c]^T\underline{\varphi}(t))$$

Tabella 3.5 - Equazioni del sistema passivo: matrice di rigidità tempo variante

---

Equazioni del sistema

---

$$[MM]\ddot{z} + [RR]\dot{z} + [KK^*(t)]z = \underline{C}F + \underline{D}(t)z_t \quad [MM] = \begin{pmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [M_{pt}] \end{pmatrix}$$

$$[RR] = \begin{pmatrix} [R] & [0] \\ [0] & [R_{pt}] \end{pmatrix} \quad [KK^*(t)] = \begin{pmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K_{pt}] \end{pmatrix} - [KK_{eqv}(t)]$$

$$[KK_{eqv}(t)] = k_s([E_{qq}]^T[E_c]^T\underline{\varphi}(t) - [E_{yy}]^T[E_y]^T)([E_y][E_{yy}] - \underline{\varphi}(t)^T[E_c][E_{qq}])$$


---

Sistema attivo, assenza di irregolarità

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h + G_1 & r_h + r_f + G_2 \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h + G_3 & k_h + k_f + G_4 \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + G_3 y_{h_{rif}} + G_4 y_{f_{rif}} \quad \underline{D}(t) = \underline{0}$$


---

Sistema attivo, vibrazione dell'imperiale

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h + G_1 & r_h + r_f + G_2 \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h + G_3 & k_h + k_f + G_4 \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + G_3 y_{h_{rif}} + G_4 y_{f_{rif}} + (r_f + G_1 + G_2) \dot{z}_i + (k_f + G_3 + G_4) z_i$$

$$\underline{D}(t) = \underline{0}$$


---

Sistema attivo, irregolarità della catenaria

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h + G_1 & r_h + r_f + G_2 \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h + G_3 & k_h + k_f + G_4 \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + G_3 y_{h_{rif}} + G_4 y_{f_{rif}}$$

$$\underline{D}(t) = k_s([E_{yy}]^T[E_y]^T - [E_{qq}]^T[E_c]^T\underline{\varphi}(t))$$


---

Sistema attivo, entrambe le irregolarità presenti

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h + G_1 & r_h + r_f + G_2 \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h + G_3 & k_h + k_f + G_4 \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + G_3 y_{h_{rif}} + G_4 y_{f_{rif}} + (r_f + G_1 + G_2) \dot{z}_i + (k_f + G_3 + G_4) z_i$$

$$\underline{D}(t) = k_s([E_{yy}]^T[E_y]^T - [E_{qq}]^T[E_c]^T\underline{\varphi}(t))$$


---

Tabella 3.6 - Equazioni del sistema controllato: matrice di rigidezza tempo variante

---



---

Equazioni del sistema

---

$$[MM]\ddot{\underline{z}} + [RR]\dot{\underline{z}} + [KK]\underline{z} = \underline{C}F + \underline{E}(t)F_c$$

$$[MM] = \begin{pmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [M_{pt}] \end{pmatrix}$$

$$[RR] = \begin{pmatrix} [R] & [0] \\ [0] & [R_{pt}] \end{pmatrix}$$

$$[KK] = \begin{pmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K_{pt}] \end{pmatrix}$$

$$[E(t)] = [E_{qq}]^T [E_c]^T \underline{\varphi}(t) - [E_{yy}]^T [E_y]^T$$

---

Sistema passivo, assenza di irregolarità

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{pmatrix}$$

$$[K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{pmatrix}$$

$$F = F_0$$

$$F_c = k_s (\underline{z}_{(2N_m+1,1)} - \underline{\varphi}(t)^T \underline{z}_{(N_m+1:2N_m,1)})$$

---

Sistema passivo, vibrazione dell'imperiale

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{pmatrix}$$

$$[K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + r_f \dot{z}_i + k_f z_i$$

$$F_c = k_s (y_h - \underline{\varphi}(t)^T \underline{q}_c) = k_s (\underline{z}_{(2N_m+1,1)} - \underline{\varphi}(t)^T \underline{z}_{(N_m+1:2N_m,1)})$$

---

Sistema passivo, irregolarità della catenaria

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{pmatrix}$$

$$[K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{pmatrix}$$

$$F = F_0$$

$$F_c = k_s (y_h - \underline{\varphi}(t)^T \underline{q}_c - z_l(t)) = k_s (\underline{z}_{(2N_m+1,1)} - \underline{\varphi}(t)^T \underline{z}_{(N_m+1:2N_m,1)} - z_l(t))$$

---

Sistema passivo, entrambe le irregolarità presenti

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h & r_h + r_f \end{pmatrix}$$

$$[K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h + k_f \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + r_f \dot{z}_i + k_f z_i$$

$$F_c = k_s (y_h - \underline{\varphi}(t)^T \underline{q}_c - z_l(t)) = k_s (\underline{z}_{(2N_m+1,1)} - \underline{\varphi}(t)^T \underline{z}_{(N_m+1:2N_m,1)} - z_l(t))$$


---

Tabella 3.7- Equazioni del sistema passivo: matrice di rigidità costante

---



---

Equazioni del sistema

---

$$[MM]\ddot{\underline{z}} + [RR]\dot{\underline{z}} + [KK]\underline{z} = \underline{C}F + \underline{E}(t)F_c \quad [MM] = \begin{pmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [M_{pt}] \end{pmatrix}$$

$$[RR] = \begin{pmatrix} [R] & [0] \\ [0] & [R_{pt}] \end{pmatrix} \quad [KK] = \begin{pmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K_{pt}] \end{pmatrix}$$

$$[E(t)] = [E_{qq}]^T [E_c]^T \underline{\varphi}(\xi_{pt}) - [E_{yy}]^T [E_y]^T$$


---

Sistema attivo, assenza di irregolarità

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h + G_1 & r_h + r_f + G_2 \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h + G_3 & k_h + k_f + G_4 \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + G_3 y_{h,rif} + G_4 y_{f,rif} \quad F_c = k_s (\underline{z}_{(2N_m+1,1)} - \underline{\varphi}(t)^T \underline{z}_{(N_m+1:2N_m,1)})$$


---

Sistema attivo, vibrazione dell'imperiale

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h + G_1 & r_h + r_f + G_2 \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h + G_3 & k_h + k_f + G_4 \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + G_3 y_{h,rif} + G_4 y_{f,rif} + (r_f + G_1 + G_2) \dot{z}_i + (k_f + G_3 + G_4) z_i$$

$$F_c = k_s (y_h - \underline{\varphi}(t)^T \underline{q}_c) = k_s (\underline{z}_{(2N_m+1,1)} - \underline{\varphi}(t)^T \underline{z}_{(N_m+1:2N_m,1)})$$


---

Sistema attivo, irregolarità della catenaria

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h + G_1 & r_h + r_f + G_2 \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h + G_3 & k_h + k_f + G_4 \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + G_3 y_{h,rif} + G_4 y_{f,rif}$$

$$F_c = k_s (y_h - \underline{\varphi}(t)^T \underline{q}_c - z_i(t)) = k_s (\underline{z}_{(2N_m+1,1)} - \underline{\varphi}(t)^T \underline{z}_{(N_m+1:2N_m,1)} - z_i(t))$$


---

Sistema attivo, entrambe le irregolarità presenti

---

$$[R_{pt}] = \begin{pmatrix} r_h & -r_h \\ -r_h + G_1 & r_h + r_f + G_2 \end{pmatrix} \quad [K_{pt}] = \begin{pmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h + G_3 & k_h + k_f + G_4 \end{pmatrix}$$

$$F = F_0 + G_3 y_{h,rif} + G_4 y_{f,rif} + (r_f + G_1 + G_2) \dot{z}_i + (k_f + G_3 + G_4) z_i$$

$$F_c = k_s (y_h - \underline{\varphi}(t)^T \underline{q}_c - z_i(t)) = k_s (\underline{z}_{(2N_m+1,1)} - \underline{\varphi}(t)^T \underline{z}_{(N_m+1:2N_m,1)} - z_i(t))$$


---

Tabella 3.8- Equazioni del sistema controllato: matrice di rigidità costante

I risultati della simulazione contemporanea dei due disturbi sono riportati nella tabella sottostante.

