



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Sistema di alimentazione MVDC per la trazione ferroviaria basato
sull'interconnessione delle sottostazioni esistenti

Relatore:

Prof. Mauro Andriollo

Laureando:

Daniele Mattana 1137631

Anno Accademico 2018/2019

*Alla mia famiglia
per il sempre presente sostegno*

INDICE

| | |
|---|----|
| SOMMARIO | 1 |
| 1. INTRODUZIONE | 3 |
| 2. LA TRAZIONE ELETTRICA | 5 |
| 2.1 Il panorama italiano | 7 |
| 3. IL SISTEMA A 3 kV IN CORRENTE CONTINUA | 11 |
| 3.1 Le linee primarie | 11 |
| 3.2 Le sottostazioni elettriche..... | 12 |
| 3.3 La linea di contatto e il circuito di ritorno..... | 27 |
| 3.4 Potenzialità e criteri di verifica | 35 |
| 3.5 La Direttissima Firenze - Roma..... | 41 |
| 4. MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA 3 kV IN CORRENTE CONTINUA | 43 |
| 4.1 Modello di una SSE..... | 44 |
| 4.2 Il treno come generatore di corrente | 47 |
| 4.3 Rappresentazione della linea di contatto e binario | 57 |
| 4.4 Verifica del modello complessivo | 62 |
| 5. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 kV | 67 |
| 5.1 Connessione e modellizzazione dei gruppi raddrizzatori | 69 |
| 5.2 L'importanza del convertitore elettronico di potenza..... | 74 |
| 5.3 Modello del convertitore elettronico di potenza | 75 |
| 6. LE SIMULAZIONI: I DUE SISTEMI A CONFRONTO | 79 |
| 6.1 Treni intervallati | 80 |
| 6.1.1 Sistema 3 kV | 81 |
| 6.1.2 Sistema 2x3 kV | 86 |
| 6.2 Tratte con diverse configurazioni altimetriche e gallerie | 92 |
| 6.2.1 Ripartenza su tratto pianeggiante | 94 |
| 6.2.2 Ripartenza in salita | 97 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.2.3 | Tratta con galleria lunga 20 km..... | 100 |
| 6.3 | SSE distanti 40 km con treni viaggianti a 250 km/h..... | 105 |
| 6.4 | A 350 km/h sulla Direttissima Firenze - Roma..... | 113 |
| 7. | CONCLUSIONI..... | 119 |
| | RINGRAZIAMENTI..... | 121 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 123 |

SOMMARIO

I sistemi elettrici per la trazione ferroviaria sono da sempre in grande sviluppo per quanto riguarda l'aumento delle potenzialità delle linee e il raggiungimento di standard sempre più elevati. Siccome il sistema italiano a 3 kV in corrente continua sembrava aver raggiunto il massimo delle sue potenzialità, negli ultimi anni si è sentita la necessità di costruire un'infrastruttura completamente nuova per la realizzazione del sistema Alta Velocità/Alta Capacità. Considerati gli elevati costi sostenuti per la realizzazione del nuovo sistema e il mancato sfruttamento delle infrastrutture esistenti, con questo lavoro si è voluta sviluppare una soluzione per aumentare le potenzialità delle già esistenti linee in corrente continua, sfruttando l'elettronica di potenza. In questo studio il sistema proposto si basa sull'architettura del 2 x 25 kV utilizzato per l'Alta Velocità, prevedendo l'installazione di un posto di conversione statica in corrente continua tra due sottostazioni limitrofe e modificando i collegamenti dei gruppi di conversione in sottostazione. Il software Simulink è stato utilizzato per sviluppare i modelli che rappresentano l'attuale sistema di trazione a 3 kV e la nuova proposta, messi poi a confronto attraverso identiche situazioni di traffico in linea. Ai fini delle analisi delle prestazioni si sono utilizzati i cosiddetti "modelli medi" dei convertitori prescindendo così dal relativo contenuto armonico.

1. INTRODUZIONE

La trazione elettrica è diventata sempre più importante per il trasporto collettivo di persone e merci, poiché contribuisce efficacemente alla mitigazione della congestione e dell'inquinamento causate dal traffico stradale. Inoltre, presenta indiscutibili vantaggi in aree dove devono essere garantiti livelli di prestazione, sicurezza, compatibilità ambientale ed economica di servizio, come il rapido trasporto di popolazioni urbane e suburbane, viaggi a lungo raggio, ferrovie ad alta velocità e attraversamento di passi montuosi e tunnel sottomarini. Nel corso degli anni i sistemi elettrici per la trazione hanno visto un sempre più crescente avanzamento tecnologico con l'obiettivo di raggiungere standard di velocità, sicurezza e affidabilità sempre più elevati. Ecco quindi che in un panorama mondiale in continua accelerazione, lo studio di una nuova soluzione per aumentare le potenzialità del sistema in corrente continua per la trazione ferroviaria sembra più che lecito.

Il sistema italiano di trazione elettrica è alimentato da linea in corrente continua a 3 kV ad eccezione delle nuove linee costruite con il sistema 2x25 kV a 50 Hz. Il basso livello di tensione utilizzato dall'alimentazione in continua limita le massime velocità raggiungibili dai mezzi di trazione, richiedenti potenze sempre maggiori così da introdurre correnti insostenibili per l'attuale sistema. Grazie all'avanzamento tecnologico dell'elettronica di potenza si è potuta studiare una possibile soluzione per aumentare le potenzialità della trazione in continua, sfruttando l'infrastruttura esistente, così da permettere velocità di percorrenza maggiori e competitive con quelle raggiungibili con l'alimentazione delle linee di contatto in alternata. Inoltre, la scelta di migliorare l'attuale sistema in corrente continua è stata dettata anche dal fatto che, a differenza di quello in alternata a frequenza industriale, non presenta problemi riguardanti la compatibilità elettromagnetica e lo squilibrio della rete nazionale.

Il lavoro di tesi è stato quindi articolato in cinque sezioni principali. La prima parte tratta i sistemi di trazione attuali e il modo in cui si è arrivati alla scelta della trazione in corrente continua nel panorama italiano. Nel capitolo "Il sistema a 3 kV in corrente continua" vengono descritti i principali elementi costituenti il sistema di trazione così da capire dove e come intervenire per il suo miglioramento. Successivamente si è passati alla spiegazione dei modelli creati per entrambi i sistemi, capitolo 4 e 5, per poi metterli al confronto nell'ultima sezione "Le simulazioni: i due sistemi a confronto".

Tale lavoro è stato realizzato grazie all'utilizzo del software Simulink che ha permesso la creazione di modelli solidi e molto vicini alla realtà.

2. LA TRAZIONE ELETTRICA

Il termine “trazione” indica l’insieme dei fenomeni, equipaggiamenti e sistemi che contribuiscono al movimento dei veicoli, mentre l’attributo “elettrica” specifica il tipo di energia fornita per produrre la forza meccanica necessaria per la trazione. Già dal 1900, con lo sviluppo delle ferrovie e, in particolare, con l’aumento delle tratte in galleria (gallerie di montagna e metropolitane), l’introduzione della trazione elettrica si fece necessaria per sostituire quella a vapore, diventata costosa (alto prezzo del carbone) e insicura per i passeggeri (avvelenamento causato dal fumo nelle gallerie). A quel tempo, c’erano due tipologie di motori elettrici dotati delle migliori proprietà meccaniche adatte alla trazione: quelli a corrente continua con eccitazione serie e quelli in corrente alternata monofase con commutatore. Visto che il motore a corrente continua, alimentato a bassa tensione (inferiore a 500 V), non destava grosse difficoltà, la corrente continua a bassa tensione fu il primo sistema ad essere utilizzato per l’alimentazione delle tratte ferroviarie. Infatti, i motori in corrente alternata, alimentati alla frequenza di rete, presentavano problemi di commutazione al collettore. Pertanto, per poter essere utilizzati, i sistemi in corrente alternata dovevano essere alimentati a frequenze più basse (16 2/3 Hz detta quindi frequenza ferroviaria).

Il principale vantaggio della corrente alternata consiste nel poter utilizzare una tensione di alimentazione più elevata perché l’interruzione di una corrente alternata (passaggio della corrente per lo zero) è più semplice rispetto all’interruzione di una diretta. A parità di consumo energetico, utilizzare una tensione maggiore, implica avere delle correnti minori in linea e quindi minori perdite ma anche minori costi di installazione della linea di contatto (sezione dei conduttori più piccola). Per contro, a causa della frequenza di alimentazione diversa da quella di rete, l’alimentazione elettrica richiede stazioni generatrici dedicate esclusivamente all’alimentazione ferroviaria o, per l’interconnessione della rete, di stazione di conversione. Tuttavia, prima del 1900, la rete elettrica era debole e non interconnessa come quella attuale e, inoltre, non esistendo grandi carichi, la costruzione di grandi stazioni di generazione e linee elettriche in alta tensione dedicate esclusivamente al sistema elettrico di trazione era quindi giustificata.

Grazie all’avanzamento tecnologico dell’elettronica di potenza e di quella elettromeccanica, dopo la Seconda Guerra Mondiale venne sviluppato un motore in corrente continua con commutatore a corrente ondulatoria, grazie al quale il veicolo poteva essere alimentato con una linea in corrente alternata monofase alla frequenza industriale (50 o 60 Hz), e la trasformazione e conversione da alternata a continua

veniva effettuata a bordo. Era quindi possibile liberarsi dalla frequenza ferroviaria e collegarsi direttamente alla rete industriale creando così il sistema di alimentazione monofase alla frequenza industriale.

Attualmente, i motori utilizzati nei moderni veicoli di trazione sono tutti in corrente alternata di tipo asincrono o sincrono con magneti permanenti alimentati da un inverter, grazie al quale, la necessità di alimentare il motore ad una determinata tensione è stata eliminata. I moderni veicoli di trazione sono quindi equipaggiati con convertitori che adattano il livello di tensione in ingresso all'inverter, che controlla il motore di trazione; comportando quindi il vantaggio di interoperabilità tra i vari sistemi elettrici di trazione esistenti.

Abbiamo quindi visto che nel corso degli anni, le tecnologie disponibili nelle varie epoche di sviluppo della trazione elettrica, in particolare per quanto riguarda la trasmissione di potenza, i livelli di tensione e il controllo della velocità dei motori di trazione, hanno portato all'adozione di diverse soluzioni tecnologiche ancora oggi utilizzate.

Nei classici autobus di trasporto urbano, tram e metropolitane, viene sempre usata la trazione elettrica in corrente continua a 600 - 750 V o 1500 V. Mentre la trazione ferroviaria, visti i diversi sistemi sperimentali utilizzati inizialmente, ha una più grande varietà di sistemi. Il panorama attuale dei sistemi elettrici utilizzati per la trazione ferroviaria comprende le seguenti tipologie di alimentazione:

- Corrente alternata monofase alla frequenza speciale $16 \frac{2}{3}$ Hz, a 15 kV, in Germania, Austria, Svizzera, Svezia, Norvegia. Negli USA per la trazione elettrica in c.a. monofase è stata adottata la frequenza di 25 Hz con tensioni 11 - 12 kV.
- Corrente alternata monofase alla frequenza industriale di 50 o 60 Hz a 25 kV in Francia, Russia, Giappone, India, Cina, Gran Bretagna, ecc.
- Corrente continua a 3 kV in Italia, Russia, Polonia, Spagna, ecc.

In tutto il mondo, lo sviluppo di binari elettrificati è superiore a 200.000 km (tabella 2.1), vale a dire il 17,2 % della rete ferroviaria globale.

| Corrente continua | | |
|--------------------------|-----------|--------------------|
| < 1 kV | 7.650 km | 96.980 km (47,3 %) |
| 1 - 2 kV | 20.440 km | |
| > 2 kV | 68.890 km | |

| Corrente alternata monofase | | |
|------------------------------------|-----------|---------------------|
| 15 kV - 16 e 2/3 Hz | 32.940 km | 105.050 km (51,2 %) |
| 25 kV - 50 o 60 Hz | 72.110 km | |
| Altri sistemi | 3.000 km | 3000 km (1,5 %) |

Tabella 2.1: Copertura della trazione elettrica in tutto il modo [3].

La trazione elettrica in corrente alternata monofase a frequenza ferroviaria rispetto a quella a frequenza industriale presenta il vantaggio di poter alimentare bilateralmente la linea di contatto, sottostazioni tutte in fase e in parallelo tra loro, e di non squilibrare la rete industriale. Tuttavia, tale sistema, al di là dei paesi in cui esiste, non trova possibilità di sviluppo in quanto richiede posti di produzione e linee di alimentazione dedicati esclusivamente alla trazione, risultando quindi antieconomico visto che tutte le reti europee sono gestite a 50 Hz. Il sistema di trazione a frequenza industriale presenta il vantaggio, rispetto a quello a 16 2/3 Hz, di poter collegare le sottostazioni di trasformazione SSE direttamente alla rete trifase generale (50 o 60 Hz): le sottostazioni non sono altro che dei trasformatori abbassatori. Per contro, il carico monofase di trazione provoca sulla rete industriale uno squilibrio di corrente. Infatti, per limitare tale squilibrio le sottostazioni vengono connesse in punti della rete ad elevata potenza di corto circuito effettuando inoltre una connessione ciclica sulle tre fasi. Ecco quindi perché la linea di contatto deve essere alimentata a sbalzo. Un problema comune ai due sistemi di alimentazione monofase è l'inquinamento. Il sistema in corrente continua permette invece di alimentare bilateralmente la linea di contatto, contenute cadute di tensione, ma il livello di tensione utilizzabile è limitato dai dispositivi atti alla protezione delle correnti di guasto in linea. Altro vantaggio rispetto al sistema in corrente alternata a 50 Hz è quello di non provocare squilibrio nella rete industriale in quanto le sottostazioni sono dei carichi trifasi. Inoltre, l'inquinamento elettromagnetico è nullo ma le correnti di ricircolo nel terreno potrebbero causare problemi di corrosione delle condutture poste nelle vicinanze. Problematica risolta con l'introduzione di conduttori sacrificali.

Andiamo ora a vedere quali sono stati i passaggi storici che hanno portato alla scelta del sistema di trazione in corrente continua a 3 kV in Italia.

2.1 Il panorama italiano

Le prime sperimentazioni riguardanti la possibilità di utilizzare la trazione elettrica anche in ambito ferroviario, oltre che per quello tranviario, già avviato a partire dal

1890 nelle città di Roma e Firenze, iniziarono nel 1897 con l'insediamento di un'apposita commissione da parte del Ministero dei Lavori Pubblici, impiegata per analizzare tre differenti sistemi:

- trazione con accumulatori e veicoli equipaggiati con motori a corrente continua sulla Milano - Monza e sulla Bologna - Santa Felice;
- trazione con corrente alternata trifase ad alta tensione con linea di contatto bifilare e motrici equipaggiate con motori asincroni sulla Lecco - Sondrio e Colico - Chiavenna;
- trazione con corrente continua a bassa tensione (650 V) con alimentazione a terza rotaia e veicoli equipaggiati con motori a corrente continua sulla Milano - Varese.

Lo scopo di tali sperimentazioni era quello di rendere meno costoso l'esercizio di ferrovie a traffico limitato, pur soddisfacendo maggiormente alle esigenze del pubblico, con la separazione del servizio viaggiatori da quello merci e con il maggior numero possibile di corse giornaliere.

Il sistema con accumulatori non dette buoni risultati e venne presto abbandonato mentre, a causa della limitata tensione applicabile ai motori a corrente continua e alle convertitrici c.a./c.c. di sottostazione per motivi di isolamento e difficoltà di commutazione, e per via di ingranaggi di riduzione della velocità non troppo affidabili per potenze elevate, il sistema a corrente continua risultava idoneo solo per carichi di trazione limitati. Così, dal 1910 al 1930, vennero elettrificati oltre 2000 km di linee in corrente alternata trifase vista la robustezza e l'affidabilità del motore asincrono che permetteva di essere alimentato ad una tensione massima oltre i 3000 V garantendo un'elevata potenzialità del sistema. Il motore asincrono trifase doveva essere alimentato tramite una linea di contatto bipolare e ad una frequenza di alimentazione ridotta a 1/3 rispetto a quella industriale (50 Hz) al fine di attuare una trasmissione diretta senza ingranaggi. Il sistema monofase a frequenza ridotta, sperimentato in altre nazioni, venne scartato per problemi di commutazione del motore a collettore. Alla fine degli anni 20 la convenienza della trazione elettrica anche per linee a traffico pesante, intenso e veloce venne affermandosi in tutta Europa. In Italia i limiti del sistema trifase risultarono bene presto evidenti: la doppia linea di contatto creava forti inconvenienti meccanici per il raggiungimento di velocità superiori ai 100 km/h, la regolazione della velocità era limitata a causa dello stretto legame con il numero di giri del motore e la scelta di una frequenza inferiore a quella industriale richiedeva la realizzazione di appositi impianti di produzione e trasporto dell'energia comportando quindi un grande

investimento economico iniziale. Nel frattempo, era possibile disporre di motori a corrente continua per 1500 V, di ingranaggi affidabili per potenze elevate e di pensare ad una trazione a 3 kV in corrente continua con due motori in serie. Il problema della conversione alternata/continua in sottostazione venne risolto grazie al raddrizzatore a vapori di mercurio e all'interruttore extrarapido idoneo all'interruzione di correnti continue alla tensione di oltre 3000 V. Così nel 1928 fu sperimentata con successo l'applicazione del sistema 3 kV c.c. alla linea Benevento - Foggia. Grazie alla riuscita di tale linea nel 1930 fu quindi deciso il sistema 3 kV c.c. per tutte le elettrificazioni future. A partire dal 1933 le elettrificazioni si svilupparono a ritmo molto intenso con picchi di oltre 800 km all'anno, raggiungendo nel 1942 i 5500 km ed il 55% di traffico: l'Italia diventava la prima in Europa per il numero di tratte ferroviarie elettrificate. Negli anni 1943 - 1945, con la guerra sul suolo italiano e gli intensi bombardamenti, gli impianti di trazione elettrica subirono un'ingente distruzione riducendo le linee esercite a trazione elettrica a 2300 km. Dopo il conflitto vennero ripristinati tutti gli oltre 5500 km di linee elettrificate e nel decennio 1950-1960 fu ripreso e completato il programma delle elettrificazioni delle tratte a maggior traffico; di seguito ne riportiamo le principali: Firenze - Pisa, Messina - Palermo, Torino - Milano - Padova - Venezia - Trieste, Bologna - Padova, Prato - Lucca - Viareggio. Negli anni successivi furono elettrificate, oltre le linee di nuova costruzione (tra cui la Direttissima Firenze - Roma), anche linee o tratti di linee a traffico meno intenso.

Il sistema 3 kV c.c. ha subito nel corso degli anni notevoli migliorie riguardanti le sottostazioni elettriche (SSE), passando da SSE costituite da gruppi raddrizzatori a vapori di mercurio da 2 MW nel 1930 a SSE con gruppi raddrizzatori al silicio da 3.6 o 5.4 MW a partire dai primi anni 60, i sistemi di rilevazione ed eliminazioni dei guasti, i sistemi di gestione delle SSE, oggi completamente telecontrollate da un posto centrale, e gli standard della linea di contatto. Questi miglioramenti tecnologici hanno permesso di passare dai 140 km/h raggiungibili negli anni 60 ai 250 km/h ora percorribili nella direttissima Firenze - Roma. A partire dagli anni settanta vi è stato uno sviluppo dei vari sistemi ferroviari mondiali con l'obiettivo principale di ridurre i tempi di percorrenza.

