

Indice

Sommario	3
1. Introduzione	5
2. Evoluzione del trasporto ferroviario in Italia	7
3. Il sistema elettrico ferroviario italiano	11
3.1. Le linee primarie	12
3.2. Le sottostazioni elettriche	13
3.3. La linea di contatto.....	35
3.4. Il circuito di ritorno.....	45
4. Il sistema in esame	51
4.1. Introduzione	51
4.2. Caratterizzazione delle parti dell'impianto.....	51
4.1.1. Linee primarie	51
4.1.2. Sottostazioni elettriche	52
4.1.3. Linea di contatto	57
4.1.4. Circuito di ritorno	58
5. Il software EMTP-RV®	59
6. La costruzione dei modelli	73
6.1. Costruzione delle parti dell'impianto.....	73
6.1.1. Rete di alimentazione	73
6.1.2. Linee primarie	73
6.1.3. Sottostazioni elettriche	75
6.1.4. Linea di contatto e circuito di ritorno	78
6.1.5. Caratteristiche di simulazione	82
7. Analisi di una tratta ferroviaria con alimentazione convenzionale	87
7.1. Le simulazioni statiche	89
Caso A.....	89
Caso B.....	96
7.2. Le simulazioni dinamiche	100
Caso A.....	110

Caso B.....	115
Caso C.....	119
Caso D.....	123
8. La nuova proposta: il sistema di alimentazione 2×3 kV.....	127
8.1. La costruzione dei modelli	128
9. Analisi di una tratta con sistema di alimentazione 2×3 kV	135
9.1. Sistema 2×3 kV con presenza di più carichi statici.....	136
9.1.1. Sistema privo di trasformatore elettronico di potenza	136
9.1.2. Sistema dotato di TEP controllato in tensione	143
9.1.3. Sistema dotato di TEP controllato in corrente	148
9.1.4. Confronto con il sistema di alimentazione convenzionale.....	152
9.2. Sistema 2×3 kV con presenza di un carico dinamico.....	153
9.2.1. Sistema privo di trasformatore elettronico di potenza	154
9.2.2. Sistema dotato di TEP controllato in tensione	158
9.2.3. Sistema dotato di TEP controllato in corrente	163
9.2.4. Confronto con il sistema di alimentazione convenzionale.....	166
9.3. Sistema 2×3 kV con presenza di un carico dinamico e il parallelo delle linee di contatto	168
9.3.1. Sistema privo di trasformatore elettronico di potenza	168
9.3.2. Sistema dotato di TEP controllato in tensione	172
9.3.3. Sistema dotato di TEP controllato in corrente	174
9.3.4. Confronto con il sistema di alimentazione convenzionale.....	177
9.4. Sistema 2×3 kV con presenza due carichi dinamici.....	178
9.4.1. Sistema privo di posto di conversione statica	178
9.4.2. Sistema dotato di TEP controllato in tensione	182
9.4.3. Sistema dotato di TEP controllato in corrente	187
9.4.4. Confronto con il sistema di alimentazione convenzionale.....	191
10. Conclusioni.....	193
Bibliografia.....	195

Sommario

I sistemi elettrici dediti ai trasporti sono da sempre in forte evoluzione, al fine di sopperire a esigenze sempre più impellenti per quanto riguarda l'aumento della potenzialità delle linee e il raggiungimento di standard sempre più elevati in termini di sicurezza e affidabilità della circolazione ferroviaria. Dato che il sistema italiano a 3 kV in corrente continua sembrava aver raggiunto il massimo delle proprie potenzialità, si è sentita la necessità di introdurre un impianto completamente nuovo. La soluzione adottata del sistema Alta Velocità / Alta Capacità non sembra essere però il ritrovato più adatto, sia per quanto riguarda i costi, sia per quanto riguarda lo sfruttamento delle infrastrutture già esistenti. Con questo lavoro si vuole affrontare la sfida dell'aumento della potenzialità delle linee in corrente continua esistenti, sfruttando i nuovi ritrovati nell'ambito dell'elettronica di potenza. Il sistema proposto è basato sull'introduzione di un posto di conversione statica in corrente continua, installato tra due sottostazioni elettriche limitrofe, in analogia a quanto fatto per il sistema 2×25 kV adottato per l'Alta Velocità. Sono stati sviluppati modelli del sistema elettrico attuale e di quello proposto attraverso il software di simulazione EMTP-RV, andando a confrontare identiche situazioni di carico, consentendo così un'efficace confronto tra le due soluzioni impiantistiche. I modelli sviluppati analizzano l'intero sistema elettrico, comprendendo anche le linee in alta tensione di alimentazione delle sottostazioni di conversione. Si sono analizzate diverse configurazioni di carico e accorgimenti tecnici inerenti la linea di contatto e il funzionamento del posto di conversione statica, al fine di derivare la soluzione impiantistica più performante.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

1. Introduzione

Il desiderio e la necessità di spostarsi da un luogo a un altro sono sempre stati degli aspetti essenziali per la vita dell'uomo fin dall'età più antica. Motivi economici, di sopravvivenza, sociali hanno sempre spinto l'uomo a viaggiare. Non stupisce quindi che la ruota sia una delle invenzioni universalmente ritenuta più importante nella storia dell'uomo. D'allora l'evoluzione tecnica del trasporto ha fatto passi da gigante. L'automobile, l'aereo, il treno, sono solo alcune delle soluzioni trovate per permettere all'uomo di spostarsi e rendere le distanze da percorrere sempre meno un ostacolo. Ma sono stati proprio i veicoli su rotaia a dare avvio a questo fenomeno, preservando sorprendentemente ancora oggi la loro importanza nel trasporto pubblico e di merci.

Il vero motivo che ha portato alla nascita della ferrovia non va tanto cercato nella maggiore capacità di sopportazione di peso per asse della strada ferrata rispetto al piano stradale, quanto nella riduzione degli sforzi di trazione permessa dalle rotaie. Inoltre la ferrovia presenta i consumi specifici di energia più bassi rispetto a qualsiasi altro mezzo di trasporto pesante.

Tabella 1 Consumo specifico per unità di trasporto dei principali mezzi di trazione pesanti

Mezzo di trasporto	Consumo specifico (gep/UT)
Aereo	90
Autocarro	35
Ferrovia	12

Lo sviluppo del trasporto su rotaia ha seguito, sin dagli albori, l'obiettivo di raggiungere standard sempre più elevati in termini di velocità, affidabilità e sicurezza. Ogni Paese ha cercato di raggiungere questi intenti in modo autonomo e isolato, tentando di trovare ovviamente la soluzione migliore dal punto di vista tecnico ed economico.

Non sorprende quindi che il panorama mondiale del trasporto ferroviario denoti oggi una diversità di soluzioni tecniche adottate molto ampia. Come esempi si possono citare il sistema ferroviario tedesco, che presenta un'alimentazione monofase a frequenza ferroviaria (16·2/3 Hz) con tensione di esercizio pari a 15 kV, il sistema ferroviario italiano, caratterizzato invece da un'alimentazione a tensione continua di valore pari a 3 kV e il sistema ferroviario francese, alimentato a una tensione alternata a 25 kV alla frequenza industriale (50 Hz).

Il desiderio di raggiungere velocità sempre più elevate, aumentando il volume di passeggeri trasportati e riducendo contestualmente i tempi di percorrenza sono obiettivi ancora oggi molto sentiti. La soluzione adottata in Italia del sistema Alta Velocità / Alta Capacità non sembra però il ritrovato più adatto, sia per quanto riguarda i costi, sia per quanto riguarda lo sfruttamento delle infrastrutture già esistenti. Oggetto di questo lavoro è

quindi quello di trovare una soluzione alternativa, che sia in grado di competere con il nuovo sistema attualmente in costruzione.

Per comprendere bene però le peculiarità del sistema ferroviario italiano e le scelte che hanno portato alle attuali caratteristiche tecniche è opportuno richiamarne brevemente la storia.

2. Evoluzione del trasporto ferroviario in Italia

Grazie alla rivoluzione industriale del Diciottesimo secolo, era giunta alla ribalta la grande forza che il vapore era in grado di sprigionare. Si pensò quindi di applicarla a un veicolo, per rendere i trasporti di persone e di merci più veloci e meno difficoltosi. I primi tentativi portarono, nel 1804, grazie all'inventore inglese Richard Trevithick, alla nascita della prima locomotiva a vapore, operante nella miniera di Pennydarren, nel Galles. Da allora innumerevoli furono le migliorie apportate, giungendo nel 1869 al primo veicolo mosso da motore elettrico con alimentazione da linea di contatto, entrato in servizio sulla tranvia del Gramme, in Usa. Dopo le prime applicazioni della trazione elettrica, ci si rese conto della possibilità di utilizzare la trazione termica con motori a benzina, a nafta o a gas. Le due soluzioni, elettrica e termica, si svilupparono poi in modo parallelo, tanto che ancora oggi, a parte in qualche zona dell'Africa e dell'Asia, dove vengono utilizzate locomotive a vapore, la trazione ferroviaria è quasi esclusivamente o Diesel o elettrica.

In Italia i primi tram elettrici in corrente continua fecero la loro comparsa solo nel 1890 nelle città di Roma e di Firenze. Nel 1899 venne inaugurata la tranvia Milano - Monza e, solo successivamente, ne venne installata una tra Bologna e San Felice.

Alla fine del secolo si sviluppò, oltre che il sistema a corrente continua, quello a corrente alternata trifase a bassa frequenza, che utilizzava per l'alimentazione 2 fili di contatto e le rotaie come terza fase. Nel suo sviluppo ebbe un ruolo fondamentale la ferrovia della Valtellina, la cui elettrificazione, effettuata nel 1902, prevedeva l'utilizzo di una tensione di 3000 V a una frequenza di 15 Hz. I buoni riscontri che si ottennero, indussero le ferrovie italiane all'applicazione di questo nuovo sistema di alimentazione alla linea dei Giovi, costituente lo sbocco principale per il porto di Genova. Nell'occasione fu elevata però la frequenza, portandola a $16\frac{2}{3}$ Hz (la frequenza ferroviaria).

I veicoli utilizzati nei due sistemi elettrici erano ovviamente diversi. Il sistema trifase a bassa frequenza alimentava mezzi di trazione dotati solitamente di due motori asincroni a rotore avvolto, mentre quello in corrente continua alimentava locomotive dotate di motori a collettore con eccitazione serie.

Il sistema in corrente continua e il sistema trifase a frequenza ferroviaria subirono, fino agli anni '30, uno sviluppo parallelo, non riuscendo nessuno dei due a prevalere sull'altro dal punto di vista tecnico - economico. Solo dopo l'esperimento, tenutosi nel 1928, della linea Benevento - Foggia, alimentata a 3000 V in corrente continua, fu chiara la superiorità di questa tipologia di alimentazione rispetto al sistema trifase a frequenza ferroviaria, che venne da allora abbandonato. Il suo sviluppo era però stato talmente notevole, che nel 1941 risultavano elettrificati 1820 km di linee, alla frequenza di $16\frac{2}{3}$ Hz e alla tensione di 3,4 kV.

La strada del sistema trifase a frequenza ferroviaria era stata originariamente imboccata per due ragioni principali: la robustezza dei motori asincroni e la facilità con la quale poteva essere effettuato il recupero dell'energia in frenata a velocità leggermente superiori a quella di sincronismo. I limiti del sistema trifase risultarono però ben presto molto evidenti. Vi era una grande difficoltà nella regolazione della velocità, dato che questa è strettamente legata al numero di giri del motore. La scelta di una frequenza inferiore a quella industriale (resa necessaria dalle caratteristiche del motore asincrono trifase) richiedeva la realizzazione di appositi impianti di produzione e di trasporto dell'energia, comportando quindi un grande investimento economico iniziale. La doppia linea di contatto creava poi forti inconvenienti meccanici al raggiungimento di velocità superiori a 100 km/h e inoltre la sua manutenzione era abbastanza problematica. Questi motivi fecero optare per l'abbandono del sistema trifase.

Del sistema in corrente continua molto apprezzata era la facilità di regolazione della velocità, dovuta intrinsecamente alla caratteristica meccanica del motore a collettore, ma realizzabile anche attraverso semplici apparecchiature elettromeccaniche (reostato, avvolgimento di campo a spire variabili). Non vi era poi la necessità di creare un sistema apposito per la produzione e il trasporto dell'energia, dato che era possibile utilizzare quello industriale (in forte sviluppo in quel periodo) attraverso sottostazioni di conversione corrente alternata / corrente continua. L'inconveniente principale risiedeva però nel valore di tensione abbastanza contenuto che era possibile utilizzare con la tecnologia a disposizione, che si traduceva in elevate correnti, elevate sezioni dei conduttori e forti cadute di tensioni in linea. Ciò nonostante il sistema risultò alla fine più conveniente dal punto di vista tecnico ed economico rispetto a quello trifase, tanto da essere definitivamente adottato.

L'avvio al passaggio definitivo al sistema in corrente continua si ebbe in occasione della ricostruzione degli impianti distrutti nella seconda guerra mondiale. Solo nel 1961 incominciò però la conversione degli impianti a frequenza ferroviaria ancora esistenti e soltanto nel 1976 il processo si poté ritenere concluso.

Da allora numerose sono state le migliorie apportate al sistema ferroviario italiano a corrente continua, mosse da esigenze sempre più impellenti per quanto riguarda la sicurezza, la velocità di percorrenza e l'affidabilità del trasporto. A tal proposito basti pensare alle migliorie subite dai gruppi di conversione, un tempo dotati di valvole ai vapori di mercurio e oggi invece formati da diodi al silicio, dei sistemi di rilevazione ed eliminazione dei guasti, dei sistemi di gestione delle sottostazioni elettriche, oggi completamente comandate in telecontrollo da un posto centrale e l'introduzione degli azionamenti elettronici che hanno permesso di disaccoppiare le caratteristiche elettriche dell'impianto da quelle dei motori, permettendo un'ottimizzazione delle prestazioni degli apparati di trazione.

Dato che i limiti tecnici in termini di potenzialità delle linee e di velocità di percorrenza del sistema in corrente continua sembravano ormai quasi insormontabili, si è sentita la necessità di rivoluzionare il panorama del trasporto ferroviario nazionale, andando a sviluppare il sistema Alta Velocità / Alta Capacità. In linea generale, questo prevede la costruzione di un'infrastruttura ferroviaria completamente nuova, in quanto l'alimentazione dei convogli, le cui velocità risultano essere superiore ai 300 km/h, viene effettuata in corrente alternata monofase a 50 Hz col noto sistema 2×25 kV. Le sue caratteristiche consentono una riduzione notevole delle correnti di linea, con benefiche conseguenze sulle cadute di tensione e sui sistemi di protezione, permettendo anche un aumento importante della potenzialità delle linee.

Oggi la rete italiana consta di 18153 km di binari elettrificati in corrente continua e 1342 km dedicati al sistema Alta Velocità, sviluppando un volume di traffico pari a 316 milioni di treni per km/anno. Questi numeri sono in continua crescita, giustificando sia la continua introduzione di migliorie tecniche più o meno evidenti, ma tutte fondamentali per un esercizio sempre più sicuro e affidabile, sia la ricerca di nuovi sistemi che permettano un aumento della potenzialità delle linee esistenti. Quindi, conclusa questa breve parentesi storica, si vuole descrivere in dettaglio il sistema elettrico ferroviario italiano in corrente continua, cominciando dall'alimentazione in alta tensione fino ad arrivare alla linea di contatto.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

3. Il sistema elettrico ferroviario italiano

Come tutti i sistemi elettrici dedicati ai trasporti, il sistema ferroviario italiano si compone di una rete di alimentazione, di posti di conversione e di circuiti di alimentazione dei convogli. In questo senso le componenti principali del sistema elettrico ferroviario italiano sono:

1. Le Linee Primarie (LP)
2. Le Sottostazioni Elettriche di conversione (SSE)
3. La linea di contatto (ldc)
4. Il circuito di ritorno (cdr)

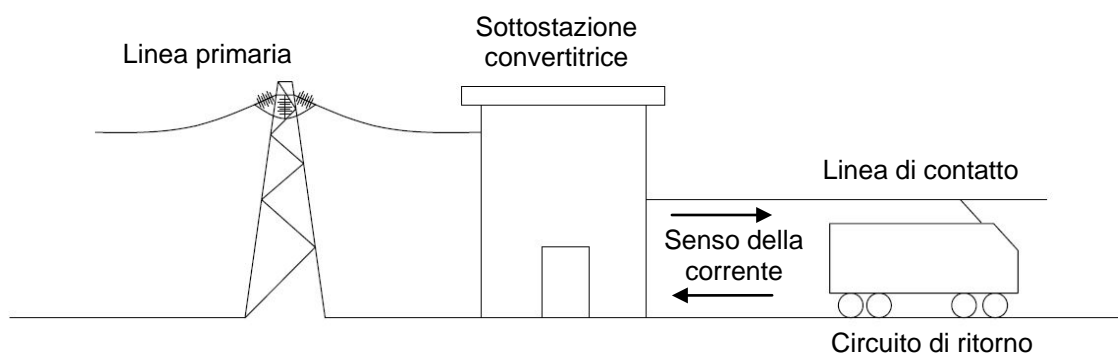


Figura 1 **Struttura del sistema elettrico ferroviario italiano**

Le linee primarie sono collegate alla rete di distribuzione nazionale e hanno lo scopo di fornire energia ad alta tensione alle SSE, rendendo conveniente la trasmissione su lunghe distanze. Nelle SSE la tensione subisce una doppia trasformazione: in primo luogo un abbassamento attraverso trasformatori e in seguito un raddrizzamento mediante ponti di Graetz trifasi. Quindi mediante gli alimentatori, viene fornita energia alla linea di contatto, dalla quale i mezzi di trazione captano corrente, che rientra nella SSE attraverso il circuito di ritorno.

Si vanno ora a descrivere dettagliatamente le parti dell'impianto sopra citate.

3.1. Le linee primarie

Per linee primarie si intendono le linee elettriche a tensione superiore a 1 kV a corrente alternata a frequenza industriale (50 Hz). Ferrovie dello Stato (FS) le classifica in 3 livelli a seconda del valore della tensione nominale della linea:

Tabella 2 Classificazione delle linee primarie in base al livello di tensione secondo FS

Livello	Tensione nominale (kV)	Impiego
1°	$1 < V_n \leq 30$	Alimentazione SSE in MT
2°	$30 < V_n \leq 120$	Alimentazione SSE in AT
3°	$120 < V_n \leq 220$	

Le LP di primo livello vengono alimentate dalle SSE, e forniscono energia agli impianti ausiliari del sistema ferroviario (illuminazione, officine, ecc.). Quelle di secondo e terzo livello collegano invece la rete di trasmissione nazionale alle SSE. Sia per le linee in AT che per quelle in MT sono utilizzate normalmente linee aeree e l'utilizzo di cavi è limitato a rari casi. Per informazioni dettagliate si rimanda a [1] e [2].

3.2. Le sottostazioni elettriche

Le Sottostazioni Elettriche (SSE) sono gli impianti dediti alla conversione dei parametri dell'energia proveniente da una o più linee primarie, al fine di alimentare opportunamente le linee di contatto e, conseguentemente, i mezzi di locomozione.

Una generica SSE può essere suddivisa in 3 grandi reparti:

1. Reparto Alta Tensione (in corrente alternata)
2. Reparto a 3 kV in corrente continua al chiuso
3. Reparto a 3 kV in corrente continua all'aperto

Questi impianti hanno subito nel corso degli anni notevoli cambiamenti, dovuti sia a un'evoluzione tecnologica sempre più spinta, sia a requisiti sempre più rilevanti in termini di affidabilità di esercizio e sicurezza.

In passato era molto diffusa l'alimentazione della SSE a 66 kV, anche se ora risulta essere quasi del tutto scomparsa, rimpiazzata dalle linee primarie a 132 kV o 150 kV. Frequente era anche il caso in cui sia il reparto AT che quello a 3 kV fossero sistemati all'interno di un edificio. La SSE era in tal caso definita di tipo chiuso. Oggi invece solitamente il reparto AT è collocato all'aperto e la SSE viene per questo motivo denominata di tipo misto. Inoltre, un sempre più largo utilizzo di sistemi di telecontrollo, rende non più necessaria la presenza di personale all'interno delle SSE, che risultano quindi impresenziate. Questo processo è in fase di ulteriore sviluppo con l'adozione del Dirigente Operativo Trazione Elettrica (DOTE), un posto centrale di controllo in grado non solo di sorvegliare e gestire le SSE e le cabine TE, ma anche le linee primarie e le linee di contatto in parti di rete sempre più ampie. La presenza delle sale gru per il sollevamento dei trasformatori non è più necessaria, dato che questi non vengono più ispezionati e riparati sul posto. Dagli anni '70 anche lo schema di potenza delle SSE ha subito una notevole semplificazione, adottando raddrizzatori con diodi al silicio al posto delle valvole al mercurio. Notevoli migliorie hanno subito le condizioni di sicurezza per il personale, grazie a una diversa disposizione delle apparecchiature nei locali e l'adozione di sistemi di blocco elettrici e di segnalazione. Negli ultimi anni si sta anche affrontando il tema dell'impatto ambientale che una SSE può recare e i possibili danni alle persone dovuti all'inquinamento elettromagnetico. In questo senso si sta sviluppando sempre più l'impiego di scomparti modulari per le apparecchiature delle SSE, che utilizzano non più collegamenti mediante linee aeree o sbarre, ma linee in cavo.

Collegamento delle SSE alle linee primarie

Anche gli schemi di collegamento delle SSE alle linee primarie hanno seguito una graduale evoluzione, diventando man mano più complessi e consentendo sempre più una flessibilità

di esercizio dell'impianto. Una prima fondamentale suddivisione è data dalla differenza tra collegamento in serie e collegamento in derivazione.

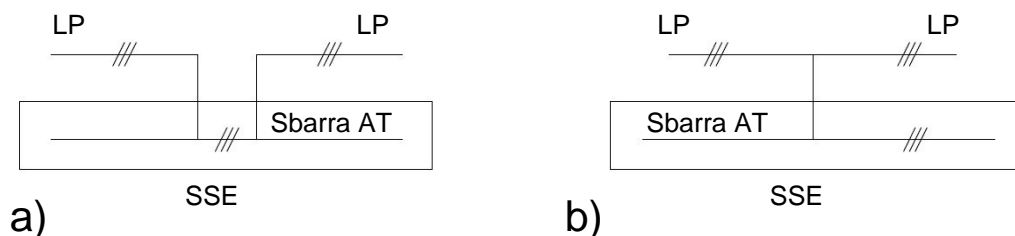


Figura 2 Schema di collegamento delle SSE: a) in serie
b) in derivazione

Con la prima configurazione la SSE può essere alimentata da una delle due linee primarie o da entrambe, garantendo quindi la continuità di esercizio in caso di guasto su una delle due tratte. La seconda prevede l'alimentazione della SSE da un'unica linea primaria, prediligendo la semplicità di impianto rispetto alla continuità di esercizio.

Le principali configurazioni per il collegamento serie sono presentate in Figura 3 e Figura 4.

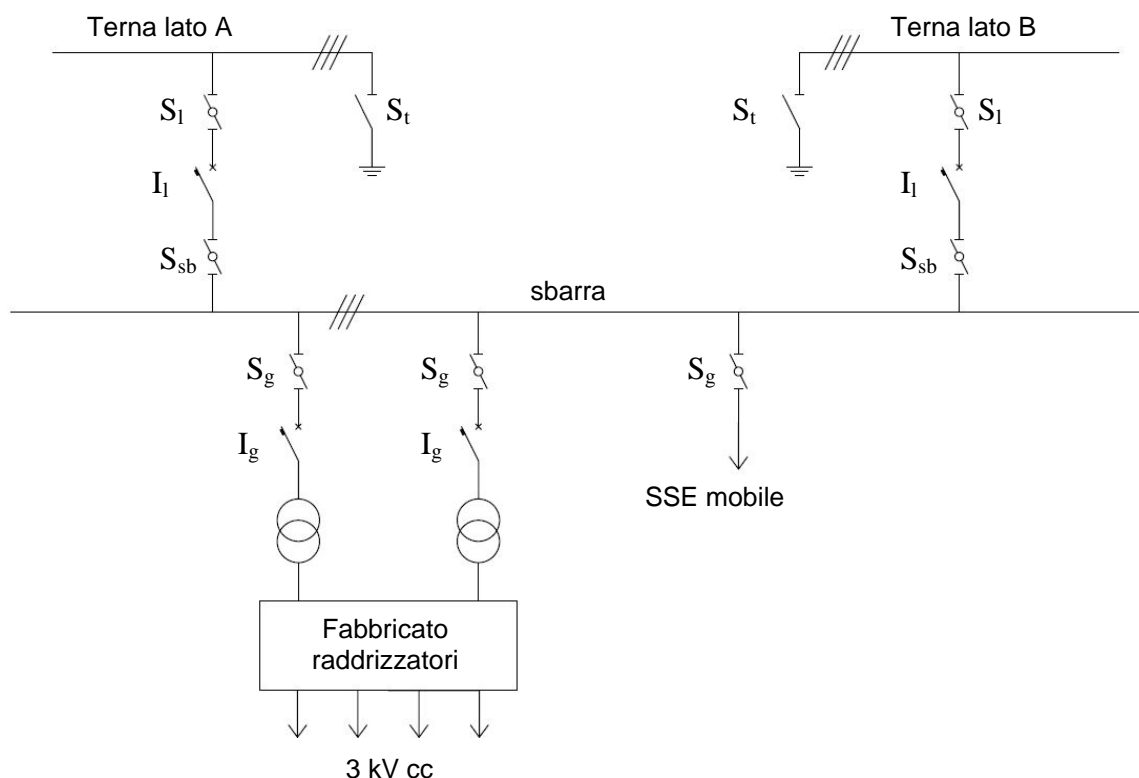


Figura 3

Simbolo	Tipo di protezione	Descrizione
S_1	Sezionatore	Sezionatore di linea in entrata e uscita
S_{sb}	Sezionatore	Sezionatore della sbarra 1 o 2

S_t	Sezionatore	Sezionatore di sicurezza con lame di terra
S_g	Sezionatore	Sezionatore di gruppo
I_l	Interruttore	Interruttore di linea
I_g	Interruttore	Interruttore di gruppo

Schema di collegamento di una SSE in serie con singola sbarra

Il primo schema prevede la presenza di due linee primarie, che insistono su una singola sbarra. Risulta abbastanza semplice, data la presenza di una sola sbarra, ma viene meno la flessibilità di esercizio della SSE, in quanto non è possibile alimentare ogni gruppo con una linea differente. Nello schema unifilare sono rappresentati anche gli organi di protezione della linea, il cui significato è spiegato in didascalia.

Uno schema simile può presentarsi nel modo seguente:

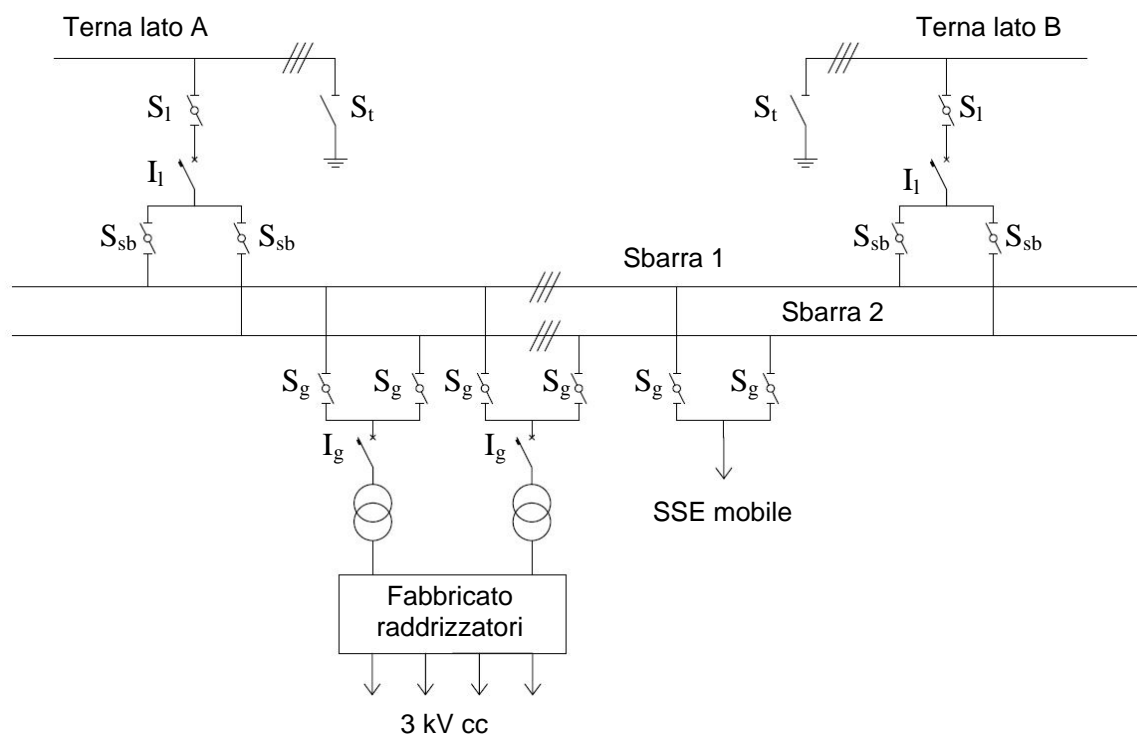


Figura 4 Schema di collegamento di una SSE in serie con doppia sbarra

Lo schema prevede sempre la presenza di due linee primarie distinte, che insistono però su una doppia sbarra, consentendo di collegare la linea primaria in entrata con quella in uscita e contemporaneamente di alimentare la SSE con una o entrambe le linee.

Uno schema generale per il collegamento in derivazione si presenta invece nel modo seguente:

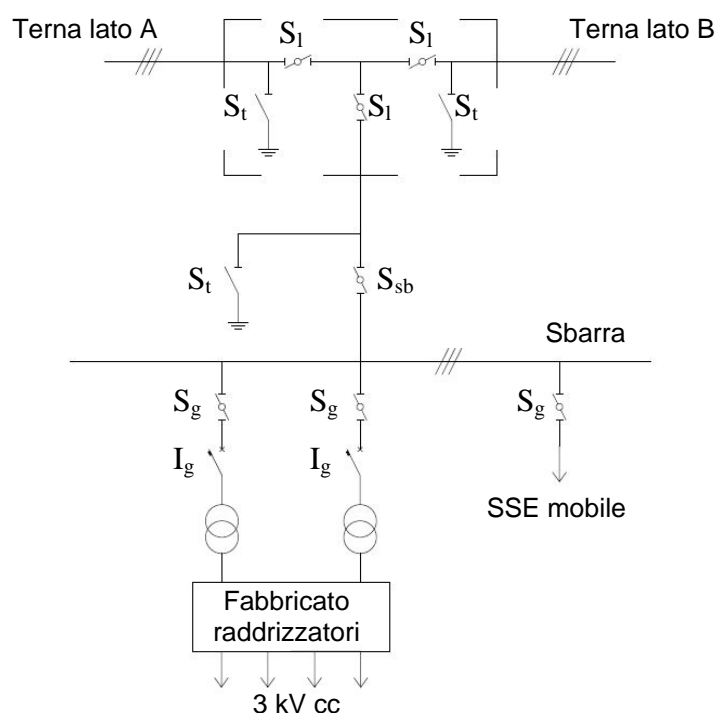


Figura 5 Schema di collegamento di una SSE in derivazione

Si nota in questo caso la necessità di avere un posto di sezionamento nella linea primaria, dal quale parte un'antenna che va ad alimentare la SSE. Il posto di sezionamento comprende 5 sezionatori: 2 per la linea primaria in entrata (uno è di sicurezza con lame di terra), 2 per la linea in uscita e 1 per l'antenna. Lo schema risulta poi analogo al precedente.

Esistono poi molte altre configurazioni, che si adattano alle esigenze e alle varie tipologie di SSE esistenti. Non si vuole però entrare nel merito troppo in dettaglio.

Distanziamento delle SSE

Fondamentale per una corretta alimentazione della linea di contatto risulta la disposizione delle SSE lungo la linea ferroviaria. Il parametro fondamentale da considerare per un corretto dimensionamento è la potenza complessiva assorbita dai convogli nella tratta considerata, che dipende ovviamente dal numero di treni, dalla potenza assorbita dal singolo carico e dalla configurazione del tracciato. A titolo di esempio si riportano alcuni dati riguardanti la potenza assorbita da varie tipologie di mezzi di trazione a determinate velocità.

Tabella 3 Potenza assorbita a definite velocità da parte dei principali convogli circolanti sulla rete italiana.

Tipologia di convoglio	Tipologia di locomotrice	Velocità (km/h)	Potenza assorbita (MW)
Elettrotreno per linee AV	ETR 500	300	8.8
Elettrotreno AV per servizio	ETR 600	250	5.5

misto			
Viaggiatori intercity	E 402B	200	6
Viaggiatori interregionale	E 464	160	3.5
Treno merci	E 633	120	2.35

La potenza installata in SSE dovrà essere superiore alla totale potenza assorbita dai carichi, per sopperire a eventuali sovraccarichi e per costituire una certa riserva. Con l'aumentare del traffico e della potenza assorbita dal singolo convoglio, si è reso necessario un adeguamento della potenza e del distanziamento delle SSE, accompagnato da un aumento della sezione dei conduttori della linea di contatto. La tabella seguente riporta l'evoluzione degli standard adottati, che rispecchiano quanto detto precedentemente.

Tabella 4 Evoluzione delle caratteristiche degli standard adottati per le SSE da parte di FS.

Distanziamento delle SSE (km)	Gruppi di conversione			Velocità massima dei treni (km/h)	Sezione del rame della catenaria (mm ²)
	N°	Tipologia	Potenza (kW)		
40	2	A vapori di mercurio	2000	150	320
20	2 o 3	A diodi al silicio	3600	160	440
12	3 o 4	A diodi al silicio	5400	250	610

L'ultima riga della tabella si riferisce allo standard adottato sulla linea Direttissima Firenze – Roma, e rappresenta la configurazione più avanzata dal punto di vista della potenza installata in SSE in Italia.

Il reparto Alta Tensione

Seguendo il flusso dell'energia, il reparto AT è il primo che si incontra provenendo dalle linee primarie. In esso avviene l'adeguamento del valore della tensione di alimentazione dei gruppi di conversione a livelli adatti alla trazione elettrica. Il confine di entrata del reparto è dato dalle strutture ad amarro sulle quali insistono le linee primarie, mentre quello di uscita è formato dagli isolatori passamuro che portano al reparto a 3 kV in corrente continua al chiuso.

Le principali apparecchiature che si trovano in questo reparto sono:

- Trasformatori di misura (TA e TV)
- Sezionatori (S)
- Interruttori (I)
- Scaricatori per AT (SC)
- Trasformatore di potenza (TP)
- Trasformatore dei servizi ausiliari (TSA)

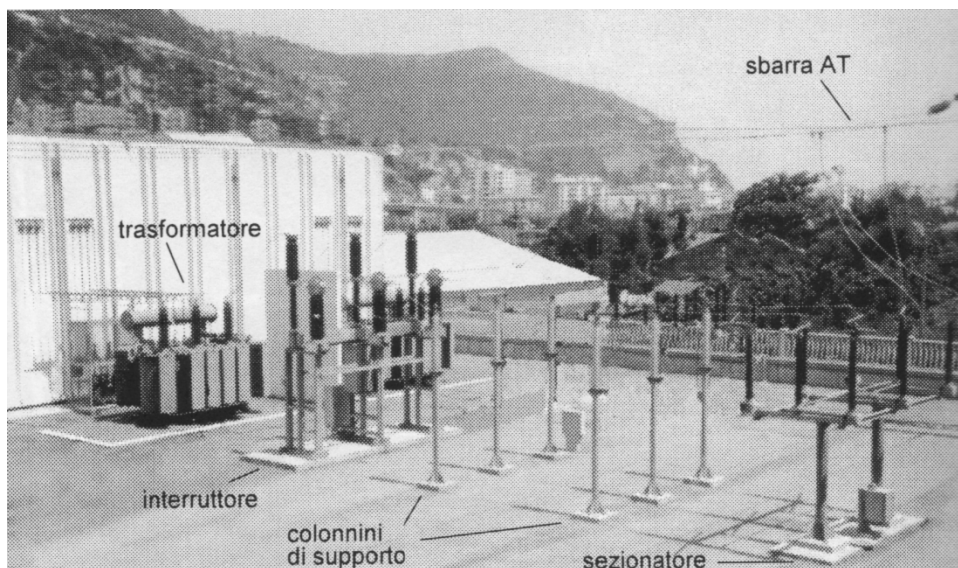


Figura 6 Reparto Alta Tensione della SSE di Ventimiglia

Il lay-out del reparto rispecchia vincoli dovuti al numero di linee primarie presenti, all'orografia del terreno, allo spazio a disposizione e alla sistemazione dei fabbricati. In ogni caso devono essere rispettate le distanze di sicurezza tra i vari componenti.

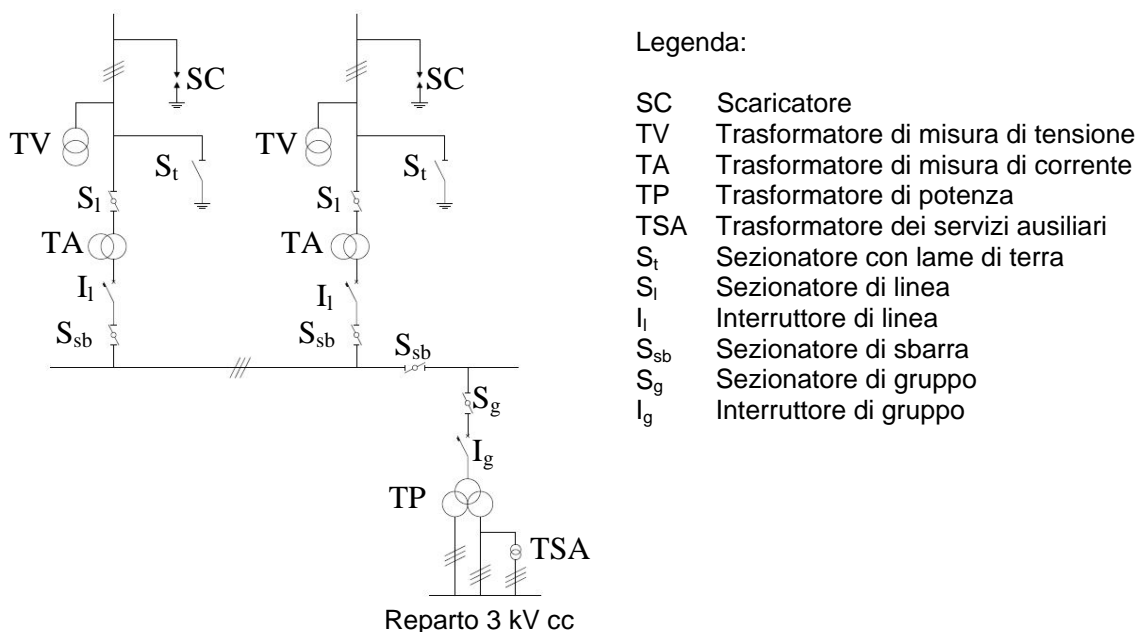


Figura 7 Schema unifilare del reparto Alta Tensione della SSE di Ventimiglia

Al fine di una descrizione più semplice, si può considerare il reparto composto da due unità: la prima comprende tutte le apparecchiature comprese tra la linea primaria e le sbarre AT, mentre nella seconda ricadono tutti i dispositivi compresi tra queste e i passamuro del fabbricato contenente il secondo reparto della SSE.

Seguendo sempre il flusso di potenza, si incontrano quindi nella prima unità il trasformatore di tensione TV, il sezionatore di linea S_l , il trasformatore di corrente TA, l'interruttore di linea I_l , il sezionatore di sbarra S_b , e le sbarre AT. Nella seconda unità si incontrano invece il sezionatore del trasformatore AT/MT S_g , l'interruttore di macchina I_g , lo scaricatore SC, il trasformatore di potenza (TP) e il trasformatore dei servizi ausiliari (TPA).

I trasformatori di misura hanno il compito di rilevare le grandezze in ingresso alla SSE (tensione e corrente) e di mettere a disposizione una grandezza proporzionale a esse che possa essere misurata. Vanno montati su cavalletti metallici di altezza adeguata per evitare pericoli di tensioni di contatto.

I sezionatori sono degli organi che permettono di isolare in aria alcune parti del circuito, per potervi accedere senza pericolo. Le norme antinfortunistiche prevedono che, nel caso in cui si debbano eseguire lavori fuori tensione, il sezionamento del circuito sia ben visibile. In questo senso il sezionatore deve dare un'indicazione visiva evidente e non deve prevedere il comando da dispositivi automatici, per evitare chiusure intempestive. La differenza principale rispetto agli interruttori sta nel fatto che i sezionatori non possono essere manovrati sotto carico, ma solo a circuito aperto. Nei reparti AT all'aperto, i sezionatori si presentano solitamente come tre colonnine di isolatori alettati per ogni fase. La colonna centrale, in grado di ruotare attorno al proprio asse, è solidale con la lama che porta il contatto mobile mentre le altre due sono sede dei contatti fissi. Questo tipo di sezionatore è detto trifase rotativo.

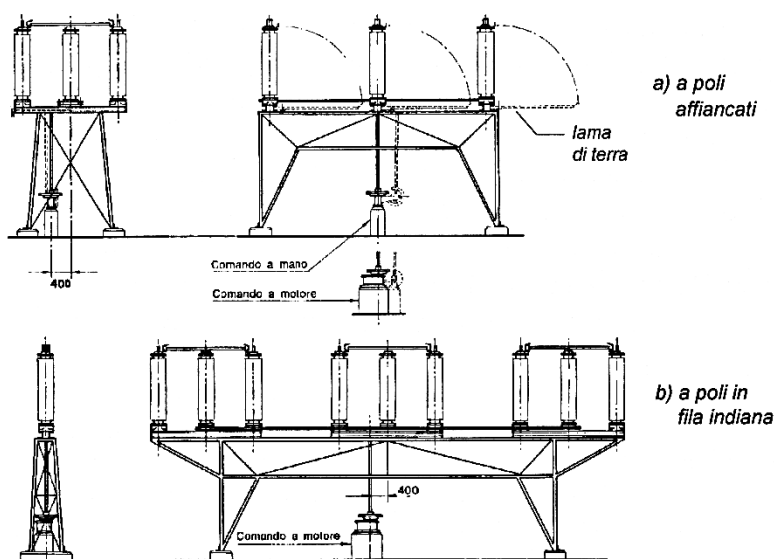


Figura 8 **Sezionatori tripolari di tipo rotativo** a) a poli affiancati
 b) a poli in fila indiana

A seconda delle esigenze di spazio, è possibile adottare due distinte configurazioni: la prima prevede che, a contatti chiusi, le lame delle tre fasi risultino parallele. Il sezionatore

di dice in questo caso a lame affiancate. Nella seconda configurazione le lame, a contatti chiusi, risultano invece allineate e il sezionatore viene detto a poli in fila indiana. Il sezionatore di linea è dotato, oltre alle tre lame di sezionamento, di tre lame di terra, che muovendosi in modo simultaneo rispetto alle prime, cortocircuitano la linea di alimentazione a terra. Questo accorgimento è necessario in quanto, nel caso di debbano eseguire lavori sulla linea, le norme prescrivono la messa a terra della stessa per la sicurezza del personale. La manovra dei due tipi di lame è interbloccata meccanicamente,

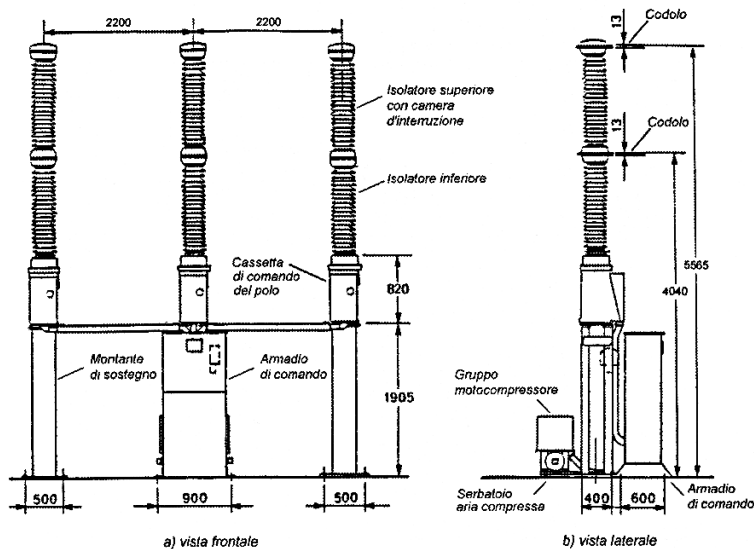


Figura 9 Vista frontale (a) e laterale (b) di un interruttore utilizzato nel reparto AT

per proteggere l'impianto dalle sovracorrenti che si possono verificare a seguito di guasti o fulminazioni, limitandone gli effetti. Sono costituiti da tre poli, posti in serie al circuito da proteggere, contenenti un fluido isolante in grado di eliminare l'arco elettrico che si origina al momento dell'apertura dell'interruttore.

Ciascun polo poggia su un cavalletto metallico, per distanziare da massa le parti sotto tensione, ed è formato da due isolatori cilindrici alettati, al cui interno sono posti i contatti e il fluido isolante. Nell'isolatore superiore è installato il dispositivo di interruzione, mentre in quello inferiore il dispositivo di movimentazione dei contatti e quello di rilevazione della corrente o della tensione. In passato, come fluido isolante, sono stati utilizzati aria compressa o olio, mentre oggi viene utilizzato quasi esclusivamente il gas SF₆. L'azionamento contemporaneo dei tre poli può essere realizzato a comando o in modo automatico qualora il dispositivo rilevi qualche anomalia. Si

permettendo quindi il collegamento a terra se e solo se il sezionatore è aperto.

Gli interruttori del reparto hanno lo scopo di interrompere o dare continuità al circuito elettrico nel quale sono inseriti. A differenza dei sezionatori, sono destinati a intervenire anche sotto carico, essendo in grado di provocare l'interruzione delle correnti presenti. Per questo motivo sono utilizzati

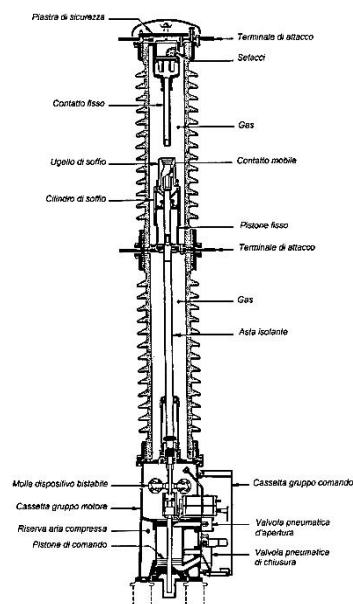


Figura 10 Vista in sezione di un interruttore utilizzato nel reparto AT in posizione di aperto

riportano di seguito alcune specifiche tecniche relative agli interruttori utilizzati nei reparti AT delle SSE.

Tabella 5 Caratteristiche tecniche degli interruttori utilizzati nel reparto AT.

Parametro		Valori nominali
Tensione nominale (kV)		66 – 132 – 150
Corrente nominale (A)		600 – 650
Potere di interruzione (A)		7000 – 30000
Sovraccarico nominale per 1 s (A)		8000 – 22000
Rapporto del riduttore di corrente k	Interruttore di linea	800 – 200/5
	Interruttore di gruppo	40/5
Tempo di apertura (s)		0,08 – 0,12
Tempo di chiusura (s)		0,30 – 0,23
Durata dell'arco (s)		< 0,01



Figura 11 Vista di uno scaricatore tipo TIBB

Lo scopo degli scaricatori è di proteggere le apparecchiature del reparto AT da eventuali sovratensioni condotte dalle linee primarie. La loro ubicazione è fondamentale agli effetti delle apparecchiature da proteggere. Nelle nuove installazioni, viene in tal senso posto subito a monte del trasformatore di potenza, dato che questa è l'apparecchiatura più costosa e sensibile del reparto. I tipi di scaricatori in uso nelle SSE sono molteplici. Tra questi i più utilizzati risultano però essere gli scaricatori all'ossido di zinco e gli scaricatori TIBB.

(a) I trasformatori di potenza utilizzati nelle SSE sono a tre avvolgimenti con primario (avvolgimento di alta tensione) collegato a stella, secondario (avvolgimento di bassa tensione) a stella e il terzo avvolgimento a triangolo (Yyd11). Come si nota dalla sigla, non è previsto il collegamento del centro stella degli avvolgimenti a massa. Questa configurazione consente inoltre di ottenere sui due avvolgimenti secondari tensioni sfasate di 30° elettrici, rendendo possibile quindi l'utilizzo di un ponte a dodici impulsi nella fase di

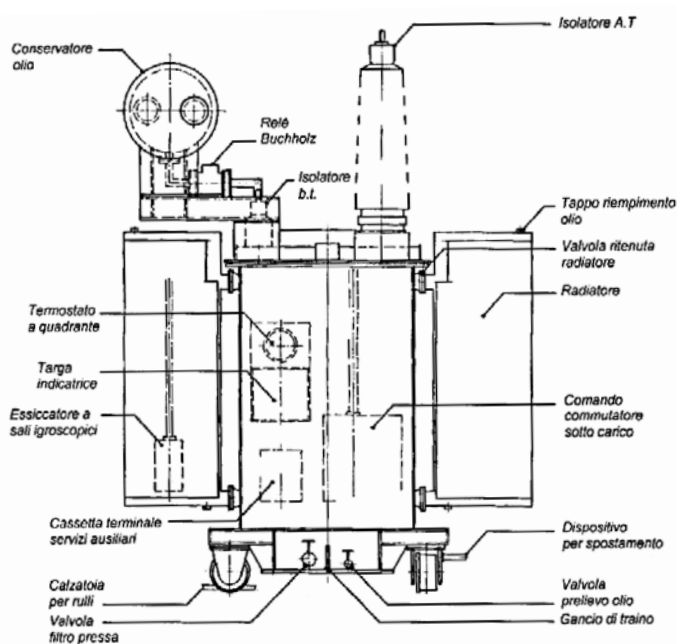


Figura 12 Vista laterale di un trasformatore da 5750 kVA

raddrizzamento della tensione.

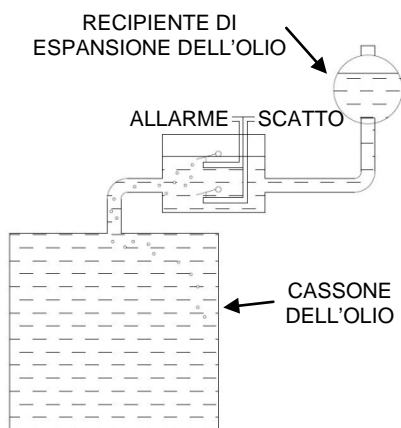


Figura 13 Principio di funzionamento del relè a gas (Buchholz)

Costruttivamente presenta un nucleo a 3 colonne con le bobine degli avvolgimenti di bassa tensione interne rispetto a quelle di alta tensione, dato che quest'ultimo è dotato di varie prese intermedie collegate al variatore sotto carico. Sono generalmente con isolamento in carta a bagno d'olio con raffreddamento naturale e dotati di numerosi dispositivi di protezione atti a rilevare eventuali anomalie di esercizio. Uno dei più importanti al fine della rilevazione dei guasti interni è il relè Buchholz, posizionato nel tubo di collegamento tra il cassone e il recipiente di espansione dell'olio. Il principio di funzionamento

si basa sul fatto che, in presenza di guasti interni, si verifica la formazione di bollicine di gas all'interno dell'olio, dovuto alla decomposizione dello stesso a causa delle elevate temperature raggiunte. Questi vanno a raccogliersi nella parte più elevata del relè, spostando un galleggiante; si hanno due soglie di intervento a seconda dell'entità del gas sviluppato, legato a sua volta alla gravità del guasto. La prima soglia genera semplicemente un allarme, mentre nei casi più gravi, viene comandata automaticamente l'apertura dell'interruttore di gruppo.

Allo scopo di regolare la tensione di uscita dei gruppi di conversione, i trasformatori sono dotati di variatore automatico di rapporto sotto carico. Questi dispositivi consentono di inserire o escludere un certo numero di spire, ottenendo una variazione del rapporto del numero di spire dell'avvolgimento primario e degli

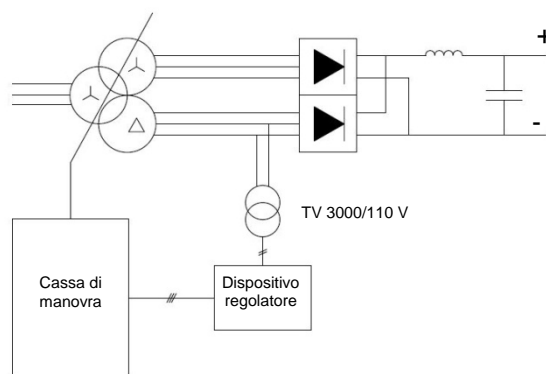


Figura 14 Schema di principio di un variatore di rapporto sotto carico a funzionamento automatico

avvolgimenti secondari con conseguente regolazione del valore della tensione al secondario. Fissato il valore di riferimento della tensione al secondario (solitamente sono disponibili 3 soglie: 3300, 3575 e 3850), il regolatore valuta lo scostamento tra questa e la tensione effettivamente presente. Se la differenza risulta essere superiore rispetto alla soglia prevista (normalmente ± 75 V), il relè comanda lo scatto del variatore, riportando la tensione entro il limite prefissato. È presente anche un dispositivo ritardatore di tempo, il quale impedisce manovre intempestive causate da fluttuazioni repentine della tensione al secondario. Con questo accorgimento si riesce a mantenere la tensione al secondario entro i limiti citati,

anche con variazioni della corrente erogata da 75 A a 3000 A e variazioni della tensione al primario comprese tra i 115 kV e 135 kV.

Una particolarità dei trasformatori di potenza utilizzati riguarda la tensione di cortocircuito, che i Capitoli Tecnici impongono essere compresa tra il 5% e il 12%. Questi valori sono molto superiori a quelli che si incontrano nei normali trasformatori di distribuzione. Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che questi trasformatori sono soggetti molto più frequentemente dei secondi a cortocircuiti. Devono quindi sopportare più efficacemente gli effetti delle sovracorrenti e cercare di ridurre l'entità delle stesse, il che equivale ad aumentare le reattanze di dispersione del trasformatore. È necessario trovare però un compromesso in quanto, impedenze di cortocircuito troppo elevate andrebbero ad aumentare le cadute di tensione e le perdite del trasformatore, con conseguenze negative sull'alimentazione della linea di contatto. Per questo motivo solitamente vengono scelti trasformatori con tensioni di corto circuito intorno al 10%.

Si riportano di seguito alcune specifiche che i trasformatori di potenza devono soddisfare.

Tabella 6 Specifiche tecniche dei trasformatori di potenza utilizzati nelle SSE.

Parametro	Valore	Valore	Valore
Tensione (kV)	66	132	150
Sigla	Yy0 – Yd11	Yyd11	Yyd11
Tensione nominale primaria (kV)	63 ± 5,6%	125 ± 8%	150 ± 8%
Rapporto di trasformazione	63000/2710	125000/2710	150000/2710
Gradino di regolazione	1,902%	1,67%	1,67%
Campo di regolazione	±22,82	±20%	±20%
Potenza nominale (kVA)	3880	5750	5750
Potenza del gruppo (kW)	3600	5400	5400
Peso complessivo (kg)	18760	28000	28000
Peso dell'olio (kg)	5500	8500	8500
Tensione di corto circuito	< 13,5%		
Sovraccarico	200% per 2 h e 5 m 300% per 5 m		

Fondamentale risulta anche l'infrastruttura attigua al trasformatore, che deve prevedere un binario che ne consenta lo spostamento, adeguate opere di fondazione in calcestruzzo e la vasca di raccolta dell'olio. Da non trascurare sono poi le massime dimensioni d'ingombro, che devono essere compatibili con le esigenze di trasporto sia su strada che su rotaia.

Il trasformatore dei servizi ausiliari ha lo scopo di alimentare tutti i circuiti accessori della SSE in corrente alternata. Viene alimentato da una delle due uscite del trasformatore di gruppo ed è posizionato tra questo e il fabbricato contenente il reparto a 3 kV in corrente continua. È a raffreddamento naturale con isolamento in carta a bagno d'olio. Si riportano di seguito alcune caratteristiche del trafo considerato:

Tabella 7 Specifiche tecniche del trasformatore dei servizi ausiliari

Parametro	Valori nominali
Tensione nominale (V)	2750
Rapporto di trasformazione	2710 - 380
Potenza nominale (kVA)	100

Reparto a 3 kV in corrente continua al chiuso

Questo reparto segue immediatamente quello appena descritto. I suoi confini sono definiti da un lato dai passamuro installati sul fabbricato che ospita le apparecchiature del reparto, e dall'altro dalle celle contenenti gli interruttori extrarapidi.

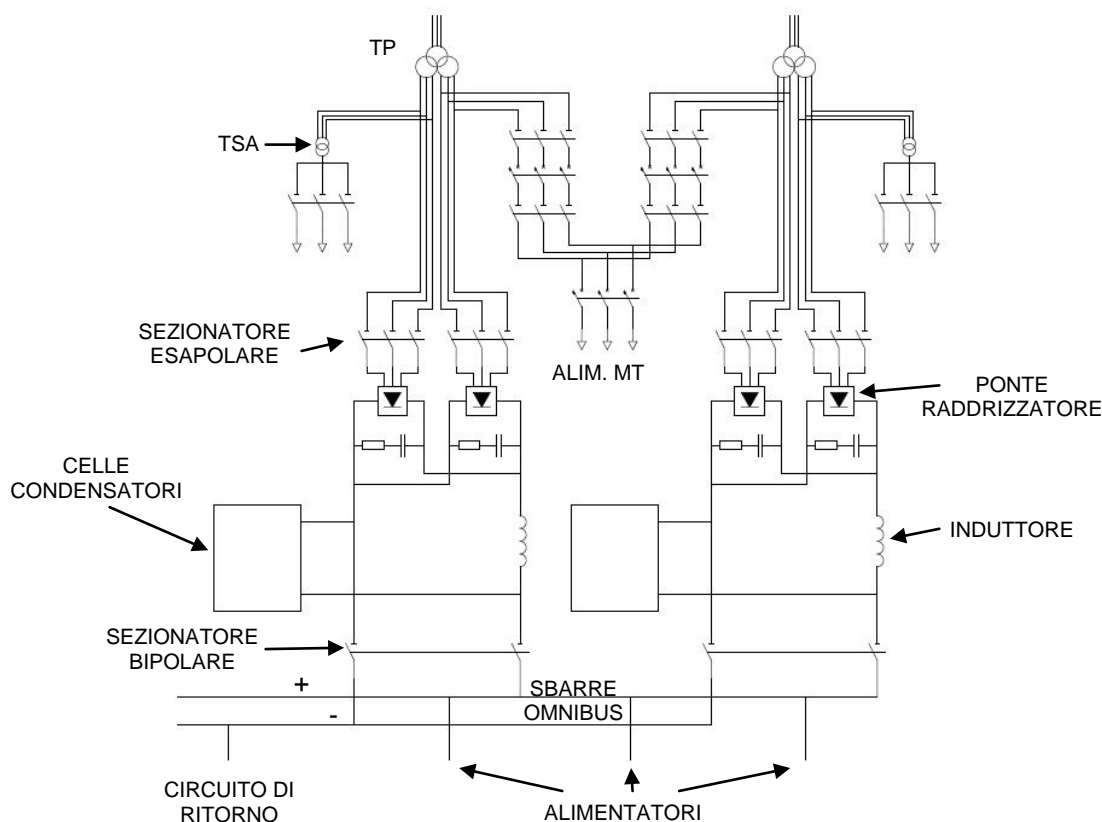


Figura 15 Schema elettrico del reparto 3 kV in corrente continua al chiuso

La funzione di questa porzione di impianto è di compiere il raddrizzamento della tensione al fine di alimentare le linee di contatto connesse alle SSE in corrente continua. Le principali strutture e apparecchiature presenti in questo reparto sono:

- Fabbricato
- Passamuro e Sezionatore esafase
- Gruppi raddrizzatori
- Sistema di filtraggio

- Sbarre omnibus e Sezionatori bipolari
- Cella misure
- Interruttori extrarapidi
- Servizi ausiliari (SA)
- Sala quadri

I fabbricati contenenti le apparecchiature del reparto erano edificati su due piani, in quanto dovevano ospitare anche il reparto AT. Oggi invece vengono costruiti solo a un piano, con strutture in muratura o cemento armato. Le dimensioni dipendono ovviamente dalla potenza e dal numero di gruppi convertitori, mentre la disposizione delle varie apparecchiature è tale da minimizzare il più possibile la lunghezza dei collegamenti. Data la tendenza attuale a gestire il sistema in telecontrollo, nelle nuove installazioni, lo spazio dedicato al personale risulta essere molto ridotto e sono installati sistemi di blocco negli accessi e di segnalazione per evitare situazioni di possibile pericolo.

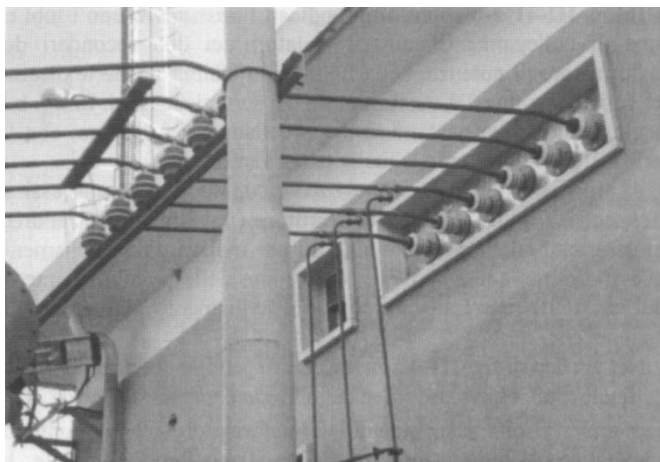


Figura 16 Vista di sei isolatori passamuro

Gli isolatori passamuro hanno lo scopo di collegare i secondari dei trasformatori posti all'esterno ai sezionatori esapolari posti all'interno dell'edificio. Il collegamento è effettuato con tubi rigidi di rame dal diametro di 30 mm. Il sezionatore esapolare è posto subito a monte del gruppo raddrizzatore e consente, assieme al sezionatore bipolare, di isolarlo elettricamente dal resto dell'impianto. È dotato di un blocco elettromagnetico, che ne impedisce

l'apertura se non è aperto l'interruttore di gruppo e di una segnalazione luminosa; la luce verde indica che sia il sezionatore esapolare che quello bipolare sono aperti, mentre quella rossa indica che almeno uno dei due è chiuso e il gruppo raddrizzatore è in servizio.

Il raddrizzatore è l'apparecchiatura principe di questo reparto. Nel corso degli anni ha subito notevoli cambiamenti, dovuti essenzialmente all'adozione di componenti con caratteristiche elettriche sempre più spinte. Tralasciando i convertitori a valvole di mercurio ormai del tutto scomparsi, si sono potuti realizzare raddrizzatori a ponte di Graetz trifase con un numero sempre minore di diodi per ogni ramo. Come esempio basta osservare la differenza tra la configurazione con la quale veniva realizzato il ponte raddrizzatore in passato e quella utilizzata nelle moderne SSE.

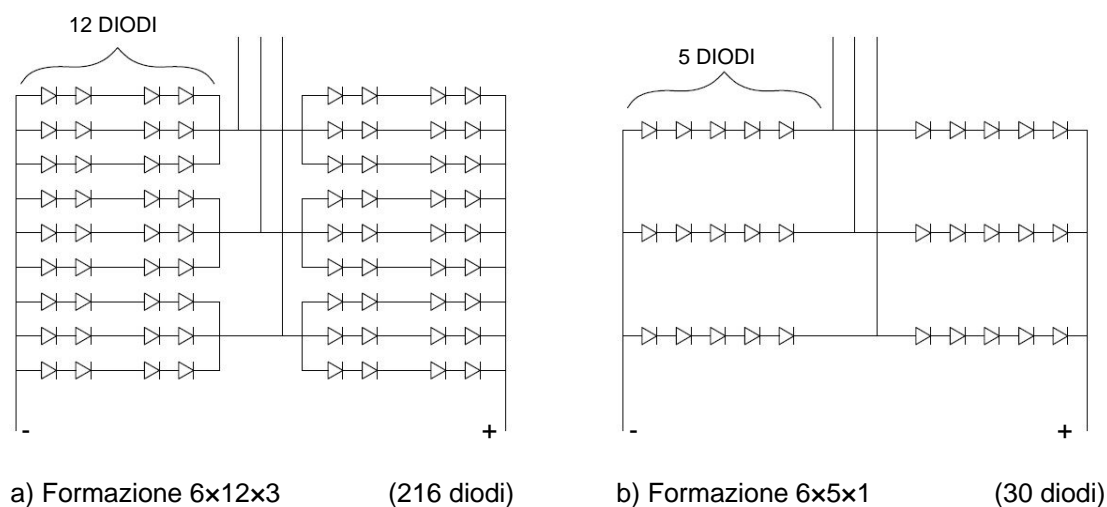


Figura 17 Schemi di formazione del ponte raddrizzatore a) Schema superato
b) Schema attuale

Come si nota si è passati da una configurazione a 216 diodi a una realizzata con soli 30 diodi.

L'utilizzo di diodi in parallelo era necessario per aumentare l'intensità di corrente transitante nel ramo. I diodi utilizzati, infatti, avevano caratteristiche di corrente e di tensione inversa abbastanza modeste, come si osserva dalla tabella seguente.

Tabella 8 Caratteristiche tecniche dei diodi utilizzati per i ponti raddrizzatori presenti nelle SSE.

Caratteristica	Diodo vecchio tipo	Diodo di tipo recente
Tensione ripetitiva (V)	400	3000
Corrente media diretta in un periodo (A)	300	2700
Corrente di sovraccarico accidentale (A)	5500	27000
Tensione inversa di picco ripetitiva (V)	1700	3000
Corrente inversa di picco ripetitiva (mA)	20	75

Il collegamento in parallelo aveva però l'inconveniente di richiedere diodi con curve caratteristiche pressoché uguali, per avere una distribuzione delle correnti uniforme sui due elementi. Una soluzione adottata per ridurre gli squilibri delle correnti è stata l'inserzione di resistenze in serie ai componenti, con però un'inevitabile dissipazione di energia.

Il collegamento in serie è invece tuttora effettuato per far fronte a tensioni inverse abbastanza elevate. Anche in questo caso le caratteristiche dei due componenti devono risultare simili, al fine di evitare che un diodo vada in interdizione prima degli altri, andando quindi a sopportare da solo l'intera tensione inversa con possibili danneggiamenti. Per rimediare a tale inconveniente vengono poste delle resistenze di valore elevato (circa 2000 Ω) in parallelo ai diodi, capaci di ripartire in modo più uniforme le tensioni inverse sul ramo. Per proteggersi poi da tensioni inverse dovute a fenomeni molto rapidi, sono

installati anche dei condensatori in parallelo al diodo, in serie ai quali vengono poste delle resistenze, per rendere più smorzato il transitorio di applicazione della tensione inversa. I condensatori utilizzati hanno una capacità di $0.5 \mu\text{F}$ e le resistenze un valore di circa 10Ω . A valle del ponte raddrizzatore viene posto anche un gruppo composto da due resistenze e una capacità (RCR), che ha la funzione di attenuare le sovratensioni di origine esterna o interna sia lato corrente continua che corrente alternata. Il condensatore è isolato in olio e presenta una capacità di circa $10 \mu\text{F}$, mentre ciascuna resistenza ha un valore di circa 12Ω . Altro sistema di protezione del gruppo raddrizzatore è il dispositivo di rilevamento guasto diodi, in grado di segnalare tempestivamente la rottura di uno dei componenti del ramo, evitando il danneggiamento successivo di tutto il filare e dell'intero convertitore.

Dato che il trasformatore fornisce ai secondari due tensioni sfasate di 30° elettrici, i due ponti raddrizzatori possono essere collegati in serie o in parallelo, ottenendo in entrambi i casi un convertitore dodecafase. La differenza principale tra i due diversi collegamenti è costituita dalle tensioni secondarie del trasformatore, che a parità di tensione raddrizzata devono essere di valore diverso. Nel caso di collegamento serie, per ottenere una tensione raddrizzata a vuoto di 3600 V , le tensioni nominali al secondario devono essere di 1355 V , mentre nel caso di collegamento in parallelo i valori devono essere pari a 2710 V . Il collegamento in parallelo richiederebbe poi l'inserzione di una bobina interfaseca per una corretta suddivisione del carico tra i due ponti, ma questa viene di solito omessa, dato che gli avvolgimenti del trasformatore realizzano la stessa funzione.

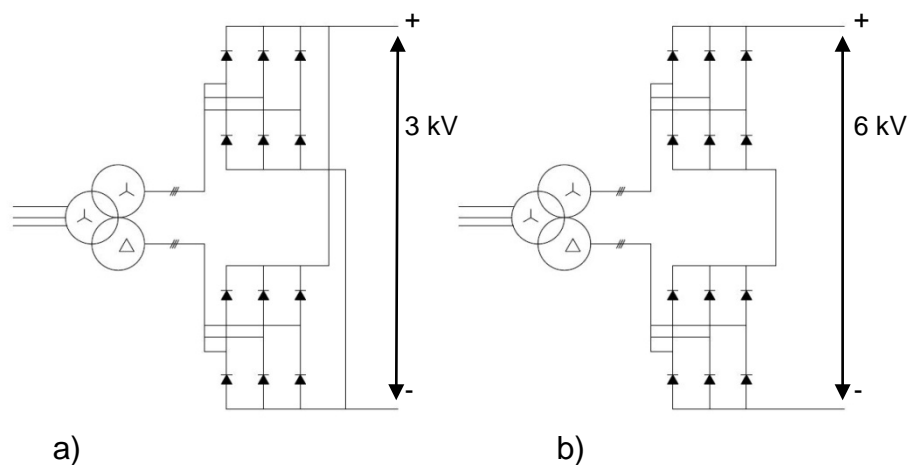


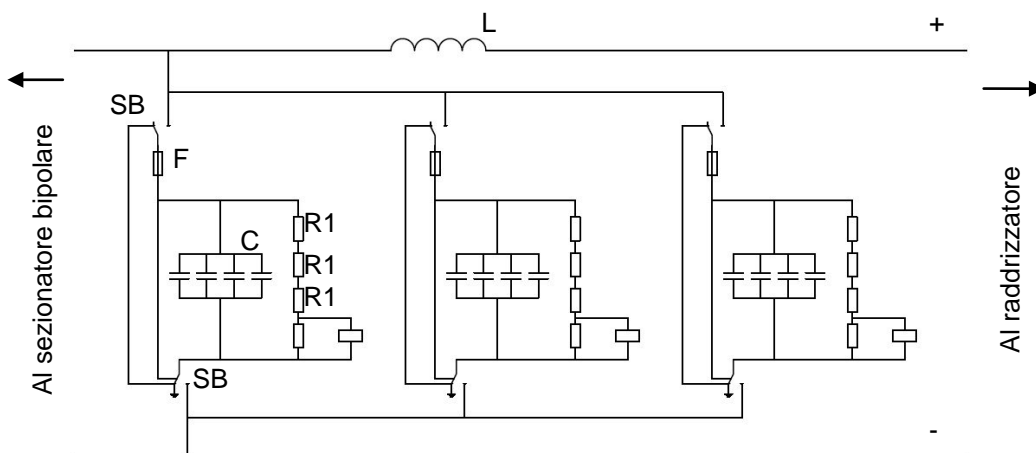
Figura 18 Collegamento di due ponti trifase a) in parallelo b) in serie

A partire dagli anni '60 le SSE sono state costruite dando per scontato un successivo innalzamento della tensione da 3000 a 6000 V . Per questo motivo venivano installati trasformatori con secondari di eguali caratteristiche, collegati in parallelo, in previsione di un loro successivo collegamento serie. Dato che le tensioni ai secondari del trasformatore risultavano identiche e in fase tra loro, si otteneva un convertitore esafase. Il passaggio al convertitore dodecafase è stato dettato dal fatto che presenta, a differenza del primo, armoniche di tensione a frequenza più elevata (la fondamentale è a 600 Hz rispetto ai 300

Hz del ponte esafase), che determinano un ripple più ridotto e comunque più facilmente filtrabile.

Bisogna poi prestare particolare attenzione ai problemi di raffreddamento dei diodi, disponendo i convertitori in locali ben ventilati e dotando l'intelaiatura del convertitore di opportuni radiatori.

Il sistema di filtraggio ha lo scopo di bloccare le armoniche generate dal gruppo raddrizzatore, per evitare disturbi nelle linee di telecomunicazione e negli impianti di sicurezza. Viene installato tra l'intelaiatura del gruppo raddrizzatore e il sezionatore bipolare. In passato era utilizzato un solo filtro aperiodico comune a tutti i gruppi, con reattore in serie alla sbarra catodica e condensatore derivato fra sbarra anodica e catodica. La tendenza attuale è invece quella di installare un filtro per ciascun gruppo e disporre il reattore in serie alla sbarra anodica. Il reattore è costituito da un avvolgimento in aria ad asse verticale che presenta un valore di induttanza di circa 6 mH. La batteria di condensatori è suddivisa in tre sezioni, ognuna formata da quattro condensatori, isolati in olio, con una capacità di 30 μF . La totale capacità installata risulta quindi essere pari a 360 μF . Ogni sezione è collegata alle sbarre da un sezionatore bipolare, il quale, a batteria disinserita, collega tra loro i terminali della stessa, cortocircuitandola a terra.



Legenda:

SB	Sezionatore bipolare con lame di terra	C	Condensatori
F	Fusibile	R1	Resistenze di scarica
L	Induttanza di filtro		

Figura 19 Schema elettrico di collegamento delle tre celle dei condensatori del filtro

Il collegamento del filtro di ciascun gruppo alle sbarre anodica e catodica (sbarre omnibus), si realizza attraverso un sezionatore bipolare, molto simile a quello esapolare posto a monte del gruppo raddrizzatore. Anche questo presenta, infatti, un dispositivo di blocco, che ne consente l'apertura solo se è aperto anche l'interruttore di gruppo. Le sbarre omnibus sono installate su appositi isolatori, poggiati su mensole che corrono lungo le pareti dell'edificio, andando ad alimentare prima la cella misure e successivamente le celle

contenente gli interruttori extrarapidi. Solitamente la sbarra anodica è contraddistinta da vernice rossa mentre quella catodica da vernice azzurra.

Come già detto, il primo locale incontrato dalle sbarre omnibus è la cella misure, contenente:

- Gli strumenti per la verifica dei valori di uscita delle grandezze lato corrente continua e la misurazione dell'energia erogata dalla SSE.
- Il collegamento della sbarra catodica al circuito di ritorno del sistema di alimentazione
- La valvola Soulè (valvola di tensione)
- L'eventuale sezionatore bipolare per il collegamento alla SSE mobile

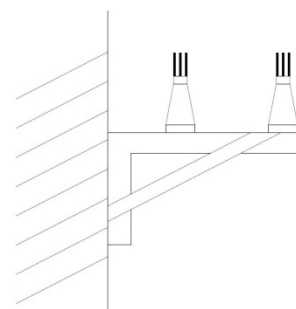


Figura 20 Particolare dell'isolamento e fissaggio delle sbarre omnibus

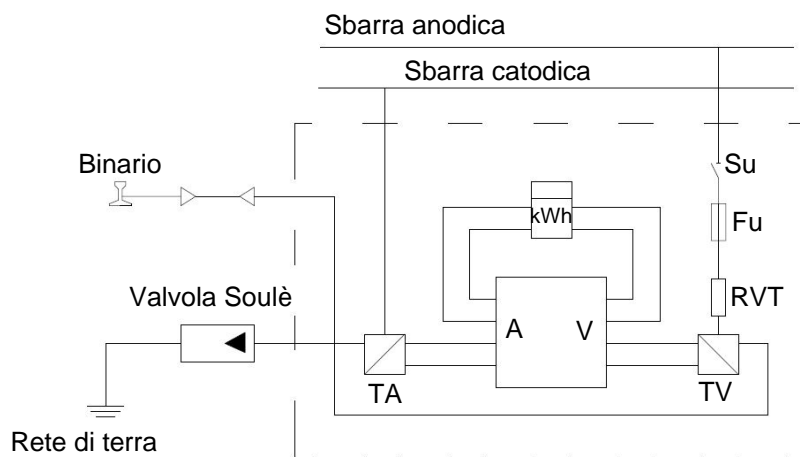


Figura 21 Schema elettrico dei collegamenti nella cella misure

La strumentazione di misura è collegata alla sbarra anodica attraverso un sezionatore unipolare (Su), un fusibile di protezione (Fu), un partitore di tensione da 6000/100 Vcc (RVT) e un trasduttore di isolamento (TV). Lo shunt per la misura di corrente è posto invece sul collegamento alla sbarra catodica e alimenta la strumentazione attraverso un altro trasduttore di isolamento (TA). Anche la valvola Soulè è collegata alla sbarra catodica, e ha lo scopo di connettere l'impianto di terra della SSE con il circuito di ritorno in caso si manifestino differenze di tensione superiori a 200 V. Nel regolare esercizio, infatti, i due impianti devono risultare separati, per evitare l'insorgere di corrosioni della rete di terra della SSE.

Le sbarre omnibus alimentano quindi le celle contenenti gli interruttori extrarapidi, i dispositivi atti a rilevare e interrompere gli eventuali cortocircuiti che si possono verificare lato alimentazione ferroviaria. Le celle, di numero pari alle linee alimentate dalla SSE, sono collocate davanti ai passamuro che delimitano il reparto 3 kV in corrente continua al chiuso. Le celle sono accessibili solo frontalmente e sono dotate di numerosi dispositivi di sicurezza, che comprendono anche segnalazioni luminose per l'indicazione della posizione del sezionatore bipolare attraverso il quale è collegato l'interruttore extrarapido. L'utilizzo

di un interruttore in grado di limitare le correnti di corto circuito in pochi millisecondi (da qui l'appellativo extrarapido) risulta fondamentale per evitare un'eccessiva sollecitazione di tutti i componenti dell'impianto, dato che l'entità delle correnti di guasto è molto

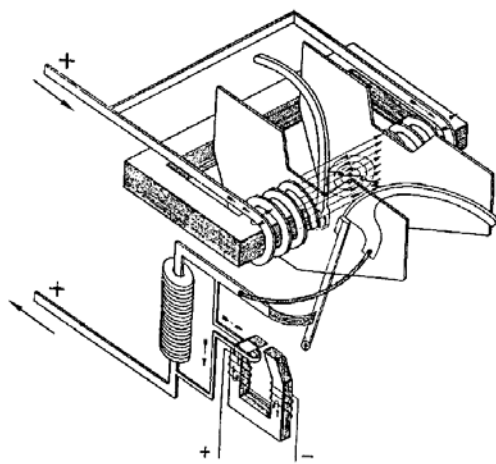


Figura 22 Principio di funzionamento del soffio elettromagnetico

importante. Il fatto poi che la corrente da interrompere sia continua e non alternata, rende il tutto molto più complesso, non potendo l'interruttore sfruttare i naturali passaggi per lo zero della grandezza sulla quale deve intervenire. Il principio di funzionamento di questo interruttore è basato quindi sull'allungamento dell'arco elettrico, creato dall'apertura dei contatti del dispositivo, e un suo successivo frazionamento, permettendone l'estinzione. Per ottenere questo risultato viene utilizzato un soffio elettromagnetico, creato dalla stessa corrente di guasto percorrendo delle spire con asse perpendicolare all'arco elettrico. Per la nota

legge di Lorentz, si crea una forza sulla corrente che spinge l'arco fra due corni che si affacciano sui contatti che si sono aperti. Le corni conducono poi l'arco in un caminetto nel quale avviene la sua suddivisione in sezioni meno energetiche e quindi più facili da estinguere. Il comando di apertura può essere dato o dal dispositivo elettromagnetico di apertura o da uno shunt magnetico. Il primo è in grado di rilevare l'entità delle sovracorrenti, mentre il secondo è sensibile al gradiente di corrente, permettendo quindi un intervento più rapido nel caso di corto circuito vicino alla SSE. Dato che la frequenza dell'insorgere di guasti è abbastanza elevata, fondamentale risulta la presenza del dispositivo di prova terra, che consente la richiusura automatica dell'interruttore se è stata verificata l'assenza di un guasto permanente sulla linea.