<b>V=180 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.08E+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	3.65E+0	2.52E+0	3.97E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	1.17E+1	5.84E+0	2.07E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-1.18E+1	-6.49E+0	9.46E+0	-	-	-	-
<b>V=180 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.06E+1	-	6.29E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	2.15E+0	2.19E+0	2.12E+1	3.66E+1	3.26E-2	1.75E-1	7.61E+0
<b>Max</b>	5.85E+0	6.07E+0	1.47E+2	8.60E+1	1.24E-1	3.43E-1	2.99E+1
<b>Min</b>	-5.44E+0	-5.42E+0	3.75E+1	-9.88E+1	-2.38E-3	-4.87E-1	-2.42E+1
<b>V=235 km/s SISTEMA PASSIVO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.03E+1	-	-	-	-
<b>Dv.Std</b>	4.32E+0	2.18E+0	3.87E+1	-	-	-	-
<b>Max</b>	1.31E+1	4.68E+0	2.16E+2	-	-	-	-
<b>Min</b>	-1.06E+1	-5.87E+0	-2.24E+1	-	-	-	-
<b>V=235 km/s SISTEMA CONTROLLATO</b>							
	$\ddot{y}_h$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\ddot{y}_f$ [m/s <sup>2</sup> ]	F <sub>co</sub> [N]	F <sub>ctr</sub> [N]	$\Delta l$ [m]	$\dot{\Delta l}$ [m/s]	P [W]
<b>Media</b>	-	-	9.01E+1	-	6.42E-2	-	-
<b>Dv.Std</b>	2.71E+0	2.68E+0	2.59E+1	4.42E+1	2.93E-2	1.83E-1	9.17E+0
<b>Max</b>	8.49E+0	7.82E+0	1.71E+2	1.39E+2	1.21E-1	3.46E-1	4.19E+1
<b>Min</b>	-8.09E+0	-7.28E+0	4.57E+0	-1.31E+2	1.24E-2	-4.60E-1	-3.60E+1

Tabella 3.9 - Risultati della simulazione

Questi risultati ci consentono di individuare un importante problema che caratterizza le linee di trazione elettrificate e in particolar modo quelle ad alta velocità: l'imperfetto contatto tra catenaria e pantografo. Come vedremo nel prossimo capitolo, questo difetto comporta la nascita del fenomeno dell'arco elettrico.

## 4. L' arco elettrico

La relazione tra pantografo e catenaria gioca un importante ruolo nei sistemi di trazione elettrificati. Il perfetto contatto tra il pantografo e la catenaria è il punto chiave per una stabile cattura di corrente da parte della locomotiva. Come già detto, con l'incremento della velocità del treno, le vibrazioni meccaniche del veicolo, l'irregolarità dei binari e i punti difficili della catenaria pregiudicherebbero seriamente il contatto elettrico tra la striscia di contatto del pantografo e la linea aerea di contatto. Da un lato, il tasso di usura del pantografo e della catenaria aumenta in modo significativo a causa del cattivo contatto elettrico scorrevole, quindi il loro tempo di vita diventa più breve. D'altra parte, si verifica frequentemente il fenomeno dell'arco nel contatto strisciante tra il pantografo e la catenaria. Con lo sviluppo dei treni ad alta velocità, il fenomeno dell'arco elettrico ha iniziato a manifestarsi con una grande frequenza e risulta pesantemente influenzato dalla natura degli elettrodi (strisciante del pantografo in carbonio e linea di contatto in rame).

Vari apparecchi sono stati messi a punto per poter studiare il fenomeno, e per studiarne i fattori influenzanti. Per esempio, si prende qui in considerazione lo studio effettuato alla School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University in Cina. In questo caso l'apparecchiatura consente di simulare i movimenti laterali a zig zag, le vibrazioni verticali e la variazione di flessibilità della linea di contatto. Vengono studiati alcuni parametri fondamentali, tra i quali la corrente e la tensione. E inoltre tutti i processi di formazione fisica dell'arco sono stati ripresi tramite una telecamera ad alta velocità.

### 4.1 Il meccanismo di formazione dell'arco elettrico

L'arco elettrico è un fenomeno che si verifica durante le operazioni di apertura e chiusura di un circuito elettrico. Esso consiste essenzialmente in un canale luminoso prodotto dalla ionizzazione dell'aria. Per spiegare tale fenomeno facciamo un passo indietro: si definisce ionizzazione di un gas, il processo per il quale un gas, inizialmente neutro, viene ionizzato sottraendogli elettroni mediante un'opportuna quantità di energia, e diventa quindi conduttore. Questo fenomeno può verificarsi in seguito al passaggio di una scarica elettrica. È anche noto come scarica elettrica, o (se la corrente che fluisce nella scarica è molto elevata) arco elettrico. Per comprendere il fenomeno di ionizzazione a opera dell'azione di una scarica elettrica in un gas, è utile un dispositivo per la generazione e lo studio di archi confinati.

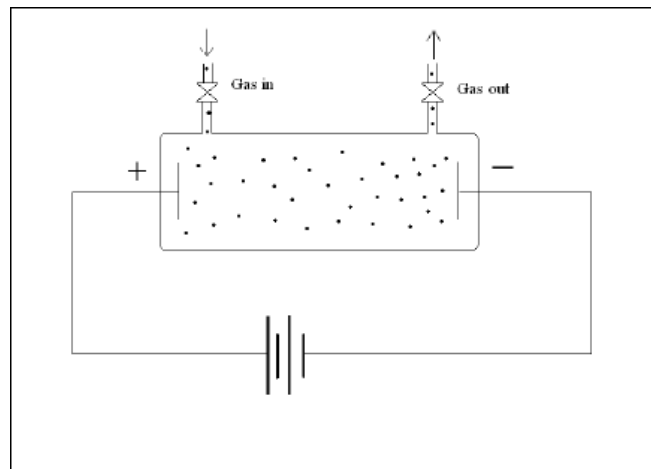


Figura 4.1 - Dispositivo per lo studio di archi confinati

Un tale dispositivo è costituito da un generatore di corrente continua e due conduttori elettrici, questi sono collegati per un capo ai rispettivi poli del generatore e immersi per l'altro in un contenitore isolato dall'ambiente esterno sia elettricamente sia per i trasporti di massa che non coinvolgono il gas che si vuole studiare. Nel dispositivo può essere inserito gas in quiete a diverse pressioni (l'arco elettrico che si stabilisce tra i due elettrodi viene chiamato in tal caso *free burning arc*) oppure in moto forzato (*transferred arc*). Ciò che si osserva è che per bassi valori di differenze di potenziale elettrico (10 V) ai capi del contenitore si ha passaggio di una corrente elettrica debolissima ( $10^{-15}$  A). Aumentando la differenza di potenziale oltre un certo valore limite, il comportamento muta improvvisamente e si evidenzia una crescita della intensità di corrente associata a una emissione luminosa: questo fenomeno coincide con la rottura del dielettrico e l'emissione elettronica che segue è in grado di autosostenere la scarica. Per pressioni pari a quella atmosferica e basse resistenze del circuito, dopo la rottura del dielettrico, si manifesta una scarica ad arco: in questo caso la corrente raggiunge valori superiori a 1 A con tensioni dell'ordine di alcune decine di Volt. Il riscaldamento del catodo per effetto joule provoca l'emissione termoionica. Un plasma in arco alla pressione normale presenta un'elevata densità elettronica e una temperatura di 5800/23200 K.

La locomotiva ottiene l'energia di alimentazione dal filo di contatto in rame attraverso la striscia di contatto del pantografo. Se filo di contatto in rame è perfettamente in contatto con lo strisciante del pantografo non c'è differenza di tensione ai capi. Ma il traferro variabile generato a causa della vibrazione meccanica del treno e del filo di contatto può portare all'innesco dell'arco: al momento del distacco tra strisciante e il filo di contatto, l'aria, il dielettrico, è rotta perché la differenza di tensione tra i due elettrodi aumenta bruscamente, il che porta alla scarica e forma una fiamma. Si forma così del plasma ad alta temperatura che altro non è che l'arco, il quale brucia come mostrato in Figura 4.2.