Nella rete ferroviaria italiana oltre il 45 % del traffico passeggeri a lunga percorrenza interessa i collegamenti sulle principali direttrici Milano - Salerno e Torino - Venezia. Per questo motivo e per sviluppare la massima integrazione con la rete europea ad Alta Velocità, con particolare riguardo alle tratte italiane inserite nei principali corridoi europei (corridoio V: Lisbona - Madrid - Linone - Milano - Lubiana - Budapest - Kiev, corridoio I: Stoccolma - Copenhagen - Amburgo - Monaco - Roma - Napoli - Palermo, corridoio dei due mari: Rotterdam - Colonia - Basilea - Milano - Genova) il gruppo

Ferrovie dello Stato nel 2009 ha concluso la realizzazione di un sistema ad Alta Velocità/Alta Capacità lungo la direttrice Torino - Milano - Bologna - Firenze - Roma - Napoli - Salerno per ridurre al minimo i tempi di percorrenza tra le maggiori metropoli italiane. Dato che i limiti tecnici in termini di potenzialità delle linee e di velocità di percorrenza del sistema a 3 kV sembravano ormai quasi raggiunti, si è deciso di elettrificare le linee Torino - Milano - Bologna - Firenze e Roma - Napoli - Salerno con il noto sistema 2x25 kV a 50 Hz ritenuto più adatto per le maggiori potenze richieste. A parità di potenza richiesta al pantografo per le alte velocità (9 - 12 MW), l'aumento della tensione applicata al treno permette di ridurre le correnti in linea, con benefiche conseguenze sulle cadute di tensione, e consente di utilizzare un unico pantografo¹ in presa anche per velocità superiori ai 250 km/h.

Oggi la rete ferroviaria italiana è costituita da 23035 km di binari elettrificati in corrente continua e 1467 km di binari dedicati al sistema Alta Velocità, di cui 250 km costituiscono la Direttissima Firenze - Roma elettrificata in corrente continua. Il sistema di alimentazione 2x25 kV a 50 Hz ha permesso di raggiungere velocità superiori ai 300 km/h comportando, tuttavia, la costruzione di un'infrastruttura ferroviaria completamente nuova quando invece, si sarebbero potute ricercare delle soluzioni tecnologiche innovative da applicare al sistema in corrente continua a 3 kV al fine di migliorarne le potenzialità. A tal proposito, conclusa questa parentesi storica, si andranno a descrivere in dettaglio, da un punto di vista elettrico, i componenti del sistema a 3 kV così da apprendere al meglio la sua struttura architettonica e cercare una soluzione tecnologica che porti ad avere risultati, in termini di velocità di percorrenza, corrente e tensione al pantografo, confrontabili con il sistema Alta Velocità/Alta Capacità.

¹ Le sperimentazioni recentemente condotte con due pantografi in presa hanno dimostrato che la captazione di corrente è soddisfacente fino a 270 - 280 km/h, ma che sopra questo limite il secondo pantografo, pur avendo ancora a 300 km/h una percentuale di distacchi contenuta, è soggetto a notevoli azioni dinamiche [6].

3. IL SISTEMA A 3 kV IN CORRENTE CONTINUA

La catena di montaggio di un sistema di trazione elettrica (TE), qualsiasi sia la tecnologia scelta per l'alimentazione della linea di contatto, si compone di una rete di alimentazione, di posti di conversione, alzamento o abbassamento della forma d'onda della tensione e di circuiti di alimentazione dei convogli. I principali componenti del sistema di TE a 3 kV in corrente continua sono:

1. le linee primarie (LP);
2. le sottostazioni elettriche di conversione (SSE);
3. la linea di contatto (l.d.c.);
4. il circuito di ritorno (c.d.r.);

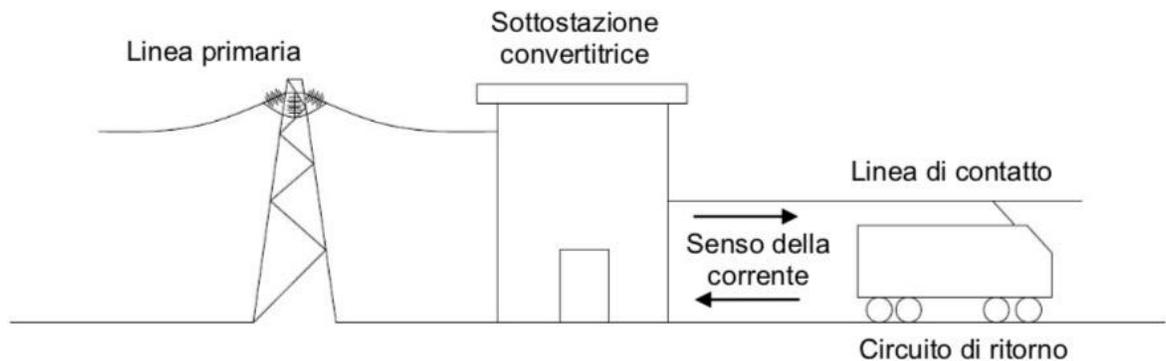


Figura 3.1: Sistema di TE in corrente continua.

Le centrali di produzione dell'energia elettrica, tramite la rete di trasmissione nazionale (AAT e AT), forniscono energia ad alta tensione alle linee primarie le quali alimentano le SSE. Nelle SSE la tensione di alimentazione subisce prima un abbassamento, tramite trasformatori a tre avvolgimenti, e successivamente un raddrizzamento tramite ponti di Graetz trifasi. Successivamente attraverso la linea di contatto viene fornita energia ai mezzi di trazione, la quale rientra nelle SSE attraverso il circuito di ritorno (binario).

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). Tali linee, di proprietà di Ferrovie dello Stato (FS) fino al 2015 ed ora gestite da Terna, sono classificate a seconda del valore di tensione nominale della linea come riportato in tabella 3.1.1.

| Livello | Tensione nominale (kV) | Campo di impiego |
|---------|------------------------|-------------------------|
| 1° | $1 < V_n \leq 30$ | Alimentazione ausiliari |
| 2° | $30 < V_n \leq 120$ | Alimentazione SSE |
| 3° | $120 < V_n \leq 220$ | |

Tabella 3.1.1: Classificazione delle linee primarie.

Le linee primarie di secondo e terzo livello collegano la rete di trasmissione nazionale alle SSE. Inizialmente la configurazione di tali linee in AT era in doppia terna su palificazione separata al fine di garantire la ridondanza dell'alimentazione: in caso di caduta di una delle due palificazioni le SSE continuavano ad essere alimentate dalla terna sulla palificazione sana. Oggi tale configurazione è stata sostituita, per motivi di compatibilità elettromagnetica e di spazio, da due terne in parallelo sostenute da un'unica palificazione. Le linee primarie di primo livello, alimentate dalle SSE, forniscono energia agli impianti ausiliari del sistema ferroviario (illuminazione, officine, ecc.). Anche queste linee sono normalmente aeree in quanto l'uso di cavi ad alta e media tensione, per quanto riguarda la trazione ferroviaria, è limitato a rari casi.

3.2 Le sottostazioni elettriche

Le sottostazioni elettriche (SSE) sono gli impianti addetti alla modifica dei parametri elettrici dell'energia proveniente da una o più linee primarie, al fine di alimentare, al valore di tensione desiderato, la linea di contatto e quindi i mezzi di trazione.

Ogni SSE è suddivisa funzionalmente in tre grandi reparti:

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

Inizialmente tutti i reparti erano sistemati all'interno di un apposito edificio, normalmente di due piani, e la SSE era denominata di tipo chiuso. Successivamente con l'aumento della tensione delle linee primarie e la possibilità di realizzare dispositivi ermetici e ad alto isolamento, le SSE sono state costruite col reparto ad alta tensione all'aperto e solo quello a 3 kV e dei servizi ausiliari al chiuso costituendo così una SSE di tipo misto. Nel corso degli anni tali impianti oltre ad aver subito modifiche di tipo strutturale hanno visto cambiamenti riguardanti anche la parte componentistica, grazie all'avanzamento tecnologico, al fine di poter sostenere un aumento del traffico ferroviario e delle velocità di percorrenza. Si è quindi passati dai raddrizzatori ai vapori

di mercurio utilizzati negli anni Trenta ai raddrizzatori con diodi al silicio a partire dagli anni Settanta, da SSE costituite da 2 gruppi raddrizzatori a SSE con 3 o 4 gruppi in parallelo riducendo anche la mutua distanza tra due SSE successive. La tabella 3.2.1 riporta l'evoluzione degli standard adottati in funzione delle massime velocità ammesse dei treni.

| Distanziamento delle SSE consecutive | Gruppi di conversione | | | Velocità massima dei treni (km/h) |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| | N. | Tipologia | Potenza (MW) | |
| 40 km | 2 | a vapori di mercuri | 2 | 150 |
| 20 km | 2 o 3 | con diodi al silicio | 3.6 | 160 |
| 20 - 16 km DD Firenze-Roma | 3 o 4 | con diodi al silicio e reg. tensione | 5.4 | 250 |

Tabella 3.2.1: Evoluzione della potenza installata e distanziamento delle SSE.

Nelle SSE sono state anche gradualmente conseguite migliori condizioni di sicurezza per il personale mediante, una diversa disposizione delle apparecchiature e l'adozione di blocchi elettrici e di segnalazioni all'ingresso dei locali laddove sono possibili situazioni di pericolo. In tali SSE sono stati sempre più perfezionati i sistemi di telecomando, telecontrollo e di diagnostica per la pronta individuazione ed eliminazione dei guasti. Grazie a tali sistemi le SSE sono normalmente impresenziate e telecontrollate dai DOTE. I DOTE, ovvero posti del Dirigente Operativo della Trazione Elettrica, sono centri di telecomando e telecontrollo computerizzati atti a comandare e controllare per aree geografiche il sistema elettrico di trazione, dalle linee in alta tensione, quando erano ancora di proprietà di FS, a quelle di contatto. In particolare, il DOTE tiene in costante osservazione lo stato delle apparecchiature delle SSE, degli interruttori e dei sezionatori, i quali vengono manovrati a distanza in caso di guasto o per esigenze operative di manutenzione.

Le SSE di conversione, un tempo alimentate alla tensione di 66 kV, ora vengo quasi tutte alimentate da linee primarie a 132 o 150 kV. Lo schema tipico, riportato in figura 3.2.1, prevede un'alimentazione in entra/esci al fine di garantire la continuità dell'esercizio anche in caso di fuori servizio della linea primaria da un lato.

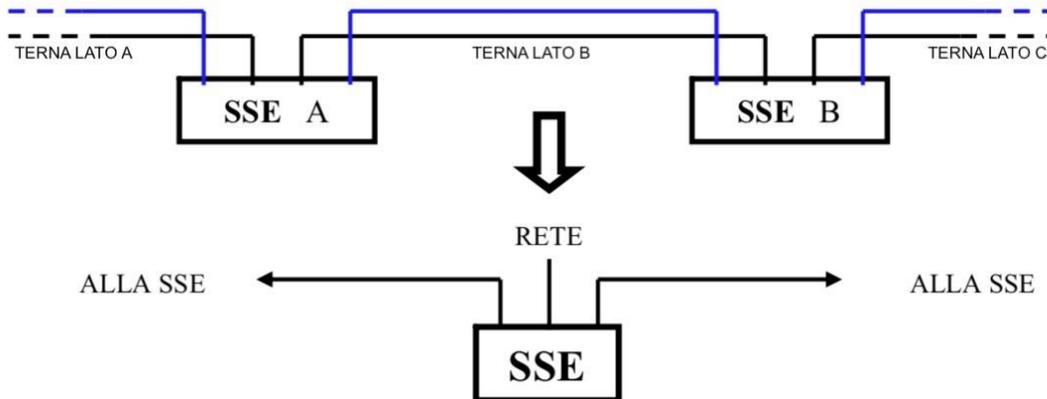


Figura 3.2.1: Schema di alimentazione entra/esci.

Dalla figura soprastante vediamo come le SSE possono essere alimentate da una doppia o singola terna di linee primarie. A seconda del numero di sbarre di AT contenute nel reparto all'aperto della SSE l'alimentazione entra/esci può essere a doppia sbarra in serie o a singola sbarra in serie. L'alimentazione a doppia sbarra in serie, rispetto a quella a singola sbarra, consente una migliore continuità di alimentazione e di poter alimentare un gruppo della SSE con la terna lato A e un gruppo con la terna lato B.

L'impianto di una SSE può essere suddiviso in otto sezioni funzionali, di cui le prime cinque, riportate in figura 3.2.2, descrivono il circuito di potenza. Seguendo il percorso dell'energia elettrica, si individuano la sezione di:

- alimentazione e smistamento in AT o MT in corrente alternata (**in nero**);
- trasformazione e alimentazione in MT (**in blu**);
- conversione dell'energia (**in rosso**);
- protezione e distribuzione TE (**in verde**);
- smistamento e alimentazione TE (**in violetto**).

Le rimanenti tre sezioni, non rappresentate in figura, sono:

- quella preposta al governo, telecomando e servizi ausiliari;
- quella comprendente gli impianti di terra e di ritorno;
- quella degli impianti e opere accessorie.

Di seguito si vanno a descrivere i principali componenti costituenti ciascun reparto (AT all'aperto, conversione al chiuso e alimentazione della linea di contatto all'aperto) seguendo il flusso dell'energia, prendendo come riferimento la figura 3.2.2.

Sistema di alimentazione MVDC per la trazione ferroviaria basato sull'interconnessione delle sottostazioni esistenti

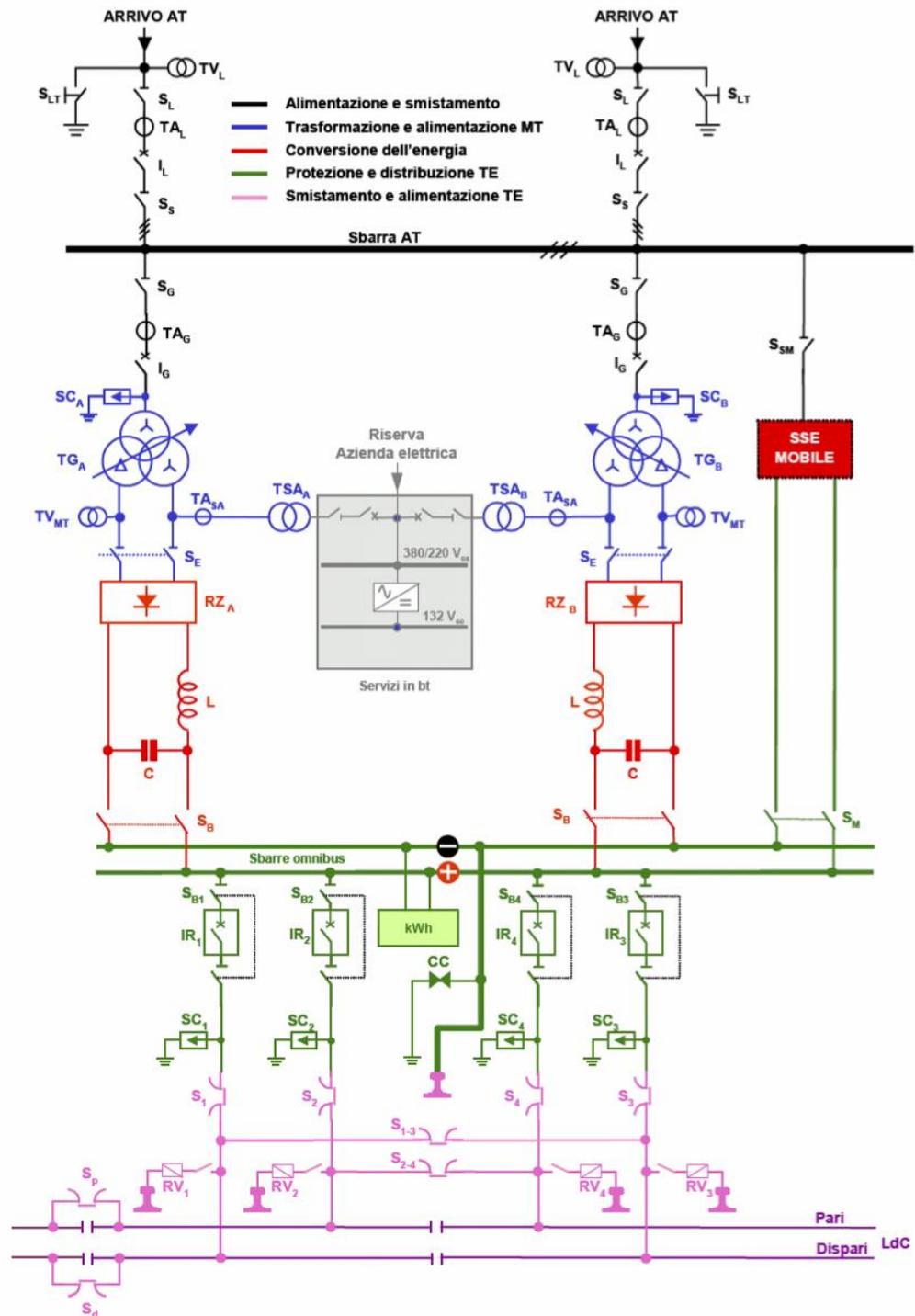


Figura 3.2.2: Schema generale di una SSE costituita da due gruppi di conversione più uno stallo per una sottostazione mobile.

Reparto in Alta Tensione all'aperto

Questa sezione, interamente sviluppata all'aperto, è costituita dall'insieme delle infrastrutture, apparecchiature e dispositivi di controllo e protezione, installati tra gli arrivi linee e il trasformatore di gruppo, quest'ultimo compreso. Le apparecchiature presenti fino al trasformatore di gruppo (AT/MT) sono riportate nella figura sottostante.

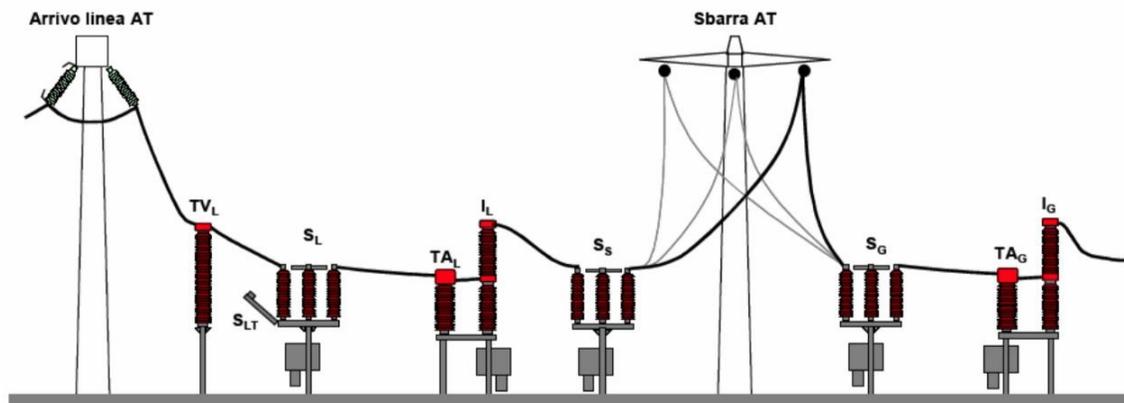


Figura 3.2.3: Vista schematica dallo stallo di arrivo linea a quello di alimentazione di gruppo.