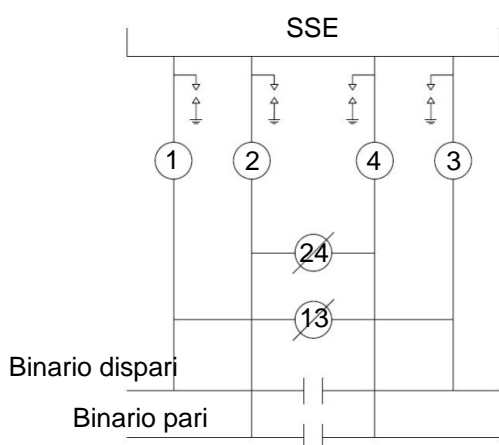
L'entità della corrente di guasto dipende dalla distanza alla quale si verifica la perdita di isolamento rispetto alla SSE; tanto più il guasto è vicino alla SSE, tanto più la corrente è elevata. Dato che le linee di contatto sono di norma alimentate un modo bidirezionale da due SSE attigue, risulta evidente che gli interruttori extrarapidi di entrambe devono poter rilevare un guasto che si verifica in qualsiasi punto della linea. La condizione più sfavorevole si ha con guasto vicino a una delle due alimentazioni, in quanto la corrente vista dall'altra SSE non è molto elevata. Le tarature degli interruttori devono in questo caso essere mantenute basse, con rischi di scatti intempestivi, dovuti a normali correnti di carico. Per ovviare a questo problema è stato introdotto un sistema di asservimento, che assicura la protezione della linea anche quando le tarature degli interruttori sono tenute più alte rispetto alla corrente di corto circuito che si verifica nel caso più sfavorevole (in prossimità di una delle due SSE). Questo accorgimento fa aprire entrambi gli interruttori quando almeno uno dei due ha rilevato una corrente di guasto. Ogni interruttore deve

proteggere quindi solo metà tratta, con conseguente possibilità di aumento dei valori di taratura e riduzione degli scatti intempestivi. I nuovi sistemi di asservimento installati di tipo ASDE2 consentono la protezione della linea di contatto anche quando in linee a doppio binario sia effettuato il parallelo pari – dispari e prevedono l'interconnessione automatica dei dispositivi di asservimento di due SSE non attigue, quando quella centrale è in avaria.

I servizi ausiliari hanno lo scopo di alimentare in bassa tensione tutti gli impianti di manovra, protezione, allarme e di servizio della SSE. Funzionano in parte in corrente alternata (con valori nominali di 380 V per i servizi trifasi e 220 V per quelli monofasi) e in parte in corrente continua (con valore unificato di alimentazione di 130 V). Le apparecchiature in ca vengono alimentate normalmente dal trasformatore dei servizi ausiliari, posto nel reparto AT della SSE. È prevista però un'alimentazione di riserva, per garantire la continuità di funzionamento, solitamente costituita da un allacciamento alla rete di distribuzione nazionale. I servizi ausiliari in cc sono invece normalmente supportati da un alimentatore stabilizzato, collegato al circuito di alimentazione dei servizi ausiliari in ca e che esegue la conversione 380 V ca / 130 V cc. Questo alimenta anche in carica tampone una batteria di accumulatori al piombo, che costituisce la riserva di alimentazione per i servizi ausiliari in cc.

Tutte le apparecchiature del reparto devono essere facilmente controllabili dalla sala quadri, dalla quale il personale preposto gestisce il funzionamento della SSE. Questa sala è presente anche nelle SSE gestite in telecontrollo dal DOTE, in quanto è essenziale in caso di manutenzione o di funzionamento a regime ridotto. Ospita gran parte delle attrezzature dedite ai servizi ausiliari, ma l'elemento fondamentale della sala è il quadro sinottico, uno schema dell'intera SSE realizzato con una serie di barre e strisce colorate, che riporta lo stato di tutti i componenti, facilitando l'individuazione di eventuali situazioni di anomalità.

Reparto a 3 kV in corrente continua all'aperto



Lo scopo di quest'ultimo reparto è andare ad alimentare tutte le linee di contatto afferenti alla SSE. I suoi confini sono determinati da un lato dagli isolatori passamuro posti a valle degli interruttori extrarapidi e dall'altro dai terminali dei sezionatori aerei ai quali sono collegati i conduttori che portano alla linea di contatto. I componenti principali di questa parte dell'impianto sono:

- I passamuro e gli scaricatori
- I sezionatori
- Le linee di alimentazione

Figura 23 Schema del reparto alimentatori di una SSE con linea a doppio binario

- Il collegamento al negativo della SSE

Seguendo sempre il flusso dell'energia, dagli isolatori passamuro si incontrano gli scaricatori e i sezionatori di prima fila. A valle di questi sono montati i sezionatori di seconda fila e infine le linee di alimentazione collegano la SSE alle linee di contatto.

Gli isolatori passamuro sono del tutto analoghi a quelli utilizzati a valle dei trasformatori di potenza. Sono però dotati in questo caso di scaricatori, aventi la funzione di condurre a terra le eventuali sovratensioni provenienti dalla linea di contatto, evitando sollecitazioni agli interruttori extrarapidi. Viene solitamente fissato alla struttura muraria dell'edificio ed è costituito da uno spinterometro, un condensatore da 4 μF , al quale viene posta una resistenza in parallelo da 100 k Ω . Con queste caratteristiche, lo scaricatore presenta una tensione di innesco di circa 7 kV.

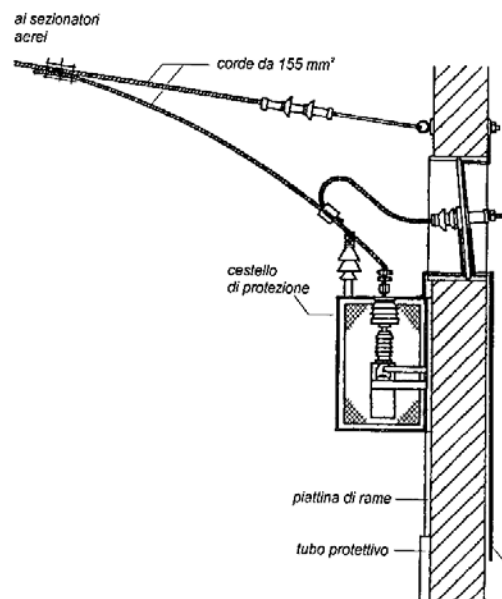


Figura 24 Vista dello scaricatore e dell'isolatore passa muro

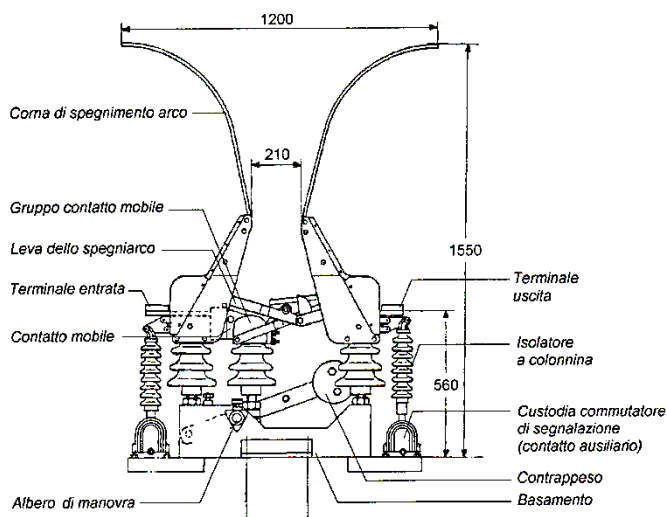


Figura 25 Schema di un sezionatore utilizzato nel reparto a 3 kV in corrente continua all'aperto

spinterometriche, di aprire il circuito anche in presenza di correnti di intensità limitata, riuscendo ad allungare l'arco elettrico fino a spegnerlo.

I sezionatori utilizzati in questo reparto sono unipolari del tipo a corna. Vengono di solito posti su palificazioni, in numero pari alle linee di contatto alimentate dalla SSE. Oltre a questi, detti di prima fila, ne sono installati altri, detti di seconda fila, che consentono il collegamento alternativo delle linee di contatto in caso di avaria della SSE considerata. Solitamente quindi i sezionatori di prima fila sono chiusi, mentre quelli di seconda fila sono aperti. La particolarità di questa tipologia di sezionatori è la capacità, grazie alle corna

Le linee di alimentazione collegano i vari sezionatori fra loro e rendono possibile l'alimentazione della linea di contatto. Sono costituite da uno o più conduttori in rame, con le caratteristiche riportate di seguito.

Tabella 9 Caratteristiche dei conduttori utilizzati per le linee di alimentazione.

Composizione	Sezione dei conduttori (mm ²)	Sezione complessiva (mm ²)	Resistenza (Ω/km)
1 corda	103	103	0,182
2 corde	2 × 103	206	0,091

Il numero di corde da utilizzare dipende ovviamente dall'intensità del traffico previsto nella linea alimentata.

Il collegamento del circuito di ritorno alla sbarra catodica della SSE viene invece realizzato mediante appositi cavi, collegati al centro della connessione induttiva più vicina alla SSE stessa.

Fondamentale per la sicurezza della SSE risulta l'impianto di terra, al quale devono essere collegate tutte le masse che, in caso di guasto, possono andare in tensione. Le linee primarie, le SSE e il circuito di alimentazione ferroviaria devono essere dotati di un proprio impianto di terra, indipendente l'uno dall'altro nel normale esercizio. Solo in caso di possibili pericoli dovuti a gradienti di tensione

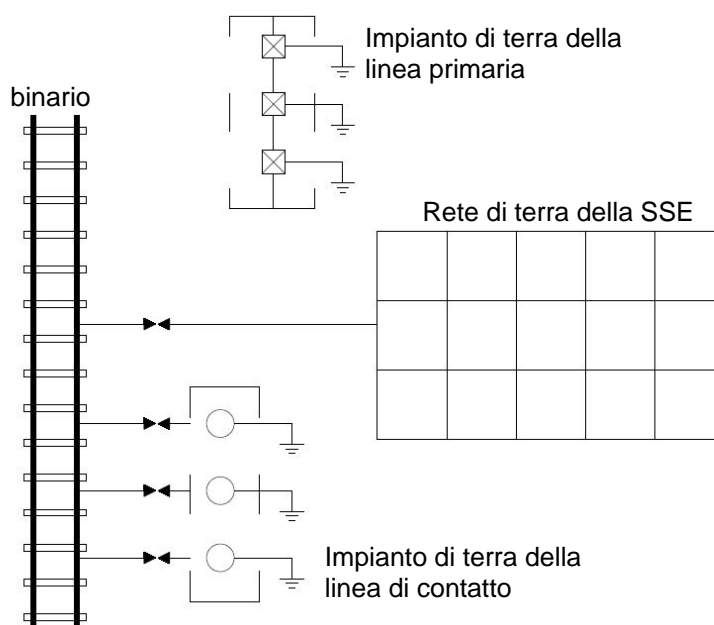


Figura 26 Rappresentazione schematica degli impianti di terra di SSE

troppo elevate in prossimità della SSE, è previsto il collegamento dell'impianto della SSE con quello del circuito di ritorno, abbassando conseguentemente l'impedenza del sistema dispersore e quindi riducendo il rischio di raggiungere tensioni di passo o di contatto troppo elevate. Sempre per motivi di sicurezza, i collegamenti delle masse verso terra sono raggruppati in settori, ognuno dei quali insiste su un relè (relè di massa), in grado di individuare quando vi è la presenza di una corrente di guasto e di far scattare l'interruttore generale di SSE.

Solitamente l'impianto di terra è costituito da una maglia di corde di rame nudo, più larghe verso il centro della SSE, interrate a una profondità superiore a un metro, coronata da picchetti dispersori posti in pozzetti ispezionabili. Nella sua realizzazione, non deve presentare una resistenza superiore a 1Ω . Per informazioni dettagliate sulle SSE si rimanda a [2], [3] e [4].

3.3. La linea di contatto

Le linee di contatto sono quella parte dell'impianto che permette l'alimentazione dei veicoli ferroviari. Per questa ragione deve risultare isolata dalle strutture di sostegno e deve assicurare il passaggio delle correnti di linea senza causare interruzioni, surriscaldamenti o perdite eccessive. Viene quindi realizzata con corde e fili di rame di idonea sezione, ben tesi rispetto al piano delle rotaie e con andamento a zig zag rispetto all'asse del binario per evitare pericolosi danneggiamenti dell'organo strisciante. Assieme al circuito di ritorno, costituisce un impianto abbastanza particolare in quanto i carichi non sono fissi, ma mobili e i contatti sono assicurati da organi striscianti (pantografo con archetto) lato ldc e dalle ruote lato binario.

Quattro sono le parti fondamentali costituenti questa porzione di impianto:

- L'infrastruttura
- I sostegni
- I conduttori
- L'impianto di terra

L'infrastruttura

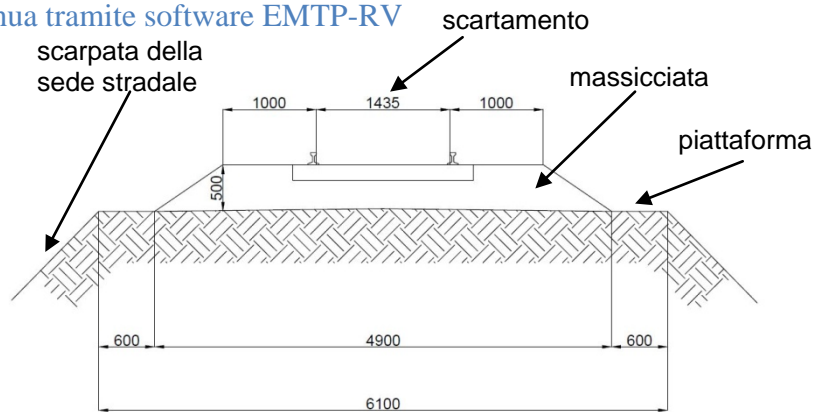
Data l'estensione delle tratte ferroviarie alimentate in corrente continua e le sollecitazioni elettriche e meccaniche cui le linee di contatto sono sottoposte, l'infrastruttura di sostegno di questa parte dell'impianto deve essere molto solida.

Importantissimo risulta il profilo plano-altimetrico della tratta considerata, in quanto a seconda del tipo di tracciato (rettilineo, in galleria, in curva ecc.), diverse sono le soluzioni tecniche da adottare per ottenere un impianto di alimentazione sicuro ed efficiente. Ad esempio, nelle curve, la rotaia esterna viene posta in sopraelevazione rispetto all'altra, al fine di cercare di equilibrare la forza centrifuga a cui è soggetto il treno. Per quanto riguarda il tracciato, esistono poi dei vincoli di natura tecnica che impongono un raggio di curvatura minimo di 150 metri, per non avere limitazioni sulla tipologia di treni che interessano la tratta, e una pendenza massima del 4%, per evitare perdite di aderenza delle ruote con conseguenti slittamenti.

Anche le soluzioni per la realizzazione del corpo stradale sono diverse a seconda dell'orografia del terreno. In generale è composto da una piattaforma, ben livellata e pendente in senso trasversale per favorire il deflusso delle acque, sopra alla quale viene posto uno strato di materiale bituminoso (sub ballast) dallo spessore di 5 cm e successivamente del pietrisco (ballast), il quale ospita le rotaie (armamento ferroviario). Le dimensioni della piattaforma variano secondo il numero di binari in parallelo e della distanza tra questi, dipendente a sua volta dalla velocità dei treni. Lo strato di ballast ha lo scopo di meglio distribuire i carichi al passaggio dei treni e il suo spessore è fissato in 35

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

cm nel caso di linee non molto trafficate, mentre in 50 cm per le linee della rete fondamentale. Le caratteristiche dell'armamento verranno descritte in dettaglio nel prossimo paragrafo.



I sostegni

Figura 27 in mm)

Sezione del corpo stradale su cui poggiano le rotaie (misure

I sostegni utilizzati per la

sospensione della linea di contatto devono essere progettati per avere idonee caratteristiche meccaniche, dipendenti dal numero e dalla tipologia di binari considerati. Come per il resto dell'impianto, numerose sono state le migliorie tecniche impiegate, che hanno portato allo sviluppo di un gran numero di tipologie di sostegni, ognuno caratterizzato da propri aspetti peculiari.

Le caratteristiche meccaniche principali che la linea di contatto richiede sono inerenti all'altezza, all'elasticità e all'insensibilità rispetto alle variazioni di temperatura e alle condizioni climatiche (presenza di vento, ghiaccio, ecc.). Le normative prescrivono che l'altezza della linea di contatto debba rimanere la più possibile costante e a un valore di 5 metri rispetto al piano del binario. Variazioni importanti porterebbero, infatti, a un continuo distacco degli striscianti, con conseguenti archi elettrici e consumo degli archetti. Per cedevolezza si intende il rapporto tra il sollevamento della linea di contatto e la spinta esercitata dal pantografo. Questo valore deve rimanere il più possibile costante, ossia la linea non deve presentare zone a rigidità diversa, che potrebbero portare a fenomeni di risonanza in relazione alle oscillazioni dei conduttori. Per rispettare questo vincolo, vengono adottati vari accorgimenti, come l'utilizzo di una freccia leggermente positiva a metà campata o l'utilizzo di una corda a Y in corrispondenza della sospensione. Le variazioni di temperatura portano invece ad allungamenti e accorciamenti dei conduttori, con un'alterazione conseguente nei tiri e nelle frecce. È stata introdotta per questo motivo la regolazione automatica del tiro dei conduttori; un sistema di pulegge e contrappesi montato

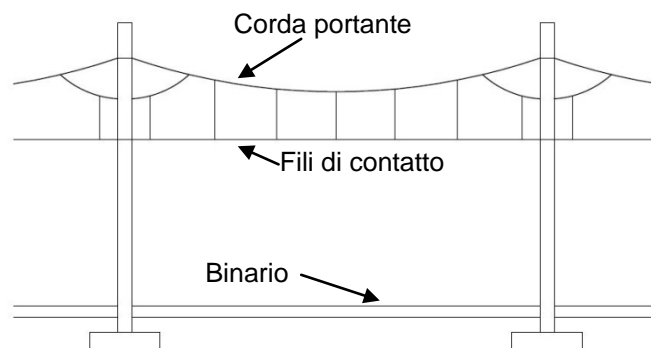


Figura 28

Sospensione longitudinale con corda portante a Y

su alcuni sostegni in grado di far fronte agli allungamenti o accorciamenti dei conduttori, con benefiche conseguenze sulla qualità dell'alimentazione dei veicoli.

Per rispettare i vincoli sopra esposti, la linea di contatto viene sostenuta o da pali infissi lateralmente al binario o da portali sovrastanti la tratta. Per quanto riguarda il primo tipo di sostegno, tre sono le principali tipologie di pali utilizzati: pali tipo M (brevetto Mannesmann), pali tipo LS e i pali di fortuna. I primi sono dotati di una struttura tubolare rastremata verso l'alto e reggono molto bene i carichi orientati in qualunque direzione. Rappresentano il 75% del totale dei sostegni utilizzati. I pali di tipo LS sono invece costituiti da due profilati a C, collegati fra loro da tondini di ferro a forma di zig zag. Rispetto ai pali tipo M hanno un costo unitario inferiore del 50%, ma presentano un momento resistente in senso longitudinale alla linea ridotto. I pali di fortuna sono invece utilizzati in caso di ripristino provvisorio della linea, a seguito di eventi eccezionali quali incidenti ferroviari o spostamento temporaneo dei binari, in quanto non richiedono blocchi di fondazione. Sono di tipo tubolare e dotati di un'appendice sulla quale sono montate due piastre da fissare sotto le rotaie.

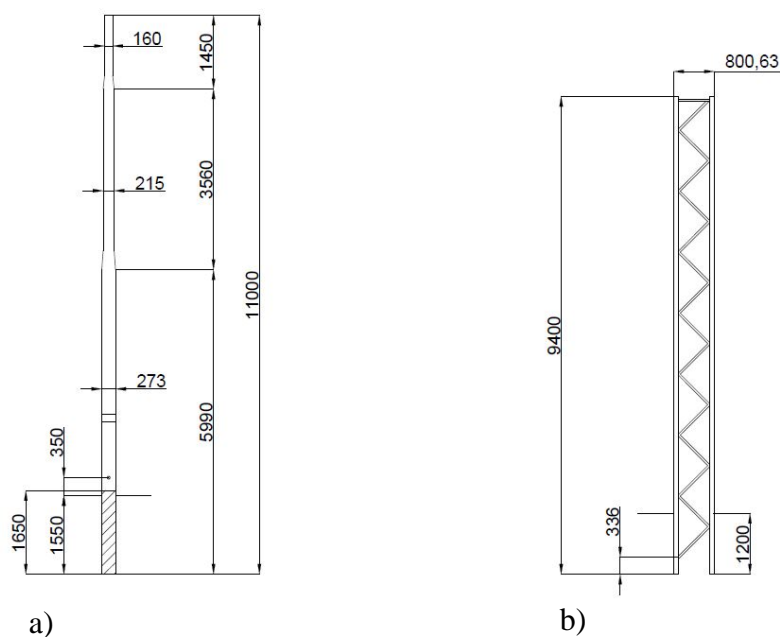


Figura 29 Viste delle principali tipologie di pali utilizzati
(misure in mm)

a) Pilo tipo M 30
b) Pilo tipo LS

I portali invece hanno una struttura composta da una travata orizzontale, fissata a due montanti verticali. Le travate sono a traliccio, solitamente di tipo rettangolare, mentre i montanti possono essere dei semplici pali tipo M oppure apposite tralicciature a sezione rettangolare. Sono largamente utilizzati nei posti di sezionamento elettrico a spazio d'aria (vedi paragrafi seguenti) e nelle stazioni, in quanto consentono un efficace distanziamento dei conduttori e richiedono spazi tra i vari binari ridotti.

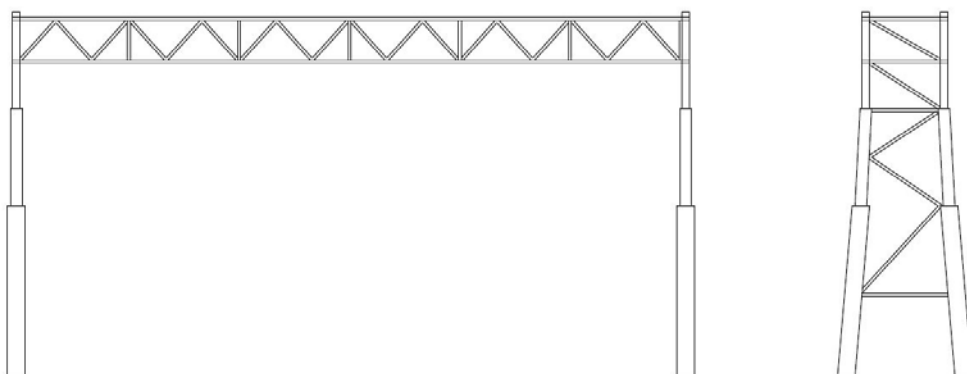


Figura 30 Esempio di portale per ormeggio per tre binari a travata rettangolare

Qualunque tipo di sostegno venga utilizzato, fondamentale risulta il corretto dimensionamento dei blocchi di fondazione, le cui dimensioni variano a seconda del tipo di sostegno e dall'entità delle sollecitazioni applicate allo stesso. Devono essere costituiti da conglomerato cementizio con forma parallelepipedica. La superficie superiore deve essere sagomata a quattro spioventi, allo scopo di favorire lo scolo delle acque piovane. Per aumentare la stabilità dei sostegni, possono essere utilizzati dei tiranti, costituiti da tondi in acciaio, collegati ad appositi blocchi di calcestruzzo.

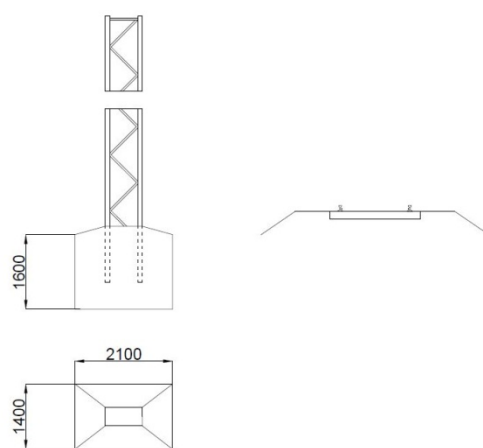


Figura 31 Blocco di fondazione per pali tipo LS (misure in mm)

Per quanto riguarda lo spazio da porre tra sostegno e binario, le normative attuali prescrivono, per tratte in piena linea, una distanza di 2.25 m dalla rotaia più vicina. La lunghezza delle campate dipende invece dal tracciato della linea e in particolare dal raggio delle curve. La lunghezza massima ammessa è di 60 m; lunghezza adottata normalmente in rettilineo e per curve con raggio maggiore di 1400 m. Per curve più importanti, la lunghezza della campata deve essere ovviamente ridotta.

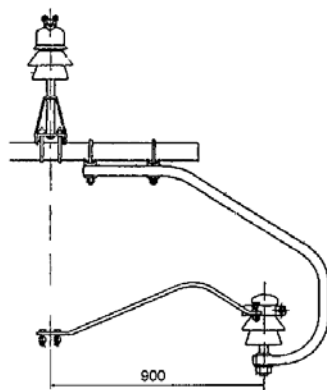


Figura 32 Sospensione a mensola orizzontale di vecchio tipo con due isolatori I489

Ai sostegni sono fissate le mensole, strutture caricate a sbalzo che hanno la funzione di posizionare le sospensioni per la linea di contatto. Sono sostenute da tiranti, costituiti da aste o corde metalliche, anch'essi assicurati ai sostegni. Le più diffuse hanno forma tubolare, dal diametro esterno di 76 mm e interno di 66

mm. In stazione la lunghezza può essere molto variabile, dipendente dal numero di binari presenti, mentre in piena linea le lunghezze sono ampiamente standardizzate.

Le sospensioni sono quel complesso di elementi che hanno lo scopo di sostenere, isolare e poligonare la linea di contatto. In generale sono composte da due isolatori; il primo è avvitato in un perno infilato in una staffa fissata direttamente alla mensola, il secondo invece è sostenuto dal braccio di poligonazione, anch'esso collegato alla mensola attraverso un apposito attacco. Il secondo isolatore non è dotato di cappa in bronzo come il primo, ma di un attacco che ospita il tirantino di poligonazione in grado di sopportare spostamenti in orizzontale e verticale, mantenendo però la poligonazione entro i limiti di ± 20 cm. Più recentemente sono state introdotte sospensioni (tipo MEC) in cui tutto

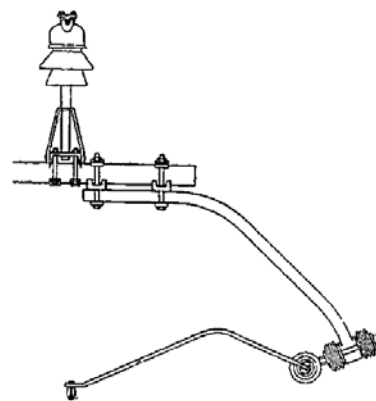


Figura 33 Sospensione a mensola orizzontale di vecchio tipo con un isolatore I489 e due isolatori a rocchetto

l'isolamento è garantito in corrispondenza del sostegno; la sospensione risulta quindi

normalmente tutta sotto tensione. È composta da un tirante orizzontale e da una mensola inclinata, alla quale è collegata un'asta di registrazione, mantenuta orizzontale da un apposito pendino, che ospita l'attacco per la corda portante. All'asta è poi collegato il tirantino di poligonazione.

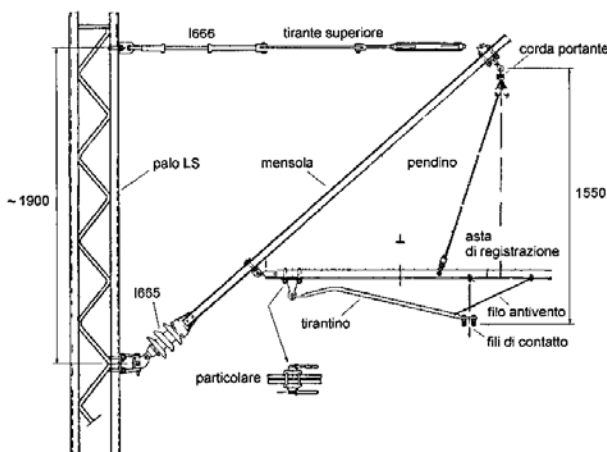


Figura 34 Sospensione tipo MEC a mensola inclinata su palo LS

Fondamentale ai fini della sicurezza elettrica risulta il circuito di terra di protezione dell'impianto di alimentazione ferroviaria. Bisogna subito sottolineare come questo debba

essere normalmente mantenuto separato dal circuito di ritorno della corrente di linea, al fine di ridurre il rischio di corrosioni elettrolitiche e conseguente indebolimento delle strutture. Solo al verificarsi di differenze di potenziale troppo elevate (maggiori di 200 V) tra i due circuiti, è prescritta la messa in parallelo degli stessi attraverso le valvole di tensione. Nel complesso, il circuito di terra viene ottenuto connettendo i singoli sostegni a paletti dispersori e collegandoli poi tra loro attraverso corde di alluminio dalle seguenti caratteristiche.

Tabella 10 Caratteristiche delle corde utilizzate per il collegamento di terra dei sostegni.

Materiale	Diametro	Struttura	Sezione (mm ²)	Massa (kg/m)
Alluminio	14,5	19 × 2,9	125	0,350

Come detto, il collegamento al circuito di ritorno è affidato a valvole di tensione, disposte a intervalli di circa 3000 m in apposite cassette fissate ai sostegni. Nel caso in cui il binario sia dotato di dispositivo di blocco automatico, il collegamento viene effettuato al centro della connessione induttiva (vedi paragrafo successivo).

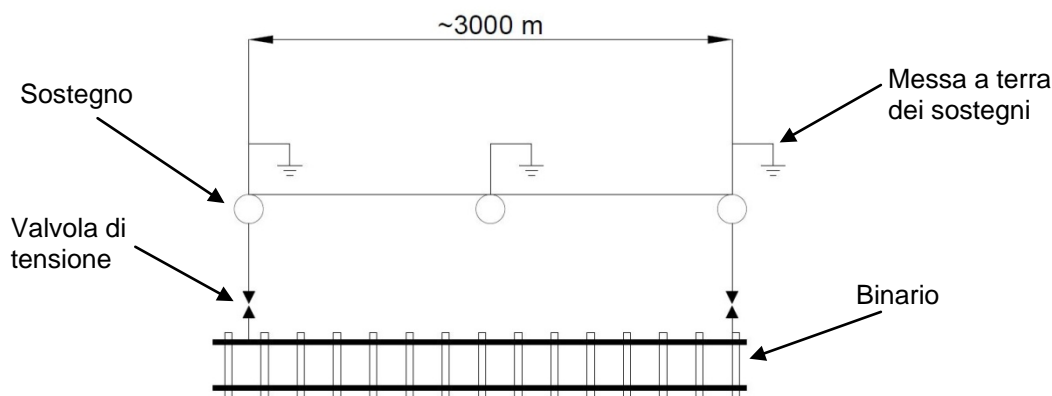


Figura 35 Separazione del circuito di ritorno dal circuito di terra dei sostegni

L'impianto deve essere tale da presentare, in corrispondenza di ogni sostegno, una resistenza di messa a terra inferiore ai 2Ω . In caso contrario devono essere realizzati alcuni accorgimenti (l'utilizzo di dispersori profondi, l'aggiunta di una corda di terra, ecc.) tali da riportarsi entro il limite previsto. Nelle linee a semplice binario è previsto l'utilizzo di due corde di terra, mentre in quelli a doppio binario è prevista l'installazione di una sola corda se la sezione della linea è inferiore a 320 mm^2 . La corda si trova all'esterno del sostegno e viene posizionata generalmente a una quota di 20 cm più bassa dei fili di contatto. Ogni 1500 metri è previsto, nel caso di linee a doppio binario, un collegamento equipotenziale tra le corde di terra dei due binari.

Al fine della protezione dalle fulminazioni è prevista, in modo analogo a quanto viene fatto per le linee di primarie, la presenza di trefoli di guardia, disposti sulla sommità dei sostegni e realizzati con funi di acciaio zincato da 60 mm^2 o di bronzo da 35 mm^2 . La tendenza attuale è però quella di limitare l'installazione di tali conduttori e di posizionare una delle due corde di terra in posizione più elevata delle sospensioni, affidandole quindi anche una funzione di protezione ceramica.

La linea di contatto

Prima di dare una descrizione dettagliata di tutti gli elementi che compongono la linea di contatto, pare utile richiamare alcuni concetti per una migliore comprensione delle scelte effettuate in termini di dimensionamento dei vari componenti.

Il dimensionamento dei conduttori che compongono la linea di contatto consiste nel determinare la sezione utile di rame rispetto alle condizioni di carico. La scelta di una

sezione troppo grande comporterebbe, infatti, oneri economici troppo elevati e problemi di captazione, mentre una sezione troppo esigua sarebbe causa di cadute di tensione elevate, maggiori perdite e di surriscaldamento dei conduttori. Per un corretto dimensionamento, bisogna quindi considerare i seguenti parametri elettrici inerenti alla linea: la resistenza ohmica, la densità di corrente nel rame e le cadute di tensione ammesse. Per valutare la resistenza chilometrica dei conduttori di rame viene solitamente utilizzata la seguente formula:

$$r_{cu} = \frac{18,8}{S} \Omega/km \quad [1]$$

dove S è la sezione espressa in mm². Si riportano di seguito le varie configurazioni possibili utilizzate nelle linee di contatto, con indicata la resistenza ohmica.

Tabella 11 Caratteristiche delle possibili configurazioni di conduttori utilizzati per le linee di contatto.

Composizione	Sezione dei conduttori (mm ²)	Sezione complessiva (mm ²)	Resistenza (Ω/km)
1 filo sagomato + 1 corda	1 × 100 1 × 63	163	0.115
2 fili sagomati + 1 corda portante	2 × 100 1 × 117	317	0.059
2 fili sagomati + 2 corde portanti	2 × 100 2 × 117	437	0.043
2 fili sagomati + 1 corda portante	2 × 150 1 × 160	460	0.041
2 fili sagomati + 2 corde portanti	2 × 100 2 × 155	510	0.037
2 fili sagomati + 2 corde portanti	2 × 120 2 × 150	540	0.035
2 fili sagomati + 2 corde portanti	2 × 150 2 × 155	610	0.031

La densità di corrente ammissibile dipende invece dalla sovratemperatura sopportabile dai conduttori, senza che questi subiscano allungamenti o deformazioni troppo importanti. Le norme prescrivono una densità di corrente massima di 4 A/mm², che corrisponde a una sovratemperatura dei conduttori di 45 °C rispetto a quella ambiente. I limiti previsti invece per le cadute di tensione impongono che per il sistema a 3000 V in corrente continua la tensione di linea sia sempre compresa tra -33% e +20% della tensione nominale (quindi compresa tra 2000 V e 3600 V). Se la tensione scende al di sotto del limite previsto viene prescritta la sospensione del traffico per alcuni mezzi pesanti (ad esempio dei treni merci), in attesa di apportare migliorie al sistema di alimentazione. Ai fini di una stima del rendimento di trasmissione, risulta utile anche la valutazione della caduta di tensione media della linea. In questo senso il rendimento può essere espresso come

$$\eta = 1 - \frac{\Delta V_m}{V} \quad [2]$$

dove ΔV_m è la caduta di tensione media mentre V è la tensione nominale di alimentazione della linea.

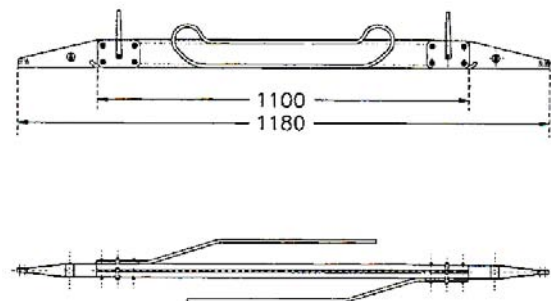


Figura 37 Isolatore di sezione di tipo tradizionale

Al fine di rendere agevole le alimentazioni o disalimentazioni parziali della linea di contatto, è prevista la suddivisione della stessa in varie zone elettriche; zone elettricamente distinte tra di loro grazie alla presenza di dispositivi di sezionamento o di collegamento e di alimentazione. I dispositivi di sezionamento possono essere costituiti da veri e propri isolatori di sezione o

da spazi d'aria. Devono garantire la continuità del contatto elettrico col pantografo nel momento di passaggio del treno, mentre l'isolamento delle zone elettriche limitrofe nel normale esercizio della linea. Per questo entrambi prevedono tratti più o meno lunghi di conduttori in parallelo. Esistono vari tipi di isolatori di sezionamento, utilizzabili però solo nelle linee a

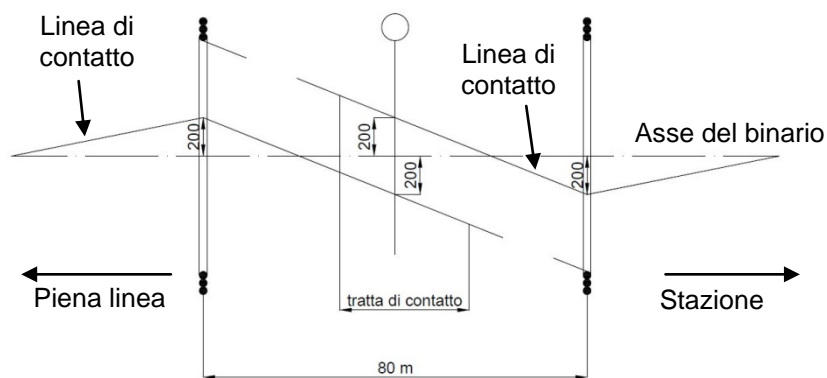


Figura 36 Sezionamento a spazio d'aria tra portali di stazione

singolo filo di contatto e singola corda portante, in quanto non consente il transito dei treni a elevate velocità, costituendo un punto a flessibilità ridotta della linea. I sezionamenti a spazio d'aria, se ben più costosi, non presentano invece questo tipo di limitazione. La presenza di dispositivi di collegamento in corrispondenza di quelli di isolamento è necessaria per variare la configurazione della rete a seconda delle esigenze di esercizio. Sono costituiti da sezionatori aerei a corna, del tutto analoghi a quelli che si trovano nelle SSE.

La classificazione delle linee di contatto prevista dalla normativa prevede cinque possibili configurazioni, come riportato nella tabella seguente:

Tabella 12 Classificazione della tipologia della linea di contatto secondo FS

Tipologia	Sezione della corda portante (mm ²)	Sezione dei fili di contatto (mm ²)	Sezione complessiva (mm ²)	Velocità massima ammessa (km/h)
A	1 × 120 fissa	2 × 100 regolati	320	140

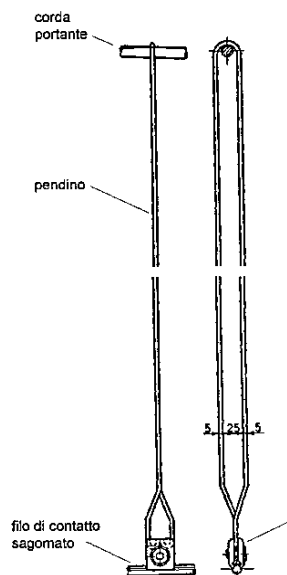
B	1 × 120 regolata	2 × 100 regolati	320	180
C	2 × 117 regolate	2 × 100 regolati	440	180
D	1 × 160 regolata	2 × 150 regolati	460	200
E	2 × 120 regolate	2 × 150 regolati	540	250

La catalogazione non è però rigorosa e, dove necessario, può essere aumentata la sezione della linea di contatto per ridurre le cadute di tensione.

I conduttori utilizzati nel sistema di alimentazione sono solitamente di rame e, solo in casi particolari, vengono utilizzati altri materiali. Tre sono i tipi utilizzati: il filo sagomato, a contatto con gli organi striscianti dei mezzi di trazione, il filo tondo, usato nella costruzione dei pendini, e le corde e i trefoli, usati per sostenere i fili di contatto, per i collegamenti equipotenziali e per le linee di alimentazione. Il filo sagomato a una sezione di 100 mm² o 150 mm² e presenta due scanalature per consentire l'attacco delle ganasce dei pendini, costituiti da un filo tondo dal diametro di 5 mm. Le corde e i trefoli hanno varie sezioni e funzioni, come riportato nella tabella seguente.

Tabella 13 Funzioni e caratteristiche di varie corde utilizzate nel circuito di alimentazione ferroviaria.

Impiego	Materiale	Diametro	Struttura	Sezione (mm ²)	Massa (kg/m)
Corda portante binario principale	Rame	14	19 × 2.8	117	1.07
Corda per cavallotti continuità	Rame	11,9	37 × 1.7	107	0.78
Corda per cavallotti di scorrimento	Rame	10,5	19 × 2.1	65	0.603
Corda per binario secondario	Rame	10,2	7 × 3.4	63	0.570
Corda di terra	Alluminio	14,5	19 × 2.9	125	0.350
Circuito di terra	Rame	7	7 × 0.8	24.5	0.194



Data la grande estensione degli impianti di alimentazione, risulta necessario l'impiego di morsetti, dispositivi di collegamento a pressione di due conduttori metallici, che rivestono sia una funzione elettrica che meccanica.

La distanza tra filo di contatto e corda portante in corrispondenza di ciascuna sospensione è di circa 1.4 m, mentre l'altezza del filo di contatto rispetto al piano del ferro è di 5.2 m.

Il collegamento dei fili di contatto con la corda portante è dato da appositi sostegni, detti pendini. Questi sono di varia lunghezza, per tenere conto della diversa posizione che devono assumere nella campata compresa tra due sostegni. Nelle tratte in cui le corde non prevedono la regolazione automatica, i pendini

Figura 38 Vista di un pendino

devono essere liberi di spostarsi, trascinati dai movimenti del filo di contatto a causa delle variazioni di temperatura. Per questo motivo solitamente vengono utilizzati solo nella parte centrale della campata, dato che in vicinanza della sospensione vengono utilizzati cavallotti di scorrimento, in grado di creare brevi tratti orizzontali nella corda portante e di ridurre l'attrito in corrispondenza dell'accavallamento tra questa e il cavallotto. Nelle linee dove è prevista la regolazione automatica della corda portante, invece, non si verificano movimenti relativi tra questa e il filo di contatto, quindi i pendini possono essere fissati alla corda con appositi morsetti.

I pendini non sono sufficienti a garantire un buon collegamento elettrico tra fili di contatto e corda portante. Al fine di evitare surriscaldamenti e fusioni, vengono posizionati dei cavallotti di continuità, costituiti da una corda di rame a 37 fili, fissati ogni 120 – 180 m. Per informazioni più dettagliate si rimanda a [5].

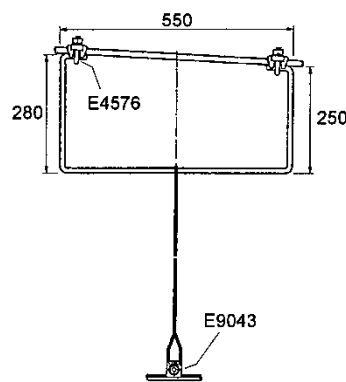


Figura 39 Cavallotto di scorrimento

3.4. Il circuito di ritorno

L'importanza del circuito di ritorno e delle sue caratteristiche è pari a quella che riveste la linea di contatto al fine di garantire un regolare esercizio ferroviario. È costituito da una o entrambe le rotaie del binario, anche se bisogna subito sottolineare che parte della corrente può disperdersi nel terreno prima di ritornare nella SSE, dato che non è previsto l'isolamento totale dei binari rispetto alla terra. In ogni caso deve essere sempre verificata la continuità elettrica del circuito, assicurando un collegamento permanente tra i vari spezzoni di rotaia.

Struttura

Il binario viene realizzato con due rotaie di acciaio disposte in modo parallelo a una distanza costante (detta scartamento), fissate a traverse di cemento armato precompresso. L'entità dello scartamento è pari a 1435 mm e il distanziamento degli appoggi delle rotaie varia a seconda del tipo di linea (per la rete fondamentale la distanza imposta è di 60 cm).

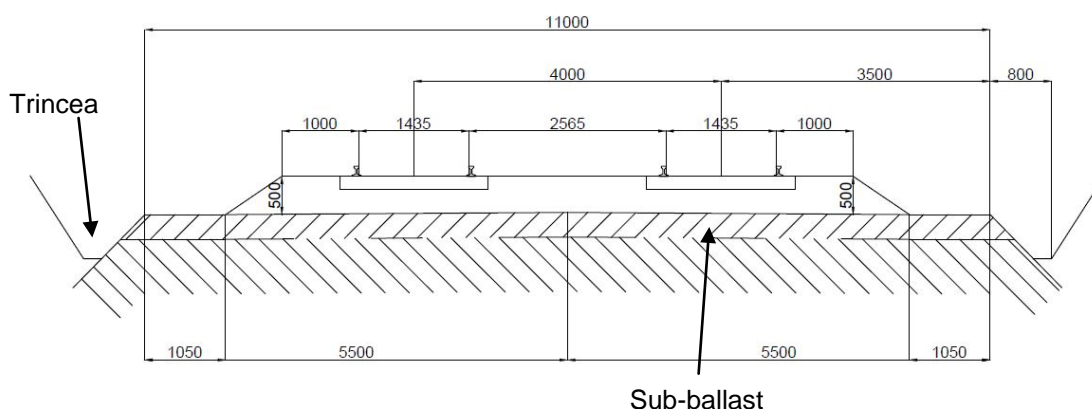


Figura 40 Sezione della sede stradale per una linea a doppio binario (misure in mm)

Nel fissare le rotaie alle traverse, vengono utilizzati espedienti affinché assumano una leggera inclinazione verso l'asse del binario, per aumentare la stabilità dei convogli in transito. Ogni rotaia risulta composta di 3 elementi: il fungo, il gambo e la suola. La parte superiore del fungo risulta arrotondata per meglio adeguarsi alla forma dei cerchioni delle ruote mentre la suola offre un'ampia base di appoggio che favorisce la stabilità del binario durante il transito dei treni. Il gambo distanzia le due parti sopra citate e presenta una zona centrale in grado di sopportare eventuali forature senza subire indebolimento della struttura del binario. Le varie tipologie di rotaie si contraddistinguono per il loro peso per metro, misurato in kg/m. Si riportano di seguito le caratteristiche di 3 tipi di rotaie, con indicate le misure principali.

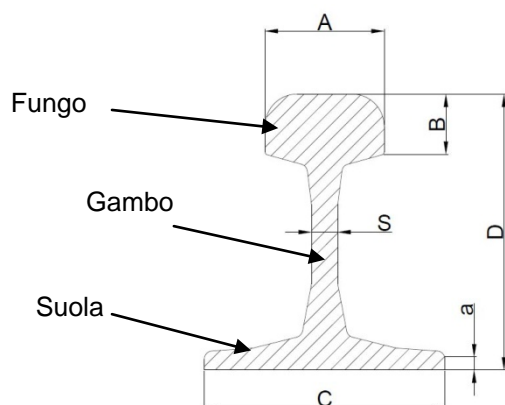


Figura 41

Tipo	Peso per metro (kg/m)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	a (mm)	S (mm)	Sezione (cm ²)
FS 46	46.30	65.00	36.87	135	145	8.12	14.00	55.5
50 UNI	49.86	70.00	38.80	135	148	10.00	14.00	63.5
60 UNI	60.36	74.30	37.50	150	172	11.50	16.50	76.86

Dimensioni principali di 3 tipi di rotaie

Data la lunghezza delle tratte ferroviarie, nella costruzione dei binari risulta necessario l'unione di più sezioni elementari successive. In passato molto utilizzate erano le giunzioni meccaniche, rimpiazzate adesso da saldature che vanno a costituire il sistema della lunga rotaia saldata (lrs). Questa evoluzione ha portato a una maggiore stabilità nella struttura della rotaia, in quanto non è più necessaria la foratura del gambo che può portare a corrosioni, e una riduzione della resistenza del circuito di ritorno. A tal proposito, con le giunzioni meccaniche, la formula pratica da utilizzare per la determinazione della resistenza chilometrica longitudinale è la seguente:

$$r = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{1,23}{p} + \frac{0,2}{l} \right) \Omega/\text{km} \quad [3]$$

dove m è il numero di rotaie in parallelo (solitamente 2 per ogni binario), p è la massa per metro lineare di rotaia e l è la lunghezza in metri di ogni tratto continuo di rotaia. Con la tecnica della lunga rotaia saldata, la resistenza chilometrica viene valutata con la formula seguente:

$$r = \frac{1}{2 \cdot p} \Omega/\text{km} \quad [4]$$

La tabella seguente riporta i valori di resistenza chilometrica per 3 configurazioni di rotaie.

Tabella 14 Caratteristiche di 3 configurazioni diverse di rotaie

Tecnica adottata	Tipo di armamento	p (massa per metro (kg/m))	m (n° di rotaie in parallelo)	l (lunghezza tratto continuo di rotaia (m))	r (Ω/km)
------------------	-------------------	----------------------------	-------------------------------	---	----------

Giunzione	FS 46	46.3	2	12	0.0223
Giunzione	FS 46	46.3	2	18	0.0195
Lrs	60 UNI	60.36	2	36	0.0082

Come già accennato, si nota la convenienza dell'utilizzo della tecnica della lunga rotaia saldata, che comporta una diminuzione sensibile della resistenza del circuito di ritorno e quindi anche dell'intero circuito di alimentazione ferroviaria.

Nelle rotaie, per il funzionamento dei circuiti di binario, devono essere inseriti dei giunti isolanti, con lo scopo di interrompere la continuità elettrica del circuito di ritorno. Per ristabilirla vengono usate apposite connessioni longitudinali del tipo a treccia, la cui resistenza deve risultare inferiore a quella corrispondente a 3 metri di rotaia.

Molto importante dal punto di vista elettrico risulta la conduttanza di dispersione verso terra delle rotaie. Queste, infatti, non sono perfettamente isolate dal terreno, permettendo a parte della corrente di ritorno di fluire a terra. Questo accorgimento evita che il binario si porti a tensioni pericolosamente alte quando percorso dalla corrente di alimentazione, ma è causa di possibili corrosioni su strutture adiacenti alla linea. La conduttanza di dispersione non è legata alla natura dei binari, ma alle condizioni della massicciata, allo stato di conservazione delle traverse e alle condizioni ambientali, risultando quindi molto variabile. Il suo valore condiziona il funzionamento dei circuiti di binario, per cui viene prescritto che la resistenza di isolamento tra le due rotaie non debba essere inferiore a $2 \Omega \cdot \text{km}$ (quindi intermini di conduttanza non superiore a 0.5 S/km) per le tratte di piena linea, mentre $1.4 \Omega \cdot \text{km}$ (quindi una conduttanza inferiore a 0.71 S/km) per i binari nell'ambito delle stazioni.

Tipologie

La normativa distingue fra tre tipi di circuito di ritorno, suddivisi in base alla funzione che le rotaie rivestono nel circuito. La prima tipologia prevede entrambe le rotaie isolate, separate da giunti isolanti, dove la continuità del circuito viene data da apposite connessioni induttive, necessarie per il funzionamento del circuito di binario. Il secondo è costituito da una sola rotaia isolata, anche se in entrambe le sezioni delle rotaie sono separate da giunti

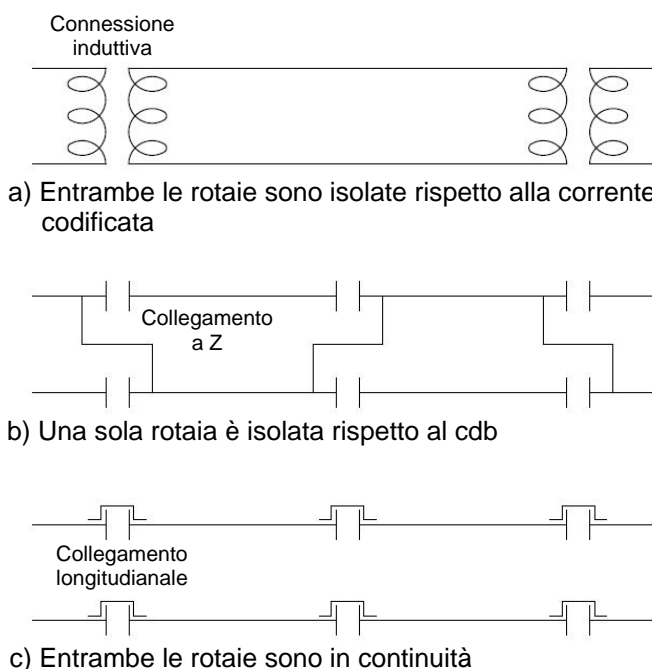


Figura 42 I tre casi dei circuiti di ritorno previsti dalla normativa

isolanti. La continuità del circuito di ritorno è data da opportuni collegamenti. Il terzo tipo prevede invece entrambe le rotaie non isolate e assicuranti la continuità del circuito di ritorno attraverso opportuni collegamenti longitudinali. I collegamenti trasversali fra rotaie sono sempre possibili solo per il circuito di tipo 3 e vengono solitamente poste ogni 180 m. Nel caso di circuito di tipo 2 sono possibili solo nel caso di linee a doppio binario, collegando fra loro le rotaie non isolate dei due binari sempre a intervalli di 180 m. Per il circuito di tipo 1, le connessioni trasversali non possono essere applicate in nessun caso.

Per capire il motivo di questa diversificazione nei tipi di circuito, bisogna introdurre il sistema dei circuiti di binario, usati per la segnalazione dell'occupazione o meno di una tratta di binario.

Il circuito di binario

Uno degli aspetti fondamentali nell'esercizio ferroviario risulta la sicurezza. Tanti sono stati gli sforzi compiuti in questo senso, che hanno reso il treno uno dei mezzi più sicuri per il trasporto di persone e di merci. Uno dei problemi principali che è stato dovuto risolvere era inerente alla verifica dell'occupazione o meno di una tratta ferroviaria, al fine di evitare disastrosi incidenti. A tale scopo, grazie all'introduzione dei circuiti di binario, venne sviluppato un sistema a blocco elettrico manuale tipo FS. Questo impianto di protezione consentiva l'identificazione dell'occupazione o meno di una tratta di binario, suddividendola in sezioni di blocco. Le porzioni di linea erano delimitate dai posti di distanziamento (detti anche posti di blocco), che dovevano risultare sempre presenziati. Il sistema richiedeva l'installazione in ogni posto di blocco di appositi apparecchi chiamati strumenti di blocco il cui funzionamento è semiautomatico.

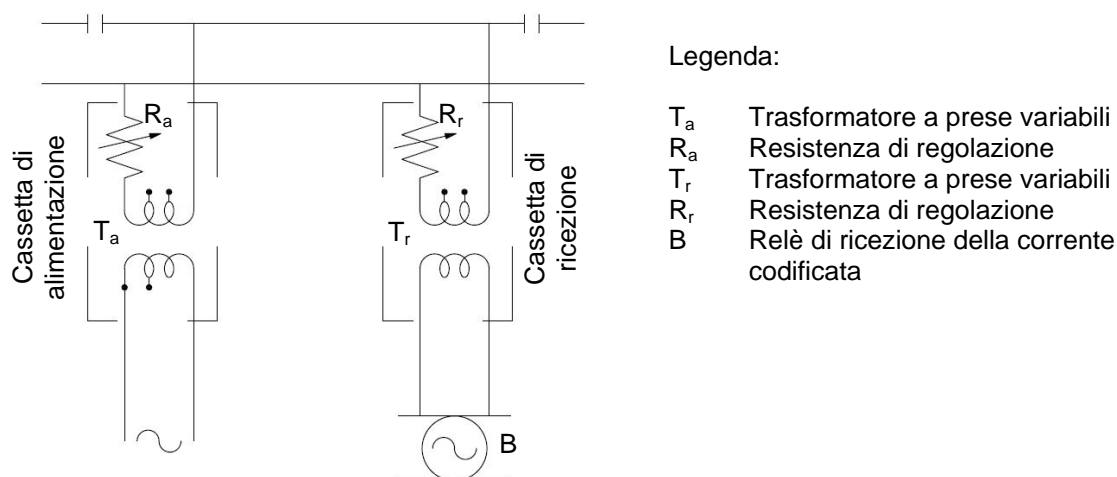


Figura 43 Schema elettrico del circuito di binario

La funzione principale di questi è il rilascio del consenso all'occupazione di una sezione di blocco previa richiesta dal posto di blocco dal quale il treno deve partire. In caso positivo, veniva dato un segnale di partenza (segnale di blocco) in forma luminosa e il treno poteva

occupare la tratta successiva. La verifica della liberazione della tratta era affidata ai circuiti di binario, mentre compito dell'operatore presente nel posto di blocco era il controllo della completezza del treno. I margini di errore umano vennero poi completamente eliminati con l'introduzione del blocco automatico, ancora oggi utilizzato per la sua grande affidabilità e sicurezza.

Il circuito di binario utilizzato nelle tratte dotate di sistema a blocco automatico, funziona in corrente alternata a 50 Hz. In serie all'alimentazione, data da un trasformatore abbassatore da 50 VA che fornisce una tensione di 150 V, viene inserita una resistenza zavorra

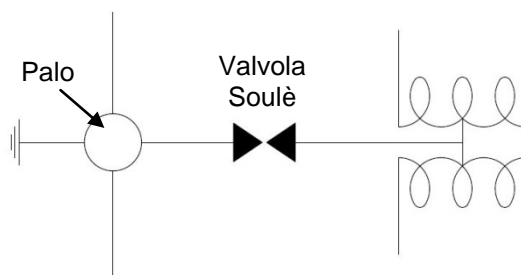


Figura 44 Schema elettrico del collegamento alla valvola di tensione

che ha lo scopo di limitare la corrente quando gli assi del treno cortocircuitano le rotaie. Il relè di ricezione del circuito

di binario è posto all'estremo opposto della sezione di blocco e viene alimentato da un trasformatore elevatore, in grado di portare la tensione a valori consoni al funzionamento del relè stesso. Quando la tratta interessata non è percorsa da treni, la corrente del circuito di binario si richiude attraverso il secondo trasformatore e il relè non scatta. In presenza invece di un convoglio, le ruote cortocircuitano le rotaie, diseccitando il relè che segnala quindi la presenza del treno sulla sezione considerata. Se le sezioni di blocco non sono troppo lunghe, è sufficiente utilizzare un circuito di ritorno del secondo tipo, utilizzando delle connessioni in treccia di rame tra le due rotaie non isolate appartenenti a sezioni contigue. Quando i circuiti di binario sono di notevole lunghezza (compresa tra 700 m e 2000 m) si adotta invece il circuito di ritorno di tipologia a, con entrambe le rotaie che partecipano alla conduzione della corrente di ritorno. Per informazioni più dettagliate si rimanda a [6] e [7].

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

4. Il sistema in esame

4.1. Introduzione

Descritte le componenti fondamentali che costituiscono il sistema elettrico ferroviario italiano, si vuole ora costruire un modello di riferimento semplice ma realistico, che rappresenti una tipica tratta ferroviaria. In analogia a quanto fatto in [8] per il sistema AV/AC, il modello comprenderà sia l'alimentazione in Alta Tensione delle SSE, che il circuito di alimentazione dei convogli, considerando quindi tutte le possibili interazioni tra le varie parti dell'impianto. Una volta eseguite le simulazioni sul sistema che rappresenta lo stato attuale della tecnica ferroviaria italiana e ottenuti dei risultati in linea con quelli reali, si vuole cercare una soluzione per aumentare la potenzialità delle linee esistenti, costruendo un nuovo modello sulla base di quello validato in precedenza.

Si vogliono fare due tipi diversi di simulazioni: la prima di tipo statico, nella quale i carichi vengono considerati fissi in un punto della tratta e si analizza quindi una situazione istantanea, con particolare attenzione alle cadute di tensione, alla tensione di binario e al ripple della forma d'onda di alimentazione. La seconda tipologia di simulazione è invece di tipo dinamico, considerando quindi uno o più carichi che si muovono lungo la tratta. Interessante sarà in questo caso l'andamento della tensione al pantografo e delle tensioni erogate dalle SSE.

4.2. Caratterizzazione delle parti dell'impianto

Si passa ora a descrivere le caratteristiche delle parti di impianto che andranno a caratterizzare il modello del sistema elettrico ferroviario attuale e che saranno successivamente implementate nel programma EMTP-RV.

4.1.1. Linee primarie

Per l'alimentazione delle SSE si sono scelti due tipi di linee primarie. La prima costituita da una doppia terna di lunghezza di 30 km con tensione nominale di 132 kV, che collega la rete nazionale a una SSE. I 6 conduttori sono formati da un'anima in acciaio con mantello in alluminio, presentano un diametro di 1.585 cm e sono caratterizzati da una resistenza chilometrica di 0.2261 Ω /km. La linea è dotata anche di fune di guardia in acciaio zincato dal diametro di 1.05 cm e sezione 0.65 cm². La disposizione dei conduttori rispecchia invece i dati contenuti nella tabella seguente.

Tabella 15 Disposizione dei conduttori costituenti la prima tipologia di linea primaria

Conduttore	Fase	Altezza dal suolo sul sostegno (m)	Altezza dal suolo a metà campata (m)	Distanza dall'asse di riferimento (m)
1	a	21.3	15	3.75
2	b	23.650	18	3.2
3	c	26	22	3.05
4	a'	21.3	15	-3.75
5	b'	23.650	18	-3.2
6	c'	26	22	-3.05
0	0	29.5	26	0

La seconda linea invece connette due SSE limitrofe ed è formata da una singola terna con conduttori dalle caratteristiche analoghe a quelle indicate in precedenza. Anche questa è dotata di fune di guardia e la disposizione delle fasi segue i dati contenuti nella tabella seguente.

Tabella 16 Disposizione dei conduttori costituenti la seconda tipologia di linea primaria

Conduttore	Fase	Altezza dal suolo sul sostegno (m)	Altezza dal suolo a metà campata (m)	Distanza dall'asse di riferimento (m)
1	a	21.3	15	3.75
2	b	23.650	18	-3.2
3	c	26	22	3.05
0	0	29.5	26	0

L'alimentazione è supposta a potenza di corto circuito infinita. Le linee a doppia terna sono quindi alimentate lato rete di trasmissione sempre alla tensione nominale di 132 kV.

4.1.2. Sottostazioni elettriche

Come spiegato in [9] e [10], la struttura delle SSE comprende due gruppi raddrizzatori da 5,4 MW, alimentati da trasformatori abbassatori da 5750 kVA appartenenti al gruppo Yyd11. Il rapporto di trasformazione è quello tipico delle SSE (132000/2710) e si è scelta una tensione di corto circuito (v_{cc}) del 12% e una potenza di corto circuito (p_{cc}) di 35 kW. Da questi dati si è dovuto poi ricavare le componenti resistive e reattive dello schema equivalente monofase dell'avvolgimento primario e dei secondari. A tale scopo, si utilizzano i seguenti simboli:

S = potenza nominale del trasformatore (VA)

V_1 = tensione nominale concatenata del primario (V)

V_2 = tensione nominale concatenata di ciascun secondario (V)

I = corrente nominale del trasformatore (A)

E = forza elettromotrice interna stellata (V)

$Z_n = \frac{V_1}{\sqrt{3}I} = \frac{V_1^2}{S}$ = impedenza di riferimento (Ω)

R_1, X_1, Z_1 = resistenza, reattanza e impedenza equivalenti del primario (Ω)

R_2, X_2, Z_2 = resistenza, reattanza e impedenza equivalenti di ciascun secondario riferite al primario (Ω)

v_1 = tensione percentuale di corto circuito da applicare al primario con entrambi i secondari in corto circuito affinché il trafo assorba la corrente nominale

p_1 = perdite percentuali misurate applicando v_1

v_2 = tensione percentuale di corto circuito da applicare al primario con uno solo dei secondari in corto circuito affinché il trafo assorba metà della corrente nominale

p_2 = perdite percentuali misurate applicando v_2

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ = pulsazione del sistema

Applicando prima v_1 e poi v_2 nelle condizioni indicate è possibile determinare i valori di $R_1, X_1, Z_1, R_2, X_2, Z_2$.

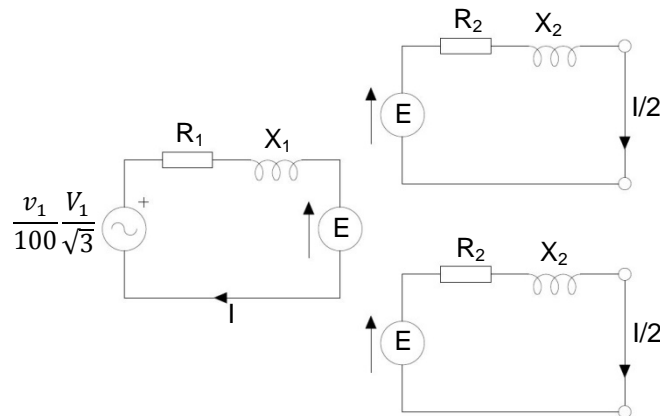


Figura 45 Prova di corto circuito n° 1, con ambedue i secondari in corto circuito

Applicando v_1 e osservando lo schema equivalente è possibile scrivere

$$\frac{v_1}{100} \cdot \frac{V_1}{\sqrt{3}} = \underline{E} + \underline{I} \cdot (R_1 + jX_1) \quad [5]$$

ma si può notare che

$$\underline{E} = \frac{I}{2} \cdot (R_2 + jX_2) \quad [6]$$

per cui si ottiene

$$\frac{v_1}{100} \cdot \frac{V_1}{\sqrt{3}} = \frac{I}{2} \cdot (R_2 + jX_2) + \underline{I} \cdot (R_1 + jX_1) \quad [7]$$

Dato che i termini resistivi R_1 e R_2 sono trascurabili rispetto a quelli induttivi X_1 e X_2 , si può scrivere, considerando in questo caso il modulo dei vettori

$$\frac{v_1}{100} \cdot \frac{V_1}{\sqrt{3}} = I \cdot \left(X_1 + \frac{X_2}{2} \right) \quad [8]$$

ovvero

$$X_1 + \frac{X_2}{2} = \frac{v_1}{100} \cdot Z_n \quad [9]$$

Applicando la tensione v_2 con le modalità indicate si può osservare, sempre osservando lo schema equivalente, che si può ricavare la seguente relazione in modo del tutto analogo

$$\frac{X_1}{2} + \frac{X_2}{2} = \frac{v_2}{100} \cdot Z_n \quad [10]$$

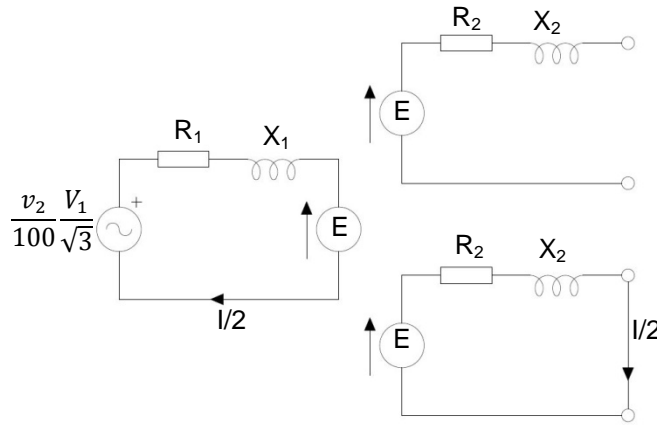


Figura 46 Prova di corto circuito n° 2, con un solo secondario in corto circuito

Risolvendo il sistema formato dalle equazioni [9] e [10] rispetto a X_1 e X_2 , si ottiene

$$X_1 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{v_1 - v_2}{100} \right) \quad [11]$$

$$X_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{2v_2 - v_1}{100} \right)$$

Per quanto riguarda le resistenze equivalenti, si può osservare che, applicando v_1 , le perdite che si verificano all'interno del trasformatore sono pari a

$$\frac{p_1}{100} \cdot \frac{P}{3} = R_1 \cdot I^2 + 2 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{I}{2} \right)^2 \quad [12]$$

Nel caso si applicasse la tensione v_2 si riscontrerebbero le seguenti perdite

$$\frac{p_2}{100} \cdot \frac{P}{3} = R_1 \cdot \left(\frac{I}{2} \right)^2 + R_2 \cdot \left(\frac{I}{2} \right)^2 \quad [13]$$

Risolvendo anche questo secondo sistema rispetto a R_1 e R_2 si ottiene

$$R_1 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{p_1 - 2 \cdot p_2}{100} \right) \quad [14]$$

$$R_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{4 \cdot p_2 - p_1}{100} \right)$$

Per quanto riguarda le reattanze X_1 e X_2 solitamente non vengono forniti i dati relativi alla prova eseguita alla tensione v_2 , ma viene indicato il rapporto di reattanza K , definito come

$$K = \frac{X_1}{X_1 + X_2} \quad [15]$$

Sostituendo nella [15] le espressioni di X_1 e X_2 sopra trovate, si ottiene

$$K = \frac{v_1 - v_2}{v_2} = \frac{v_1}{v_2} - 1 \quad [16]$$

ottenendo quindi l'espressione di v_2 in funzione di v_1 e K

$$v_2 = \frac{v_1}{1 + K} \quad [17]$$

Sostituendo l'espressione appena trovata nelle [11] si ottiene

$$\begin{aligned} X_1 &= 2 \cdot Z_n \cdot \frac{v_1}{100} \cdot \frac{K}{1+K} \\ X_2 &= 2 \cdot Z_n \cdot \frac{v_1}{100} \cdot \frac{1-K}{1+K} \end{aligned} \quad [18]$$

Si possono quindi individuare due casi estremi: il primo in cui $K = 0$, sinonimo del fatto che i due secondari sono del tutto disaccoppiati tra loro. Il trafo è quindi caratterizzato dalle seguenti espressioni

$$v_2 = v_1 \quad X_1 = 0 \quad X_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \frac{v_1}{100} \quad [19]$$

Il secondo caso prevede i due secondari perfettamente accoppiati magneticamente tra di loro, ossia il rapporto di reattanza $K = 1$. Il trasformatore prevede quindi

$$v_2 = \frac{v_1}{2} \quad X_2 = 0 \quad X_1 = Z_n \cdot \frac{v_1}{100} \quad [20]$$

Applicando quanto appena visto al trasformatore presente in SSE, si ottiene

$$p_1 = \frac{p_{cc}}{P} \cdot 100 = \frac{35}{5750} \cdot 100 = 0,609 \% \quad [21]$$

p_2 non è invece indicata. Assumendo però che le perdite in condizioni di carico nominale siano equamente suddivise tra il primario ed entrambi i secondari e, nella prova alla tensione v_2 il primario è caricato a metà e uno solo dei secondari è a carico nominale, si può scrivere che

$$p_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{p_1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{p_1}{2} = \frac{3}{8} \cdot p_1 = 0,228 \% \quad [22]$$

Infine si ottiene

$$Z_n = \frac{V_1^2}{P} = 1,277 \Omega \quad [23]$$

Applicando ora le [14] si ottiene

$$R_1 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{p_1 - 2 \cdot p_2}{100} \right) = 2 \cdot 1,277 \cdot \left(\frac{0,609 - 2 \cdot 0,228}{100} \right) = 0,004 \Omega$$

$$R_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{4 \cdot p_2 - p_1}{100} \right) = 2 \cdot 1,277 \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,228 - 0,609}{100} \right) = 0,008 \Omega \quad [24]$$

Per la valutazione delle induttanze equivalenti bisogna fare una distinzione a seconda del valore del rapporto di reattanza. Nel caso in cui $K = 0$, allora si ottiene

$$v_2 = \frac{v_1}{1 + K} = v_1 = 12 \%$$

$$X_1 = 0 \Omega$$

$$X_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \frac{v_1}{100} = 2 \cdot 1,277 \cdot \frac{12}{100} = 306,46 \Omega \quad [25]$$

$$L_2 = \frac{X_2}{\omega} = \frac{306,46}{314,16} = 0,976 H$$

Nel caso in cui $K=1$ invece si ricava

$$v_2 = \frac{v_1}{2} = 6 \%$$

$$X_1 = Z_n \cdot \frac{v_1}{100} = 1,277 \cdot \frac{12}{100} = 153,23 \Omega \quad [26]$$

$$L_1 = \frac{X_1}{\omega} = \frac{153,23}{314,16} = 0,488 H$$

$$X_2 = 0 \Omega$$

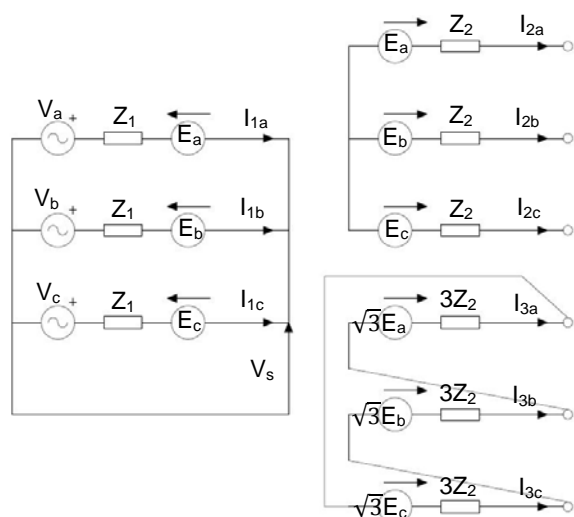


Figura 47 Schema equivalente trifase di un trasformatore a 2 avvolgimenti secondari rispettivamente a stella e a triangolo

Solitamente i trasformatori delle SSE presentano un accoppiamento tra gli avvolgimenti secondari poco importante, per questa ragione si utilizzano i dati ricavati per un rapporto di reattanza nullo. Non bisogna poi dimenticare che i valori trovati sono relativi a un circuito equivalente. Quindi il valore della resistenza e della reattanza dell'avvolgimento connesso a triangolo andranno moltiplicati per 3 nel

momento in cui bisognerà inserire i dati per la costruzione del modello della rete ferroviaria.

I trasformatori alimentano i ponti raddrizzatori dodecafasi, che presentano 5 diodi per ramo con inserite in parallelo resistenze di compensazione della tensione da 2000Ω e una capacità da $0.5 \mu\text{F}$ con una resistenza da 10Ω in serie. Viene considerata anche la presenza del gruppo di protezione RCR, composto da due resistenze da 12Ω e da una capacità di $10 \mu\text{F}$. A valle di ciascun ponte raddrizzatore viene installato un filtro, composto da un'induttanza di 6 mH e una capacità di $360 \mu\text{F}$ (3 gruppi da 4 condensatori da $30 \mu\text{F}$).

Il collegamento delle SSE alle linee di contatto viene effettuato tramite 2 corde in rame di lunghezza di 300 m . Ogni corda presenta una sezione di 2.25 cm^2 , con un diametro di 1.96 cm e una resistenza chilometrica di $0.08 \Omega/\text{km}$. Il collegamento del binario al negativo della SSE viene invece effettuato attraverso due corde di rame, ciascuna dal diametro di 1.8 cm e dalla sezione di 2.00 cm^2 . La lunghezza dei conduttori è sempre di 300 m e la resistenza chilometrica di ciascuno è di $0.09 \Omega/\text{km}$.

Vengono trascurati gli effetti di tutti i collegamenti tra le varie parti citate in quanto di lunghezza molto ridotta, e la presenza dei sistemi di protezione, non influenti nel normale funzionamento del sistema.

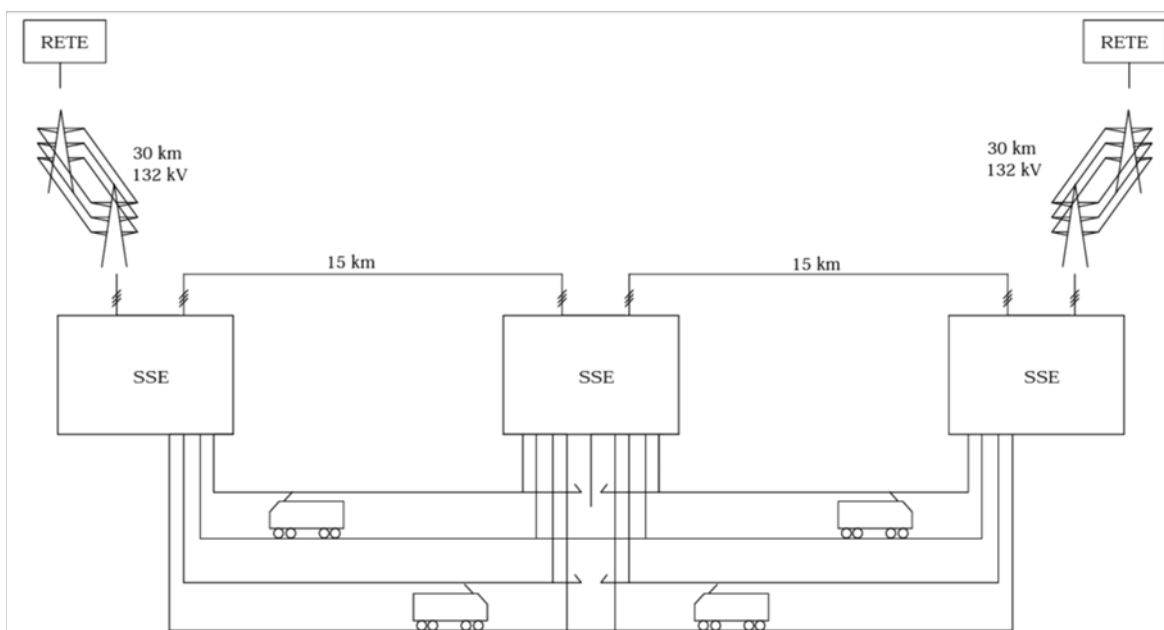


Figura 48 Struttura completa del sistema elettrico che si vuole modellizzare

4.1.3. Linea di contatto

Le SSE, distanziate di 15 km , alimentano una tratta a doppio binario, caratterizzata da una linea di contatto di tipologia C, composta da due corde portanti e da due fili di contatto, per una sezione utile di rame di 4.40 cm^2 . La tratta considerata è di piena linea, con una distanza tra i sostegni della linea di 60 m . La linea è dotata di due funi di guardia in alluminio con una sezione complessiva di 2.50 cm^2 , messe a terra in corrispondenza di

ogni sostegno. È prevista la messa in parallelo dei trefoli di protezione dei due binari ogni 1500 m. La resistenza chilometrica dell'intera linea di contatto è di 0.052 Ω /km mentre quella delle funi di guardia è di 0.114 Ω /km. La disposizione dei conduttori segue i dati riportati nella tabella seguente.

Tabella 17 Disposizione dei conduttori costituenti la linea di contatto e i collegamenti equipotenziali

Conduttore	Altezza dal suolo sul sostegno (m)	Altezza dal suolo a metà campata (m)	Distanza dall'asse di riferimento (m)
Linea di contatto 1	5.20	5.20	2
Trefolo 1	5	4.3	5.12
Linea di contatto 2	5.20	5.20	-2
Trefolo 2	5	4.3	-5.12

Dai dati riportati in tabella, si nota come ai singoli conduttori che vanno a comporre l'intera linea di contatto, sia stato sostituito un unico conduttore equivalente di sezione pari alla somma delle sezioni dei singoli conduttori.

4.1.4. Circuito di ritorno

Le rotaie vengono considerate come due conduttori in acciaio, con una sezione di 76.86 cm^2 e una resistenza chilometrica di 0.03 Ω /km. La disposizione segue i dati della tabella seguente.

Tabella 18 Disposizione dei conduttori costituenti il circuito di ritorno

Conduttore	Altezza dal suolo (m)	Distanza dall'asse di riferimento (m)
Rotaia 1	0	2.7175
Rotaia 2	0	1.2825
Rotaia 3	0	-2.7175
Rotaia 4	0	-1.2825

Il circuito di ritorno è dotato di blocco automatico con circuito di binario della lunghezza di 1.5 km. Le connessioni induttive vengono considerate prive di perdite e caratterizzate da un valore di induttanza di 5 mH per lato. Sia la conduttanza di dispersione verso terra della rotaia, sia quella presente tra le rotaie vengono supposte pari a 0.05 S/km.

Lo sviluppo del modello verrà eseguito con il software EMTP-RV.

5. Il software EMTP-RV®

EMTP – RV è un software dedicato alle simulazioni di transitori elettromagnetici su vasti sistemi di potenza e su reti elettriche in generale. Il nome infatti è l'acronimo di Electromagnetic Transients Program - Restructured Version. La versione utilizzata e che verrà descritta è la 10.4.

Il software è dotato di un'interfaccia grafica (GUI) che lo rende abbastanza intuitivo e simile ad altri programmi di simulazione circuitale (Simulink, PSpice, ecc). L'affidabilità dei risultati ottenuti e un solver molto evoluto lo rendono il programma di riferimento per studi di questo genere.

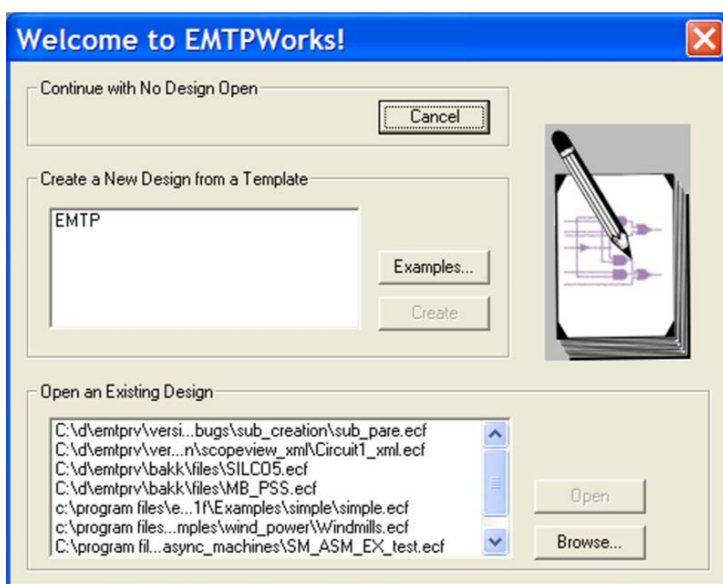


Figura 49 Schermata di benvenuto del programma

Per iniziare un nuovo progetto è sufficiente aprire il programma. Apparirà una schermata di benvenuto, nella quale è possibile scegliere se continuare un progetto salvato precedentemente oppure iniziarne uno nuovo. Evidenziando la parola “EMTP” e cliccando sul tasto “crea” si passa alla creazione di un nuovo modello con le caratteristiche standard del programma.