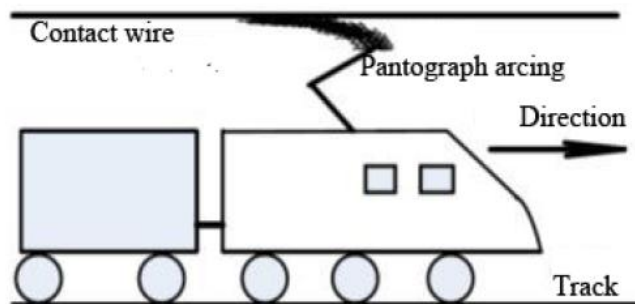


Figura 4.2 - Fenomeno dell'arco quando pantografo e catenaria si separano

L'arco elettrico tra il pantografo e la linea di contatto è un fenomeno comune e fortemente predominante alle alte velocità, con l'incremento dei carichi e con le basse temperature caratterizzanti i periodi invernali. Anche nei sistemi in corrente continua però, anche se il voltaggio è relativamente più basso rispetto al sistema in corrente alternata, spesso si nota l'innesco dell'arco: come risultato di questo fenomeno, spesso si nota un bagliore lungo il pantografo, soprattutto quando la velocità è elevata. A causa dell'alta temperatura dell'arco, lo strisciante del pantografo e il filo di contatto vengono erosi con il tempo e presentano quindi vita breve e un forte degrado delle prestazioni. In certe condizioni, un arco particolarmente intenso può anche rompere direttamente il filo di contatto. Nei sistemi in corrente alternata, l'arco elettrico genera dei transitori e sovratensioni, che possono causare asimmetrie e distorsioni della tensione di alimentazione e delle forme d'onda delle correnti e può quindi danneggiare il pantografo e la linea di contatto per l'alimentazione. L'asimmetria genera a sua volta componenti in corrente continua e armoniche che propagano nel sistema di trazione e nel sistema di segnalamento causando così interferenze elettromagnetiche (EMI). L'arco elettrico può anche causare interferenze con i sistemi di controllo del convertitore e può provocare l'apertura del circuito di protezione dell'interruttore principale che protegge il materiale rotabile e le stazioni di alimentazione. Inoltre il meteo influenza pesantemente tale fenomeno: in condizioni di bel tempo, una sottile pellicola di umidità si genera tra le superfici di contatto e agisce come lubrificante, migliorando la scorrevolezza del contatto tra pantografo e filo di contatto. In inverno, questo strato di umidità si congela e con il variare delle condizioni meteo, si formano strati di brina che portano ad una perdita di scorrevolezza e alla formazione di archi visibili che si muovono con il pantografo lungo il filo di contatto, anche quando la velocità del treno è bassa.

Il fenomeno dell'arco caratterizza l'intera linea di trazione con una particolare propensione nei punti di sezionamento per il cambio fase e nei punti di cambio tensione. In questi tratti infatti i sezionatori consentono da una parte di garantire la presenza ravvicinata di due tratte di linea alimentate con tensione o fasi differenti, ma dall'altra costituiscono un punto di innesco di oscillazioni e vibrazioni che aiutano l'innescarsi del fenomeno dell'arco elettrico.



## 4.2 Il sistema di prova dell'arco elettrico

Seguendo i meccanismi di formazione dell'arco, è stato sviluppato un sistema di prova originale, che comprende un generatore dell'arco e un sistema di misura, come mostrato in Figura 4.3. Le frecce rappresentano la direzione di movimento del filo di contatto di rame e del pantografo. La linea di contatto in rame è fissata nelle scanalature sui bordi esterni di due ruote. Il pantografo, è invece installato su un carrello, ed è guidato da due servomotori. Un servomotore controlla i movimenti lineari del pantografo lungo l'asse delle ruote per simulare il movimento a zigzag della linea di contatto di trazione, l'altro servomotore controlla i movimenti su e giù del pantografo rispetto alla direzione verticale per simulare la vibrazione della locomotiva e della linea di contatto. La potenza in uscita dei servomotori può essere regolata da un computer industriale (IC) per poter modificare la velocità di movimentazione del pantografo. Il flusso di corrente proveniente dall'alimentatore, attraversa il filo di contatto in rame, la resistenza di contatto o l'arco, il pantografo, il carico integrativo con la resistenza e l'induttanza, infine risale alla rete elettrica. I fattori di carico di diversi tipi di veicoli possono essere simulati regolando i valori di resistenza e induttanza del carico integrativo.

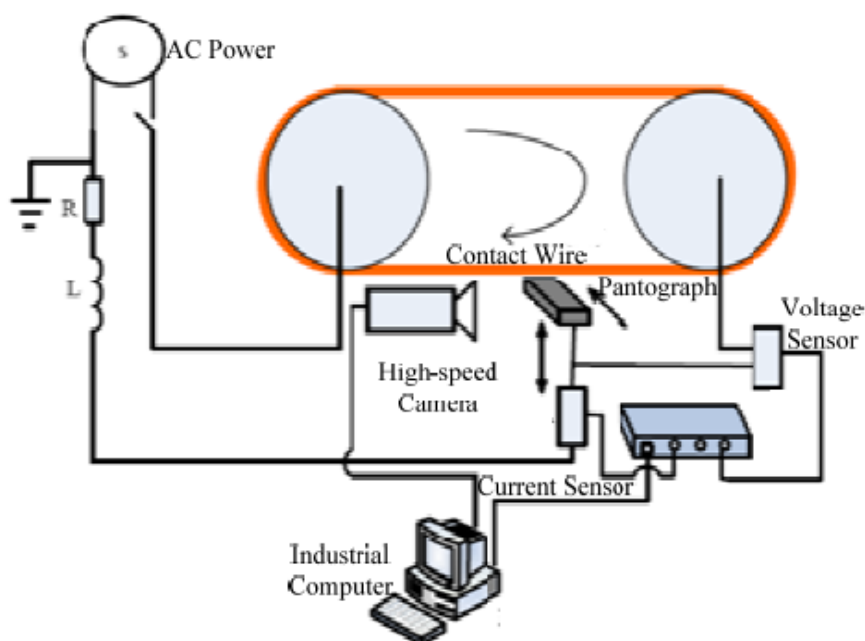


Figura 4.3 - Sistema di prova dell'arco elettrico

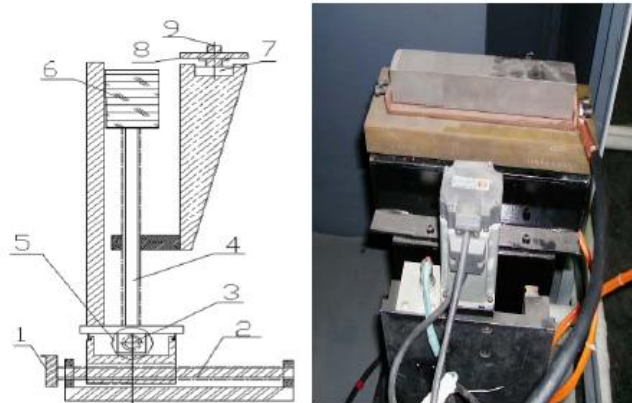
Ci sono quattro unità principali del sistema sperimentale, che consistono nel dispositivo di guida del filo di contatto, nel dispositivo di movimentazione del pantografo, nel sistema di controllo e nella parte elettrica.

#### **4.2.1 Il dispositivo di guida del filo di contatto**

Lo strisciante del pantografo e la linea di contatto possiedono una velocità relativa di scorrimento elevata nella direzione orizzontale quando la locomotiva elettrica è in movimento. In questo esperimento, la linea di contatto è movimentata con un'alta velocità nella direzione orizzontale, mentre il pantografo è tenuto in quiete rispetto al suolo. Così il contatto viene simulato nella maniera più inerente alla realtà. La Figura 4.3 mostra lo schema dell'apparato sperimentale, che consiste in un motore a velocità variabile, alcuni nastri trasportatori, una ruota motrice, un filo di contatto, una ruota condotta, un dispositivo di regolazione e altri componenti. Ciascuna delle ruote è fissata a un telaio isolante in modo da mantenere un buon isolamento. I diametri delle due ruote sono di 1 metro e la distanza tra i due è di 2,5 metri. Una estremità dell'albero della ruota motrice è collegato all'albero di un motore a velocità variabile tramite nastri trasportatori di gomma in modo che vi sia isolamento tra la ruota e il motore, e l'altra estremità è collegata con un collettore a spazzola di carbone che viene utilizzato per collegarlo con l'alimentazione. Il motore a velocità variabile è fissato su un supporto isolante appena sotto l'asse centrale della ruota motrice ed ha una certa distanza di sicurezza da esso. Il filo di contatto è fissato nelle scanalature sui bordi esterni delle due ruote. Il filo di contatto di rame è usato per guidare la ruota condotta e viene considerato come la linea di trazione catenaria. Quando la ruota motrice è messa in rotazione dal motore a velocità variabile, il filo di contatto si muove insieme ad essa. Un regolatore di tensione è installato nel telaio della ruota condotta per regolare la tensione del filo di contatto. La velocità variabile del motore può simulare la velocità variabile della locomotiva.