Gli arrivi linee in AT sono costituiti dalle parti finali delle cosiddette "linee primarie", di norma a tensioni nominali di 66, 132 e 150 kV.

Il primo dispositivo che si incontra, seguendo sempre il flusso dell'energia, è il trasformatore di tensione di linea TV_L (riduttore di tensione) utilizzato per la misurazione della tensione in arrivo. Da ogni fase della linea AT viene derivato un trasformatore di tensione (TV_L) di tipo induttivo (con elevato rapporto di trasformazione) o capacitivo (in grado di sfruttare la reattanza capacitiva a 50 Hz dei condensatori incorporati), al fine di ridurre la tensione a valori idonei per essere misurata dalle apparecchiature di misura di tipo digitale e/o microprocessore. A seconda del valore di tensione misurato si ha o meno l'intervento delle protezioni, sia di massima - minima tensione che delle selettive distanziometriche. Nelle nuove SSE il TV_L è utilizzato sia per le misure di energia sia per l'intervento delle protezioni distanziometriche che agiscono sull'interruttore di linea I_L .

Dopo il trasformatore di misura di linea troviamo il sezionatore di linea S_L in alta tensione, a manovra manuale e/o motorizzata, il quale non apre a carico ma viene utilizzato per far vedere se la linea è sezionata nel caso in cui sia intervenuto l'interruttore di linea. Allo stesso sezionatore è associato il sezionatore S_{LT} , chiamato anche più semplicemente "lame di terra", il quale è provvisto di particolari lame per la

messa a terra delle condutture elettriche. Esso è necessario per la sicurezza delle persone a cause della tensione residua che potrebbe rimanere sulle capacità verso terra della linea in AT una volta sezionata. Le lame di terra sono vincolate nelle manovre a S_L per rendere impossibile la loro contemporanea chiusura: il collegamento a terra di S_{LT} è possibile solo se le lame principali S_L sono in posizione di aperto.

Continuando a seguire il flusso dell'energia, dopo il sezionatore di linea troviamo il trasformatore di corrente di linea TA_L (riduttore di corrente) connesso in serie ad ogni fase. Negli impianti meno recenti ciascun TA è costituito da un'apparecchiatura separata mentre negli impianti più moderni è inserito nel corpo dell'interruttore. Nella stessa struttura in cui è posizionato il TA_L vi è l'interruttore di linea in alta tensione I_L del tipo in SF_6 (esafluoruro di zolfo). L' SF_6 permette di ottenere elevati livelli di isolamento e, soprattutto, riesce a "spegnere" rapidamente gli archi elettrici grazie alla sua elevata resistenza dielettrica, permettendo anche un'ottima conduzione del calore.



Figura 3.2.4: Sezionatore AT di arrivo linea.



Figura 3.2.5: Interruttore e TA di linea.

L'interruttore ha lo scopo di interrompere o dare continuità al circuito elettrico in cui è inserito e a differenza del sezionatore, è destinato ad intervenire anche sotto carico, essendo in grado di provocare l'estinzione delle correnti presenti.

A valle dell'interruttore di linea I_L troviamo il sezionatore di sbarra S_s con le stesse funzionalità del sezionatore di linea S_L ma privo delle lame di terra. A seconda del numero di gruppi costituenti la SSE, dalle sbarre AT si diramano tante terne di conduttori in parallelo quanti sono i gruppi presenti. Ciascun gruppo sarà quindi dotato del proprio sezionatore di gruppo S_G , del trasformatore di corrente di gruppo TA_G e

dell'interruttore di gruppo I_G . Le apparecchiature di gruppo hanno le stesse caratteristiche elettriche e funzionali di quelle di linea (S_L , TA_L e I_L). Per concludere tale parte riguardante l'alimentazione e smistamento in AT riportiamo di seguito alcune specifiche tecniche riguardanti gli interruttori (I_L e I_G).

| Parametro | | Valori nominali |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------|
| Tensione nominale (kV) | | 66 - 132 - 150 |
| Corrente nominale (A) | | 600 - 650 |
| Potere di interruzione (A) | | 7000 - 32000 |
| 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 nominale d'apertura (s) | | 0,08 - 0,12 |
| Tempo nominale di chiusura (s) | | 0,30 - 0,23 |
| Durata dell'arco (s) | | < 0,01 |

Tabella 3.2.2: Parametri di funzionamento degli interruttori AT.

La sezione di trasformazione e alimentazione in media tensione, parte blu di figura 3.2.2, ha lo scopo di trasformare l'energia dall'alta tensione alla media tensione per la successiva conversione in corrente continua. In ingresso ad ogni trasformatore di gruppo **TG**, troviamo uno scaricatore **SC** in AT al fine di proteggere il trasformatore di potenza da sovratensioni di origine esterna (atmosfera) e di manovra. I trasformatori di gruppo alimentano i gruppi raddrizzatori e, qualora non siano presenti fonti di alimentazioni di aziende elettriche o si voglia avere un'alimentazione di riserva, forniscono energia anche ai servizi ausiliari attraverso un trasformatore MT/BT. I trasformatori di potenza (TG) sono a tre avvolgimenti dove il primario (avvolgimento in alta tensione) è collegato a stella, un secondario (avvolgimento in media tensione) è anch'esso collegato a stella e l'altro secondario (terzo avvolgimento) collegato a triangolo (Yyd11). Questa configurazione permette di utilizzare un ponte raddrizzatore a dodici impulsi (due ponti di Graetz connessi in serie o in parallelo) visto che le due tensioni secondarie sono sfasate di 30° elettrici. Altra caratteristica di tali trasformatori è quella di essere dotati di un variatore sotto carico così da poter regolare automaticamente la tensione di uscita dai gruppi raddrizzatori attraverso il controllo della tensione secondaria del trasformatore, misurata utilizzando appositi trasformatori

di misura in media tensione TV_{MT} collocati al secondario. Al fine di capire il funzionamento del regolatore sotto carico osserviamo la figura sottostante.

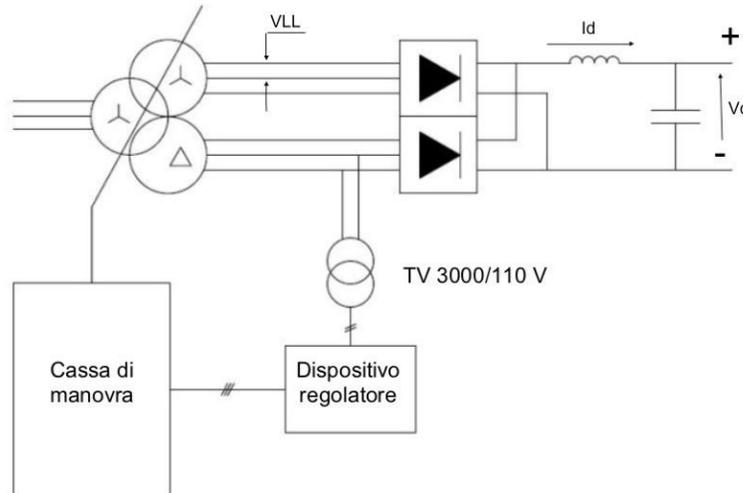


Figura 3.2.6: Schema di principio di un variatore sotto carico.

Tale figura rappresenta un gruppo costituito da un trasformatore a tre avvolgimenti e due ponti di Graetz connessi in parallelo. A titolo di esempio ipotizziamo di voler mantenere a valle del raddrizzatore una tensione raddrizzata V_d di valor medio pari a 3600 V (tensione di riferimento). Vista la connessione dei due

ponti raddrizzatori, per avere la tensione desiderata a vuoto ($I_d = 0$), la tensione secondaria concatenata del trasformatore dovrà presentare un valore efficace di $V_{LL} = 3600/1.35 = 2667$ V. Nella condizione a carico, considerando nulle le perdite nei due convertitori, a causa dell'induttanza del trasformatore il valor medio della tensione raddrizzata V_d si ridurrà di un valore pari a $6 \cdot f \cdot L_s \cdot I_d / 2$ ($I_d / 2$ poiché i due ponti sono in parallelo). Quindi per mantenere i 3600 V, con regolatore posizionato al primario, si dovranno ridurre il numero di spire primarie (presa -1) al fine di aumentare la tensione concatenata al secondario. Per non far operare il variatore sotto carico anche a causa di fluttuazioni della tensione, la tensione misurata deve uscire dalla "banda morta" per un tempo solitamente superiore ai 30 secondi.

Il trasformatore di gruppo è anche dotato delle apparecchiature necessarie, come i relè Buchholz e le sonde di temperatura, necessarie per l'intervento delle protezioni in caso di guasto. L'isolamento dei trasformatori è in resina epossidica o in olio; per quest'ultimi devono essere installate opportune opere accessorie come le vasche di raccolta olio e le paratoie antifiamma. Negli impianti di nuova realizzazione i trasformatori di potenza sono in olio da 5,4 MW con doppio avvolgimento secondario da 1355 V così da permettere di collegare in serie i due ponti raddrizzatori in modo da consentire una corretta distribuzione del carico fra i secondari del trasformatore di gruppo. In tabella 3.2.3 sono riportati i principali dati dei trasformatori di potenza utilizzati nelle SSE.

| Parametro | Valore | Valore | Valore |
|---|-------------------------------------|--------------|--------------|
| Tipo | 66 kV | 132 kV | 150 kV |
| Sigla | Yy0 - Yd11 | Yd11 | Yd11 |
| Tensione nominale primaria (kV) | 63 ± 5,6 % | 125 ± 8 % | 150 ± 8 % |
| Rapporto di trasformazione | 63000/2710 | 125000/2710 | 15000/2710 |
| Gradino di regolazione | 1,902 % | 1,67 % | 1,67 % |
| Campo di regolazione | ±12 x 1,902 % | ±12 x 1,67 % | ±12 x 1,67 % |
| Potenza nominale (kVA) | 3880 | 5750 | 5750 |
| Potenza del gruppo (kW) | 2000- 3600 | 5400 | 5400 |
| Peso complessivo (kg) | 18760 | 28000 | 28000 |
| Peso olio (kg) | 5500 | 8500 | 8500 |
| Tensione % di corto circuito | < 13,5 % | | |
| Sovraccarico | 200% per 2 ore 300% per 5 minuti | | |
| NB: il variatore mantiene la tensione di uscita costante entro uno scarto di +75 e -75 V intorno ad un valore di riferimento a 3300, 3575 o 3850 V. | | | |

Tabella 3.2.3: Dati sui trasformatori di potenza.



Figura 3.2.7: Trasformatore di potenza AT/MT da 132 kV.

L'esterno e l'interno della SSE sono connessi con isolatori passamuro.

Reparto a 3 kV in corrente continua al chiuso

Facendo sempre riferimento alla figura 3.2.2, il reparto al chiuso comprende tutte le apparecchiature presenti tra il sezionatore esapolare S_E e l'interruttore extrarapido I_R . L'interno del fabbricato è dedicato alla conversione della corrente alternata in corrente continua alla tensione di 3,6 kV, tipica della trazione elettrica, alla sua distribuzione e alla protezione della SSE da sovracorrenti proveniente dalla linea di contatto.

Il sezionatore esapolare, posto a monte del trasformatore di gruppo, consente, insieme al sezionatore bipolare di sbarra S_B , di isolare elettricamente il gruppo raddrizzatore dal resto dell'impianto.

Il raddrizzamento della tensione alternata, in uscita dal secondario del trasformatore di gruppo, è affidato a due raddrizzatori a diodi a ponte di Graetz trifase che possono essere collegati in serie o in parallelo come mostrato nella figura sottostante.

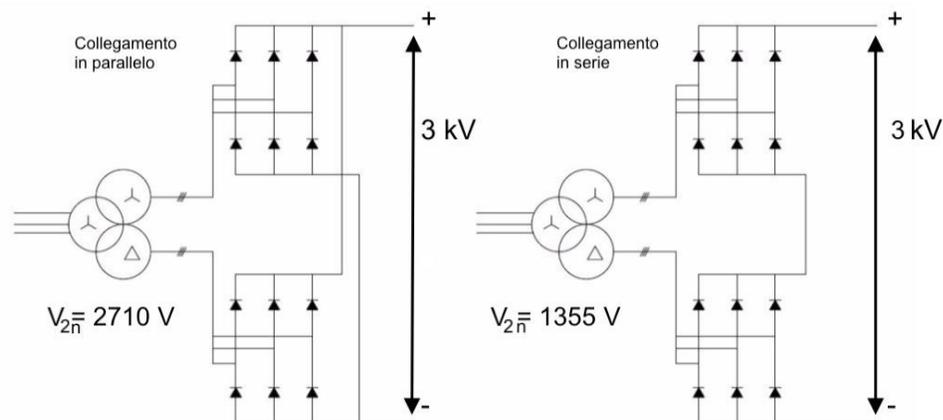


Figura 3.2.8: Collegamento in parallelo e in serie di due ponti trifasi.

Grazie allo sfasamento di 30° elettrici delle due tensioni secondarie, i due ponti raddrizzatori sia che siano collegati in serie o in parallelo, danno luogo a un convertitore dodecafase che presenta armoniche di tensione a frequenza più elevata (la fondamentale è a 600 Hz rispetto ai 300 Hz del ponte esafase), determinando un ripple della tensione raddrizzata più ridotto e facilmente filtrabile. La differenza principale, nelle due tipologie di collegamento, è rappresentata dal valore nominale della tensione secondaria del trasformatore. Per ottenere una tensione raddrizzata a vuoto di 3600 V, nel caso di collegamento serie, la tensione nominale secondaria deve essere di 1355 V, mentre nel caso di collegamento parallelo, il secondario del trasformatore di gruppo deve presentare una tensione nominale di 2710 V. Il collegamento in parallelo richiederebbe l'inserzione di una bobina interfase per

meglio suddividere il carico tra i due ponti raddrizzatori, di solito omessa, dato che gli avvolgimenti del trasformatore realizzano la stessa funzione. Con il collegamento in serie dei due ponti si potrebbe avere una tensione raddrizzata di 6 kV nel caso in cui il secondario del trasformatore di gruppo abbia una tensione nominale di 2710 V.

Nel corso degli anni, come accennato nel capitolo precedente, il raddrizzatore ha subito notevoli cambiamenti passando da convertitori esafasi costituiti da 216 diodi, ogni ramo comprendeva 3 rami in parallelo aventi 4 diodi in serie ciascuno, a configurazioni attuali, comprendenti solamente 5 diodi per ramo, per un totale di 30 diodi. Tali migliorie hanno permesso di installare, a parità di potenza, convertitori di minor ingombro. Nella disposizione del convertitore, all'interno della SSE, si presta particolare attenzione nel garantire la migliore circolazione naturale dell'aria e la massima uniformità possibile di raffreddamento. Infatti, dalla temperatura ambiente e dalle sovratemperature a cui sono sottoposti i diodi al silicio, dipende la possibilità di carico e sovraccarico dei gruppi.

A valle del raddrizzatore troviamo un filtro passa alto con frequenza di taglio attorno ai 108 Hz, costituito da una induttanza L da 360 mH e un banco di condensatori C da 360 μ F. Lo scopo del sistema di filtraggio è quello di bloccare le armoniche presenti nella tensione raddrizzata per evitare disturbi nelle linee di telecomunicazione e negli impianti di sicurezza. Il banco di condensatori è suddiviso in tre sezioni, ciascuna con quattro condensatori, isolati in olio, da 30 μ F come mostrato figura 3.2.10.



Figura 3.2.9: Induttanza da 6 mH.

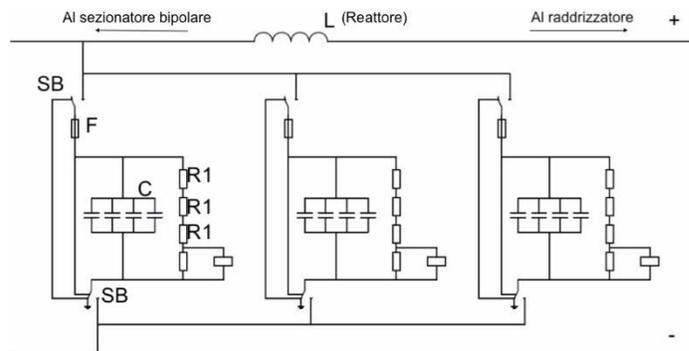


Figura 3.2.10: Schema elettrico del banco di condensatori.

Il filtro di ciascun gruppo è collegato alle **sbarre omnibus** tramite il sezionatore bipolare S_B il quale ha la funzione di separare ciascun gruppo raddrizzatore dalle sbarre omnibus. Tali sbarre, sostenute da isolatori fissati su mensole a muro ad una altezza di

almeno tre metri dal suolo, si estendono lungo le pareti del fabbricato. Esse vanno ad alimentare prima, la cella contenente la strumentazione per la misura dell'energia erogata dalla SSE, e successivamente le celle contenenti gli interruttori extrarapidi I_R .

La sbarra omnibus negativa (catodica) è collegata all'impianto di terra della SSE che è separato dal circuito di ritorno (binario). Infatti, nel normale funzionamento, la messa a terra dei binari (circuito di ritorno) e la messa a terra della SSE sono separate poiché i binari possono essere utilizzati per portare informazioni riguardanti la posizione, velocità ed intensità di traffico dei treni ed inoltre per evitare l'insorgere di corrosioni della rete di terra della SSE. In caso di guasto in linea il cortocircuitatore **CC** mette in parallelo le due messe a terra così da ridurre l'impedenza di terra riducendo il rischio di raggiungere tensioni di passo o di contatto troppo levate. Il cortocircuitatore entra quindi in funzione in caso si manifestino differenze di potenziale superiori a 200 V tra circuito di ritorno e impianto di terra della SSE. Inizialmente al posto di tale dispositivo veniva impiegata la valvola Soulè la quale aveva la stessa funzione ma doveva essere sostituita dopo ogni guasto.

Dalla sbarra omnibus positiva (anodica) per ogni linea di contatto si diramano due linee visto che la continuità elettrica in corrispondenza della SSE è interrotta al fine di garantire la continuità del servizio in caso di SSE fuori servizio (tale concetto è ripreso successivamente). Ogni linea che alimenta la l.d.c. è dotata di un interruttore extrarapido (IR_1 IR_2 IR_3 IR_4).