Appare quindi la schermata

principale del programma, nella quale si riconosce al centro il foglio di lavoro, in alto la barra contenente i comandi principali, sulla destra la libreria che racchiude gli oggetti necessari a costruire il modello e in basso una finestra nella quale vengono mostrati gli eventuali avvisi o errori del programma.

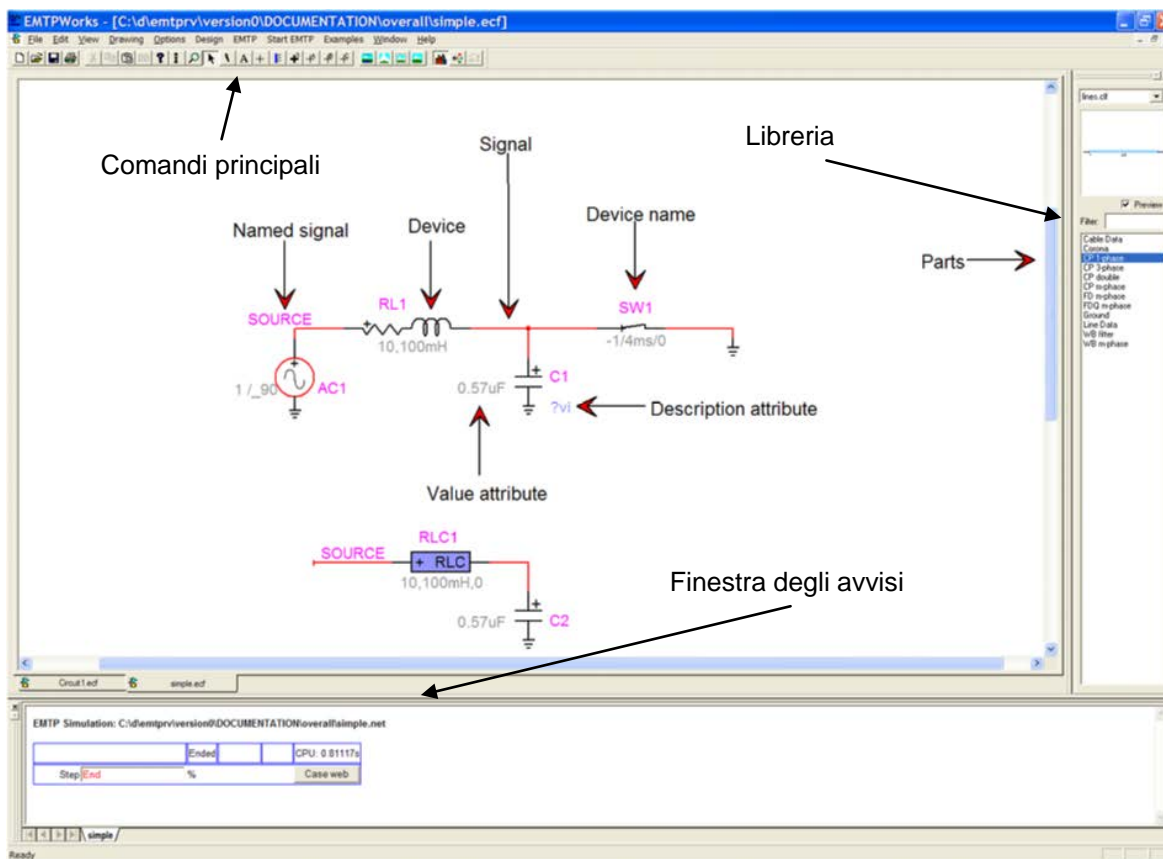


Figura 50 Schermata iniziale del programma

Oggetti (Devices)

Gli oggetti possono essere trascinati dalla libreria a lato e posizionati sul piano di lavoro. Ogni dispositivo ha un orientamento di default, che può essere modificato dopo il posizionamento nel circuito. Una volta inseriti, gli oggetti possono essere spostati sul piano trascinandoli, tenendo premuto il tasto sinistro del mouse o con i tasti freccia della tastiera. Quando un dispositivo si muove, il programma cerca di mantenere le connessioni esistenti, ma questo non è sempre possibile e l'utente potrebbe dover rifare la connettività manualmente. Un dispositivo può avere zero, uno o più porte (pin). I pin posizionati a

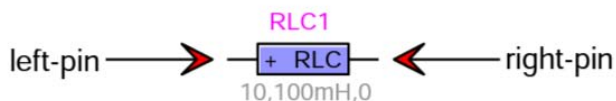


Figura 51 Un oggetto con due sole porte

sinistra sono chiamati anche k-pin, mentre quelli di destra m-pin. Il segno più "+" viene utilizzato per fornire il verso corretto per i dispositivi di potenza. Il progetto può contenere varie tipologie di dispositivi: dispositivi elettrici (come resistenze, induttanze, ecc.), dispositivi di controllo (come schemi a blocchi, integratori, ecc.), oggetti simulati riconosciuti da EMTP e oggetti di controllo delle impostazioni del lavoro (la biblioteca "options.clf" ha dispositivi per la selezione di

opzioni di simulazione). È possibile modificare l'aspetto dell'oggetto, cliccando col tasto destro sullo stesso e selezionando l'opzione "Edit Symbol".

Ogni dispositivo possiede una scheda delle proprietà, organizzata in varie sottoschede, accessibile con un doppio clic del mouse. La sottoscheda "Values" consente di modificare i valori delle caratteristiche fisiche dell'oggetto considerato (come il valore dell'induttanza per un dispositivo "induttore"). I dati inseriti nei campi sono testati quando l'utente clicca all'esterno del campo considerato. Il colore blu è usato per i dati esistenti. Quando un campo dati viene invece verificato, il colore verde oliva indica dati accettati e il colore rosso

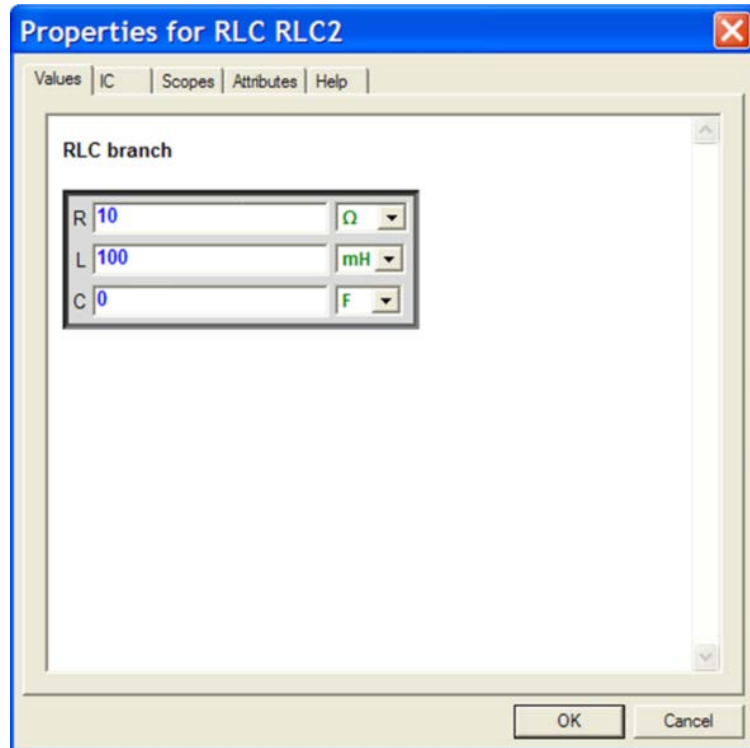


Figura 52 Finestra delle proprietà dell'oggetto "RLC"

segnala un problema corretto. Il pulsante OK registra tutte le modifiche dei dati e chiude la tendina delle proprietà dell'oggetto. La scheda "IC" consente di immettere le eventuali condizioni iniziali dell'oggetto, la scheda "Scopes" permette invece di selezionare le forme d'onda o i segnali che si vogliono visualizzare una volta finita la simulazione, la scheda "Attributes" permette di modificare alcune opzioni interne al dispositivo, come il nome, la descrizione ecc. Infine la scheda "Help" contiene il file di descrizione dell'oggetto, nel quale viene spiegata la funzione di tutti i campi da inserire e il comportamento del dispositivo al variare delle opzioni di simulazione. Ulteriori spiegazioni vengono fornite da tendine che appaiono una volta che si è spostato il puntatore del mouse sul campo o l'opzione desiderata.

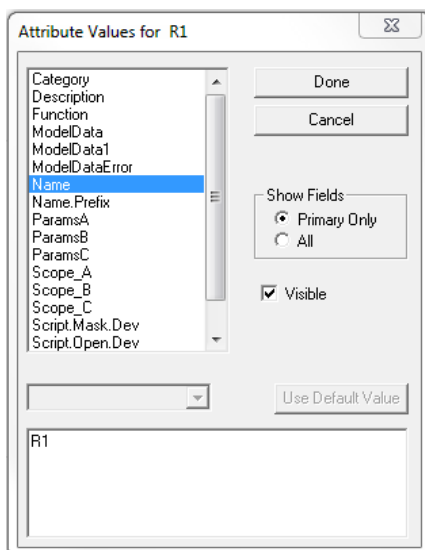


Figura 53 Finestra degli attributi dell'oggetto R1

Gli attributi del dispositivo costituiscono la sua "memoria" e ne stabiliscono le regole di comportamento. La modifica di questi campi è consigliabile solo a chi ha già una buona familiarità col programma, in quanto un uso errato può danneggiare i dati del dispositivo e creare problemi in seguito

difficilmente risolvibili. In ogni caso, gli attributi utilizzati per il salvataggio dei dati nel progetto e l'invio nel file netlist sono: "ParamsA", "ParamsB", "ParamsC" e "ModelData". Attraverso questi campi è possibile gestire l'oggetto in modo automatico, selezionando ad esempio le forme d'onda che si vogliono visualizzare, rendendo isolati alcuni oggetti, impostando alcuni valori fisici del dispositivo, ecc.

Questo modo di procedere risulta utile nel momento in

cui si devono settare le impostazioni di un gran numero di oggetti. Verrà quindi trattato più in dettaglio nella sezione dedicata agli script. Gli attributi possono essere resi visibili allo scopo di fornire un feedback visivo per i dati inseriti. Impostando ad esempio l'attributo "Value" come visibile, sarà possibile vedere i valori dei campi caratteristici dell'oggetto separati da una virgola. Se invece è visibile anche l'attributo "Description", sono mostrate una serie di lettere. Ad esempio la sigla "!iv?vip" indica che sono presenti delle condizioni iniziali in termini di corrente e tensione (!iv) ed è attiva la registrazione delle forme d'onda di corrente e tensione e della potenza erogata o assorbita dall'oggetto (?vip).

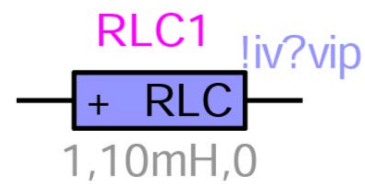


Figura 54 Oggetto con alcuni attributi visibili

Attualmente il programma prevede l'utilizzo di 3 tipi di pin: Power-pin (porta di potenza), Input-pin (pin di ingresso) e Output-pin (pin di uscita). Il Power-pin è utilizzato per i dispositivi di potenza. Un dispositivo di controllo può invece avere pin di ingresso e / o pin di uscita. Segnali destinati al controllo di un dispositivo di potenza non si connettono direttamente alla porta, ma sono necessari sensori, in grado di modificare la natura del segnale. Alcuni dispositivi possono avere sia pin per il controllo che pin di potenza, come il caso del dispositivo "tiristore", contenuto all'interno della libreria "switches.clf".

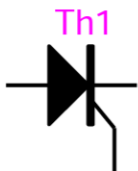


Figura 55 Oggetto "Thyristor"

Collegamenti (Wires)

Gli oggetti sono collegati tra loro attraverso dei collegamenti. Connessioni tra pin di controllo (ingresso o uscita) conducono segnali di controllo, mentre collegamenti tra pin di potenza trasmettono segnali di potenza. Se un segnale di ingresso (collegato a un pin di ingresso) non è collegato ad alcun segnale di uscita, EMTP assume che il suo valore è sempre zero. È possibile rinominare il nome dei collegamenti e renderli visibili, cliccando col tasto destro del mouse sulla connessione e cliccando la voce "Name". In generale però questa azione non è utile, a meno che non si ha la necessità di creare un riferimento speciale o si vuole effettuare una connessione per nome (vedi di seguito) tra oggetti diversi.

Il metodo standard per collegare uno o più oggetti è quello di disegnare un collegamento (cliccando vicino al pin di partenza, tenendo premuto il puntatore del mouse e spostandosi nel foglio di lavoro) tra i pin dei dispositivi o tra segnali già esistenti. È possibile utilizzare

anche gli strumenti di disegno che consentono di iniziare il collegamento in un qualsiasi punto della pagina.

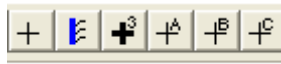


Figura 56 Strumenti per la rappresentazione grafica dei segnali

Come accennato, è anche possibile collegare gli oggetti utilizzando i nomi dei segnali, senza disegnare una connessione visibile. Due o più oggetti afferenti a segnali che presentano lo stesso nome risultano quindi connessi tra loro. Affinché il collegamento sia effettivo è necessario però che il nome dei segnali sia visibile.

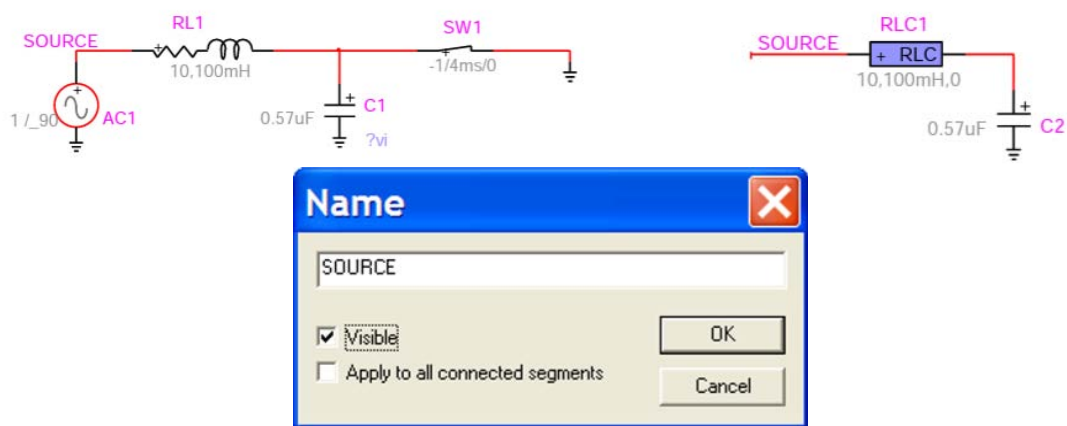


Figura 58 Connessione per nome

Questo metodo di collegamento è però pericoloso, in quanto soggetto a facili errori, e quindi sconsigliato. Un approccio migliore quando è assolutamente necessario il collegamento per nome consiste nell'utilizzare i "Page Connectors" (Connettori di Pagina). Questi oggetti sono disponibili nella libreria "Pseudo Devices.clf" e consentono di creare progetti su più pagine distinte, ma con dispositivi tra loro interconnessi. La connessione

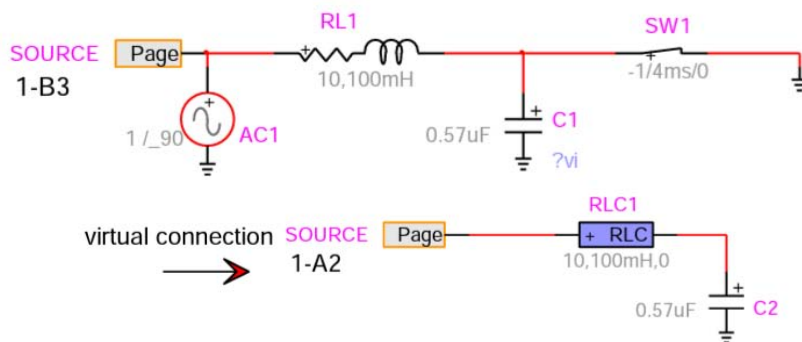


Figura 57 Connessione con "Page Connectors"

viene creata nominando nello stesso modo il connettore di pagina invece del segnale a cui è collegato. Questo approccio è più robusto e fornisce un feedback visivo di posizione del collegamento, attivabile nel menu in alto "Drawing>Design Preferences" e selezionando la

scheda "Page Refs". In questa scheda è necessario spuntare la casella di controllo " Enable Automatic Page References".

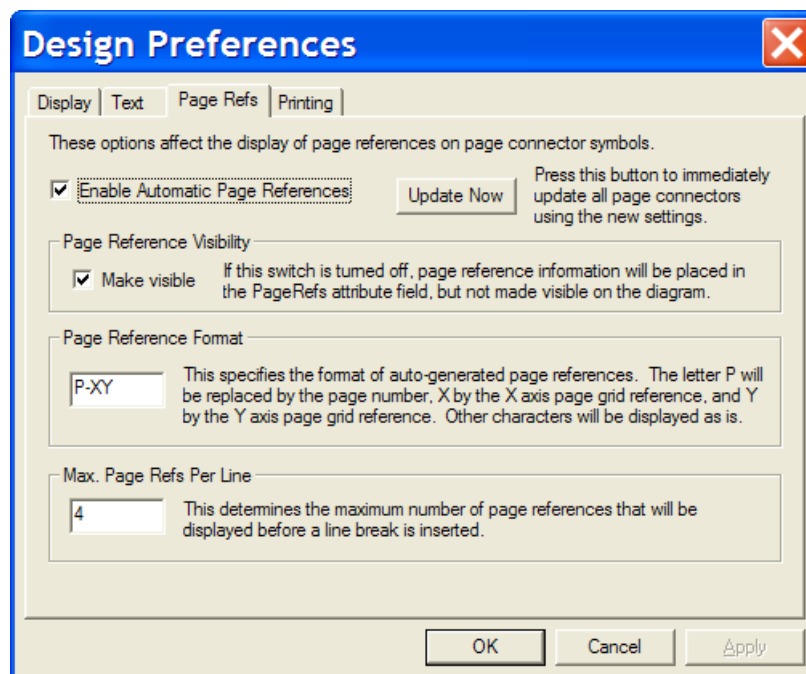


Figura 59 La schermata delle opzioni generali per rendere visibile la posizione dei “Page Connectors”

Un singolo click su una connessione, mette in evidenza l’intero collegamento a cui è soggetta, facendo cambiare colore anche alle porte interessate. Un doppio clic su un segnale mostra invece le connessioni virtuali (connessioni per nome e con i connettori di pagina).

Esistono più tipologie di collegamenti possibili. La connessione di default riguarda un segnale monofase. Esso può essere disegnato partendo da un segnale esistente, da una porta di un dispositivo o utilizzando il primo pulsante del "Draw signal tool" (Figura 56). Un segnale di controllo può essere condotto solo da una connessione di questo tipo, mentre un segnale di potenza può anche essere trasmesso da una connessione trifase, da un “3-Phase Bus” o da connessioni distinti per la fase A, B o C. Il bus trifase viene utilizzato come un concentratore di segnale, utile nel caso si vogliano trattare separatamente le tre fasi di un segnale. Il tipo di connessione è selezionabile tramite un click col tasto destro del mouse sul segnale e selezionando la voce "Line Type".

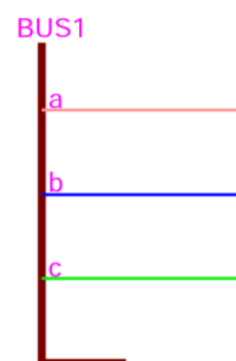


Figura 60 “3-Phase Bus” con connessioni distinte per le 3 fasi

Sottocircuiti (Subcircuits)

Fondamentale per la realizzazione di un modello semplice ed efficace risulta la creazione di sottocircuiti. Essi consentono di semplificare i disegni, di creare moduli riutilizzabili e di mascherare eventuali parti di progetto che non si vogliono mostrare. EMTP-RV offre diversi metodi per la creazione di sottocircuiti, i quali possono essere creati da qualsiasi porzione del circuito. È anche possibile fare un sottocircuito dall'intero circuito in esame. Il

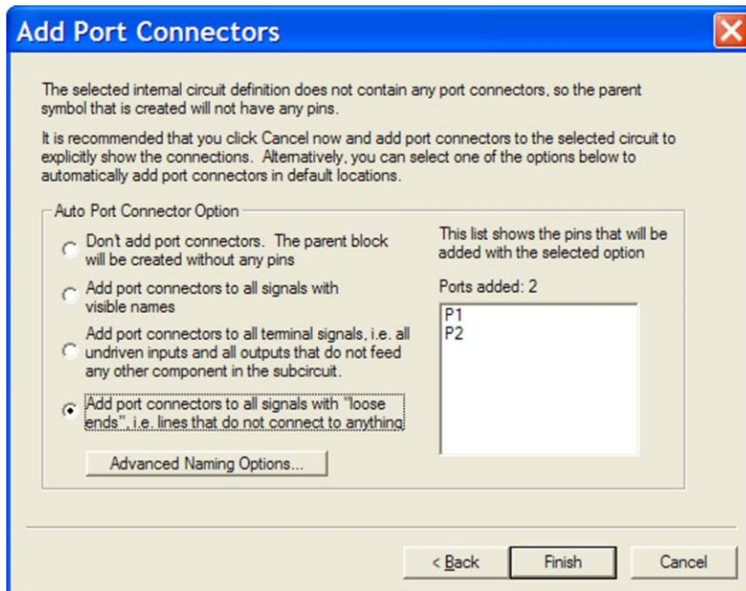


Figura 61 Schermata per la scelta del numero di porte da assegnare al sottocircuito

metodo più semplice di creazione di un sottocircuito consiste nel selezionare la parte del modello da confinare e selezionare dal menu in alto "Options>Subcircuit>Create Subcircuit Block". Se i connettori del sottocircuito non sono posti prima di utilizzare questo comando, allora EMTP-RV suggerisce in automatico le porte da inserire, attraverso le opzioni "Add port connectors to all signals with visible names"

(Aggiungi i connettori di porta a tutti i segnali con nomi visibili) o "Add port connectors to all signals with loose ends" (Aggiungi i connettori di porta a tutti i segnali con estremità sciolte).

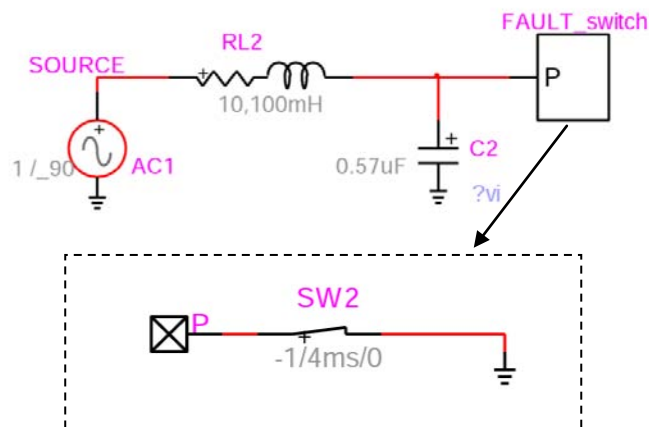


Figura 62 Esempio di utilizzo di un sottocircuito

Un sottocircuito può avere zero, uno o più porte e qualsiasi tipo di pin. Il circuito superiore può contenere diversi sottocircuiti, ognuno dei quali può contenerne altri, con un numero illimitato di livelli di incapsulamento. Il simbolo predefinito usato nel momento della creazione del sottocircuito è un rettangolo dotato di tante porte quante sono quelle disponibili. Anche in questo caso il comando "Symbol Editor" può essere utilizzato per

modificarne la forma. Una volta creato, il sottocircuito può essere aperto in un foglio separato con un doppio clic sul suo simbolo. Le scorciatoie da tastiera disponibili in tal senso sono: "CTRL + SHIFT + I" (in) per entrare nel sottocircuito e "CTRL + SHIFT + U" (up) per salire al livello precedente.

La prima volta che viene creato un sottocircuito, questo risulta bloccato. Per apportare modifiche sono disponibili due metodi per lo sblocco: attraverso il menu "Circuito Info", accessibile premendo il tasto destro del mouse all'interno della pagina contenente il sottocircuito oppure spostando un oggetto del sottocircuito e accettando lo sblocco nella finestra di successiva comparsa.

Una caratteristica fondamentale che deve essere ben compresa prima di utilizzare sottoreti è la seguente. Quando un sottocircuito viene creato e poi duplicato, EMTP-RV continua a mantenere solo una copia del suo circuito interno. Il che significa che tutte le modifiche all'interno di un sottocircuito si riflettono automaticamente sulle copie dello stesso. Questa proprietà è molto utile nel caso si abbia a che fare progetti molto estesi, in quanto la modifica un solo sottocircuito permette di cambiare automaticamente tutti gli altri. Se si desidera dividere una definizione di sottocircuito dall'altro, allora il sottocircuito deve essere reso unico. Questa operazione viene compiuta attraverso la selezione del menu in alto "Options>Part Type>Make Unique Type". Per una più facile individuazione delle parentele tra sottocircuiti è molto importante realizzare un feedback visivo, mostrando ad esempio il nome del sottocircuito reso unico o cambiando il suo simbolo utilizzando il comando "Symbol Editor".

Come già accennato, un sottocircuito può contenere altri sottocircuiti, che vanno a costituire un albero di sottocircuiti. Se si desidera modificare un sottocircuito multilivello per renderlo completamente staccato dal sottocircuito primitivo, è necessario modificarne tutti i livelli gerarchici. È anche possibile propagare unicità dall'alto verso il basso per un sottocircuito contenente altri sottocircuiti selezionando l'opzione "Apply to subcircuit contents" sul pannello di comando "Make

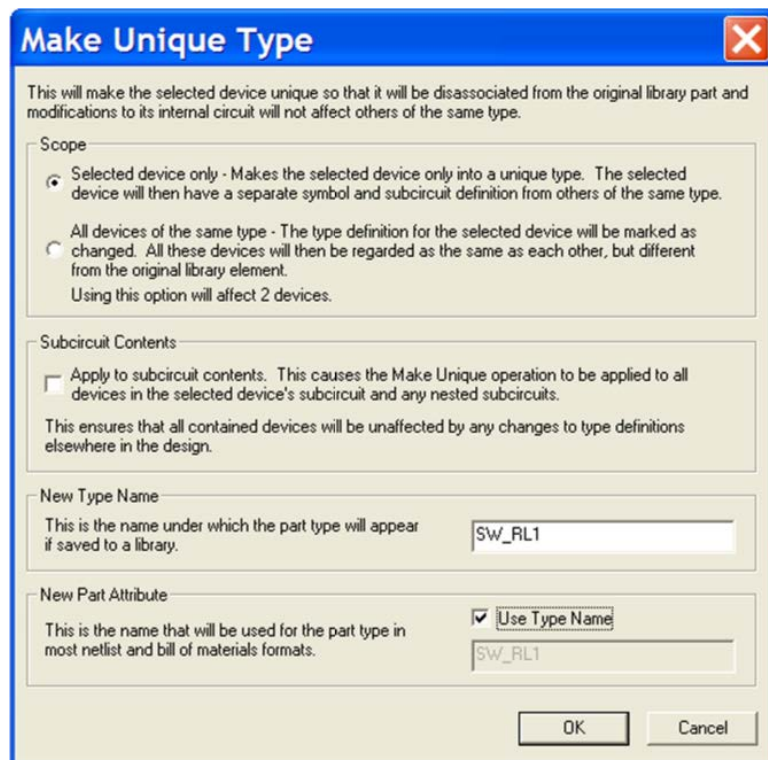


Figura 63
selezionati

Finestra per rendere indipendenti i sottocircuiti

Unique Type”.

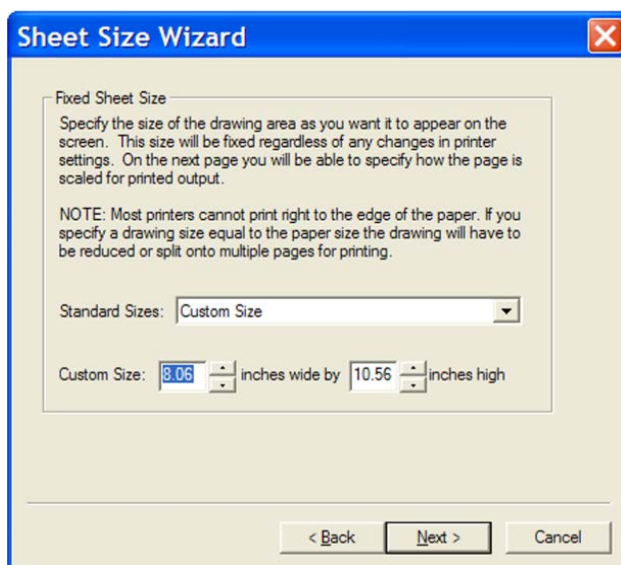


Figura 64 Finestra per modificare l'ampiezza del foglio di lavoro

Importante risulta anche poter modificare le dimensioni della pagina su cui si sta lavorando. Progetti molto estesi possono infatti richiedere molto spazio per essere meglio descritti e costruiti. Per fare questo è necessario spostarsi nel menu in alto “Drawing” e selezionare l’opzione “Sheet Size Wizard”. Il programma chiederà quindi quale pagina si vuole modificare (solo se il progetto prevede la presenza di più pagine o di sottocircuiti) e successivamente le dimensioni della pagina (sotto forma di formato di pagina o le dimensioni effettive).

Simulazioni

Una volta completata la stesura del circuito, l'utente deve selezionare le opzioni di simulazione, disponibili attraverso il menu “EMTP>Simulation Options”.

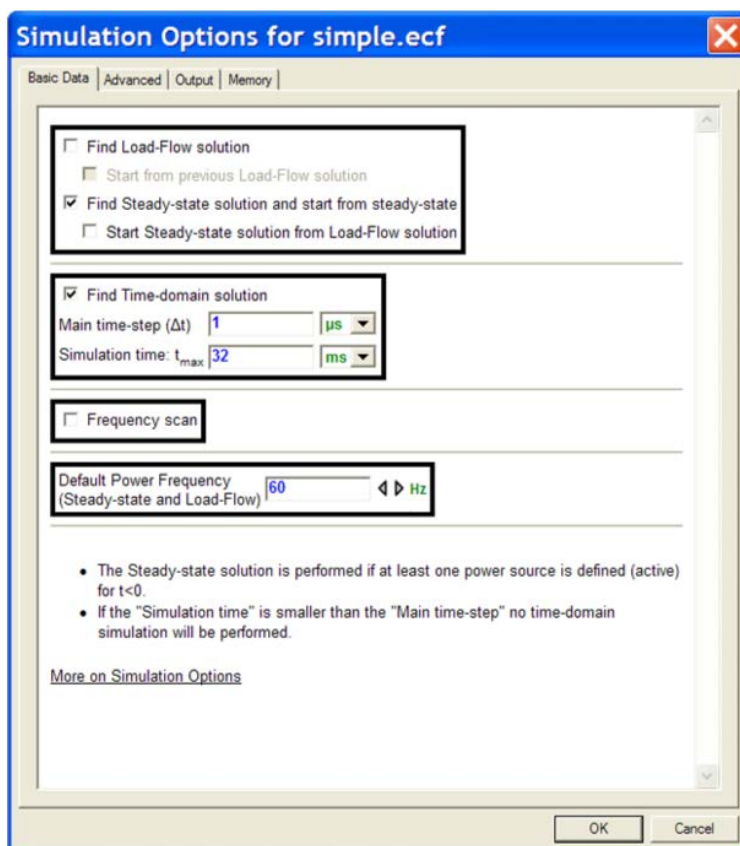


Figura 65 Finestra delle opzioni di simulazione

EMTP-RV può simulare reti elettriche (reti o circuiti di potenza) e sistemi di controllo. I sistemi di controllo sono simulati a livello di schema a blocchi e possono anche essere utilizzati in unione a dispositivi di potenza, collegandoli quindi a reti elettriche.

EMTP ha 4 possibilità di simulazione distinte: Load-Flow solution, Steady-state solution, Time-domain solution e Frequency scan solution.

Load-Flow solution permette la simulazione dei flussi di potenza della rete. Le

equazioni di rete sono risolte utilizzando i fasori complessi. I dispositivi attivi (sorgenti) sono solo i così detti dispositivi Load-Flow (LF-devices), mentre i dispositivi di carico sono utilizzati per inserire equazioni di vincolo in termini di potenza attiva e reattiva assorbita. È possibile eseguire uno studio dei flussi di potenza solo in relazione a un'unica frequenza fondamentale, specificata nell'opzione "Default Power Frequency". La rete in esame può risultare multifase e squilibrata e nella soluzione i dispositivi del sistema di controllo sono scollegati e non risolti. Una volta risolta la rete, il programma crea un file di risultati (Load-Flow solution data file), che può essere caricato, attraverso la spunta dell'opzione "Start from previous Load-Flow solution" per riavviare lo studio dei flussi di potenza da una precedente soluzione. Questa opzione non è utile quando la soluzione viene trovata senza problemi di convergenza e il numero di iterazioni è basso. Essa però può contribuire a ridurre il numero di iterazioni quando si cerca di migliorare la tolleranza di convergenza o di fornire condizioni iniziali migliori per casi complessi.

Steady-state solution permette di eseguire una simulazione a regime permanente della rete. Le equazioni sono risolte utilizzando fasori complessi e tutti i dispositivi sono forniti di un modello di circuito a parametri concentrati. Questa opzione di simulazione può essere usata per un effettivo studio a regime del sistema o per inizializzare una successiva soluzione nel dominio del tempo. I dispositivi del sistema di controllo sono scollegati e non risolti, mentre alcuni dispositivi non lineari sono linearizzati o scollegati. Il diverso comportamento dei dispositivi viene descritto nelle apposite sezioni di "Help" di ciascun oggetto. La soluzione viene raggiunta se è presente almeno un dispositivo di sorgente di alimentazione caratterizzato da un tempo di avvio (activation time) inferiore a 0. Anche in questo caso può essere utilizzata l'opzione "Start from previous Load-Flow solution" per inizializzare la soluzione a regime da una precedente soluzione di uno studio dei flussi di potenza.

Time-domain solution consente di ottenere una soluzione della rete nel dominio del tempo. La rete elettrica e le equazioni del sistema di controllo sono risolte utilizzando una tecnica di integrazione numerica, che prevede che tutti i dispositivi non lineari siano risolti in contemporanea con le equazioni di rete. Per la simulazione nel dominio del tempo può essere utilizzata la stessa rete dell'analisi dei flussi di potenza. La soluzione può eventualmente iniziare da una soluzione ottenuta con un'analisi in regime stazionario per l'inizializzazione delle variabili di rete, consentendo di raggiungere velocemente condizioni di regime nelle forme d'onda nel dominio del tempo. Le soluzioni del regime stazionario forniscono in questo senso le condizioni per l'istante iniziale della simulazione ($t = 0$). In alternativa l'utente può inizializzare manualmente il valore iniziale delle variabili di stato, se diverso da quello impostato di default.

Frequency scan solution permette di eseguire l'analisi armonica della rete in esame. L'utente deve specificare l'intervallo di frequenze tra cui eseguire l'esame, definendo anche il passo tra due frequenze successive. Il programma esegue poi la soluzione a regime permanente per ogni frequenza.

Grafici e Scope

Per visualizzare le forme d'onda di interesse, è necessario, prima di eseguire la simulazione, specificare quali grafici devono essere salvati. Esistono in questo senso due opzioni: la prima riguarda la visualizzazione delle grandezze interne a un oggetto del circuito (ad esempio la tensione ai capi di una resistenza), la seconda invece quella relativa a grandezze presenti in un collegamento (ad esempio la differenza di potenziale tra una connessione e la terra). Nel primo caso è sufficiente fare doppio clic sull'oggetto, selezionare la scheda "Scope", e spuntare la grandezza che si vuole salvare (corrente, tensione o potenza). Nel secondo caso, bisogna utilizzare degli oggetti particolari, contenuti nella libreria "meters.clf". I più importanti in questo senso sono: "I scope and observe", che, posto nel collegamento tra due oggetti, permette di visualizzare la forma d'onda di corrente, "v scope (1 pin)" che, connesso a un collegamento, permette di salvare la forma d'onda di tensione verso terra e "v scope (2 pins)" che, connesso tra due collegamenti, permette di visualizzare l'andamento della differenza di potenziale tra i due punti. La registrazione della forma d'onda è attiva per tutta la durata della simulazione e non è possibile memorizzare solo un intervallo più breve. La visualizzazione delle forma d'onda viene fatta attraverso un programma interno a EMTP-RV; MPLOT. Per accedervi è sufficiente, una volta terminata la simulazione, cliccare col tasto destro sul foglio di lavoro e selezionare l'opzione "mplot". Si aprirà quindi una schermata, in cui è

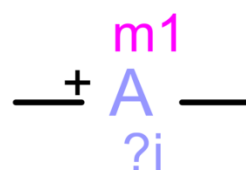


Figura 67 Oggetto "I scope and observe"

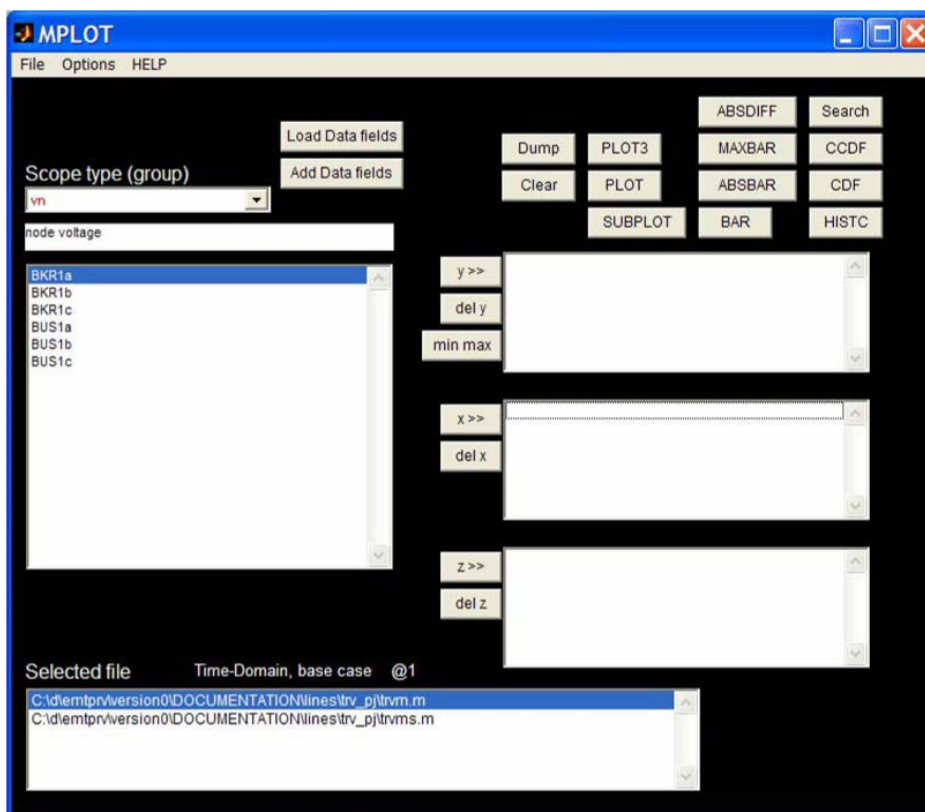


Figura 66 Finestra principale di "MPLOT"

possibile scegliere la tipologia di forma d'onda da visualizzare (tensione, corrente, ecc.) e il nome dell'oggetto corrispondente. Per riprodurre una grandezza è quindi sufficiente selezionarla a sinistra, cliccare sul pulsante "y>>" (apparirà allora il nome anche nella casella a destra) e cliccare sul pulsante "PLOT" (l'asse delle ascisse è l'asse temporale di default). È possibile selezionare più di una forma d'onda contemporaneamente ed eseguire grafici tridimensionali, inserendo anche una grandezza nella casella relativa all'asse z e cliccando sul pulsante "PLOT3". In alto a destra sono disponibili una serie di tasti, che permettono di eseguire delle operazioni particolari quali grafici a barre, distribuzioni del massimo dei valori delle grandezze da graficare, ecc. Risulta inoltre molto utile la possibilità di esportare direttamente il file di dati contenuto nel programma in formato ".mat", leggibile attraverso il software Matlab®, oppure in formato di testo. In questo modo è possibile eseguire un'elaborazione dei risultati con software dedicati, superando molte difficoltà relative a un'evoluzione di "mplot" non troppo spinta. È utile subito sottolineare che il software non riesce a leggere file di dati troppo grandi (la dimensione massima è circa 700 Mb). Nel caso di elevati tempi di simulazione è necessario quindi salvare solo le forme d'onda strettamente necessarie, altrimenti si rischia che i risultati siano completamente inutilizzabili.

Script

EMTP-RV supporta la lettura di script (serie di istruzioni particolari per far eseguire in modo automatico alcune procedure) in quanto è un'applicazione orientata agli oggetti. Lo scripting permette di personalizzare il progetto in tutti i suoi aspetti; dalla gestione dei dati di tutti i dispositivi fino alla manipolazione delle opzioni di progetto. Ci sono due linguaggi di scripting utilizzati in EMTP-RV: un esclusivo "Report Script" ("Export Lingua Script") e "JavaScript" con estensioni EMTP-RV. Soprattutto il secondo linguaggio risulta molto utile in quanto Javascript (chiamato anche Jscript) è disponibile su tutti i computer. Per chiamare ed eseguire uno script è possibile associare il file contenente lo stesso all'attributo Script.Open.Dev di un dispositivo e lo script viene lanciato quando viene fatto doppio clic sul dispositivo. In alternativa è possibile selezionare lo script da eseguire, attraverso il menu in alto "Design>Utilities>Run a Script".

I principali oggetti contenuti nell'estensione del linguaggio "Jscript" di EMTP-RV sono i seguenti:

- **DWCircuit**: rappresenta un circuito all'interno del progetto considerato. Nei disegni semplici è presente solitamente un solo oggetto circuito, che contiene tutti gli altri elementi. Nelle strutture gerarchiche possono essere presenti invece più oggetti circuito, come ad esempio i sottocircuiti. La creazione dell'oggetto "DWCircuit" è quasi sempre il punto di partenza di tutti gli script, in quanto consente l'accesso a tutti gli elementi del circuito.

- DWDevice: rappresenta un oggetto all'interno del circuito considerato. Sono disponibili una gran varietà di metodi per la variazione e la lettura degli attributi dei dispositivi.
- DWSignal: rappresenta un generico segnale all'interno del circuito. Non può essere creato direttamente, ma solo attraverso altri metodi di oggetti come DWPin.signal.
- DWPin: rappresenta una generica porta di un oggetto all'interno del circuito. Viene utilizzato quando si vogliono avere informazioni sullo stato della porta, come il nome del segnale collegato o il tipo di connessione.
- DWStatic: è un oggetto statico che consente di usare metodi generali per l'accesso a informazioni riguardanti l'intero progetto.

Agli oggetti appena elencati, sono associati dei metodi che ne permettono la lettura e la variazione dei parametri caratteristici. Si riportano in tabella i metodi più comuni e utili in fase di creazione di uno script.

Tabella 19 Elenco dei metodi più utili per la creazione di script, suddivisi per oggetto

Oggetto	Metodi
DWCircuit	<p>devices: restituisce un array contenente gli oggetti presenti nel circuito</p> <p>pins: restituisce un array contenente le porte presenti nel circuito</p> <p>signals: restituisce un array contenente le connessioni presenti nel circuito</p> <p>findByLocator: ricerca un qualsiasi oggetto all'interno del circuito che corrisponda alla stringa di ricerca inserita</p>
DWDevice	<p>getAttribute: restituisce il valore di un attributo dell'oggetto</p> <p>isUnique: restituisce "vero" se il dispositivo non presenta copie all'interno del circuito considerato, altrimenti "falso"</p> <p>makeUnique: rende indipendente l'oggetto da eventuali sue copie primitive</p> <p>numPins: restituisce il numero di porte dell'oggetto</p> <p>objType: restituisce una stringa contenente il nome dell'oggetto</p> <p>pins: restituisce un array contenente le porte dell'oggetto</p> <p>setAttribute: consente di modificare un attributo dell'oggetto</p> <p>subCircuit: restituisce un oggetto DWCircuit che rappresenta il sottocircuito dell'oggetto</p>
DWSignal	<p>circuit: restituisce il nome del circuito in cui è contenuto il segnale</p> <p>getAttribute: restituisce il valore di un attributo dell'oggetto</p> <p>setAttribute: consente di modificare un attributo dell'oggetto</p>
DWPin	<p>name: restituisce il nome della porta</p> <p>signal: restituisce il nome dei segnali a cui è collegata la porta</p> <p>pinNum: restituisce o modifica il numero della porta</p>
DWStatic	<p>currentCircuit: restituisce un oggetto "DWCircuit" contenente il riferimento al circuito attualmente selezionato</p>

Senza entrare nel dettaglio del linguaggio di programmazione "Jscript", si riporta di seguito un semplice esempio di uno script in grado di rendere visibili tutti i nomi dei segnali presenti nel progetto.

```
var cct=currentCircuit();
var all_sigs=cct.signals(1); //all selected signals in the current circuit
```

```
/*Show the name
if (all_sigs.length > 0){
    for (i=0; i < all_sigs.length; i++){
        all_sigs[i].setAttributeVis("Name", true)
    }
} else{
    alert('No selected signals');
}
```

La prima riga del codice ha la funzione di inizializzare la variabile *cct* e, attraverso il metodo *currentCircuit()*, farla diventare un oggetto *DWCircuit*, rappresentante il circuito selezionato. La seconda riga inizializza l'array *all_sigs*, assegnandoli tutti i segnali del circuito considerato. Il comando *if* controlla che l'array di segnali non sia vuoto, e in caso positivo, un ciclo *for* seleziona man mano tutti i segnali e rende l'attributo "*Name*" visibile. Nel caso in cui il circuito selezionato sia privo di segnali, viene mandato un segnale di errore '*No selected signals*'.

Una volta descritto sommariamente le funzionalità del software in uso, si vuole descrivere in dettaglio la procedura di costruzione del modello sopra descritto.

6. La costruzione dei modelli

Con le caratteristiche delle parti dell'impianto sopra elencate, si vogliono sviluppare due modelli differenti relativi allo stato attuale; il primo caratterizzato da due SSE alimentate da una sola linea primaria in doppia terna, il secondo invece provvisto di tre SSE alimentate da due connessioni con la rete industriale in AT. Verrà sviluppato prima il modello più semplice e successivamente quello più completo.

6.1. Costruzione delle parti dell'impianto

Si vuole ora descrivere nel dettaglio i particolari costruttivi dei modelli utilizzati per le simulazioni. La descrizione delle parti seguirà il flusso di potenza, partendo quindi dall'alimentazione delle linee primarie, fino alle caratteristiche della linea di contatto. Verrà esaminata dapprima la costruzione delle varie parti dell'impianto, per poi passare alle caratteristiche peculiari dei modelli utilizzati nelle simulazioni di tipo statico e di tipo dinamico che si vorranno effettuare.

6.1.1. Rete di alimentazione

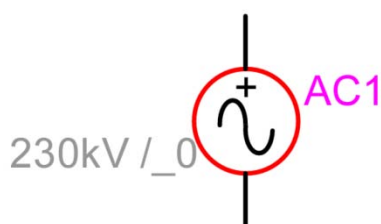


Figura 68 Oggetto "V ac"

Dato che si è supposta una potenza di corto circuito della rete di alimentazione delle linee primarie infinita, l'alimentazione può essere modellizzata attraverso dei generatori di tensione ideale trifase. Questi oggetti sono presenti direttamente nella libreria e consentono di impostare una tensione di alimentazione in termini di valore massimo, di valore efficace, ecc. Bisogna però porre grande attenzione, in quanto il software non richiede il valore della tensione concatenata, bensì

quello della tensione stellata. Il valore da inserire risulta quindi essere 76.210 kV per ogni fase. Nel modello a 2 SSE è quindi stata sistemata una sola alimentazione, mentre nel modello a 3 SSE, le alimentazioni sono due, rendendo più simmetrico il sistema.

6.1.2. Linee primarie

Per la costruzione delle linee primarie, è necessario introdurre le varie tipologie di linee disponibili all'interno del programma. Una qualsiasi linea aerea può essere, infatti, modellizzata attraverso i seguenti dispositivi: CP-line, FD-line e WB-line. Senza entrare nei dettagli, la CP-line (Costant Parameter Line) rappresenta il classico modello di una linea a parametri distribuiti, dove non si considera la dipendenza dei parametri della linea



Figura 69 Oggetto "FD-line" trifase

dalla frequenza. La FD-line (Frequency Dependent Line) risulta più accurata, in quanto tiene conto anche della dipendenza dalla frequenza delle componenti longitudinali resistiva e reattiva della linea. Infine la WB-line (Wideband Line) rappresenta il modello più sofisticato di modellizzazione di una linea, in quanto considera la completa dipendenza dalla frequenza di tutti i parametri. Di questi oggetti esistono versioni monofasi, trifasi e polifasi, ma tutti riconducibili allo stesso schema di funzionamento.

Qualunque tipo di modello si voglia utilizzare, l’inserimento delle caratteristiche della linea viene fatto attraverso un oggetto diverso: il “Line Data”. Questo permette di scegliere la tipologia di modello di linea che si vuole creare e, una volta inserite le caratteristiche, produce un file che può essere caricato all’interno dei tipi di linea visti prima. Facendo doppio clic sull’oggetto “Line Data”, si accede alle opzioni di inserimento dati. È necessario quindi inserire solo le caratteristiche geometriche ed elettriche della linea e il programma poi penserà alla creazione del modello vero e proprio. Il numero di opzioni disponibili è veramente grande, quindi si riportano di seguito solo quelle ritenute fondamentali. Nella prima scheda (“Data”), la casella “Module” consente di scegliere se si vuole creare un vero e proprio modello di linea oppure le matrici di resistenza, induttanza e capacità relative alla configurazione di conduttori in esame. È necessario quindi indicare il numero di conduttori che costituiscono la linea (comprese le eventuali funi di guardia) e le loro caratteristiche. Nella tabella, la colonna “Wire” è riservata al numero del conduttore, mentre nella colonna “Phase Number” viene indicata la fase del conduttore. Due conduttori con la stessa fase sono visti come in parallelo tra di loro e la fase 0 è riservata ai conduttori di terra, quando questi non devono essere considerati separatamente. Nelle altre colonne è necessario inserire: la resistenza chilometrica, il diametro esterno del conduttore, la distanza orizzontale rispetto a un riferimento comune e l’altezza del conduttore rispettivamente sul traliccio e a metà campata. È poi necessario specificare la tipologia di correzione per

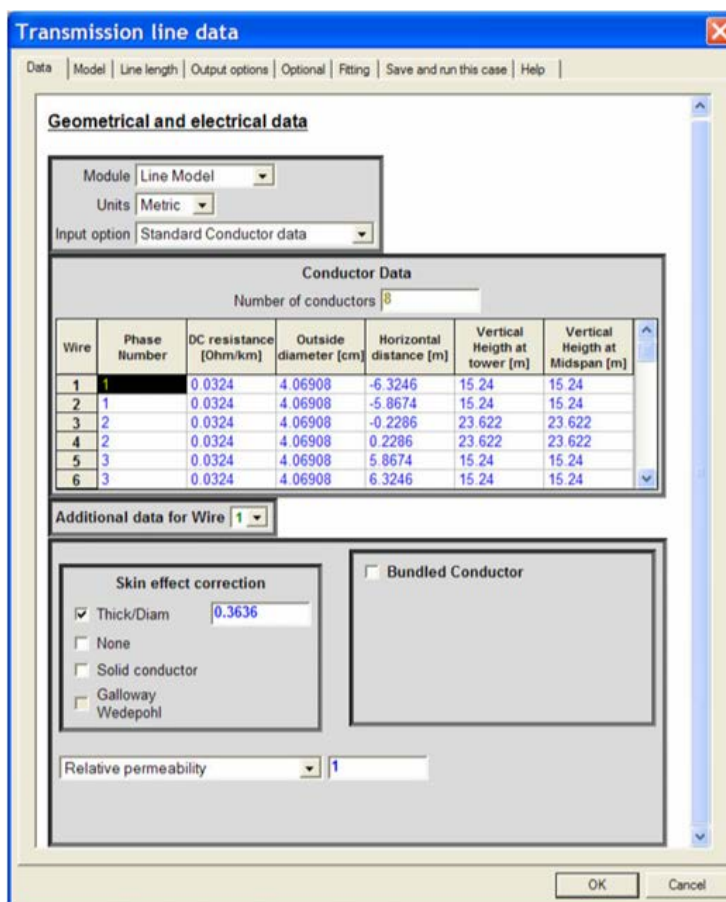


Figura 70

Schermata di scelta delle opzioni dell’oggetto “Line Data”

tenere conto della presenza dell'effetto pelle (Skin effect correction) che si vuole utilizzare e indicare se il conduttore è suddiviso in più sottoconduttori (Bundled conductor) o meno. La scheda "Model" consente di indicare la tipologia di modello che si vuole creare. Oltre a quelli già visti (FD, CP WB), permette di creare anche un modello Exact-PI, che costituisce una rappresentazione a π esatta della linea utilizzabile però solo nel dominio della frequenza. Infine nella scheda "Line length" è necessario indicare la lunghezza della linea. Una volta completato l'inserimento dei dati occorre spostarsi sulla scheda "Save and run this case", indicare il nome con cui si vuole salvare il file contenente il modello della linea, e premere il pulsante "Save and Run". Nella stessa cartella di lavoro contenente il progetto su cui si sta lavorando apparirà quindi un file ".pun", che può essere caricato dalla scheda delle opzioni di uno dei modelli di linea presenti nel programma.

Per la costruzione del modello delle linee primarie si è fatta la scelta di utilizzare l'oggetto FD-line al posto di WB-line in quanto meno pesante dal punto di vista computazionale e comunque abbastanza preciso, dato che il contenuto armonico nelle tensioni risulta poco rilevante. Per la doppia terna, ai 6 conduttori di fase sono stati assegnati altrettanti numeri diversi, in modo tale che le due terne di tensioni risultino indipendenti. Il collegamento tra i generatori e le linee è stato poi realizzato attraverso un "3-phase bus".

6.1.3. Sottostazioni elettriche

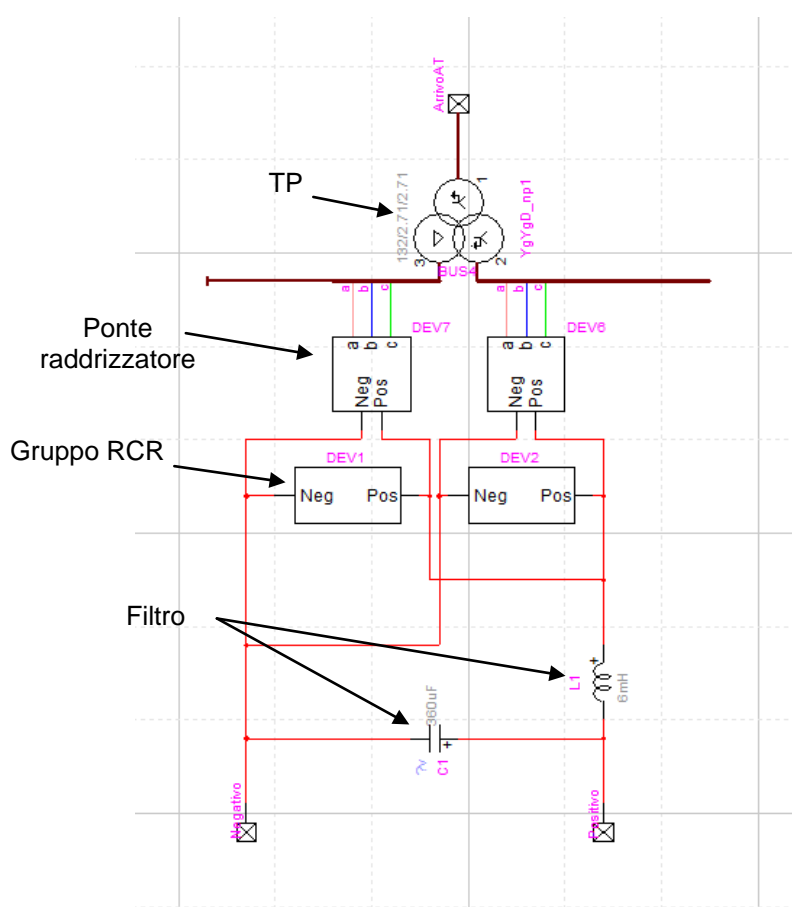


Figura 71 Struttura di un gruppo di conversione costruito con EMTP-RV

Una volta create le linee primarie si è passati alla realizzazione delle Sottostazioni Elettriche. Sono stati modellizzati in questo caso solo le componenti fondamentali, tralasciando gli elementi di collegamento. Il collegamento alle linee primarie viene sempre effettuato attraverso un "3-phase bus", connesso a sua volta direttamente a un sottocircuito che rappresenta un gruppo di conversione. Accedendovi, il primo dispositivo che si incontra è il trasformatore abbassatore.

All'interno del programma esiste già un oggetto che rappresenta il modello di un trasformatore a tre avvolgimenti con primario a stella e secondari a triangolo - stella. I collegamenti a stella del modello sono però connessi direttamente a terra, cosa che non è verificata nel trasformatore

attualmente adottato nelle SSE. È necessario per prima cosa modificare questo particolare, in quanto rischia di compromettere i risultati delle simulazioni. Per farlo, è sufficiente cliccare col tasto destro sul dispositivo, selezionare l'opzione "Properties", e spuntare l'opzione "Lock opening subcircuit". È quindi possibile rendere visibile il sottocircuito interno al trasformatore. Per eliminare le messe a terra degli avvolgimenti è quindi sufficiente, dopo aver reso possibile la modificazione del circuito, eliminare gli oggetti "massa" presenti nel circuito. Bisogna inserire poi, nella scheda delle

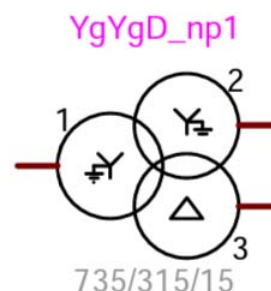


Figura 72 Oggetto "3 windings transformer"

proprietà, le caratteristiche del trasformatore. In particolare il programma richiede l'inserimento delle potenze nominali, delle tensioni nominali (il valore efficace della tensione concatenata) e dei valori dei parametri induttivi e reattivi di tutti e tre gli avvolgimenti. Bisogna prestare particolare attenzione a questi ultimi dati, in quanto bisogna ricordare che, nella determinazione dei valori di resistenza e induttanza degli avvolgimenti, si fa sempre riferimento a un trasformatore trifase con avvolgimenti collegati a stella. Per questo motivo i valori dei parametri dell'avvolgimento a triangolo devono essere moltiplicati per 3. È possibile scegliere se inserire direttamente il valore di resistenza e induttanza di ogni avvolgimento ($R_1, X_1, R_2, X_2, R_3, X_3$) espressi in Ω oppure i valori di $R_{12}, X_{12}, R_{23}, X_{23}, R_{13}, X_{13}$ espressi in pu. Per la conversione dell'espressione dei parametri in per unità a quella relativa ai singoli avvolgimenti, bisogna introdurre le seguenti grandezze:

S_{base} = potenza base del trasformatore

S_{b1}, S_{b2}, S_{b3} = potenze nominali degli avvolgimenti (primario, secondario e terziario)

V_{b1}, V_{b2}, V_{b3} = tensioni nominali degli avvolgimenti

Z_{b1}, Z_{b2}, Z_{b3} = impedenze basi dei singoli avvolgimenti

Ponendo

$$S_{base} = S_{b1}$$

$$Z_{b1} = \frac{V_{b1}^2}{S_{base}}$$

$$Z_{b2} = \frac{V_{b2}^2}{S_{base}}$$

$$Z_{b3} = \frac{V_{b3}^2}{S_{base}}$$

[27]

la determinazione dei parametri voluti segue le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{1}{2} \left[\frac{R_{12}}{S_{b1}} + \frac{R_{13}}{S_{b2}} - \frac{R_{23}}{S_{b3}} \right] \cdot S_{base} \cdot Z_{b1} \\
 R_2 &= \frac{1}{2} \left[\frac{R_{12}}{S_{b1}} - \frac{R_{13}}{S_{b2}} + \frac{R_{23}}{S_{b3}} \right] \cdot S_{base} \cdot Z_{b2} \\
 R_3 &= \frac{3}{2} \left[-\frac{R_{12}}{S_{b1}} + \frac{R_{13}}{S_{b2}} + \frac{R_{23}}{S_{b3}} \right] \cdot S_{base} \cdot Z_{b3} \\
 X_1 &= \frac{1}{2} \left[\frac{X_{12}}{S_{b1}} + \frac{X_{13}}{S_{b2}} - \frac{X_{23}}{S_{b3}} \right] \cdot S_{base} \cdot Z_{b1} \\
 X_2 &= \frac{1}{2} \left[\frac{X_{12}}{S_{b1}} - \frac{X_{13}}{S_{b2}} + \frac{X_{23}}{S_{b3}} \right] \cdot S_{base} \cdot Z_{b2} \\
 X_3 &= \frac{1}{2} \left[-\frac{X_{12}}{S_{b1}} + \frac{X_{13}}{S_{b2}} + \frac{X_{23}}{S_{b3}} \right] \cdot S_{base} \cdot Z_{b3}
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

È inoltre possibile considerare il ramo di magnetizzazione del circuito, inserendo il valore di una resistenza di magnetizzazione (che modella le perdite a vuoto del trafo), e un'induttanza non lineare, espressa in termini di corrente di magnetizzazione – flusso di magnetizzazione. Nella scheda “IC” è poi possibile inserire il valore iniziale dei flussi dei tre avvolgimenti, se questi sono diversi da zero. Data la mancanza di dati relativi alle prove a vuoto del trasformatore e della caratteristica non lineare di magnetizzazione, si è preferito non considerare la presenza del ramo trasversale del trafo.

Da notare che, anche se si inseriscono nel circuito più di un trasformatore dello stesso tipo, il programma memorizza una sola copia interna del sottocircuito relativo. Questo implica che una modifica su un solo trasformatore provoca lo stesso cambiamento su tutti gli altri. Se si desidera quindi modificare un solo trasformatore, è necessario rendere l'oggetto indipendente dagli altri attraverso il già citato comando “Options>Part Type>Make Unique Type”.

Il programma non è dotato all'interno delle sue librerie del modello di un trasformatore con variatore sotto carico (On Load Tap Changer). I trasformatori delle SSE appartengono invece a questa categoria e, per la realizzazione di un modello accurato, si sarebbe dovuto realizzare lo schema di funzionamento, andando sostanzialmente a costruire ex novo il modello del trasformatore. Si è preferito in questo caso evitare notevoli complicazioni, andando a considerare i trasformatori delle SSE con variatore sotto carico disattivato e impostato sulla sua tacca centrale.

Connesso al trasformatore è presente il ponte raddrizzatore, costruito anch'esso in forma di sottocircuito. La modellizzazione è stata fatta in modo fedele, andando a inserire tutti i componenti descritti nei capitoli precedenti. EMTP-RV è infatti dotato, all'interno della libreria "switches.clf" del modello di diodo ideale, del quale bisogna solo specificare la tensione di innesco (minima tensione da applicare affinché il diodo entri in conduzione), posta a 1 V, e la corrente inversa (corrente circolante attraverso il diodo quando è applicata una tensione inversa), considerata nulla. Per un conseguimento più rapido delle condizioni

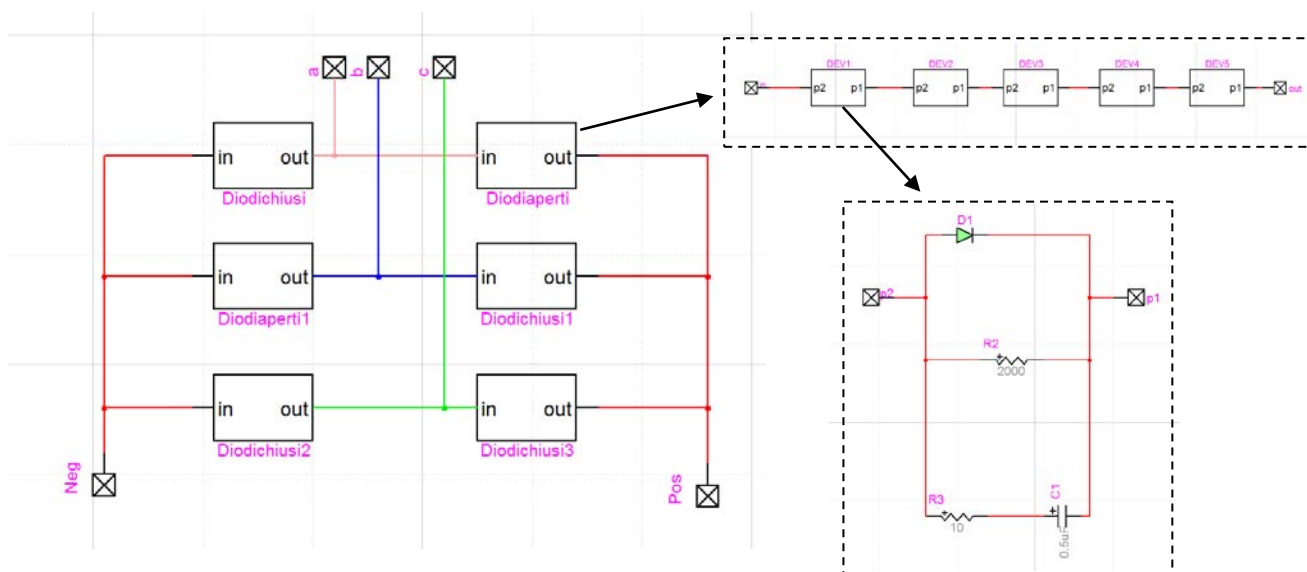


Figura 73 Sottocircuito del ponte raddrizzatore

di regime, alcuni rami sono stati considerati in conduzione nell'istante iniziale (i sottocircuiti denominati "Diodiaperti"), mentre gli altri in interdizione (i sottocircuiti denominati "Diodichiusi"). Questa opzione è disponibile nelle proprietà del diodo, spuntando o meno la casella "closed at t=0".

Come indicato in [11] e [12], i due ponti di Graetz afferenti allo stesso trasformatore sono quindi stati messi in parallelo e, a valle, è stato inserito il filtro per l'attenuazione delle armoniche. I due gruppi di conversione da 5,4 MW sono quindi stati collegati tra loro, andando a simulare la presenza della sbarra omnibus positiva.

Per la modellizzazione del collegamento della SSE alla linea di contatto, il procedimento è stato analogo a quello seguito per la realizzazione delle linee primarie. Quindi attraverso il dispositivo "Line Data", si sono inseriti tutti i dati relativi alla linea ed è stato creato il file da caricare in oggetto "FD-line" monofase.

6.1.4. Linea di contatto e circuito di ritorno

Per la creazione invece della linea di contatto, si è preferito procedere in modo completamente diverso, andandola a realizzare secondo il metodo multiconduttore, come spiegato in [13], [14] e [15]. Questo approccio prevede che tutti i conduttori vengano suddivisi in un numero di celle elementari e a ciascuna di esse si associ una rete equivalente composta da conduttanze, capacità e auto e mutue induttanze in numero

dipendente dal numero di conduttori considerati. Le celle vengono poi collegate in cascata, andando a formare il sistema di conduttori in esame. La suddivisione di una lunga tratta in segmenti elementari di lunghezza limitata giustifica l'adozione di un modello a parametri concentrati per le celle, necessario tra l'altro per valutare l'andamento delle grandezze lungo la tratta considerata e simulare con maggiore accuratezza l'effetto del carico che si muove lungo la linea.

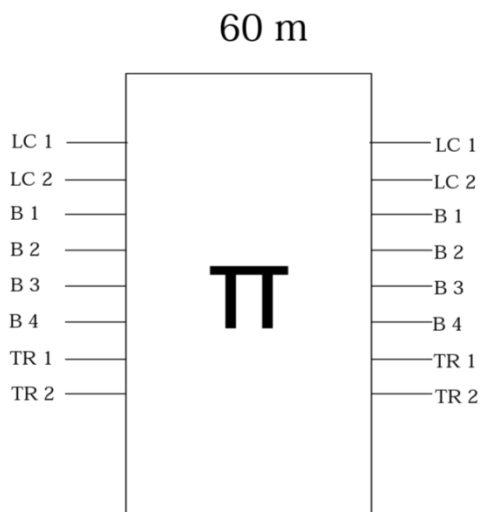


Figura 74 Schema a π equivalente di una cella componente il circuito di alimentazione ferroviaria

La cella elementare è costituita in questo caso da 8 conduttori, comprendendo, quindi, il modello entrambi i binari. La linea di contatto viene simulata come un unico conduttore di sezione equivalente, posto alla stessa altezza della linea di contatto. Le rotaie vengono considerate come 2 conduttori distinti, posti a contatto col terreno, mentre la posizione della fune di guardia rimane quella già indicata. Le celle sono state supposte di lunghezza di 60 m, al fine di avere una buona discretizzazione della linea e di simulare in modo corretto le messe a terre dei sostegni.

Rimane ora da capire come costruire il modello a π equivalente della cella attraverso EMTP-RV, senza andare a valutare in modo manuale i parametri resistivi induttivi e capacitivi, come viene spiegato invece in [16]. All'interno della libreria "RLC branches.clf" è presente l'oggetto "PI multiphase" che rappresenta un generico modello a π di un numero qualsiasi di fasi. Questo dispositivo richiede l'inserimento di tre matrici: la matrice delle resistenze, la matrice delle induttanze e la matrice delle capacità. Eventualmente è possibile inserire anche la matrice delle conduttanze trasversali, utile in questo caso se si hanno dei conduttori, come le rotaie, non isolati dal terreno.

Il modello a π equivalente presenta un numero di rami orizzontali quanti sono i conduttori presenti. Questi rami accolgono le parti resistiva e induttiva proprie del conduttore, non tralasciando però i mutui accoppiamenti tra i vari conduttori, modellizzati attraverso mutue induttanze e mutue resistenze. I rami trasversali sono invece in numero doppio rispetto ai precedenti, in quanto le capacità e le eventuali conduttanze vengono divise a metà e poste ai due lati dei rami orizzontali. Anche in questo caso vengono considerati sia la capacità e la conduttanza verso terra propria del conduttore, sia i mutui accoppiamenti capacitivi e conduttivi. Senza entrare nei

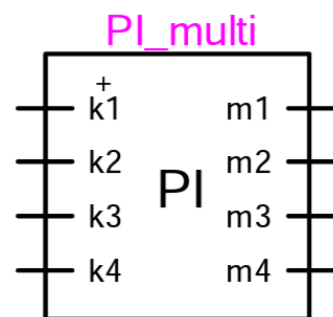


Figura 75 Oggetto "PI multiphases"

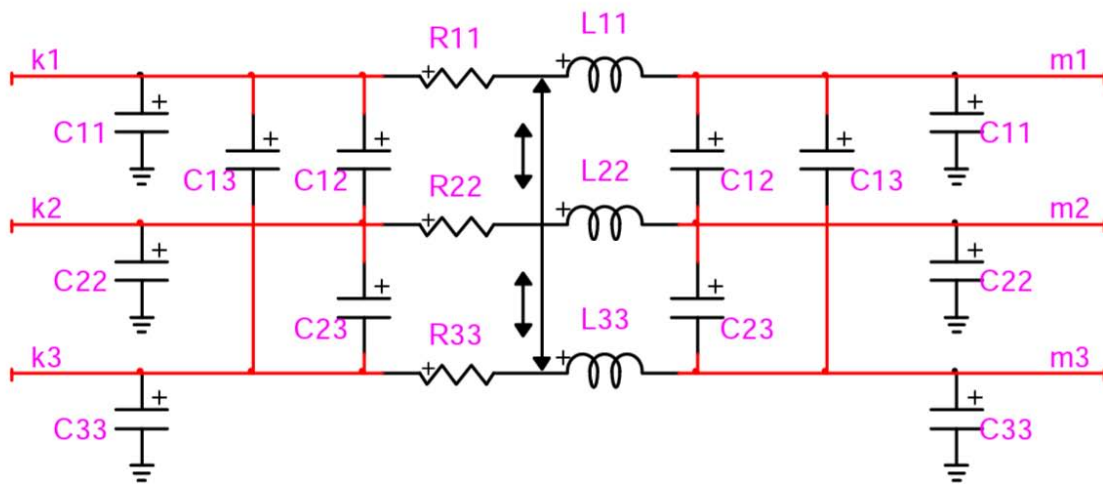


Figura 76 Circuito elettrico equivalente di una rappresentazione a π di un sistema trifase

dettagli, la matrice delle resistenze presenta sulla diagonale il valore della componente resistiva longitudinale del conduttore, mentre fuori dalla diagonale, il valore del mutuo accoppiamento resistivo tra conduttori diversi. La matrice delle induttanze presenta invece sulla diagonale il valore dell'autoinduttanza del conduttore e fuori diagonale i valori della mutua induttanza tra conduttori diversi. Queste due matrici risultano per tanto simmetriche. La matrice delle capacità presenta invece sulla diagonale la somma della capacità verso terra e delle capacità verso gli altri conduttori, mentre fuori diagonale, il valore della capacità tra due conduttori diversi, cambiata di segno. L'eventuale matrice delle conduttanze longitudinali è molto simile a quella delle capacità, presentando sulla diagonale la somma della conduttanza verso terra e verso gli altri conduttori, mentre fuori diagonale, il valore della mutua conduttanza cambiata di segno. Queste ultime due matrici vengono poi internamente divise per due, e assegnate ai due rami longitudinali del modello a π .

Nella scheda "IC" è poi possibile inserire le condizioni iniziali, se diverse da zero; in particolare la corrente iniziale per le induttanze e la tensione iniziale per le capacità (anche di valore diverso per i due rami longitudinali).

Bisogna ora capire come valutare in modo automatico i valori da inserire nelle matrici sopra descritte, senza applicare manualmente le formule di Carson o il calcolo dei coefficienti di potenziale di Maxwell. Anche in questo caso EMTP-RV è dotato degli strumenti adatti allo scopo. L'oggetto "Line Data", già visto per la creazione dei modelli delle linee primarie, è, infatti, in grado, data una configurazione qualsiasi di conduttori, di ricavarne il modello a π equivalente. Per farlo, è sufficiente aprire la scheda delle proprietà dell'oggetto "Line Data", selezionare nel campo "Module" l'opzione "Line Parameters". Una volta inseriti i dati relativi alla configurazione e alle caratteristiche elettriche dei conduttori, è necessario spostarsi sulla scheda "Save and run this case", nominare il modello che si sta creando e salvarlo. Nella cartella in cui è presente il progetto su cui si

sta lavorando, verrà creato un file dal nome prima indicato con estensione “.pun”. In questo caso non è possibile caricarlo direttamente dall’oggetto “PI multiphase”, ma è necessario elaborarlo ulteriormente. Nella libreria “option.clf” è presente un oggetto chiamato “Data converter”. Aprendolo, appare una schermata che comprende una finestra dove poter copiare i dati da convertire, una seconda più in basso dove vengono restituiti i dati modificati e in basso una serie di opzioni per scegliere la tipologia di dati da trasformare. Aprendo il file “.pun” attraverso un editor di testo e copiando interamente il file all’interno della finestra in alto, è possibile ottenere le matrici delle resistenze, induttanze e capacità del modello a π equivalente selezionando il pulsante “EMTP-V3 PI VINTAGE data”. Queste appariranno, infatti, nella finestra dedicata alla conversione dei dati. Dopo aver chiarito il numero di conduttori presenti, è quindi sufficiente copiare ogni matrice nel dispositivo “PI multiphase” per ottenere il modello a π della cella.

Si è creato in questo modo un modello a π privo di conduttanze trasversali. Queste però risultano fondamentali per una corretta modellizzazione della linea, in quanto, come già detto, le rotaie non possono essere considerate come conduttori perfettamente isolati dal terreno, al contrario invece dei conduttori aerei. È necessario quindi apportare delle modifiche al modello appena creato. Una prima soluzione trovata è stata quella di inserire delle resistenze di valore opportuno sulle fasi relative alle rotaie ai lati dell’oggetto “PI multiphase”, al fine di simulare la conduttanza verso terra dei binari. La seconda soluzione, più pratica, è stata quella di agire direttamente sulla matrice delle conduttanze interna al dispositivo stesso. È stato quindi possibile simulare non solo la conduttanza verso terra di ogni singola rotaia, ma anche la mutua conduttanza tra le rotaie di uno stesso binario. È stato tralasciato il mutuo accoppiamento conduttivo tra rotaie di binari diversi.

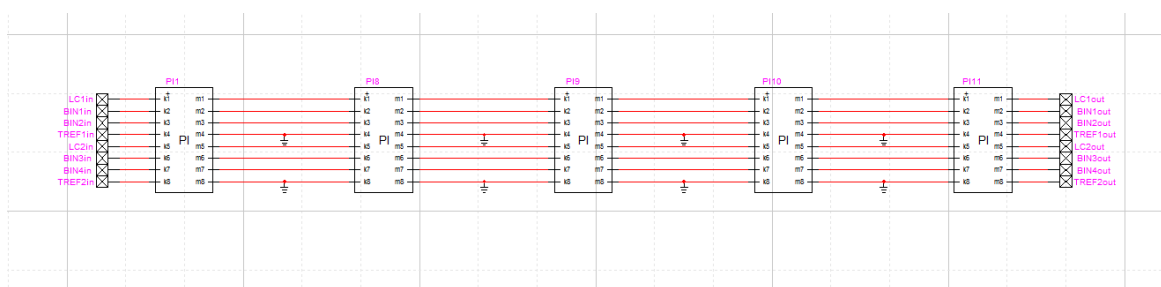


Figura 77 Vista del sottocircuito rappresentante una tratta di 300 m di lunghezza

Creato quindi il modello a π della singola cella, si è passati all’assemblaggio della linea intera, mettendo in cascata copie identiche dello stesso oggetto “PI multiphase”. Anche in questo caso si è scelto di procedere attraverso l’uso di sottocircuiti, in quanto consentono di costruire un modello più facile da gestire e più agevolmente modificabile. Sono stati, infatti, connessi in primo luogo 5 celle in cascata, posizionando su ogni collegamento delle funi di guardia la messa a terra corrispondente e l’eventuale presenza delle resistenze per la simulazione della dispersione del circuito di binario. Si è così creata una tratta di linea dalla lunghezza di 300 m, che è stata posta all’interno di un sottocircuito. Collocando quindi 5 copie di questo sottocircuito in cascata, si è realizzato un secondo sottocircuito

che rappresenta un percorso di 1500 m. Andando a ripetere la procedura si è quindi costruita una tratta di linea lunga 7500 m. Quest'ultimo passaggio ha però richiesto l'introduzione delle connessioni induttive, il cui inserimento è previsto ogni 1500 m. Anche queste sono state create attraverso un sottocircuito molto semplice, composto da 4 induttanze connesse tra loro in modo tale da formare una forma a H. Le connessioni induttive sono state poi inserite tra i sottocircuiti che rappresentano un pezzo di tratta lunga 1500 m. Infine, facendo una copia dell'ultimo sottocircuito creato (tratta lunga 7500 m), si è completata la costruzione della linea di contatto compresa tra due SSE.

6.1.5. Caratteristiche di simulazione

Nella simulazione di tipo statico, il carico è stato modellizzato come una resistenza di valore opportuno, in modo tale che la sua potenza assorbita fosse in linea con quella di un treno reale. Sono quindi stati scelti due valori di resistenza, pari rispettivamente a 1Ω e 2Ω , dissipanti rispettivamente circa 9 MW e 4,5 MW. I carichi sono poi stati posti sempre al centro della tratta compresa tra due SSE, per simulare il caso peggiore.