#### **4.2.2 Il dispositivo di movimentazione del pantografo**

In aggiunta al normale moto orizzontale ad alta velocità, il pantografo e la catenaria presentano un moto orizzontale laterale a zigzag che serve per ridurre l'abrasione dello strisciante. Inoltre si manifesta una vibrazione verticale a causa della variazione di rigidità della catenaria, delle vibrazioni meccaniche del veicolo e di altri fattori. La movimentazione dello strisciante del pantografo è controllata tramite il servo sistema mostrato in Figura 4.4.



(a) The sketch(b) partial physical photo

1-Adjusting handle, 2-X roller screw, 3-Z roller screw, 4-Y roller screw, 5-Z servo motor, 6-Y-servo motor, 7-Cylinder, 8-Insulation board, 9-Pantograph strip

Figura 4.4 - Sistema servo controllato per la movimentazione del pantografo

Viene installata una vite a rulli nella parte inferiore a formare un dispositivo di scorrimento in direzione X. La posizione dello strisciante del pantografo può essere modificata lungo il filo di contatto perché una manopola di regolazione è fissata alla fine del cursore X. Il cursore laterale Z viene posizionato sul cursore X, ed è azionato da un servomotore. Il dispositivo di scorrimento verticale Y è comandato da un servomotore ed è fissato sul cursore Z. Sulla parte superiore del cursore Y, vi è un attuatore di pressione regolabile, che viene utilizzato per garantire il contatto flessibile tra strisciante e filo di contatto. Un pannello isolante è fissato sulla parte superiore del cilindro. Il contatto strisciante del pantografo è posizionato esattamente sulla superficie del pannello isolante. Il sistema di elevazione del pantografo di solito funziona come segue: in primo luogo, mette lo strisciante del pantografo in una posizione appropriata longitudinale (X) regolando la maniglia secondo i requisiti della prova. In secondo luogo, il servo motore controllato dal servo sistema aziona la vite a rulli e la fa ruotare. Il movimento laterale a zigzag nella direzione Z è realizzato perché il cursore Z è guidato nel movimento dalla vite. In terzo luogo, in accordo con la frequenza di vibrazione tra il pantografo strisciante e la catenaria, la condizione di moto del cursore Y viene effettuata regolando l'altro servo sistema e il servomotore. Le modalità di funzionamento possono essere utilizzate per simulare i processi di separazione e riavvicinamento del sistema pantografo - catenaria. La diversa forza di contatto del pantografo può essere realizzata agendo sulla pressione dell'aria nel cilindro.

### 4.2.3 Il sistema di controllo

Il diagramma schematico del sistema di controllo dell'apparato di simulazione dell'arco è mostrato in Figura 4.5. Le principali componenti sono un Industrial Personal Computer (IPC), un controllo logico programmabile (PLC) e un sistema di

movimentazione. L'IPC è in grado di modificare i parametri di prova e controllare il PLC tramite moduli di comunicazione. Mentre, il PLC controlla il movimento relativo e la vibrazione verticale tra lo strisciante del pantografo e il filo di contatto tramite i diversi motori di guida.

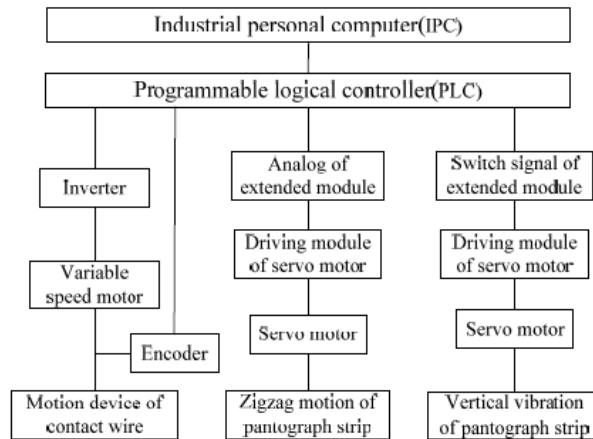


Figura 4.5 - Sistema di controllo per il test

#### 4.2.4 I parametri della linea di contatto e dello strisciante del pantografo

La linea di contatto è costituita da una lega di alluminio e rame. Lo strisciante del pantografo è invece costituito da carbonio con l'aggiunta di alcuni metalli. La Tabella 4.1 indica i parametri caratterizzanti la linea di contatto, le percentuali dei metalli contenuti nel materiale e i parametri che caratterizzano lo strisciante del pantografo.

TABLE I Basic parameters of the contact wire

Pattern	Length of AC(mm)	Length of BC(mm)	Resistivity ( $\Omega/\text{km}$ )	Breaking force(kN)
RIM120	13.2	12.85	0.239	57

TABLE II Element content of slide board

C(wt%)	Pb(wt%)	Sn(wt%)	Si(wt%)	Ni(wt%)	Cu(wt%)
59	6.97	2.87	0.697	0.533	29.93

TABLE III The physical parameters of slide board

Volume density( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Open porosity	Compression strength (MPa)	Rupture strength (MPa)	Resistivity ( $\mu\Omega/\text{m}$ )
2.85	0.4%	359	110	7

Tabella 4.1 - Parametri della linea di contatto e dello strisciante

## 4.3 L'esperimento sull'arco

Alcuni caratteri tipici dell'arco sono visualizzati utilizzando questa apparecchiatura di prova, ad esempio le proprietà elettriche dell'arco, il rapporto tra la resistenza di contatto e la forza di contatto, la forma dell'arco, e così via.

### 4.3.1 Le proprietà elettriche dell'arco

In Figura 4.6 sono rappresentati i parametri elettrici caratterizzanti l'arco elettrico: la curva rossa e la curva nera rappresentano rispettivamente la tensione d'arco e la corrente d'arco.

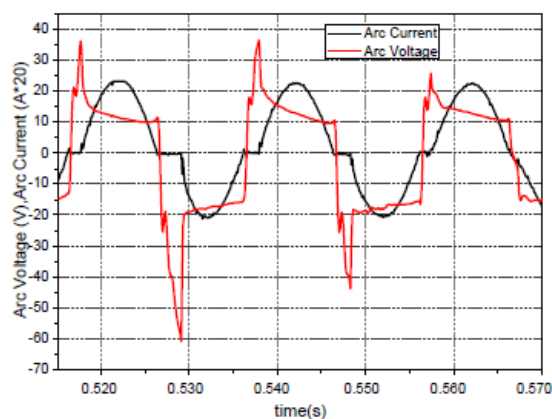


Figura 4.6 - Parametri elettrici caratterizzanti il fenomeno dell'arco

Come mostrato in tale figura, la forma d'onda della tensione dell'arco è distorta seriamente, e contiene un gran numero di componenti in corrente continua e componenti armoniche. Quando la differenza di tensione tra i due elettrodi tende a zero, l'arco si spegne perché la caduta di tensione ai capi dell'arco è troppo piccola. Si manifesta così il passaggio per lo zero della corrente (CZC). L'arco può essere riacceso nuovamente e può continuare a bruciare dopo la CZC quando la tensione aumenta. La tensione di superamento viene generata alla fine della CZC quando improvvisamente il traferro è di nuovo rotto.

### 4.3.2 La forma dell'arco elettrico

In Figura 4.7 sono riportate le caratteristiche morfologiche dell'arco che sono state registrate in condizioni diverse: la Figura 4.7 (a) è l'immagine dell'arco che è stato immortalato nella realtà al passaggio di un treno; la Figura 4.7 (b) è una foto dell'arco, ripresa durante prove tradizionali; la Figura 4.7 (c) è la fotografia di alcuni archi elettrici catturati durante i test qui descritti.