L'interruttore extrarapido, figura 3.2.11, è di fondamentale importanza per evitare un'eccessiva sollecitazione di tutti i componenti dell'impianto, dato che l'entità delle correnti di guasto è molto elevata. Inoltre, visto che la corrente da interrompere è continua e non alternata, l'interruttore non può sfruttare i naturali passaggi per lo zero della grandezza sulla quale deve intervenire. In linea di principio l'interruttore extrarapido è un interruttore unipolare dotato di un contatto mobile con richiamo mediante molle precaricate. L'aggancio è di tipo magnetico con bobina di ritenuta e circuito magnetico in ferro (elettrocalamita). Nel normale funzionamento la corrente che circola nel circuito di ritenuta, genera al traferro dell'elettrocalamita una forza magnetica in grado di mantenere i contatti chiusi. Per non utilizzare correnti sul circuito di ritenuta troppo elevate, visto che le correnti che alimentano la linea di contatto sono dell'ordine dei chilo ampere, viene utilizzato uno shunt magnetico. A regime ($di/dt = 0 \Rightarrow x_L = 0$) la maggior parte della corrente che alimenta la linea di contatto passa attraverso lo shunt magnetico e solo una piccola parte concatena l'elettrocalamita, creando un flusso magnetico che può essere vinto anche con piccole correnti di

ritenuta. In caso di guasto (di/dt elevato $\Rightarrow x_L$ elevata) tutta la corrente di guasto concatena l'elettrocalamita smagnetizzandola e la molla provoca l'apertura dei contatti (NB: l'extra rapidità è data dalla molla).

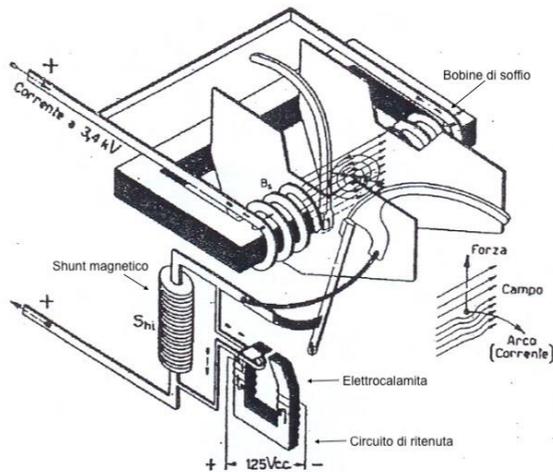


Figura 3.2.11: Interruttore extrarapido durante l'apertura.

La zona di formazione dell'arco è investita perpendicolarmente da un campo magnetico sostenuto dalle bobine di soffio, percorse dalla corrente di guasto. Per la nota legge di Lorentz, si genera un campo risultante la cui forza elettromagnetica di reazione spinge l'arco verso il suo circuito di estinzione (circuito di soffio). Tale circuito è composto da un certo numero di piastre metalliche, addossate a settori isolanti disposti trasversalmente al percorso dell'arco e

chiuso ai lati da pareti isolanti. L'arco, spinto verso l'alto, si suddivide in tanti archi elementari i quali vengono raffreddati e deionizzati tra le piastre di materiale isolante.

Vista l'elevata frequenza dell'insorgere dei guasti, un circuito prova linea in parallelo all'interruttore extrarapido permette una richiusura automatica di quest'ultimo, garantendo così la continuità del servizio in caso sia stata verificata l'assenza di un guasto permanente sulla linea. Tale circuito è composto da due sezionatori bipolari, uno a monte e l'altro a valle dell'interruttore ($S_{B1-2-3-4}$ in figura 3.2.2), una resistenza di prova terra R_L in parallelo, un contatore di prova terra PT in serie alla resistenza di prova terra e un dispositivo di rivelazione voltmetrica R_V . Dopo l'apertura dell'extrarapido, aperti i suoi sezionatori a monte e valle, R_V risulta in parallelo con la linea di contatto mentre R_L , grazie alla chiusura del contatore PT , viene messa in serie sempre alla linea di contatto. A interruttore extrarapido aperto i sezionatori vengono chiusi. Se dopo un tempo dell'ordine delle decine di secondi non si verificano scariche, limitata caduta di tensione su R_V , viene dato il consenso alla chiusura dell'interruttore e la linea di contatto riprende ad essere alimentata. In caso contrario, elevata caduta di tensione su R_V , si ha l'apertura del contatore PT permessa dalla limitazione della corrente di cortocircuito grazie alla presenza di R_L , e successiva procedura di riprova. La sequenza viene ripetuta 2 - 3 volte e infine, mancato ancora il consenso di richiusura, viene segnalato il guasto permanente in linea.

Di fondamentale importanza, al fine di estinguere le correnti di guasto nel minor tempo possibile, è l'asservimento degli interruttori extrarapidi. Dato che la linea di contatto è alimentata in modo bidirezionale da due SSE attigue, risulta evidente che gli interruttori extrarapidi di entrambe le SSE devono poter rilevare un guasto che si verifichi in qualsiasi punto della linea. Le tarature degli interruttori devono in questo caso essere mantenute basse, con rischi di scatti intempestivi, dovuti a normali correnti di carico. Il sistema di asservimento (denominato ASDE: asservimento a diseccitazione) prevede il collegamento di tutti gli enti preposti all'alimentazione e protezione della linea di contatto (interruttori extrarapidi), mediante l'utilizzo di un circuito costituito da una coppia telefonica. L'ASDE consente quindi di aumentare i livelli di taratura degli interruttori, devo proteggere metà tratta ciascuno, riducendone gli scatti intempestivi. Il sistema di asservimento permette anche di abbassare il livello di taratura degli interruttori nel caso di fuori esercizio dell'asservimento stesso o di una sottostazione elettrica. Per avere un'idea delle correnti ammissibili e dei tempi di intervento degli interruttori extrarapidi, in tabella 3.2.4 vengono riportati i principali dati di funzionamento di un interruttore tipo ABB UR 36 V.

| Parametro | Valore |
|---|---------------|
| Corrente permanente massima ammissibile | 4000 A |
| Corrente di corta durata ammissibile | 6550 A |
| Potere di interruzione a 4000 V | 55 kA |
| Campo di taratura | 2000 - 5000 A |
| Tempo di reazione meccanica in apertura diretta per massima corrente | 4 ms |
| Tempo totale di interruzione per un gradiente iniziale di corrente di 5×10^5 A | circa 25 ms |

Tabella 3.2.4: Dati di funzionamento extrarapido ABB UR 36 V

Infine, all'interno del fabbricato, troviamo anche i servizi ausiliari ovvero, gli impianti elettrici alimentati a bassa tensione, necessari per il funzionamento dei circuiti di manovra, di controllo, di allarme e di servizio delle apparecchiature presenti nella SSE. Tali impianti funzionano in parte in corrente alternata, alla tensione di 380 V per i servizi trifasi e 220 V per quelli monofasi, e in parte in corrente continua al valore nominale di 130 V. Le apparecchiature in corrente alternata sono alimentate dal trasformatore dei servizi ausiliari, **TSA** in figura 3.2.2, e possono anche essere connesse ad un'alimentazione indipendente in bassa tensione o ad un gruppo di continuità al fine di garantirne il funzionamento anche in caso di mancata alimentazione della SSE. I

servizi ausiliari in corrente continua sono invece alimentati da un raddrizzatore che esegue la conversione 380 V c.a. / 130 V c.c. (si veda la figura 3.2.2). Tale raddrizzatore alimenta anche uno scompartimento di batterie, che in caso di emergenza, riescono ad alimentare sia i servizi in corrente continua sia quelli in alternata, tramite un inverter, per un periodo limitato.

Reparto a 3 kV in corrente continua all'aperto

Tale reparto, in cui si effettua lo smistamento dell'energia e l'alimentazione tramite conduttori aerei (feeder) e sezionatori a 3 kV c.c. delle varie linee di contatto, inizia con gli isolatori passamuro a valle degli interruttori extrarapidi e termina con i sezionatori aerei ai quali sono collegati i conduttori che portano alla linea di contatto. Gli isolatori passamuro, del tutto analoghi per tipo e montaggio a quelli utilizzati a valle dei trasformatori di potenza, sono però dotati di scaricatori **SC**. A differenza degli scaricatori montati a monte dei trasformatori di gruppo, tali scaricatori, hanno la funzione di condurre a terra le eventuali sovratensioni provenienti dalla linea di contatto, evitando di sollecitare gli interruttori extrarapidi.

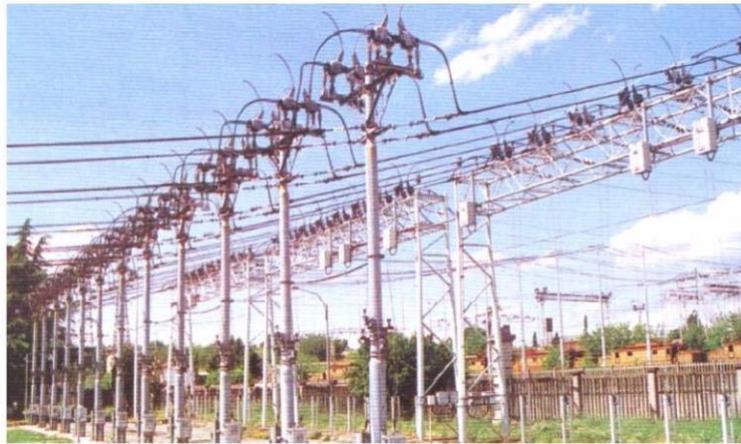


Figura 3.2.12: Sezionatori aerei a 3 kV, organi di manovra e complessi voltmetrici.

I sezionatori aerei unipolari a corna a 3 kV in c.c. sono provvisti degli interruttori di comando, del commutatore di telecontrollo incluso - escluso e, in generale, sono dotati di organi a motore che permettono automaticamente il loro azionamento. Tali sezionatori a corna si suddividono in sezionatori di prima fila (S_1 , S_2 , S_3 e S_4 di figura 3.2.2) e di seconda fila (S_{1-3} e S_{2-4} di figura 3.2.2). Solitamente i sezionatori di prima fila sono chiusi, così da alimentare la linea di contatto, mentre quelli di seconda fila, generalmente aperti, possono essere utilizzati per collegare alternativamente le linee di contatto così da garantire la continuità dell'esercizio in caso di avaria della SSE considerata (ecco perché in prossimità della SSE la continuità elettrica della linea di

contatto è interrotta). Grazie alle corna spinterometriche tali sezionatori riescono ad aprire il circuito anche in presenza di correnti di intensità limitata, riuscendo ad allungare l'arco fino a spegnerlo.

Infine, come rappresentato in figura 3.2.2, una SSE può essere dotata degli stalli per ospitare una sottostazione mobile (SSM) la quale è dotata di tutte le apparecchiature a partire dal trasformatore di potenza fino all'interruttore extrarapido precedentemente descritte. La necessità di utilizzare una SSM può essere dettata da diversi fattori come:

- guasti più o meno distruttivi delle SSE fisse;
- interventi di rinnovo e/o potenziamento delle SSE fisse che risultano fuori servizio in tutto o in parte;
- aumentare le potenzialità della linea a causa della ripartenza di più treni per una interruzione precedente.

Nel corso degli anni le SSE hanno raggiunto un elevato livello di standardizzazione così da renderle facilmente interfacciabili tra loro. Per informazioni più dettagliate sulla struttura delle SSE si rimanda a [6], [7] e [12].

3.3 La linea di contatto e il circuito di ritorno

Nel seguente sotto capitolo si descrivono i due ultimi componenti principali del sistema di trazione elettrica a 3 kV in corrente continua. Ci si è soffermati principalmente sulle loro caratteristiche da un punto di vista elettrico mentre si è fatto solamente qualche rapido accenno alla parte strutturale, sostegni ed infrastrutture, non perché di minor importanza ma in quanto elude dallo scopo di questa spiegazione. Alla fine di questa sezione c'è anche una piccola digressione riguardante le cadute di tensione in linea relative ad una tratta con alimentazione bilaterale.

Linea di contatto

Possiamo pensare alla linea di contatto come una "guida" in cui è incanalata l'energia necessaria ai sistemi di trazione per percorrere la tratta con la velocità desiderata. Il materiale rotabile è dotato, sul tetto (in gergo ferroviario imperiale), di una presa di corrente chiamata pantografo che, nella parte superiore, presenta una o più sbarre chiamate striscianti. Gli striscianti, in carbone, rame, acciaio o leghe speciali, hanno lo scopo di condurre la corrente, necessaria all'apparato motore, attraverso l'aderenza con la linea di contatto. Come tutte le corde anche la linea di contatto è dotata di una propria elasticità e per questo motivo il pantografo, con i propri movimenti, deve cercare di compensare quelli della corda per mantenere un contatto sicuro e stabile,

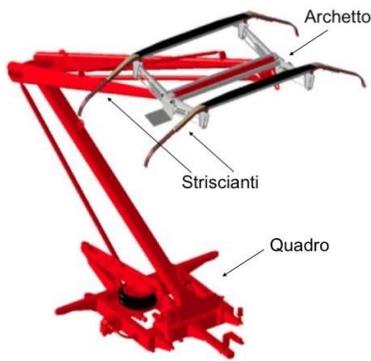


Figura 3.3.1: Pantografo ATR 95.

con un numero ridotto di distacchi. La qualità della captazione è infatti definita dal numero di distacchi che si verificano, tra linea e pantografo, durante il tempo di percorrenza della tratta. Al verificarsi di un micro-distacco abbiamo un'interruzione di potenza fornita al locomotore, una formazione di un arco potenzialmente dannoso per gli striscianti e infine, potrebbe anche verificarsi un'apertura intempestiva degli interruttori extrarapidi a causa della elevata corrente d'arco. Per questo motivo linea di contatto e pantografo rappresentano un unico sistema.

Quindi, per mantenere un ridotto numero di distacchi, le caratteristiche meccaniche della linea di contatto sono inerenti all'altezza rispetto al piano del binario, all'elasticità e all'insensibilità rispetto alle variazioni di temperatura e alle condizioni climatiche. La normativa vigente prevede che l'altezza della linea di contatto debba rimanere la più possibile costante ad un valore di 5 metri. Per mantenere un'elasticità il più uniforme possibile lungo il tracciato e soprattutto al passaggio del pantografo sono stati utilizzati due tipologie di accorgimenti: pendini, del diametro di 5 mm, che sostengono la linea di contatto per mezzo di una corda portante e l'utilizzo di corde a Y, figura 3.3.2, in corrispondenza dei punti fissi (punti in cui la forza di contatto tra pantografo e linea di contatto è minima). Tra linea di contatto e fune portante troviamo dei cavallotti di continuità, figura 3.3.3, poiché i pendini, vista la ridotta sezione, non sono sufficienti a garantire un buon collegamento elettrico.

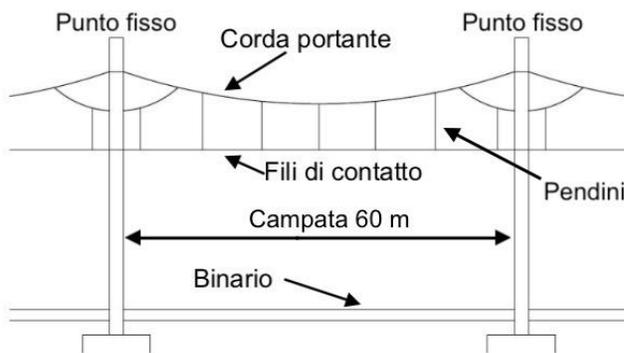


Figura 3.3.2: Schema catenaria con corda portante a Y.

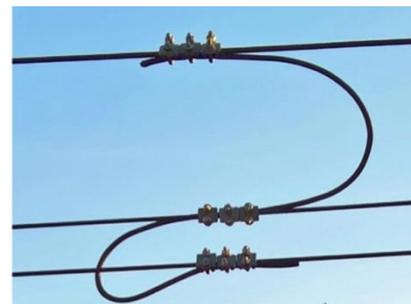


Figura 3.3.3: Cavallotto di continuità.

La linea di contatto è quindi composta dal vero e proprio filo di contatto, a contatto con il pantografo, e dalla corda portante. Tali funi sono in parallelo elettrico tra di loro e trasportano entrambe l'energia ai mezzi di trazione. Per limitare gli allungamenti o

accorciamenti della linea a causa delle variazioni di temperatura, è stata introdotta la regolazione automatica del tiro dei conduttori; un sistema dotato di pulegge e contrappesi montato su alcuni sostegni. La poligonazione del filo di contatto, spostamento di ± 20 cm rispetto all'asse dei binari, viene effettuata per non usurare gli striscianti del pantografo nello stesso punto così da aumentarne le ore di utilizzo.

La linea di contatto è sostenuta da sospensioni per mezzo di mensole fissate o su pali infissi lateralmente al binario o su portali sovrastanti la tratta. I portali sono composti da una travata orizzontale fissata a due montati verticali. La distanza massima tra un sostegno e l'altro, denominata campata, è di 60 metri in rettilineo e per curve con raggio maggiore ai 1400 metri. Per curve più importanti la distanza deve essere ovviamente ridotta.

Il materiale generalmente utilizzato per la linea di contatto (funi di contatto e corde portanti) è il rame. Il filo di contatto ha generalmente una sezione di 100 mm^2 o 150 mm^2 e presenta due scanalature per consentire l'attacco delle ganasce dei pendini come mostrato in figura.

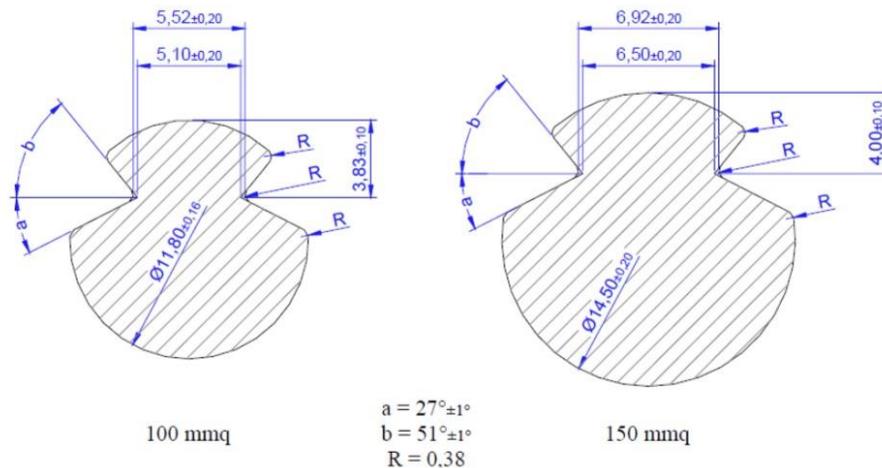


Figura 3.3.4: Sezione dei fili di contatto da 100 e 150 mm² usati dalle FS.