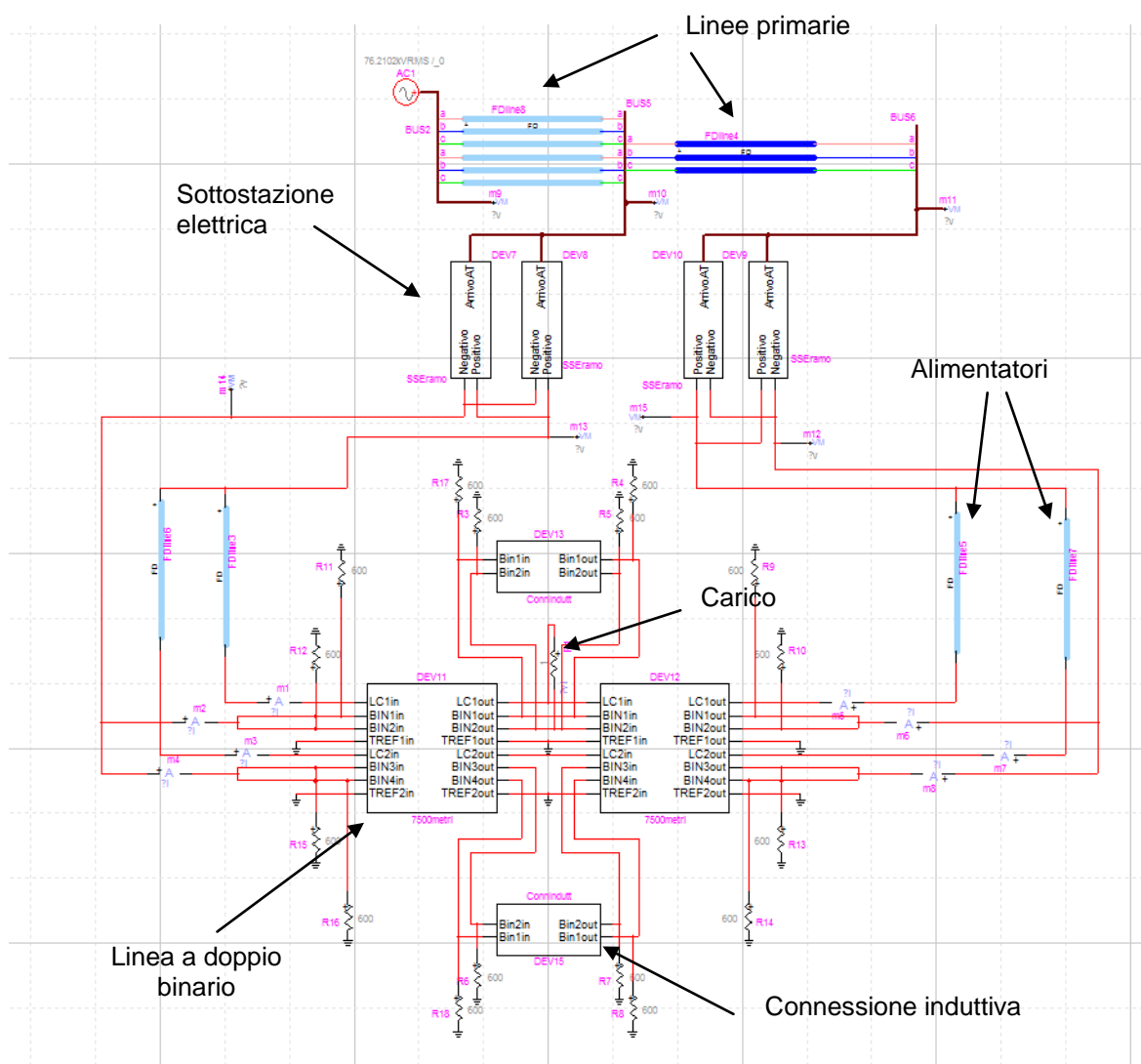


Figura 78 Modello utilizzato per le simulazioni di tipo statico comprendente due sole SSE.

La gestione delle simulazioni di tipo dinamico è stata invece più complessa. Il programma non prevede infatti la possibilità di avere un carico mobile all'interno del circuito realizzato. È stato necessario quindi escogitare un espediente che simulasse in modo fittizio il movimento di un treno lungo il binario. La soluzione trovata è stata di porre tra le varie celle lungo tutta la tratta dei generatori di corrente pilotabili. Controllandone il tempo di accensione e la corrente da erogare, è possibile infatti simulare il movimento di un treno, impostando la velocità di spostamento e il profilo di potenza che deve assorbire. È stato quindi necessario creare un sottocircuito apposito, comprendente il generatore di corrente e il relativo schema di controllo.

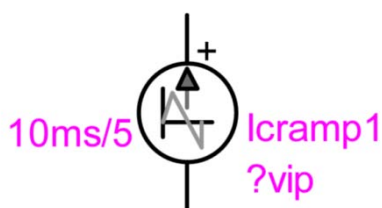


Figura 79
ramp”

Oggetto “I complex

Affinché il dispositivo assorba un determinato profilo di potenza muovendosi lungo il binario, è necessario che ogni sottocircuito abbia un proprio segnale di riferimento di corrente da assorbire. Questo viene fornito da un oggetto compreso all'interno della libreria “sources.clf”; il “I complex ramp”. Questo dispositivo è in grado di erogare un segnale di potenza a doppia rampa, della quale bisogna definire il tempo di avvio (t_{start}), il tempo di salita della rampa

(t_0), il valore di picco della corrente (I_{m0}), il tempo di discesa (t_1), la corrente da erogare all'istante t_1 (I_{m1}) e il tempo di spegnimento del dispositivo (t_{stop}). Prima del tempo di avvio e dopo il tempo di spegnimento, “I complex ramp” si comporta come un circuito aperto. Modificando ognuno di questi oggetti lungo tutta la tratta è possibile simulare in modo abbastanza preciso lo spostamento di un treno in termini di velocità e di potenza assorbita. Risulta in questo senso molto utile l'utilizzo di script appositi, che consentono di settare in modo automatico un gran numero di dispositivi diversi.

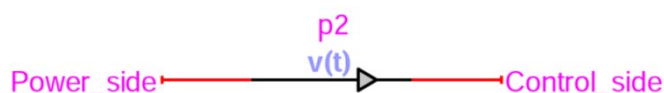


Figura 80

Oggetto “v(t) probe”

Dato che, fissato il profilo di potenza, la corrente che il carico deve assorbire dipende dalla tensione della linea di contatto, è stato necessario inserire un controllo in retroazione per il generatore di corrente pilotato. Questo si compone di due oggetti “v(t) probe”, contenuti all'interno della libreria “meters.clf”, collegati rispettivamente alla linea di contatto e a uno dei binari, in grado di trasformare un segnale di potenza (in questo caso la tensione dei due conduttori) in un segnale di controllo. Le grandezze così

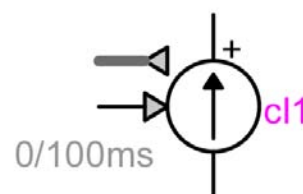


Figura 81
controller”

Oggetto “I

ottenute vengono poi sommate all'interno di un blocco logico e filtrate affinché il segnale di controllo non presenti un ripple eccessivo, che potrebbe portare all'instabilità del sistema. Il filtro utilizzato si presenta come una funzione di trasferimento, riprodotte un semplice filtro passa basso RC, con costante di tempo pari a 1s. Per ottenere il pilotaggio dei generatori di corrente, il segnale di riferimento per la potenza viene diviso per il segnale di tensione tra linea di contatto e binario prima elaborato. Dato che il dispositivo "I complex ramp" genera un segnale di potenza, è stato necessario inserire un oggetto "v(t) probe" per convertirlo in un segnale di controllo prima del suo utilizzo. Il generatore di corrente pilotato, posto ovviamente tra la linea di contatto e le rotaie, viene rappresentato come un dispositivo "I controlled", del quale bisogna definire il tempo di accensione e di spegnimento. Risulta conveniente in questo caso lasciare il dispositivo sempre acceso, in quanto l'eventuale assorbimento di corrente è già gestito dal sistema di controllo. Per non mantenere i due binari perennemente cortocircuitati tra loro, sono stati posizionati due generatori di corrente, ognuno afferente a una rotaia diversa. Per questo motivo il segnale di pilotaggio è stato diviso per due e assegnato a entrambi i generatori.

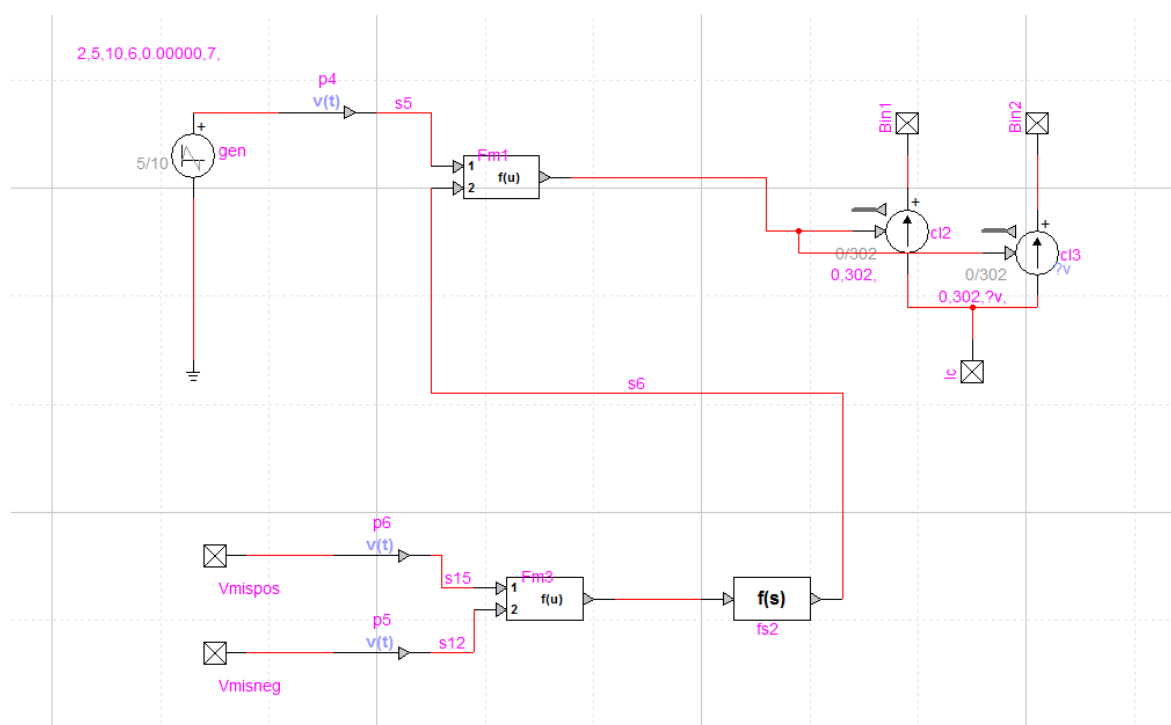


Figura 82 Struttura dell'oggetto "treno" costruito con EMTP-RV

Per ridurre il numero di dispositivi utilizzati, è stata poi elaborata una versione del sottocircuito che rappresenta il carico più semplice, dove si ha la presenza di un solo "v(t) probe", che rileva la tensione sulla linea di contatto. In questo modo il profilo di potenza assorbita non sarà più così preciso come nel caso precedente, ma con errori ancora accettabili.

La scelta di far assorbire a ogni carico un profilo di potenza triangolare è stata dettata da due ragioni fondamentali: la prima è la semplicità di controllo, la seconda è la riproduzione abbastanza fedele del profilo di potenza da assorbire lungo tutta la tratta. Il profilo triangolare permette, infatti, di approssimare la curva della potenza da assorbire con una spezzata a tratti. Per meglio capire questo concetto, basti considerare che la composizione di due rette dà come risultato ancora una retta. Quindi, accendendo il carico nel momento in cui quello precedente sta assorbendo la massima corrente, i due profili di potenza vanno a sommarsi, andando a congiungere linearmente i due massimi della potenza assorbita da due carichi attigui. Accendendo e spegnendo progressivamente tutti i generatori di corrente disposti lungo la tratta, si riesce quindi a simulare in modo abbastanza fedele il profilo di potenza assorbito dal treno mentre si sposta come sviluppo lineare dei valori massimi dei segnali triangolari.

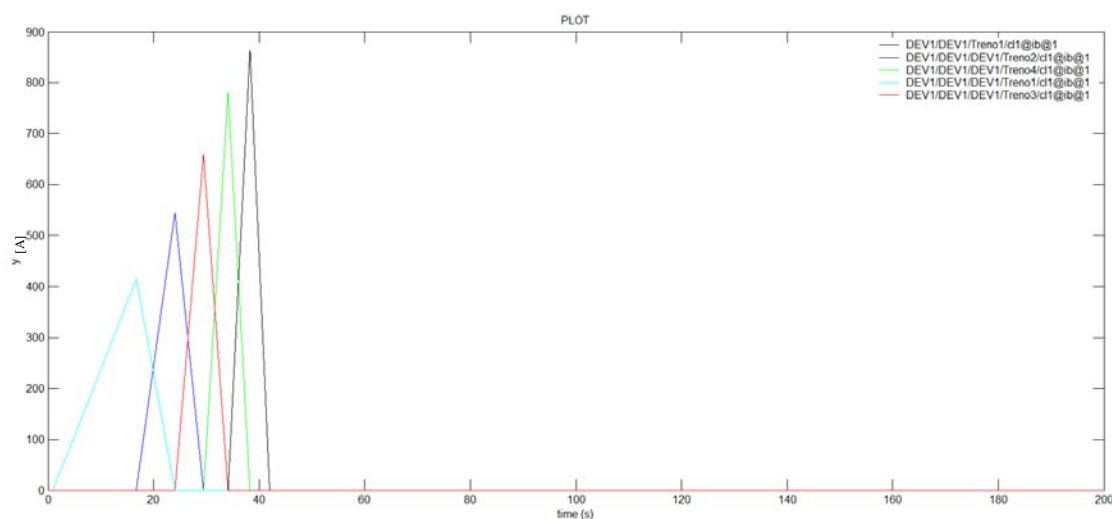


Figura 83 Correnti assorbite dai primi 5 dispositivi “treno” durante una simulazione dinamica

Si è quindi elaborato uno script per il settaggio automatico di tutti i carichi disposti lungo la tratta. Senza riportare per intero il codice utilizzato, lo script, dopo aver inizializzato tutte le variabili necessarie, legge il file contenente i dati relativi alla potenza e diagramma orario, costruendo quindi delle stringhe per il successivo settaggio dei vari generatori di corrente. Eseguendo quindi una serie di cicli per selezionare i dispositivi uno alla volta, renderli indipendenti gli uni dagli altri e impostare i valori corretti.

Nelle simulazioni in cui i carichi dinamici sono due, i treni avranno lo stesso profilo di potenza e diagramma orario, ma partiranno da posizioni opposte.

Il modello utilizzato comprende solo due SSE, in quanto lo schema più completo avrebbe richiesto un numero di dispositivi troppo elevato. La versione in uso, infatti, è dotata di una licenza accademica che prevede un numero massimo di oggetti le 5000 unità. Sarebbe stato impossibile quindi, per come si è deciso di simulare lo spostamento del carico, analizzare una tratta lunga 30 km, anche perché i tempi di simulazione sarebbero

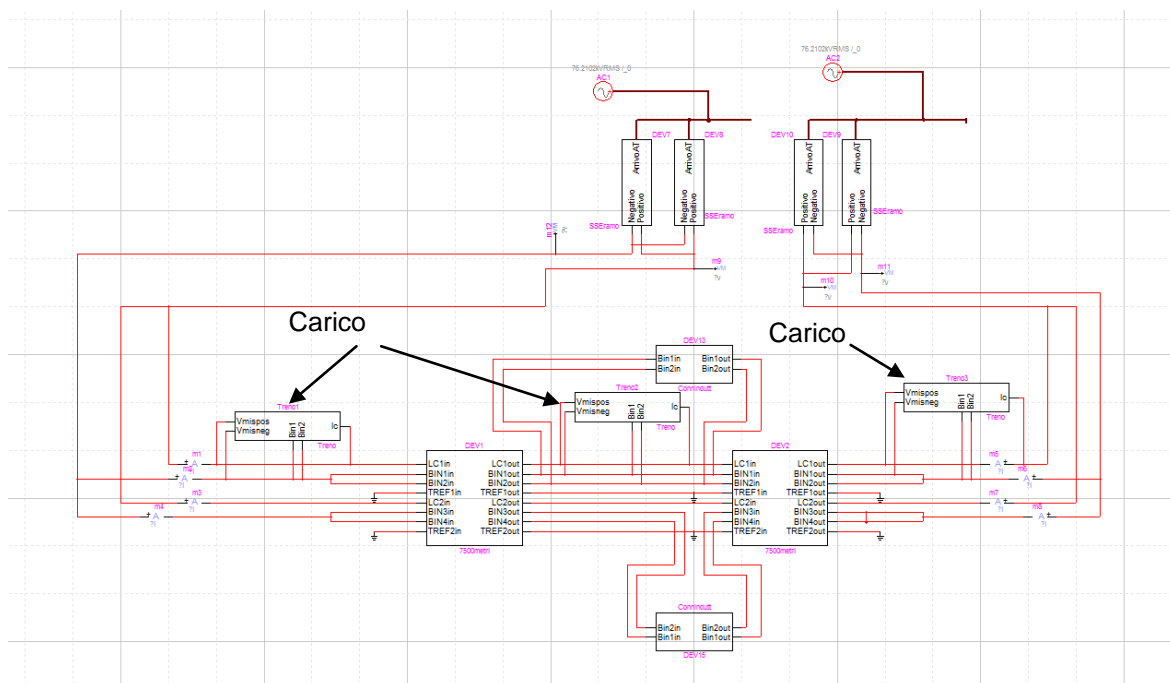


Figura 84 Modello utilizzato per le simulazioni di tipo dinamico

diventati eccessivamente lunghi. Per utilizzare un passo di integrazione abbastanza lungo, si è deciso inoltre di eliminare sia la presenza delle linee primarie, sia quella degli alimentatori. Il programma, infatti, richiede un passo di integrazione inferiore al tempo di transito di un'onda viaggiante lungo la linea considerata. Le SSE sono quindi sempre alimentate alla tensione di 132 kV concatenati, andando a perdere quindi le informazioni relative al contenuto armonico nella sezione di alta tensione del sistema ferroviario. Infine, sono state eliminate le induttanze presenti nelle connessioni induttive, in quanto potevano causare dei risultati non aderenti alla realtà, dovuti al modo con cui si è modellizzato il carico. Gli assorbimenti di corrente di tipo triangolare in corrispondenza delle induttanze possono infatti dare delle cadute di tensione sulla linea non reali, originate non tanto dalla presenza di una corrente continua nel binario, ma dalla derivata della corrente nel tempo. Dato che il carico non assorbe realmente una corrente avente quella forma, la presenza delle connessioni induttive conduceva a risultati erronei e, visto che la loro presenza non era strettamente necessaria ai fini del circuito di potenza, si è optato per una loro eliminazione, lasciando però il collegamento in parallelo dei binari.

Descritti i modelli che saranno utilizzati, si passa ora a vedere i risultati delle simulazioni eseguite.

7. Analisi di una tratta ferroviaria con alimentazione convenzionale

I modelli sviluppati hanno permesso di eseguire, come già detto, due tipi di simulazioni: statiche e dinamiche. Data la semplicità dei modelli e i tempi di simulazione ridotti, sono state eseguite in primo luogo le simulazioni del caso statico e, solo successivamente, quelle dinamiche.

Scopo della prima tipologia di simulazioni è osservare l'andamento delle forme d'onda di corrente e di tensione in varie parti dell'impianto, nel momento in cui un carico si trovi al centro della tratta interessata, ossia nel caso più sfavorevole. Inoltre la possibilità di trattare i casi più semplici con formulazioni analitiche permette di verificare la bontà del modello sviluppato attraverso il confronto dell'andamento della caduta di tensione in linea. I modelli utilizzati sono stati due: il primo prevede la presenza di due sole SSE, con alimentazione di una sola da parte della rete di trasmissione, il secondo è invece più completo, comprendendo tre SSE con doppia alimentazione dalla rete.

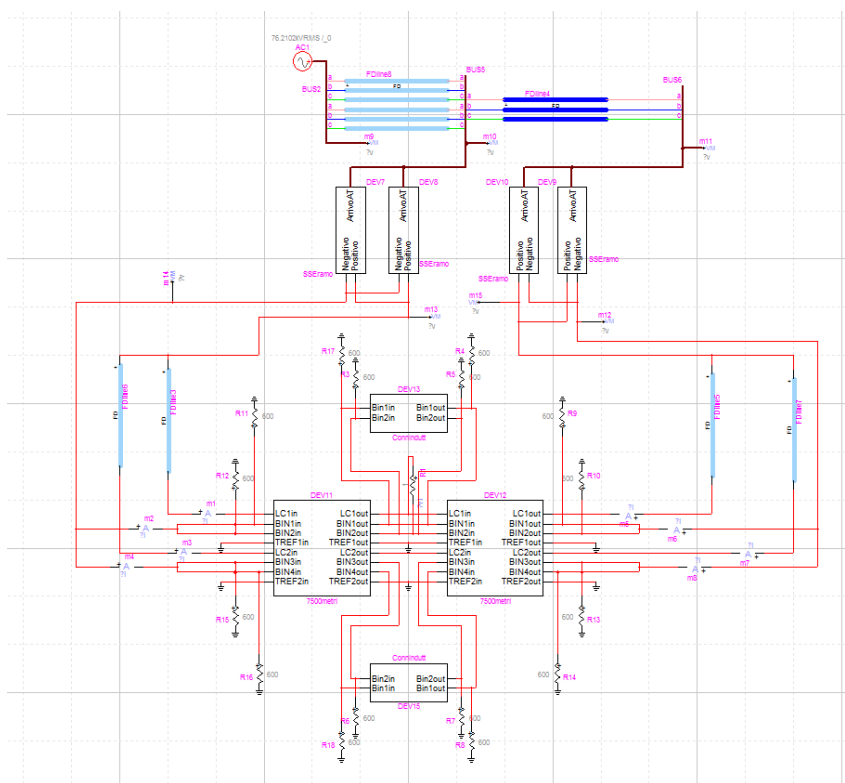


Figura 85 Modello a due sole SSE utilizzato nella simulazione di tipo statico

Il primo caso (caso A) considera la presenza di un carico a centro tratta sul primo binario, simulato attraverso una resistenza da 1Ω , denominata R1, mentre nel modello più completo (caso B), i carichi sono tre: 2 nella parte sinistra, rispettivamente da 1Ω e 2Ω (nel disegno chiamati R22 e R3), mentre solo uno nella parte destra, sempre da 1Ω (denominato R2). Il valore di resistenza di 1Ω è stato scelto in modo tale da simulare l'assorbimento di potenza di un convoglio utilizzato nel sistema Alta Velocità/ Alta

Capacità (circa 9 MW), mentre quella da 2Ω per simulare la presenza a metà tratta di un treno in grado di assorbire circa 4.5 MW.

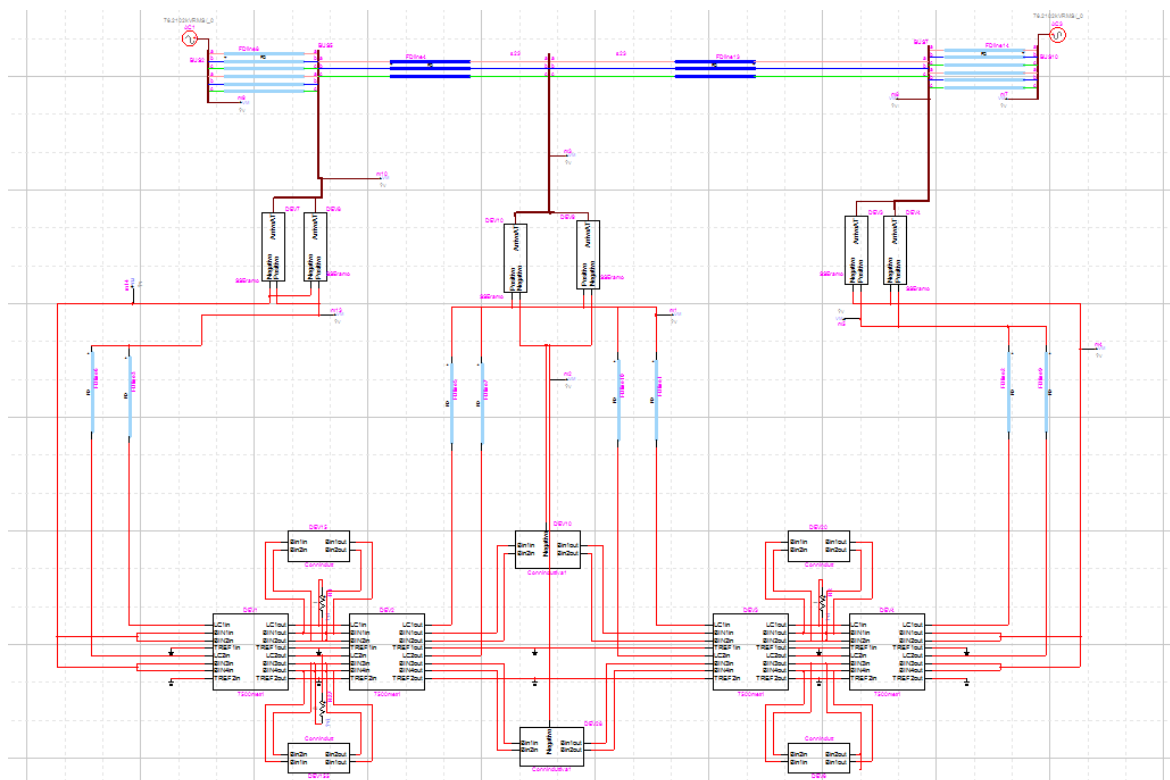


Figura 86 Modello a tre SSE utilizzato nella simulazione di tipo statico

Prima di eseguire le simulazioni si sono dovuti impostare i parametri di simulazione e in particolar modo la durata della stessa e il passo di simulazione. Il programma, infatti, non è in grado di ricavare, attraverso una simulazione “Steady-state solution”, la condizione di regime permanente per una rete che presenta sezioni in corrente alternata a 50 Hz e altre in corrente continua. È perciò necessario effettuare una simulazione “Time-domain solution” nella quale le grandezze raggiungono la condizione di regime dopo un certo intervallo di tempo. Dopo alcune prove si è notato come per il caso più semplice (2 SSE) risulta sufficiente impostare come durata della simulazione 600 ms affinché il sistema raggiunga le condizioni di regime, mentre per il caso più complesso è necessario 1 s. Come passo di integrazione si è poi impostato per entrambe uno step di $1.2 \mu\text{s}$, sufficientemente corto al fine di descrivere le forme d’onda di tensione e corrente nel modo più corretto possibile. Si è inoltre spuntata la casella “Find steady-state solution and start from steady-state” per ridurre il più possibile i tempi di simulazione.

Le forme d’onda di interesse nei due modelli utilizzati per le simulazioni statiche sono state:

- le tensioni di alimentazione delle SSE (V_{alim})
- le tensioni in uscita dalle SSE della linea di contatto (V_{pos})

- le tensioni in uscita dalle SSE del collegamento al binario (V_{neg})
- le tensioni assorbite dai carichi (V_{car})
- le correnti erogate e assorbite dalle SSE (I_{SSE})
- le correnti assorbite dai carichi (I_{car})

La loro valutazione è stata molto semplice, utilizzando la funzione “scope” all’interno del menù delle proprietà dei dispositivi (come le resistenze) oppure attraverso l’utilizzo degli oggetti “I scope and observe” e “v scope (1 pin)” opportunamente collegati al modello. La visualizzazione è stata poi eseguita attraverso il programma interno “mplot”. Solo nel modello che prevede la presenza di 2 SSE è invece stato valutato anche l’andamento della tensione di binario lungo tutta la tratta interessata. La sua valutazione non è, infatti, immediata e il procedimento per ottenerla è abbastanza lungo, rendendo inutile un suo apprezzamento nel modello a tre SSE, dove la lunghezza della tratta è ovviamente doppia rispetto al modello più semplice. Per la sua determinazione è infatti necessario inserire tra tutte le celle costituenti la tratta ferroviaria i dispositivi “v scope (1 pin)”, nominandoli opportunamente, in modo tale da riuscire a metterli nella giusta sequenza una volta completata la simulazione. Dato che il numero di dispositivi da inserire è molto alto (circa 250) e conseguentemente anche il numero delle forme d’onda da salvare, è necessario eseguire due simulazioni distinte, nelle quali vengono salvate prima le tensioni del binario a sinistra del carico, e poi quelle del binario a destra. In questo modo è possibile salvare solo metà delle forme d’onda per ogni simulazione, evitando problemi di dimensione del file di risultati. Come verrà descritto più avanti, questo modo di procedere verrà adottato anche, in modo più spinto, nel caso delle simulazioni dinamiche. Grazie alla costruzione della tratta ferroviaria attraverso i sottocircuiti, l’inserzione di tutti i dispositivi risulta invece abbastanza agevole, dato che, una volta inseriti in una delle copie del sottocircuito che rappresenta una lunghezza di binario di 300 m, vengono copiati automaticamente in tutti gli altri analoghi. Eseguite le simulazioni è necessario elaborare ulteriormente i risultati ottenuti, trasferendo i dati nel software Matlab®.

7.1. Le simulazioni statiche

Caso A

Per quanto riguarda il modello più semplice, le forme d’onda della tensione di alimentazione delle SSE sono riportate in figura.

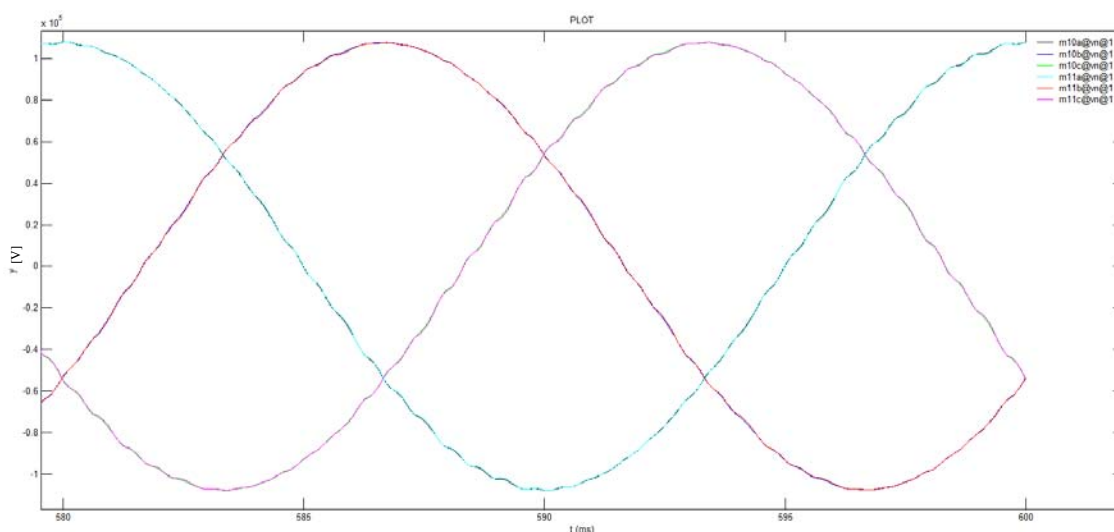


Figura 87 Andamento della tensione di alimentazione V_{alim} delle due SSE m10: SSE di sinistra
m11: SSE di destra

Come si può notare e come confermato in [17], la forma d'onda delle tre fasi non è perfettamente liscia, ma presenta un debole contenuto armonico dovuto all'effetto dei gruppi raddrizzatori dodecafasi, che mettono in gioco, lato linee primarie, correnti (e corrispondenti tensioni) di armonicità $12k \pm 1$. I valori delle tensioni di alimentazione delle due SSE sono molto simili, segno che la caduta di tensione sulla linea primaria che collega le due SSE è poco importante.

Le tensioni in uscita dalle SSE si presentano invece nel modo seguente:

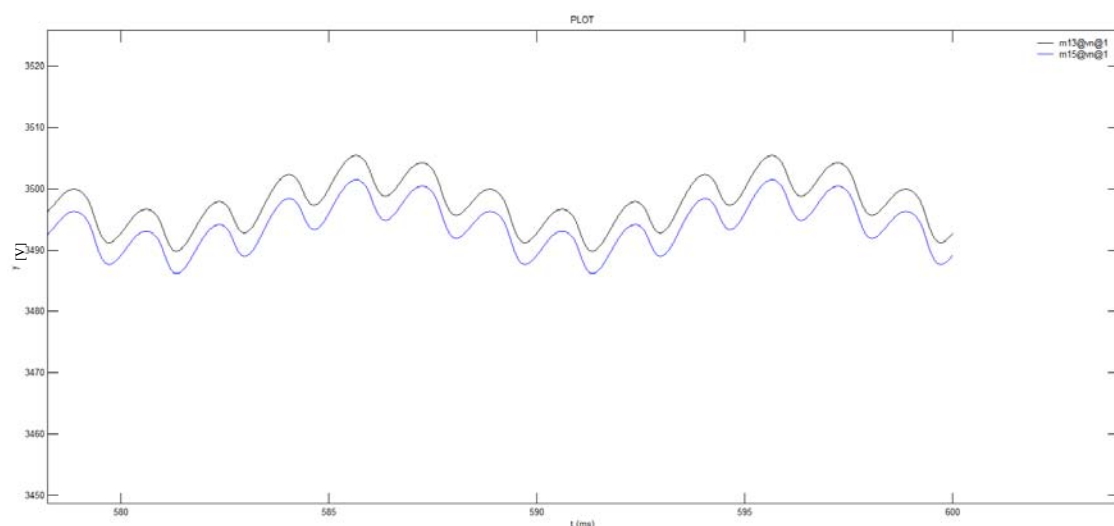


Figura 88 Andamento delle tensioni erogate V_{pos} dalle SSE m13: SSE di sinistra
m15: SSE di destra

Osservando la forma d'onda si nota il tipico ripple di tensione causato da un ponte raddrizzatore a 12 impulsi, sovrapposto al quale vi è la presenza di una componente di

seconda armonica, dovuta presumibilmente al funzionamento non perfettamente simmetrico dei due rami del raddrizzatore. Il valore della tensione in uscita è circa 3500 V, in linea con i dati che si possono realmente trovare in una SSE. La differenza di circa 4 V tra le due tensioni in uscita è dovuta alla caduta di tensione che si verifica sulla linea primaria di collegamento tra i due posti di conversione.

Le tensioni dei negativi delle due SSE si presentano invece in questo modo:

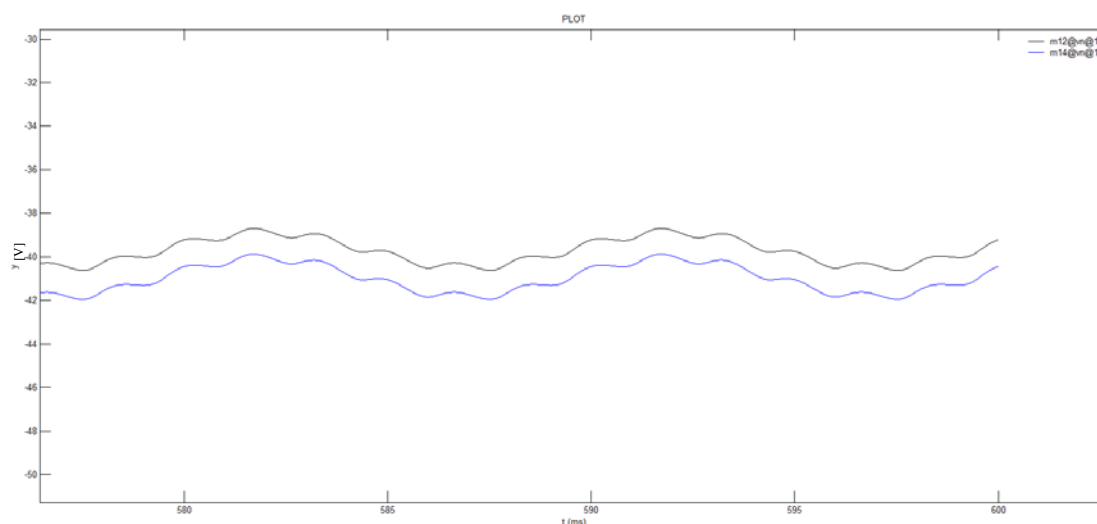


Figura 89 Andamento dei potenziali delle sbarre negative V_{neg} delle SSE m12: SSE di sinistra
m14: SSE di destra

La forma d'onda è molto simile a quella vista in precedenza, con un ripple, però, più attenuato, filtrato dall'induttanza propria del circuito di alimentazione dei convogli. La differenza di circa 1,5 V è dovuta sempre al diverso valore di alimentazione delle due SSE. Da notare è come la sbarra catodica della SSE si porti a un potenziale leggermente negativo rispetto alla terra lontana. Questo è dovuto al fatto che il binario non è completamente isolato dal terreno e quindi parte della corrente di ritorno fluisce nel suolo. Affinché la corrente possa richiudersi attraverso il negativo della SSE, il binario deve portarsi, in prossimità della stessa, a un potenziale inferiore a quello del terreno, divenendo quindi minore di 0. Per meglio capire questo concetto si riporta di seguito l'andamento della tensione di binario lungo la tratta considerata:

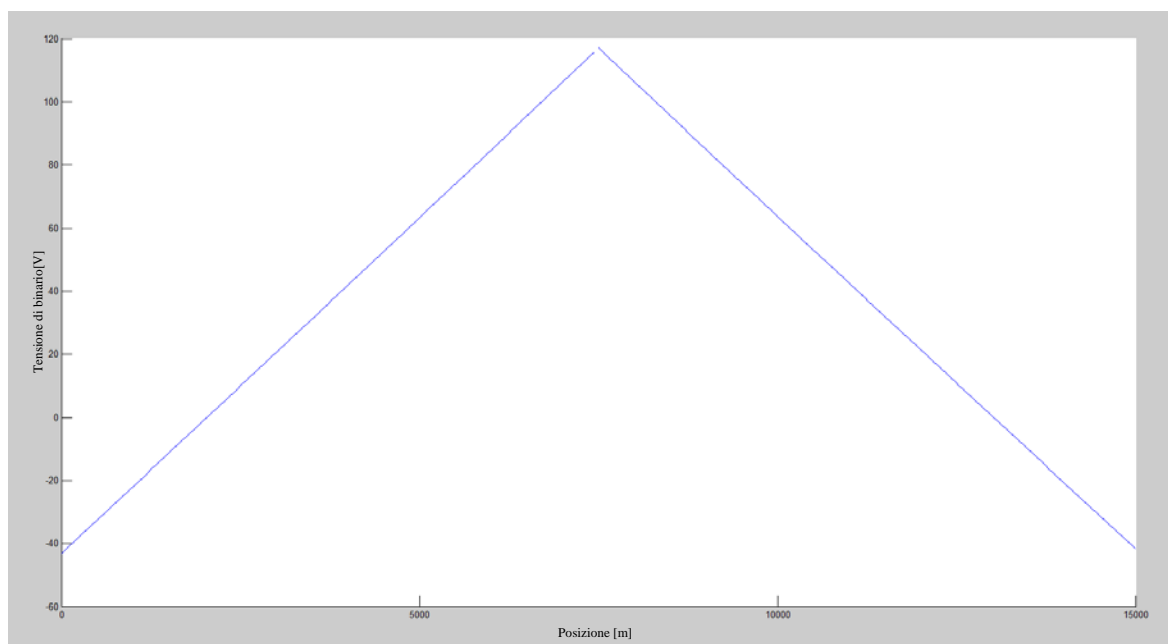


Figura 90 Andamento della tensione di binario lungo la tratta interessata

In prossimità del carico, ossia a centro tratta, vi è la massima dispersione di corrente nel suolo e quindi il binario si porta al potenziale massimo rispetto alla terra lontana. Al contrario, in prossimità della SSE, la corrente deve rientrare nel circuito di ritorno, facendo assumere al binario potenziali negativi. Bisogna sottolineare che i valori indicati sono relativi alla differenza di potenziale tra il binario e il riferimento di terra. Non rappresenta quindi la tensione di contatto a cui sarebbe sottoposta una persona nel caso in cui toccasse una rotaia, in quanto questa dipende dalla distribuzione del potenziale attorno alla stessa. I valori ottenuti sembrano essere abbastanza verosimili, in quanto l'entità della corrente dispersa risulta in linea con quanto analizzato in [18].

Il valore a cui si porta la tensione di binario dipende dall'entità della corrente assorbita dal carico e dall'isolamento delle rotaie rispetto al suolo. Per quanto riguarda la prima dipendenza, è facile intuire come tanto più le correnti sono importanti, tanto più le tensioni di binario risultano elevate. La potenzialità della linea influisce quindi in modo rilevante su questo aspetto, potendo anche far scattare le valvole di tensione poste tra il circuito di ritorno e la messa a terra dei sostegni della linea di contatto. L'isolamento della rotaia rispetto al terreno è invece legato alle condizioni atmosferiche. La conduttanza trasversale della rotaia utilizzata nelle simulazioni ($g=0.05$ S/km) è relativa a tempo asciutto, ma in caso di pioggia o forte umidità il suo valore può aumentare notevolmente, fino a superare anche 1 S/km. In queste condizioni ovviamente il binario presenta una resistenza verso terra più bassa, causando una diminuzione dei valori di tensione di binario che si possono misurare. Il problema risiede in questo caso nelle correnti circolanti nel terreno, che possono dare, in presenza di strutture metalliche prossime alle rotaie (come tubazioni o gli stessi sostegni della linea di contatto), corrosioni elettrolitiche. È questa una delle ragioni

per cui il binario non viene intenzionalmente messo a terra, ma non viene neanche completamente isolato, per evitare pericolose tensioni di contatto.

La tensione a cui è sottoposto il carico (la differenza di potenziale tra linea di contatto e binario a metà tratta) si presenta invece nel modo seguente:

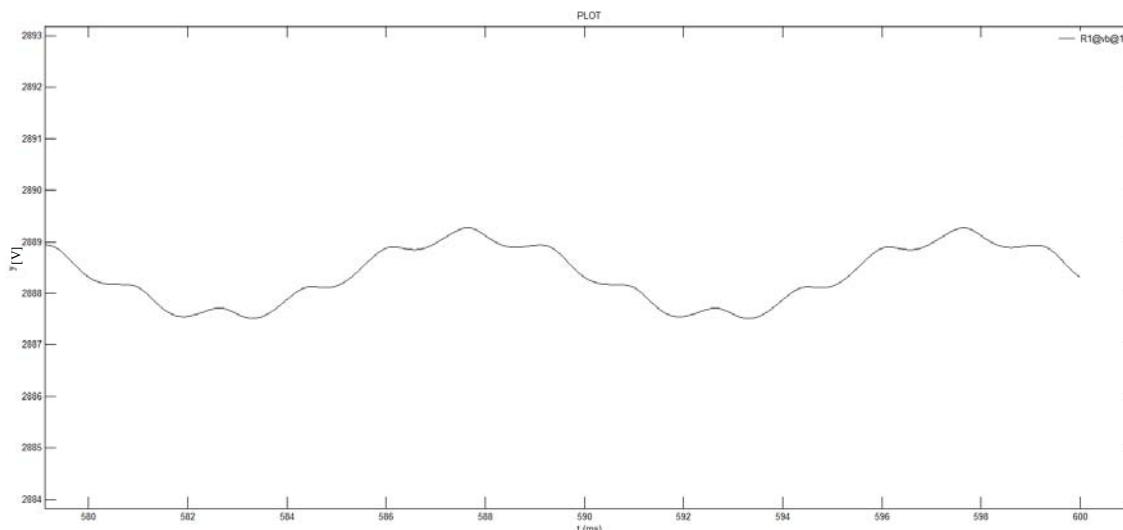


Figura 91 Andamento della tensione presente sul carico

Anche in questo caso si nota lo stesso ripple di tensione già visto per le forme d'onda in uscita dalle SSE. Interessante in questo caso risulta il valore della tensione, che si assesta intorno ai 2890 V, ancora accettabile dal punto di vista dell'alimentazione ferroviaria. Si registra quindi una caduta di tensione di circa 600 V rispetto all'alimentazione da parte della SSE, dovuta a una corrente erogata da ogni SSE di circa 1445 A. La potenza effettivamente assorbita dal carico è quindi pari a 8,34 MW, in linea con le potenze assorbite realmente dai convogli circolanti a velocità intorno ai 300 km/h. Al fine di aumentare la potenzialità della linea, la caduta di tensione risulta però essere già troppo elevata, non permettendo di raggiungere gli standard tipici del sistema Alta Velocità / Alta Capacità (treni intervallati di 5 minuti con velocità di 300 km/h). Inoltre non si sta tenendo in considerazione il problema di captazione della corrente, che per potenze molto elevate risulta essere prioritario. Per questi motivi il sistema di alimentazione in corrente continua attuale sembra aver già raggiunto il massimo delle sue possibilità, rendendo necessario un suo miglioramento.

Le correnti erogate dalle SSE si presentano in questo modo:

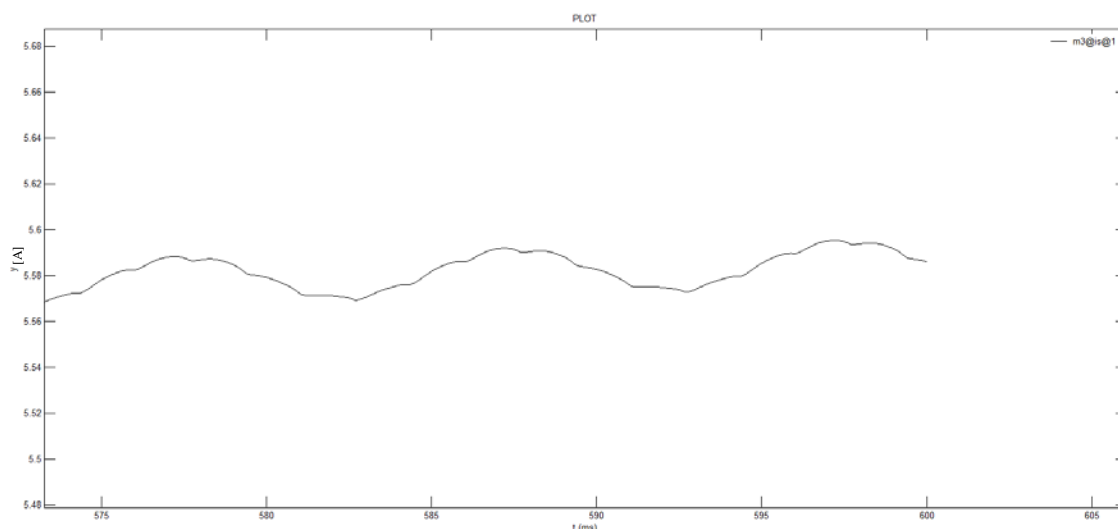


Figura 93 Andamento della corrente erogata dalle SSE sulla linea non caricata

Il suo valore è abbastanza irrisorio in confronto alle correnti assorbite dai carichi, determinando una potenza persa di circa 50 W, assolutamente trascurabile rispetto alle potenze in gioco nel normale esercizio della linea. Solo se lo squilibrio risulterà molto accentuato allora le potenze messe in gioco dalle correnti di ricircolo assumeranno un ruolo significativo.

Dato che i due binari non sono tra loro isolati, le correnti di ritorno si distribuiscono tra di essi, come si nota dai grafici seguenti.

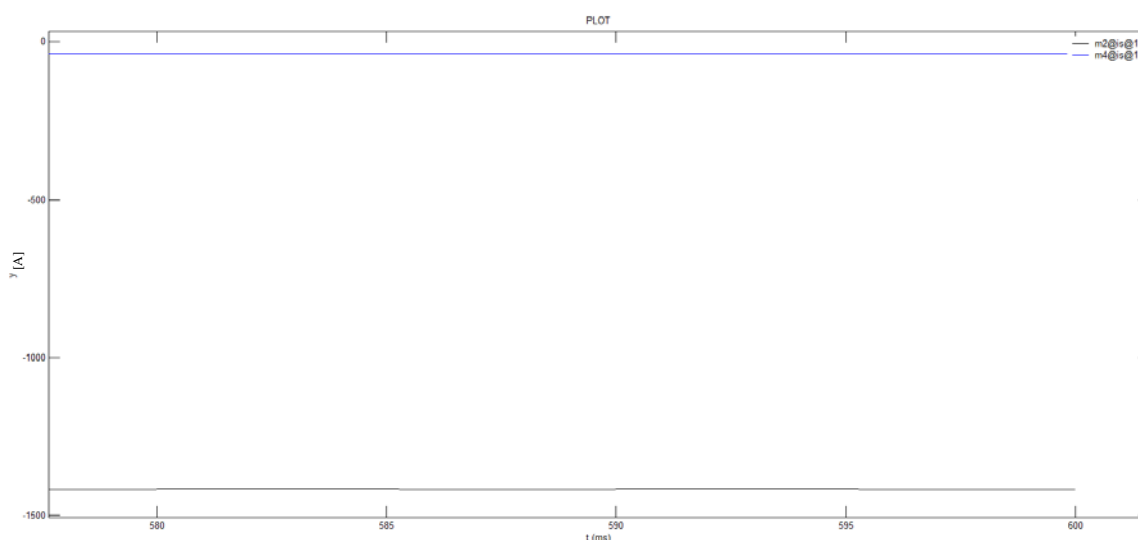


Figura 94 Corrente di binario entrante nella SSE di sinistra **m2: corrente della linea caricata**
m4: corrente della linea non caricata

Il segno negativo delle correnti indica che la corrente è entrante nella SSE. Il segno positivo, come si è già visto, indica invece una corrente erogata dalla SSE. Come già detto,

anche il binario non caricato partecipa, anche se in modo meno rilevante rispetto all'altro, alla conduzione della corrente di ritorno, presentando in prossimità della SSE un valore di circa 38 A.

Note le tensioni e le correnti erogate dalle SSE e assorbite dai carichi, è possibile anche valutare il rendimento del sistema di alimentazione dei convogli. Le potenze erogate dalle SSE sono pari a 5.133 MW per la SSE di sinistra, mentre 5.089 MW per la SSE di destra, per una potenza totale erogata di 10.222 MW. La potenza assorbita dal carico è invece pari a 8.340 MW, andando quindi a definire un rendimento di trasmissione pari a 0.816.

Caso B

Lo stesso tipo di analisi è stata eseguita anche sul modello più completo, mostrando ovviamente molte analogie.

Le tensioni a cui sono sottoposti i carichi si presentano nella maniera seguente:

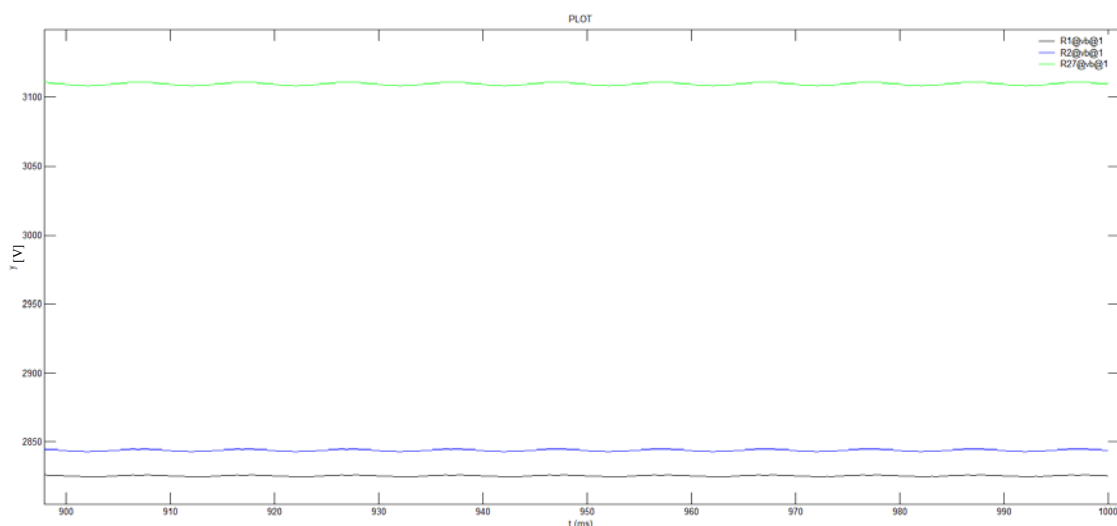


Figura 95 Andamento delle tensioni presenti sui carichi

R1: carico da 1 Ω a sinistra
R2: carico da 1 Ω a destra
R27: carico da 2 Ω

Si riconoscono in blu e nero i grafici delle forme d'onda relativi ai carichi più gravosi per la linea. Anche in questo caso i valori delle tensioni risultano essere abbastanza contenuti, assestandosi sotto i 2850 V. Anche se in questo modello l'alimentazione delle SSE da parte delle linee primarie risulta essere più simmetrica, si nota comunque una differenza tra i valori delle tensioni erogate ai due carichi, dovuta al maggior carico a cui è sottoposta la parte sinistra della linea, che presenta, infatti, due convogli sui binari alimentati dalle SSE. Le reali potenze assorbite dai carichi risultano in definitiva essere pari rispettivamente a 8.09 MW per il treno a destra e 7.98 MW per il convoglio a sinistra. La forma d'onda verde è relativa invece al carico da 2 Ω che, assorbendo una corrente inferiore, influisce in modo meno rilevante sulle cadute di linea, presentando una tensione ai suoi capi superiore

ai 3100 V. Il carico assorbe, infatti, una potenza pari a 4.84 MW, di molto inferiore rispetto a quelle esaminate sopra. Per meglio valutare il ripple presente nelle tensioni di alimentazione dei carichi, si è eseguita l'analisi di Fourier della forma d'onda del carico da 1 Ω della parte sinistra del modello.

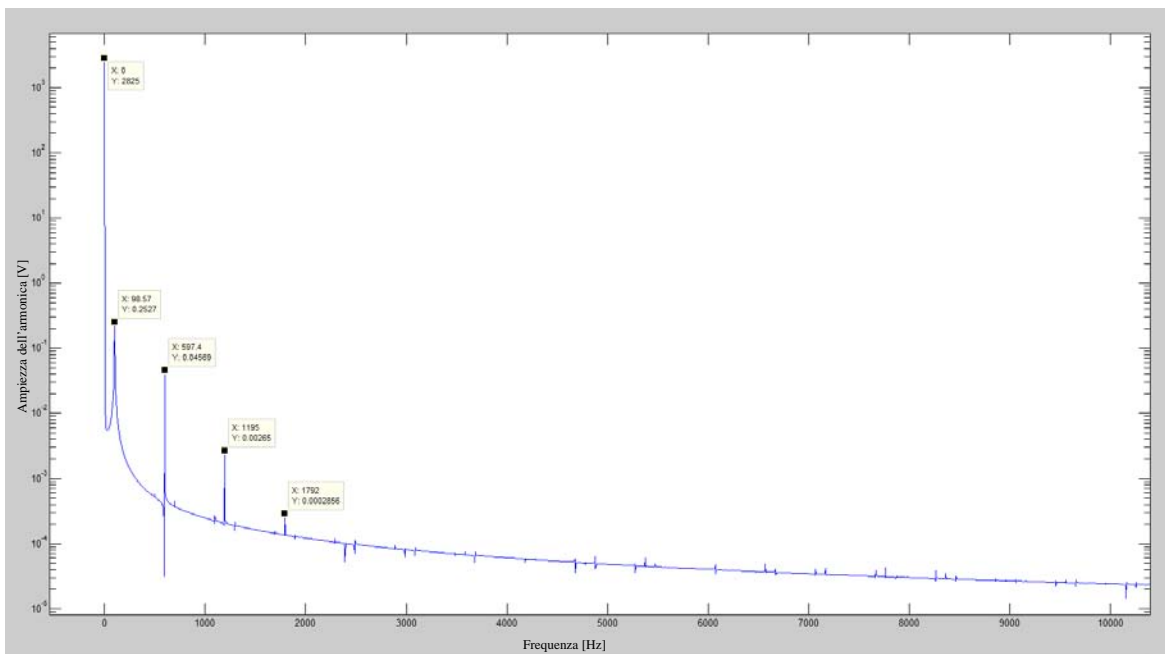


Figura 96 Risultati dell'analisi di Fourier della forma d'onda di tensione presente sul carico R1

L'analisi è stata eseguita trasferendo i dati relativi alla forma d'onda in Matlab® e sviluppando uno script apposito. I risultati convalidano quanto già visto anche nella simulazione precedente e quanto confermato in [19] e [20]. La forma d'onda presenta delle componenti armoniche di ampiezza del tutto trascurabile rispetto alla componente continua (tutte inferiori a 0.5 V). Le armoniche presenti sono quelle tipiche di un ponte a dodici impulsi (600 Hz e multipli), con la sovrapposizione di una seconda armonica, la cui presenza potrebbe essere dovuta a una non perfetta simmetria del circuito raddrizzatore.

Le tensioni erogate dalle SSE si presentano invece nel modo seguente:

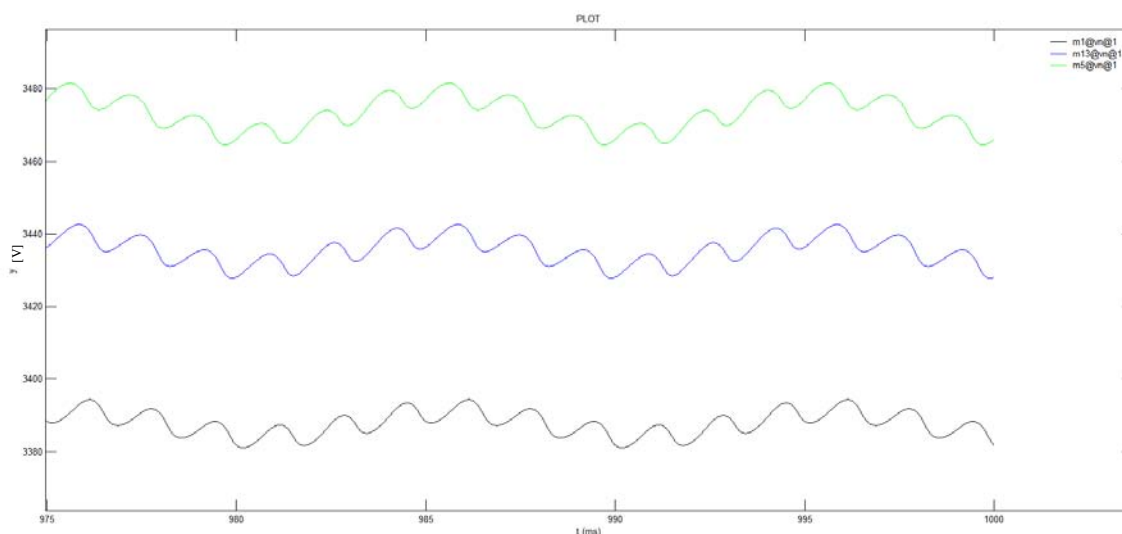


Figura 97 Andamento delle tensioni erogate dalle SSE m1: SSE centrale m5: SSE di destra
m13: SSE di sinistra

Rispetto al modello utilizzato precedentemente, il contenuto armonico presente ha un peso più rilevante. Il valore della tensione erogata dalla SSE centrale (circa 3388 V) risulta più basso rispetto a quelle delle SSE laterali (rispettivamente 3435 V per quella di sinistra e 3473 V per quella di destra), essendo alimentate in modo indiretto dalle linee primarie e dovendo alimentare tutti e 3 i carichi. La SSE di sinistra presenta invece la tensione di alimentazione della linea di contatto più elevata in quanto le linee a cui afferiscono sono le meno caricate. Questi squilibri di tensione determinano, anche in questo caso, correnti di ricircolo, che interessano tutte le tratte ferroviarie alimentate, determinando perdite di linea aggiuntive. Anche in questo caso è stata eseguita l'analisi di Fourier della forma d'onda della tensione erogata dalla SSE di sinistra, mettendo in luce alcune differenze rispetto all'analisi eseguita precedentemente.

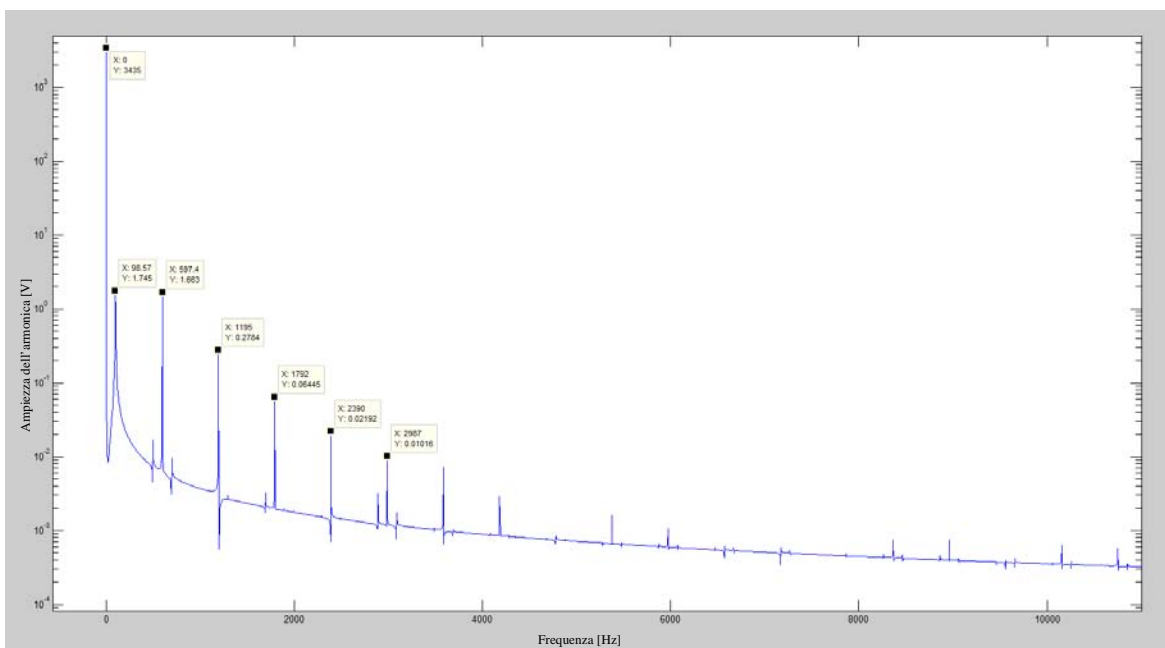


Figura 98 Risultati dell'analisi di Fourier della forma d'onda di tensione erogata dalla SSE di sinistra

Le componenti armoniche presentano infatti un valore leggermente superiore (anche maggiore di 3 V) rispetto alle tensioni di alimentazione dei carichi, ma comunque sempre trascurabili rispetto alla componente continua. Questa differenza è dovuta al naturale filtraggio operato dall'induttanza propria della linea di contatto, che determina quindi un'ampiezza delle componenti armoniche decrescente man mano che ci si allontana dal gruppo di conversione. Le frequenze presenti sono invece quelle già viste in precedenza.

Le tensioni delle sbarre catodiche delle SSE si presentano invece nel modo seguente.

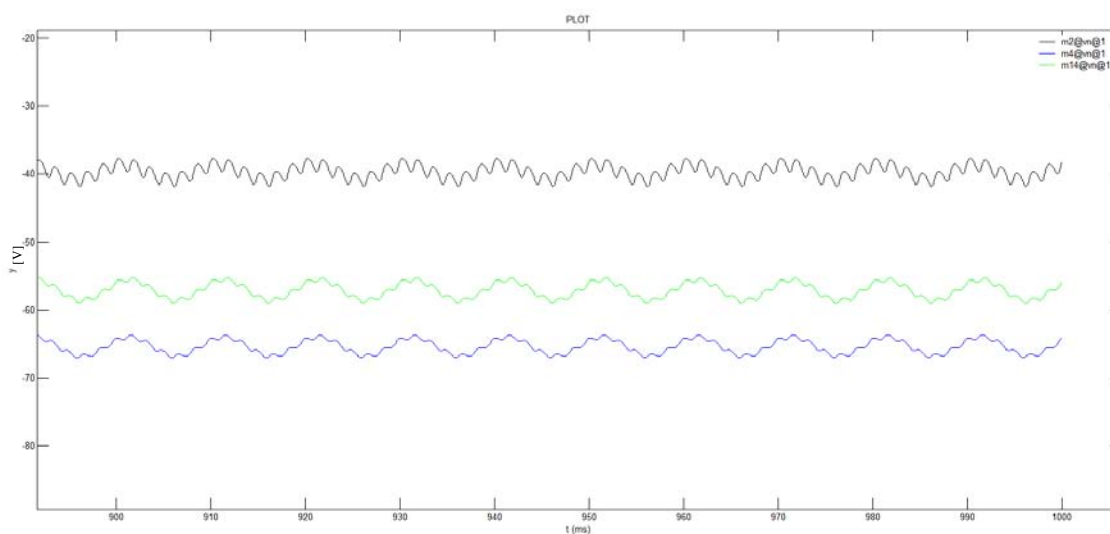


Figura 99 Potenziali della sbarra negativa delle SSE m2: SSE centrale m4: SSE di destra m14: SSE di sinistra

La SSE centrale presenta la tensione più elevata (-40 V), quella relativa alla SSE di sinistra ha un valore di circa -57 V, mentre la tensione della sbarra catodica della SSE di destra mostra il valore più basso (-65 V). Per quanto riguarda il contenuto armonico vale quanto già osservato in precedenza. In questo caso però la componente armonica di valore più elevato non supera mai 1.5 V di ampiezza.

È stato valutato anche in questo caso il rendimento di trasmissione del sistema. Le potenze erogate dalle SSE sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 20 Valori delle potenze erogate dalle SSE sulle varie linee di contatto

Sottostazione	Binario	Potenza (MW)
Sinistra	1	5.178
Centrale tratta a sinistra	1	4.600
Destra	1	5.476
Sinistra	2	2.961
Centrale tratta a sinistra	2	2.427
Centrale tratta a destra	1	4.442
TOTALE		25.086

Le potenze assorbite dai carichi sono invece riportate nella tabella seguente:

Tabella 21 Valori delle potenze assorbite dai carichi

Tratta occupata	Binario	Potenza (W)
Sinistra	1	8.076
Sinistra	2	4.836
Destra	1	7.980
TOTALE		20.893

Il rendimento di trasmissione risulta in questo caso pari a 0.832, molto simile a quello trovato in precedenza.

7.2. Le simulazioni dinamiche

Terminate le simulazioni riguardanti i casi statici e ottenuti dei risultati in linea con quanto accade in realtà, si è passati a eseguire delle simulazioni dinamiche, nelle quali il carico si muove lungo la tratta di binario compresa tra due SSE. Sono state costruite quattro tipologie di modelli diversi, per simulare 4 possibili configurazioni di rete e di carico:

1. Caso A: presenta un solo carico in movimento da sinistra verso destra e la configurazione della rete di alimentazione è quella già descritta nel capitolo precedente.
2. Caso B: prevede sempre un solo carico, ma con le linee di contatto dei due binari messe in parallelo a metà tratta.
3. Caso C: sono presenti due carichi, viaggianti in direzioni opposte e con la configurazione di rete del caso A
4. Caso D: simile a quella del caso C, ma con il parallelo delle linee di contatto.

Il profilo di potenza, tipico di un convoglio per linee AV / AC, che si vuole far assorbire al treno lungo la tratta è il seguente:

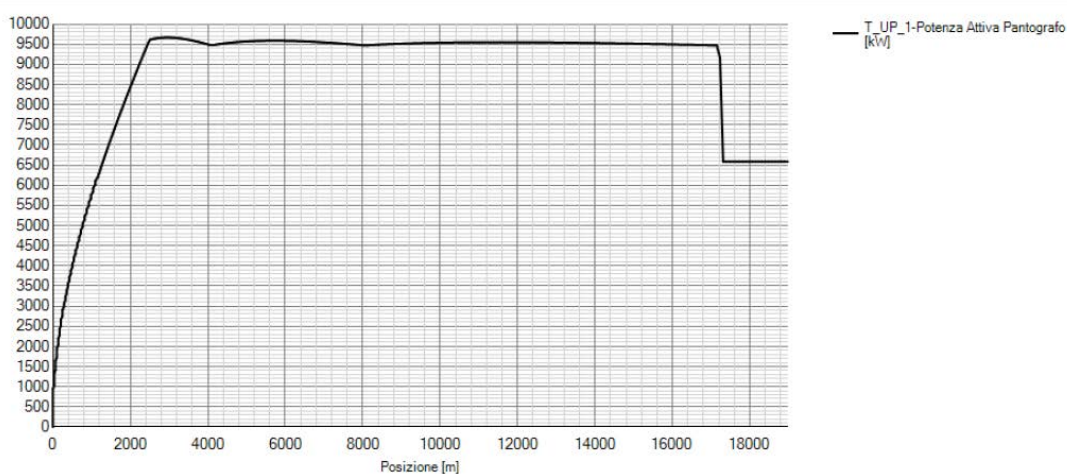


Figura 100 Profilo della potenza attiva assorbita da un convoglio per linee AV in funzione della posizione

Il profilo di velocità che il treno deve invece seguire è il seguente:

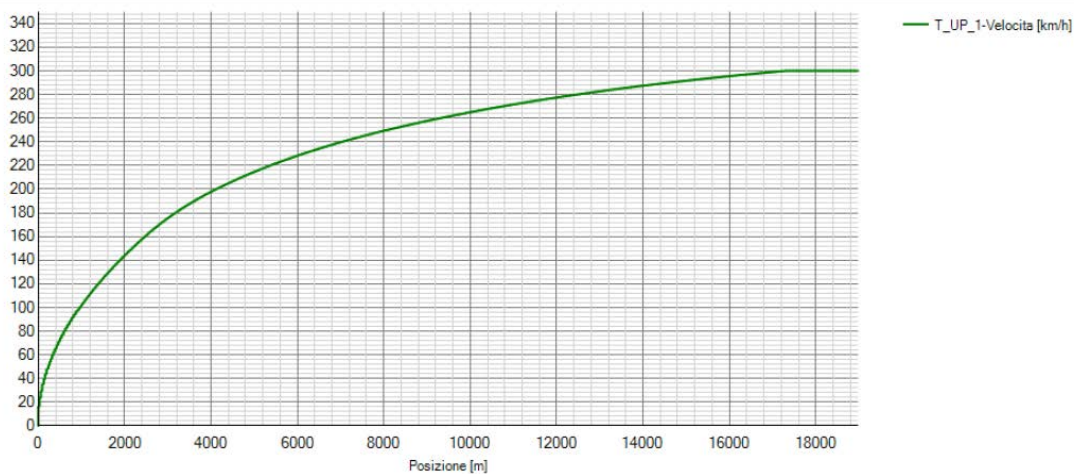


Figura 101 Profilo di velocità di un convoglio per linee AV in funzione della posizione

Dato che si dispone solo dei grafici già elaborati e non dei dati sorgente, è necessario eseguire un'extrapolazione di questi, per rendere più agevole il successivo settaggio dei vari generatori di corrente. Allo scopo è possibile utilizzare svariati software freeware, come “engage” o simili, il cui utilizzo è abbastanza intuitivo. Basta infatti caricare l'immagine contenente il grafico da analizzare, posizionare il sistema di riferimento, impostare la scala dei due assi e selezionare la curva da extrapolare. Il programma automaticamente riconoscerà alcuni punti della curva e ne fornirà i valori di ascissa e ordinata. I dati possono poi essere trasferiti su software tipo Matlab® per ulteriori elaborazioni. In questo caso è necessario eseguire modificazioni successive per due ragioni: la prima è che, per come è stato costruito il modello, sono necessari i valori di potenza da assorbire relativi a punti distanti 60 m e la seconda è relativa al fatto che non interessa tanto il profilo di velocità del carico, quanto invece il diagramma orario, sempre relativo a intervalli di 60 m. È stato quindi elaborato un codice Matlab® che sopperisse a queste due esigenze, in grado di elaborare un file di dati contenente per ogni posizione del carico, il valore di potenza da assorbire e l'istante di passaggio. Si riporta di seguito il profilo di potenza effettivamente implementato nel programma.

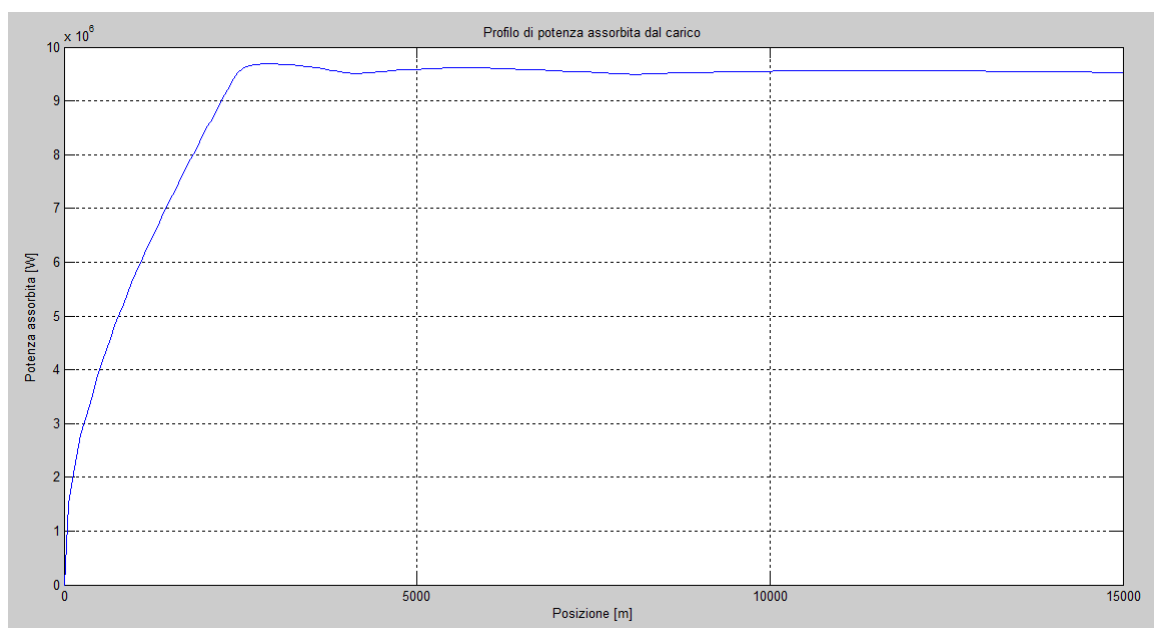


Figura 102 Profilo della potenza attiva che si vuole far assorbire al carico nelle simulazioni dinamiche

Dal confronto con il grafico originale, si può notare che le elaborazioni non hanno influito in modo rilevante sull'andamento del profilo di potenza.

La figura seguente presenta invece il diagramma orario del treno. Si può subito notare come le simulazioni dovranno coprire un tempo di circa 5 minuti, affinché il carico riesca a coprire interamente la tratta considerata. I tempi di simulazione saranno in questo senso abbastanza elevati, costringendo a utilizzare un passo di integrazione abbastanza grande.

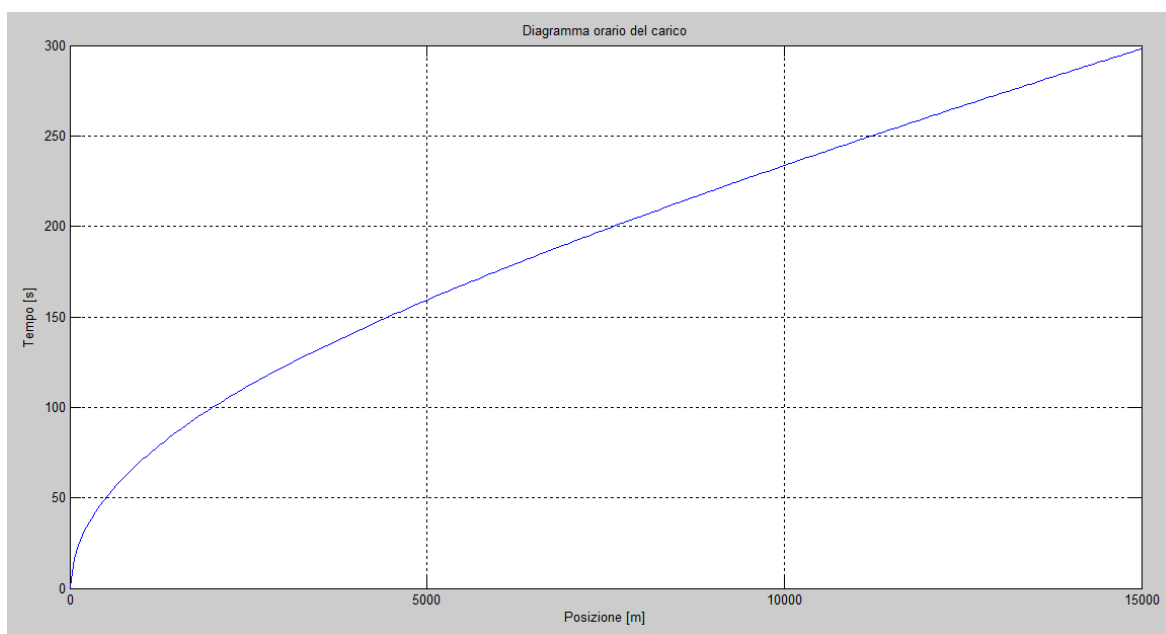


Figura 103 Diagramma orario che si vuole far seguire al carico nelle simulazioni dinamiche

Rispetto alle simulazioni statiche, i tempi di simulazione sono molto più lunghi, in quanto non è necessario solamente attendere che il sistema si porti a regime, ma è indispensabile aspettare che il carico completi il suo spostamento lungo la tratta di binario. Come si deduce dal diagramma orario, il tempo necessario per il movimento completo del treno è poco inferiore ai 297 s. Si è quindi deciso di impostare come durata di simulazione un tempo di 300 s, facendo partire il carico solo dopo che la rete ha raggiunto le condizioni di regime, ossia dopo circa 1 s. Dato che l'intervallo di osservazione è abbastanza lungo, si è necessariamente dovuto scegliere un passo di integrazione piuttosto ampio, per evitare tempi di simulazione esageratamente alti. Questa decisione ha però delle conseguenze negative in termini di rappresentazione della forma d'onda osservata, in quanto, con un passo di integrazione troppo grande non si riesce a seguire in modo corretto l'andamento istantaneo del segnale. La presenza delle armoniche genera quindi un ripple di tensione e di corrente molto superiore a quello che si verifica nei casi statici. Le simulazioni dinamiche saranno quindi significative dal punto di vista dell'andamento dei valori di tensione e di corrente, e non della loro forma d'onda, che risulterà necessariamente distorta. La scelta di compromesso fatta è stata di impostare un passo di integrazione di 0.5 ms, ottenendo quindi dei tempi di simulazione accettabili.

Per verificare l'esattezza del modello utilizzato e il modo con cui si è simulato il movimento del carico, si è eseguita inizialmente una simulazione di prova, nella quale si è supposta la presenza di un carico con velocità costante (di valore di 60 m/s) e assorbente una corrente di 3000 A. Si è poi ricavato l'andamento della caduta di tensione lungo la linea al variare della posizione del carico e lo si è confrontato con quello fornito dalle formule teoriche descriventi lo stesso sistema, presentate in modo completo in [5].

Per ricavare in modo analitico l'andamento della caduta di tensione lungo la linea, bisogna introdurre le seguenti grandezze:

E_a, E_b : tensioni fornite dalle due SSE (V)

I_a, I_b : correnti erogate dalle due SSE (A)

I : corrente assorbita dal carico (A)

L : lunghezza della tratta compresa tra le due SSE (m)

r : resistenza chilometrica della linea di contatto (Ω/km)

Si suppone che il carico sia unico, assorba una corrente costante I e che la tratta L venga alimentata agli estremi da due SSE ideali, con tensioni di uguale valore e resistenza interna trascurabile, ossia $E_a = E_b = E$. Ovviamente si ha anche che $I_a + I_b = I$. Se il carico è unico, le due SSE vi concorreranno con due correnti direttamente proporzionali alla distanza x dal carico. È possibile quindi calcolare la tensione alla distanza x da una SSE, partendo rispettivamente dalla SSE_a o SSE_b come segue:

$$V = E - r \cdot I_a \cdot x = E - r \cdot (L - x) \cdot (I - I_a) \quad [29]$$

dove si è trascurata la resistenza del circuito di ritorno. Si ottiene quindi:

$$I_a \cdot x = (L - x) \cdot (I - I_a) \quad [30]$$

giungendo a

$$I_a(x) = \frac{(L - x)}{L} \cdot I \quad [31]$$

Si nota che se:

- $x = 0$ $I_a(x) = I$ la corrente viene fornita tutta dalla SSE_a
- $x = L$ $I_a(x) = 0$ la corrente viene fornita tutta dalla SSE_b

Sostituendo nella [29], la [31], si ottiene che

$$V = E - r \cdot \frac{(L - x)}{L} \cdot I \cdot x \quad [32]$$

E quindi l'andamento della caduta di tensione lungo la linea risulta

$$\Delta V_x = E - V = r \cdot \frac{(L - x)}{L} \cdot I \cdot x \quad [33]$$

La caduta di tensione ΔV_x varia con legge quadratica in funzione dell'ascissa x e raggiunge il suo valore massimo a metà tratta. Si ottiene infatti

$$\Delta V_{max} = \Delta V_{x=\frac{L}{2}} = r \cdot \frac{(L-\frac{L}{2})}{L} \cdot I \cdot \frac{L}{2} = \frac{r \cdot L \cdot I}{4} \quad [34]$$

Il calcolo invece della caduta di tensione media fornisce invece il seguente risultato

$$\Delta V_{media} = \frac{1}{L} \int_0^L r \cdot \frac{(L-x)}{L} \cdot I \cdot x \cdot dx = \frac{r \cdot L \cdot I}{6} = \frac{2}{3} \cdot \Delta V_{max} \quad [35]$$

Con i dati utilizzati nel modello, si ottiene il seguente andamento della caduta di tensione.