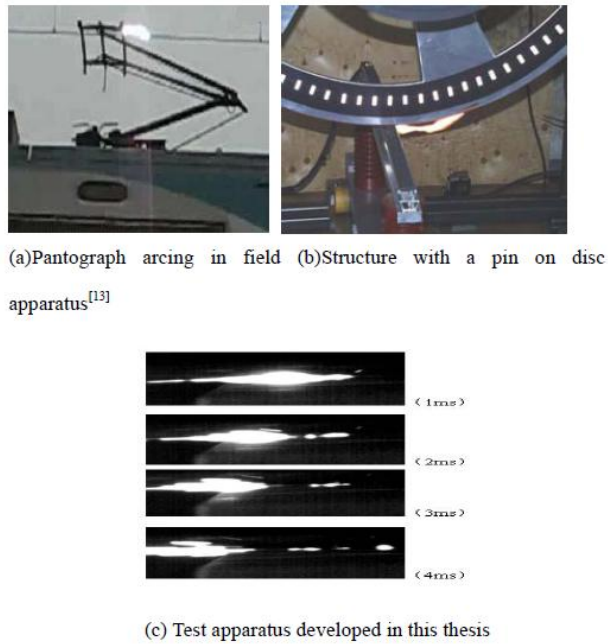


Figura 4.7 - Foto della manifestazione dell'arco in diverse condizioni

La condizione di contatto tra strisciante e linea di contatto agisce direttamente sulla morfologia dell'arco perché l'arco si muove lungo il filo di contatto di rame come mostrato in Figura 4.7 (a). L'immagine dell'arco mostrata in Figura 4.7 (b) mostra che l'arco si distribuisce lungo la periferia della ruota: è una forma diversa da quella reale dell'arco, perché in questo caso l'arco è curvo. In questo studio invece, la morfologia dell'arco è simile a quella effettiva ricavata in un treno in moto. Contrariamente ai risultati analitici, l'apparecchiatura di prova dell'arco che è stata sviluppata in questo documento può essere utilizzata per simulare le caratteristiche morfologiche dell'arco che insorge ai capi di un pantografo.

## 4.4 Analisi e discussione dei risultati

### 4.4.1 Analisi della tensione d'arco

**Tensione di riaccensione dell'arco:** in Figura 4.8 è rappresentata la tensione d'arco e il suo punto di riaccensione. A è il punto di riaccensione quando lo strisciante si comporta come catodo, C è il punto di riaccensione nel caso in cui il filo di contatto rappresenta il catodo.

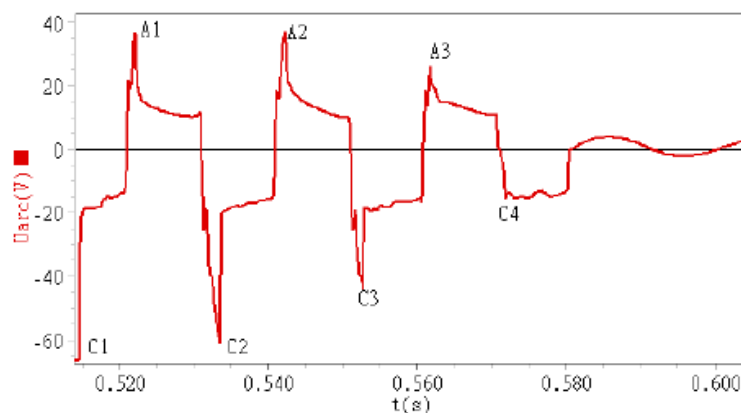


Figura 4.8 - Tensione di arco

Come la figura ha mostrato, la tensione di arco presenta quattro periodi, poi l'arco si estingue. La componente fondamentale della forma d'onda della tensione d'arco è una componente sinusoidale, aspetto che è evidente dopo  $t=5.81$  s. La figura 4.9 rappresenta la tensione di riaccensione dell'arco per differenti gap tra pantografo e linea.

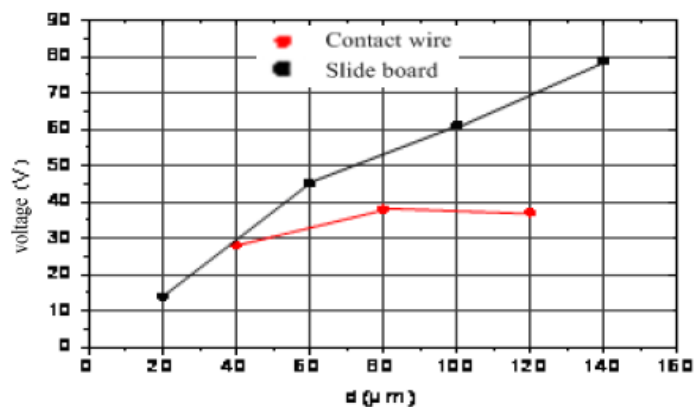


Figura 4.9 - Tensione di riaccensione dell'arco a differenti gap

Si può vedere dal grafico che ovviamente la tensione di riaccensione aumenta con l'aumentare della dimensione del traferro tra il pantografo e la linea di testa. La tensione di riaccensione dell'arco aumenta linearmente quando il pantografo si comporta come catodo, mentre questo discorso non vale per l'altro caso, nel quale presenta delle fluttuazioni. Quindi possiamo concludere che:

- La tensione di riaccensione dell'arco è più elevata quando lo strisciante si comporta come catodo;

- La tensione di riaccensione dell'arco viene incrementata con l'aumentare del traferro;

**Tensione di estinzione dell'arco:** la tensione di estinzione dell'arco è la tensione che si ha tra il pantografo e la linea di testa quando la corrente dell'arco è approssimativamente zero. La tensione d'arco diminuisce e quindi aumenta: l'arco si spegne quando la tensione d'arco è uguale alla tensione di alimentazione, la corrente di arco è quindi nulla, e in questo momento la tensione d'arco è chiamata tensione di estinzione. Da questo momento l'aria presente nel gap non conduce più e torna ad essere un isolante.

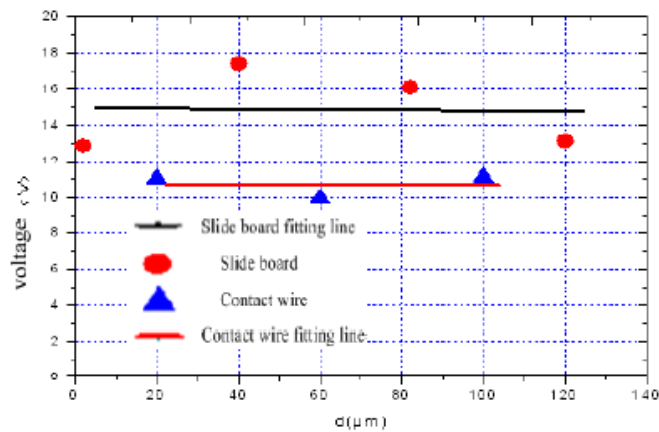


Figura 4.10 - Tensione di estinzione dell'arco a differenti distanze

La figura 4.10 dimostra che la tensione di estinzione è circa costante. Ma la tensione è diversa tra pantografo e linea di testa. La tensione di estinzione della linea di testa è circa 11V, ma quella del pantografo è 15V. Questo diverso comportamento è dovuto alla differente emissione di elettroni e al differente materiale dell'elettrodo. L'emissione termoionica è la principale emissione di elettroni quando brucia l'arco. Questa capacità di emissione di elettroni è influenzata dal materiale degli elettrodi e dalla temperatura dell'aria nell'intercapedine. Il lavoro dello strisciante è più intenso di quello della linea di testa: quindi la tensione di estinzione del pantografo è superiore rispetto a quella della linea di testa. E, lo stesso vale per il valore della tensione di estinzione con il variare del gap.

**Caratteristiche della tensione d'arco nel dominio delle frequenze:** a causa della continua formazione dell'arco tra il pantografo e la linea di contatto, vengono generate un numero elevato di componenti armoniche e in correnti continua.