La scelta della sezione dei conduttori, costituenti la linea di contatto, è strettamente legata alle cadute di tensione in linea, al surriscaldamento dei conduttori e alla minimizzazione dei costi. Infatti, una sezione troppo grande, al fine di ridurre le cadute di tensione a parità di densità di corrente, comporterebbe oneri economici troppo elevati e problemi di captazione (linea pesante), mentre una sezione troppo esigua sarebbe causa di maggiori perdite e surriscaldamento dei conduttori. La resistenza chilometrica della linea di contatto ci da un'idea delle cadute di tensione che si

avrebbero ($\Delta V = r \cdot x \cdot I$)² e della potenza dissipata per effetto Joule ($P_{dissipata} = r \cdot x \cdot I^2$). La formula utilizzata per valutare la resistenza chilometrica è la seguente:

$$r_c = \rho_{Cu} \cdot \frac{1000}{S_c} = \frac{18}{S_c} \text{ } [\Omega/km] \quad (3.1)$$

dove S_c è la sezione complessiva di tutte le corde in rame di cui è formata la linea aerea, espressa in mm² (solitamente si considera la sezione nominale totale meno un 15 - 20 %, per tener conto dell'usura) e $\rho_{Cu}=0,018 \text{ } [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$. La normativa vigente prevede cinque configurazioni possibili, come riportato nella tabella seguente:

| Tipologia | Sezione della corda portante (mm ²) | Sezione del filo di contatto (mm ²) | Sezione complessiva (mm ²) | Velocità massima ammessa (km/h) |
|-----------|---|---|--|---------------------------------|
| A | 1 x 120 fissa | 2 x 100 regolati | 320 | 140 |
| B | 1 x 120 regolata | 2 x 100 regolati | 320 | 180 |
| C | 2 x 117 regolate | 2 x 100 regolati | 440 | 180 |
| D | 1 x 160 regolata | 2 x 150 regolati | 460 | 200 |
| E | 2 x 120 regolate | 2 x 150 regolati | 540 | 250 |

Tabella 3.3.1: Tipologia della linea di contatto secondo FS.

Per la protezione dalle fulminazioni sono posizionati dei trefoli di guardia in acciaio zincato o bronzo sulla sommità dei sostegni.

Infine, la linea di contatto, tra due SSE, è sempre alimentata bilateralmente visto che le SSE, a meno di casi particolari, hanno la stessa tensione a vuoto assicurando una non circolazione di correnti di ricircolo.

Il circuito di ritorno

Il binario è costituito da due rotaie di ferro o acciaio disposte ad una distanza costante, detta scartamento, fissate a traverse di cemento armato precompresso. La parte della rotaia a contatto con i cerchioni dei treni è detta fungo ed è sostenuto dall'anima la quale poggia sulla suola. Le rotaie sono inclinate verso l'interno del binario di 3° per migliorare il moto dei treni, mantenere i cerchioni sui binari e compensare in curva la forza centrifuga. Vista la lunghezza delle tratte ferroviarie le rotaie sono giuntate. Il

² Con x indichiamo la distanza del treno dalla sottostazione di sinistra se treno sul binario dispari o destra se treno su binario pari.

circuito di ritorno è quindi costituito da una o da entrambe le rotaie del binario. Di fondamentale importanza dal punto di vista elettrico è la conduttanza di dispersione



Figura 3.3.5: Sezione di rotaia in acciaio con massa lineare di 60 kg/m.
1) fungo, 2) anima, 3) suola.

verso terra delle rotaie. Esse infatti non sono isolate perfettamente dal terreno in modo tale da permettere a parte della corrente di ritorno di fluire a terra così da evitare che il binario si porti a tensioni pericolosamente elevate. La conduttanza di dispersione non è legata alla natura dei binari, ma alle condizioni della

massicciata, zona in cui poggiano i binari, allo stato di conservazione delle traverse e alle condizioni ambientali. Inoltre, visto che la corrente continua potrebbe provocare una corrosione delle rotaie o di altre condutture vicine al circuito di ritorno, dei conduttori sacrificali vengono posti in parallelo ai binari.

La resistenza chilometrica di un binario costituito da rotaie in ferro ($\rho_{Fe} \cong 10 \cdot \rho_{Cu}$) può essere calcolata nella seguente maniera:

$$r_b = \rho_{Fe} \cdot \frac{1000}{S_b} = \frac{190}{S_b} \quad [\Omega/km] \quad (3.2)$$

Le rotaie sono solitamente identificate con la loro massa lineare m_b (kg/m). Vogliamo quindi esprimere la resistenza chilometrica del binario in funzione di m_b . Ricordando che la densità del ferro è $\gamma_{Fe} = 7,85 \cdot 10^3$ kg/m³ ed esprimendo la sezione complessiva delle due rotaie in funzione della massa lineare, $S_b = (2 \cdot m_b) / (l \cdot \gamma_{Fe})$, otteniamo:

$$r_b = 190 \cdot \frac{\gamma_{Fe}}{2 \cdot m_b} = \frac{0,75}{m_b} \quad [\Omega/km] \quad (3.3)$$

Come precedentemente accennato i binari sono giuntati. I giunti sono dei punti a resistenza concentrata. Si tiene conto delle giunture considerando una sovra lunghezza della rotaia: per ogni giunto si considerano 2 - 3 metri aggiuntivi di binario. Quindi la resistenza chilometrica del binario può essere ottenuta utilizzando la seguente formula:

$$r_b = \frac{0,9}{m_b} \quad [\Omega/km] \quad (3.4)$$

Solitamente a titolo cautelativo la totale massa lineare viene ridotta del 10 - 15 % per tenere conto dell'usura.

La messa a terra dell'impianto di alimentazione ferroviaria (linea di contatto) è normalmente mantenuta separata dal circuito di ritorno della corrente di linea per ridurre il rischio di corrosioni elettrolitiche. I due sistemi vengono messi in parallelo attraverso delle valvole di tensione quando la differenza di potenziale supera i 200 V (stesso principio del cortocircuitatore nelle SSE).

Infine, i binari ospitano anche il circuito di binario utilizzato per il segnalamento delle posizioni dei treni in linea. Al fine di garantirne il funzionamento, tra i binari sono inseriti dei giunti isolanti con lo scopo di interrompere la continuità elettrica del circuito di ritorno. Apposite connessioni longitudinali a treccia permettono di ristabilirla. Per maggiori informazioni riguardati le SSE la l.d.c e il binario si rimanda a [6], [7], [8] e [12].

Cadute di tensione con alimentazione bilaterale

Da quanto precedentemente descritto possiamo rappresentare linea di contatto e binario, da un punto di vista elettrico, come un unico conduttore caratterizzato da una resistenza chilometrica di:

$$r = r_c + r_b \quad [\Omega/\text{km}] \quad (3.5)$$

Andiamo ora a studiare tre differenti configurazioni per individuare in quali punti della tratta la tensione al pantografo presenta il valore minimo:

- alimentazione bilaterale a singolo binario con SSE aventi la stessa tensione;
- alimentazione bilaterale a singolo binario con SSE aventi tensioni diverse;
- alimentazione bilaterale a doppio binario con binari in parallelo.

Consideriamo quindi la figura seguente:

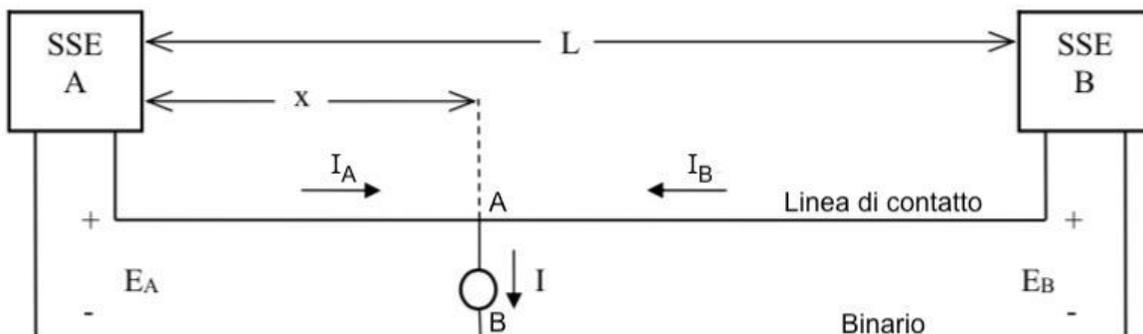


Figura 3.3.6: Schema di una tratta a singolo binario.

Consideriamo che il treno, distante x dalla SSE di sinistra, stia assorbendo un determinato valore di corrente. Le SSE hanno la stessa tensione raddrizzata a vuoto $E = E_A = E_B$ e trascuriamo, per semplicità, la loro resistenza interna. Applicando il metodo delle correnti di anello otteniamo:

$$\begin{cases} E_A - V_{AB} = r \cdot x \cdot I_A \\ E_B - V_{AB} = r \cdot (L - x) \cdot I_B \\ I_A + I_B = I \end{cases} \quad (3.6)$$

Ricavando dalla prima equazione V_{AB} e sostituendo nella seconda, tenendo conto che $I_B = I - I_A$, ricaviamo:

$$I_A = \frac{L - x}{L} \cdot I \quad (3.7)$$

da cui possiamo notare che: per $x = 0$ (treno in corrispondenza della SSE di sinistra) tutta la corrente è erogata dalla SSE_A ($I_A = I$) mentre, per $x = L$ (treno in corrispondenza della SSE di destra) tutta la corrente è erogata dalla SSE_B ($I_A = 0$). Per trovare in che punto della linea la tensione al pantografo è minima basterà osservare quando la caduta di tensione $\Delta V_{AB} = E - V_{AB}$ è massima. Sostituendo quindi l'espressione di I_A nella prima equazione del sistema 3.6 e ponendo la derivata della caduta rispetto alla posizione del treno uguale a zero, otteniamo:

$$\frac{d\Delta V_{AB}}{dx} = r \cdot \frac{L - x}{L} \cdot I - r \cdot \frac{x}{L} \cdot I = 0 \Leftrightarrow x = \frac{L}{2} \quad (3.8)$$

Abbiamo quindi ricavato che a metà tratta la tensione applicata al pantografo è minima e quindi, a parità di potenza richiesta, richiederà una corrente maggiore. Punto critico dell'alimentazione bilaterale è il centro della tratta la cui caduta di tensione è massima e pari a $\Delta V_{AB_MAX} = (r \cdot L \cdot I)/4$.

Ipotizziamo ora che il variatore sotto carico nella SSE_B sia fuori servizio a causa di un guasto. La tensione raddrizzata a vuoto E_A sarà maggiore di E_B . Definendo $\Delta E = E_A - E_B$ e svolgendo gli stessi passaggi di prima, ricaviamo che la differenza di tensione tra la SSE_A e la tensione al pantografo è data da:

$$\Delta V_{AB} = I \cdot r \cdot x - I \cdot r \cdot \frac{x^2}{L} + \frac{\Delta E}{L} \cdot x \quad (3.9)$$

Derivando l'espressione ottenuta rispetto alla posizione del treno e ponendola uguale a zero ricaviamo:

$$x = \frac{L}{2 \cdot I \cdot r} \cdot \left(I \cdot r + \frac{\Delta E}{L} \right) \quad (3.10)$$

Da tale espressione, per come abbiamo definito x (distanza dalla SSE_A), possiamo intuire come il punto minimo della tensione al pantografo sarà spostato verso la SSE con tensione minore:

$$\begin{cases} E_A > E_B \Rightarrow \Delta E > 0 \text{ } x \text{ più lontano da SSE}_A \\ E_A < E_B \Rightarrow \Delta E < 0 \text{ } x \text{ più vicino alla SSE}_A \end{cases}$$

Nel caso di tratta a doppio binario, per contenere le cadute di tensione, si possono collegare in parallelo i due binari in corrispondenza del centro della tratta come mostrato in figura:

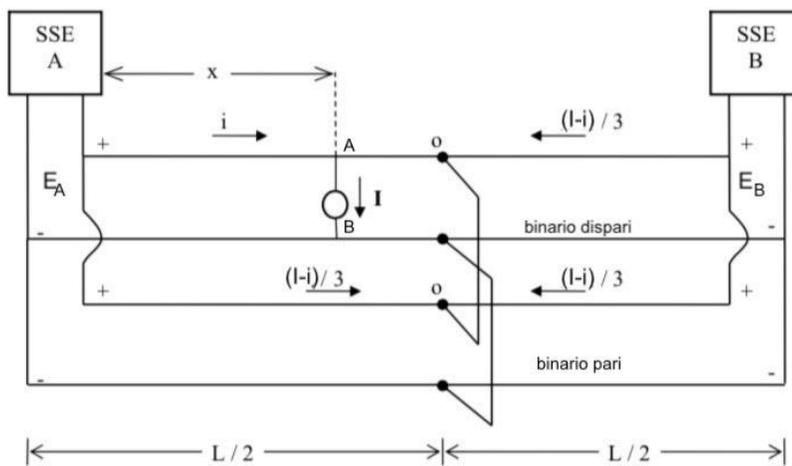


Figura 3.3.7: Tratta a doppio binario con collegamento in parallelo a mezzzeria. $I_A=i$, $I_B=i$.

Considerando le due SSE con la stessa tensione raddrizzata a vuoto, quando il treno è compreso tra la SSE_A e il centro della tratta, possiamo esprimere la caduta di tensione nella seguente maniera:

$$\Delta V_{AB} = E - V_{AB} = r \cdot x \cdot I \cdot \left(\frac{\frac{2}{3} \cdot L - x}{\frac{2}{3} \cdot L} \right) \quad (3.11)$$

Si può facilmente dimostrare che tale caduta equivale alla caduta che si avrebbe lungo una singola linea alimentata bilateralmente di lunghezza $(2/3) \cdot L$. Quindi grazie al collegamento in parallelo dei due binari, la massima caduta di tensione si trova a $L/3$, quando il treno è compreso tra SSE_A ($x = 0$) e $L/2$, e a $(2/3) \cdot L$, quando il treno si trova tra $L/2$ e SSE_B ($x = L$). In entrambi i punti la caduta di tensione vale:

$\Delta V_{AB_MAX} = (r \cdot L \cdot I)/6$. Quindi minore rispetto a quella ottenuta con tratta a singolo binario. Tale beneficio si ha solamente quando un binario è carico e l'altro scarico.

3.4 Potenzialità e criteri di verifica

Dopo aver descritto i principali componenti del sistema di trazione elettrica a 3 kV in c.c., vogliamo capire qual è la massima potenza che può essere richiesta da un treno, tra due SSE, e quali criteri devono essere rispettati al fine di non danneggiare i componenti dell'impianto.

Per calcolare, da un punto di vista teorico, la massima potenza che può essere assorbita da un treno osserviamo lo schema di figura 3.4.1, rappresentante una tratta a singolo binario. Rappresentiamo il treno come un generatore di corrente continua, il cui valore dipende dal rapporto tra la potenza elettrica richiesta al pantografo e la tensione applicata ($I_T = P_{el}/V_{AB}$). Linea di contatto e binario sono caratterizzati rispettivamente con le proprie resistenze chilometriche r_c e r_b , e le SSE, distanti L , possono essere rappresentate come dei generatori di tensione (E_A e E_B) con in serie una resistenza ($R_{intA,B}$).

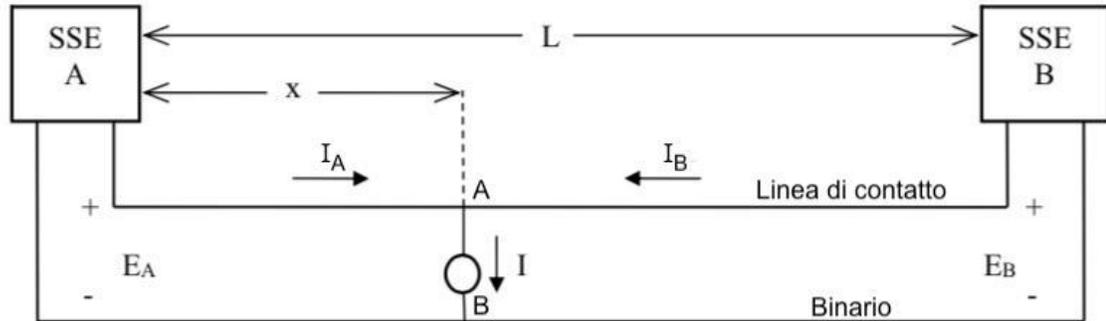
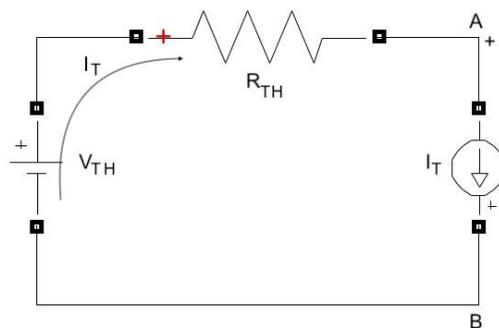


Figura 3.4.1: Schema di una tratta a singolo binario.

Applicando il teorema di Thévenin tra A e B otteniamo lo schema circuitale equivalente di seguito riportato. La resistenza equivalente di Thévenin è data da:



di seguito riportato. La resistenza equivalente di Thévenin è data da:

$$R_{TH} = \frac{(R_{intA} + r_0 \cdot x) \cdot (R_{intB} + r_0 \cdot (L - x))}{R_{intA} + R_{intB} + r_0 \cdot L} \quad (3.12)$$

con r_0 somma della resistenza chilometrica della linea di contatto r_c e

Figura 3.4.2: Schema circuitale equivalente.

del binario r_b . La tensione del generatore equivalente di Thevenin dipende dalle tensioni delle due SSE. Considerando, per semplicità, il caso in cui la tensione raddrizzata a vuoto delle due SSE sia la stessa, così da non dover considerare le correnti di ricircolo, la tensione del generatore equivalente V_{TH} sarà uguale alla tensione raddrizzata a vuoto. Risolvendo lo schema circuitale di figura 3.4.2 ricaviamo il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{TH} - R_{TH} \cdot I_T \\ V_{AB} = \frac{P_{el}}{I_T} \end{cases} \quad (3.13)$$

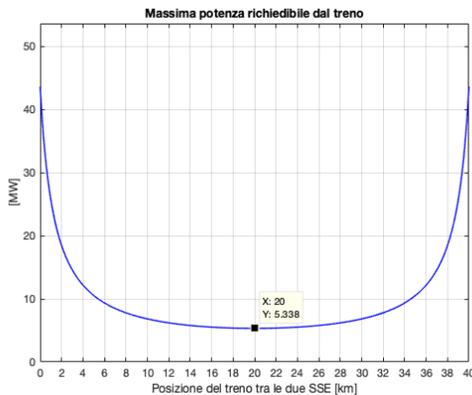
Sostituendo al termine V_{AB} , della prima equazione, l'espressione P_{el}/I_T e derivando l'equazione ottenuta rispetto alla corrente del treno I_T otteniamo:

$$\frac{dP_{el}}{dI_T} = -2 \cdot I_T \cdot R_{TH} + V_{TH} \quad (3.14)$$

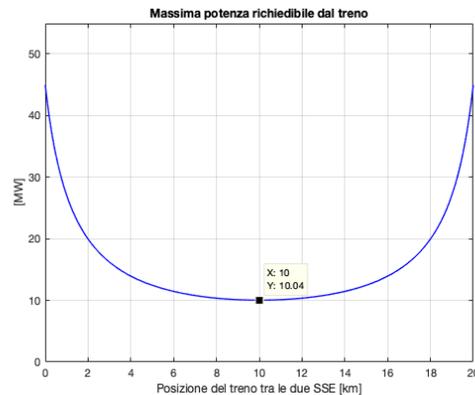
Prescindendo per il momento dal valutare se I_T è sostenibile o meno, ponendo l'equazione sopra ricavata uguale a zero, ricaviamo che la massima potenza che può essere richiesta dal treno si ha per $I_T = V_{TH}/(2 \cdot R_{TH})$ ovvero:

$$P_{elMAX} = \frac{V_{TH}^2}{4 \cdot R_{TH}} \quad (3.15)$$

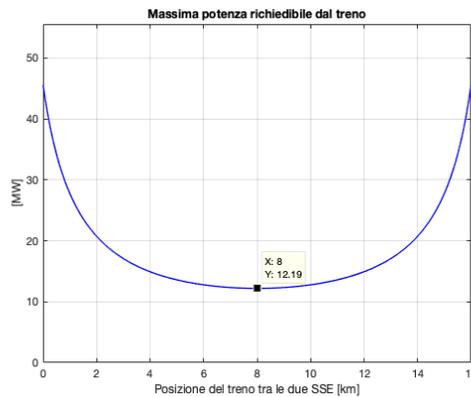
Tale potenza dipende dalla posizione del treno tra le due SSE visto che, come ricavato in 3.12, la resistenza equivalente di Thévenin è correlata alla posizione del treno (x). Riportiamo di seguito l'andamento di P_{elMAX} in funzione della posizione del treno e al variare della distanza tra le SSE.