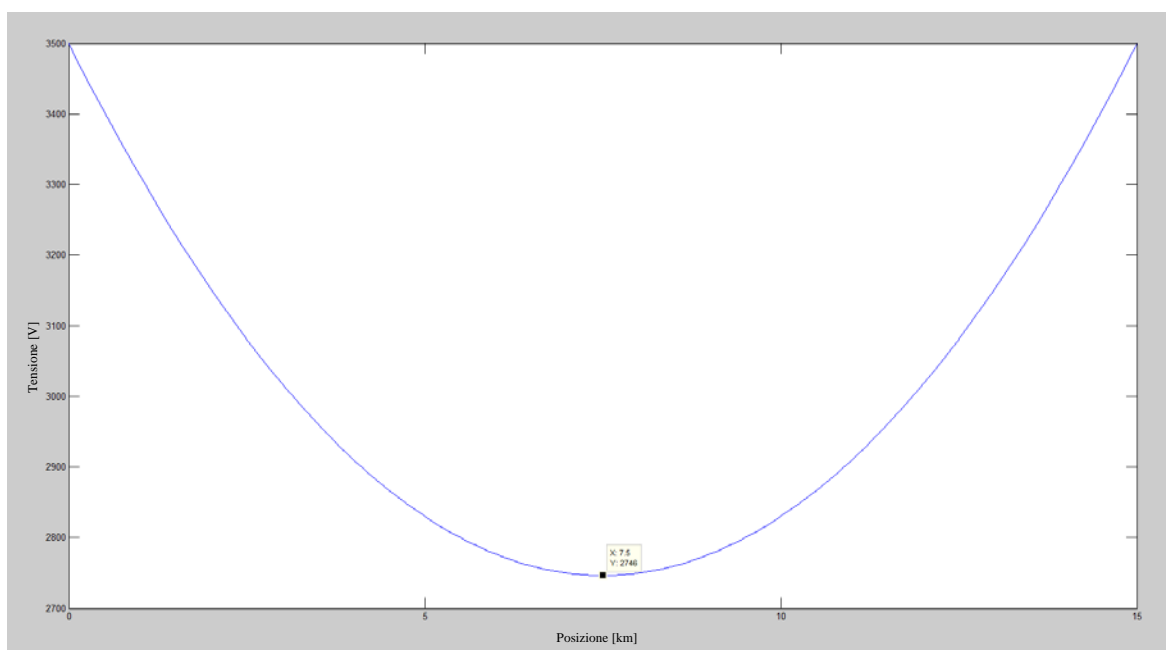


Figura 104 Profilo della caduta di tensione lungo la linea ottenuto applicando le formule analitiche

Ovviamente l'andamento presenta un minimo in corrispondenza del centro tratta, che assume un valore pari a 2746 V.

Si suppone ora che le due SSE funzionino a tensioni diverse, ossia che $E_a \neq E_b$. Dato che esiste una differenza di potenziale ΔE tra le due SSE, nascerà una corrente di circolazione I_c pari a

$$I_c = \frac{E_a - E_b}{r \cdot L} = \frac{\Delta E}{r \cdot L} \quad [36]$$

Ricordando i risultati trovati precedentemente e applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si trova che

$$\begin{cases} I_a(x) = \frac{(L-x)}{L} \cdot I + I_c = \frac{(L-x)}{L} \cdot I + \frac{\Delta E}{r \cdot L} \\ I_b(x) = I - \frac{(L-x)}{L} \cdot I - I_c = \frac{x}{L} \cdot I - \frac{\Delta E}{r \cdot L} \end{cases} \quad [37]$$

Ricordando la [33], si ottiene che l'andamento della caduta di tensione segue la seguente espressione

$$\Delta V_x = r \cdot \frac{(L-x)}{L} \cdot I \cdot x + r \cdot x \cdot I_c = r \cdot I \cdot x - r \cdot I \cdot \frac{x^2}{L} + \frac{\Delta E}{L} \cdot x \quad [38]$$

Dalla relazione:

$$\frac{d\Delta V_x}{dx} = r \cdot I - \frac{2 \cdot x \cdot r \cdot I}{L} + \frac{\Delta E}{L} = 0 \quad [39]$$

si ricava il punto per cui è massima la caduta di tensione, la cui coordinata x vale

$$x_{\Delta V_{max}} = \left(r \cdot I + \frac{\Delta E}{L} \right) \cdot \frac{L}{2 \cdot I \cdot r} = \frac{L}{2} \cdot \left(1 + \frac{\Delta E}{L \cdot I \cdot r} \right) = \frac{L}{2} \cdot \left(1 + \frac{I_c}{L} \right) \quad [40]$$

ΔV_{max} è quindi spostata verso la SSE che sta erogando la tensione minore.

Dato che la linea che si sta analizzando è a doppio binario, è possibile pensare di collegare in parallelo i due binari a metà tratta, in modo tale da ridurre le cadute di tensione lungo la linea. Supponendo che il treno si trovi nella metà prossima alla SSE_a, che le due SSE erogano la stessa tensione e definendo in questo caso

I_a : corrente erogata dalla SSE_a sulla linea caricata

la corrente $(I - I_a)$ arriverebbe tutta dal lato destro del treno. Effettuando il collegamento in parallelo a metà tratta, la corrente in oggetto arriva nel punto indicato confluendo da tre percorsi differenti (le due linee afferenti alla SSE_b e la seconda alimentata dalla SSE_a). Dato che i 3 rami del circuito presentano la stessa impedenza, la corrente risulta equamente distribuita tra di essi. La caduta di tensione in funzione della coordinata x, valida per $0 \leq x \leq L/2$, risulta quindi essere pari a

$$\Delta V_x = r \cdot x \cdot I_a = r \cdot (I - I_a) \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) + r \cdot \frac{(I - I_a)}{3} \cdot \frac{L}{2} \quad [41]$$

ottenendo l'espressione della corrente I_a

$$x \cdot I_a = (I - I_a) \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) + \frac{(I - I_a)}{3} \cdot \frac{L}{2} \quad [42]$$

$$I_a(x) = \frac{I \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L - x \right)}{\frac{2}{3} \cdot L}$$

Sostituendo nella [41] la [42] si ottiene l'andamento della caduta di tensione lungo la linea, valido per $0 \leq x \leq L/2$

$$\Delta V_x = r \cdot x \cdot I_a = r \cdot x \cdot \frac{I \cdot (\frac{2}{3}L - x)}{\frac{2}{3}L} \quad [43]$$

Si riconosce, dal confronto con la [33], che l'espressione corrisponde alla caduta di tensione che si avrebbe lungo una singola linea alimentata bilateralmente di lunghezza $\frac{2}{3} \cdot L$. Se il carico si trova nella metà prossima alla SSE_b, ossia per $L/2 \leq x \leq L$, il ragionamento è speculare e l'espressione della caduta di tensione la seguente

$$\Delta V_x = r \cdot (L - x) \cdot I_b = r \cdot (L - x) \cdot \frac{I \cdot (x - \frac{1}{3} \cdot L)}{\frac{2}{3} \cdot L} \quad [44]$$

I massimi della caduta di tensione sono in corrispondenza di $x = 1/3 \cdot L$ e $x = 2/3 \cdot L$, assumendo in entrambi i casi il seguente valore

$$\Delta V_{max} = \Delta V_{x=\frac{L}{3}} = \frac{r \cdot L \cdot I}{6} \quad [45]$$

Con i dati utilizzati nel modello, si ottiene il seguente andamento della caduta di tensione nel caso di collegamento in parallelo dei binari.

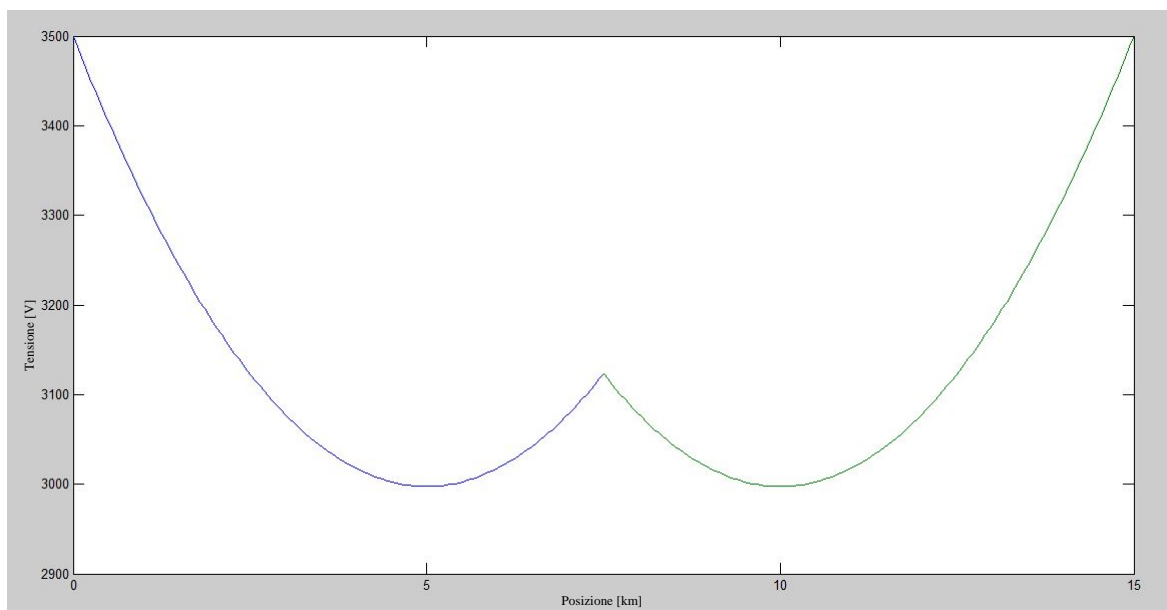


Figura 105 Profilo della caduta di tensione lungo la linea con posto di parallelo ottenuto applicando le formule analitiche

Il minimo valore che assume la tensione lungo la tratta è in questo caso pari a 2998 V.

Ricavare dal modello utilizzato l'andamento della caduta di tensione lungo la linea non si è rivelato un processo immediato. Bisogna infatti considerare l'elevato numero di dispositivi che bisogna monitorare, il tempo di simulazione abbastanza elevato e la limitatezza nell'analisi dei dati offerta dal programma. Per risolvere il problema dovuto al salvataggio

di un file di dati troppo grande, si sono dovute avviare separatamente 10 simulazioni identiche, in modo tale che ognuna di esse salvasse solo una parte delle forme d'onda necessarie a ricostruire la caduta di tensione di linea. Per fare questo sono stati elaborati 10 script diversi, che impostassero lo stesso profilo di corrente da assorbire in tutte le simulazioni, ma definissero di volta in volta le differenti forme d'onda da salvare. Completati i 10 processi di simulazione (che possono essere avviati anche contemporaneamente se la macchina su cui è installato il programma è abbastanza performante) si sono dovute salvare le forme d'onda di tensione lungo la linea in formato “.mat” e successivamente esportarle in Matlab®. È stato quindi possibile andare a estrarre il valore della tensione tra linea di contatto e binario relativa a ogni posizione del carico lungo la tratta ferroviaria, ricostruendo quindi l'andamento della caduta di tensione lungo la linea al variare della posizione del carico.

Per quanto riguarda la verifica del primo modello utilizzato, l'andamento della caduta di tensione lungo la linea si presenta nel modo seguente.

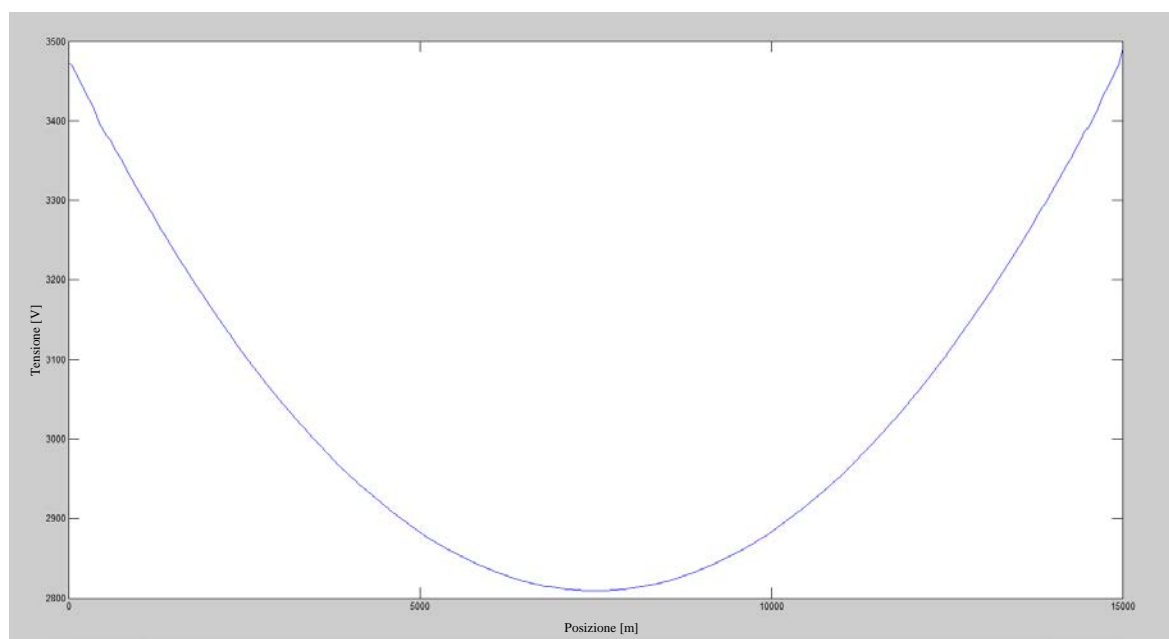


Figura 106 Profilo della caduta di tensione lungo la linea ottenuto dal modello utilizzato per le simulazioni dinamiche

Da un confronto con l'andamento fornito dalle formule teoriche, si nota un accordo perfetto in termini di forma. Il valore massimo della caduta di tensione invece risulta essere diverso nei due casi. Le simulazioni hanno infatti portato a un valore minimo della tensione della linea di contatto di 2810 V, leggermente superiore a quello fornito dalle formule teoriche. La discrepanza nei due risultati, per quanto trascurabile vista l'entità delle tensioni in gioco, può essere dovuta alle semplificazioni fatte nel modello teorico. Infatti, nella loro applicazione, si suppone che tutto il binario si trovi al potenziale di terra, si considera trascurabile la resistenza del circuito di ritorno e le SSE sono supposte ideali e alla stessa tensione. In realtà, come visto nelle simulazioni statiche, il potenziale del

binario non è costantemente nullo, ma dipende dall'entità della corrente nel circuito di ritorno e dalla posizione del carico. Dato che l'andamento rappresentato è relativo alla differenza di potenziale tra linea di contatto e binario, si spiega come i valori trovati siano superiori rispetto a quelli forniti dalle formule teoriche, visto che il binario, in corrispondenza del carico, assume un potenziale positivo rispetto a quello di terra. Il potenziale delle SSE non è poi costante, ma dipende dalla corrente erogata dalla SSE stessa, facendo nascere delle correnti di ricircolo che influenzano, anche se in modo non troppo rilevante, i risultati.

Si è poi effettuata la stessa verifica nel caso in cui sia presente il collegamento in parallelo dei due binari a centro tratta. Si è ottenuto il seguente andamento della caduta di tensione lungo la linea.

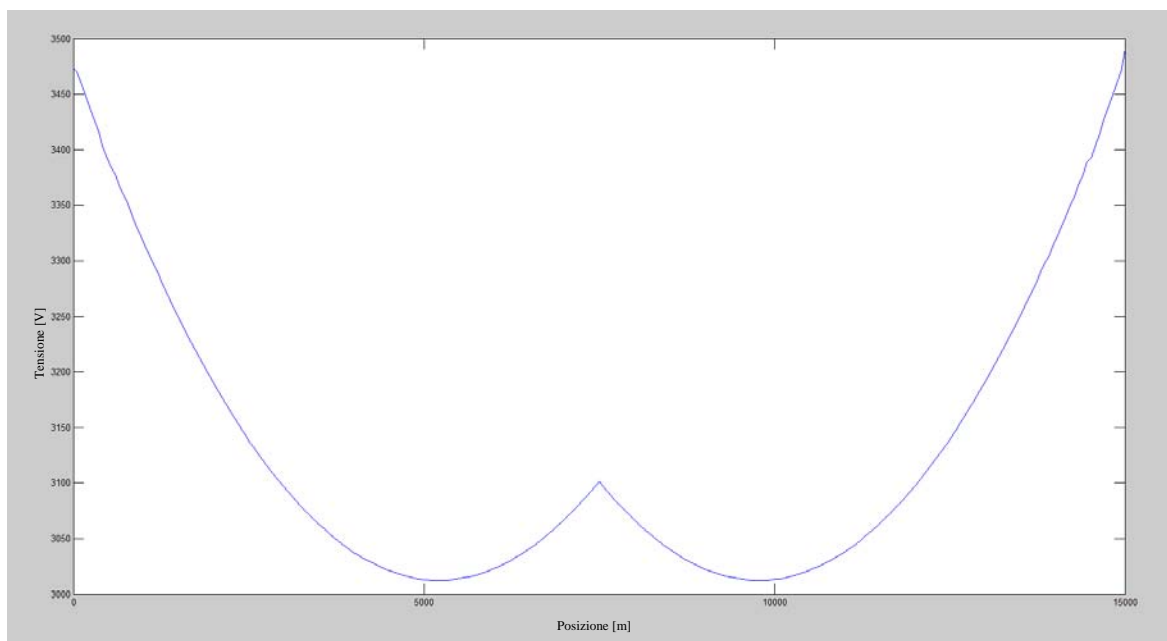


Figura 107 Profilo della caduta di tensione lungo la linea con posto di parallelo ottenuto dal modello utilizzato per le simulazioni dinamiche

Anche in questo caso si nota una perfetta concordanza in termini di andamento, mentre degli scostamenti per quanto riguarda i valori assunti dalla tensione della linea di contatto, che risultano più elevati rispetto a quelli forniti dalle formule teoriche. Il valore minimo della tensione registrata nelle simulazioni è infatti pari a 3015 V, di poco discosto dal modello analitico.

Il modello fornisce quindi dei risultati verosimili sotto tutti gli aspetti analizzati. Anche le simulazioni dinamiche potranno quindi essere considerate come di riferimento nello sviluppo di un nuovo modello, rappresentante la nuova proposta per il sistema di alimentazione ferroviario in corrente continua.

Caso A

La prima simulazione dinamica da effettuare è relativa allo spostamento di un carico con i profili di velocità e potenza presentati nel capitolo precedente, su una linea a doppio binario, già descritta in precedenza. In analogia a quanto fatto nella verifica del modello vista sopra, si sono dovute avviare 10 simulazioni identiche per ottenere dei risultati successivamente elaborabili.

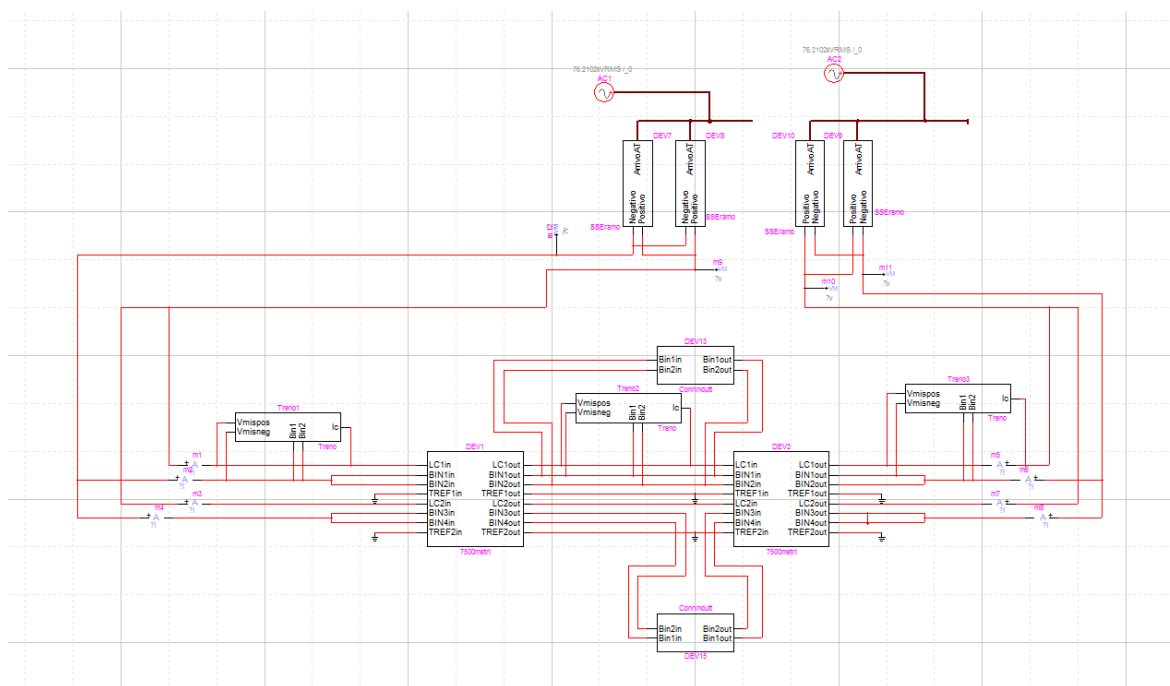


Figura 108 Modello utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente un solo carico

Interessante risulta l'andamento delle tensioni erogate dalle SSE, di cui si riportano di seguito i grafici.

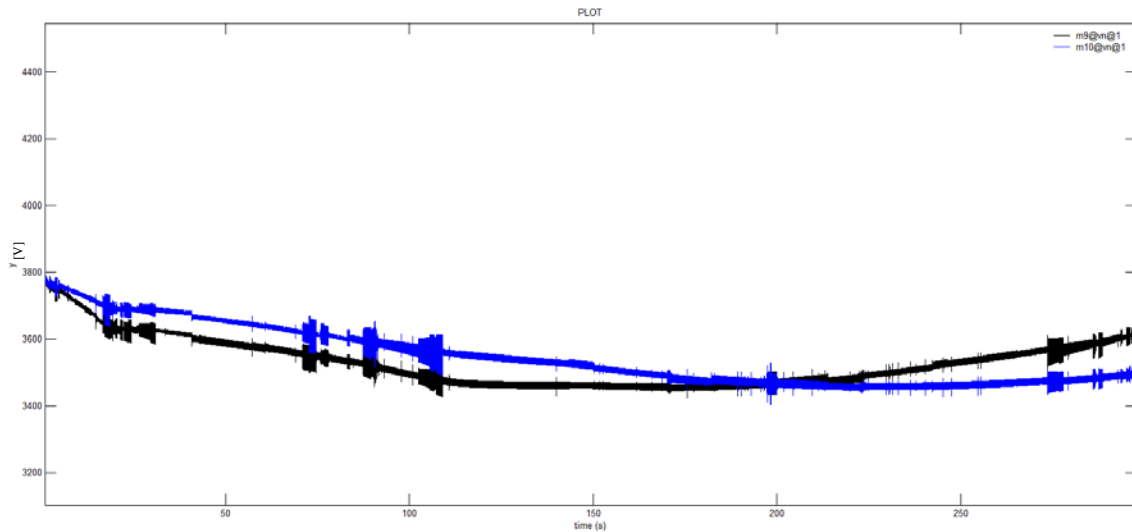


Figura 109 Andamento delle tensioni erogate dalle SSE m9: SSE di sinistra
m10: SSE di destra

Come si nota le due SSE non si trovano allo stesso potenziale, determinando la presenza di una corrente di ricircolo anche nella linea di contatto priva di carichi. La differenza nelle tensioni erogate è dovuta al diverso carico a cui sono sottoposte le SSE durante lo spostamento del treno. All'inizio infatti la corrente assorbita viene quasi del tutto fornita dalla SSE a sinistra (la più vicina al carico), determinando quindi una caduta di tensione interna alla SSE superiore rispetto a quella di destra. Solo nel momento in cui il carico si trova a metà tratta ($t=200$ s), le due SSE erogano la stessa corrente e, conseguentemente, le tensioni fornite dalle stesse assumono lo stesso valore.

Le correnti erogate dalle due SSE assumono invece i seguenti andamenti:

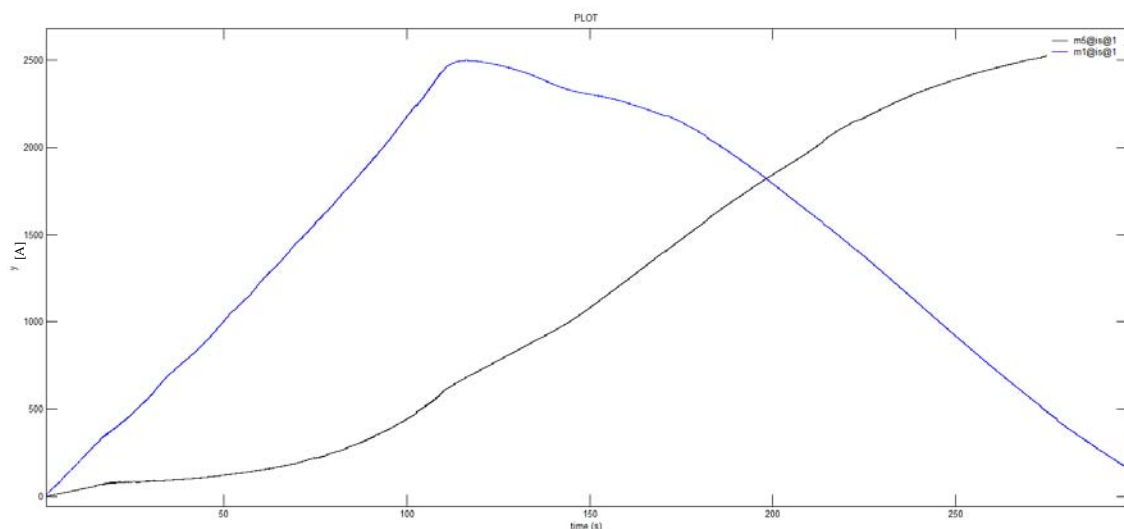


Figura 110 Correnti erogate dalle SSE sulla linea caricata m1: SSE di sinistra
m5: SSE di destra

L'andamento delle due correnti risulta molto diverso a causa del profilo di potenza assorbito dal carico. All'inizio infatti il carico richiede una potenza non troppo elevata e, conseguentemente la corrente viene erogata quasi esclusivamente dalla SSE di sinistra. Intorno ai 100 s, il carico ha raggiunto la sua massima potenza, e conseguentemente le correnti erogate e le cadute di tensione crescono finché il treno non raggiunge il centro della tratta. In questo punto la corrente assorbita dal carico è massima (in quanto è massima la caduta di tensione sulla linea) e viene suddivisa esattamente tra le due SSE. Verso la fine della simulazione il carico viene alimentato quasi esclusivamente dalla SSE di destra, la cui tensione ovviamente si abbassa rispetto alla SSE di sinistra.

Lo squilibrio nelle tensioni imposte dalle SSE genera una corrente anche nella linea non caricata, che assume il seguente andamento.

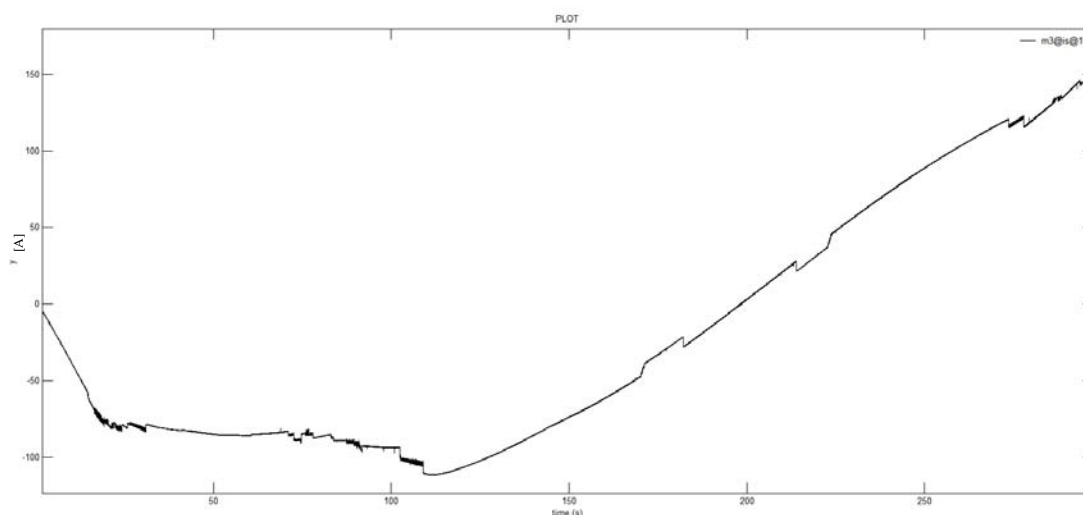


Figura 111 Andamento della corrente erogata sulla linea non caricata

Un valore negativo della corrente indica che il suo verso è da destra verso sinistra, mentre è positiva nel caso contrario. Dai valori assunti si deduce che, come già visto, nella prima parte della simulazione la tensione fornita dalla SSE di sinistra è più bassa di quella di destra, in quanto erogante una corrente più elevata. Nella seconda parte la situazione si inverte e lo squilibrio delle SSE diventa sempre più importante, dando luogo a una crescita del valore della corrente di ricircolo.

Interessante risulta anche l'andamento della tensione verso terra della sbarra negativa delle SSE, che si presenta in questo modo.

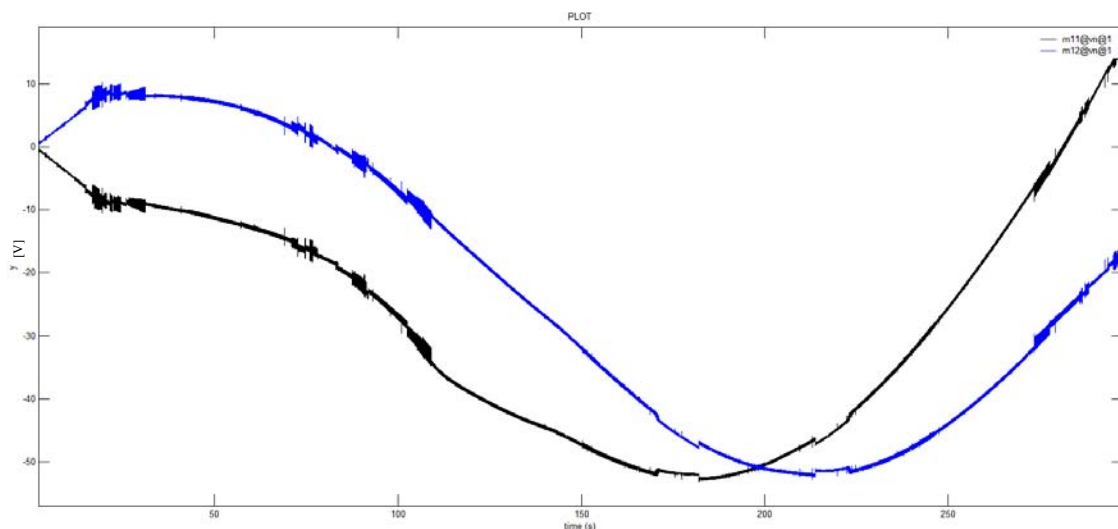


Figura 112 Andamento dei potenziali delle sbarre catodiche delle SSE m11: SSE di destra m12: SSE di sinistra

Dagli andamenti si deduce che solo quando il carico si trova in prossimità della SSE, allora il potenziale verso terra della sbarra catodica si porta a un valore leggermente positivo, mentre quando il treno si trova lontano, il potenziale assume valori negativi, permettendo il ritorno della corrente dispersa nel terreno. Il valore minimo della tensione raggiunto dalla sbarra è pari a -50 V e si registra in corrispondenza del passaggio per il centro tratta del convoglio.

Resta ora da esaminare solo l'andamento della caduta di tensione lungo la linea, che assume la seguente forma.

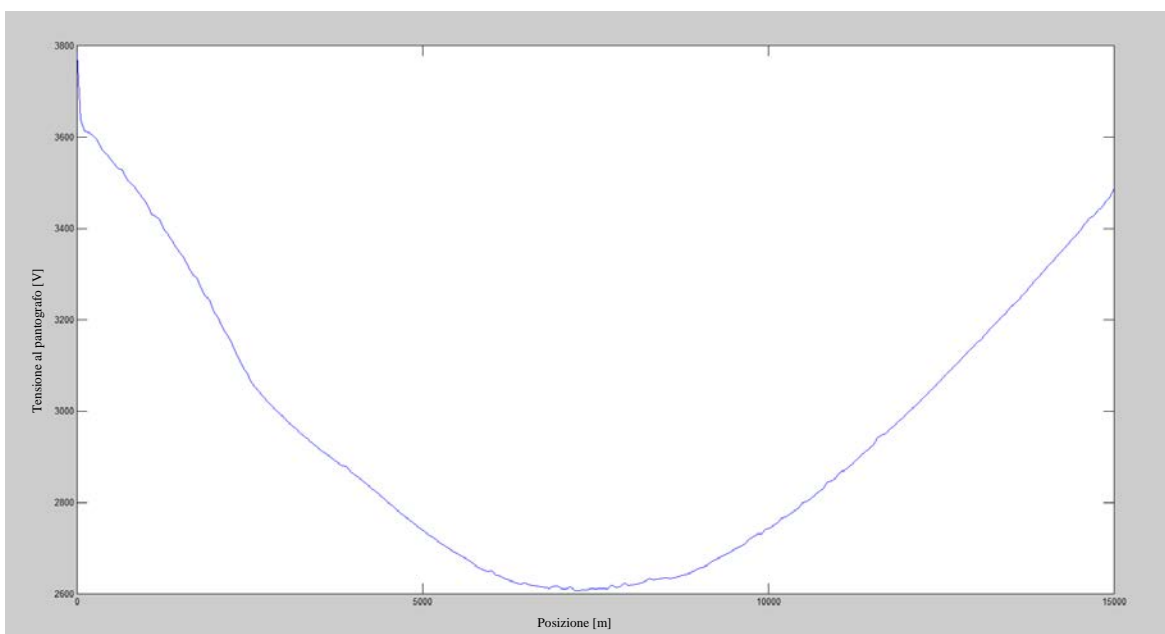


Figura 113 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea

Per la sua determinazione si è seguito il procedimento già analizzato nella verifica del modello utilizzato. La forma è simile a quella già vista in precedenza, ma non uguale, in quanto in questo caso il carico assorbe una corrente non costante per seguire il profilo di potenza imposto. Da notare è il valore minimo che assume la tensione della linea di contatto, pari a 2600 V, ancora compreso nei limiti imposti (+20 % e -33% della tensione nominale), ma già abbastanza ridotto per un funzionamento ottimale del treno. Per completezza si riporta di seguito anche l'andamento della tensione a metà tratta in funzione del tempo di simulazione.

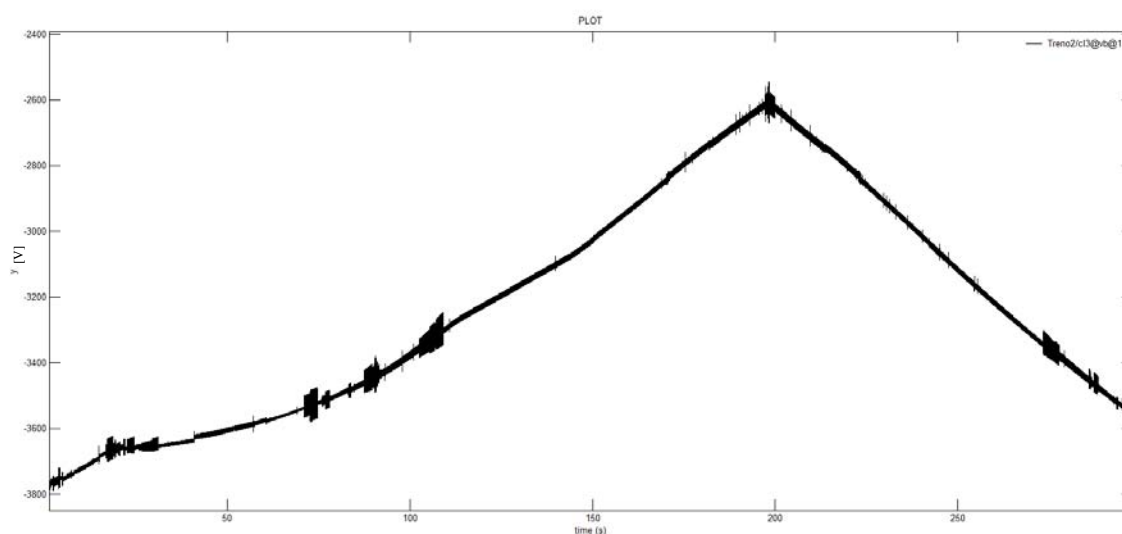


Figura 114 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

I valori assunti sono negativi a causa della diversa convenzione utilizzata per i dispositivi attivi e passivi. In questo caso è stata rilevata infatti la tensione ai capi del generatore di corrente pilotato, che viene gestito dal programma come un dispositivo attivo e quindi dotato della convenzione da generatore. In ogni caso si riscontra quanto già detto; la tensione assume il suo valore minimo in corrispondenza del passaggio da parte del carico nel centro tratta della linea, assumendo un valore pari a 2600 V.

Gli andamenti delle grandezze viste in questa simulazione presentano delle deformazioni locali, che si manifestano come un aumento del ripple della forma d'onda. Questo non è un fenomeno realmente esistente, ma causato da problemi nel settaggio delle opzioni di simulazione, soprattutto per quanto riguarda il passo di integrazione della soluzione. Per avere dei tempi di simulazione accettabili, si è infatti scelto un passo di integrazione abbastanza ampio che, in concomitanza con la presenza di armoniche nel circuito di alimentazione ferroviaria, genera dei fenomeni di risonanza locali. Per ottenere degli andamenti più puliti sarebbe necessario solo filtrare maggiormente la forma d'onda di tensione in uscita dalle SSE e diminuire il passo di integrazione. Inserendo infatti dei filtri risonanti in corrispondenza della seconda, dodicesima e ventiquattresima armonica in

cascata al gruppo raddrizzatore e impostando un passo di simulazione di $10 \mu\text{s}$, si ottiene il seguente andamento della tensione misurata a metà tratta.

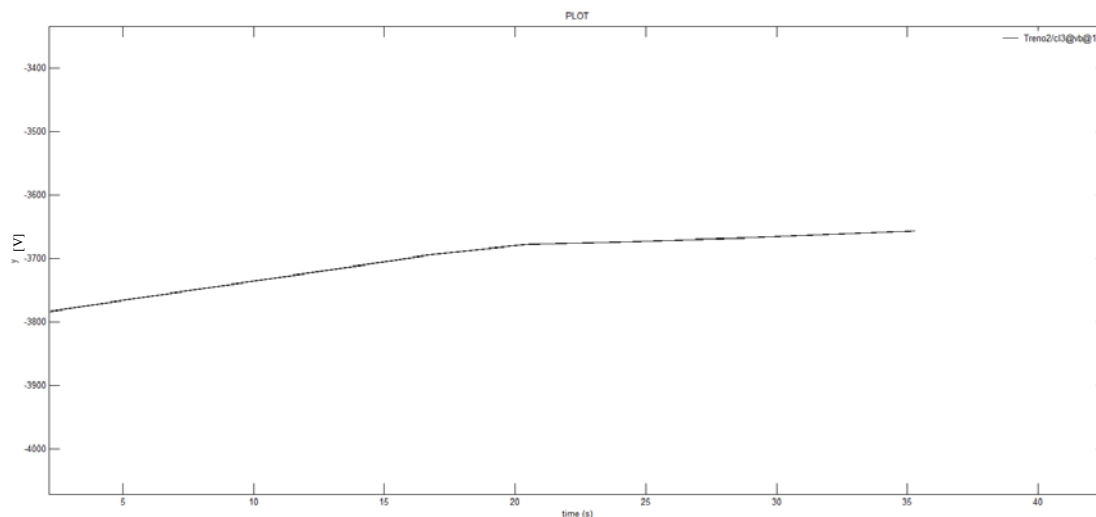


Figura 115 Particolare dell'andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

La simulazione è stata bloccata dopo 35 s, poiché solo una verifica di quanto appena esposto. Come si nota dal confronto con l'andamento sopra riportato, la forma d'onda risulta nettamente più pulita, ma il valor medio assunto rimane il medesimo. La scelta quindi di prediligere un tempo di simulazione più ridotto a discapito della precisione nella rappresentazione della forma d'onda sembra in questo senso ragionevole. Questo varrà in tutte le successive simulazioni, che presenteranno ovviamente le stesse deformazioni.

Caso B

Per migliorare il sistema dal punto di vista della caduta di tensione, si è effettuata una seconda simulazione dinamica, che prevede lo spostamento di un carico con i medesimi profili di velocità e potenza, su una linea a doppio binario che prevede, in questo caso, la messa in parallelo delle due linee di contatto a metà tratta. In analogia a quanto già fatto, si sono dovute avviare 10 simulazioni identiche per ottenere dei risultati successivamente elaborabili. Tutte le caratteristiche della simulazione sono rimaste invariate rispetto al caso precedente.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

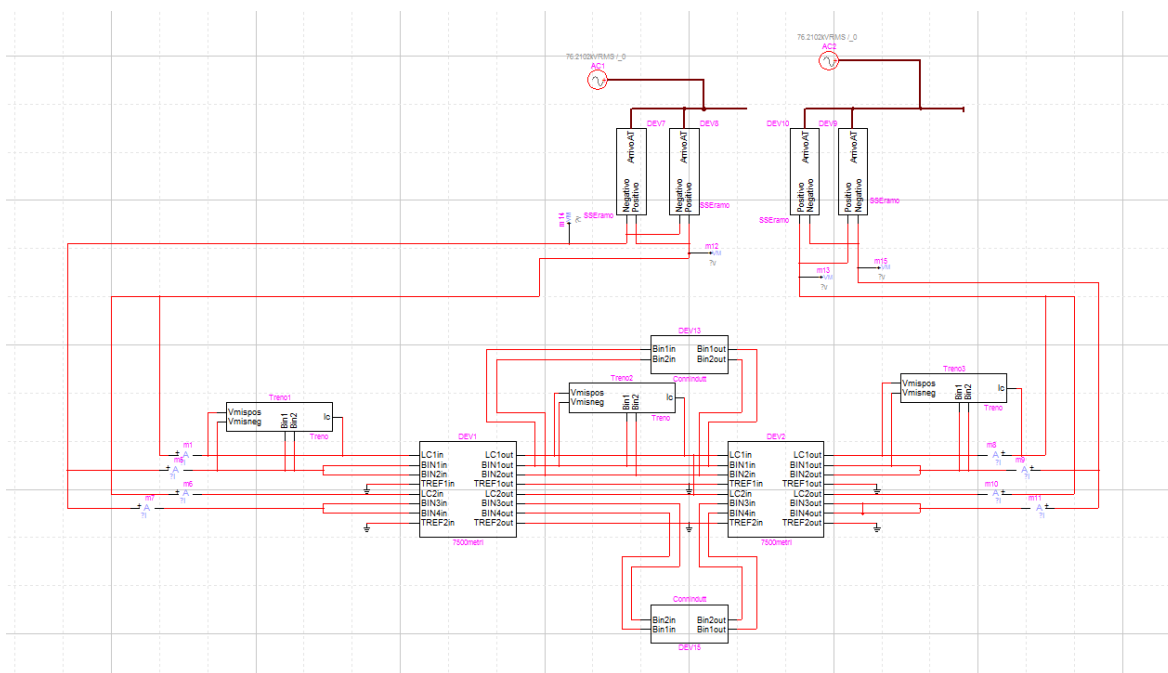


Figura 116 Modello utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente un solo carico e il posto di parallelo delle linee di contatto

Il collegamento in parallelo delle due linee è stato effettuato tralasciando le caratteristiche elettriche del conduttore che crea la connessione, realizzando quindi un corto circuito netto tra le due linee di contatto.

Si riportano di seguito gli andamenti delle tensioni erogate dalle due SSE.

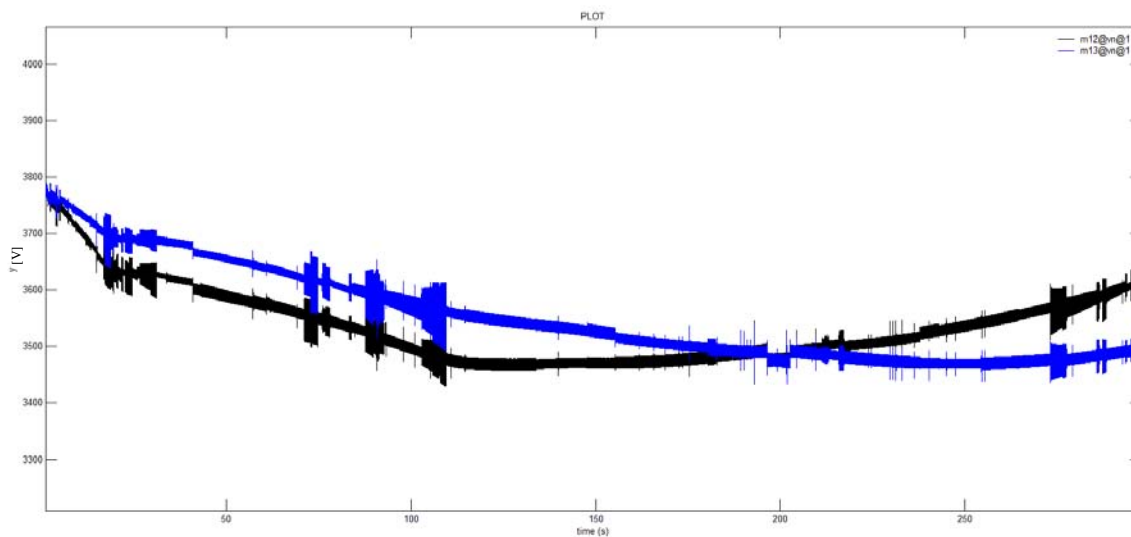


Figura 117 Andamento dei potenziali delle sbarre anodiche delle SSE m12: SSE di sinistra
m13: SSE di destra

In modo simile a quanto visto nella simulazione precedente, gli andamenti delle tensioni imposte dalle due SSE risultano essere differenti, generando correnti di ricircolo nel

sistema in esame. In questo caso però tutte le linee concorrono alla conduzione della corrente assorbita dal carico, e quindi risulta difficile l'individuazione dell'andamento della corrente di ricircolo.

Le correnti erogate dalle SSE si presentano invece nel modo seguente.

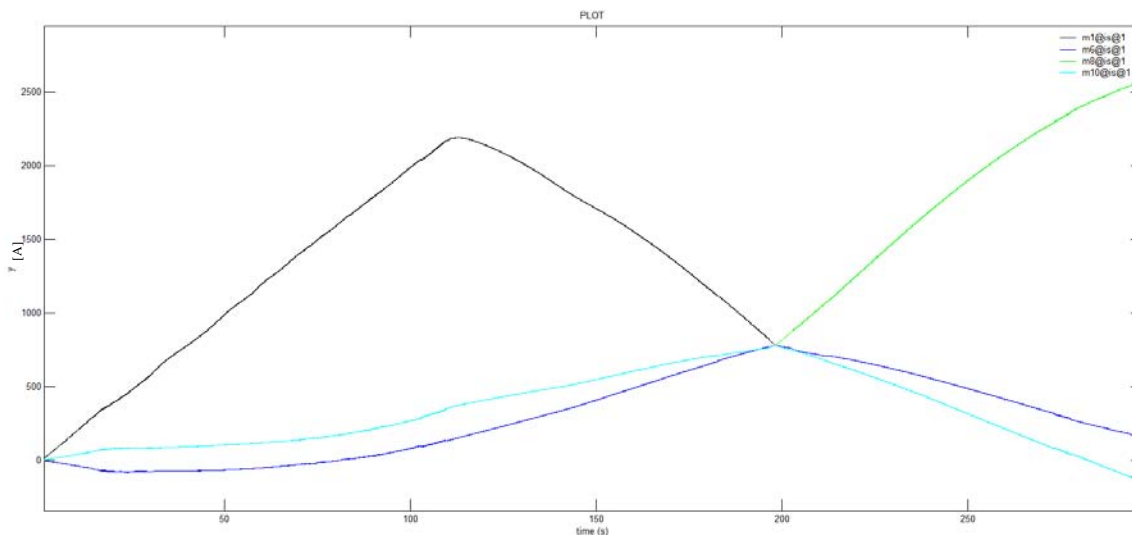


Figura 118 Correnti erogate dalle SSE

m1: SSE di sinistra su linea caricata
 m6: SSE di sinistra su linea non caricata
 m8: SSE di destra su linea caricata
 m10: SSE di destra su linea non caricata

Analizzando in primo luogo le correnti erogate dalla SSE di sinistra sulle due linee alimentate, si vede come la linea su cui insiste il carico è molto più caricata della linea messa in parallelo, che ha quindi solo una funzione di supporto alla conduzione della corrente. Nella prima parte della simulazione si può notare la presenza della corrente di ricircolo sulla seconda linea, che determina l'inversione del verso della corrente sul conduttore in esame. L'andamento della corrente erogata sulla linea caricata è invece simile a quello già visto nel caso precedente, ma i valori sono di molto diminuiti, migliorando conseguentemente il profilo di tensione sulla tratta analizzata. Esaminando anche le correnti erogate dalla SSE di destra, si riconosce un andamento simile nella linea caricata a quanto visto nella simulazione precedente. Anche le correnti erogate dalle due SSE sulla linea non caricata sono molto simili, assumendo il valore massimo in corrispondenza del passaggio del carico per il centro tratta.

Le tensioni dei negativi delle SSE si presentano invece nel modo seguente.

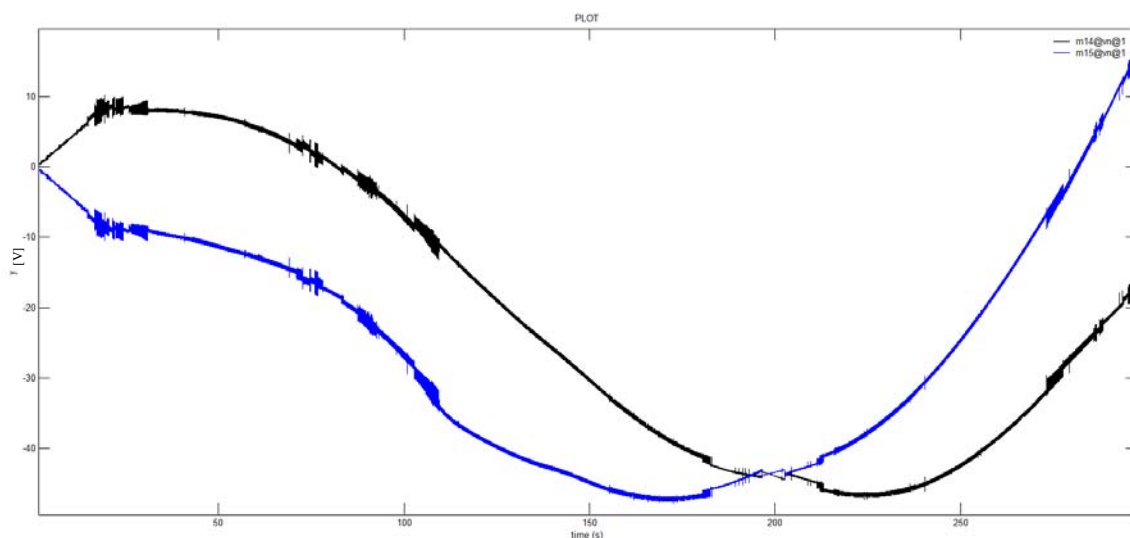


Figura 119 Andamento dei potenziali delle sbarre catodiche delle SSE **m15: SSE di destra**
m14: SSE di sinistra

Anche in questo caso non si notano grandi differenze nell'andamento rispetto alla simulazione precedente. Solo i valori assunti risultano essere leggermente inferiori (non si raggiungono mai i -50 V di potenziale verso terra).

Rimane da analizzare l'andamento della caduta di tensione lungo la linea, che si presenta in questo modo.

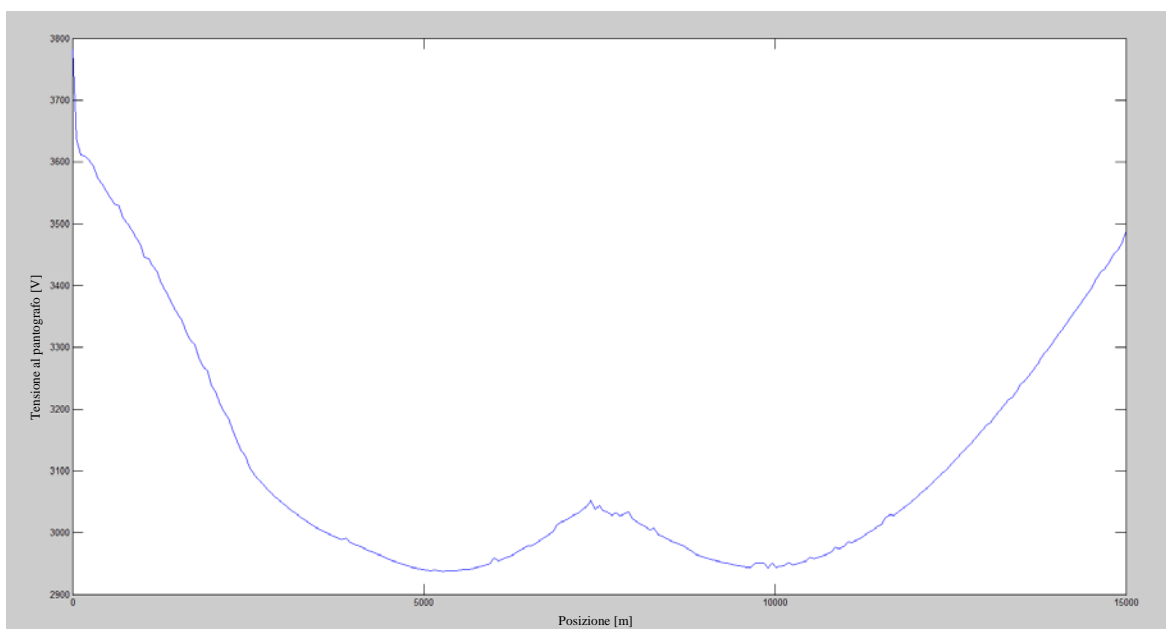


Figura 120 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata

L'andamento è molto simile a quello ottenuto nella verifica del modello con il parallelo delle linee di contatto. Si nota come il massimo della caduta di tensione sia collocato a un terzo e due terzi della tratta, assumendo però valori decisamente più alti rispetto alla

simulazione precedente (la tensione non scende mai sotto i 2940 V). In questo senso la messa in parallelo delle linee di contatto risulta un espediente molto efficace, soprattutto per alzare il valore della tensione presente a metà tratta, come emerge dalla figura seguente.

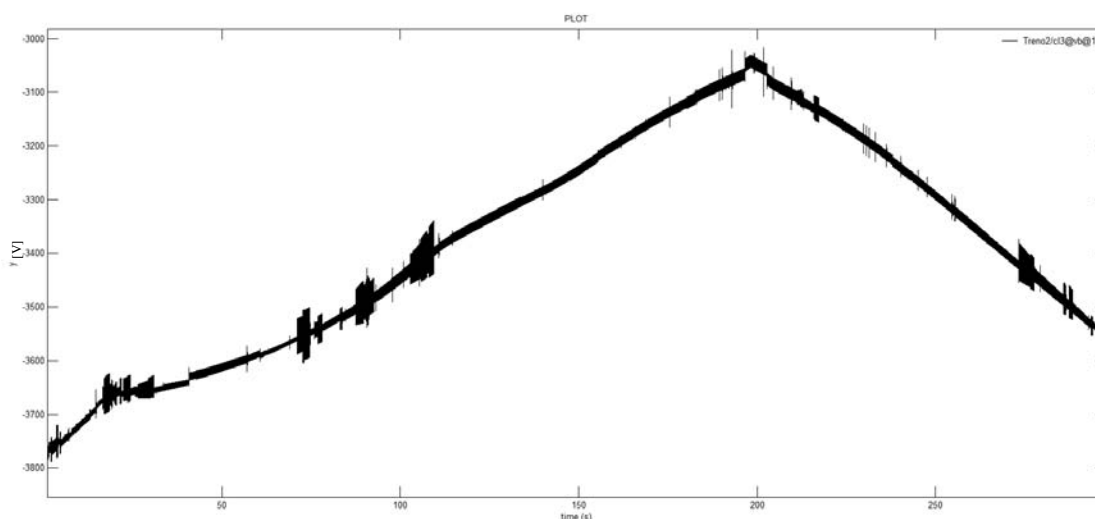


Figura 121 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

Si vuole ora analizzare il caso in cui la tratta presenti più di un carico, al fine di esaminare l'effetto di un sovraccarico importante delle SSE e delle linee esistenti. Si eseguirà quindi una terza simulazione, nella quale le linee di contatto non saranno collegate in parallelo a metà tratta, e una quarta, invece, dove è previsto questo accorgimento tecnico.

Caso C

La terza simulazione sul modello presentato prevede la presenza di due carichi con lo stesso profilo di velocità e potenza ma viaggianti in direzione opposte. È stato necessario adottare in questo caso il modello semplificato del treno, che prevede un solo “v(t) probe”, che rileva la tensione solo sulla linea di contatto, al fine di ridurre il numero di dispositivi utilizzati. Ovviamente anche gli script impiegati per settare i generatori di corrente sono stati modificati per controllare in modo indipendente i due carichi in movimento.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

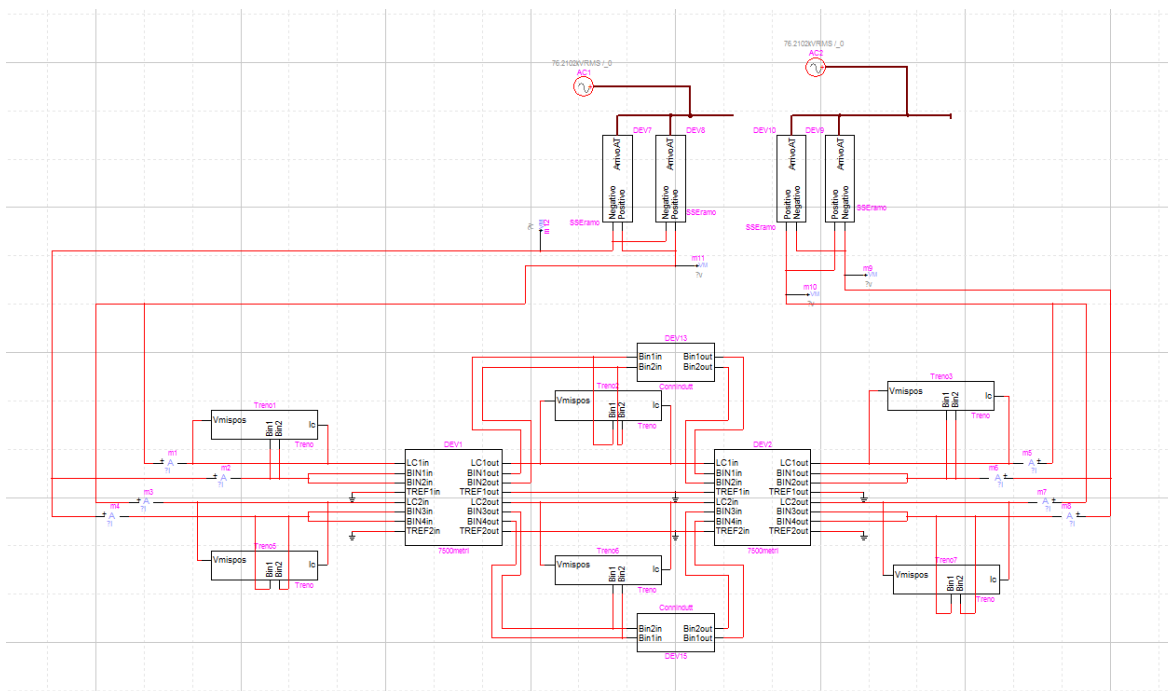


Figura 122 Modello utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente due carichi

Interessanti risultano gli andamenti delle tensioni erogate dalle due SSE, riportati di seguito.

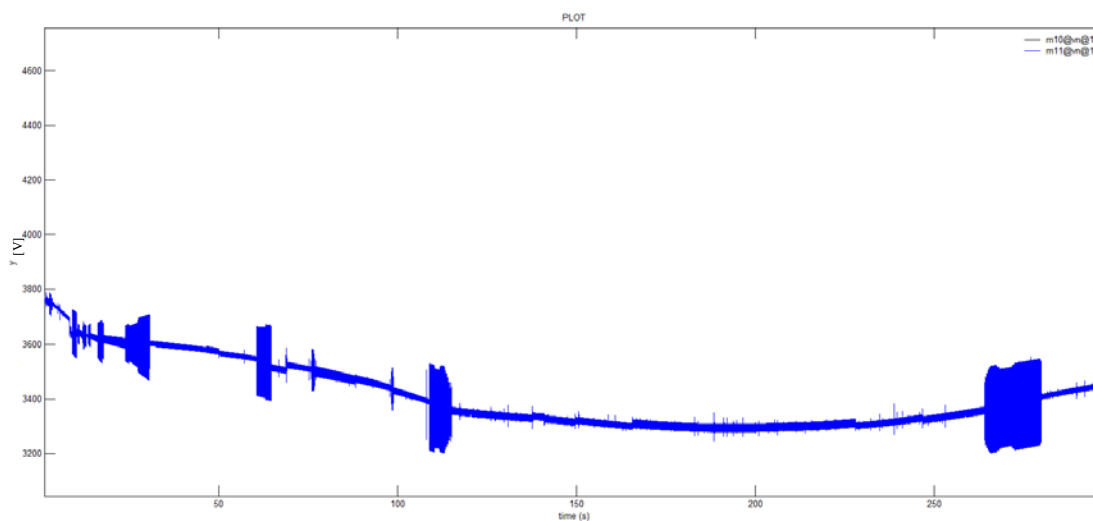


Figura 123 Andamento dei potenziali delle sbarre anodiche delle SSE m10: SSE di sinistra
m11: SSE di destra

In questo caso le tensioni imposte dalle SSE sono perfettamente uguali. I carichi infatti sono perfettamente speculari, facendo erogare dalle SSE il medesimo profilo di corrente e causando quindi la medesima caduta di tensione interna. Non si avrà in questo caso nessuna corrente di ricircolo tra le linee alimentate dalle SSE. Si nota come, a causa della presenza di due carichi, le tensioni erogate assumano valori inferiori (intorno ai 3300 V)

rispetto alle simulazioni precedenti (dove le tensioni non sono scese mai sotto i 3500 V). Questo fatto, assieme alle correnti abbastanza importanti che percorrono le linee, determinerà delle cadute di tensioni superiori rispetto ai casi precedenti.

Di interesse risultano anche i profili di corrente erogati dalle SSE.

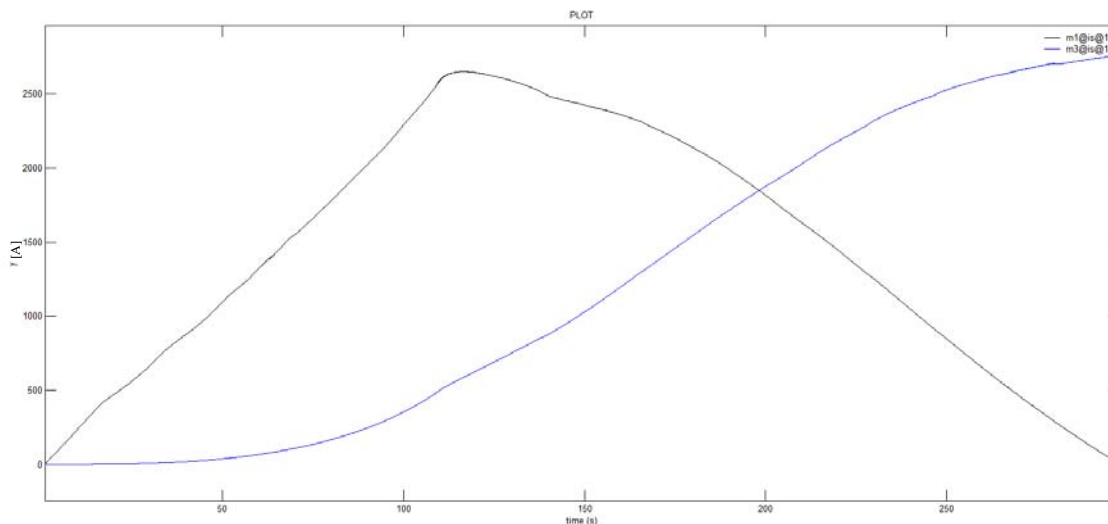


Figura 124 Correnti erogate dalle SSE **m1: SSE di sinistra**
m3: SSE di destra

Osservando gli andamenti delle correnti erogate dalle SSE di sinistra sulle due linee, si riconoscono quelli già visti nella prima simulazione. Le differenze però stanno nei valori assunti dalle correnti, più elevati in questo caso. Le ragioni di questa diversità sono due: la prima sta nel fatto che il modello di treno utilizzato è più semplice rispetto a quello utilizzato nella prima simulazione dinamica e non rileva la vera tensione tra linea di contatto e binario, ma solo il potenziale del conduttore di alimentazione verso la terra lontana. Il secondo motivo risiede nelle maggiori cadute di tensione che si verificano sulla linea, che determinano un maggior assorbimento di corrente per rispettare il vincolo del profilo di potenza imposto. Le correnti erogate dalla SSE di destra presentano lo stesso andamento, ma sono ovviamente invertite rispetto a quella di sinistra, dato che i treni assorbono un profilo di potenza identico, ma viaggiano in direzioni opposte.

Interessante risulta anche l'andamento delle tensioni della sbarra negativa delle SSE, riportato di seguito.

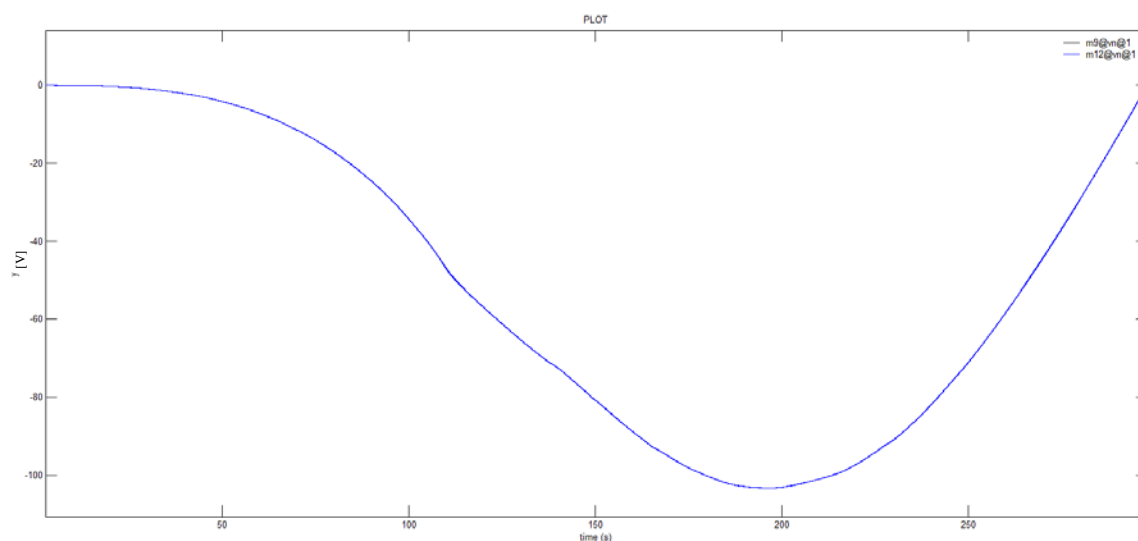


Figura 125 Andamento dei potenziali delle sbarre catodiche delle SSE m9: SSE di destra
m12: SSE di sinistra

Come si nota, le tensioni presentano il medesimo andamento, data la simmetria del sistema in esame. Si riscontrano in questo caso valori decisamente inferiori rispetto alle simulazioni precedenti (il potenziale verso terra raggiunge i -100 V in corrispondenza del passaggio del convoglio per il centro tratta), sintomo di una più marcata dispersione di corrente nel suolo.

Rimane da analizzare l'andamento della caduta di tensione sulle due linee, che si presenta in questo modo.

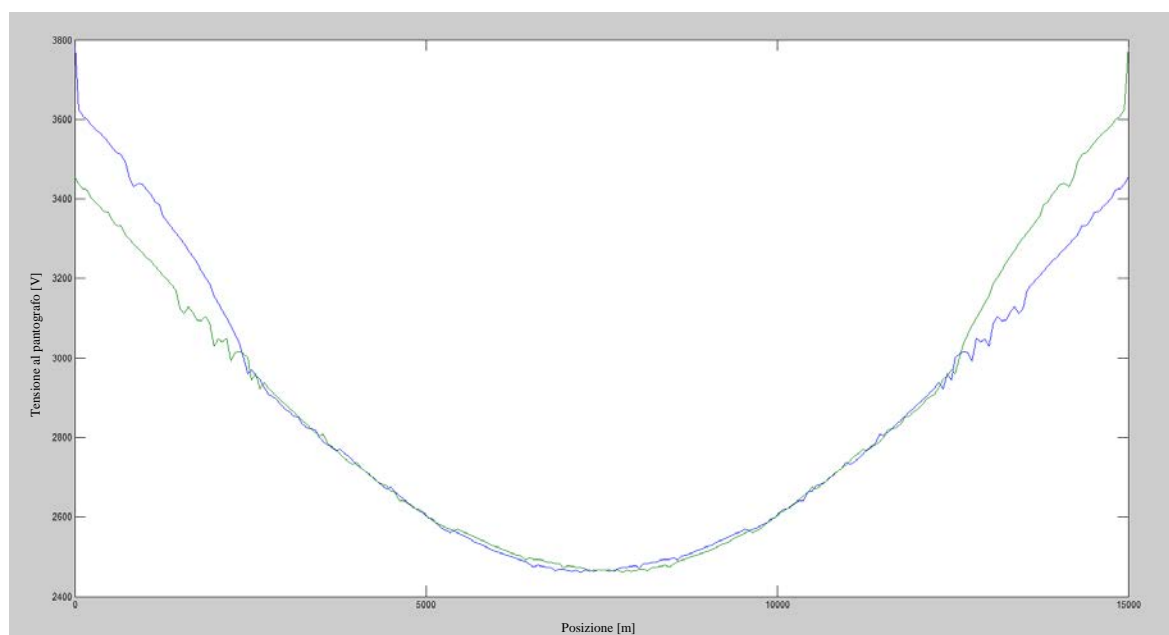


Figura 126 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata blu: treno da sinistra
verde: treno da destra

Come si nota, l'andamento della caduta di tensione sulle due linee è speculare e risulta molto simile a quello già incontrato nella prima simulazione dinamica. La differenza sostanziale risiede però nel valore minimo che la tensione assume nel momento in cui il treno passa per il centro della tratta analizzata, che risulta essere inferiore ai 2500 V. Inoltre per buona parte del percorso la tensione al pantografo risulta essere inferiore ai 2700 V, determinando una qualità dell'alimentazione ferroviaria abbastanza scarsa. Di seguito si riporta l'andamento della tensione misurata a metà tratta durante la simulazione, per evidenziare la massima caduta di tensione che si registra. I valori sono negativi in quanto, come già spiegato in precedenza, la misura viene fatta ai capi del generatore di corrente pilotato.

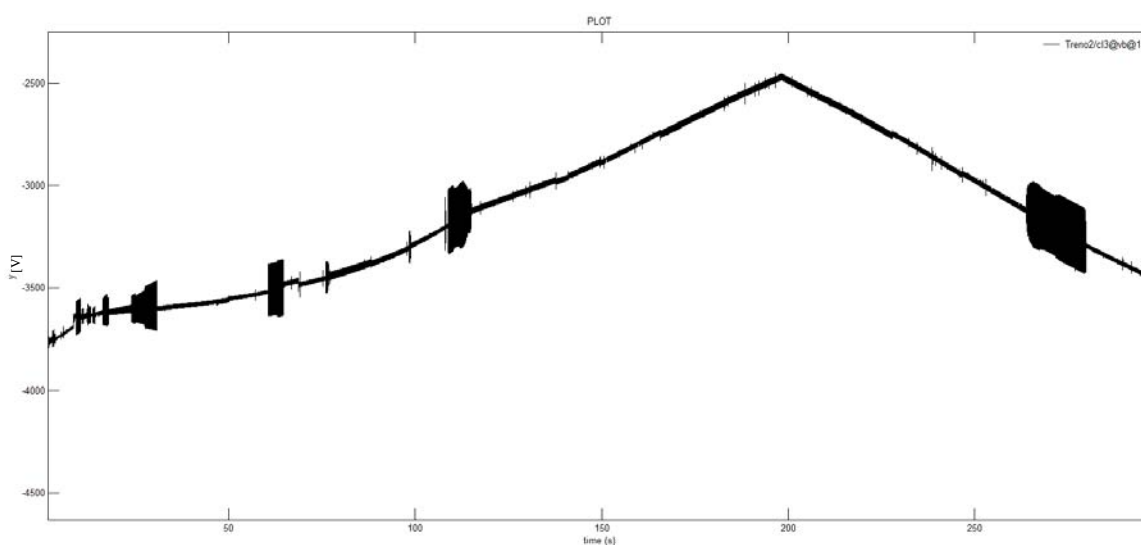


Figura 127 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

Caso D

Come fatto nelle simulazioni che prevedevano la presenza di un solo carico, si è pensato di migliorare il profilo della caduta di tensione effettuando il collegamento in parallelo delle due tratte ferroviarie. Il modello utilizzato è quindi del tutto simile a quello appena presentato, ma con l'integrazione del posto di parallelo a metà tratta. Anche le opzioni di simulazione e gli accorgimenti per ottenere dei risultati successivamente elaborabili sono gli stessi già utilizzati.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

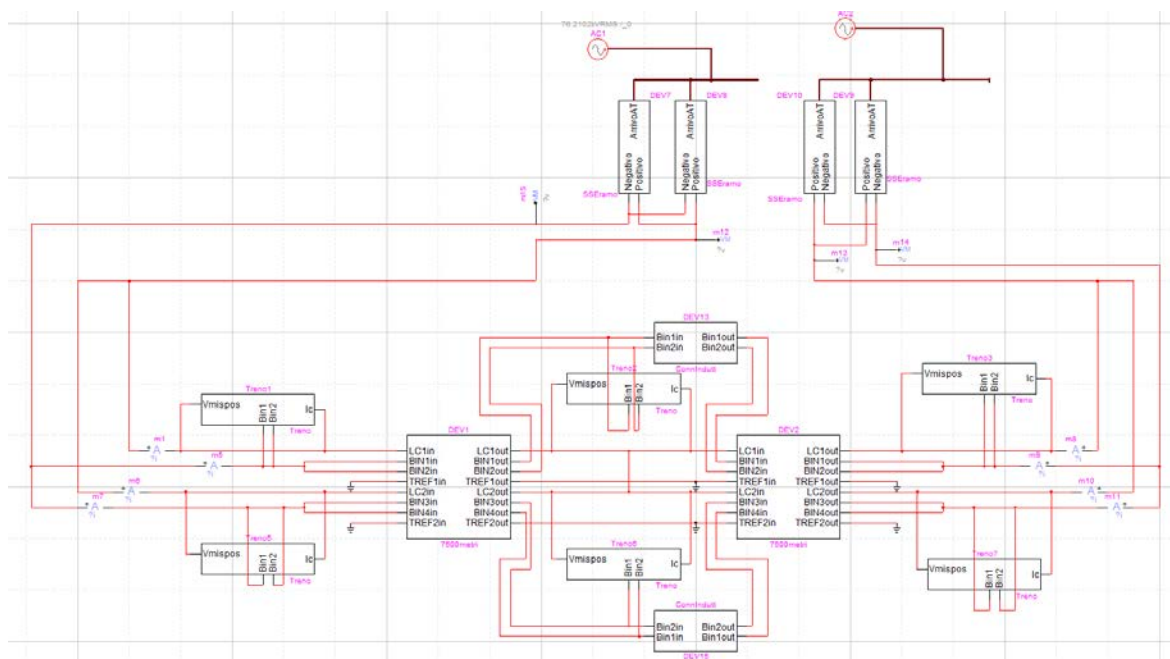


Figura 128 Modello utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente due carichi e posto di parallelo a metà tratta

Si riportano di seguito gli andamenti delle tensioni erogate dalle due SSE.

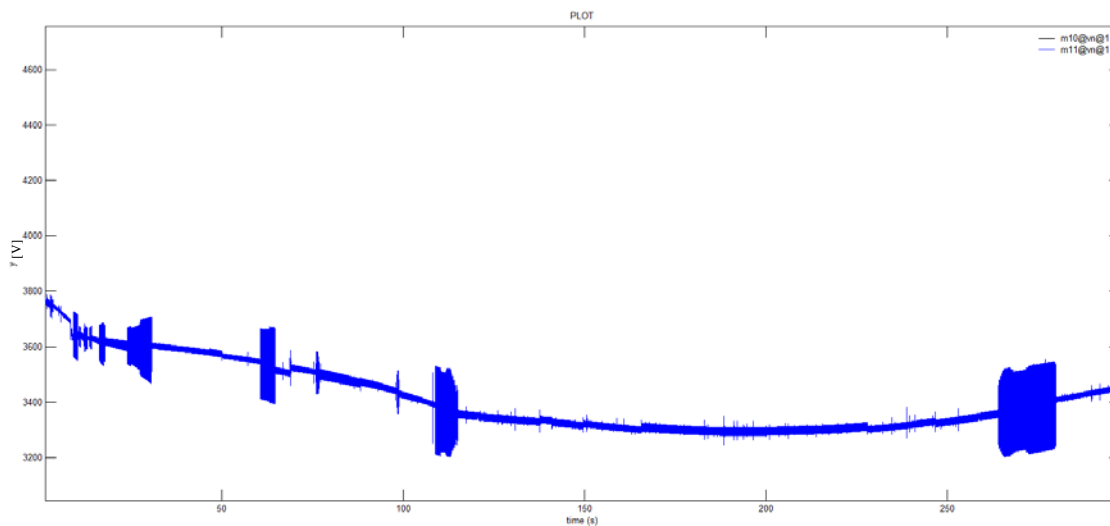


Figura 129 Andamento dei potenziali delle sbarre anodiche delle SSE **m10: SSE di sinistra**
m11: SSE di destra

Si nota che gli andamenti delle due tensioni sono esattamente identici tra di loro, a causa della perfetta simmetria che si riscontra nei carichi presenti. Da un confronto con la simulazione precedente si nota anche un perfetto accordo con gli andamenti ottenuti in precedenza. Questo non vale solo per le tensioni erogate dalle SSE, ma per tutti le grandezze di interesse. La simmetria nei carichi rende infatti superfluo il collegamento in parallelo, facendo sembrare le due tratte completamente indipendenti. Questo giustifica il

fatto che tutti i risultati ottenuti sono identici a quelli già incontrati nella simulazione precedente. Il collegamento in parallelo risulta quindi efficace nel caso, quasi sempre verificato, di dissimmetria nei carichi che interessano le due linee.

Per completezza si riporta di seguito il profilo della caduta di tensione delle due tratte analizzate, che risulta identico a quello ottenuto nella simulazione precedente.