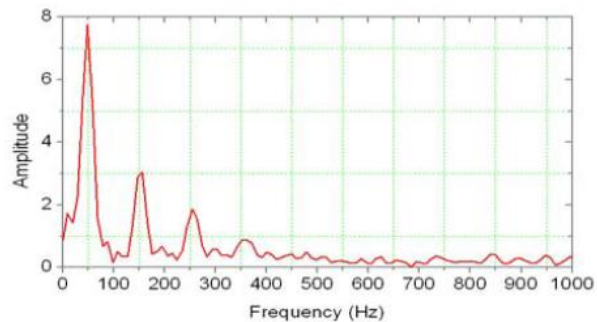


Figura 4.11- Spettro della tensione d'arco

In Figura 4.11 è mostrato come il segnale contenga un elevato numero di componenti in corrente continua e armoniche dispari. Le componenti in corrente continua consistono nel 12% delle onde fondamentali, le terze armoniche occupano il 38% delle fondamentali, le quinte armoniche approssimativamente il 30% e le settime circa il 10%. Una grande quantità di componenti continue causeranno una polarizzazione dei trasformatori per la trazione. Le componenti continue e quelle armoniche possono anche causare perdite elettromagnetiche del trasformatore quando si lavora vicino alla sua piena capacità, aumento di temperatura del trasformatore e altri problemi.

#### 4.4.2 Analisi della corrente d'arco

**Analisi dell'andamento della corrente:** in Figura 4.12 è riportata la corrente d'arco. Questa presenta una forma d'onda sinusoidale con due zone in cui la corrente è nulla. Se in corrispondenza del primo punto di passaggio per lo zero della corrente, la tensione è sufficientemente elevata, viene generato un arco che brucia sino al passaggio per lo zero successivo. L'arco invece si spegne nel momento in cui la tensione cala al di sotto di quella necessaria per garantirne l'esistenza.

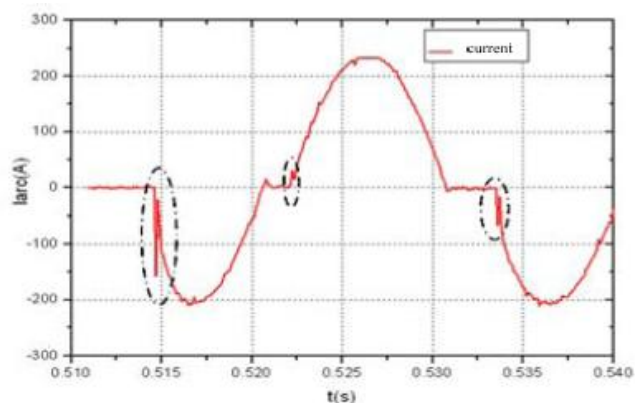


Figura 4.12-Corrente d'arco

**Caratteristiche della corrente d'arco nel dominio delle frequenze:** in Figura 4.13 è riportato lo spettro della corrente d'arco. Da tale grafico si evidenzia che le componenti in corrente continua consistono nel 25% delle onde fondamentali, le terze armoniche occupano il 14% delle fondamentali, le quinte armoniche approssimativamente il 7% e le settime circa il 4%. Queste componenti minacciano il funzionamento del trasformatore utilizzato per l'alimentazione, quello della locomotiva e altri equipaggiamenti utilizzati nelle operazioni di sicurezza.

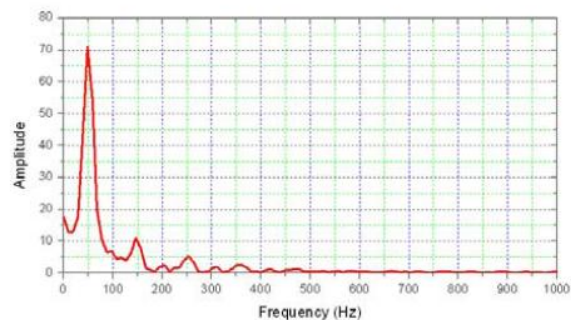


Figura 4.13 - Spettro della corrente d'arco

#### 4.4.3 Durata dell'arco

La durata dell'arco è uno dei parametri più importanti che influenza l'energia trasportata dall'arco stesso. È logico concludere che l'erosione elettrica provocata dal fenomeno dell'arco sia proporzionale all'energia posseduta dall'arco stesso e che quest'ultima sia fortemente influenzata dalla durata dell'arco. La durata dell'arco si compone da due momenti fondamentali: la fase metallica del tempo di arco  $t_m$  e quella gassosa  $t_g$ . La fase metallica è la fase iniziale che si estende dallo scoccare dell'arco fino alla formazione della fase gassosa dell'arco. Con l'incremento di corrente, l'arco esisterà nella sola fase gassosa. La sua durata dipende dal tipo di carico applicato: nella tabella sottostante è rappresentata la sua variazione con applicati carichi di diversa natura.

Load Current Time	Resistive	Inductive
	40	4.47
50	5.44	6.90
60	6.40	8.01
70	6.60	8.57
80	6.77	9.05
90	7.71	10.50
100	8.64	12.20

Tabella 4.2 - Durata dell'arco sotto carichi diversi

La durata dell'arco aumenta con l'aumentare della corrente di trazione, non importa quale sia la natura del carico. Questo incremento della durata è dovuto a un sensibile aumento della temperatura nella zona dello scorrimento del pantografo sul filo di contatto che fa incrementare sensibilmente la densità di emissione termoionica: in questo modo l'energia dell'arco cresce notevolmente e viene quindi incrementato il tempo di rilascio di tale energia. A pari intensità di corrente la durata è maggiore in caso di carico induttivo piuttosto che resistivo. Nel caso di un'induttanza infatti, questa immagazzina energia che rilascia nel momento in cui si ha un affievolimento dell'arco e ne consente una maggiore durata.

#### 4.5 Simulazione numerica e modello analitico del fenomeno

In un modello "Black Box", il fenomeno dell'arco può essere descritto tramite semplici equazioni matematiche dalle quali può venire ricavata la conducibilità dell'arco sfruttando la misura della tensione e della corrente. Tale modello non è adatto per l'osservazione di circuiti aperti, ma è molto affidabile per la simulazione di quanto accade nei circuiti di simulazione degli archi elettrici.

In particolare per lo studio di tali fenomeni si può fare riferimento a due differenti modelli: il modello di Cassie, il quale viene utilizzato in condizioni di correnti e temperature elevate, e il modello di Mayr, che viene utilizzato per descrivere la conducibilità nel caso in cui l'intensità di corrente sia prossima allo zero. Questi modelli possono venire sintetizzati con equazioni di carattere generale. In particolare, nella forma generalizzata, la conducibilità dell'arco  $R$ , è una funzione dei parametri che caratterizzano l'arco e in particolare dell'energia trasmessa nel processo.

$$g = f(P_{in}, P_{out}, t) = \frac{i_{arc}}{u_{arc}} = \frac{1}{R}$$

Dove  $P_{in}$  è la potenza erogata per formare l'arco,  $P_{out}$  la potenza trasmessa dall'arco,  $t$  il tempo,  $i_{arc}$  il valore istantaneo della corrente d'arco,  $u_{arc}$  il valore istantaneo della tensione d'arco e  $R$  il valore istantaneo della resistenza che caratterizza l'arco.

Analiticamente si è dimostrato che  $R$  può venire approssimata come:

$$R = 1.05 \frac{l}{I}$$

Dove  $l$  è la lunghezza dell'arco,  $I$  l'intensità di corrente istantanea.

Per la schematizzazione del fenomeno dell'arco elettrico si può utilizzare un semplice circuito in cui si ha un interruttore che consente di schematizzare un momentaneo

malfunzionamento. Al lato sorgente dell'interruttore è presente un circuito per riprodurre una tensione transitoria, mentre il circuito RLC dal lato linea rappresenta una linea di trasmissione breve che è cortocircuitato. Vengono qui confrontati i due differenti approcci.