. 1



. 2



. 3

Figura 3.4.3: Risultati ottenuti considerando $r_c=0,0392 \Omega/\text{km}$, $r_b=0,0176 \Omega/\text{km}$ e $R_{\text{intA}}=R_{\text{intB}}= 0,1533 \Omega$ con SSE aventi la stessa tensione raddrizzata a vuoto. 1) SSE distanti 40 km, 2) SSE distanti 20 km, 3) SSE distanti 16 km.

Osservando l'evoluzione della potenza elettrica teorica possiamo notare come il punto critico si presenti al centro della tratta e che diminuendo la distanza tra le SSE la P_{eMAX} aumenta. Dai grafici ottenuti, in corrispondenza delle SSE ($x = 0$ e $x = L$), il treno potrebbe assorbire una potenza maggiore di 240 MW. Considerando una tensione nominale di 3,6 kV, tale potenza comporterebbe un'erogazione di corrente di circa 66 kA ovvero ciascuna SSE dovrebbe essere costituita da 44 gruppi di conversione da 5,4 MW in parallelo (valore esorbitante). Inoltre, correnti di tale valore sarebbero di gran lunga maggiori delle correnti di taratura degli interruttori extrarapidi (vedi tabella 3.2.4) e porterebbero i conduttori della linea di contatto a valori di temperatura insostenibili considerando le attuali sezioni in gioco (tabella 3.3.1). Possiamo quindi concludere che la potenza derivabile dalla linea di contatto è limitata dalla necessità di soddisfare contemporaneamente i seguenti **criteri principali** (Specifiche Tecniche di Interoperabilità):

- il carico massimo ammissibile per i gruppi raddrizzatori delle sottostazioni non venga superato;
- la temperatura dei conduttori della linea di contatto nei punti più critici non superi il valore massimo ammissibile;
- la tensione al pantografo dei treni si mantenga entro limiti accettabili, sia per una regolare utilizzazione dell'energia da parte dei mezzi di trazione, sia nei riguardi del rendimento del trasporto dell'energia sulla linea di contatto;
- l'assorbimento di corrente da parte dei treni non superi i valori di taratura per massima corrente degli interruttori extrarapidi di linea;

Quindi al fine di garantire un corretto funzionamento degli impianti di trazione elettrica e per non danneggiarne i componenti, il traffico ferroviario in linea deve rispettare tali criteri.

In ambito ferroviario vengono distinte due condizioni di esercizio: l'esercizio normale, dove vengono presi in considerazione i periodi della giornata in cui il traffico è più intenso, e l'esercizio anomalo (tempi minori di 2 ore), che considera i casi di anomalia delle linee (ripartenza di più treni a causa di un guasto in linea) e degli impianti (fuori servizio di una SSE).

Andiamo ora a descrivere i quattro criteri precedentemente elencati e i limiti assunti, al fine di garantire il corretto funzionamento degli impianti di trazione elettrica a 3 kV in corrente continua.

Carico ammissibile dei gruppi raddrizzatori

Il carico massimo ammissibile dei gruppi raddrizzatori viene calcolato **in base al valore quadratico medio della corrente erogata**, per tempi riguardati ore di esercizio, e ai **picchi di corrente**, per tempi inferiori ai 5 minuti. Come esposto nel sotto capitolo 3.2 i due ponti a diodi costituenti un gruppo possono essere connessi in serie o in parallelo. Con la connessione dei ponti raddrizzatori in serie e il trasformatore a tre volgimenti con tensione nominale secondaria di 2710 V si potrebbe ottenere una tensione raddrizzata a vuoto di 6 kV ($V_{d0} = 2 \cdot 1,35 \cdot (V_{2n} + n_{tacca}^0 \cdot \Delta V) = 6 \text{ kV}$ con variatore al primario sulla presa -11). I limiti di carico di ciascun ponte a diodi, a seconda della potenza installata, sono riportati nella seguente tabella.

| Parametri considerati | Potenza nominale del gruppo ³ | |
|---------------------------------|--|---------|
| | 3600 kW | 5400 kW |
| Corrente nominale | 500 A | 750 A |
| Carico ammissibile per 2 ore | 1000 A | 1500 A |
| Carico ammissibile per 5 minuti | 1500 A | 1750 A |

Tabella 3.4.1: Valori in uscita da ciascun ponte a diodi.

Con i due ponti a diodi connessi in serie (tensione nominale del sistema 6 kV), applicando una tensione nominale di 7,2 kV alla linea di contatto (le Specifiche Tecniche di Interoperabilità permettendo di superare la tensione nominale di un 20%,

³ Potenza nominale del gruppo è calcolata in base al prodotto tra la tensione nominale applicata alla linea di contatto e la corrente nominale. Due ponti in serie e V_n di 3,6 kV la potenza nominale risulta di 2,7 MW.

vedi paragrafo successivo) ciascun gruppo raddrizzatore (trasformatore + i due ponti raddrizzatori) ha una potenza nominale installata di $P_{Gn} = V_n \cdot I_{Gn} = 7,2 \cdot 750 = 5,4$ MW. Il collegamento dei due ponti di Graetz in serie non viene ancora effettuato in quanto non sono ancora disponibili interruttori extrarapidi in grado di lavorare ad una tensione continua nominale superiore ai 4000 V. Ecco quindi perché, nel caso in cui si scelga la connessione in serie dei due ponti, sia necessario utilizzare trasformatori a tre avvolgimenti con tensione nominale secondaria di 1355 V.

Con i due ponti a diodi connessi in parallelo (tensione nominale del sistema 3 kV) la corrente nominale del gruppo raddrizzatore è data dalla somma delle correnti nominali di ciascun ponte a diodi (quindi $I_n = 1500$ A), ottenendo ancora una potenza nominale installata di 5,4 MW. Quindi, se i due ponti a diodi costituenti ciascun gruppo sono connessi in parallelo, le correnti dirette e ammissibili sono duplicate come mostrato nella tabella sottostante.

| Potenza nominale (kW) | Corrente nominale (A) | Corrente media quadratica (A) | | Corrente di punta (A) |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| | | Limiti in situazioni normali (+ 50%) | Limiti in situazioni anomale (+ 100%) | |
| 3600 | 1000 | 1500 | 2000 | Per una durata non superiore a 5 min. 3000 |
| 5400 | 1500 | 2250 | 3000 | 3500 |

Tabella 3.4.2: Limiti di carico di un gruppo raddrizzatore costituito da due raddrizzatori in parallelo

Quindi, una SSE costituita da 2 gruppi di conversione da 5,4 MW con raddrizzatori in parallelo, consente erogazioni massime ammissibili di 6000 A per 2 ore e di 7000 A di punta per non più di 5 minuti.

Temperatura della linea di contatto

Oltre certi valori di corrente i conduttori che costruiscono la catenaria (funi portati e di contatto) potrebbero subire un eccessivo riscaldamento per effetto Joule, comportando, oltre che al possibile danneggiamento dei conduttori, anche una diminuzione del franco da terra con conseguente aumento dei distacchi dello strisciante e possibile intervento intempestivo degli interruttori extrarapidi. Tale fenomeno, com'è noto, dipende dalla densità di corrente che percorre i conduttori e dal suo tempo di persistenza. Dalle prove sperimentali eseguite si è arrivati alla conclusione che la massima sovratemperatura ammissibile per i conduttori della linea di contatto è di 40 °C (50 °C in condizioni anomale). Quindi, considerando le condizioni

più sfavorevoli di temperatura ambiente (40 °C, tenuto conto del riscaldamento dovuto al sole), il valore massimo prudenzialmente ammesso della temperatura della catenaria risulta di 80 °C. Infine, i punti più soggetti al maggior aumento di temperatura sono quelle prossimi alle SSE, dove si sommano i carichi dovuti a più treni esistenti nella tratta⁴.

Tensione al pantografo

La tensione al pantografo può variare intorno al valore nominale del sistema purché si mantenga entro i valori +20% (3600 V) -33% (2000 V) fissati dalla normativa nazionale ed internazionale vigente sia in condizioni di esercizio normali che anomale. Tuttavia, normalmente, si ammette una tensione minima al pantografo pari a -20% della tensione nominale (2400 V). Per le linee progettate per velocità superiori ai 200 km/h le Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI) richiedono che la “tensione media utile”, definita come il rapporto tra la potenza media assorbita al pantografo e la corrente media, non sia inferiore a 2800 V (in situazioni anomale) e 3000 V (in situazioni normali) valori al di sotto dei quale i moderni locomotori con regolazione elettronica cominciano a non essere più in grado di assorbire la piena potenza. Oltre alle cadute di tensione massime possono interessare anche quelle medie che incidono sui consumi energetici, ovvero sul rendimento di trasmissione della linea espresso dalla formula:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta V_m}{V_n} \quad (3.16)$$

dove ΔV_m è la caduta di tensione media e V_n la tensione nominale del sistema. Ecco che in questo panorama di tensioni limite sono entrati in gioco i trasformatori di potenza (trasformatori di gruppo) con variatore automatico del rapporto di trasformazione sotto carico (OLTC).

| Parametri | Situazioni di esercizio | |
|---|-------------------------|----------|
| | normali | anomale |
| Tensione utile media | ≥ 3000 V | ≥ 2800 V |
| Tensione minima assoluta | 2400 V | 2300 V |
| Percentuale di rilievi di tensione ≤ 2800 V | ≤ 10% | ≤ 20% |

Tabella 3.4.3: Parametri limite della tensione al pantografo.

⁴ In 3.3 abbiamo dimostrato, trascurando la resistenza interna delle sottostazioni, che quando un treno si trova in corrispondenza di una SSE essa eroga tutta la corrente necessaria al treno.

Taratura interruttori extrarapidi

La taratura degli interruttori extrarapidi vincola i valori istantanei delle erogazioni di corrente da parte delle SSE. Tuttavia, grazie al sistema di asservimento (ASDE) mediante il quale ciascun extrarapido protegge metà tratta intervenendo comunque automaticamente in caso di anomali abbassamenti della tensione lungo la linea, si è potuto aumentare la taratura degli interruttori. Grazie quindi a questi due interventi la condizione relativa alla protezione dei corto - circuiti risulta meno critica delle altre e pertanto l'esame sui limiti di potenza derivabile dalla linea di contatto può essere limitato alle sole tre condizioni precedenti: carico massimo gruppi raddrizzatori, sovratemperatura e tensione al pantografo. Per i valori di taratura degli extrarapidi si rimanda alla tabella 3.2.4.

Nei capitoli seguenti al fine di verificare le potenzialità, sia dell'attuale sistema di trazione, sia di quello sperimentato faremo riferimento a questi criteri principali.

3.5 La Direttissima Firenze - Roma

La Direttissima Firenze - Roma è una linea ferroviaria ad Alta Velocità/Alta Capacità elettrificata in corrente continua a 3 kV. Visto che, in Italia, è la linea in corrente continua percorsa con la maggior velocità (velocità di esercizio 250 km/h), tale tratta è stata scelta come tratta di riferimento. Possiamo infatti intuire che se trovassimo un sistema di alimentazione tale da aumentare la velocità di percorrenza nella Direttissima, questo miglioramento potrebbe essere implementato anche alle tratte percorse a velocità minori.

La Direttissima (DD), inaugurata per oltre metà percorso il 24 febbraio 1977, nata come quadruplicamento della linea lenta (LL) già esistente, è stata la prima linea veloce realizzata in Europa. La tratta, a doppio binario, lunga circa 250 km venne completata il 26 maggio 1992. Il tracciato è pressoché rettilineo con distanza tra binario pari e binario dispari di 4 metri per neutralizzare gli effetti dinamici dei treni in fase di incrocio in linea. La pendenza massima è dell'8 ‰, il raggio minimo delle curve è di 3000 metri e la galleria più lunga presenta una lunghezza di 10 km.

Per sostenere un traffico veloce le SSE sono distanti 16 - 20 km l'una dall'altra, dotate di 3 gruppi di conversione da 5,4 MW, solitamente due in servizio continuativo e uno di riserva per garantire la ridondanza del sistema. La linea di contatto nel corso degli anni ha subito diverse modifiche. Le corde attualmente in uso sono: due corde portanti in rame da 120 mm² e due fili di contatto in rame da 150 mm².

Per stimare il traffico sulla Direttissima si è utilizzato il sito di Trenitalia (<https://www.trenitalia.com>). Si sono considerate solamente le frecce in partenza da Firenze S. M. Novella con direzione Roma Tiburtina (durata 1h e 20 minuti) tra le 10:00 e le 22:00. Si è ipotizzato che i regionali e i regionali veloci percorrano la tratta lenta. Facendo quindi una media degli orari di partenza si è ricavato che la Direttissima è percorsa da treni intervallati ogni circa 20 minuti con velocità massima di 250 km/h.

| Partenza (Firenze S. M. Novella) | Arrivo (Roma Termini) | Δt medio partenze |
|---|----------------------------------|---|
| 10:08 - 10:24 - 10:48 | 11:28 - 11:43 - 12:08 | 20 min. |
| 11:08 - 11:24 - 11:38 - 11:48 | 12:28 - 12:43 - 12:58 - 13:08 | 13,3 min. |
| 12:08 - 12:38 | 13:28 - 13:58 | 30 min. |
| 13:08 - 13:38 - 13:48 | 14:28 - 14:58 - 15:08 | 20 min. |
| 14:08 - 14:38 | 15:28 - 15:58 | 30 min. |
| 15:08 - 15:38 | 16:28 - 16:58 | 30 min. |
| 16:08 - 16:24 - 16:38 - 16:48 | 17:28 - 17:43 - 17:58 - 18:08 | 13,3 min. |
| 17:08 - 17:24 - 17:38 | 18:28 - 18:43 - 18:58 | 20 min. |
| 18:08 - 18:38 - 18:48 | 19:28 - 19:58 - 20:08 | 20 min. |
| 19:08 - 19:24 - 19:38 | 20:28 - 20:43 - 20:58 | 20 min. |
| 20:08 - 20:38 | 21:27 - 21:58 | 30 min. |
| 21:08 - 21:38 | 22:28 - 22:58 | 30 min. |

Tabella 3.5.1: Orari partenze e arrivi del 26/02/2019.

4. MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA 3 kV IN CORRENTE CONTINUA

Nel seguente capitolo vengono descritti i modelli realizzati per effettuare delle simulazioni sull'attuale sistema di trazione in corrente continua. Gli elementi che costituiscono gli schemi a blocchi di una tratta compresa tra due SSE, rappresentata in figura 4.1, sono descritti nel seguente ordine: sottostazione elettrica, treno (posizionato all'interno dei blocchi binario), linea di contatto e binario.

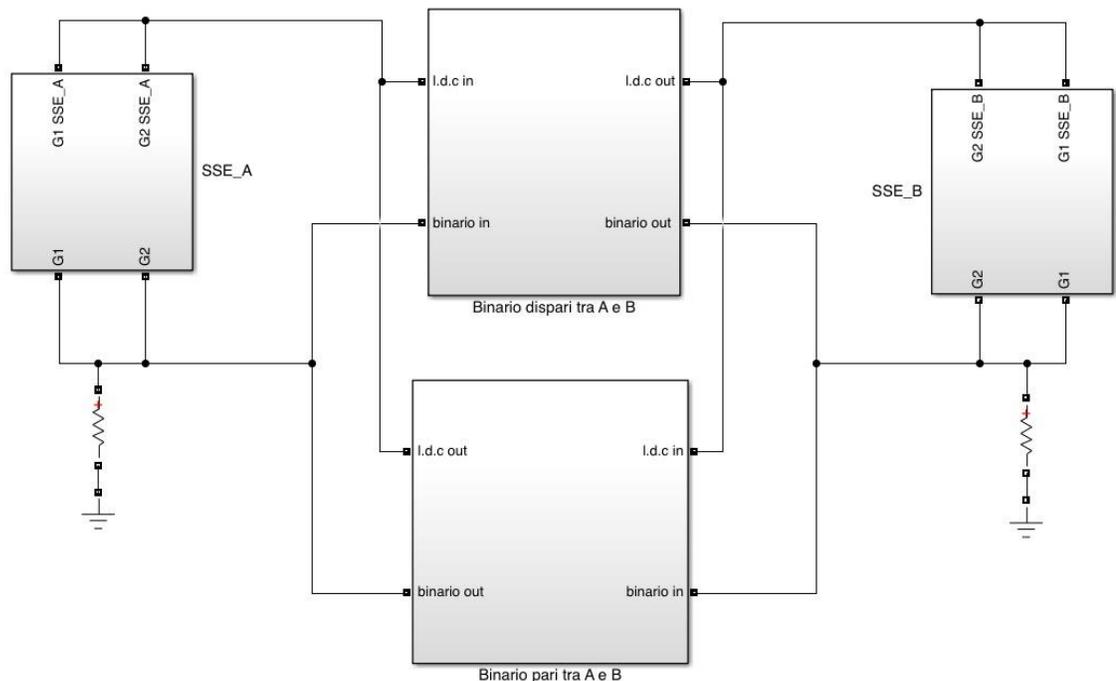


Figura 4.1: Blocchi costituenti una tratta tra due SSE.

Prima di iniziare a descrivere i modelli creati riportiamo di seguito le ipotesi adottate:

- si sono sempre simulate tratte a doppio binario (binario pari e binario dispari) con treni viaggiati, sui due binari, in direzioni opposte;
- i treni con velocità superiori ai 250 km/h sono dotati di due pantografi in presa continuativa;
- la presenza di due pantografi non limita la massima velocità raggiungibile;
- la massima corrente assorbibile da un pantografo I_{max} è di 2 kA.

Infine, per verificare la veridicità del sistema sviluppato è stata eseguita una simulazione di verifica basata su un'ipotesi di traffico esistente.