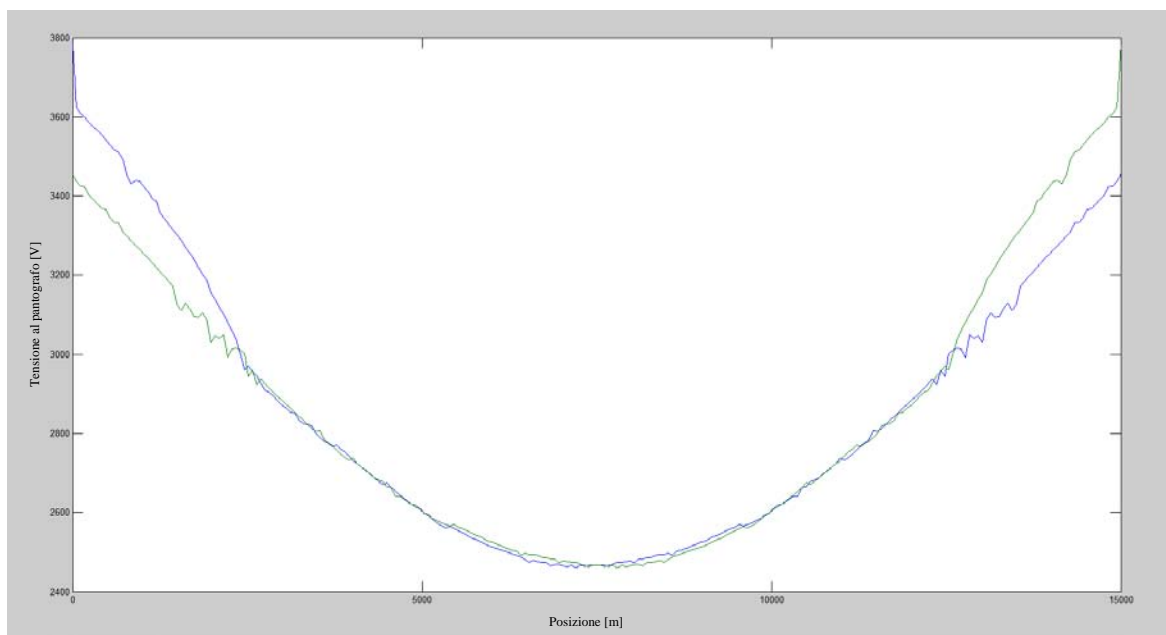


Figura 130 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata

blu: treno da sinistra
verde: treno da destra

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

8. La nuova proposta: il sistema di alimentazione 2×3 kV

Le simulazioni effettuate sul modello relativo allo stato attuale del sistema elettrico ferroviario italiano hanno portato in evidenza le criticità del sistema, soprattutto in previsione a un aumento della potenzialità delle linee esistenti. Le cadute di tensione, soprattutto verso il centro della tratta alimentata dalle SSE, risultano essere troppo importanti perché garantiscano una buona qualità dell'alimentazione dei convogli. Per questo motivo si vuole cercare una soluzione che faccia aumentare la potenzialità delle linee, senza però andare a stravolgere completamente l'infrastruttura ferroviaria esistente.

Prendendo spunto dal sistema Alta Velocità/Alta Capacità in fase di costruzione, si vuole cercare di applicare lo stesso principio di funzionamento alle tratte tradizionali alimentate in corrente continua a 3 kV, come fatto in [21] e [22]. Il sistema prevederà, quindi, non più un solo complesso di conduttori dedicato all'alimentazione dei convogli, ma due sistemi di conduttori distinti: uno esercito a +3 kV, sempre responsabile dell'alimentazione dei treni e il secondo esercito a -3 kV, riservato invece solo al trasporto dell'energia elettrica. Diverso risulterà quindi il collegamento del circuito di alimentazione ferroviaria ai gruppi convertitori. Il feeder positivo sarà sempre collegato al positivo della sbarra in SSE, mentre alla sbarra catodica sarà collegato il feeder negativo e non più il circuito di ritorno delle correnti di linea. Affinché i conduttori vengano eserciti rispettivamente a +3 kV e -3 kV, il ponte raddrizzatore non potrà più prevedere il collegamento in parallelo dei due rami, che saranno connessi quindi in serie. Il binario viene quindi connesso al centro dei due ponti di Graetz del circuito raddrizzatore, che non risulterà più della tipologia dodecafase, ma esafase, con aumento delle armoniche nel circuito di alimentazione. Fondamentale per il corretto funzionamento del sistema risulterà la presenza di un punto di conversione statica, che ricoprirà la funzione degli autotrasformatori utilizzati nel sistema 2×25 kV. Il convertitore statico ha quindi la funzione di permettere lo scambio di energia tra i due feeder, svolgendo il ruolo di una sorta di trasformatore elettronico di potenza.

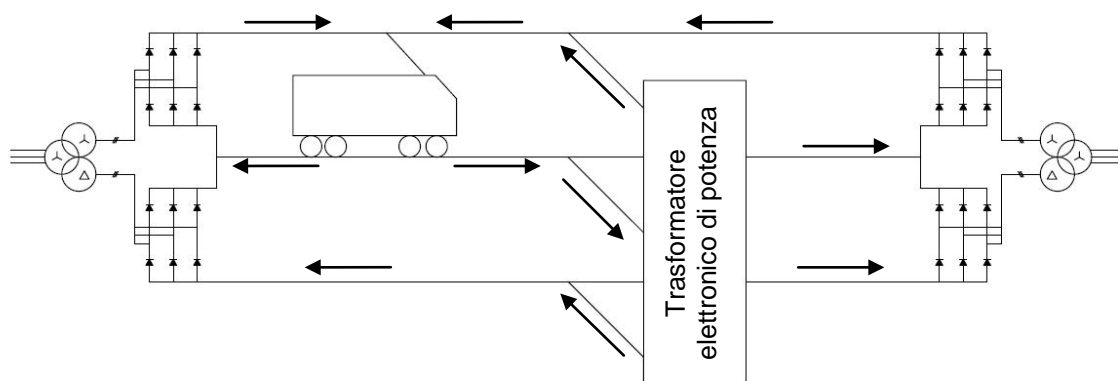


Figura 131 Schema del nuovo sistema di alimentazione proposto con in evidenza il verso delle correnti

Il sistema consente il trasporto di parte dell'energia a una tensione superiore (+6 kV totali), rispetto al sistema tradizionale, riducendo conseguentemente le cadute di tensione sulla linea di contatto. Parte della corrente di alimentazione percorrerà infatti il feeder negativo al posto della linea di contatto. Il punto di conversione statica può poi essere comandato in modo tale da controllare alcuni parametri relativi alla linea di contatto, come la tensione a metà tratta o la corrente erogata dalle SSE. In questo modo è possibile aumentare la potenzialità della linea, in relazione alle possibilità del convertitore statico di potenza, senza pregiudicare la qualità dell'alimentazione dei convogli.

8.1. La costruzione dei modelli

Per lo sviluppo del modello riprodotto il sistema appena presentato si è preso come riferimento quello utilizzato nelle simulazioni già completate e validate. Nessuna modifica è stata apportata alla sezione di alta tensione e quindi le configurazioni delle linee primarie e del trasformatore di potenza risultano essere identiche a quella già utilizzate.

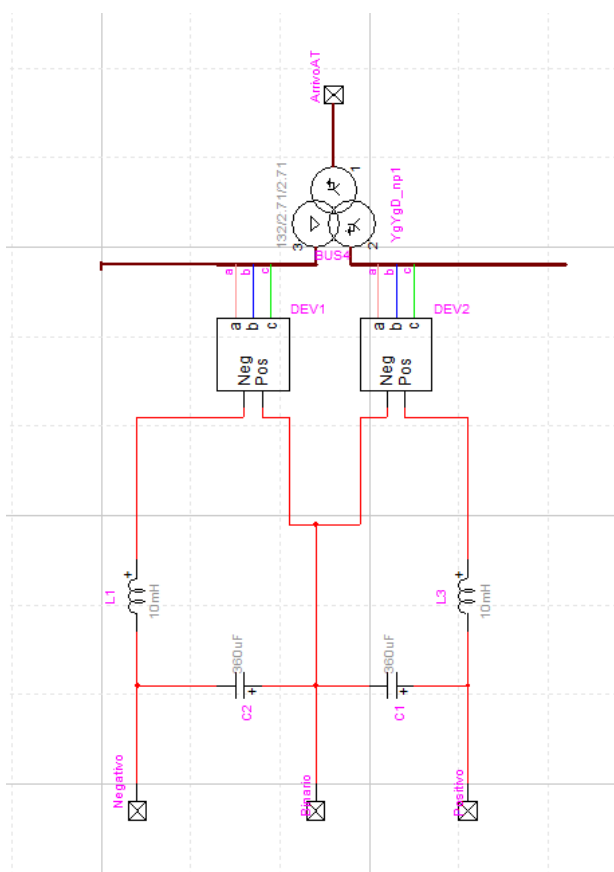


Figura 132 Struttura di un gruppo di conversione del nuovo sistema di alimentazione costruito con EMTP-RV

Per quanto riguarda la SSE, a parte le modifiche già descritte riguardanti il collegamento dei ponti raddrizzatori, la cui realizzazione rimane invariata, è da sottolineare l'inserzione di un doppio filtro passa basso, uno relativo al feeder positivo e il secondo relativo al feeder negativo. Il valore della capacità è rimasto pari a 360 μ F, mentre il valore dell'induttanza è stato aumentato a 10 mH, in modo tale da filtrare maggiormente le armoniche di tensione generate dal gruppo raddrizzatore. L'inserzione di un filtro anche sul lato del feeder negativo è stato necessario per evitare l'insorgere di fenomeni di risonanza che portavano ad avere un ripple di tensione troppo importante.

Anche i collegamenti della SSE con il circuito di alimentazione ferroviaria sono rimasti identici al modello utilizzato nelle simulazioni precedenti, prevedendo quindi 2 conduttori in rame in parallelo per l'alimentazione sia dei feeder positivi

che di quelli negativi.

Completamente nuova è stata invece la costruzione del modello della linea di alimentazione dei convogli, la quale è comunque stata costruita secondo il metodo multiconduttore, con celle sempre della lunghezza di 60 m. La tratta simulata è sempre a doppio binario, con un distanziamento delle SSE pari a 15 km. In analogia a quanto fatto con il modello usato precedentemente, è stato in primo luogo sviluppato il modello della singola cella. A differenza del caso precedente, i conduttori sono 10, tenendo infatti conto anche della presenza dei due feeder negativi. Le caratteristiche di questo conduttore sono state definite per analogia al sistema Alta Velocità/Alta Capacità. Il sistema di corde utilizzato risulta quindi essere composto da conduttori aventi un'anima in acciaio con mantello in alluminio. La sezione complessiva, ricavata in modo proporzionale al sistema 2×25 kV, risulta essere pari 628.6 cm², presentando quindi una resistenza chilometrica di 0.04598 Ω/km. Anche in questo caso si è semplificato il modello della cella, considerando un unico conduttore equivalente al posto del sistema di corde del feeder. Le caratteristiche della linea di contatto e del trefolo di terra sono invece identiche a quelle già viste nel modello utilizzato in precedenza. La disposizione dei conduttori segue i dati riportati nella tabella seguente.

Tabella 22 Disposizione dei conduttori costituenti la linea di contatto e i collegamenti equipotenziali

Conduttore	Altezza dal suolo sul sostegno (m)	Altezza dal suolo a metà campata (m)	Distanza dall'asse di riferimento (m)
Linea di contatto 1	5.20	5.20	2
Trefolo 1	5	4.3	5.12
Feeder negativo 1	6	6	5.12
Linea di contatto 2	5.20	5.20	-2
Trefolo 2	5	4.3	-5.12
Feeder negativo 2	6	6	-5.12

Anche le caratteristiche del circuito di ritorno risultano invariate, prevedendo sempre la presenza delle connessioni induttive poste a intervalli di 1500 m.

Completamente nuova risulta la realizzazione del trasformatore elettronico di potenza (TEP), installato a metà della tratta considerata.

Non ci si è concentrati tanto sull'aspetto circuitale del dispositivo, quanto più sul principio di funzionamento. Il comportamento risulta in questo senso molto simile a un doppio chopper reversibile, in grado di trasferire energia dal feeder negativo a quello positivo, sostenendo quindi la tensione e partecipando all'alimentazione del convoglio. In estrema sintesi, la struttura del chopper reversibile consta di due banchi di condensatori, due interruttori di potenza controllati ai quali sono collegati in parallelo 2 diodi di free-wheeling, e un reattore connesso tra il punto centrale dei due interruttori statici e il binario.

Un interruttore è collegato alla linea a +3kV e uno è collegato alla linea a -3kV, realizzando il trasferimento di energia dai condensatori del banco alimentato a -3kV verso i condensatori del banco alimentato a +3kV attraverso un opportuno comando degli interruttori.

Per simulare il comportamento del convertitore di potenza in termini medi, sono stati inseriti due generatori di corrente pilotati, analoghi a quelli utilizzati per la realizzazione dei carichi nelle simulazioni di tipo dinamico effettuate prima. I generatori erogano corrente verso i feeder positivo e negativo, essendo entrambi collegati al binario. L'entità della corrente da erogare viene comandata da un controllo che, analizzando lo stato della grandezza in ingresso (una tensione, una corrente o altro), gestisce il trasformatore elettronico di potenza in modo tale da soddisfare i vincoli voluti.

Sono state sviluppate due tipologie di controllo diverso: la prima gestisce il punto di conversione statica in modo tale che la tensione a metà tratta non scenda mai sotto i 3000 V, mentre la seconda verifica che la corrente erogata dalle SSE sulla linea di contatto non superi mai i 1500 A.

La prima tipologia di controllo si compone di due oggetti "v(t) probe", in grado di rilevare la tensione rispettivamente della linea di contatto e del binario a metà tratta. Si ricava quindi per differenza la tensione di linea effettivamente presente al centro della linea, la quale viene successivamente filtrata per eliminare il ripple dal segnale che potrebbe portare all'instabilità del controllo. Si confronta quindi il valore misurato con il riferimento di 3000 V impostato. Se la tensione risulta superiore al valore di riferimento, allora il controllo non agisce, mentre se scende sotto la soglia dei 3000 V, allora il controllore PI comanda i generatori in modo tale da riportare la tensione entro il limite voluto. Da notare che il controllo deve dare ai generatori di corrente solo dei valori positivi di comando, e spegnersi quando la tensione risale autonomamente al di sopra del limite impostato. Per questa ragione è stato inserito un dispositivo limitatore in uscita al controllore PI, in grado di limitare i segnali di controllo ai soli valori positivi. Il dispositivo "PI controller" è stato settato in modo tale da avere una risposta più rapida possibile, riuscendo quindi a seguire in modo abbastanza preciso le variazioni del segnale in ingresso. Un timer è stato inserito infine per rendere il dispositivo insensibile nei primi secondi di simulazione, nei quali il sistema raggiunge le condizioni di regime.

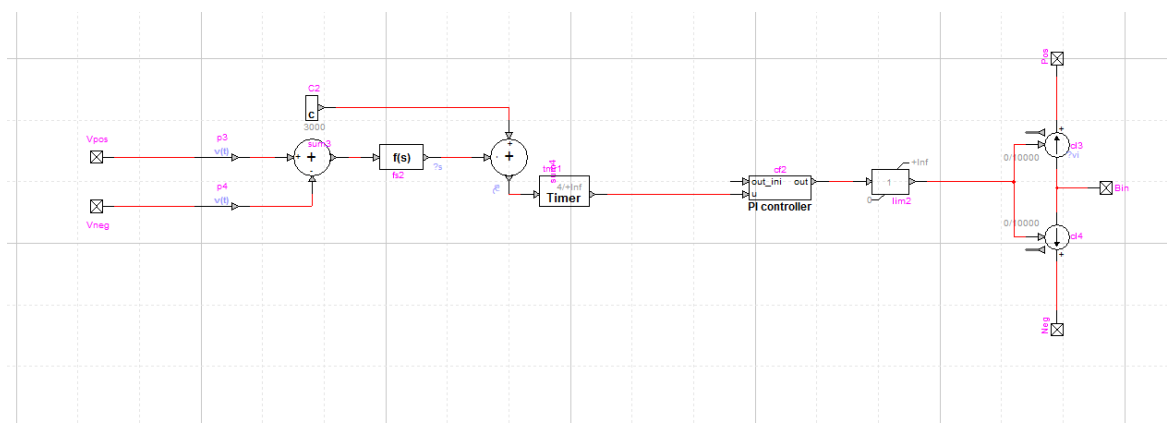


Figura 133 Struttura del trasformatore elettronico di potenza controllato in tensione costruito con EMTP-RV

È stato poi sviluppato un secondo sistema di controllo, che regola la corrente erogata dalle SSE sulla linea, impedendone quindi il sovraccarico. Il valore limite imposto è pari a 1500 A. Il controllo si compone di due dispositivi “i(t) probe” che, inseriti in serie alla linea di contatto uscente dalla SSE, sono in grado di rilevare la corrente transitante nella stessa e fornire un segnale di controllo pari al valore della corrente misurata. Sono stati inseriti quindi ai due estremi della linea di contatto e il segnale da loro prodotto è stato successivamente trattato con l’utilizzo di un filtro passa basso LC, sempre per scongiurare il possibile verificarsi dell’instabilità del sistema. Il segnale viene poi confrontato con il limite previsto e, in caso risultasse superiore a questo, il controllore PI si attiva per riportarlo nel range di valori previsto. Anche in questo caso i valori possibili per il segnale di controllo dei generatori sono solo positivi e per questo è stato posto un limitatore a valle del controllore PI. Le correnti transittanti sui due estremi della linea vengono trattate e controllate in modo indipendente e solo in seguito i segnali di controllo vengono sommati per comandare il trasformatore elettronico di potenza. In questo modo quando una delle due correnti di linea supera il valore previsto, il controllo si attiva e parte della potenza richiesta dal carico comincia a transitare sul feeder negativo. Sono stati inseriti anche in questo caso due timer per rendere insensibile il controllo nei primi secondi di simulazione.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

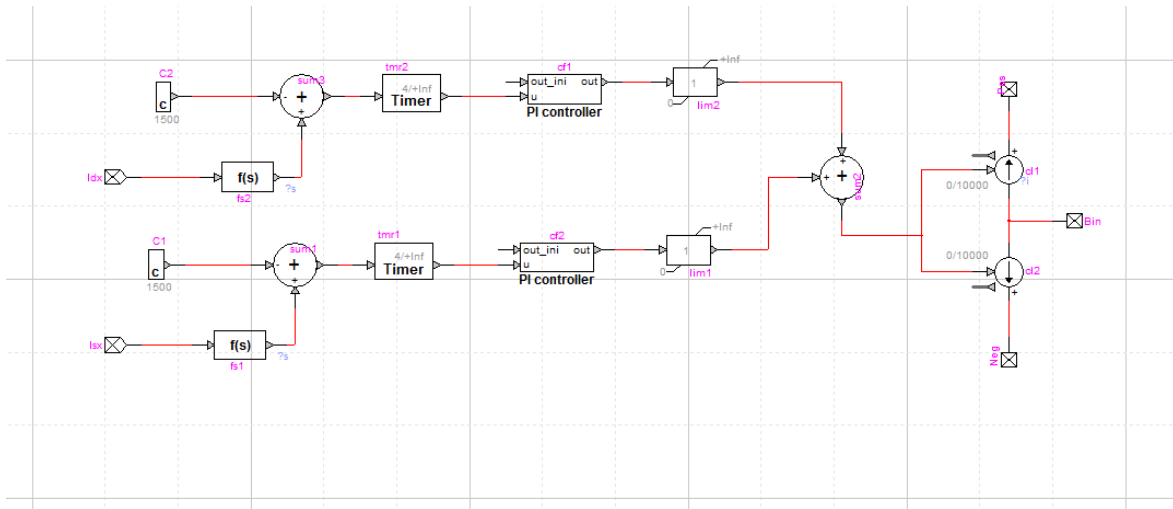


Figura 134 Struttura del trasformatore elettronico di potenza controllato in corrente costruito con EMTP-RV

In modo simile al caso precedente sono stati sviluppati diversi modelli, per riuscire a eseguire sia simulazioni di tipo statico, sia di tipo dinamico. Nelle simulazioni di tipo statico il carico è stato modellizzato come una resistenza di valore pari a 1Ω o 2Ω . Solo

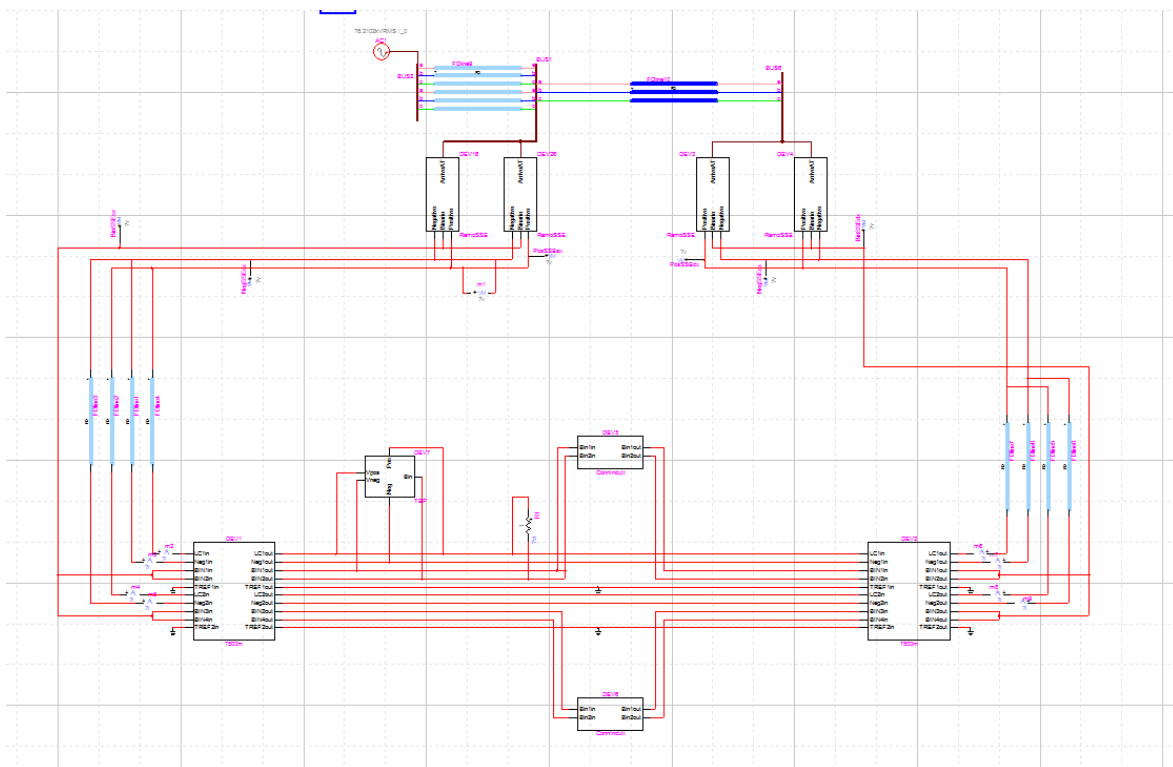


Figura 135 Modello a due sole SSE utilizzato nella simulazione di tipo statico del nuovo sistema di alimentazione (provvisto di TEP controllato in tensione)

nei modelli in cui è previsto l'utilizzo del trasformatore elettronico di potenza controllato in corrente, il valore è stato ridotto a 0.75Ω , per mettere in evidenza l'effettivo funzionamento del posto di conversione statica. Per ottenere dei risultati confrontabili con quelli conseguiti col modello riprodotto lo stato attuale del sistema ferroviario, sono stati

sviluppati due modelli diversi: il primo comprendente due sole SSE, alimentate solo da un lato dalla rete di trasmissione nazionale e collegate tra loro da linee primarie, mentre il secondo è più completo, comprendendo 3 SSE alimentate in modo bilaterale dalla rete.

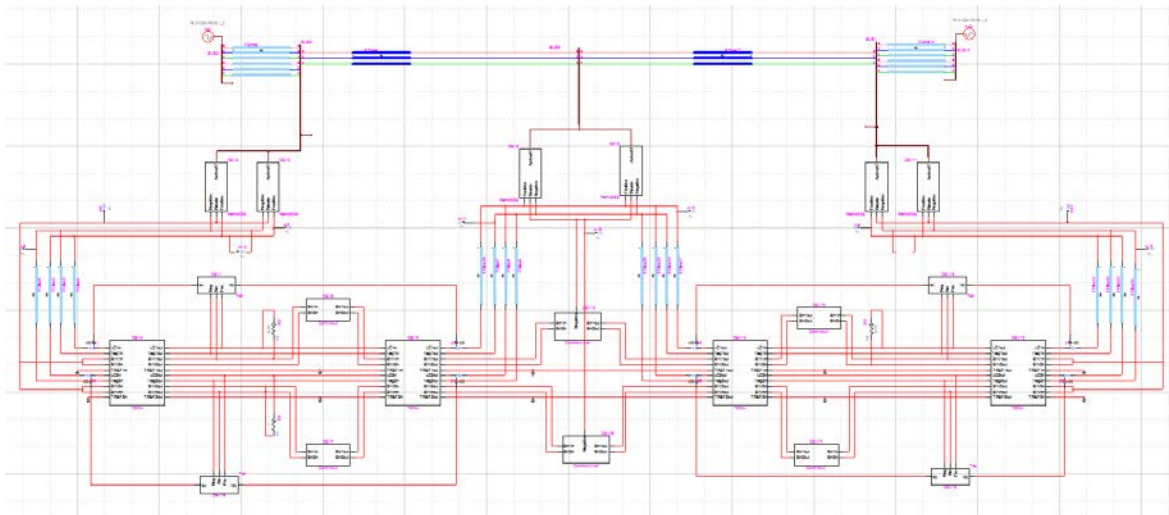


Figura 136 Modello a tre SSE utilizzato nella simulazione di tipo statico del nuovo sistema di alimentazione (provvisto di TEP controllato in corrente)

Nelle simulazioni di tipo dinamico il carico è stato trattato nello stesso modo rispetto ai modelli già sviluppati in precedenza. Il profilo di velocità e di potenza è rimasto invariato, per avere un confronto immediato tra i diversi modelli di linea proposti.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

9. Analisi di una tratta con sistema di alimentazione 2×3 kV

Costruiti i modelli di riferimento, si è quindi passati alla parte di simulazione. Come per il caso precedente, sono state eseguite sia simulazioni statiche, con lo scopo di riprodurre una situazione istantanea e osservare le forme d'onda che andavano ad assumere le grandezze di interesse del modello, sia simulazioni dinamiche, per ricreare un effettivo carico in movimento e andare a esaminare gli andamenti temporali delle tensioni e correnti del sistema.

Per eseguire un'analisi esauriente sul nuovo sistema di alimentazione 2×3 kV, sono stati sviluppati 3 modelli differenti: il primo che non prevede la presenza del posto di conversione statica, il secondo che comprende il trasformatore elettronico di potenza controllato in tensione e il terzo invece che introduce il controllo in corrente. Per queste tre tipologie di modelli sono state eseguite tutte le simulazioni già effettuate sul modello riprodotto lo stato attuale del sistema ferroviario; 2 di tipo statico e 4 di tipo dinamico. Verranno presentati prima i risultati ottenuti dalle simulazioni di tipo statico, e successivamente quelli raggiunti con le simulazioni di tipo dinamico.

9.1. Sistema 2×3 kV con presenza di più carichi statici

Si sono eseguite in primo luogo le simulazioni di tipo statico, andando a osservare le medesime forme d'onda presentate nelle simulazioni precedenti. Si è osservato il comportamento del nuovo sistema di alimentazione nelle 3 condizioni descritte nel paragrafo precedente: senza posto di conversione statica, con TEP controllato in tensione e con TEP controllato in corrente. Le simulazioni che verranno presentate sono state eseguite sul modello più completo comprendete tre SSE, tralasciando quindi quelle eseguite sul modello più semplice. La disposizione dei carichi è identica al modello utilizzato per la rappresentazione del sistema di alimentazione attuale, prevedendo quindi sulla parte sinistra due carichi rispettivamente da 1 Ω e 2 Ω (denominati R2 e R1), mentre sulla parte destra solo un carico da 1 Ω (chiamato R3).

9.1.1. Sistema privo di trasformatore elettronico di potenza

Nel settaggio delle opzioni di simulazione si è dovuto aumentare il tempo totale della stessa fino a 1 s, in quanto il sistema richiedeva più tempo per raggiungere le condizioni di regime. Tutte le altre caratteristiche sono rimaste invece invariate.

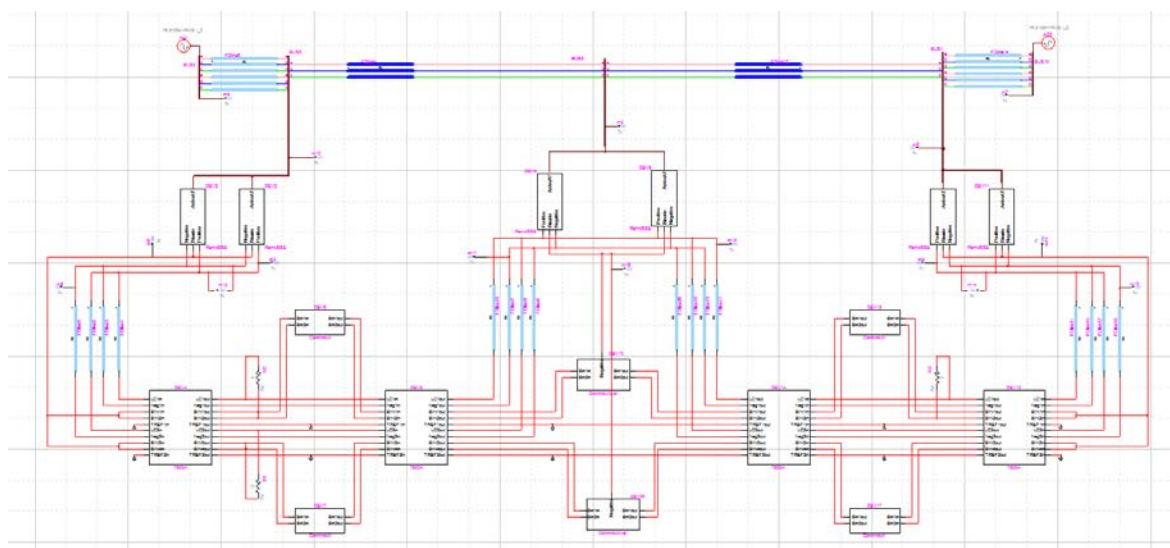


Figura 137 Modello a tre SSE privo di TEP utilizzato nella simulazione di tipo statico

Le tensioni di alimentazione delle SSE presentano sempre un ripple dovuto alla presenza del ponte raddrizzatore. La sua entità è però molto contenuta e non crea un grosso disturbo alla rete di alimentazione. La presenza delle linee primarie influisce in modo poco rilevante sulla caduta di tensione; per questo motivo le tre SSE sono alimentate a una tensione molto prossima a quella nominale (132 kV).

Analisi di una tratta con sistema di alimentazione 2×3 kV

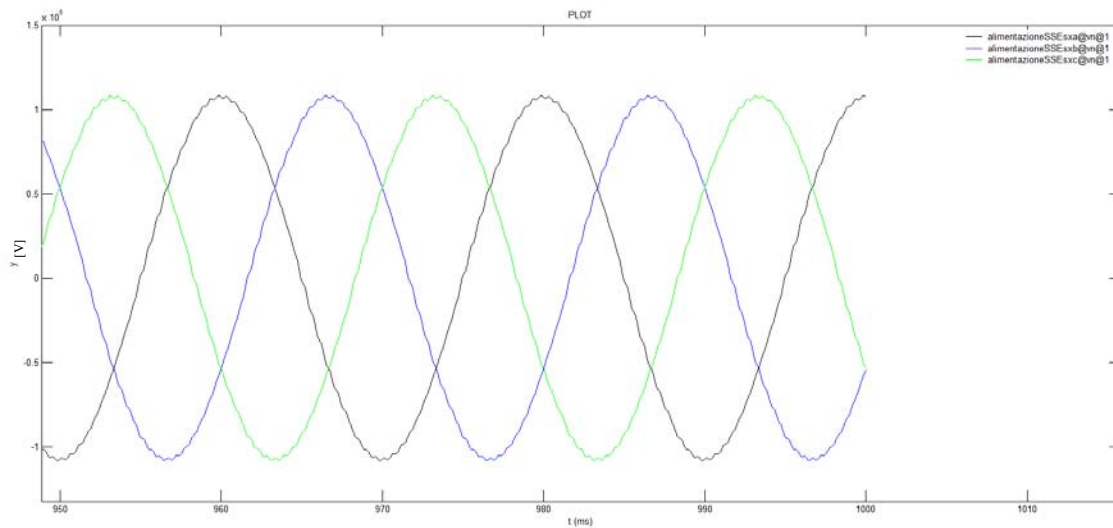


Figura 138 Andamento della tensione di alimentazione V_{alim} della SSE di sinistra

Le tensioni registrate sui carichi si presentano nel modo seguente.

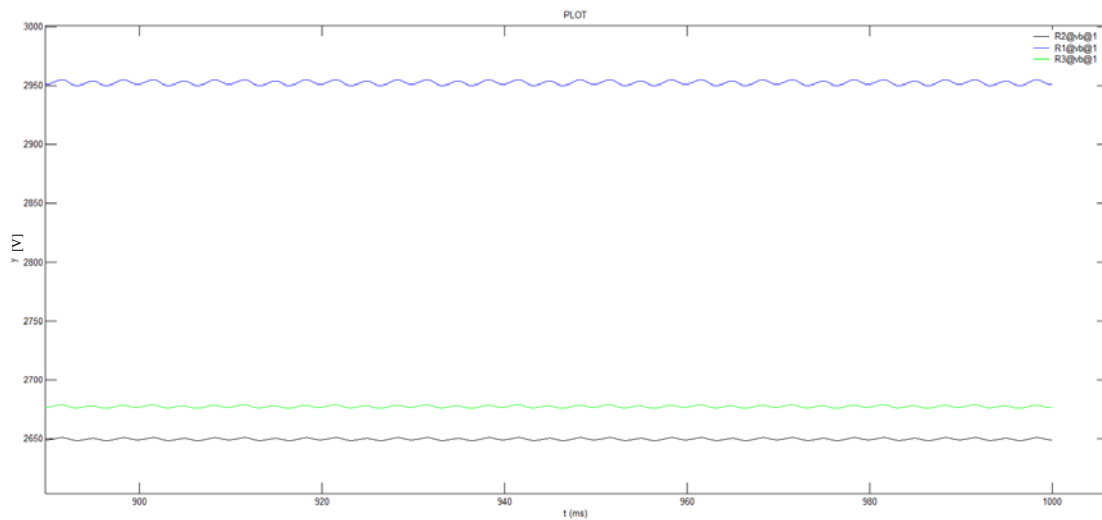


Figura 139 Andamento delle tensioni presenti sui carichi

R2: carico da 1Ω a sinistra
R3: carico da 1Ω a destra
R1: carico da 2Ω

Si riscontrano delle tensioni inferiori rispetto al modello rappresentante lo stato attuale del sistema ferroviario. Le tensioni dei carichi più importanti (quelli da 1Ω) si assestano infatti a 2650 V e 2675 V, mentre quello da 2Ω è soggetto a una tensione di 2950 V. Anche il ripple di tensione risulta più rilevante, come si nota dall'analisi di Fourier del segnale registrato sul carico R2.

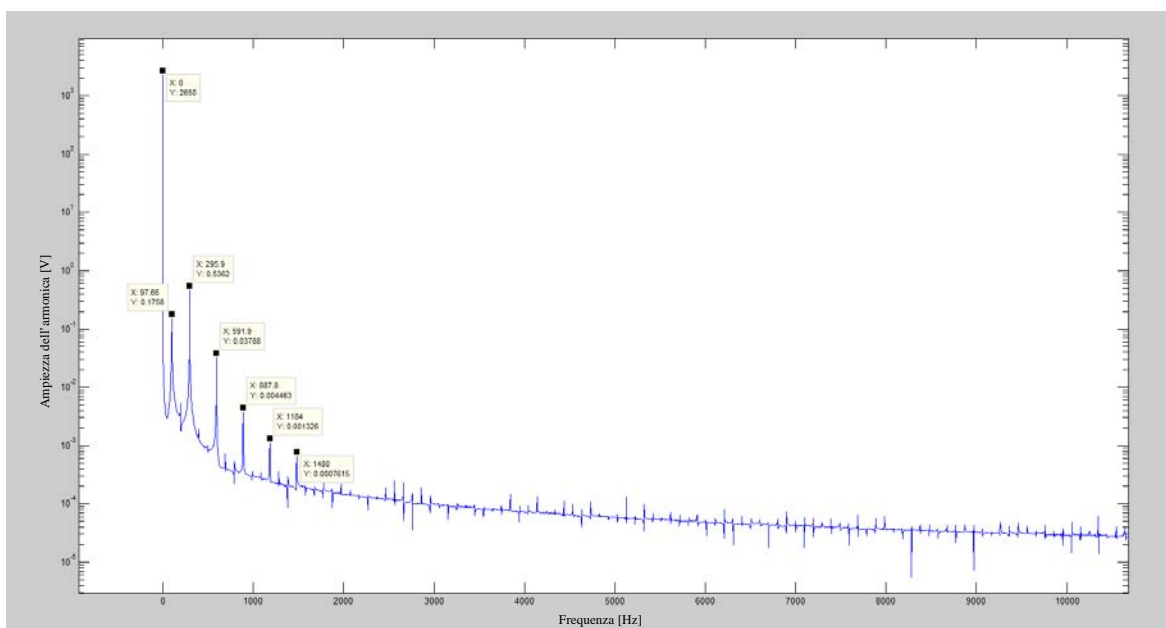


Figura 140 Risultati dell'analisi di Fourier della forma d'onda di tensione presente sul carico R2

Si nota in primo luogo la presenza di armoniche multiple della sesta, tipiche di un raddrizzamento esafase, sovrapposte a una alla frequenza di 100 Hz. Anche se i valori riscontrati sono doppi rispetto alle simulazioni precedenti, restano comunque molto limitati (l'armonica più importante è la sesta e presenta un valore efficace poco superiore a 1 V).

Le tensioni erogate dalle SSE si presentano invece nel modo seguente:

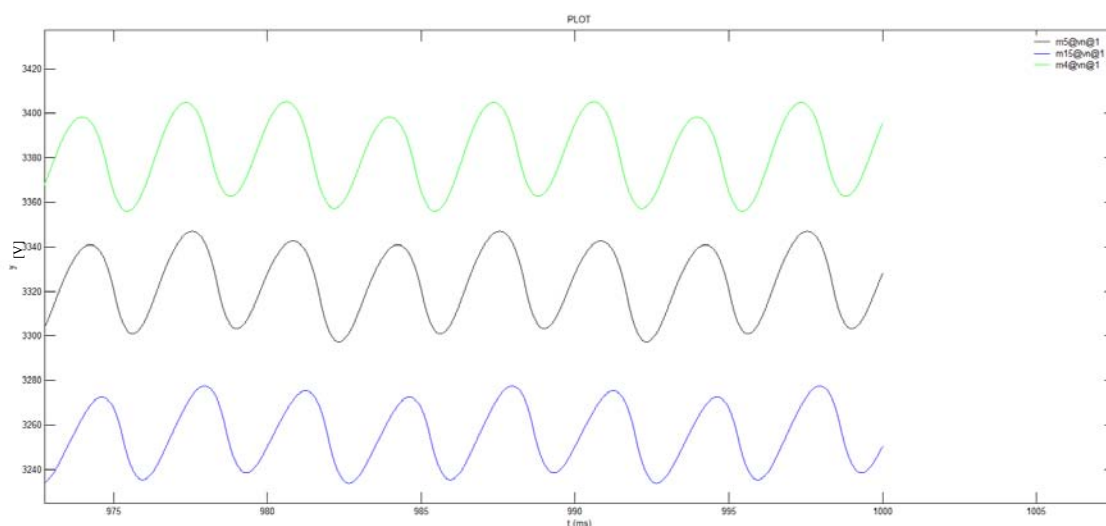


Figura 141 Andamento delle tensioni erogate dalle SSE m15: SSE centrale m4: SSE di destra m5: SSE di sinistra

I valori delle tensioni erogate dalle SSE risultano inferiori rispetto al modello di riferimento. La SSE di sinistra fornisce infatti una tensione media pari a 3223 V, quella centrale, la più caricata, una tensione di 3248 V e quella di destra un valore pari a 3380 V.

Questo è sintomo di una maggiore caduta di tensione interna alla SSE, dovuta alla diversa distribuzione delle correnti all'interno del trasformatore. L'assenza del posto di conversione statica rende infatti il feeder negativo completamente inutile, dato che non è in grado di scambiare energia con la linea di contatto. Tutta la corrente viene quindi fornita solo dal ramo del ponte raddrizzatore connesso tra binario e linea di contatto e conseguentemente, le perdite sono localizzate solo sul primario e sul secondario connesso a triangolo. La maggiore caduta di tensione interna alla SSE causa un abbassamento della tensione di linea, con conseguenze negative sulla qualità dell'alimentazione dei convogli. Interessante risulta anche il ripple della forma d'onda che non è più quello tipico di un ponte a 12 impulsi, ma si nota la presenza di armoniche a frequenze più basse, in particolare 300 Hz e multipli, caratteristiche di un semplice ponte di Graetz trifase. Questo è giustificato dal fatto che solo un ramo del ponte è effettivamente caricato, determinando la comparsa della sesta armonica e suoi multipli, di entità superiore rispetto al caso precedente, nonostante l'inserzione di un filtro più efficiente.

I diversi valori nelle tensioni erogate generano delle correnti di squilibrio, la cui presenza può essere eliminata andando ad adottare i variatori sotto carico sui trasformatori abbassatori nelle SSE. Anche il ripple di tensione registrato risulta essere superiore rispetto al modello di riferimento, come si deduce dall'analisi di Fourier eseguita sulla forma d'onda del potenziale della sbarra anodica della SSE di sinistra.

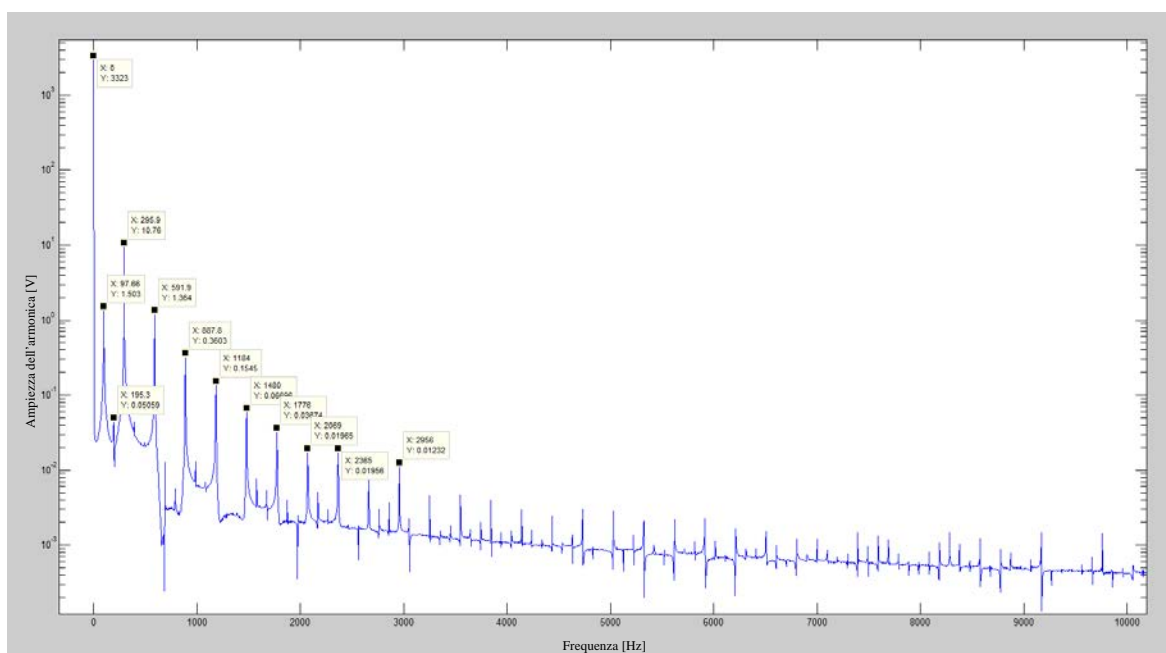


Figura 142 Risultati dell'analisi di Fourier della forma d'onda di tensione erogata dalla SSE di sinistra

Le componenti armoniche presenti sono le stesse viste nell'analisi della tensione insistente sul carico, ma i valori risultano ovviamente superiori, dato il mancato naturale filtraggio dell'induttanza propria della linea. L'armonica più importante risulta sempre essere la sesta, il cui valore efficace è pari a 20 V. Anche se i valori riscontrati risultano essere

superiori alla simulazione di riferimento, il contributo delle armoniche al valore efficace della tensione imposta dalle SSE non supera l'1% del valore medio, non costituendo quindi una grande fonte di disturbo.

Le tensioni dei binari in corrispondenza delle SSE si presentano invece nel modo seguente.

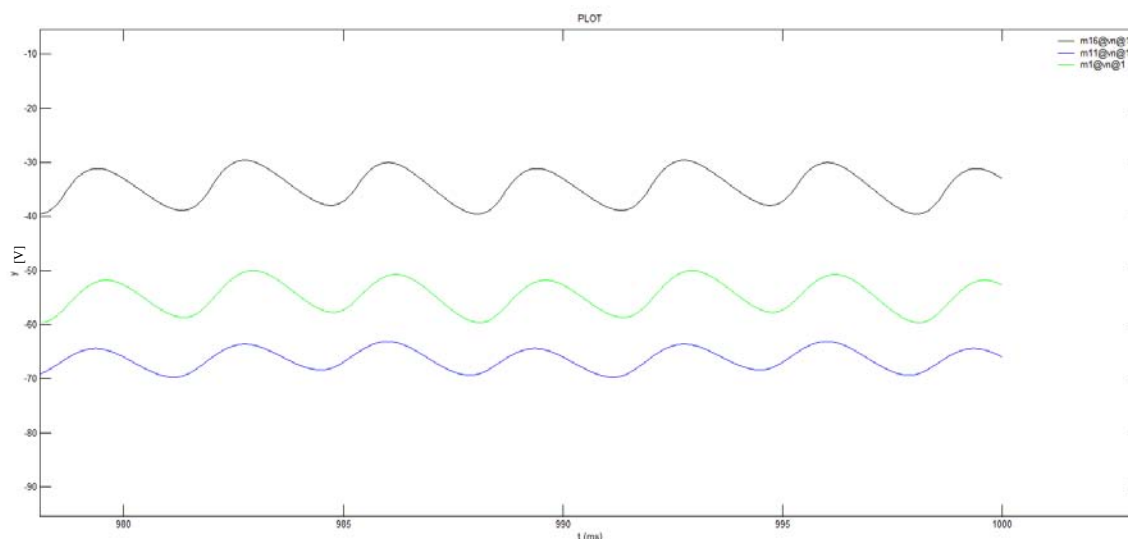


Figura 143 Potenziali di binario in prossimità delle SSE **m16: SSE centrale** **m11: SSE di destra**
m1: SSE di sinistra

La SSE centrale presenta la tensione più elevata (-35 V), quella relativa alla SSE di sinistra ha un valore di circa -55 V, mentre la tensione della sbarra catodica della SSE di destra mostra il valore più basso (-67 V). I valori registrati risultano in questo caso essere in linea con quelli trovati nella simulazione sul modello di riferimento. La forma d'onda rispecchia invece quanto già detto in precedenza; il ripple di tensione è più contenuto rispetto a quello presente nella tensione erogata dalle SSE, in quanto filtrato anche dall'intero circuito di alimentazione dei convogli. Questo concetto è reso ancora più evidente dal confronto delle analisi di Fourier dei due segnali.

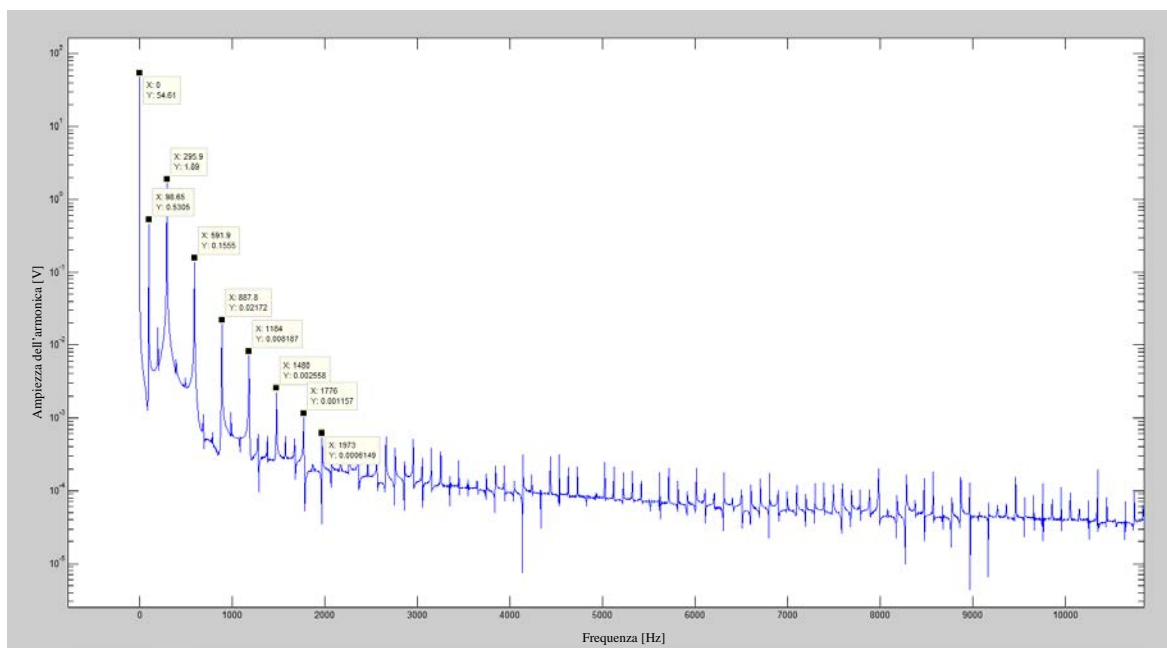


Figura 144 Risultati dell'analisi di Fourier eseguita sulla forma d'onda del potenziale di binario della SSE di sinistra

Le armoniche presenti sono le stesse già descritte prima, ma i loro valori efficaci risultano essere 10 volte più bassi rispetto a quelle registrate nelle tensioni di alimentazione delle linee di contatto.

Si riporta in questo caso anche il potenziale verso terra del feeder negativo in prossimità della SSE di sinistra.

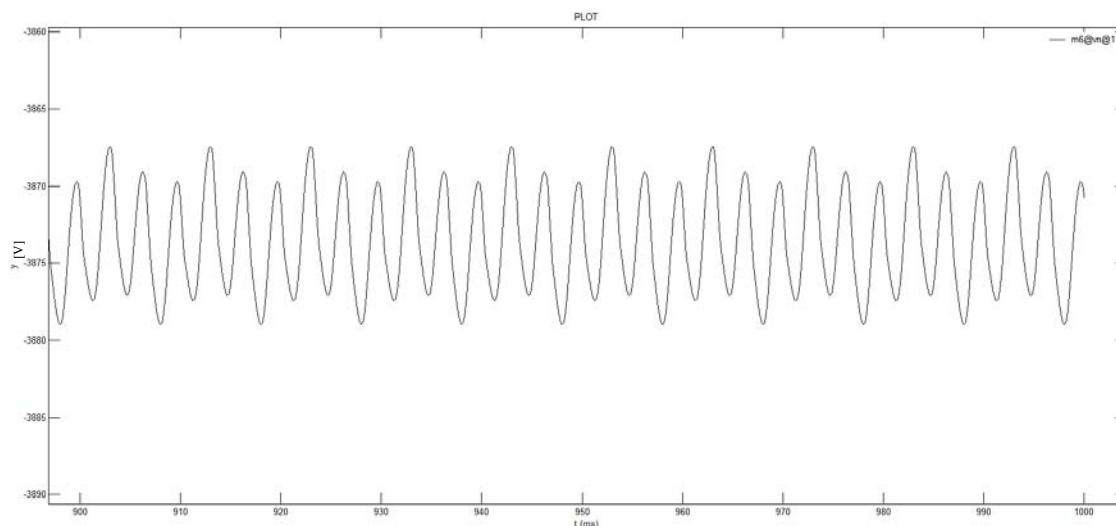


Figura 145 Andamento del potenziale della sbarra catodica della SSE di sinistra

La sbarra negativa della SSE si porta a una tensione verso terra di circa -3875 V, valore in modulo più alto dei -3600 V previsti a vuoto. Questo è dovuto al fatto che il ponte raddrizzatore collegato in serie fornisce ai suoi capi una tensione in modulo pari a 7200 V.

La sbarra positiva non si trova però a 3600 V, ma, a causa delle cadute di tensione interne alla SSE, si assesta a una tensione verso terra di 3323 V. La tensione della sbarra negativa è quindi vincolata a portarsi a un valore di tensione inferiore a quello previsto. Si nota inoltre come, grazie all'inserzione del filtro anche tra la sbarra negativa e il circuito di ritorno della corrente, il ripple di tensione risulta essere abbastanza modesto, come confermato dall'analisi di Fourier riportata di seguito.

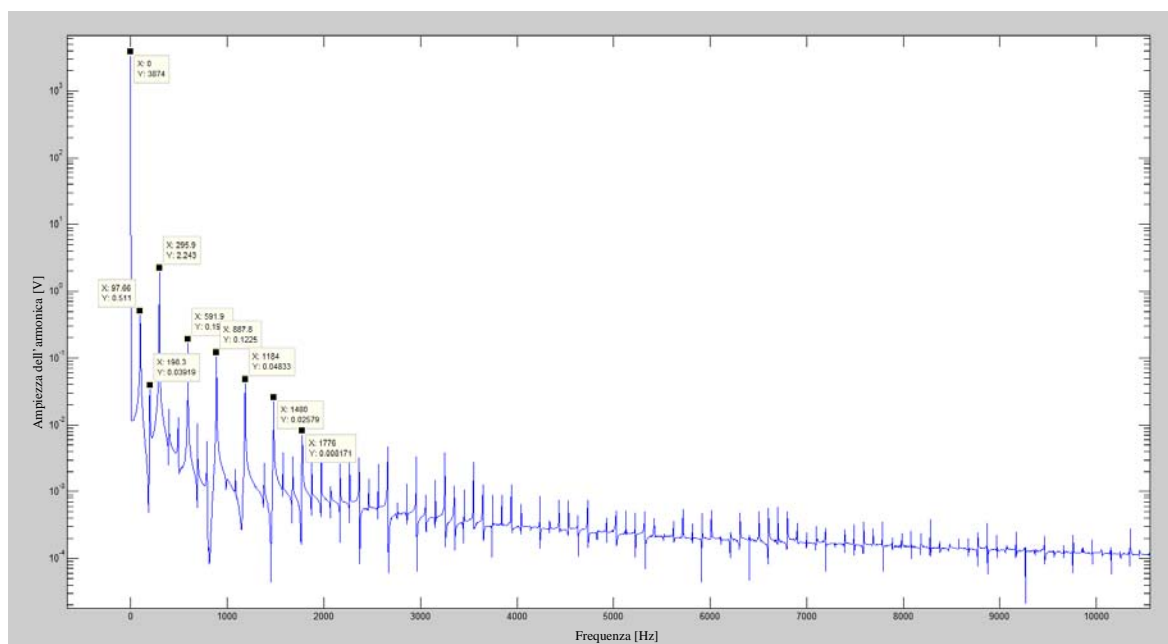


Figura 146 Risultati dell'analisi di Fourier eseguita sulla forma d'onda del potenziale della sbarra catodica della SSE di sinistra

Come si nota, la componente armonica più importante rimane quella incentrata sui 300 Hz, che presenta un valore di poco inferiore ai 5 V, comunque trascurabile per un corretto funzionamento del sistema.

È stato valutato anche in questo caso il rendimento di trasmissione del sistema. Anche se le tensioni fornite dalle SSE sono squilibrate, le correnti presenti nei feeder negativi sono pressoché nulle, non causando quindi perdite aggiuntive nel sistema. Le potenze erogate dalle SSE sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 23 Valori delle potenze erogate dalle SSE sulle varie linee di contatto

Sottostazione	Binario	Potenza (MW)
Sinistra	1	4.765
Centrale tratta a sinistra	1	4.089
Destra	1	5.150
Sinistra	2	2.780
Centrale tratta a sinistra	2	2.154

Centrale tratta a destra	1	3.895
TOTALE		22.835

Le potenze assorbite dai carichi sono invece riportate nella tabella seguente:

Tabella 24 Valori delle potenze assorbite dai carichi

Tratta occupata	Binario	Potenza (MW)
Sinistra	1	7.022
Sinistra	2	4.360
Destra	1	7.171
TOTALE		18.554

Il rendimento di trasmissione risulta in questo caso pari a 0.813.

Il nuovo sistema, in queste condizioni di funzionamento, risulta quindi avere caratteristiche peggiori rispetto a quello attuale.

9.1.2. Sistema dotato di TEP controllato in tensione

Il modello considera, in questo caso, la presenza di 4 trasformatori elettronici di potenza installati al centro delle linee di contatto, controllati in modo tale che la tensione a metà tratta non scenda mai sotto i 3000 V. Le caratteristiche del modello e le opzioni di simulazione sono le medesime utilizzate nell'analogia simulazione eseguita in precedenza.

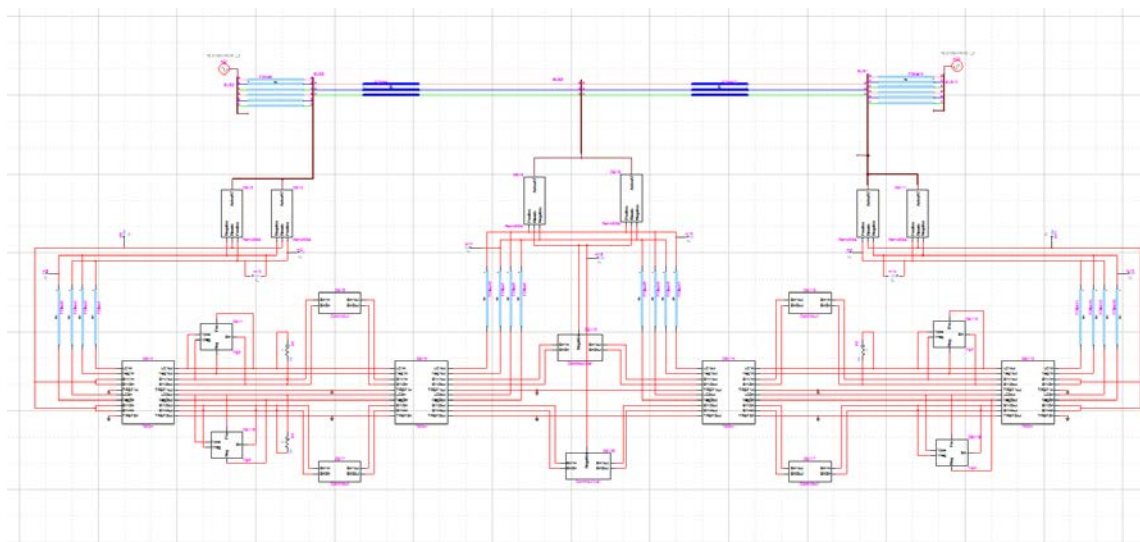


Figura 147 Modello a tre SSE dotato di TEP controllato in tensione utilizzato nella simulazione di tipo statico

Come per il caso privo di posto di conversione statica, le tensioni di alimentazione delle SSE presentano sempre un ripple dovuto alla presenza del ponte raddrizzatore. La sua

entità è però molto contenuta e non crea un grosso disturbo alla rete di alimentazione. La presenza della linea primaria compresa tra le due SSE influisce in modo poco rilevante sulla caduta di tensione; per questo motivo le due SSE sono alimentate a una tensione molto prossima a quella nominale (132 kV).

Le tensioni registrate sui carichi si presentano nel modo seguente.

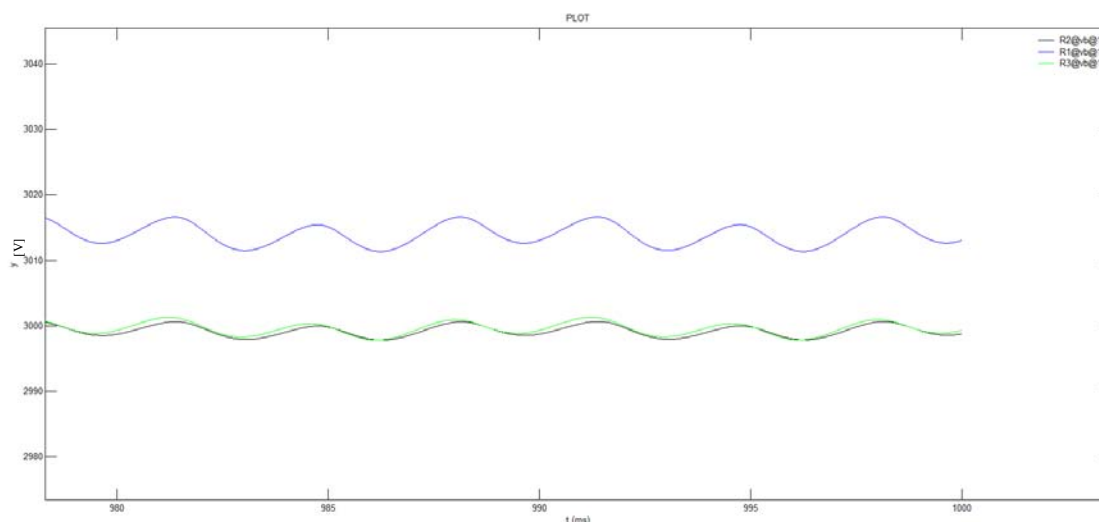


Figura 148 Andamento delle tensioni presenti sui carichi

R1: carico a sinistra da 2 Ω
R2: carico a sinistra da 1 Ω
R3: carico a destra da 1 Ω

Si nota subito che i valori riscontrati non scendono per nessun carico al di sotto dei 3000 V, indice di un corretto funzionamento del sistema di controllo. I carichi da 1 Ω presentano una tensione pari a 3000 V, mentre quello da 2 Ω leggermente superiore (3015 V). Questo significa che solo i trasformatori elettronici di potenza relativi alle linee più caricate sono in funzione, mentre quello che dovrebbe alimentare in parte il primo carico non è in conduzione, dato che la tensione a centro tratta è naturalmente superiore al limite impostato. Come conferma si riportano le correnti transitanti attraverso i posti di conversione statica.

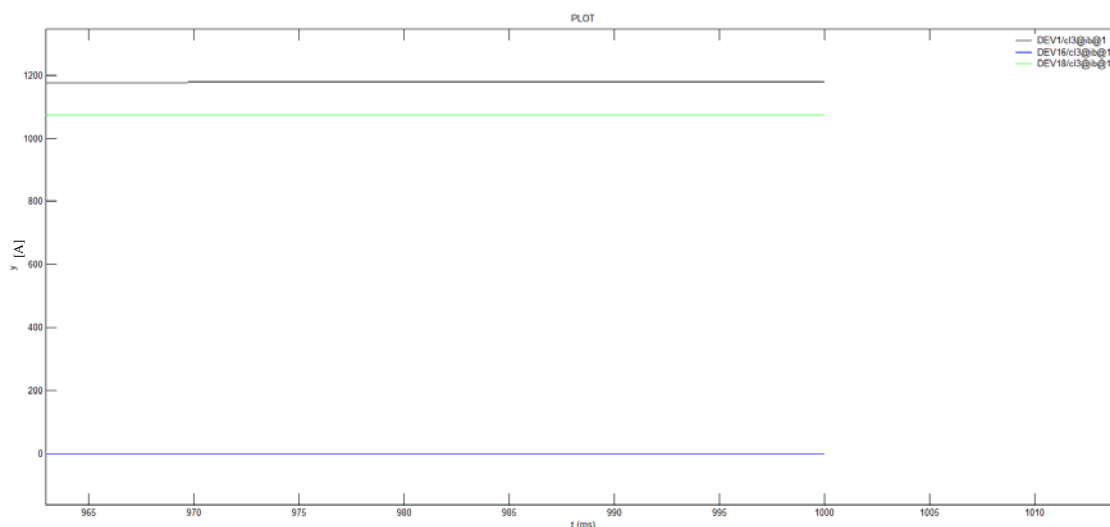


Figura 149 Correnti erogate dai TEP

DEV1: TEP su carico a sinistra da 1 Ω
 DEV16: TEP su carico a sinistra da 2 Ω
 DEV18: TEP su carico a destra da 1 Ω

Come si nota, il TEP installato sulla linea dove è presente il carico da 2 Ω non è in funzione, mentre attraverso gli altri due transita una corrente rispettivamente di 1179 A e 1075 A.

Le tensioni erogate dalle SSE si presentano invece nel modo seguente.

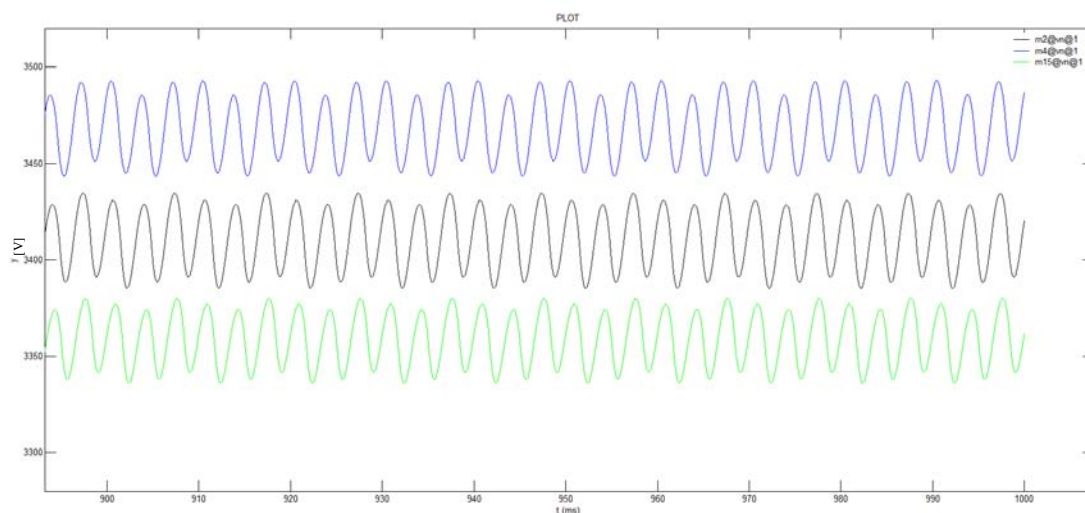


Figura 150 Andamento delle tensioni erogate dalle SSE

m15: SSE centrale
 m4: SSE di destra
 m5: SSE di sinistra

I valori riscontrati sono in linea con quelli visti nella simulazione eseguita sul modello analogo rappresentante il sistema ferroviario attuale. La SSE di sinistra fornisce infatti una tensione media pari a 3410 V, quella centrale, la più caricata, una tensione di 3355 V e quella di destra un valore pari a 3470 V. Da notare è però che i valori sono molto più alti

rispetto a quelli riscontrati nella simulazione precedente. Questo è sintomo che il posto di conversione statica è in funzione, determinando una migliore distribuzione delle correnti all'interno del trasformatore presente in SSE. Il feeder negativo risulta in questo caso percorso da corrente, scaricando in parte la linea di contatto e riducendo conseguentemente le cadute di tensione in linea. Interessante risulta anche il ripple della forma d'onda che, seppur entrambi i ponti in serie risultino partecipare alla conduzione delle correnti di carico, presenta le caratteristiche di un semplice ponte di Graetz trifase, mostrando la presenza di armoniche multiple della sesta.

Le tensioni dei binari in corrispondenza delle SSE si presentano invece nel modo seguente.

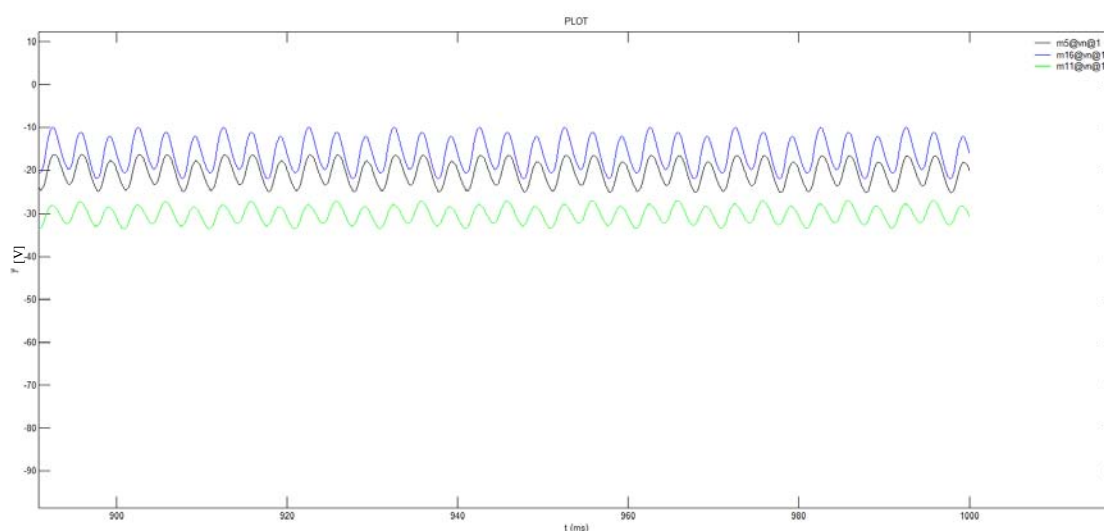


Figura 151 Potenziali di binario in prossimità delle SSE m16: SSE centrale m11: SSE di destra m5: SSE di sinistra

La SSE centrale presenta la tensione più elevata (-15 V), quella relativa alla SSE di sinistra ha un valore medio di circa -20 V, mentre la tensione della sbarra catodica della SSE di destra mostra il valore più basso (-30 V). I valori registrati risultano essere superiori con quelli trovati nella simulazione sul modello di riferimento. La forma d'onda rispecchia invece quanto già detto in precedenza; il ripple di tensione è più contenuto rispetto a quello presente nella forma d'onda del potenziale della sbarra anodica, in quanto filtrato dall'intero circuito di alimentazione dei convogli e non solo dal filtro presente in SSE.

Si riportano anche i potenziali verso terra dei feeder negativi in prossimità delle SSE.

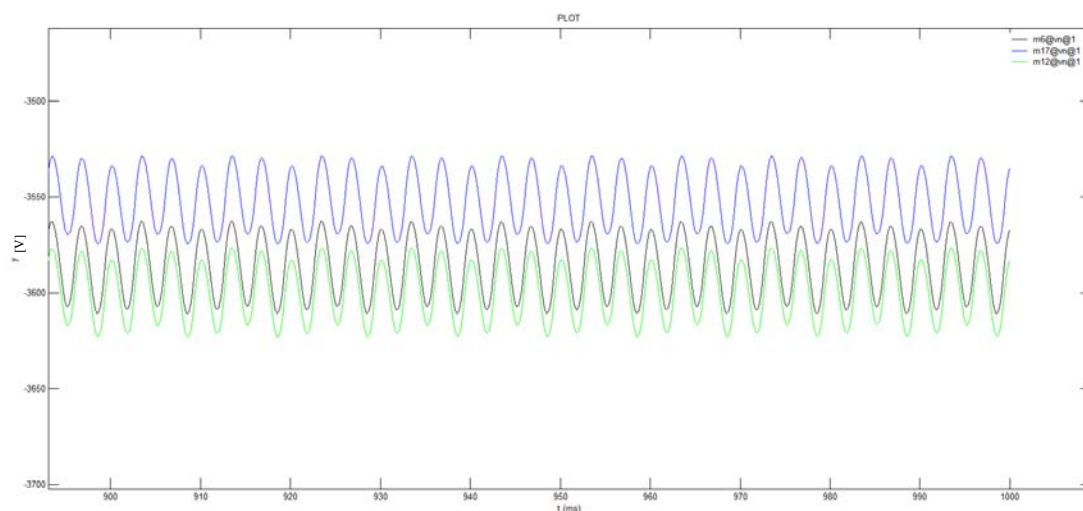


Figura 152 Andamento dei potenziali delle sbarre catodiche delle SSE
m6: SSE di sinistra
m17: SSE centrale
m12: SSE di destra

I valori assunti dalle 3 sbarre catodiche sono molto simili. La sbarra negativa della SSE di sinistra si porta infatti a una tensione verso terra di circa -3580 V, quella della SSE centrale assume un valore pari a -3550 V e quella della SSE di destra raggiunge i -3600 V. Al contrario di quanto accadeva nella simulazione eseguita sul modello privo di posto di conversione statica, i valori sono tutti inferiori rispetto a quelli previsti a vuoto, evitando quindi sollecitazioni eccessive dell’isolamento.

È stato valutato anche in questo caso il rendimento di trasmissione del sistema. Si sono valutate le potenze erogate dalle varie SSE sia sul feeder positivo, sia su quello negativo. Si sono trascurate le perdite relative alla linea priva di carico, in quanto la corrente presente non è troppo rilevante. Le potenze erogate dalle SSE sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 25 Valori delle potenze erogate dalle SSE sui vari feeder positivi e negativi

Sottostazione	Binario	Feeder	Potenza (W)
Sinistra	1	Positivo	3.344
		Negativo	2.267
Centrale tratta a sinistra	1	Positivo	2.853
		Negativo	1.912
Destra	1	Positivo	3.843
		Negativo	2.152
Sinistra	2	Positivo	2.802
		Negativo	0.170
Centrale tratta a sinistra	2	Positivo	2.327

		Negativo	-0.169
Centrale tratta a destra	1	Positivo	2.792
		Negativo	1.668
TOTALE			25.983

Le potenze assorbite dai carichi sono invece riportate nella tabella seguente:

Tabella 26 Valori delle potenze assorbite dai carichi

Tratta occupata	Binario	Potenza (W)
Sinistra	1	9.000
Sinistra	2	4.536
Destra	1	9.000
TOTALE		22.536

Il rendimento di trasmissione risulta in questo caso essere pari a 0.867, superiore rispetto a quello ottenuto sul modello di riferimento.

Le analisi fin qui eseguite portano ad affermare che il nuovo sistema di alimentazione 2×3 kV in corrente continua dotato di trasformatore elettronico di potenza garantisce una qualità di alimentazione migliore rispetto al sistema tradizionale, facendo diminuire le cadute di tensione di linea e assicurando allo stesso tempo un aumento della potenzialità delle tratte esistenti. Inoltre, grazie alla suddivisione delle correnti di carico nei feeder positivo e negativo, anche il rendimento di trasmissione migliora, riducendo conseguentemente le perdite di linea. Il contenuto armonico risulta però più rilevante, data la presenza di armoniche multiple della sesta, anche se il ripple di tensione presenta ancora valori abbastanza contenuti.

9.1.3. Sistema dotato di TEP controllato in corrente

Il modello considera la presenza di 4 trasformatori elettronici di potenza installati a metà tratta controllati in modo tale che la corrente erogata su ogni linea di contatto dalle SSE sia inferiore a 1500 A. Le opzioni di simulazione sono rimaste le medesime utilizzate nell'analoga simulazione eseguita in precedenza, a parte il tempo di simulazione, alzato a 2 s, per permettere al sistema di raggiungere le condizioni di regime permanente.

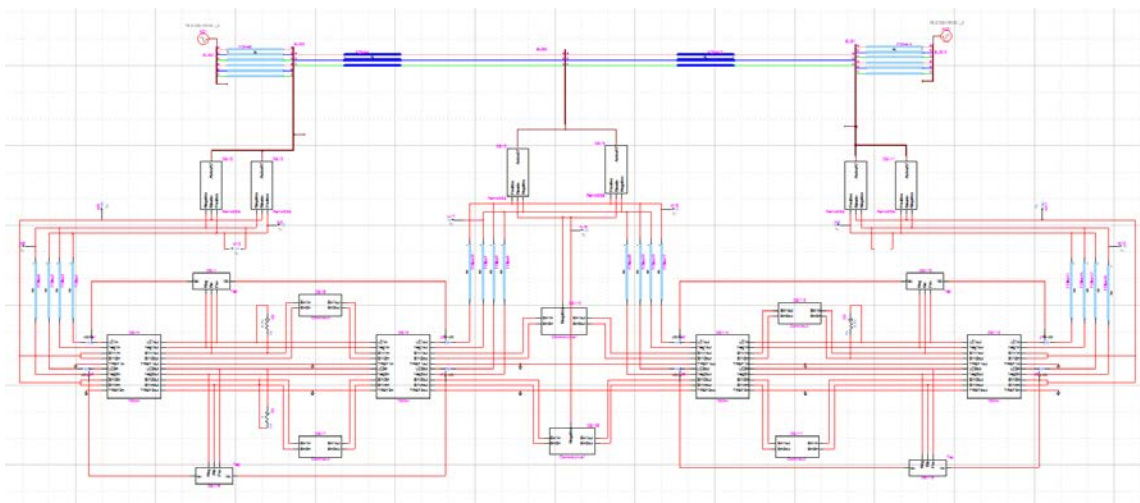


Figura 153 Modello a tre SSE dotato di TEP controllato in corrente utilizzato nella simulazione di tipo statico

La disposizione dei carichi è rimasta inalterata rispetto ai modelli precedenti, prevedendo però sulla parte sinistra due carichi rispettivamente da 0.75 Ω e 1 Ω, mentre sulla parte destra solo un carico da 0.75 Ω, per evidenziare l'effettivo funzionamento del controllo in corrente.

Le tensioni registrate sui carichi si presentano nel modo seguente.

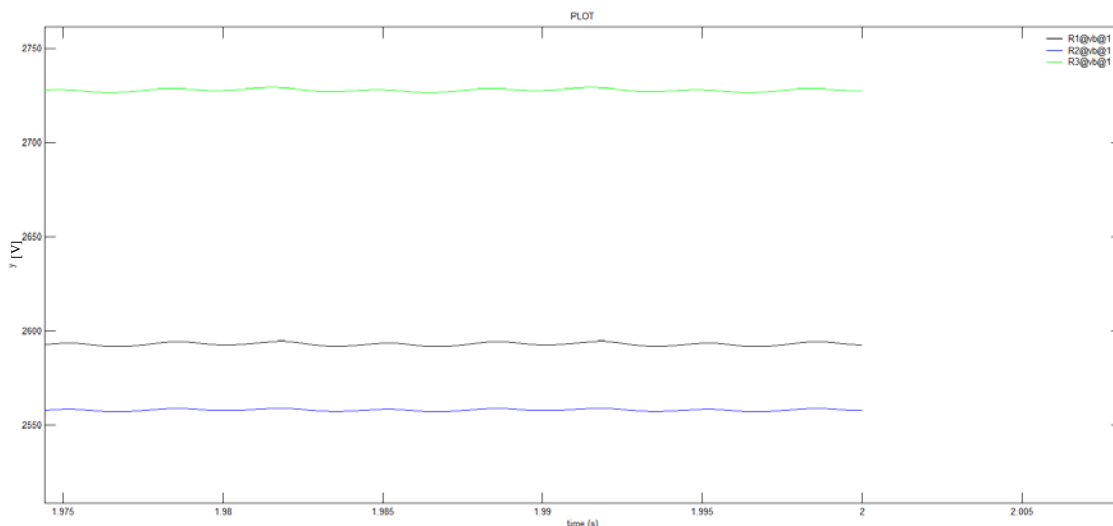


Figura 154 Tensioni presenti sui carichi
R1: carico a sinistra da 1 Ω
R2: carico a sinistra da 0.75 Ω
R3: carico a destra da 0.75 Ω

Come per il caso precedente, le tensioni riscontrate sui carichi sono molto inferiori rispetto al modello in cui il posto di conversione statica era controllato in tensione. Questo a causa sia del maggiore carico a cui sono sottoposte le SSE, sia dell'utilizzo meno importante dei feeder negativi. Si tralasciano gli andamenti dei potenziali delle sbarre anodiche e catodiche delle SSE, in quanto simili a quelli già incontrati nelle simulazioni precedenti.

Come verifica dell'effettivo funzionamento dei posti di conversione statica, si riportano di seguito gli andamenti delle correnti transitanti attraverso i TEP.

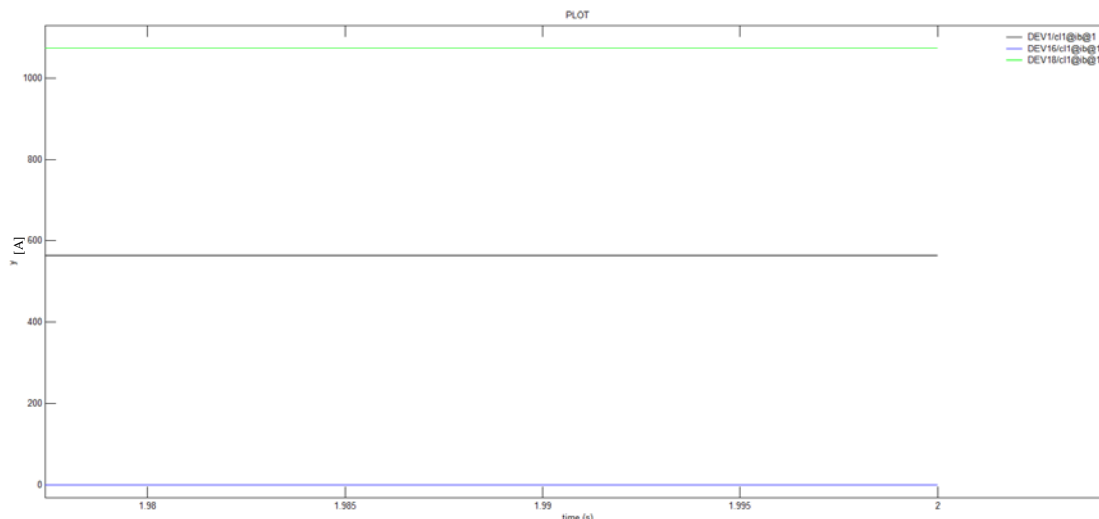


Figura 155 Correnti erogate dai TEP **DEV1/DEV18: TEP su carico a sinistra/destra da 0.75 Ω**
DEV16: TEP su carico a sinistra da 1 Ω

Come si nota, i TEP installato sulla linea dove è presente il carico da 1 Ω non è in funzione, mentre attraverso gli altri due transita una corrente rispettivamente di 563 A e 1073 A.