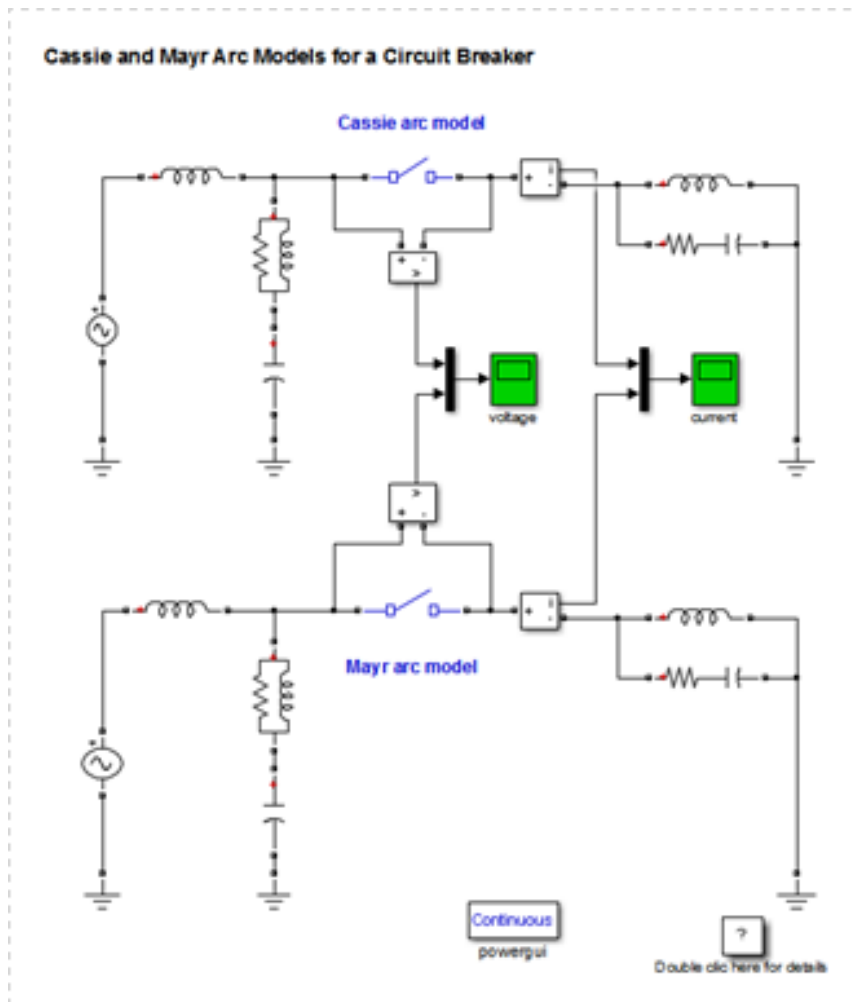


Figura 4.14- Confronto fra i modelli di Cassie e di Mayr

Il modello dell'arco di Cassie (in Figura 4.15 rappresentato in giallo), presenta una tensione d'arco costante nell'intervallo in cui ho corrente elevata, mentre nel modello di Mayr viene mostrata una tensione d'arco crescente con un picco in prossimità del passaggio per lo zero della corrente. Nel modello di Cassie non si riesce poi ad interrompere la corrente di corto circuito, mentre in quello di Mayr viene interrotta e mostrata una piccola corrente post-arco di 0.6A subito dopo il passaggio per lo zero della corrente. Infine nel caso del modello dell'arco di Mayr, la tensione transitoria si accumula sull'interruttore.

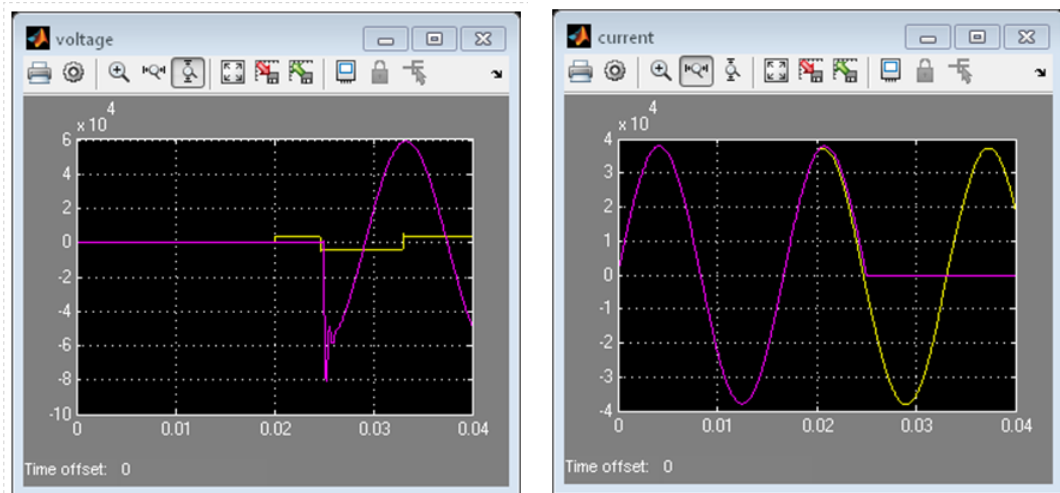


Figura 4.15- Confronto dei risultati

## 4.6 Impatto dell'arco sulle componenti

### 4.6.1 Impatto sul trasformatore principale

Abbiamo visto precedentemente, grazie all'analisi in frequenza di corrente e tensione caratterizzanti l'arco elettrico, che questo fenomeno è accompagnato da un numero svariato di armoniche e componenti in corrente continua. Abbiamo anche detto come le componenti in corrente continua causino una polarizzazione dei trasformatori di trazione, mentre l'insieme di componenti continue ed armoniche possono causare perdite elettromagnetiche dei trasformatori specialmente quando si lavora vicini alla loro piena capacità.

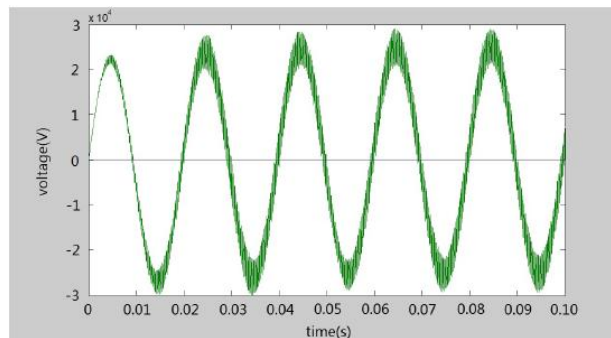


Figura 4.16 - Tensione sul lato alta tensione del trasformatore

Quanto rappresentato sopra è la forma d'onda della tensione sul lato alta tensione del trasformatore principale. Poiché l'arco provoca svariate armoniche, queste comportano delle vibrazioni nella tensione di alimentazione del trasformatore. La forma d'onda diventa meno regolare e questo influenza le operazioni di routine del trasformatore, accelerando l'invecchiamento e l'usura di tutto l'apparecchio. Durante questi meccanismi il trasformatore può produrre rumore e generare componenti continue. Per risolvere tale problema si può pensare di collegare un condensatore in parallelo al lato alta tensione del trasformatore: durante il processo transitorio del pantografo lungo il filo di contatto, la tensione ai capi del carico rimane la stessa. Poiché il processo di variazione della tensione accade molto lentamente se comparato alla formazione dell'arco, c'è solo una piccola differenza tra la tensione di alimentazione e quella presente sul pantografo. Quando compare l'arco il generatore fornisce solo una piccola quantità di energia per l'arco e questo si estingue più in fretta. In seguito a svariate analisi si è stabilito che con un condensatore da 8  $\mu\text{F}$  in parallelo, la tensione di alimentazione del trasformatore principale è notevolmente migliorata.

#### 4.6.2 Impatto sulla linea di contatto e sullo strisciente

Durante il moto dello strisciente sotto la linea di contatto aerea, si verificano svariate meccanismi di usura causati per esempio dall'ossidazione e dal distacco di parti, fenomeni fortemente influenzati dalla forza normale che si esercita tra le due componenti, dalla velocità di scorrimento, dalla corrente elettrica e dal calore sviluppato.

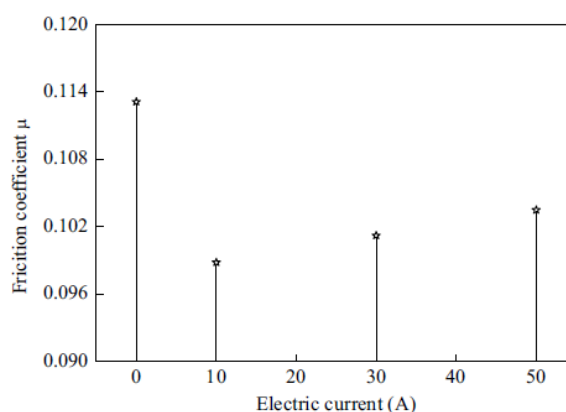


Figura 4.17 - Variazione del coefficiente di attrito con la corrente elettrica

La presenza della corrente elettrica fa modificare il coefficiente di attrito: in assenza di corrente, tale coefficiente è stimato pari a 0.114. Tale coefficiente tuttavia ha una tendenza ad aumentare quando viene applicata la corrente. Questo è dovuto alla formazione nell'interfaccia di uno strato di ossido che viene favorito dal passaggio della

corrente. La distruzione dell'interfaccia a causa dell'arco elettrico comporta l'esistenza di vari coefficienti. In figura 4.18 è mostrata la variazione di volume di usura dello strisciante in carbonio con e senza scarica ad arco.