4.1 Modello di una SSE

Il modello di una sottostazione elettrica è stato definito riferendosi alle SSE presenti nella direttissima Firenze - Roma. Si sono quindi considerate SSE costituite da 3 gruppi in parallelo da 5,4 MW ciascuno, di cui due in servizio continuativo e uno di riserva. Si sono utilizzati trasformatori a tre avvolgimenti da 5750 kVA con tensione nominale secondaria di 2710 V (dati in tabella 3.2.3). Ciascun gruppo, composto da un trasformatore a tre avvolgimenti e due raddrizzatori connessi in PARALLELO, è stato modellizzato con un generatore di tensione pilotato, rappresentante la tensione raddrizzata a vuoto, una resistenza in serie, per la caduta dovuta alla commutazione della corrente, ed il variatore a carico (OLTC), come mostrato in figura 4.1.1.

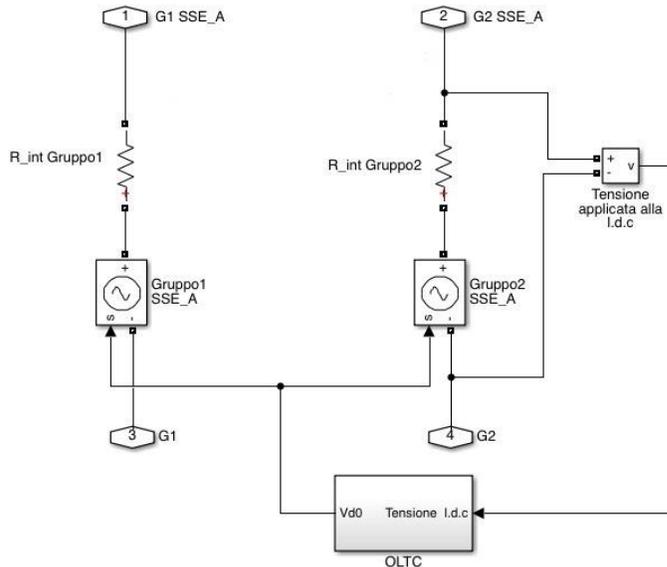


Figura 4.1.1: Modello SSE: due gruppi in parallelo, ciascun gruppo è costituito da due gruppi raddrizzatori in parallelo connessi a un trasformatore a tre avvolgimenti. Il gruppo di riserva non è stato modellizzato.

La resistenza in serie al generatore di tensione, come precedentemente detto, modella la caduta di tensione, $6 \cdot f \cdot L_s \cdot I_d$, dovuta al fenomeno della commutazione nel ponte raddrizzatore (per maggiori informazioni si rimanda a [13]). Al fine di ricavare il valore dell'induttanza L_s corrispondente al ramo serie del trasformatore si definiscono: il valore efficace I_{s1n} della corrente nominale di prima armonica al secondario del trasformatore e il valore nominale I_{dn} della corrente raddrizzata in uscita dal raddrizzatore. Considerando una tensione di corto circuito $v_{cc\%}$ del trasformatore pari al 12 % e trascurando i termini resistivi, possiamo scrivere la

caduta di tensione nominale riferita al secondario con l'avvolgimento primario in condizione di corto circuito come:

$$\omega \cdot L_s \cdot I_{s1n} = v_{cc\%} \cdot \frac{V_{2n}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

Sapendo che il valore efficace della fondamentale di prima armonica è legato alla corrente raddrizzata dalla seguente espressione⁵:

$$I_{s1n} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{I_{dn}}{2} \quad (4.2)$$

possiamo ricavare L_s come:

$$L_s = \frac{v_{cc\%} \cdot V_{2n}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi f \cdot I_{s1n}} = \frac{v_{cc\%} \cdot V_{2n}}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot I_{dn}} \quad (4.3)$$

Siccome abbiamo deciso di modellizzare un gruppo con un unico generatore di tensione, la resistenza⁶ che riproduce la caduta di tensione dovuta alla commutazione in ciascun raddrizzatore costituente un gruppo è:

$$R_{int} = \frac{6 \cdot f \cdot L_s}{2} = \frac{v_{cc\%} \cdot V_{2n}}{\sqrt{2} \cdot I_{dn}} \quad (4.4)$$

Con $V_{2n}=2710$ V, $I_{dn}=1500$ A e $v_{cc\%}=0,12$ ciascuna resistenza interna di figura 4.1.1 presenta il valore di 0,1533 Ω .

Visto che lo scopo di questa tesi non è quello di studiare l'evoluzione delle correnti di guasto, per le SSE e il binario si è considerata un'unica messa a terra collegata al negativo dei generatori di tensione attraverso una resistenza di valore elevato (1 M Ω). La presenza di tale resistenza si è resa necessaria poiché il programma Simulink faceva richiudere, verso la messa a terra tra due sottostazioni, buona parte della corrente che rientrava nelle SSE falsando quindi i risultati della simulazione.

Infine, si assume che i due OLTC agiscano in modo perfettamente sincronizzato e quindi sono rappresentati con un unico blocco. Il blocco che rappresenta la logica di controllo OLTC applicata al generatore di tensione è stato ottenuto adoperando la logica utilizzata in un modello preesistente in Simulink relativo ai trasformatori (che in questa sede non interessa rappresentare). Per la variazione della presa si è considerato un

⁵ Con $I_{dn} = 1500$ A.

⁶ La resistenza è divisa per due perché i due ponti costituenti ciascun gruppo sono in parallelo e quindi, essendo percorsi dalla corrente $I_{dn}/2$, la caduta di tensione è dimezzata.

ritardo di intervento di 30 secondi, valore tipico per evitare eccessivi interventi per inseguire le fluttuazioni della tensione in ingresso, un intervallo temporale di 5 secondi, relativo al tempo necessario per il passaggio da una presa all'altra, e una banda morta di ± 75 V entro la quale non ci sono interventi. Il variatore interviene se la differenza tra la tensione applicata alla linea di contatto e la tensione di riferimento rimane al di fuori della banda morta per più di 30 secondi. Essendo focalizzati sulla modellizzazione lato DC il variatore è rappresentato come se agisse direttamente sul generatore di tensione in DC. Quindi ad una variazione di presa ($\Delta V = 45,257$) corrisponde una variazione della tensione raddrizzata a vuoto $\Delta V_{dc} = 1,35 \cdot \Delta V$. Visto che si simulano tratte ad alta velocità, è stata scelta sia come tensione nominale del sistema sia come riferimento del variatore a carico la massima tensione applicabile al pantografo secondo le STI ovvero i 3600 V. Riportiamo di seguito gli schemi a blocchi costituenti l'OLTC.

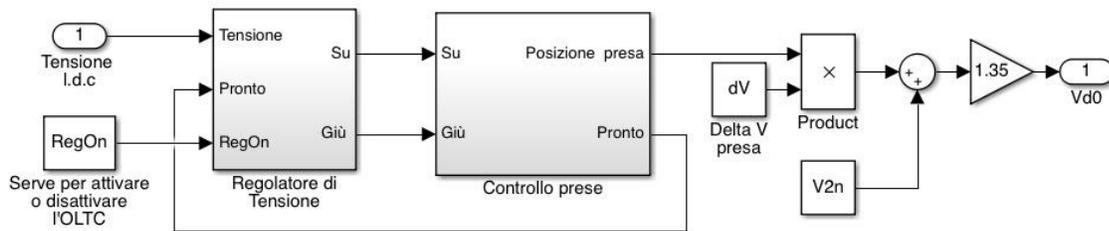


Figura 4.1.2: OLTC blocco principale. Input tensione linea di contatto, output tensione raddrizzata a vuoto.

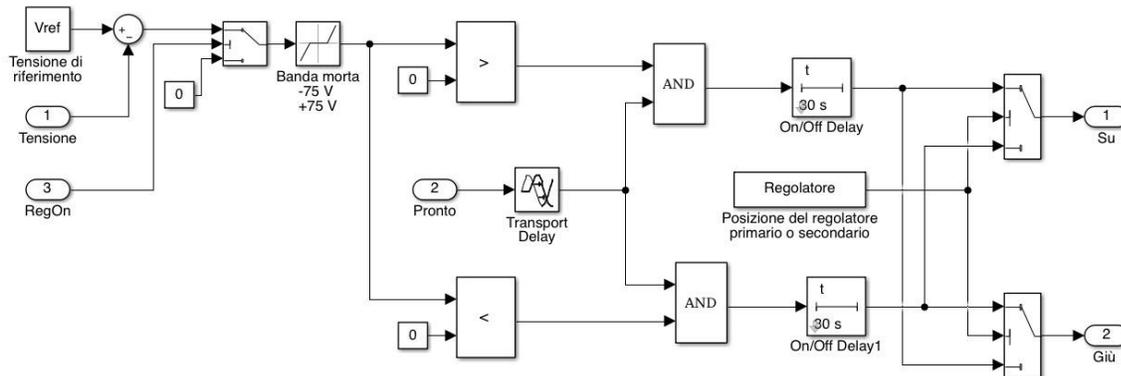


Figura 4.1.3: Blocco regolatore di tensione: varia la presa a seconda della tensione sulla linea di contatto.

Per quanto riguarda le caratteristiche del treno come massa, accelerazione massima, massimo sforzo di trazione, ecc. l'ETR 1000, in configurazione 8 carrozze, è stato scelto come treno di riferimento. Riportiamo di seguito i principali dati utilizzati:

| ETR 1000 | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Composizione | 8 carrozze (4M+4R) |
| Numero posti | 470 |
| Massa/posto | 1060 kg |
| Rapporto di aderenza (α) | 50 % |
| Tensione | 25 kV 50 Hz; 15 kV 16 2/3 Hz; 3 kV dc |
| Potenza massima | 9,8 MW |
| Massimo sforzo di trazione | 370 kN |
| Velocità massima | 360 km/h |
| Accelerazione massima | 0,7 m/s ² |
| Decelerazione massima | 1,2 m/s ² |

Tabella 4.2.1: Dati ETR 1000.

Prima di andare a descrivere i modelli creati riprendiamo i concetti principali riguardanti la forza motrice, che il gruppo motore deve sviluppare, necessaria per l'avanzamento del treno ad una determinata velocità. Il moto di un treno è governato dalle normali leggi della meccanica; quindi, per poter calcolare la forza motrice/meccanica F_m , occorre determinare il complesso delle forze resistenti al moto del treno.

$$F_m = F_{resistente} + F_{inerzia} \quad (4.5)$$

Sapendo che la forza d'inerzia ($F_{inerzia}$) è legata all'accelerazione o decelerazione del treno e alla sua massa, massa equivalente per tener conto delle masse rotanti, rimane da definire la forza che si oppone al moto del mezzo ($F_{resistente}$). Tale forza resistente è data dalla somma di più forze agenti sul mezzo di trazione:

1. *resistenze sistematiche*: dovute unicamente all'avanzamento del treno su binario pianeggiate e rettilineo in assenza di vento. Fanno parte di tali forze le resistenze di attrito tra perni e cuscinetti degli assi montati, le resistenze di attrito volvente tra ruota e rotaia, la resistenza dell'aria e le resistenze per attriti e deformazioni del binario e dei vincoli.

2. *resistenze accidentali*: dovute a particolari condizioni del tracciato. Resistenza dovuta alle curve, resistenza dovuta alle pendenze (positiva o negativa), resistenza dovuta al vento (positiva o negativa), resistenza in galleria.

Nel corso di questa tesi si sono solamente considerate le resistenze sistematiche, quelle relative alle pendenze e quelle in galleria. Per la valutazione delle resistenze sistematiche F_{r0} si è utilizzata la formula sperimentale descritta in [17] e di seguito riportata:

$$F_{r0} = \left(1 + 0,0025 \cdot v_{\left[\frac{km}{h}\right]} \cdot 4,8 \cdot \frac{n + 2,7}{G_{T[kN]}} \cdot 0,0145 \cdot \left(v_{\left[\frac{km}{h}\right]} + 15 \right)^2 \right) \cdot G_{T[kN]} \quad [N] \quad (4.6)$$

dove v è la velocità del treno, n rappresenta il numero di carrozze, G_T il peso totale del treno (Mg) e 15 è un coefficiente addizionale per tener conto della resistenza dell'aria.

Per quanto riguarda la resistenza in galleria F_G si è considerata la seguente formula sperimentale ricavata in [14]:

$$F_G = f_t \cdot v_{\left[\frac{m}{s}\right]}^2 \quad [N] \quad (4.7)$$

con $f_t = 4,1 \text{ kg/m}$.

Infine, per tenere conto della forza resistente dovuta alle pendenze F_P si è utilizzata la nota formula:

$$F_P = \pm G_{T[N]} \cdot \frac{i_{\text{‰}}}{\sqrt{i_{\text{‰}}^2 + 1}} \quad [N] \quad (4.8)$$

dove la pendenza del tracciato è definita da $i = tg(\alpha)$ con α angolo compreso tra l'orizzontale e il piano in salita.

L'equazione generale utilizzata per esprimere la dinamica del treno risulta essere:

$$F_m = F_{r0} + F_G \pm F_P + M \cdot (1 + \varepsilon) \cdot a \quad (4.9)$$

con M massa totale e ε incremento di massa al fine considerare anche l'inerzia delle parti rotanti. Si è considerato $\varepsilon=7\%$ rimandando a [3] per maggiori informazioni.

Definita quindi l'equazione dinamica, si va a descrivere il processo di implementazione dei due modelli. Come precedentemente detto la corrente assorbita dal treno viene espressa in funzione della potenza elettrica assorbita al pantografo e della tensione applicatagli. Per prima cosa si è sviluppato il modello del treno in **moto rettilineo uniforme su una tratta in media pendenza priva di gallerie**. In queste ipotesi la forza motrice dipende solamente dalle resistenze sistematiche (F_{r0}) che sono in funzione

della velocità. Dalla velocità di crociera del treno è immediato il calcolo della forza motrice ai cerchioni. Per il calcolo della potenza elettrica al pantografo in questo primo modello si sono considerati i rendimenti nominali dei componenti che troviamo partendo dai cerchioni fino al pantografo. Riportiamo in tabella i valori utilizzati:

| Dispositivo | Rendimento nominale |
|---|---------------------|
| Riduttore di velocità (η_{GB}) | 82 % |
| Motore asincrono (η_M) | 98 % |
| Inverter (η_I) | 98 % |
| Pantografo (η_P) | 92 % |
| Complessivo ($\eta_{Tot} = \eta_{GB} \cdot \eta_M \cdot \eta_I \cdot \eta_P$) | 72,453 % |

Tabella 4.2.2: Rendimenti utilizzati.

Noti quindi i vari rendimenti attraverso una semplice formula possiamo ricavare la potenza elettrica richiesta dal treno:

$$P_{el} = \frac{P_m}{\eta_{Tot}} = \frac{F_m \cdot v_{\left[\frac{m}{s}\right]}}{\eta_{Tot}} = \frac{F_{r0[N]} \cdot v_{\left[\frac{m}{s}\right]}}{\eta_{Tot}} \quad [W] \quad (4.10)$$

Quindi, con i rendimenti assunti e la formula (4.6) utilizzata per le resistenze sistematiche, una velocità di crociera di 250 km/h richiede una potenza elettrica al pantografo di 5,77 MW mentre per viaggiare a 300 km/h il treno deve assorbire una potenza di 9,48 MW. Il treno è quindi rappresentato come un generatore di corrente pilotato secondo il seguente modello:

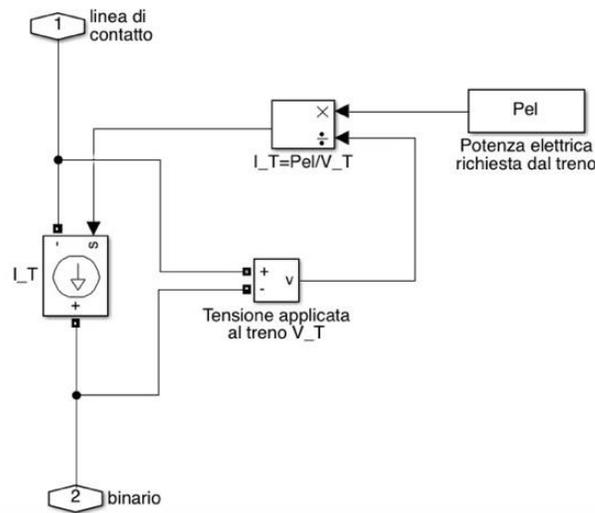


Figura 4.2.1: Modello del treno a velocità costante in una tratta di media pendenza priva di gallerie.

In questo primo modello non si sono considerate limitazioni sulla massima corrente assorbibile dal treno in quanto non è stato utilizzato per descrivere la dinamica del treno, ma per osservare le forme d'onda di corrente e tensione al pantografo per una determinata potenza elettrica richiesta. Inoltre, sono state simulate tratte che siano in grado di fornire la potenza elettrica richiesta dal treno in ogni punto della tratta, vedi sotto capitolo 3.4. Quindi grazie a questo semplice modello è stato possibile, con un opportuno script MATLAB, simulare nell'ambiente Simulink il regime elettrico corrispondere al passaggio di treni intervallati viaggiati a velocità costante con SSE diversamente distanziate.

Un altro modello è stato creato per lo studio della **dinamica del treno** con le relative limitazioni di massima corrente assorbibile I_{max} , relativa alla tipologia e numero di pantografi in presa, e massima accelerazione permessa dal gruppo motore. Tale modello, sia pur più complesso, si basa sempre sul concetto del treno come generatore di corrente. Per capire al meglio com'è stato realizzato questo secondo schema a blocchi possiamo suddividere il treno in 3 macrosistemi: l'azionamento elettrico, costituito dall'inverter, dal motore elettrico, dal riduttore e dalle ruote, visto come un sistema di conversione elettromeccanica che ha come input la corrente assorbita al pantografo e come output la forza meccanica di propulsione, il sistema meccanico vero e proprio, ed il sistema di controllo.

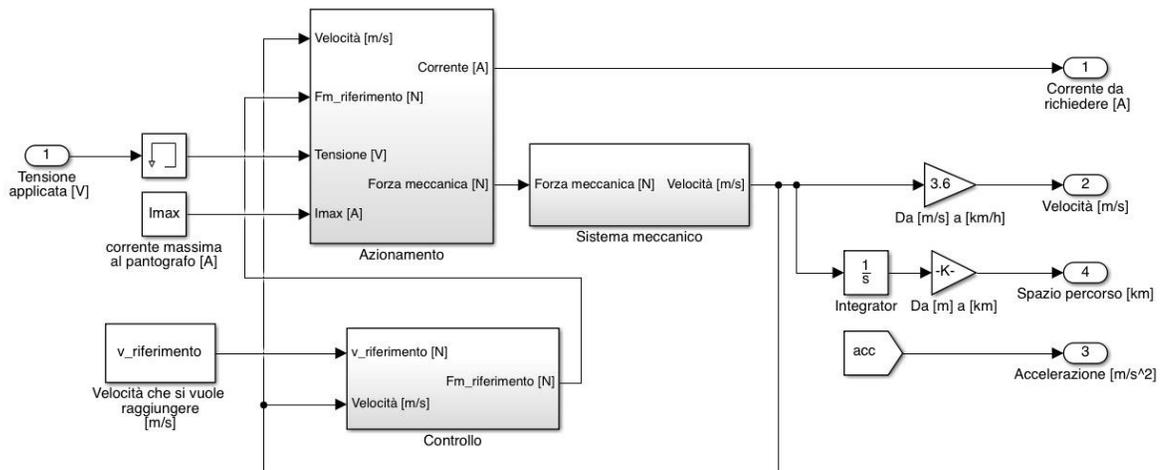


Figura 4.2.2: Modello del treno. I tre macrosistemi.