Come conferma del corretto funzionamento del controllo in corrente, si riportano gli andamenti delle correnti erogate da ciascuna SSE sulle linee di contatto.

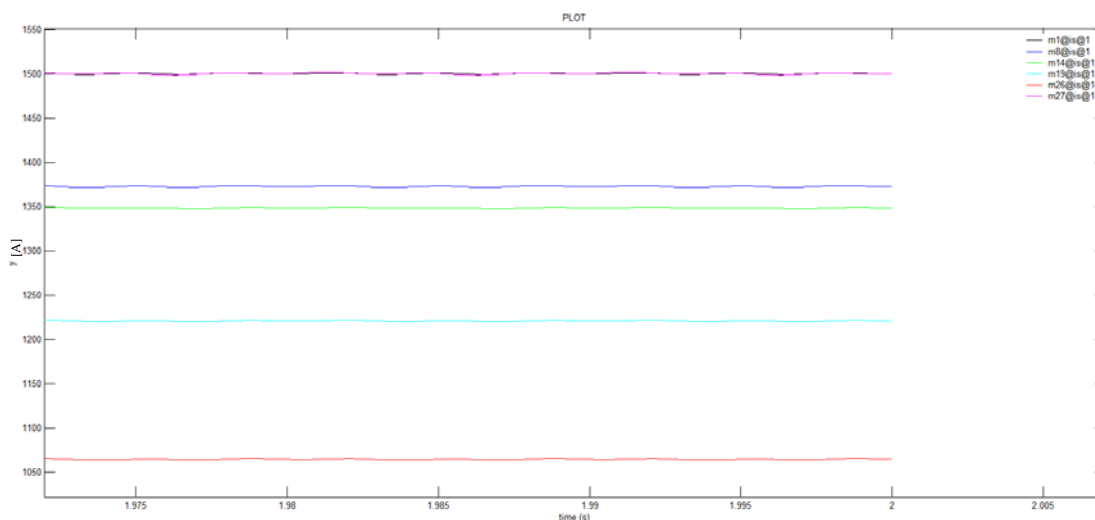


Figura 156 Correnti erogate dalle SSE sulla ldc **m1: SSE di sinistra su carico da 0.75 Ω**
m8: SSE di sinistra su carico da 1 Ω
m14: SSE centrale su carico da 0.75 Ω di sinistra
m19: SSE centrale su carico da 1 Ω

m26: SSE centrale su carico da 0.75 Ω di destra
m27: SSE di destra su carico da 0.75 Ω

Come si nota, i valori registrati sono tutti inferiori ai 1500 A.

La qualità dell'alimentazione risulta in questo caso abbastanza scarsa, in quanto non si ha più un controllo diretto sulla tensione della linea di contatto. Riducendo il limite di corrente del controllo del TEP si potrebbero ottenere risultati migliori, in linea con quelli incontrati nel modello che prevedeva il controllo in tensione.

È stato valutato anche in questo caso il rendimento di trasmissione del sistema. Si sono valutate le potenze erogate dalle varie SSE sia sul feeder positivo sia su quello negativo. Si sono trascurate le perdite relative alla linea priva di carico, in quanto di ordini di grandezza inferiori rispetto alle potenze in gioco. Le potenze erogate dalle SSE sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 27 Valori delle potenze erogate dalle SSE sui vari feeder positivi e negativi

Sottostazione	Binario	Feeder	Potenza (W)
Sinistra	1	Positivo	4.939
		Negativo	1.214
Centrale tratta a sinistra	1	Positivo	4.354
		Negativo	0.798
Destra	1	Positivo	5.152
		Negativo	2.098
Sinistra	2	Positivo	4.521
		Negativo	0.204
Centrale tratta a sinistra	2	Positivo	3.940
		Negativo	-0.203
Centrale tratta a destra	1	Positivo	3.436
		Negativo	1.732
TOTALE			32.189

Le potenze assorbite dai carichi sono invece riportate nella tabella seguente:

Tabella 28 Valori delle potenze assorbite dai carichi

Tratta occupata	Binario	Potenza (W)
Sinistra	1	8.724
Sinistra	2	6.718
Destra	1	9.922

TOTALE	25.365
--------	--------

Il rendimento di trasmissione risulta in questo caso pari a 0.788, molto più basso rispetto a quello trovato nella simulazione sul modello di riferimento.

9.1.4. Confronto con il sistema di alimentazione convenzionale

Il nuovo sistema sembra apportare un miglioramento per quanto riguarda il rendimento di trasmissione del sistema, come confermato dal confronto tra i rendimenti riscontrati nelle varie simulazioni statiche eseguite.

Tabella 29 Valori dei rendimenti di trasmissione dei modelli statici a due sole SSE

Tipologia di alimentazione	Rendimento di trasmissione
Sistema tradizionale	0.816
Sistema 2 × 3 kV privo di TEP	0.796
Sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in tensione	0.848

Tabella 30 Valori dei rendimenti di trasmissione dei modelli statici a tre SSE

Tipologia di alimentazione	Rendimento di trasmissione
Sistema tradizionale	0.833
Sistema 2 × 3 kV privo di TEP	0.813
Sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in tensione	0.867

Nel confronto non si è tenuto conto del caso del sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in corrente, in quanto la potenza assorbita dai carichi è sensibilmente diversa rispetto ai casi riportati nelle tabelle. Si nota comunque un miglioramento di circa il 3% nel rendimento di trasmissione del nuovo sistema di alimentazione rispetto a quello tradizionale, rendendolo quindi più economico dal punto di vista di un futuro esercizio dell'impianto. Nel caso in cui il posto di conversione statica non sia in funzione, il sistema presenta però un sovraccarico del ramo del raddrizzatore connesso al feeder positivo, presentando un rendimento di trasmissione peggiore del sistema tradizionale.

Si riscontra però anche un leggero aumento del contenuto armonico di tensione, dovuto al funzionamento in serie dei due ponti raddrizzatori trifasi e alla presenza del posto di conversione statica. I valori delle armoniche presenti nel nuovo sistema sono comunque esigui (sempre inferiori all'1% del valore medio), escludendo quindi il verificarsi di possibili problemi di risonanza.

9.2. Sistema 2×3 kV con presenza di un carico dinamico

Terminate le simulazioni statiche, si è passati a eseguire le simulazioni dinamiche, nelle quali il carico si muove lungo la tratta di binario compresa tra le due SSE. Si considera in primo luogo la presenza di un solo carico in movimento, caratterizzato dai profili di velocità e potenza visti nelle simulazioni sullo stato attuale del sistema ferroviario italiano. Il modello considera una linea a doppio binario nelle tre configurazioni viste nel paragrafo precedente: priva di convertitore elettronico di potenza, dotata di TEP controllato in tensione e infine con il controllo in corrente. Le opzioni di simulazione sono rimaste invariate rispetto alle simulazioni di riferimento.

Si è effettuata anche in questo caso la verifica della correttezza dei nuovi modelli utilizzati, andando a simulare la presenza di un carico con velocità costante (di valore di 60 m/s) e assorbente una corrente di 3000 A prima sulla doppia linea priva di posto di parallelo e successivamente dotata di questo accorgimento tecnico. Il metodo per ricavare l'andamento della tensione al pantografo è lo stesso descritto nel capitolo 7.2.

Nel primo caso, l'andamento della tensione presente sul carico si mostra in questo modo.

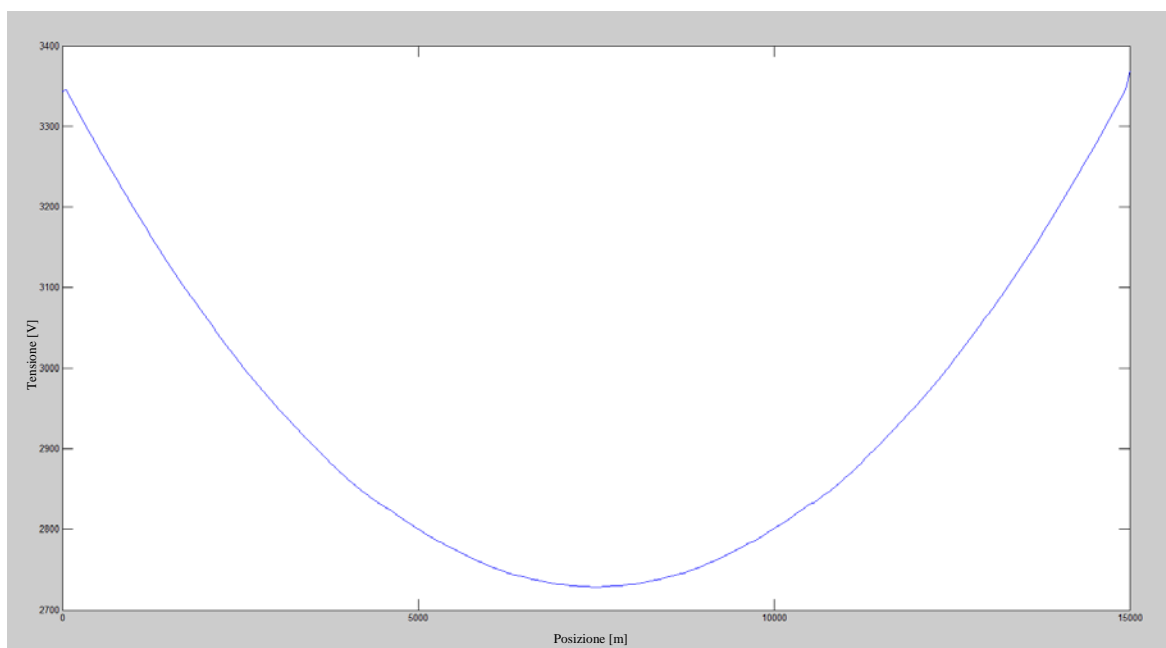


Figura 157 Profilo della caduta di tensione lungo la linea ottenuto dal modello utilizzato per le simulazioni dinamiche sul nuovo sistema di alimentazione

Si nota subito che la tensione registrata quando il treno si trova in corrispondenza delle SSE è pari a 3350 V, contro i 3480 V riscontrati nella verifica effettuata sul modello di riferimento. Le cadute di tensione interne alla SSE risultano quindi essere maggiori anche nelle simulazioni di tipo dinamico. Conseguentemente anche la tensione minima registrata risulta essere inferiore, andando ad assumere il valore di 2750 V.

La verifica del modello che presenta invece il parallelo delle linee di contatto e dei feeder negativi ha prodotto invece il seguente andamento della caduta di tensione lungo la linea.

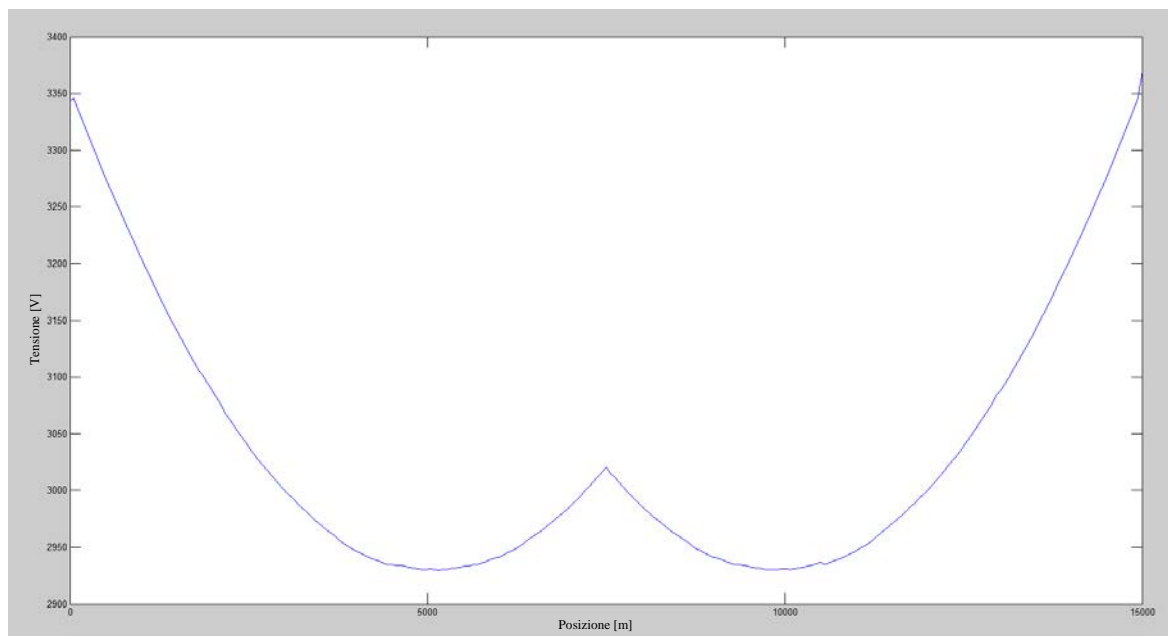


Figura 158 Profilo della caduta di tensione lungo la linea ottenuto dal modello con posto di parallelo utilizzato per le simulazioni dinamiche sul nuovo sistema di alimentazione

Si nota una perfetta corrispondenza in termini di andamento rispetto al modello di riferimento, ma i valori di tensione registrati risultano essere inferiori; il valore minimo della tensione riscontrato nella simulazione è infatti pari a 2937 V, contro i 3015 V rilevati nel modello di riferimento.

Appurato il corretto funzionamento dei modelli costruiti, si è passati all'esecuzione delle simulazioni dinamiche. Come per i modelli sviluppati per l'analisi dello stato attuale del sistema ferroviario italiano, è stato necessario far partire per ogni caso 10 simulazioni identiche, al fine di ottenere dei file di risultati gestibili in modo agevole.

9.2.1. Sistema privo di trasformatore elettronico di potenza

Si considera in primo luogo il nuovo sistema di alimentazione privo però dei posti di conversione statica, al fine di osservare l'effetto di un'avaria del TEP.

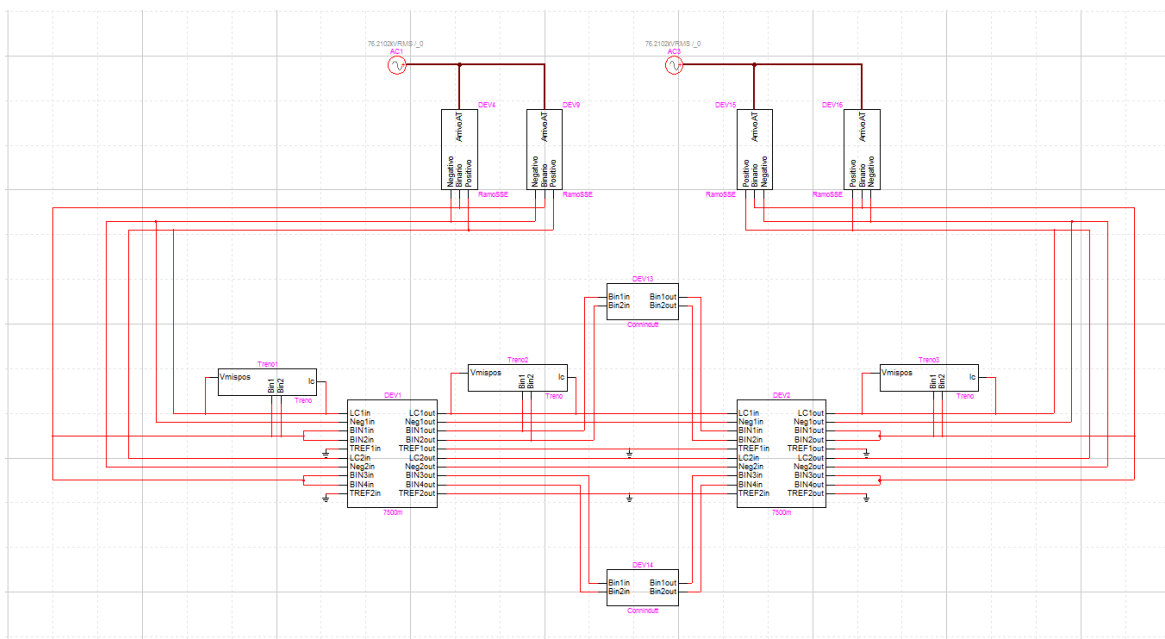


Figura 159 Modello primo di TEP utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente un solo carico

Interessante risulta l'andamento della tensione erogata dalle SSE, che si presenta nel modo seguente.

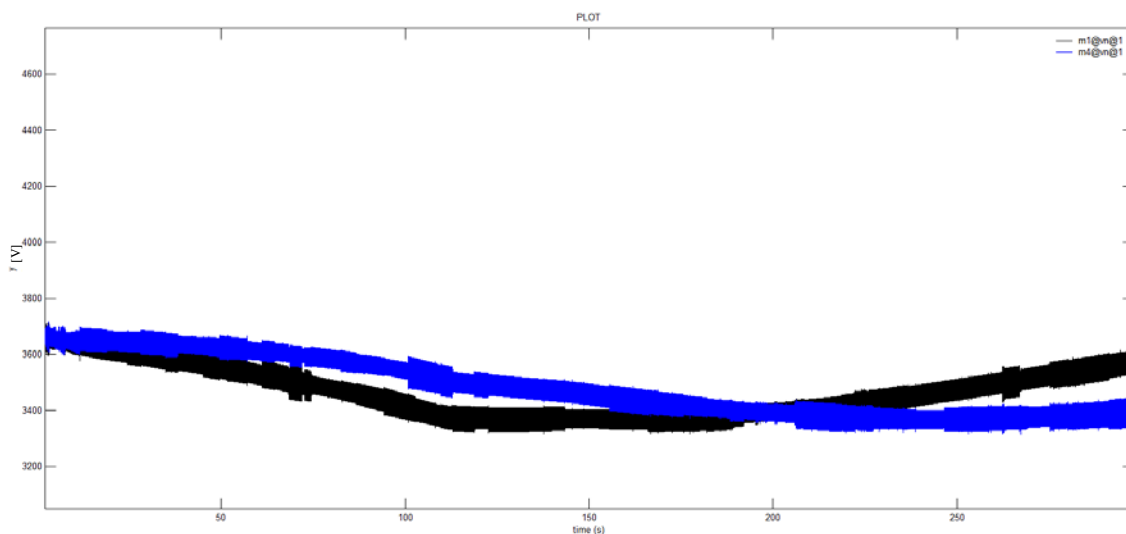


Figura 160 Tensioni erogate dalle SSE m1: SSE di sinistra m4: SSE di destra

Come si nota le due SSE non si trovano allo stesso potenziale, determinando la presenza di una corrente di ricircolo anche nella linea di contatto priva di carichi e sul feeder negativo. Dato che però lo squilibrio di tensione non è eccessivo, l'entità delle correnti presenti su questi conduttori è molto modesta, evitando quindi il verificarsi di forti perdite di linea anche in assenza di carichi. Da notare è il valore più basso che assume la tensione erogata

da entrambe le SSE, sintomo di una caduta di tensione interna più importante rispetto al caso di riferimento.

L'andamento del potenziale dei feeder negativi in prossimità delle SSE si presenta invece nel modo seguente.

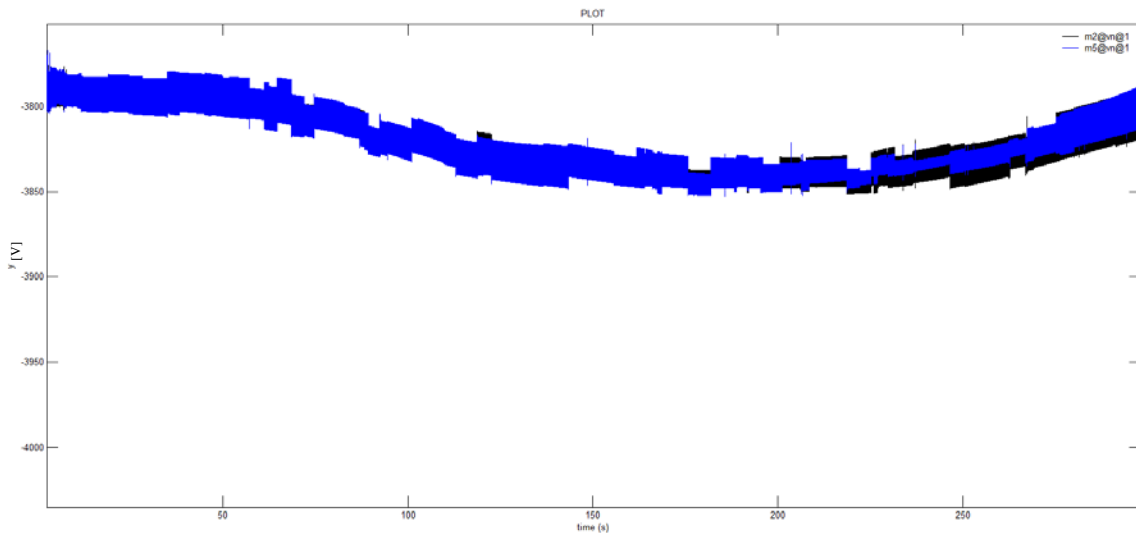


Figura 161 **Potenziali della sbarra negativa delle SSE** **m5: SSE di destra**
m2: SSE di sinistra

Anche in questo caso l'andamento non è perfettamente identico per le due SSE, determinando una corrente di ricircolo sui feeder negativi del circuito di alimentazione, di entità però poco rilevante (il valore è sempre inferiore ai 5 A). Da notare è anche il valore assunto dal potenziale, sempre inferiore ai -3800 V, come già riscontrato nelle simulazioni di tipo statico. Infine bisogna ricordare che l'irregolarità della forma d'onda registrata è dovuta a errori di tipo numerico, non presentando in realtà un andamento così discontinuo.

Interessante risulta anche l'andamento della tensione verso terra del binario in prossimità delle SSE, che si presenta in questo modo.

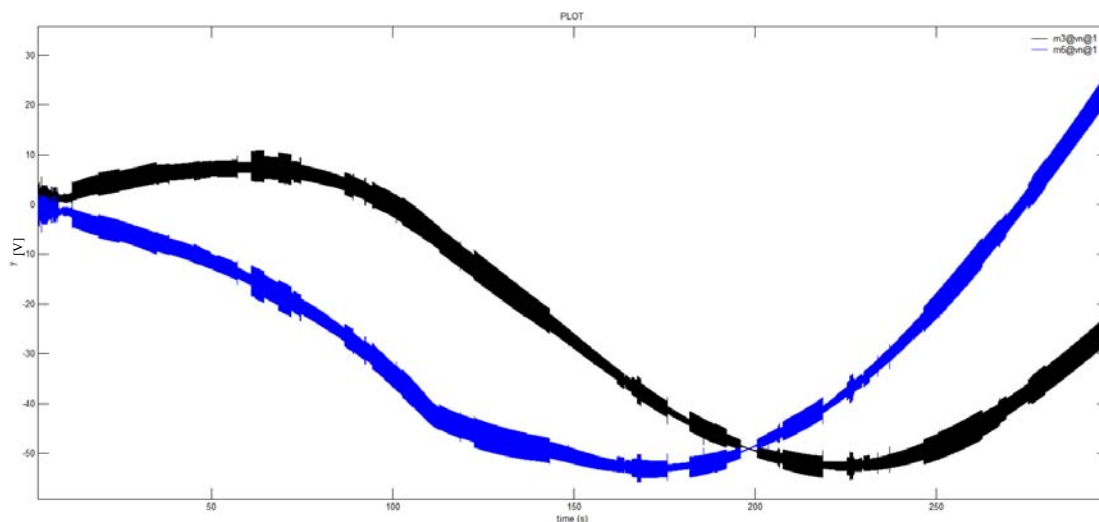


Figura 162 Potenziale di binario in prossimità delle SSE m3: SSE di sinistra
m6: SSE di destra

Gli andamenti risultano molto simili a quelli riscontrati nelle simulazioni effettuate sui modelli di riferimento. Il valore minimo della tensione raggiunto dal binario è pari a -50 V e si registra in corrispondenza del passaggio per il centro tratta del convoglio.

Resta ora da esaminare solo l'andamento della caduta di tensione lungo la linea, che assume la seguente forma.

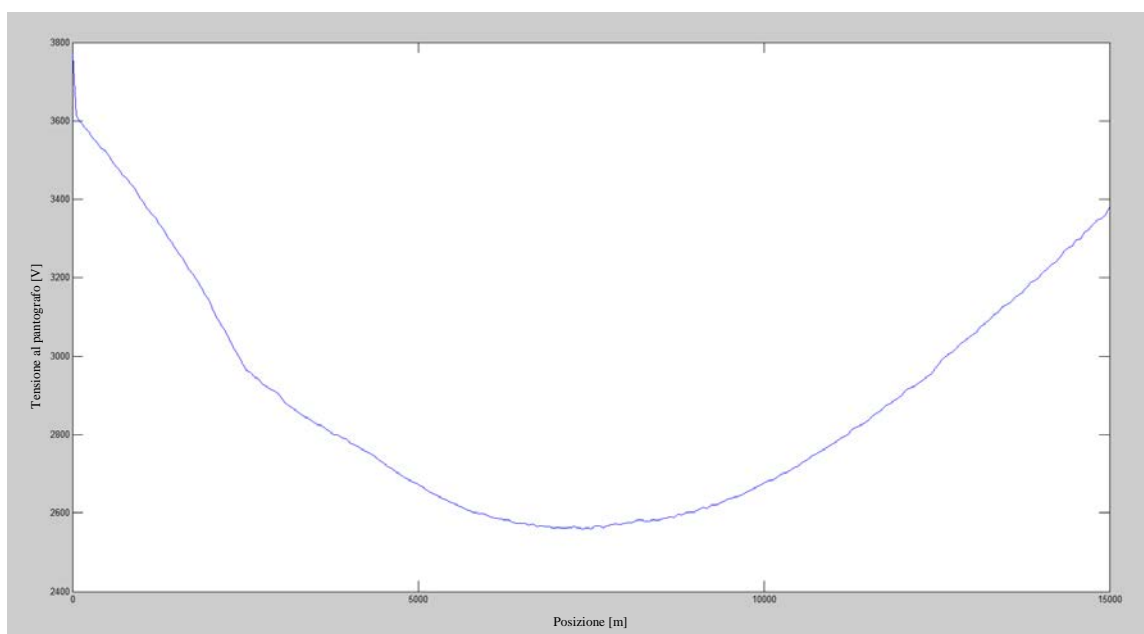


Figura 163 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata

L'andamento si presenta del tutto simile a quello registrato nella simulazione effettuata sul modello di riferimento, con un valore minimo rilevato a metà tratta leggermente inferiore (2520 V rispetto ai 2600 V riscontrati in precedenza). Per completezza si riporta di seguito

anche l'andamento della tensione rilevata a metà tratta in funzione del tempo di simulazione.

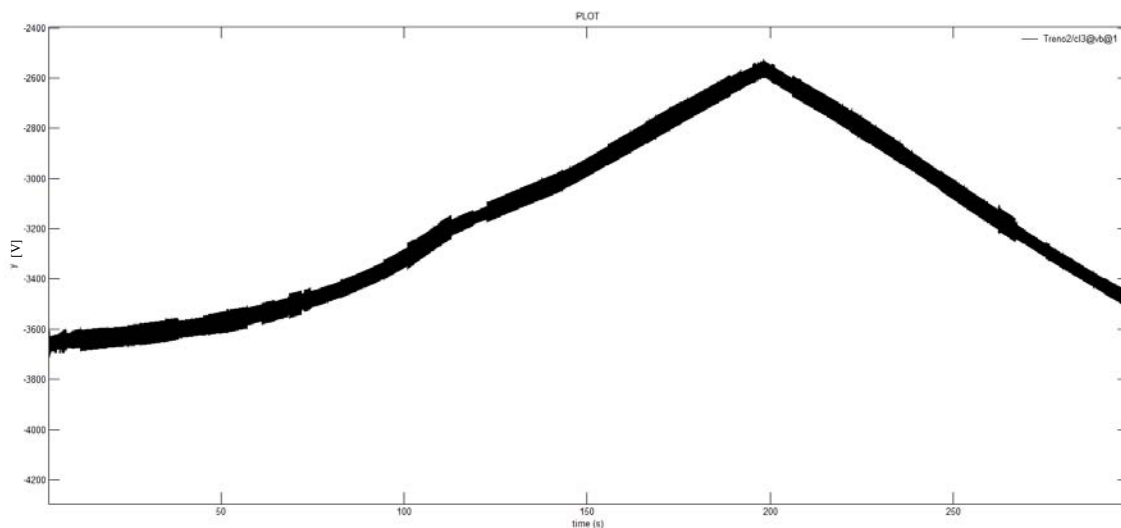


Figura 164 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

Si ricorda che i valori assunti sono negativi a causa della convenzione utilizzata dal programma per definire il generatore di corrente pilotato.

9.2.2. Sistema dotato di TEP controllato in tensione

La seconda simulazione da effettuare è relativa allo spostamento di un carico con i soliti profili di velocità e potenza, su una linea realizzata secondo il sistema 2×3 kV dotata di posto di conversione statica controllato in tensione.

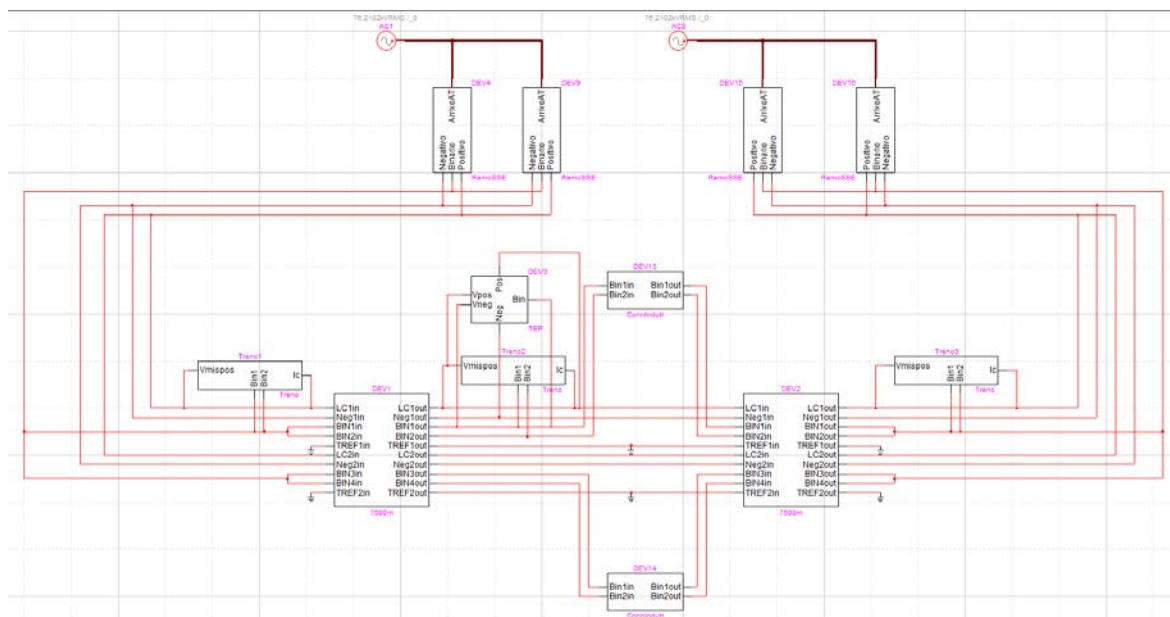


Figura 165 Modello dotato di TEP controllato in tensione utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente un solo carico

Interessante risulta l'andamento delle tensioni erogate dalle SSE, che si presentano nel modo seguente.

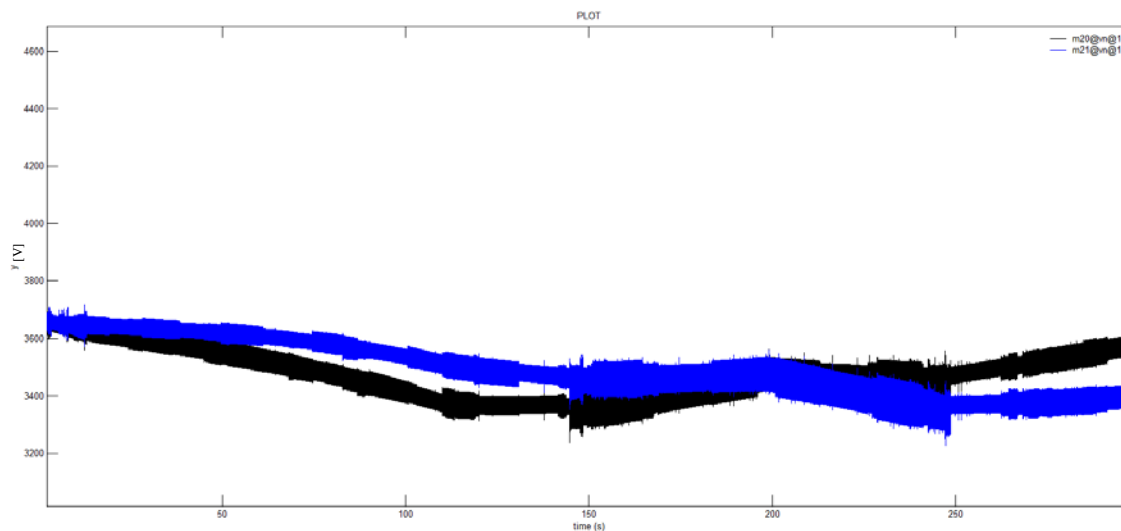


Figura 166 **Tensioni erogate dalle SSE** **m20: SSE di sinistra**
m21: SSE di destra

Come si nota le due SSE non si trovano allo stesso potenziale, determinando la presenza di una corrente di ricircolo anche nella linea di contatto priva di carichi e sul feeder negativo. Dato che però lo squilibrio di tensione non è eccessivo, l'entità delle correnti presenti su questi conduttori è molto modesta, evitando quindi il verificarsi di forti perdite di linea anche in assenza di carichi. Da notare è l'andamento che assume il potenziale tra i 150 s e i 250 s, intervallo di tempo in cui si attiva il trasformatore elettronico di potenza, la cui conseguenza è una riduzione delle cadute di tensione interne alle SSE, con successivo innalzamento del potenziale delle sbarre anodiche. L'attivazione è legata però solo al valore della tensione presente a metà tratta, che risulterà quindi sempre superiore ai 3000 V.

Si riporta di seguito l'andamento assunto dalla corrente transitante attraverso il trasformatore elettronico di potenza.

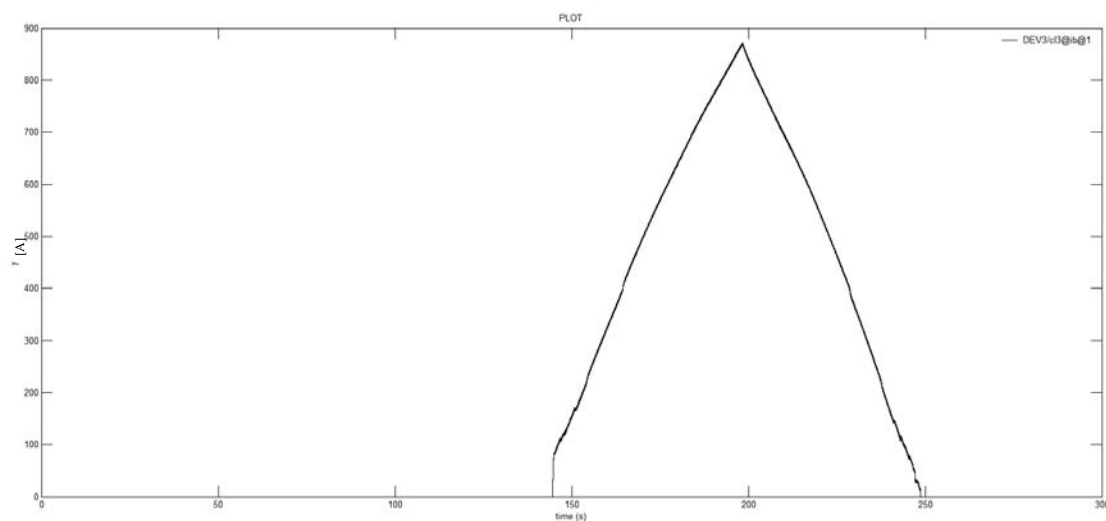


Figura 167 Andamento della corrente fornita dal TEP alla linea di contatto

Si nota come l'andamento presenta un massimo in corrispondenza del passaggio del convoglio per il centro della tratta analizzata (che avviene a circa 200 s). Questo infatti sarebbe il momento in cui si avrebbe la maggiore caduta di tensione in linea, e quindi l'apporto del feeder negativo deve essere massimo. L'andamento della corrente segue poi quello che avrebbe la caduta di tensione a metà tratta durante lo spostamento del carico.

L'andamento del potenziale dei feeder negativi in prossimità delle SSE si presenta invece nel modo seguente.

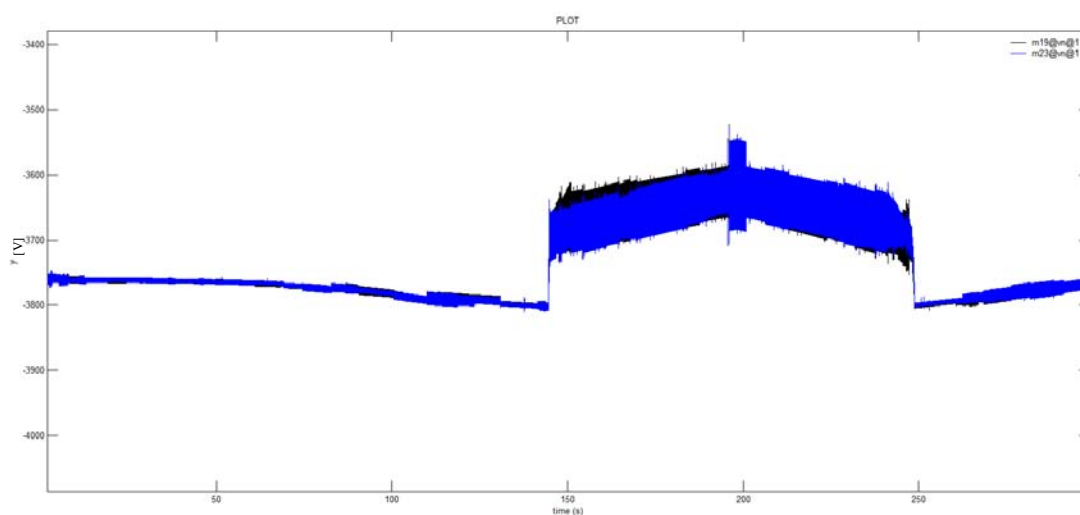


Figura 168 Potenziali della sbarra negativa delle SSE m19: SSE di sinistra m23: SSE di destra

Anche in questo caso l'andamento non è perfettamente identico per le due SSE, determinando una corrente di ricircolo sul feeder negativo della linea non caricata, di entità

però poco rilevante. Da notare è anche il valore assunto dal potenziale, sempre inferiore ai -3700 V negli istanti in cui il posto di conversione statica non risulta in conduzione, mentre prossimo ai -3600 V nei momenti in cui il TEP è attivo. L'andamento rispecchia quindi quanto già verificato nelle simulazioni effettuate in precedenza.

Interessante risulta anche l'andamento della tensione verso terra del binario in prossimità delle SSE, che si presenta in questo modo.

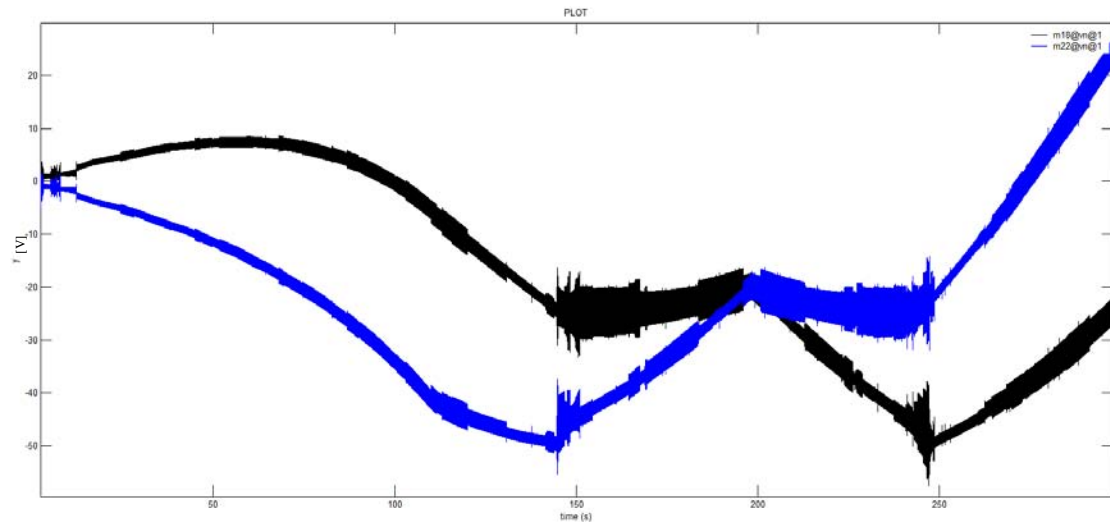


Figura 169

Potenziali di binario in prossimità delle SSE

m18: SSE di sinistra
m22: SSE di destra

Confrontando gli andamenti ottenuti con quelli relativi alla simulazione effettuata senza la presenza del posto di conversione statica, si nota subito l'effetto dell'attivazione del TEP, in grado di elevare la tensione del binario in prossimità delle SSE.

Resta ora da esaminare solo l'andamento della caduta di tensione lungo la linea, che assume la seguente forma.

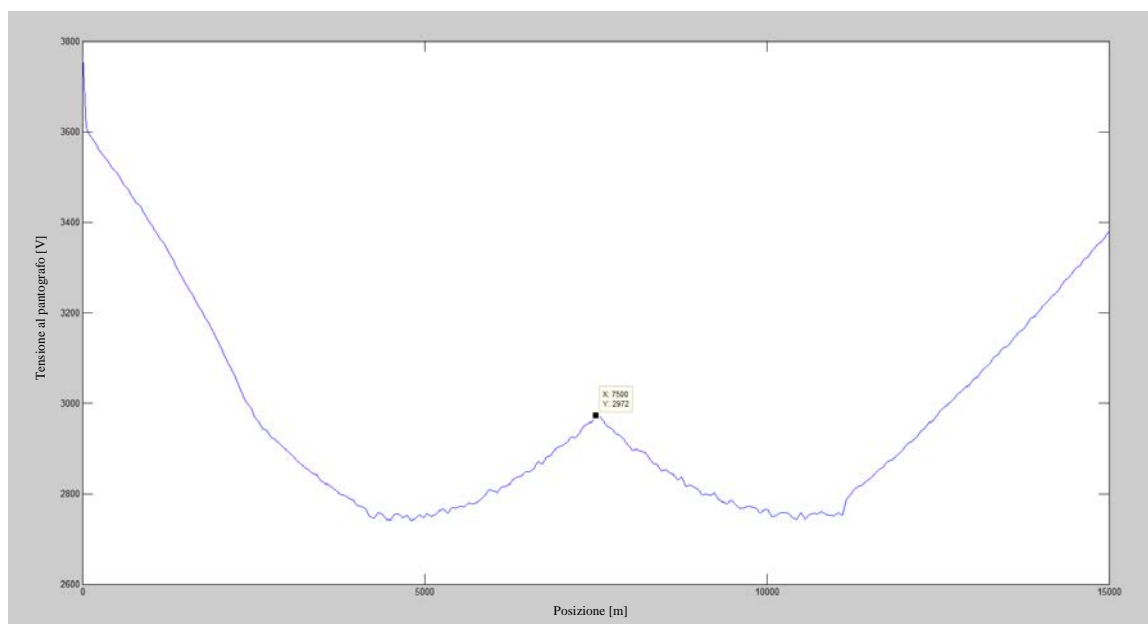


Figura 170 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata

Si nota subito come l'andamento sia molto diverso rispetto a quelli visti finora. L'attivazione del TEP ha infatti l'effetto di ridurre le cadute di tensione, andando a migliorare la qualità dell'alimentazione dei convogli. Rispetto alla simulazione eseguita senza il posto di conversione statica, il valore della tensione al pantografo non scende infatti mai sotto i 2750 V, contro i 2600 V riscontrati precedentemente. Inoltre non si verifica più che la massima caduta di tensione è in corrispondenza del centro della tratta, ma viene spostata a un terzo e due terzi del tracciato.

Per completezza si riporta di seguito anche l'andamento della tensione rilevata a metà tratta in funzione del tempo di simulazione.

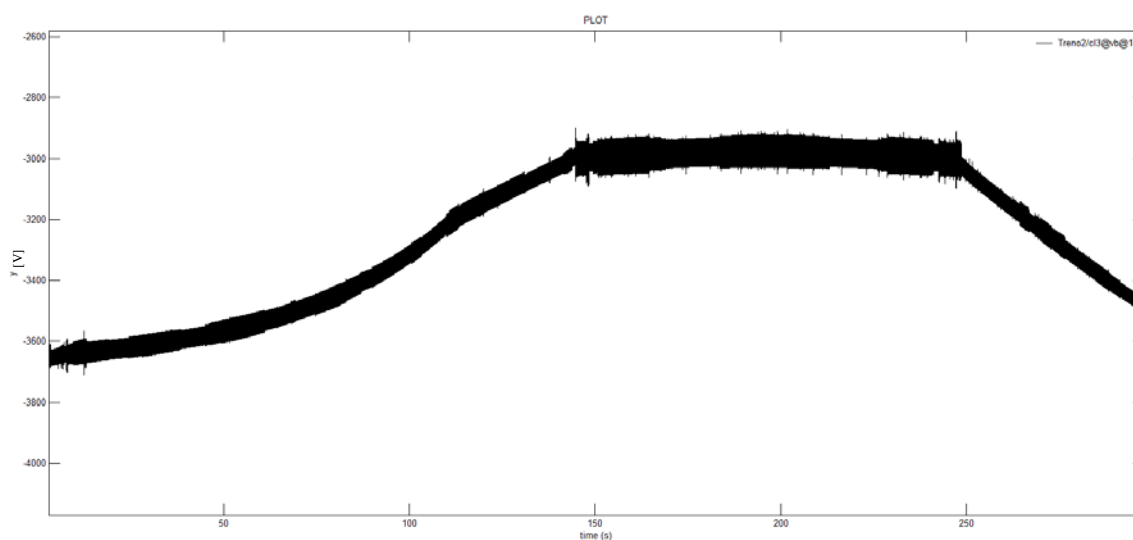


Figura 171 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

Si nota il corretto funzionamento del controllo, in grado di non far scendere la tensione a metà tratta al di sotto dei 3000 V. Si ricorda che i valori assunti sono negativi a causa della convenzione utilizzata dal programma per definire il generatore di corrente pilotato.

9.2.3. Sistema dotato di TEP controllato in corrente

La simulazione è analoga a quella eseguita in precedenza, ma il posto di conversione statica risulta controllato in corrente.

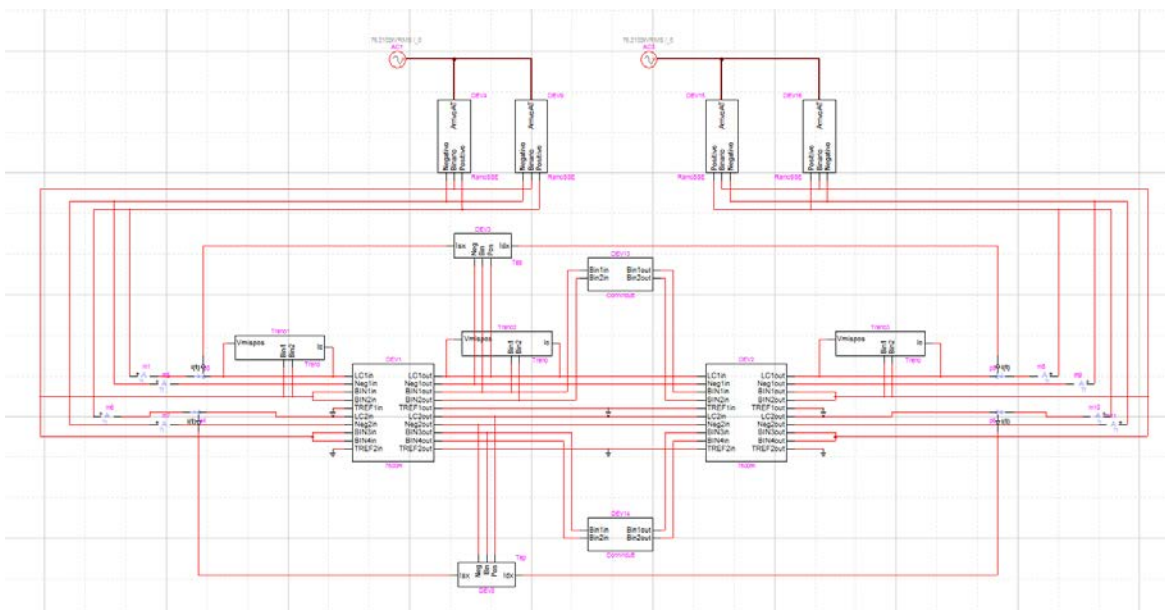


Figura 172 Modello dotato di TEP controllato in tensione utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente un solo carico

Interessante risulta l'andamento della tensione erogata dalle SSE, che si presenta nel modo seguente.

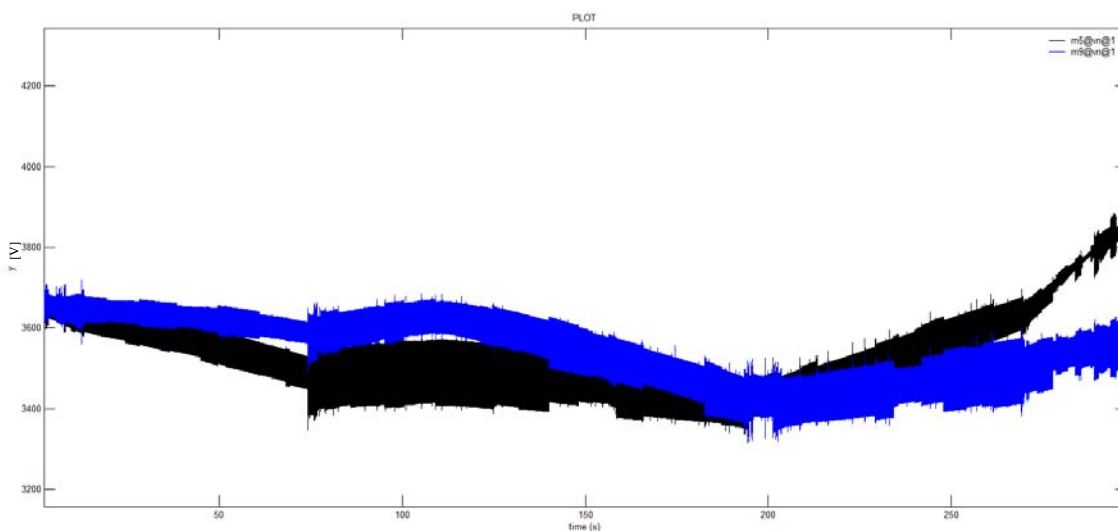


Figura 173 Tensioni erogate dalle SSE
 m5: SSE di sinistra
 m9: SSE di destra

Come si nota le due SSE non si trovano allo stesso potenziale, determinando la presenza di una corrente di ricircolo anche nella linea di contatto priva di carichi e sul feeder negativo. Dato che però lo squilibrio di tensione non è eccessivo, l'entità delle correnti presenti su questi conduttori è molto modesta, evitando quindi il verificarsi di forti perdite di linea anche in assenza di carichi. Interessante è l'andamento che assume il potenziale dopo i 75 s, istante in cui si attiva il trasformatore elettronico di potenza. La messa in funzione è legata solo al valore della corrente erogata dalla SSE sulla linea di contatto, che risulterà quindi sempre inferiore ai 1500 A, non andando quindi a gestire direttamente l'andamento della caduta di tensione lungo la linea.

Come verifica di quanto detto, si riporta di seguito l'andamento assunto dalla corrente transitante attraverso il trasformatore elettronico di potenza.

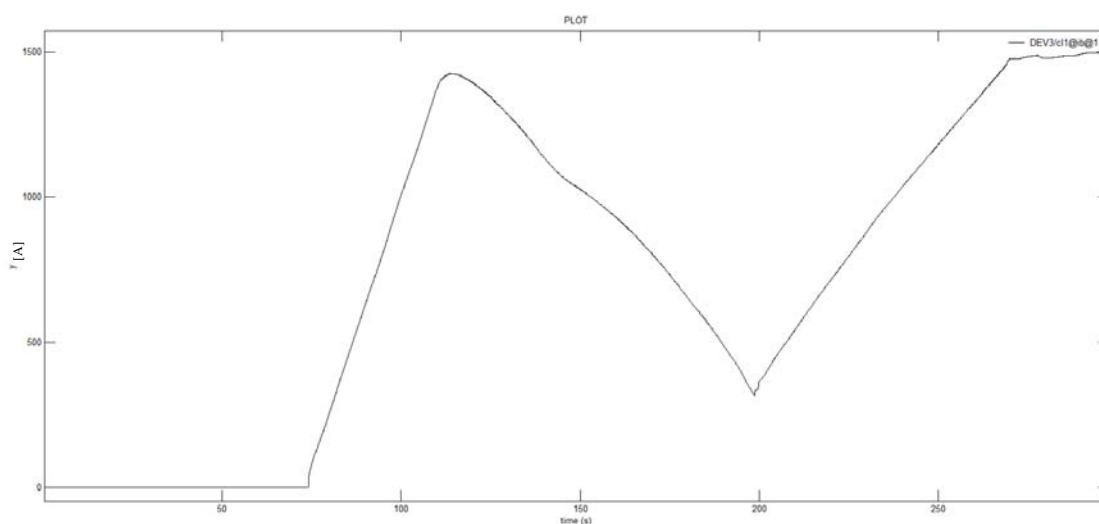


Figura 174 Andamento della corrente fornita dal TEP alla linea di contatto

Si nota come l'andamento presenti un minimo in corrispondenza del passaggio del convoglio per il centro della tratta analizzata (che avviene a circa 200 s). Questo infatti è il momento in cui la corrente viene suddivisa in modo eguale tra le due SSE, determinando quindi il minimo apporto del feeder negativo. Quando il convoglio si trova invece in prossimità delle SSE, la corrente viene fornita quasi interamente da un solo posto di alimentazione e quindi il contributo del posto di conversione statica è massimo. Da notare sono anche i valori molto più elevati della corrente transitante nel TEP, indice di una caduta di tensione maggiore presente sulla linea di contatto.

Come conferma del corretto funzionamento del controllo, si riportano gli andamenti delle correnti erogate dalle SSE sulla linea di contatto.

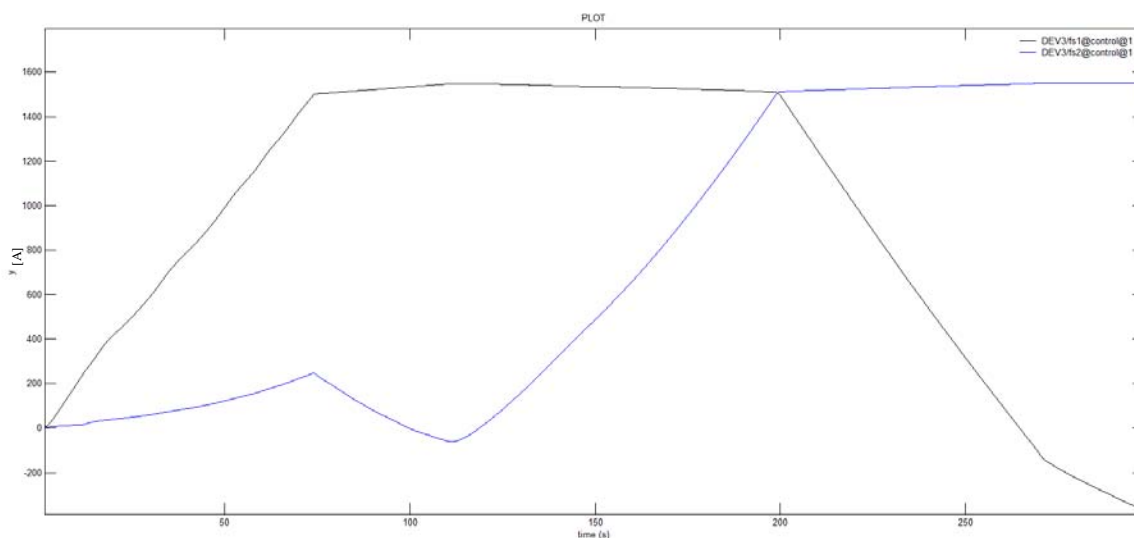


Figura 175 Correnti erogate dalle SSE sulla Idc **DEV3/fs1: SSE di sinistra**
DEV3/fs2: SSE di destra

Si nota che il valore della corrente erogata sulla linea di contatto sia sempre limitato, anche se, a causa di un sistema di controllo non perfetto, il valore di 1500 A impostato venga superato di poco da entrambe le SSE.

Resta ora da esaminare solo l'andamento della caduta di tensione lungo la linea, che assume la seguente forma.

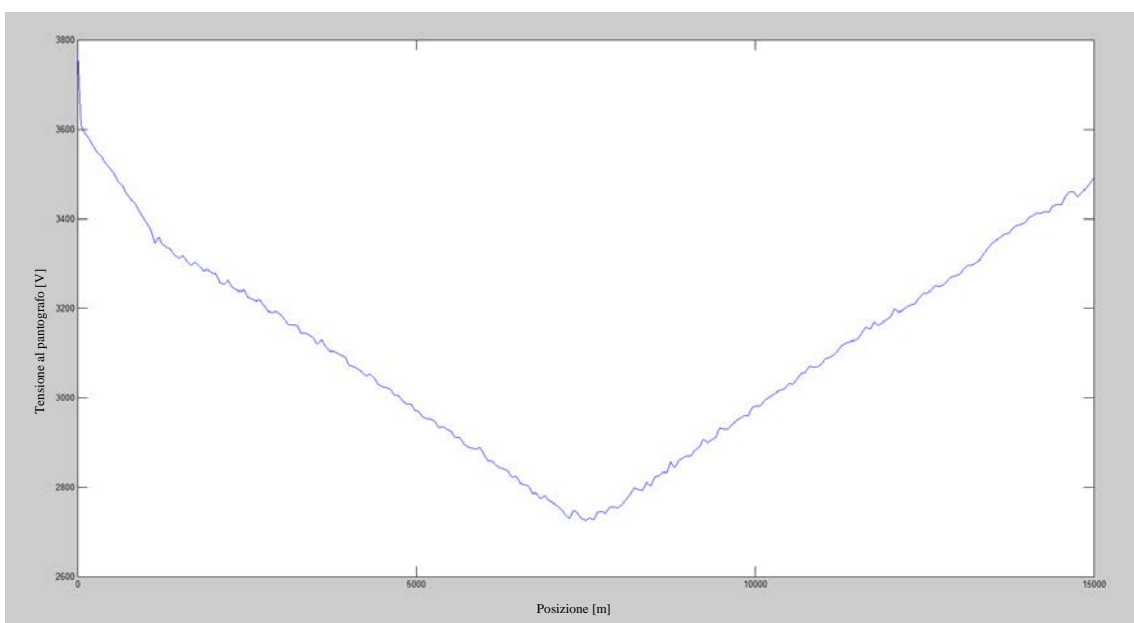


Figura 176 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata

Si nota subito come l'andamento sia molto diverso rispetto a quelli visti finora. L'attivazione del TEP ha infatti l'effetto di limitare la corrente presente in linea a 1500 A, facendo assumere alla caduta di tensione il tipico andamento lineare. Il valore della

tensione al pantografo non scende mai sotto i 2700 V, contro i 2600 V riscontrati nella simulazione eseguita senza il posto di conversione statica. Rispetto al controllo in tensione, si nota però un peggioramento nella qualità dell'alimentazione, migliorabile impostando dei valori più limitati come riferimento di corrente.

Per completezza si riporta di seguito anche l'andamento della tensione rilevata a metà tratta in funzione del tempo di simulazione.

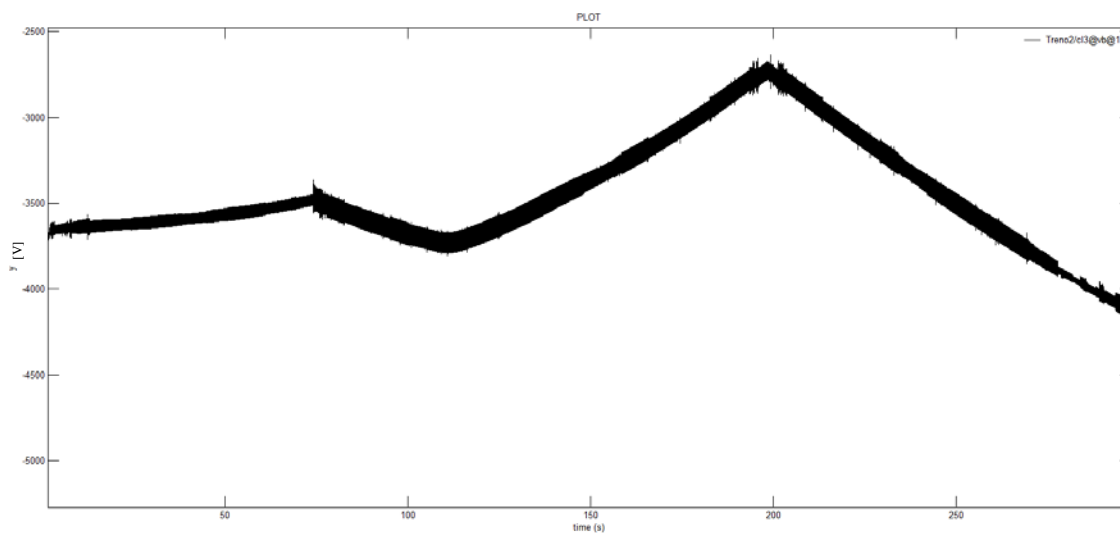


Figura 177 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

Anche in questo caso si nota l'effetto dell'attivazione del controllo, in grado di ridurre le cadute di tensione di linea. Si nota in un primo momento un aumento della tensione (in termini assoluti dato che i valori riportati sono negativi per la solita convenzione da generatore usata per il dispositivo), dovuto a una riduzione della corrente proveniente dalla SSE di destra, per poi ritornare a scendere e toccare il minimo in corrispondenza ovviamente del passaggio del convoglio per il centro della tratta.

9.2.4. Confronto con il sistema di alimentazione convenzionale

Si riporta di seguito una tabella per permettere un rapido confronto dei sistemi di alimentazione utilizzati nella condizione di carico vista.

Tabella 31 Valori delle grandezze caratteristiche dei modelli utilizzati comprendenti un solo carico dinamico

Tipo di alimentazione	Tensione minima al pantografo (V)	Massima tensione di binario in termini assoluti in prossimità delle SSE (V)	Minima tensione del feeder negativo in prossimità delle SSE (V)	Minima tensione del feeder positivo in prossimità delle SSE (V)
Sistema tradizionale	2600	-52	-	3500
Sistema 2 × 3 kV privo di TEP	2520	-55	-3840	3380

Sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in tensione	2750	-50	-3830	3380
Sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in corrente	2700	70	-3760	3480

I risultati ottenuti portano ad affermare che il nuovo sistema di alimentazione privo di posto di conversione statica determina un peggioramento della qualità di alimentazione dei convogli rispetto al sistema attuale sia dal punto di vista della presenza di armoniche, sia per quanto riguarda le cadute di tensione in linea. L'introduzione del trasformatore elettronico di potenza a metà tratta determina invece degli effettivi vantaggi dal punto di vista dell'aumento della potenzialità delle linee e di una riduzione delle cadute di tensione. Particolare attenzione va posta al potenziale della sbarra catodica nel momento in cui il posto di conversione statica non sia in funzione. In questa condizione infatti il potenziale supera in modulo il valore nominale di -3600 V, non avendo considerato la presenza del dispositivo variatore sotto carico nel trasformatore di potenza.

9.3. Sistema 2×3 kV con presenza di un carico dinamico e il parallelo delle linee di contatto

Al fine di cercare di migliorare il sistema dal punto di vista della caduta di tensione in linea si è pensato di mettere in parallelo a centro tratta i conduttori di alimentazione. Si è effettuata quindi la seconda simulazione dinamica, che prevede sempre lo spostamento di un carico, su una linea a doppio binario con la messa in parallelo dei due feeder negativi e delle due linee di contatto a metà tratta. Il collegamento dei conduttori è stato effettuato tralasciando le caratteristiche elettriche della connessione, realizzando quindi un corto circuito netto. I casi considerati e le caratteristiche di simulazione sono quelli già visti nel paragrafo precedente.

9.3.1. Sistema privo di trasformatore elettronico di potenza

Si considera in primo luogo il nuovo sistema di alimentazione privo però dei posti di conversione statica, al fine di osservare l'effetto di un'avaria del TEP.

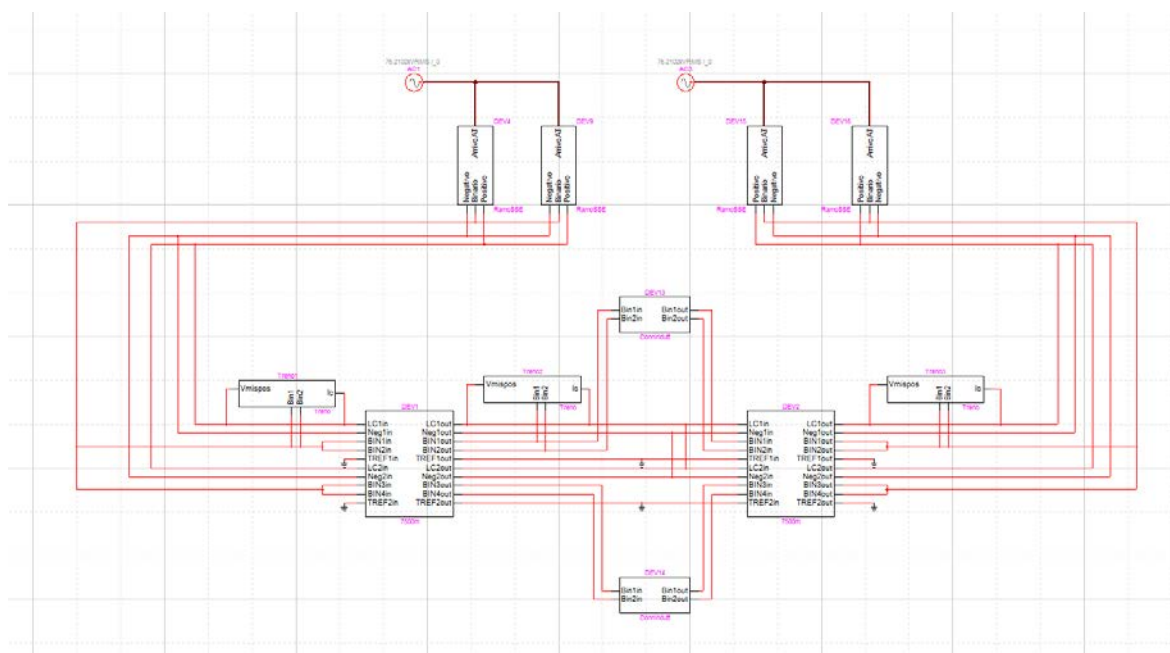


Figura 178 Modello privo di TEP utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente un solo carico e il posto di parallelo a metà tratta

Si riportano di seguito gli andamenti delle tensioni erogate dalle due SSE.

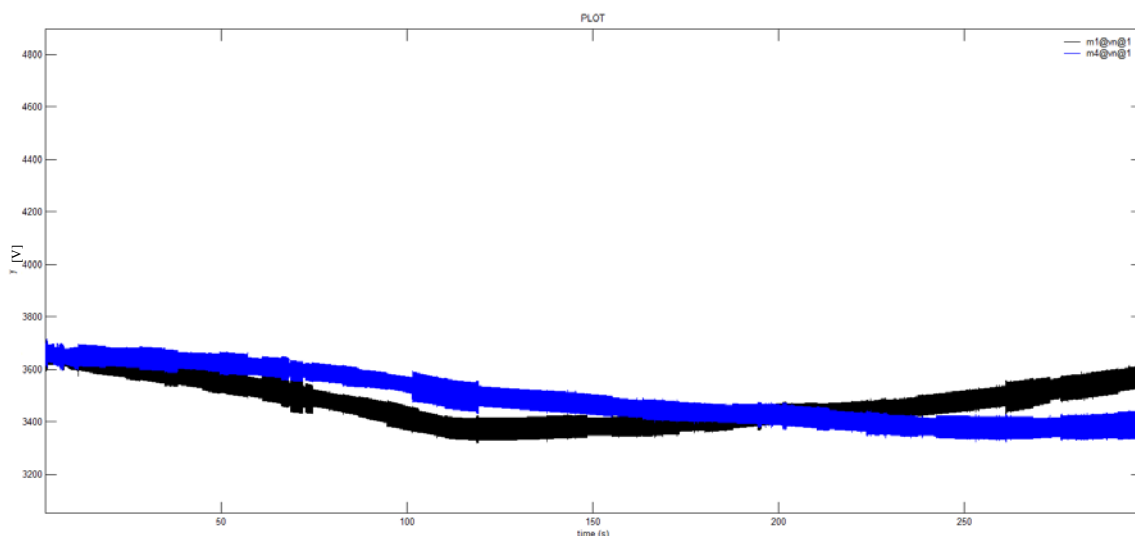


Figura 179 Tensioni erogate dalle SSE m1: SSE di sinistra
m4: SSE di destra

In modo simile a quanto visto nel caso privo di posto di parallelo, gli andamenti delle tensioni imposte dalle due SSE risultano essere differenti, generando correnti di ricircolo nel sistema in esame. In questo caso però tutte le linee di contatto concorrono alla conduzione della corrente assorbita dal carico, e quindi risulta difficile l'individuazione dell'andamento della corrente di ricircolo.

Gli andamenti dei potenziali delle sbarre catodiche delle SSE assumono invece la seguente forma.

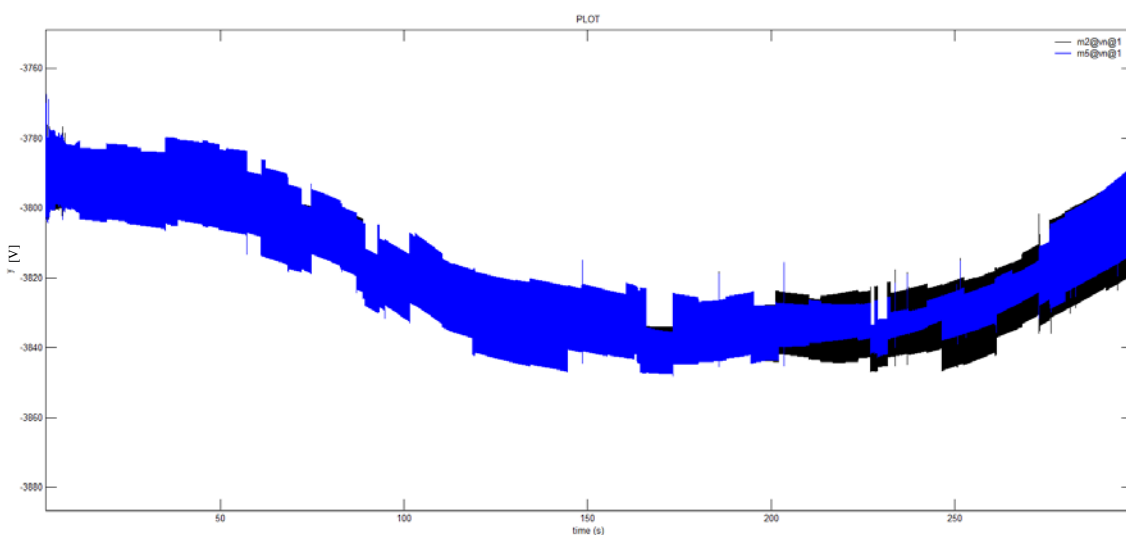


Figura 180 Potenziali della sbarra negativa delle SSE m2: SSE di sinistra
m5: SSE di destra

I valori assunti sono molto simili a quelli riscontrati nell'analogo caso privo di posto di parallelo. Dato che lo squilibrio delle tensioni risulta essere molto modesto, l'entità delle

correnti di ricircolo presenti sui feeder negativi è sempre inferiore ai 3 A, determinando delle perdite trascurabili in questi conduttori.

Le tensioni dei binari in prossimità delle SSE si presentano invece nel modo seguente.

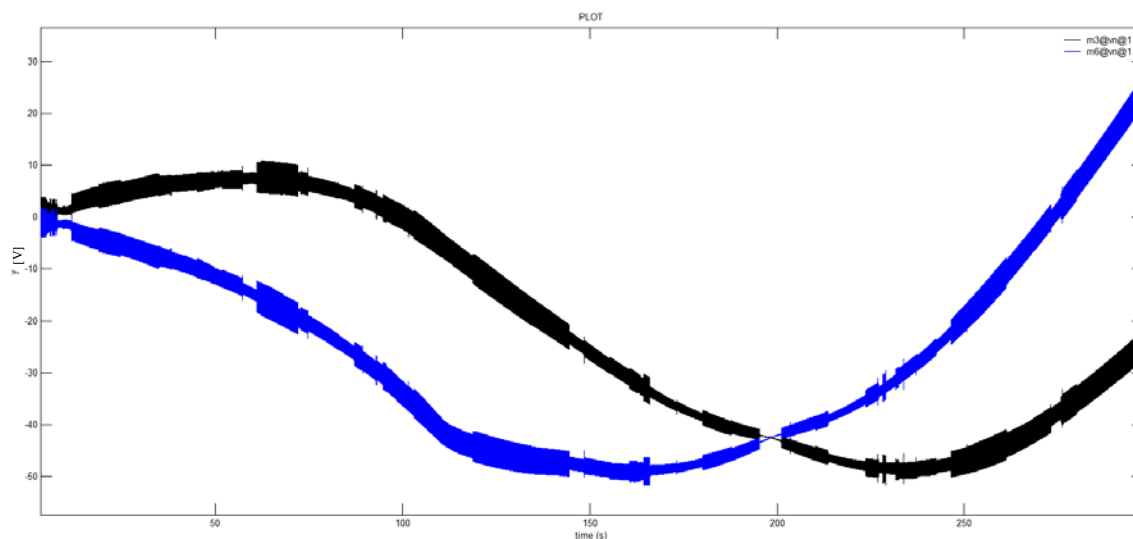


Figura 181 Potenziale di binario in prossimità delle SSE m3: SSE di sinistra m6: SSE di destra

Anche in questo caso non si notano grandi differenze nell'andamento rispetto alle simulazioni precedenti. Anche i valori assunti risultano essere molto simili, raggiungendo anche in questo caso i -50 V di potenziale verso terra.

Rimane da analizzare l'andamento della caduta di tensione lungo la linea, che si presenta in questo modo.

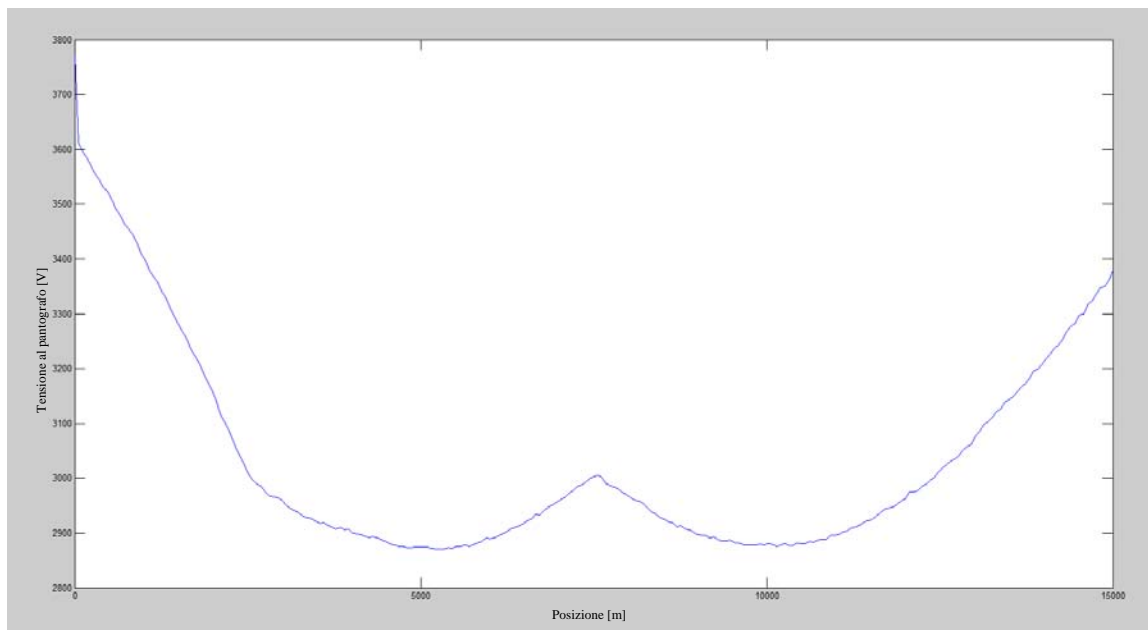


Figura 182 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata

L'andamento è molto simile a quello ottenuto nella verifica del modello con il parallelo delle linee di contatto. Si nota come il massimo della caduta di tensione sia collocato a un terzo e due terzi della tratta, assumendo però valori decisamente più alti rispetto all'analogo caso privo però di posto di parallelo (la tensione non scende mai sotto i 2880 V). Rispetto però alla stessa simulazione effettuata sul modello di riferimento, i valori riscontrati sono leggermente inferiori (il valore minimo registrato è stato infatti pari a 2940 V). In questo senso la messa in parallelo delle linee di contatto risulta comunque un espediente molto efficace, soprattutto per alzare il valore della tensione presente a metà tratta.

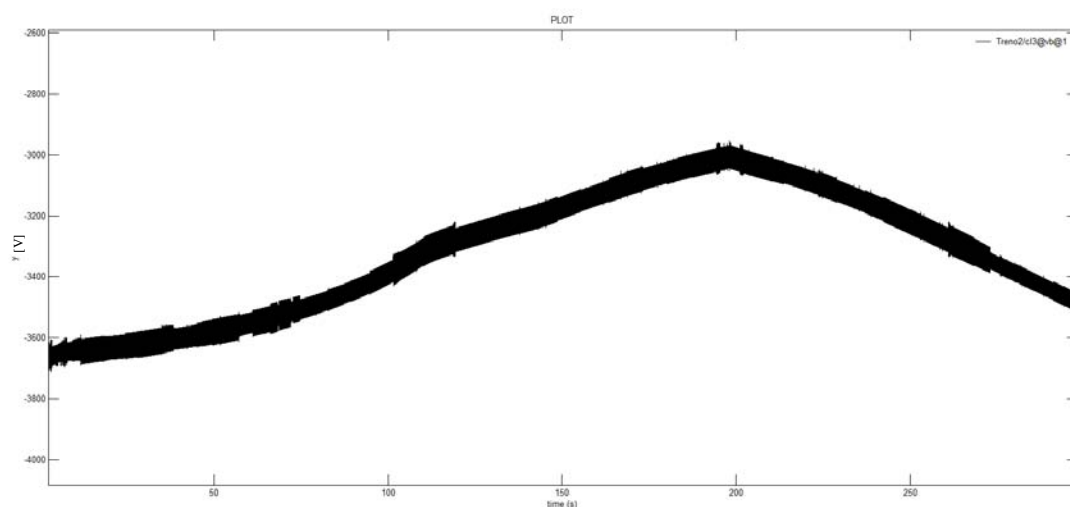


Figura 183 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

Come si nota, il valore della tensione a metà tratta non scende mai sotto i 3000 V, garantendo una qualità dell'alimentazione dei convogli molto superiore rispetto al modello privo di posto di parallelo.

9.3.2. Sistema dotato di TEP controllato in tensione

Si è quindi considerato il caso in cui tutte e due le linee siano dotate di posto di conversione statica, i cui TEP lavorano quindi in parallelo. Tutte le caratteristiche della simulazione sono rimaste invariate rispetto ai casi precedenti, prevedendo quindi che la tensione a metà tratta non scenda mai sotto i 3000 V.