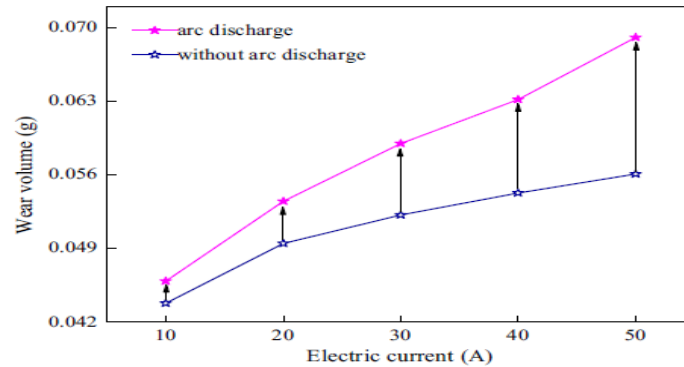


Figura 4.18 - Tasso di usura dello strisciante al variare della corrente

Si può notare che in entrambi i casi l'usura del materiale è bassa nel caso in cui non si manifesti passaggio di corrente elettrica, mentre con l'incremento della corrente il tasso di usura aumenta quasi linearmente. In caso di presenza dell'arco, è noto che l'intensità della scarica aumenta con l'aumentare della corrente. Questo spiega perché si hanno picchi di usura così elevati.

Nelle figure sottostanti sono mostrate delle micrografie delle superfici usurate dello strisciante di carbonio di un pantografo soggetto a diversi tipi di arco.

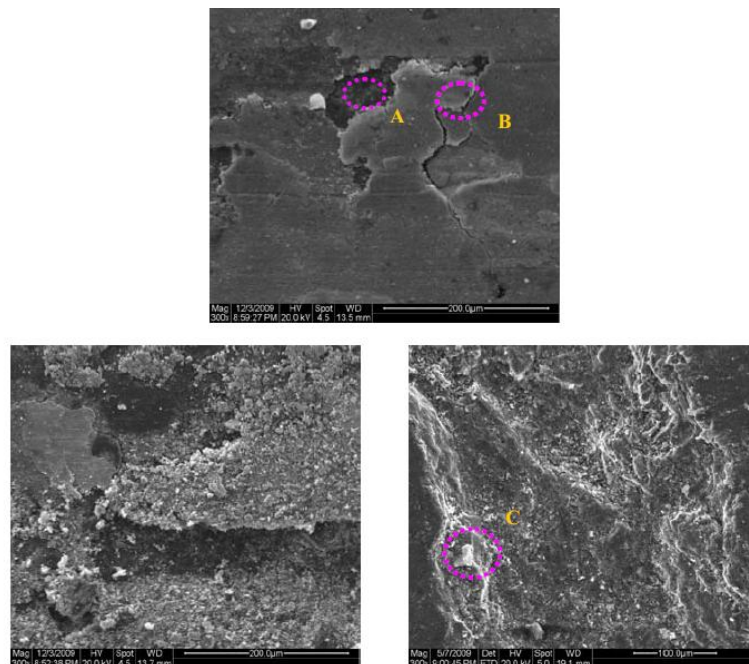


Figura 4.19 - Micrografie della superficie dello strisciante per I=0 A, I=30 A

Nella prima viene mostrato come la superficie sia molto liscia, sinonimo di assenza di scarica ad arco. Si evidenziano delle scaglie di usura e dei distacchi dalla superficie usurata: questi fenomeni vengono attribuiti alla forte adesione e frattura causata dal calore sviluppato in seguito all'attrito e al grave stress sopportato dalla zona. Nelle altre due immagini viene rappresentato invece il caso in cui si manifesta la scarica ad arco. Sono evidenti, oltre a quanto detto sopra, dei piccoli punti luminosi, dei crateri di ablazione causati dall'arco e punti con metallo fuso sulla superficie. Ovviamente più è elevata la corrente, più grandi saranno i crateri di erosione.



## Conclusioni

Questo lavoro è stato sviluppato per dimostrare come alcune problematiche meccaniche possano influenzare pesantemente la captazione elettrica della corrente e portare alla nascita di fenomeni fortemente deterioranti per le linee elettriche.

Per meglio comprendere questi fenomeni si è partiti da un capitolo introduttivo riguardante la trazione elettrica nel quale sono stati descritti gli elementi fondamentali che caratterizzano quest'ultima, e, in particolare la linea di trazione, il pantografo e i tipi di treni utilizzati.

Poi si è passati al secondo capitolo nel quale sono stati descritti tutti gli apparati elettrici, il sistema di alimentazione e le possibili interferenze elettromagnetiche che possono nascere in questi complessi sistemi.

Il terzo capitolo è stato dedicato all'analisi dal punto di vista meccanico del sistema pantografo-catenaria e in particolar modo alle vibrazioni che nascono quando il tutto è messo in movimento.

Infine è stata affrontata la descrizione dell'innesco dell'arco elettrico proprio in seguito a queste vibrazioni e di alcuni sistemi di prova messi a punto per studiarlo, si sono analizzate le grandezze fisiche che lo descrivono e infine si sono riportate le conseguenze che questo fenomeno comporta.

Questo ci porta a concludere che un miglioramento nel contatto tra linea aerea e pantografo comporterà un netto miglioramento nella durata delle parti in contatto tra loro con una conseguente diminuzione dei costi legati alla manutenzione. La spinta nella ricerca di soluzioni impiantistiche è quindi fortemente influenzata da questo fenomeno, il quale, ad oggi rappresenta il problema più grave che affligge le linee ad Alta Velocità.

## Bibliografia

- [1] G. Diana, F. Cheli, “ *Dinamica e vibrazione dei sistemi* ”, Vol.1, 1997.
- [2] D. Zaninelli, “ *Sistemi elettrici per l’alta velocità ferroviaria* ”, 2010.
- [3] D. V. Fonte, A. Collina, “ *Un confronto tra diverse strategie di controllo di un pantografo ferroviario in presenza dell’irregolarità delle infrastrutture*”, 2011.
- [4] T. Ding, G. X. Chen, S. F. Xiao, L. Xie, Q. D. Zeng, “ *The role of the arc erosion in sever wear of carbon strip/copper contact wire in pantograph catenary system* ”, 2011.
- [5] T. Li, G. Wu, L. Zhou, G. Gao, W. Wang, B. Wang, D. Liu, D. Li, “*Pantograph arcing’s impact on locomotive equipments* ”, 2011.
- [6] B. Wang, G. Wu, L. Zhou, G. Gao, W. Wang, D. Liu, D. Li, T. Li, “*Pantograph arc’s energy characters under various load* ”, 2011.
- [7] W. Wang, G. Wu, G. Gao, B. Wang, L. Zhou, Y. Cui, D. Liu, “ *Experimental study of electrical characteristics on pantograph arcing* ”, 2011.
- [8] A. Dong, G. Wu, G. Gao, L. Zhou, W. Wang, B. Wang, Y. Cui, Y. Mingming, “*Simulation system of pantograph arcing* ”, 2011.
- [9] S. Midya, D. Bormann, T. Schutte, R. Thottappillil, “ *Pantograph arcing in electrified railway – Mechanism and influence of various parameters* ”, 2009.
- [10] N. Markovic, S. Bjelic, J. Ziavanic, U. Jaksic, “ *Numerical simulation and analytical model of electrical arc impedance in the transient processes* ”, 2013.
- [11] R. Turri, “ *Appunti di Alimentazione elettrica delle linee ferroviaria ad Alta Velocità*”, 2009.

- [12] S.Chen, F.Sha, "*Three types of electromagnetic noise between pantograph and catenary*", 2009.
- [13] M.Nessi, S.Bruni, M.Carnevale, "*Modellizzazione matematica e identificazione dei parametri per la simulazione dell'interazione dinamica tra pantografo e catenaria*", 2010.
- [14] J.P. Massat, "*Modélisation du comportement dynamique du couple pantographe-caténaire. Application à la détection de défauts dans la caténaire*", 2007