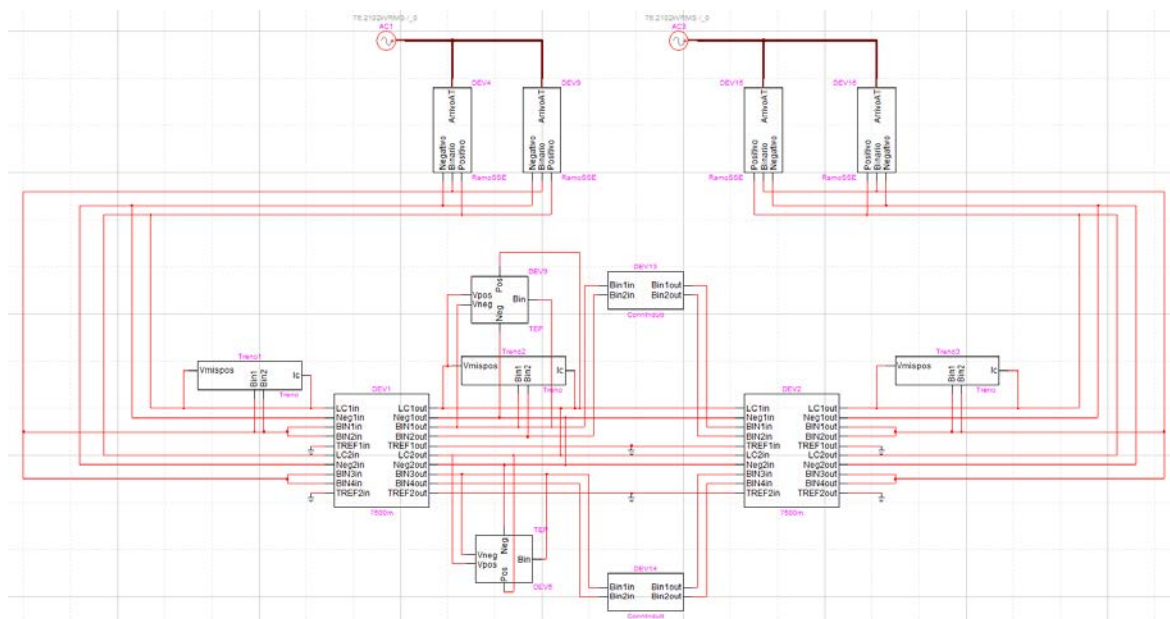


Figura 184 Modello dotato di TEP controllato in tensione utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente un solo carico e il posto di parallelo a metà tratta

Si riportano di seguito gli andamenti delle tensioni erogate dalle due SSE.

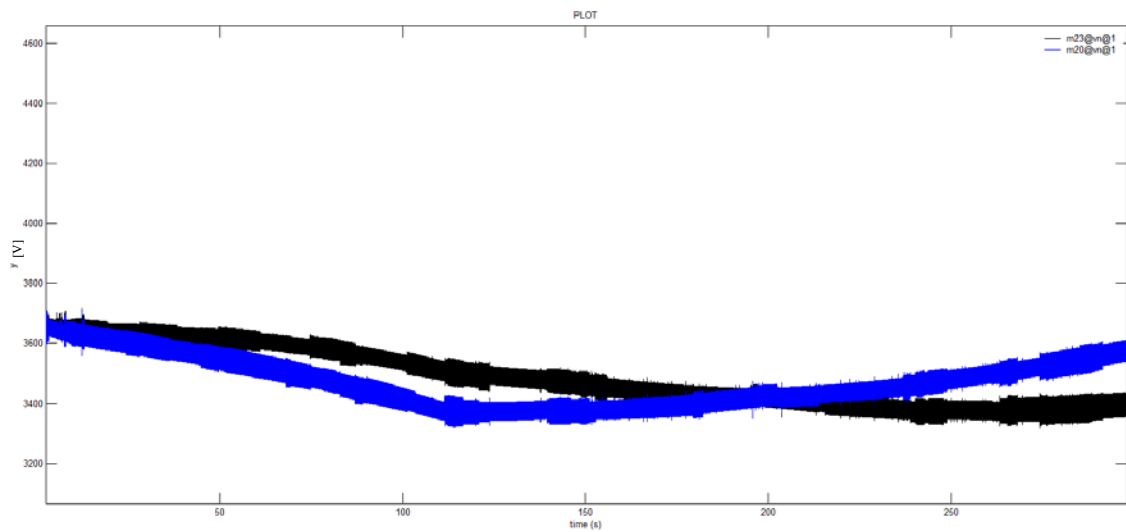


Figura 185 Tensioni erogate dalle SSE m20: SSE di sinistra
m23: SSE di destra

Da un confronto con gli andamenti ottenuti dal modello privo di posto di conversione statica, non si nota alcuna differenza. Questo sta a significare che il trasformatore elettronico di potenza non entra mai in funzione, essendo la tensione a centro tratta sempre maggiore del limite imposto. Come conferma si riporta l'andamento della corrente transitante attraverso il convertitore statico.

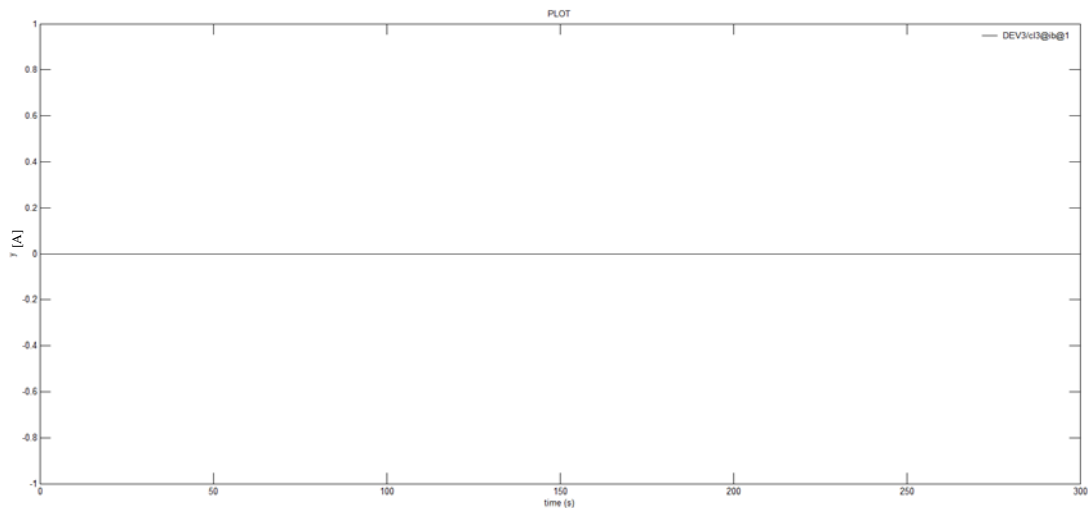


Figura 186 Andamento della corrente fornita dal TEP alla linea di contatto

La corrente è costantemente nulla in quanto la tensione registrata a metà tratta non scende mai sotto i 3000 V.

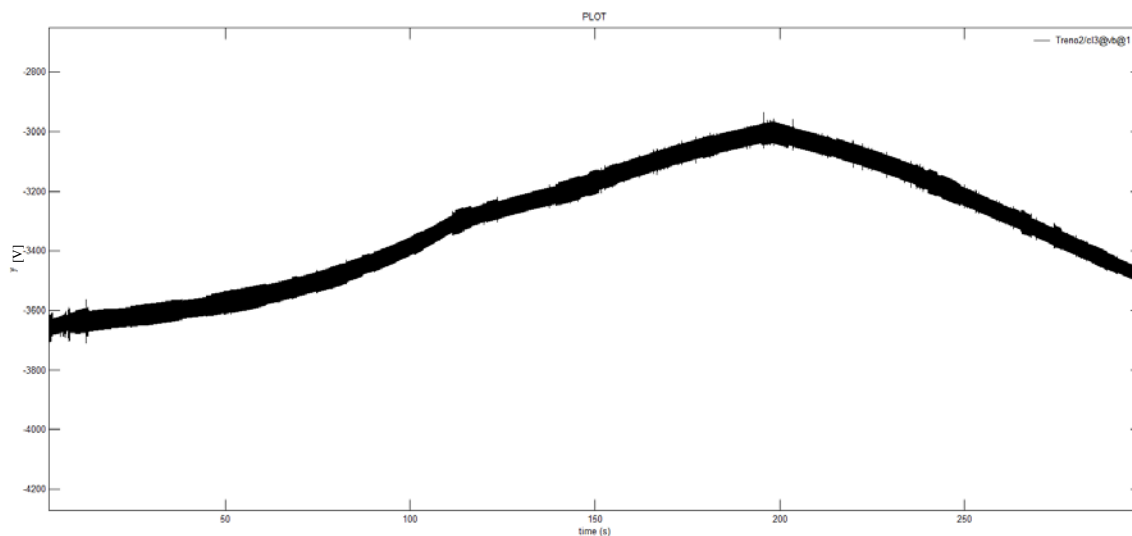


Figura 187 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta

Non si ritiene opportuno riportare il resto degli andamenti delle grandezze di interesse, in quanto identici a quelli già riportati nella simulazione priva di TEP.

9.3.3. Sistema dotato di TEP controllato in corrente

Il terzo modello sviluppato considera tutte e due le linee dotate di posto di conversione statica, i cui TEP vengono controllati in base alle correnti erogate sui feeder positivi. Come per la simulazione relativa al sistema elettrico ferroviario attuale, il limite di corrente imposto è pari a 1500 A.

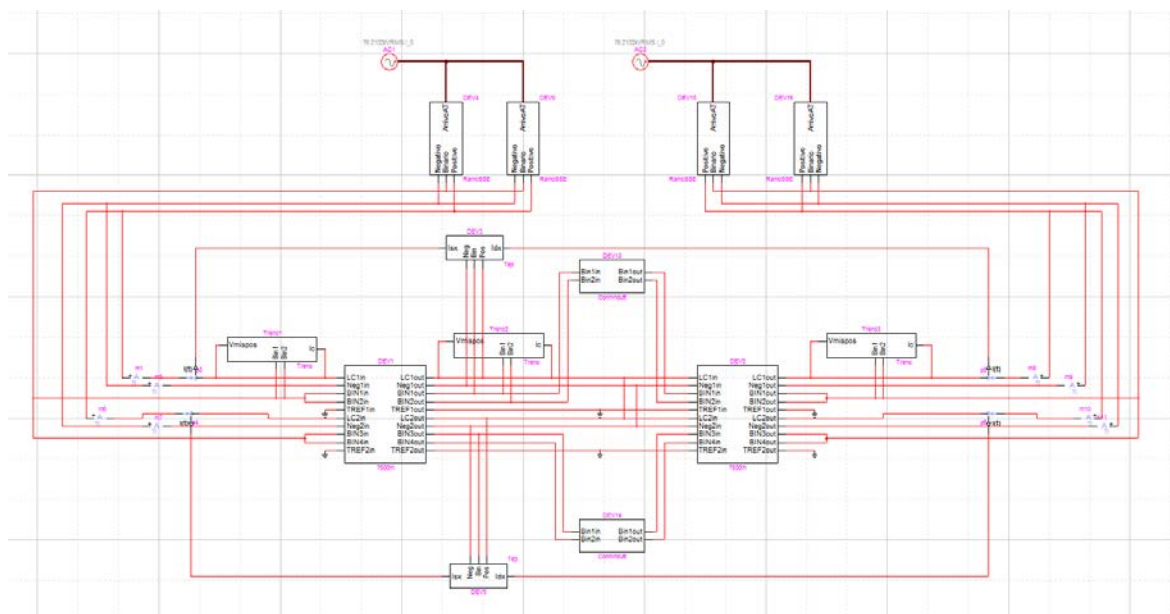


Figura 188 Modello dotato di TEP controllato in corrente utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente un solo carico e il parallelo delle linee di contatto

Si riportano di seguito gli andamenti delle tensioni erogate dalle due SSE.

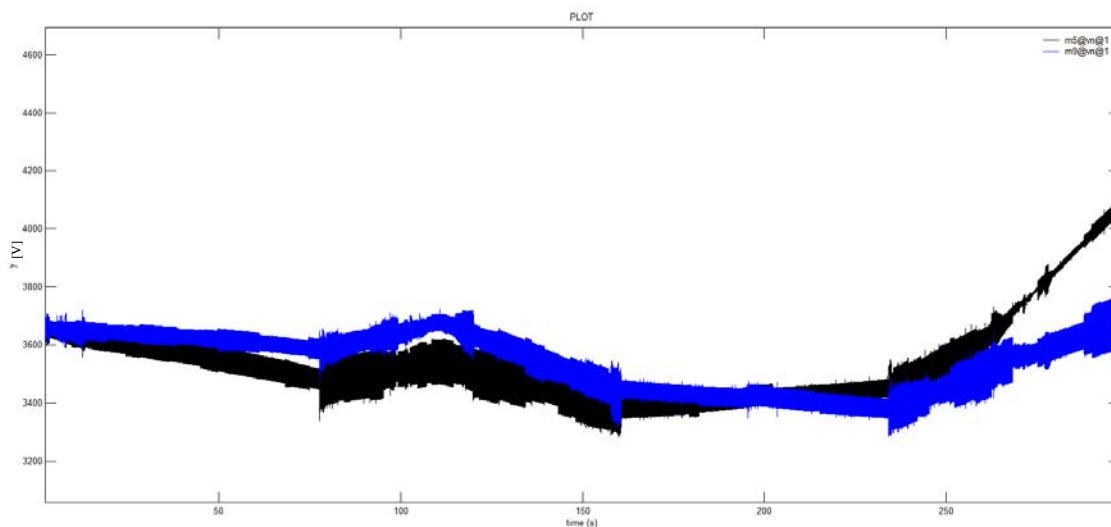


Figura 189 Tensioni erogate dalle SSE **m5: SSE di sinistra**
m9: SSE di destra

Da un confronto con gli andamenti ottenuti nel modello privo di posto di conversione statica, è possibile identificare i momenti di attivazione del TEP. Si nota infatti un primo innalzamento del valore della tensione tra i 75 s e i 160 s e un secondo superati i 135 s. Come conferma di quanto detto si riporta l’andamento della corrente transittante attraverso il convertitore statico presente sulla linea caricata.

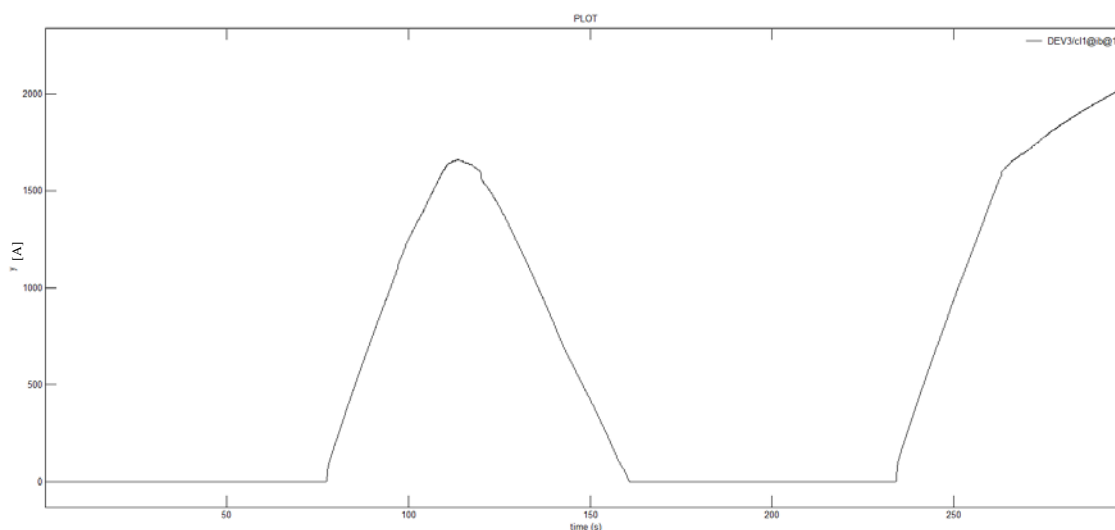


Figura 190 Andamento della corrente fornita dal TEP alla linea di contatto

Si vede come il posto di conversione statica sia in funzione solo quando il carico si trova all’inizio e alla fine della tratta, in quanto la corrente non è equamente suddivisa tra le due SSE. Nella parte centrale invece le correnti sono suddivise tra tutti e quattro i conduttori in modo più uniforme e quindi non viene superato mai il valore di corrente di attivazione del TEP.

Come conferma del corretto funzionamento del controllo in corrente, si riportano gli andamenti delle correnti erogate sulla linea di contatto in cui è presente il carico. Le correnti erogate sull'altra linea non vengono mostrate perché sempre inferiori al limite impostato.

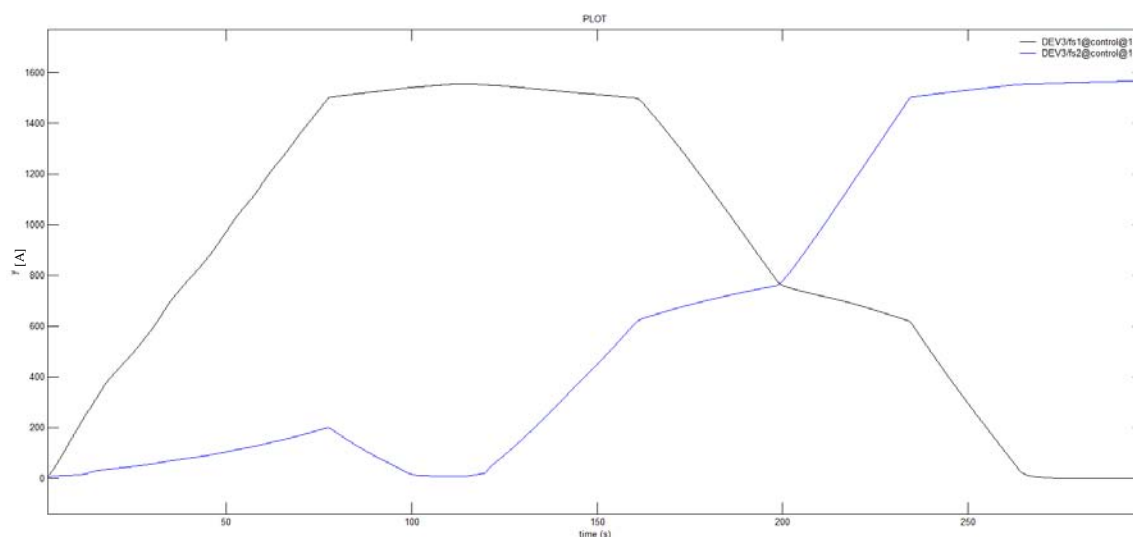


Figura 191 Correnti erogate dalle SSE sulla ldc **DEV3/fs1: SSE di sinistra**
DEV3/fs2: SSE di destra

Rimane ora solo da presentare solo l'andamento della caduta di tensione lungo la tratta considerata.

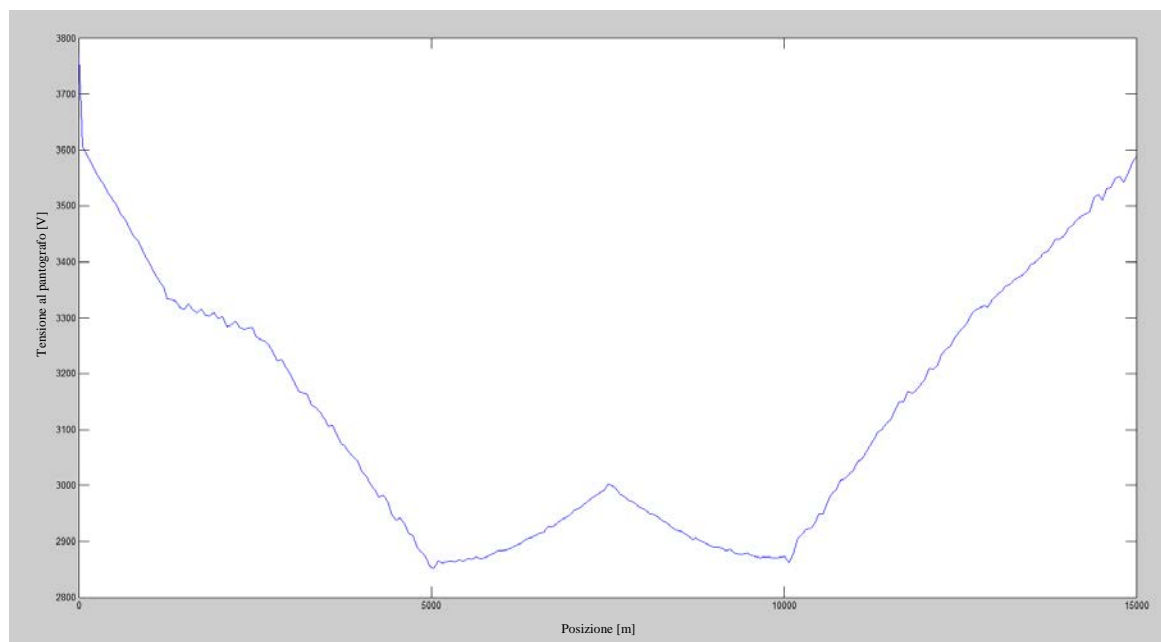


Figura 192 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata

Da un confronto con l'andamento ottenuto dal modello privo di posto di conversione statica, si nota subito l'effetto dell'attivazione del TEP, in grado di elevare la tensione al

pantografo. Nella parte centrale della tratta invece i valori sono identici a quelli già incontrati nella simulazione priva di TEP, dato che il trasformatore elettronico di potenza non è in funzione.

9.3.4. Confronto con il sistema di alimentazione convenzionale

Si riporta di seguito una tabella per permettere un rapido confronto dei sistemi di alimentazione utilizzati nella condizione di carico vista in questo paragrafo.

Tabella 32 Valori delle grandezze caratteristiche dei modelli utilizzati comprendenti un solo carico dinamico e il parallelo delle linee di contatto

Tipo di alimentazione	Tensione minima al pantografo (V)	Massima tensione di binario in termini assoluti in prossimità delle SSE (V)	Minima tensione del feeder negativo in prossimità delle SSE (V)	Minima tensione del feeder positivo in prossimità delle SSE (V)
Sistema tradizionale	2940	-47	NO	3500
Sistema 2 × 3 kV privo di TEP	2880	-50	-3840	3380
Sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in tensione	2940	-50	-3830	3380
Sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in corrente	2880	-50	-3820	3400

Come per il caso precedente, l'assenza del posto di conversione statica porta a un peggioramento delle caratteristiche del sistema rispetto a quello tradizionale in ogni suo aspetto. L'accensione del trasformatore elettronico di potenza a metà tratta, determina invece prestazioni significativamente migliori per quanto riguarda la diminuzione delle cadute di tensione in linea e quindi dell'aumento della potenzialità della tratta considerata. Da questo punto di vista, il controllo del trasformatore elettronico di potenza in tensione sembra offrire prestazioni migliori rispetto al controllo in corrente. Modificando i limiti imposti per i due comandi si potrebbero però ottenere risultati molto simili.

9.4. Sistema 2x3 kV con presenza due carichi dinamici

La terza simulazione prevede la presenza di due carichi con lo stesso profilo di velocità e potenza ma viaggianti in direzione opposte. È stato necessario adottare, come in precedenza, il modello semplificato del treno, che prevede un solo “v(t) probe”, che rileva la tensione solo sulla linea di contatto, al fine di ridurre il numero di dispositivi utilizzati. In modo analogo a quanto visto nelle simulazioni sul sistema elettrico ferroviario attuale, non si considererà la presenza del posto di parallelo tra le linee di contatto e i feeder negativi, in quanto non significativo con la condizione di carico esaminata.

9.4.1. Sistema privo di posto di conversione statica

Si considera in primo luogo l'assenza del posto di conversione statica.

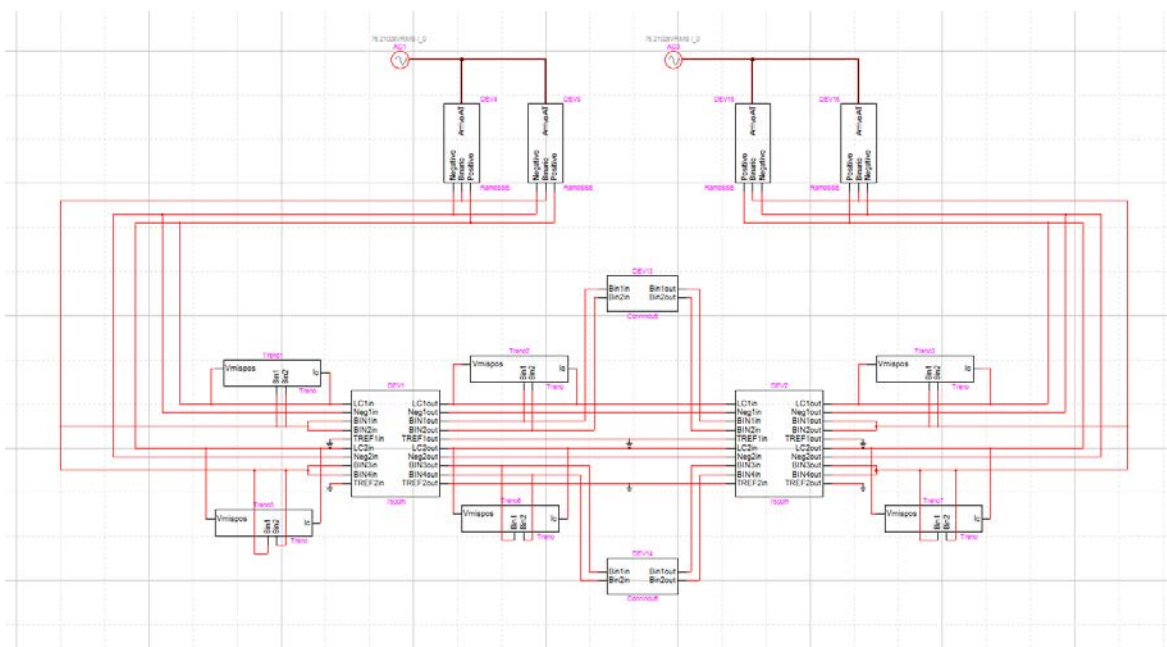


Figura 193 Modello privo di TEP utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente due carichi

Di interesse risultano gli andamenti delle tensioni erogate dalle SSE, di cui si riportano di seguito i grafici.

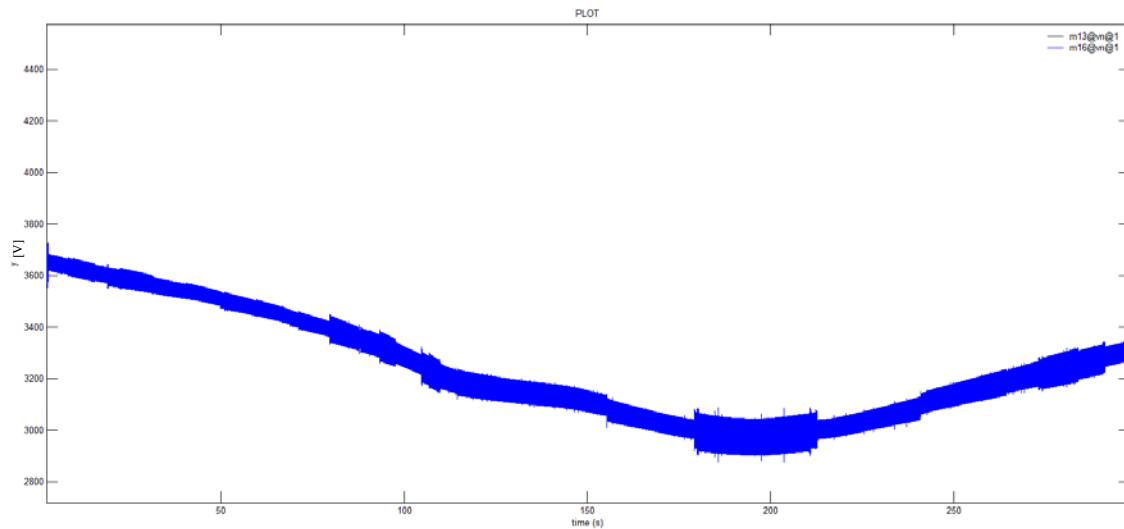


Figura 194 **Tensioni erogate dalle SSE** **m13: SSE di sinistra**
m16: SSE di destra

In questo caso le tensioni imposte dalle SSE sono perfettamente uguali. Come per le simulazioni effettuate sui modelli di riferimento, i carichi sono perfettamente speculari, facendo erogare dalle SSE il medesimo profilo di corrente e causando quindi la medesima caduta di tensione interna. Non si avrà in questo caso nessuna corrente di ricircolo tra le linee alimentate dalle SSE. Da notare è il valore raggiunto dalla tensione nel momento in cui i due treni passano per il centro della tratta, che si assesta sui 3000 V, il valore più basso riscontrato nelle simulazioni effettuate fino a questo momento. Questo comporterà una sensibile riduzione anche della tensione rilevata al pantografo, determinando una qualità di alimentazione molto scarsa.

Gli andamenti dei potenziali della sbarra catodica della SSE si presentano invece nel modo seguente.

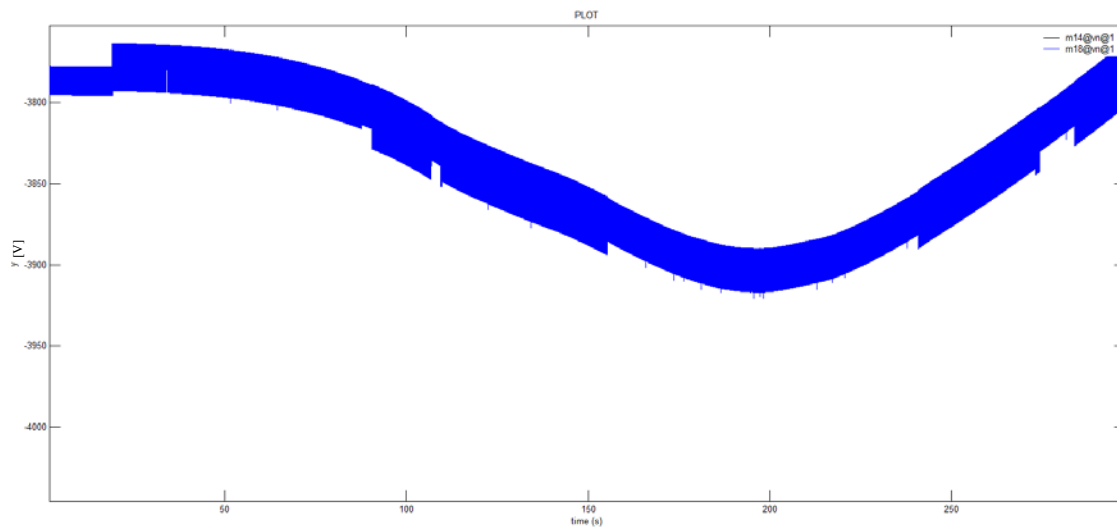


Figura 195 **Potenziali della sbarra negativa delle SSE** **m14: SSE di sinistra**
m18: SSE di destra

Anche in questo caso gli andamenti sono perfettamente identici, data la simmetria delle tensioni imposte sulle linee di contatto. Da notare sono però i valori assunti dal potenziale della sbarra catodica, che raggiungono anche i -3900 V, molto superiori in modulo rispetto ai -3600 V previsti a vuoto. Bisogna ricordare che i valori delle tensioni delle sbarre catodiche e anodiche risultano essere così variabili a causa della mancata presenza del dispositivo variatore sottocarico nel modello utilizzato per i trasformatori. Questo è infatti in grado di mantenere la tensione al secondario del trasformatore più costante, andando a influire in modo benefico sulla qualità dell'alimentazione del circuito di trazione ferroviaria.

Interessante risulta anche l'andamento delle tensioni di binario in prossimità delle SSE, riportato di seguito.

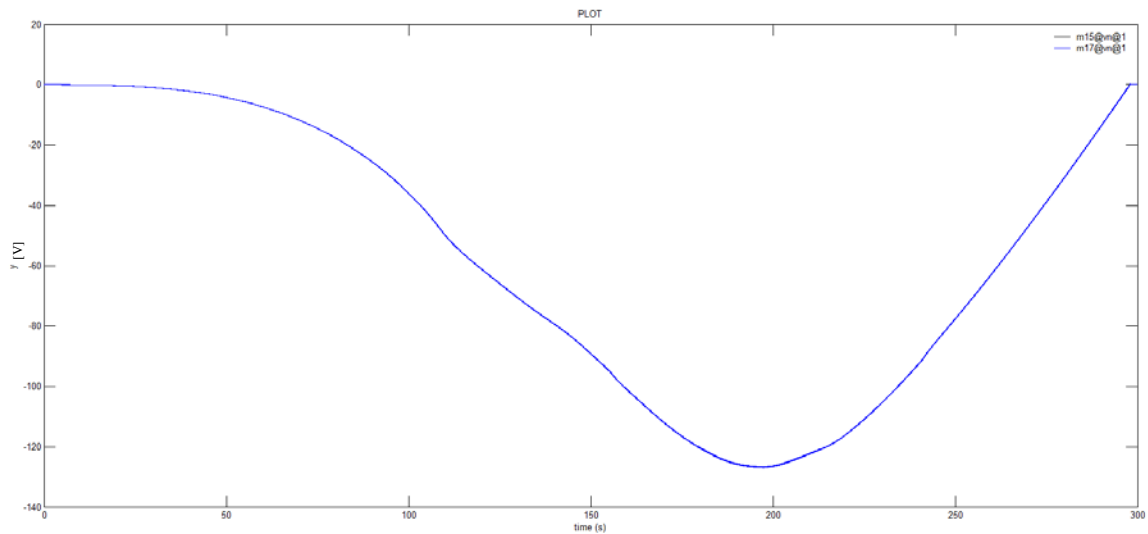


Figura 196 Potenziale di binario in prossimità delle SSE **m15: SSE di sinistra**
m17: SSE di destra

Come si nota, le tensioni presentano il medesimo andamento, data la simmetria del sistema in esame. Si riscontrano in questo caso valori decisamente inferiori rispetto alle simulazioni precedenti (il potenziale verso terra raggiunge i -120 V in corrispondenza del passaggio del convoglio per il centro tratta), sintomo di una più marcata dispersione di corrente nel suolo.

Rimane da analizzare l'andamento della caduta di tensione sulle due linee, che si presenta in questo modo.

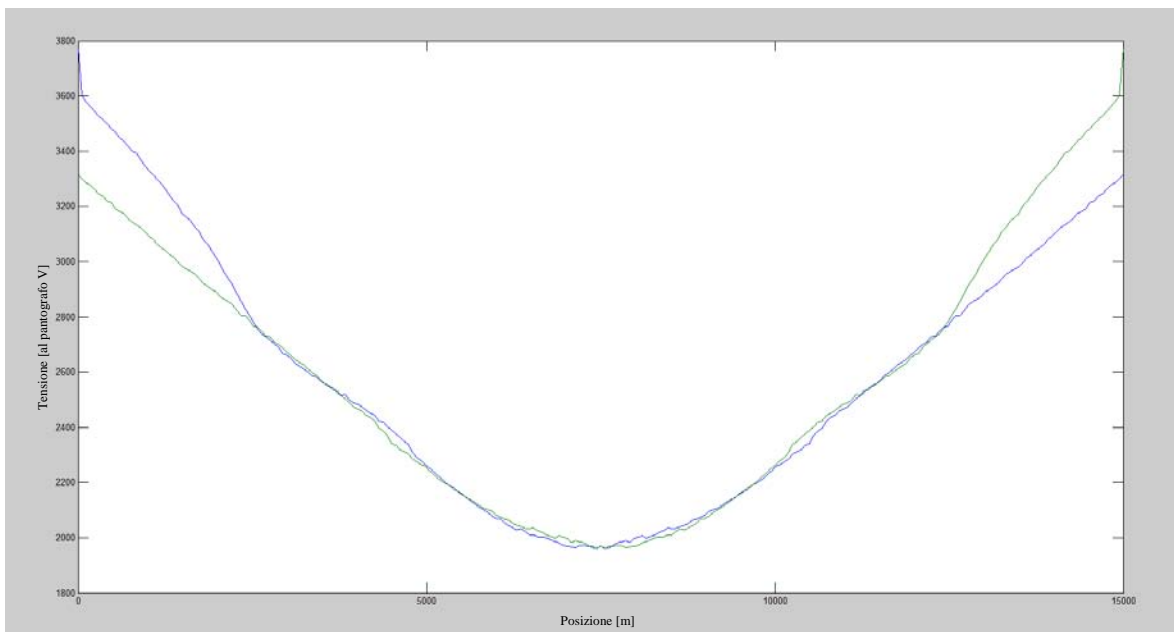


Figura 197 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata **blu: treno da sinistra**
verde: treno da destra

Come si nota, l'andamento della caduta di tensione è speculare e risulta molto simile a quello già incontrato nella simulazione effettuata sul modello di riferimento. La differenza sostanziale risiede però nel valore minimo che la tensione assume nel momento in cui il treno passa per il centro della tratta analizzata, che risulta essere inferiore ai 2000 V, contro i circa 2500 V riscontrati in precedenza. Questo calo molto evidente è determinato da un lato da una caduta di tensione interna alla SSE maggiore e dall'altro da un'intensità delle correnti di carico più alta, dato che il profilo di potenza risulta essere inalterato e la tensione applicata al treno risulta minore. Il modello mostra quindi che, con questa particolare configurazione di rete e di carichi, non si riescono a soddisfare i vincoli per una corretta alimentazione dei convogli.

Di seguito si riporta l'andamento della tensione misurata a metà tratta durante la simulazione, per evidenziare la massima caduta di tensione che si registra. I valori sono negativi in quanto, come già spiegato in precedenza, la misura viene fatta ai capi del generatore di corrente pilotato.

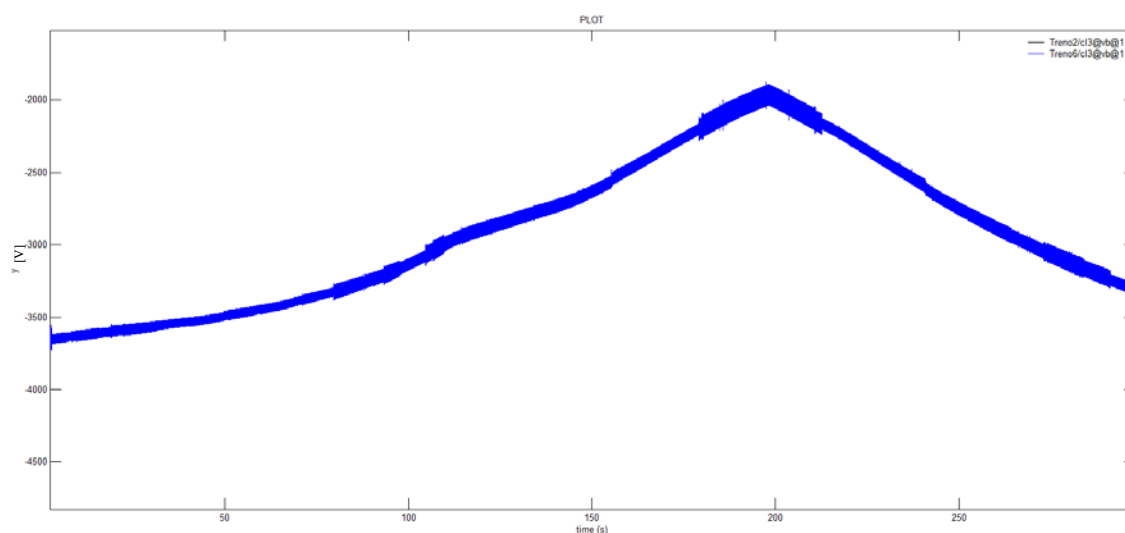


Figura 198 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta Treno2: linea di sinistra
Treno5: linea di destra

Data la simmetria del sistema in esame, la tensione rilevata sulla seconda linea risulta essere perfettamente identica.

9.4.2. Sistema dotato di TEP controllato in tensione

Si è quindi passati a considerare la presenza del TEP controllato in tensione. Data la sostanziale analogia con il caso precedente, tutte le opzioni di simulazione sono rimaste inalterate, così come l'analisi dei risultati.

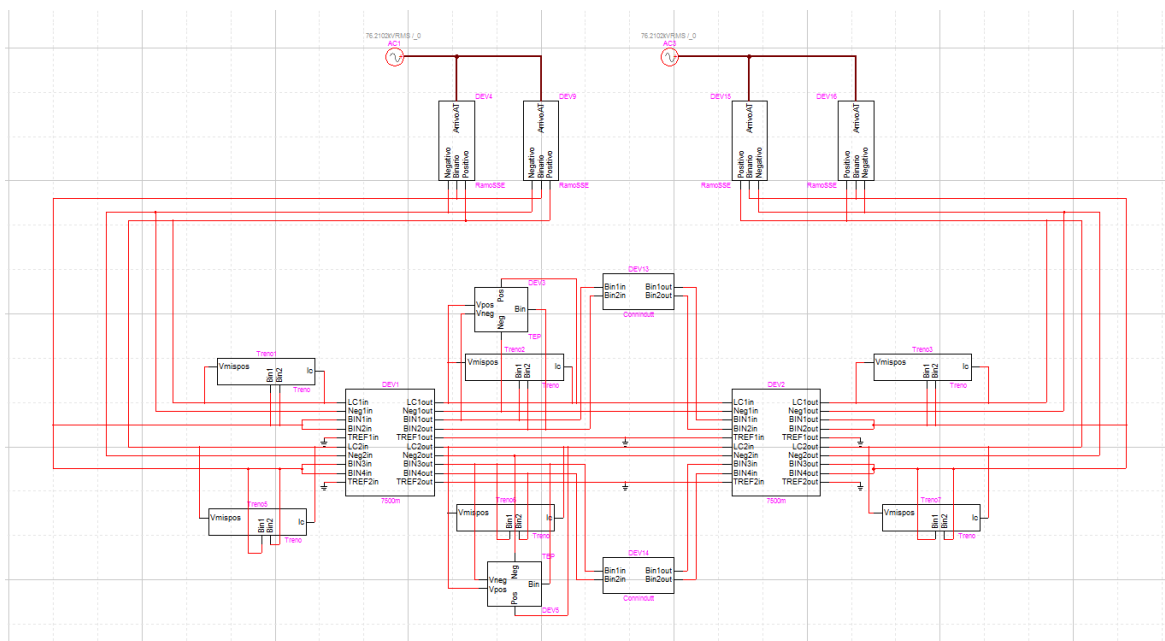


Figura 199 Modello dotato di TEP controllato in tensione utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente due carichi

Di interesse risultano gli andamenti delle tensioni erogate dalle SSE, di cui si riportano di seguito i grafici.

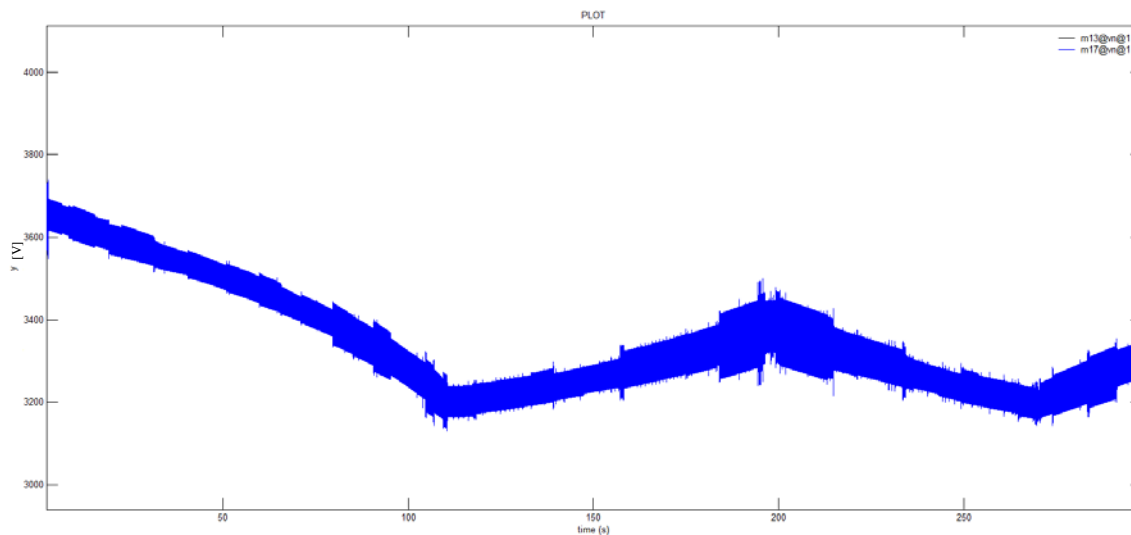


Figura 200 Tensioni erogate dalle SSE
 m13: SSE di sinistra
 m17: SSE di destra

Anche in questo caso le tensioni imposte dalle SSE sono perfettamente uguali, evitando la presenza di correnti di ricircolo. L'andamento suggerisce che entrambi i posti di parallelo entrino in funzione tra i 115 s e i 270 s, dato che si riscontra un innalzamento del valore della tensione erogata rispetto all'analoga simulazione effettuata senza la presenza del posto di conversione statica. Rispetto al caso in cui si aveva la presenza di un solo carico, i valori registrati sono molto più bassi, sintomo di un carico maggiore a cui sono sottoposte

le SSE. L'attivazione del posto di conversione statica evita che la tensione cali fino a 3000 V, come succedeva nella simulazione precedente, limitando il valore minimo raggiunto a 3230 V.

Le correnti transittanti nei trasformatori elettronici di potenza hanno invece il seguente andamento.

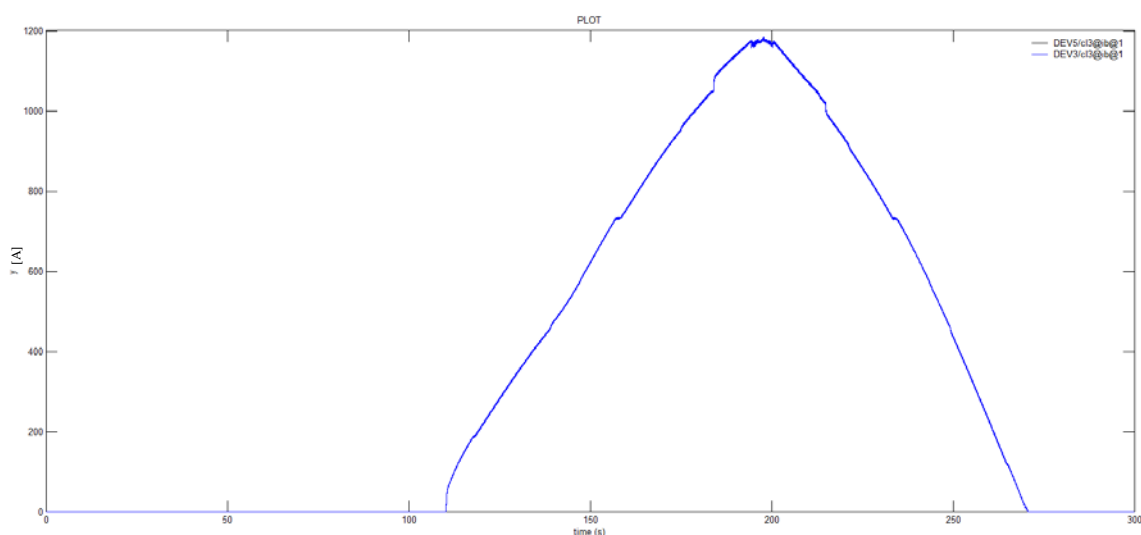


Figura 201 **Correnti erogate dai TEP** **DEV3: TEP su carico proveniente da sinistra**
DEV5: TEP su carico proveniente da destra

L'andamento è molto simile a quello riscontrato nella simulazione precedente. Data la simmetria del sistema in esame, la corrente viene fornita in modo uguale dalle due SSE, andando a caricare in modo equilibrato la parte sinistra e destra del feeder negativo. La massima corrente transittante nel posto di conversione si osserva in corrispondenza del passaggio del carico per il centro della tratta, punto in cui si verificherebbe la caduta di tensione maggiore. Rispetto al caso precedente, i valori di corrente rilevati sono molto superiori, a causa della maggiore caduta di tensione interna alla SSE e il conseguente abbassamento della tensione lungo la linea di contatto. Infatti, per non scendere sotto lo stesso minimo valore imposto (3000 V), il contributo del feeder negativo deve essere maggiore. Quindi, il valore massimo raggiunto, pari a 1180 A, è molto più alto rispetto a quello registrato nella simulazione precedente, superando probabilmente le capacità del convertitore elettronico di potenza. In ogni caso, dato che non si è scesi in dettaglio nella parte circuitale del dispositivo, quest'ultima affermazione rimane priva di conferma.

Gli andamenti dei potenziali della sbarra catodica della SSE si presentano invece nel modo seguente.

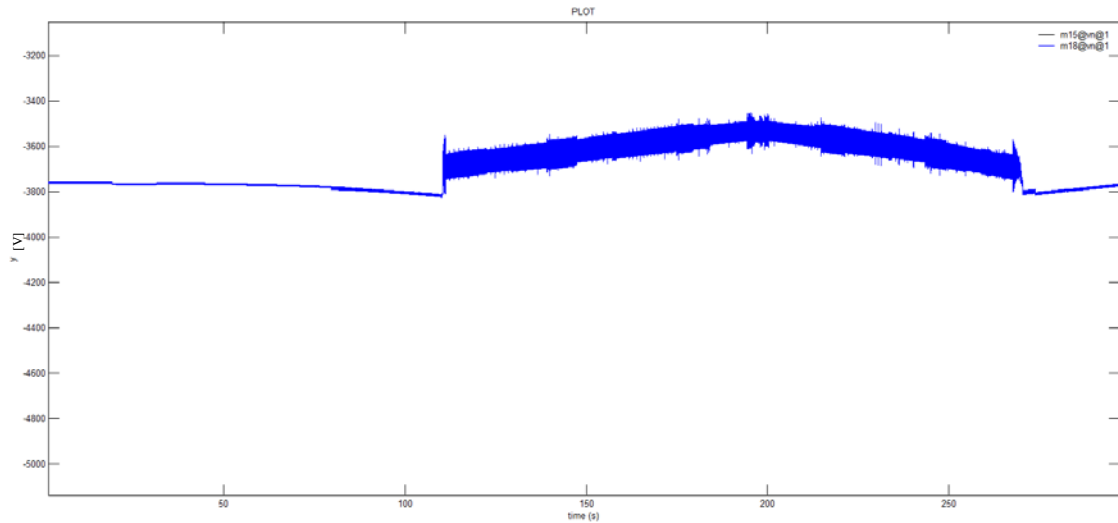


Figura 202 **Potenziali della sbarra negativa delle SSE** **m15: SSE di sinistra**
m18: SSE di destra

In analogia agli andamenti dei potenziali delle sbarre anodiche, anche quelli delle sbarre catodiche risultano essere identici tra loro. Si nota subito l'intervallo di attivazione del trasformatore elettronico di potenza, che determina, anche in questo caso, un aumento dei valori della tensione registrata. Il valore minimo riscontrato risulta essere pari a -3800 V, maggiore in modulo rispetto al modello che prevede un solo carico in movimento. Il feeder negativo deve quindi prevedere un livello di isolamento verso terra più elevato rispetto a quello positivo, dato che i valori riscontrati sono in tutte le simulazioni superiori in modulo rispetto a quelli previsti a vuoto. Bisogna però ricordare che l'inserimento nel modello del variatore sotto carico nel trasformatore di gruppo potrebbe limitare queste forti variazioni nella tensione fornita dalle SSE.

Interessante risulta anche l'andamento delle tensioni di binario in prossimità delle SSE, riportato di seguito.

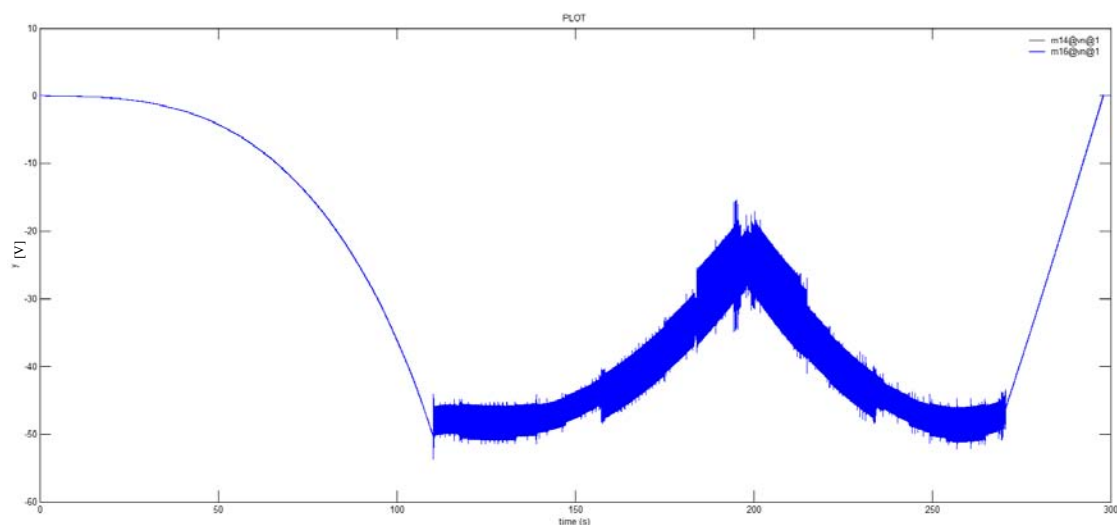


Figura 203 Potenziale di binario in prossimità delle SSE m14: SSE di sinistra m16: SSE di destra

Come si nota, anche i potenziali del binario presentano il medesimo andamento, data la simmetria del sistema in esame. Si riscontrano in questo caso valori decisamente superiori rispetto alla simulazione effettuata senza la presenza del posto di conversione statica (il potenziale verso terra non scende mai sotto i -50 V, contro i -120 V rilevati in precedenza), indice di una dispersione di corrente verso terra meno importante.

Rimane da analizzare l'andamento della caduta di tensione sulle due linee, che si presenta in questo modo.

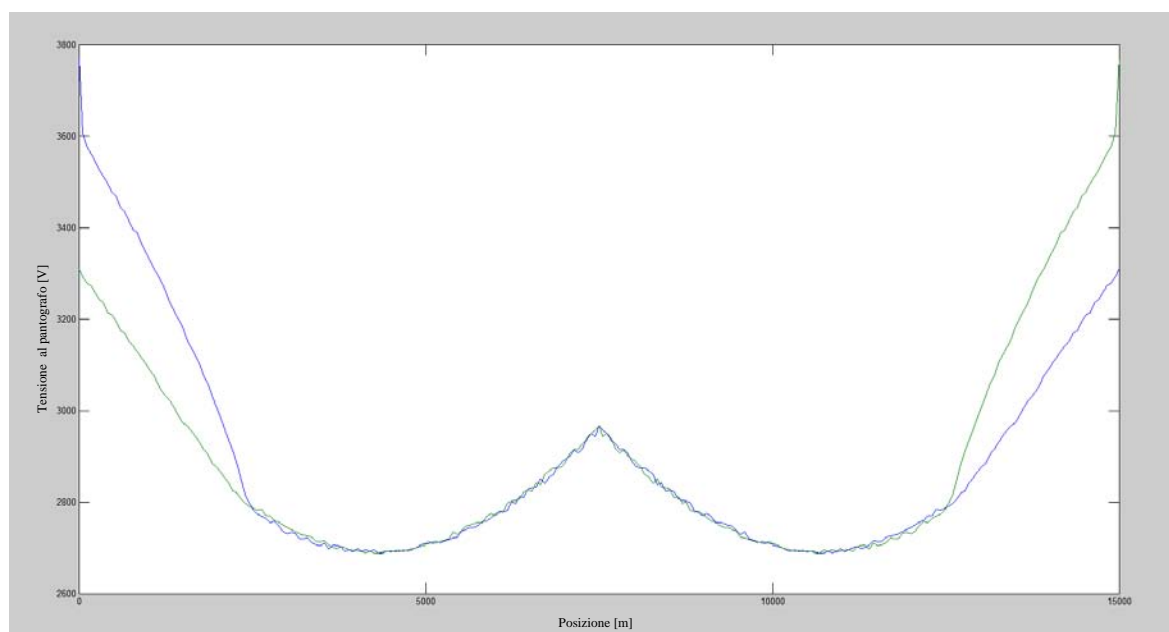


Figura 204 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata blu: treno da sinistra verde: treno da destra

Come si nota, l'andamento della caduta di tensione è speculare e risulta molto simile a quello già incontrato nella simulazione effettuata sul modello che presenta un solo carico dinamico. Nel momento in cui si ha l'attivazione dei due trasformatori elettronici di potenza, l'andamento della caduta di tensione risulta essere identico, in quanto i dispositivi lavorano per mantenere il potenziale del feeder positivo a metà tratta allo stesso valore. Impostando una tensione minima al centro tratta di 3000 V, si riesce in questo caso a ottenere una tensione minima al pantografo di 2700 V. In questi termini, si nota quindi un grande vantaggio nell'utilizzo del nuovo sistema di alimentazione completo sia rispetto al sistema tradizionale (dove si riscontrava una tensione minima al pantografo pari a 2500 V) sia rispetto al nuovo sistema privo di posto di conversione statica (dove la tensione al pantografo scendeva fino a 2000 V). La simulazione dimostra come il nuovo sistema sia in grado di aumentare la potenzialità delle linee, garantendo una qualità di alimentazione molto buona. Aumentando il valore del riferimento di tensione nel controllo (per esempio a 3100 V), si può ovviamente migliorare ulteriormente il sistema in termini di tensione minima al pantografo, tenendo conto però del maggior carico a cui viene sottoposto il trasformatore elettronico di potenza.

Di seguito si riporta l'andamento della tensione misurata a metà tratta sui due binari durante la simulazione, per evidenziare il corretto funzionamento del controllo del trasformatore elettronico di potenza.

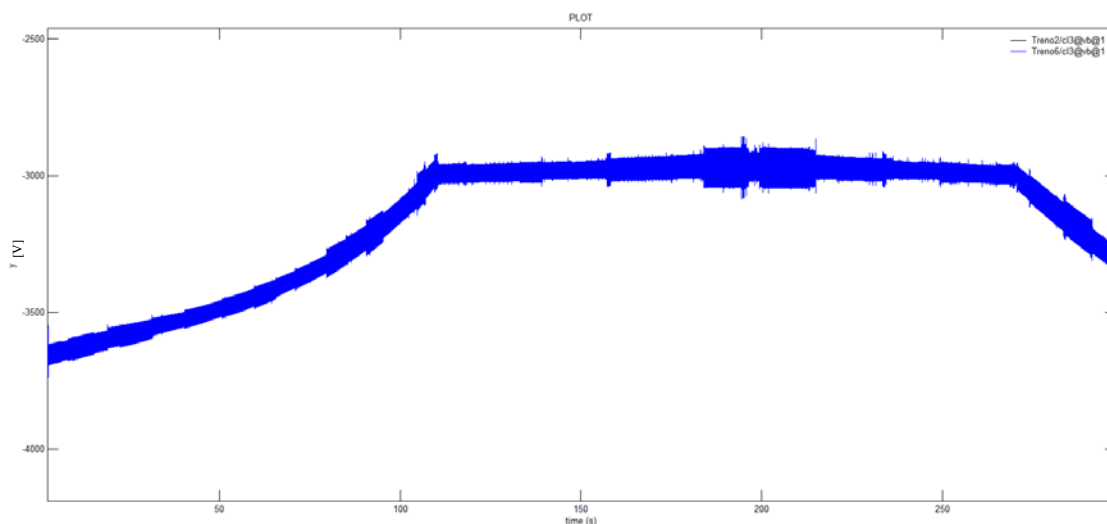


Figura 205 Andamento del potenziale della linea di contatto a metà tratta Treno2: linea di sinistra
Treno5: linea di destra

Data la simmetria del sistema in esame, la tensione rilevata sulla seconda linea risulta essere perfettamente identica. Come previsto, entrambe non scendono mai sotto il valore impostato.

9.4.3. Sistema dotato di TEP controllato in corrente

L'ultima simulazione prevede la presenza di due carichi con lo stesso profilo di velocità e potenza ma viaggianti in direzione opposte. Entrambe le linee sono dotate di posto di

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

conversione statica controllato in corrente e non è previsto il posto di parallelo a metà tratta.

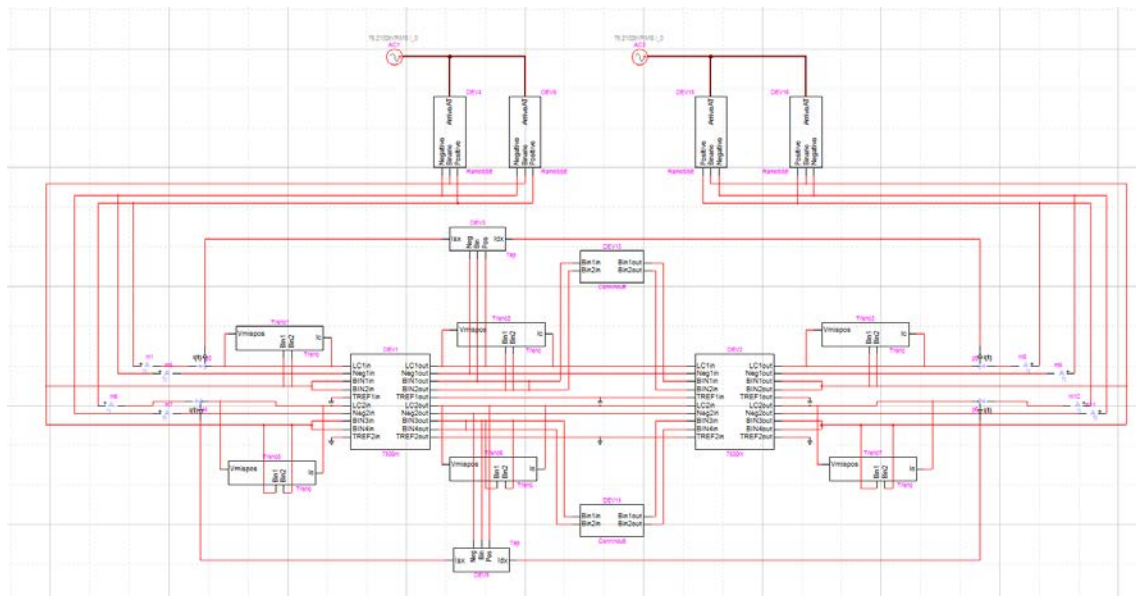


Figura 206 Modello dotato di TEP controllato in corrente utilizzato nella simulazione di tipo dinamico comprendente due carichi

Di interesse risultano gli andamenti delle tensioni erogate dalle SSE, di cui si riportano di seguito i grafici.

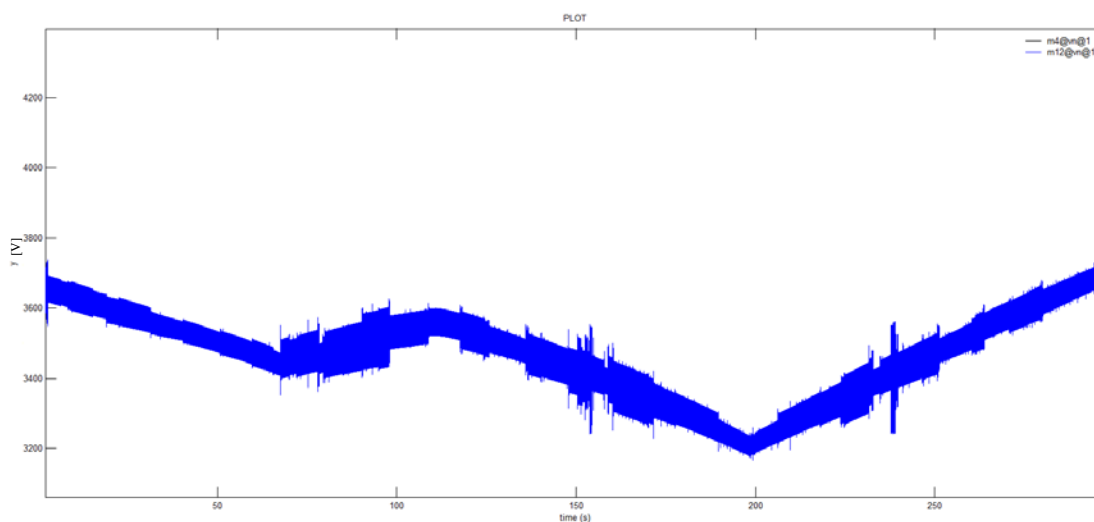


Figura 207 Tensioni erogate dalle SSE
 m4: SSE di sinistra
 m12: SSE di destra

Anche in questo caso le tensioni imposte dalle SSE sono perfettamente uguali, evitando la presenza di correnti di ricircolo. L'andamento suggerisce che entrambi i posti di parallelo entrino in funzione tra i 70 s e i 300 s, dato che si riscontra un innalzamento del valore della tensione erogata rispetto all'analogica simulazione effettuata senza la presenza del

posto di conversione statica. Rispetto al caso in cui si aveva la presenza di un solo carico, i valori registrati sono molto più bassi, sintomo di un carico maggiore a cui sono sottoposte le SSE.

Le correnti transittanti nei trasformatori elettronici di potenza hanno invece il seguente andamento.

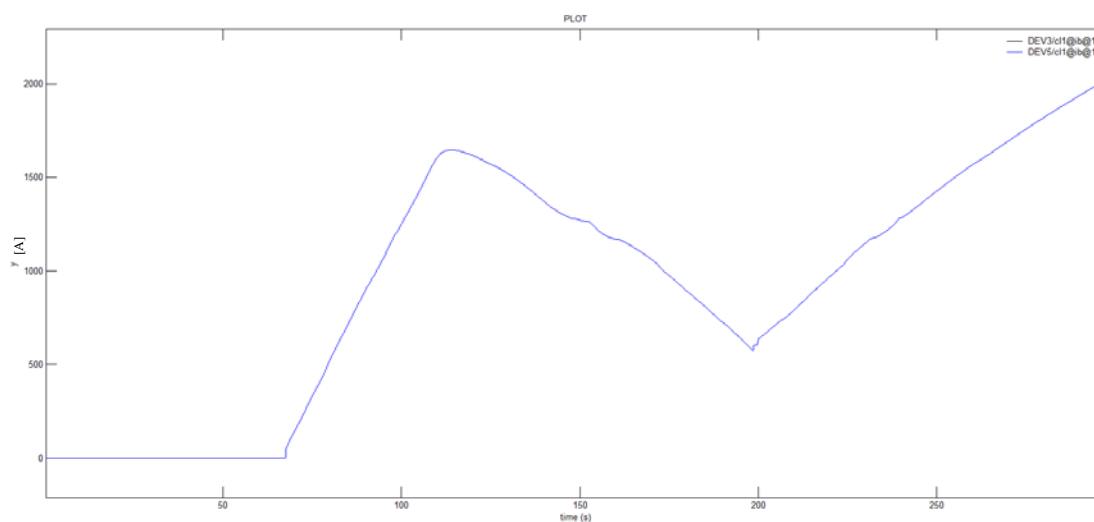


Figura 208 **Correnti erogate dai TEP** **DEV3: TEP su carico proveniente da sinistra**
DEV5: TEP su carico proveniente da destra

L'andamento è molto simile a quello riscontrato nella prima simulazione dinamica con controllo del posto di conversione statica in corrente. I valori registrati sono però molto più elevati, dato che le SSE sono sottoposte a un carico maggiore e quindi anche le cadute di tensione di linea sono molto più importanti. Quindi, per non superare il valore di corrente erogata sulla linea di contatto di 1500 A, il contributo del feeder negativo deve essere maggiore rispetto alla prima simulazione effettuata. Gli andamenti sono perfettamente identici a causa della simmetria del sistema in esame, presentando entrambi un minimo in corrispondenza del passaggio dei convogli per il centro tratta. Il valore massimo raggiunto, pari a 2000 A, è molto più alto rispetto a quello registrato nella simulazione precedente, superando probabilmente le capacità del convertitore elettronico di potenza.

Per verificare il corretto funzionamento del controllo si riportano gli andamenti delle correnti erogate sulla prima linea di contatto; quelli dell'altra linea saranno perfettamente identici, anche se invertiti.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

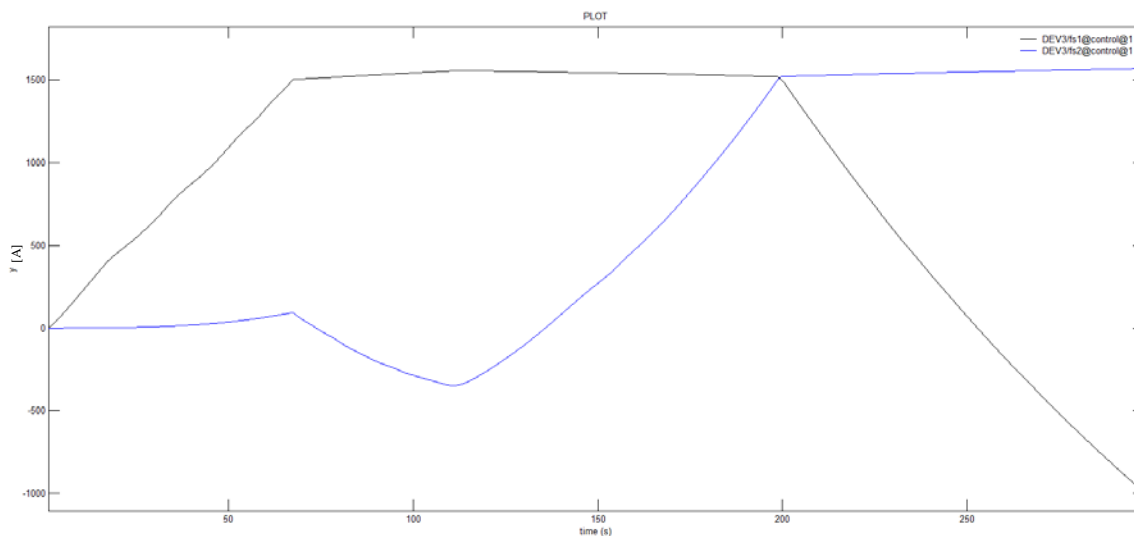


Figura 209 Correnti erogate dalle SSE sulla ldc **DEV3/fs1: SSE di sinistra**
DEV3/fs2: SSE di destra

Come si nota, il controllo del posto di conversione statica funziona correttamente, dato che la corrente erogata sulla linea di contatto non supera mai i 1500 A.

Rimane da analizzare l'andamento della caduta di tensione sulle due linee, che si presenta in questo modo.

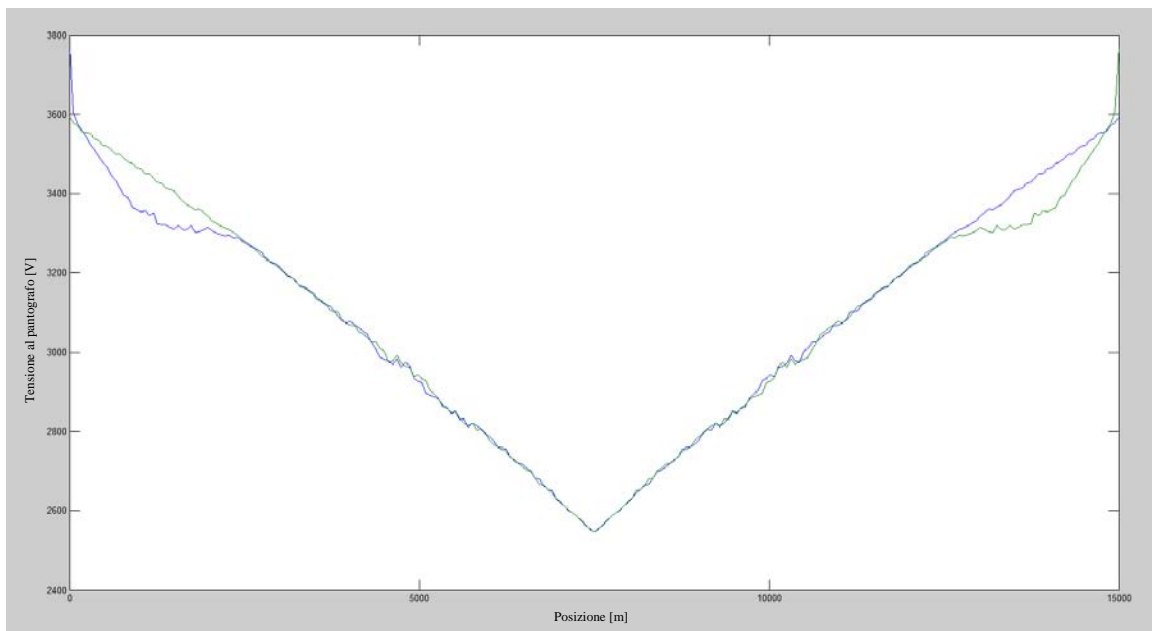


Figura 210 Andamento della tensione al pantografo lungo la linea analizzata **blu: treno da sinistra**
verde: treno da destra

Come si nota, l'andamento della caduta di tensione sulle due linee è speculare e risulta molto simile a quello già incontrato nella simulazione effettuata sul modello che presenta un solo carico dinamico. Nel momento in cui si ha l'attivazione dei due trasformatori

elettronici di potenza, l'andamento della caduta di tensione risulta essere lineare, in quanto la corrente transitante sulla linea di contatto ha un valore costante, pari a 1500 A. La qualità dell'alimentazione risulta però più bassa rispetto al caso in cui il trasformatore elettronico di potenza venga controllato in tensione. Con i limiti impostati infatti, si riesce a ottenere una tensione minima al pantografo di 2520 V. Si nota comunque un vantaggio nell'utilizzo del nuovo sistema di alimentazione completo sia rispetto al sistema tradizionale (dove si riscontrava una tensione minima al pantografo pari a 2500 V) sia rispetto al nuovo sistema privo di posto di conversione statica (dove la tensione al pantografo scendeva fino a 2000 V).

9.4.4. Confronto con il sistema di alimentazione convenzionale

Si riporta di seguito una tabella per permettere un rapido confronto dei sistemi di alimentazione utilizzati nella condizione di carico vista in questo paragrafo.

Tabella 33 Valori delle grandezze caratteristiche dei modelli utilizzati comprendenti due carichi dinamici

Tipo di alimentazione	Tensione minima al pantografo (V)	Massima tensione di binario in termini assoluti in prossimità delle SSE (V)	Minima tensione del feeder negativo in prossimità delle SSE (V)	Minima tensione del feeder positivo in prossimità delle SSE (V)
Sistema tradizionale	2490	-105	-	3350
Sistema 2 × 3 kV privo di TEP	1990	-125	-3900	3020
Sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in tensione	2700	-50	-3850	3230
Sistema 2 × 3 kV con TEP controllato in corrente	2520	-65	-3810	3230

I valori registrati portano alle stesse conclusioni presentate nei casi precedenti. L'assenza del posto di conversione statica porta a un peggioramento delle caratteristiche del sistema rispetto a quello tradizionale in ogni suo aspetto. L'accensione del trasformatore elettronico di potenza a metà tratta, determina invece prestazioni significativamente migliori per quanto riguarda la diminuzione delle cadute di tensione in linea e quindi dell'aumento della potenzialità della tratta considerata. Da questo punto di vista, il controllo del trasformatore elettronico di potenza in tensione sembra offrire prestazioni migliori rispetto al controllo in corrente.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

10. Conclusioni

Le simulazioni eseguite prima sui modelli rappresentanti il sistema di alimentazione attuale e successivamente su quelli provvisti del sistema 2×3 kV in corrente continua hanno messo in evidenza le loro diverse caratteristiche, portando ad affermare una superiorità del sistema innovativo rispetto a quello tradizionale almeno in termini di aumento della potenzialità delle tratte e di miglioramento della qualità di alimentazione.

Come conferma di quanto detto si riportano di seguito i valori minimi di tensione registrati al pantografo nelle simulazioni dinamiche eseguite sulle varie tipologie di modelli sviluppati.

Tabella 34 Valori della tensione minima al pantografo riscontrati nelle varie simulazioni effettuate

Sistema in esame	Tensione minima registrata al pantografo per tipologia di simulazione (V)			
	1 carico	1 carico con linee in parallelo	2 carichi	2 carichi con linee in parallelo
Sistema tradizionale	2600	2940	2490	2490
Sistema 2×3 kV privo di TEP	2520	2880	1990	1990
Sistema 2×3 kV con TEP controllato in tensione	2750	2940	2700	2700
Sistema 2×3 kV con TEP controllato in corrente	2700	2880	2520	2520

Si evince subito come l'adozione del nuovo sistema dotato di posto di conversione statica riduce le cadute di tensione in linea, determinando, a parità di carico, una qualità di alimentazione superiore rispetto al sistema attuale. Il controllo in tensione sembra poi fornire prestazioni migliori rispetto a quello in corrente, anche se, modificando i riferimenti delle grandezze di controllo, sarebbe possibile ottenere dei risultati prossimi tra di loro.

Il nuovo sistema sembra apportare un miglioramento anche per quanto riguarda il rendimento di trasmissione del sistema, come confermato dal confronto tra i rendimenti riscontrati nelle simulazioni statiche.

Per poter affermare una completa superiorità del nuovo sistema di alimentazione rispetto a quello tradizionale e al sistema Alta Velocità / Alta Capacità bisognerebbe eseguire molte altre valutazioni, sia di tipo economico (per quanto riguarda ad esempio il costo di gestione e delle infrastrutture) che di tipo impiantistico (ad esempio riguardanti la sicurezza e affidabilità del sistema), non oggetto però di questo lavoro. Lo scopo sembra però essere stato raggiunto, avendo introdotto, almeno dal punto di vista modellistico, un nuovo sistema di alimentazione, in grado di far fronte in modo efficiente alle nuove esigenze di potenzialità delle tratte ferroviarie in corrente continua.

Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV

Bibliografia

- [1] R. Benato e L. Fellin, Impianti elettrici, Torino: UTET scienze tecniche, 2011.
- [2] V. Finzi, Trazione elettrica linee primarie e sottostazioni, Genova: Coedit, 2002.
- [3] A. Fumi, A. Luzi e P. Fazio, «Le linee di trazione elettrica FS,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 839 - 847, Ottobre 2002.
- [4] L. Mayer, Impianti ferroviari, Roma: Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 1993.
- [5] V. Finzi e D. Cervetto, Trazione elettrica linee di contatto, Genova: Coedit, 2003.
- [6] V. Macello e R. Cristalli, «Linea Milano-Mortara SS.E. di Abbiategrasso in Box prefabbricati,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 125 - 132, febbraio 2006.
- [7] V. Finzi, Impianti di sicurezza, Genova: Coedit, 2001.
- [8] A. Capasso, M. Ciucciarelli e S. Lauria, «Una metodologia di calcolo integrato del sistema di trazione a 2*25 kV, 50 Hz,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 979 - 998, Novembre 2009.
- [9] P. Cesario e P. O. Ventura, «Impedenze equivalenti e correnti di cortocircuito nei sistemi di trazione in corrente continua,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 868 - 882, dicembre 1996.
- [10] G. Guidi Buffarini e G. Guidi Buffarini, «Analisi funzionale di gruppi raddrizzatori a 3kV c.c. mediante programmi dedicati di simulazione,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 485 - 503, luglio 1996.
- [11] J. Hall, J. Kettleborough e A. Razak, «Parallel operation of bridge rectifiers without an interbridge reactor,» *IEE Proceedings B: Electric Power Applications*, vol. 137, n. 2, p. 125, 1990.
- [12] Y.-S. Tzeng, «Harmonie analysis of parallel-connected 12-pulse uncontrolled rectifier without an interphase transformer,» *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, vol. 145, n. 3, p. 253, 1998.
- [13] V. Castagna, «Nuovo modello di calcolo per l'analisi a regime dei sistemi di trazione elettrica a c.c. e c.a.,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 1031 - 1043, dicembre 2004.
- [14] V. Castagna, «Studio delle correnti disperse dal circuito di ritorno T.E. in terreni non omogenei,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 625 - 639, Luglio - Agosto 2004.

- [15] G. Guidi Buffarini e G. Guidi Buffarini, «Modello multiconduttore per il calcolo delle correnti disperse nella trazione a c.c.,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 783 - 793, dicembre 2000.
- [16] P. Cesario e P. O. Ventura, «Il calcolo delle impedenze nelle alimentazioni della trazione elettrica,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 626 - 642, settembre 1996.
- [17] A. Capasso, R. Lamedica e V. Morelli, «Linee ferroviarie per alta velocità a 3 kV c.c.: predeterminazione della distorsione armonica nel sistema trifase di alimentazione,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 427 - 439, Luglio - Agosto 1991.
- [18] G. Lucca, «Propagazione di tensione e corrente lungo un binario: due modelli di calcolo a confronto,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 133 - 143, febbraio 2005.
- [19] P. Cesario, «Analisi dell'interazione elettrica fra sottostazione emotrice nei sistemi di trazione 3 kV cc,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 488 - 504, luglio 1995.
- [20] R. J. Hill, M. Fracchia e P. Pozzobon, «A frequency domain model for 3 kV DC traction DC- side resonance identification,» *IEEE Transactions on Power System*, vol. 10, n. 3, pp. 1369 - 1376, 1995.
- [21] J. Rull-Duran, J. Bergas-Jane, S. Galceran-Arellano, A. Sumper e J. Coves-Moreno, «Power electronics improving 3-wire DC railways electrification,» *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE '09*, 2009.
- [22] J. I. Prada Vázquez, Sistema de electrificación ferroviaria 2 X 3000 V, Madrid, 2009.