Il **sistema di controllo**, modellizzato con un controllore PI ($K_p=600000$ e $K_i=10$, si rimanda a [10] per maggiori informazioni), fornisce l'incremento di forza meccanica $F_{m_riferimento}$ che deve sviluppare l'azionamento elettrico al fine di raggiungere la velocità di regime. Riportiamo di seguito il relativo schema a blocchi:

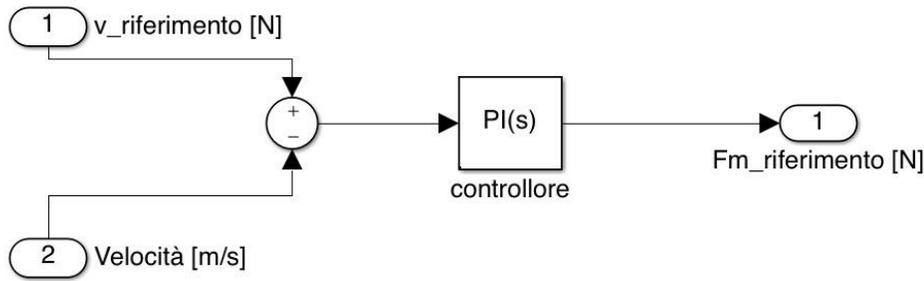


Figura 4.2.3: Il sistema di controllo.

L'azionamento elettrico ha invece il compito di fornire la forza meccanica ai cerchioni assorbendo corrente dalla linea di contatto. In questo modello non abbiamo considerato un rendimento nominale costante ma abbiamo preso in considerazione che esso vari con il variare della potenza richiesta ed erogata. La potenza meccanica prodotta sarà uguale alla potenza elettrica assorbita meno la potenza persa nel rame e nel ferro del gruppo motore. Riportiamo di seguito i dati nominali del gruppo motore e il ragionamento seguito per crearne il relativo schema:

| Dato | Valore |
|---|----------|
| Potenza nominale (P_n) | 9,8 MW |
| Velocità nominale (v_n) | 300 km/h |
| Rendimento nominale (η_n) | 98,5 % |
| Rapporto tra le perdite (ρ_{0n}) | 22 % |

Tabella 4.2.3: Dati motore. Il rendimento nominale η_n comprende anche l'inverter.

Il coefficiente ρ_{0n} rappresenta il rapporto tra le perdite a vuoto nominali P_{0n} , legate alla velocità del motore ma indipendenti dal carico, e le perdite nominali negli avvolgimenti P_{epn} , dipendenti dal carico ma indipendenti dalla velocità. Noto il rendimento nominale, la totale potenza persa in condizioni nominali è facilmente ricavabile come segue:

$$P_{pn} = P_{0n} + P_{epn} = P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \quad (4.11)$$

Quindi dalla conoscenza della potenza persa nominale e del rapporto r_{0n} possiamo esprimere i due termini riguardanti le perdite del gruppo motore come:

$$P_{0n} = P_{pn} \cdot \frac{\rho_{0n}}{1 + \rho_{0n}} = P_n \cdot \left(\frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{0n}}{1 + \rho_{0n}} \right) \quad (4.12)$$

$$P_{epn} = \frac{P_{pn}}{1 + \rho_{0n}} = P_n \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n \cdot (1 + \rho_{0n})} \quad (4.13)$$

Ora, se si ipotizza che la forza meccanica F_m sia grosso modo proporzionale alla corrente del motore, le perdite nel rame per una generica velocità valgono:

$$P_{ep} = P_{epn} \cdot \left(\frac{F_m}{F_n}\right)^2 = K_p \cdot F_m^2 \quad (4.14)$$

Essendo $F_n = \frac{P_n}{v_n}$ otteniamo $K_p = \frac{P_{epn}}{F_n^2} = \frac{(1-\eta_n) \cdot v_n^2}{\eta_n \cdot (1+\rho_{0n}) \cdot P_n}$.

Ipotizzando invece che la tensione al motore sia grosso modo proporzionale alla velocità, si ha che le perdite nel ferro per una generica velocità posso essere calcolate come segue:

$$P_0 = P_{0n} \cdot \left(\frac{v}{v_n}\right)^2 = K_0 \cdot v^2 \quad (4.15)$$

con $K_0 = \frac{P_{0n}}{v_n^2} = \frac{(1-\eta_n) \cdot \rho_{0n} \cdot P_n}{\eta_n \cdot (1+\rho_{0n}) \cdot v_n^2}$

Per una generica velocità v la potenza elettrica P_{el} assorbita dal motore è data quindi da:

$$P_{el} = F_m \cdot v + K_0 \cdot v^2 + K_p \cdot F_m^2 \quad (4.16)$$

Dividendo infine la potenza elettrica necessaria, P_{el} , per la tensione applicata al gruppo motore V_{DC} , ovvero tensione al pantografo meno la caduta di tensione su di esso, otteniamo la corrente che il treno deve assorbire dalla linea di contatto. Tale corrente sarà l'input del generatore di corrente in linea rappresentante il treno.

Per la risoluzione dell'equazione 4.16 bisogna calcolare due variabili: la velocità del treno v e la forza meccanica sviluppata F_m . La forza meccanica di riferimento in uscita dal sistema di controllo deve comunque rispettare i seguenti vincoli:

- essere minore della massima forza F_{max} "estraibile" dalla linea di contatto corrispondente alla massima corrente assorbibile dal pantografo e alla tensione applicata al motore;
- essere minore del massimo sforzo di trazione F_{tr_max} che può compiere il gruppo motore;
- essere minore della forza di aderenza F_{ad} per evitare lo slittamento dei cerchioni sulla rotaia.

La massima forza di trazione F_{max} ad una generica velocità v può essere calcolata risolvendo la seguente equazione di secondo grado, ricavata a partire dall'equazione 4.16, considerando, ovviamente, solamente la radice positiva:

$$V_{DC} \cdot I_{max} = F_{max} \cdot v + K_o \cdot v^2 + K_P \cdot F_{max}^2 \quad (4.17)$$

con $V_{DC} \cdot I_{max}$ massima potenza elettrica assorbibile dal motore e $F_{max} \cdot v$ massima potenza meccanica fornibile ai cerchioni.

Per il massimo sforzo di trazione si sono considerati i 370 kN dell'ETR 1000 mentre per il calcolo della forza di aderenza si è utilizzata la seguente formula ricavata da relazioni sperimentali (per maggiori approfondimenti si rimanda a [3]):

$$F_{ad} = \frac{f_{ad0}}{(1 + 0,011 \cdot v_{\frac{km}{h}})} \cdot G_{ad} \quad (4.18)$$

con f_{ad0} coefficiente di aderenza statico (0,33 per rotaie asciutte, 0,25 per rotaie umide) e G_{ad} peso aderente⁷ ($G_{ad} = \alpha \cdot M \cdot g$ in accelerazione, $G_{ad} = M \cdot g$ in frenatura visto che tutte le ruote contribuiscono a frenare). Quanto detto finora si traduce nel modello rappresentato in figura 4.2.4.

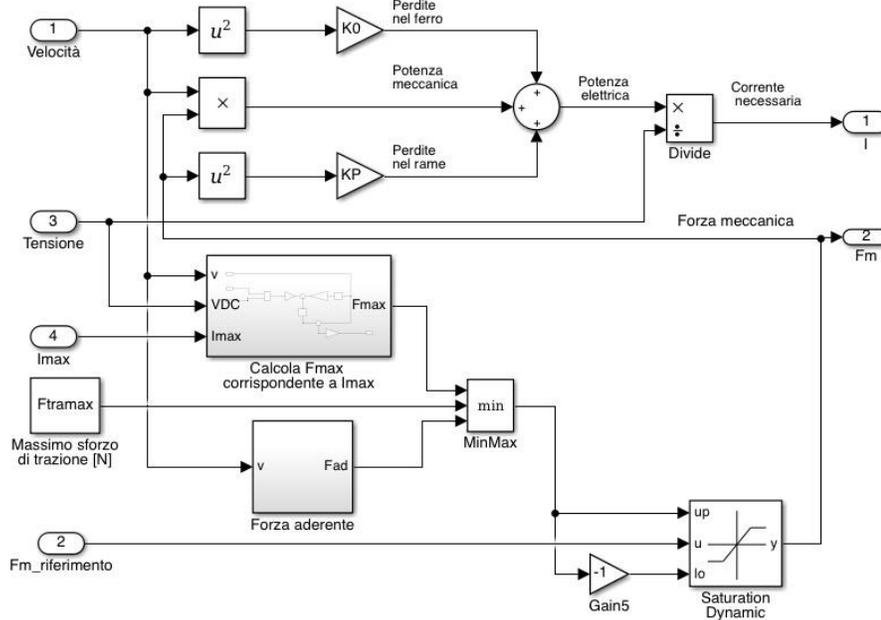


Figura 4.2.4: Gruppo azionamento elettrico.

⁷ In accelerazione il peso aderente è il peso delle motrici. Il coefficiente α definisce la massa aderente rispetto alla massa totale del locomotore: $\alpha = (massa\ aderente)/(massa\ totale)$.

Al fine di risolvere l'equazione 4.16 manca da calcolare la velocità del treno. Ecco quindi che entra in gioco il **sistema meccanico** da cui si ricava l'accelerazione del treno esplicitandola dall'equazione 4.9:

$$a = \frac{F_m - (F_{ro} + F_G \pm F_p)}{M \cdot (1 + \varepsilon)} = \frac{F_m - \sum F_{resistenti}}{M_{eq}} \quad (4.19)$$

Integrando infine l'accelerazione otteniamo la velocità del treno. In figura 4.2.5 è riportato il modello relativo al sistema meccanico.

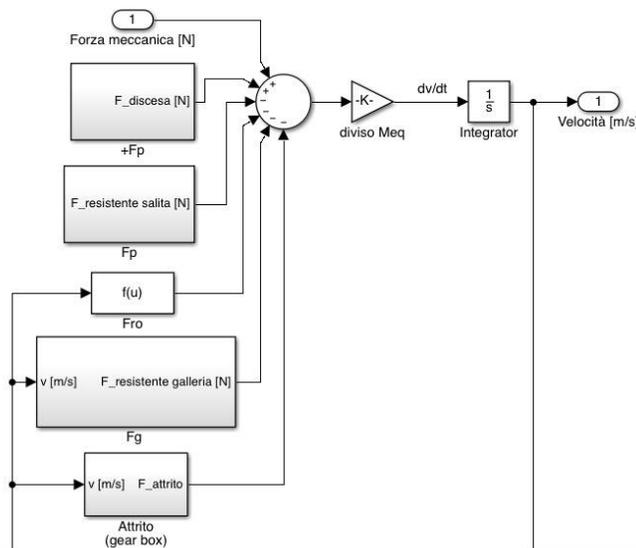


Figura 4.2.5: Il sistema meccanico.

I blocchi riguardanti le resistenze accidentali (F_G e $\pm F_p$) sono attivati con degli appositi switch attivati dalla posizione del treno, facilmente ricavabile integrando la velocità.

Per concludere il modello si sono infine considerate le perdite nel riduttore di velocità (gear box) e nel pantografo. Le perdite nel gear box sono state modellizzate come un'aggiunta di forza meccanica che il gruppo motore deve sviluppare e per questo sono state inserite all'interno del sistema meccanico come rappresentato in figura 4.2.5. Possiamo assumere che tali perdite siano date da un termine costante K_F , dovuto all'attrito tra i denti del riduttore, più un termine legato all'attrito viscoso K_V , proporzionale alla velocità.

$$F_{attrito} = K_F + K_V \cdot v \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4.20)$$

Noti il rendimento nominale del riduttore ($\eta_{nGB} = 82\%$) e il rapporto tra le due tipologie di perdite ($\rho_{nGB} = 10\%$) si possono ricavare i coefficienti K_F e K_V facendo gli stessi

ragionamenti eseguiti per il calcolo di K_0 e K_P . Riportiamo di seguito le due espressioni ottenute:

$$K_V = \frac{\rho_{nGB} \cdot (1 - \eta_{nGB}) \cdot F_n}{\eta_{nGB} \cdot \rho_{nGB} \cdot (1 + \rho_{nGB}) \cdot v_n} \quad (4.21)$$

$$K_F = \frac{\rho_{nGB} \cdot (1 - \eta_{nGB}) \cdot F_n}{\eta_{nGB} \cdot (1 + \rho_{nGB})} \quad (4.22)$$

Per modellizzare le perdite nel pantografo si è aggiunta una resistenza di opportuno valore tra la linea di contatto e il generatore di corrente (ricordiamo che rappresenta il treno in linea). Per la valutazione del valore della resistenza si sono seguiti gli stessi ragionamenti di prima. Definiti il rendimento nominale del pantografo ($\eta_{nPan} = 92\%$) e ipotizzando che la massima corrente che possa fluire nel pantografo sia quella nominale, possiamo ricavare la potenza persa in condizioni nominali P_{pnPan} utilizzando l'equazione 4.11 dove $P_n = P_{nPan} = I_{max} \cdot V_{n(3600V)}$. Dalle perdite nominali riusciamo a ricavare le perdite per ogni condizione di corrente assorbita:

$$P_{pPan} = P_{pnPan} \cdot \left(\frac{I}{I_{max}}\right)^2 = \left(\frac{P_{pnPan}}{I_{max}^2}\right) \cdot I^2 = R_{nPan} \cdot I^2 \quad (4.23)$$

Quindi con $I_{max} = 2kA$, un pantografo in presa, otteniamo $R_{nPan} = 0,1565 \Omega$, mentre con due pantografi in presa, $I_{max} = 4kA$, abbiamo $R_{nPan} = 0,0783 \Omega$.

Una volta completato il modello del treno, è possibile inserire tale blocco nel modello della linea attivando i generatori di corrente in linea a seconda della pozione del treno, secondo lo schema riportato di seguito:

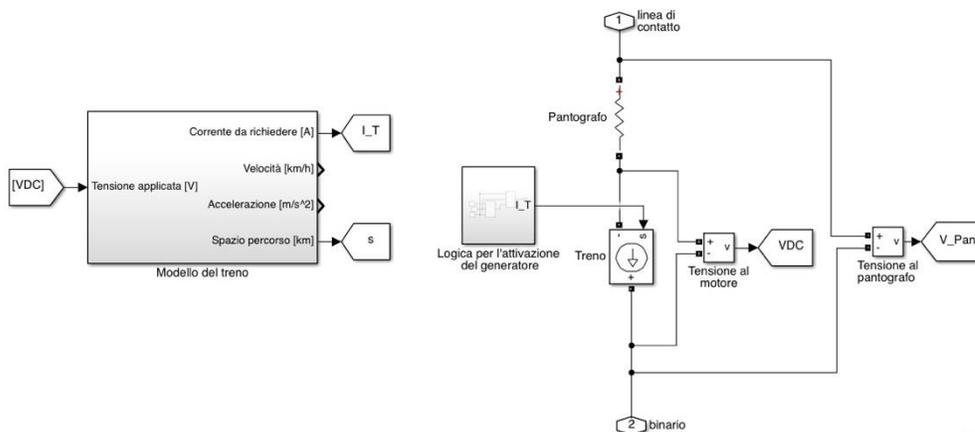


Figura 4.2.6: Esempio di attivazione del generatore.

La tensione V_{DC} misurata ai capi del generatore di corrente rappresenta un input per il modello del treno. La tensione al pantografo viene misurata per verificare il rispetto dei limiti imposti dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI) citate in 3.4. Per attivare il generatore di corrente a seconda di dove si trova il treno è stata creata una logica di attivazione che ha come input lo spazio percorso dal treno e la corrente richiesta, calcolati nel modello del treno. Se ne riporta un esempio considerando SSE distanti 16 km con treno che inizia a percorrere il km 16. Percorsa la tratta tra le due SSE (B e C), mentre il generatore di corrente di quella tratta viene disattivato ($I_T=0$), un altro generatore, posizionato nella tratta successiva, riceve il comando di attivazione.

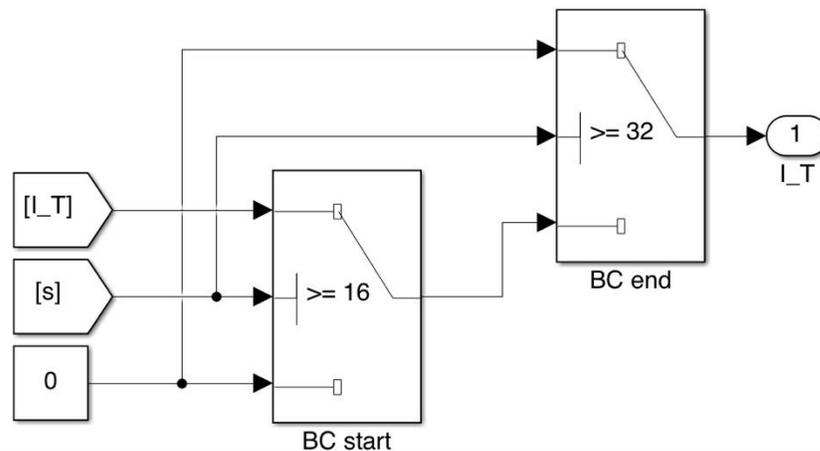


Figura 4.2.7: Esempio di logica per l'attivazione del generatore.

4.3 Rappresentazione della linea di contatto e binario

Conclusa la descrizione dei modelli rappresentanti il treno in linea, ci apprestiamo a descrivere come sono stati modellizzati la linea di contatto ed il binario. La modellizzazione si ispira a questi tre concetti fondamentali:

- l'alimentazione del treno è sempre bilaterale;
- a seconda di dove si trova il treno, linea di contatto e circuito di ritorno determinano delle cadute di tensione a monte e a valle del treno rispetto alla direzione del moto;
- treni sul binario dispari viaggiano da sinistra verso destra mentre treni sul binario pari da destra verso sinistra.

Quindi, considerando che il treno si trovi ad una distanza generica x , espressa in km, dalla SSE di sinistra e che le due SSE siano distanti L , le cadute di tensione a sinistra e a destra del treno possono essere così calcolate:

$$\Delta V_{sx} = r_o \cdot x \cdot I_A \quad (4.24)$$

$$\Delta V_{dx} = r_o \cdot (L - x) \cdot I_B \quad (4.25)$$

con r_o somma delle resistenze chilometriche (Ω/km) della catenaria r_c e del binario r_b , I_A corrente erogata dalla SSE di sinistra e I_B corrente erogata dalla SSE di destra. Dalle due equazioni precedentemente scritte possiamo dedurre che linea di contatto e binario possono essere modellizzati come dei generatori di tensione pilotati che provocano una certa caduta di tensione al pantografo del treno a seconda della sua posizione in linea. Ecco quindi che all'interno di ogni blocco binario di figura 4.1 troviamo i seguenti sottosistemi:

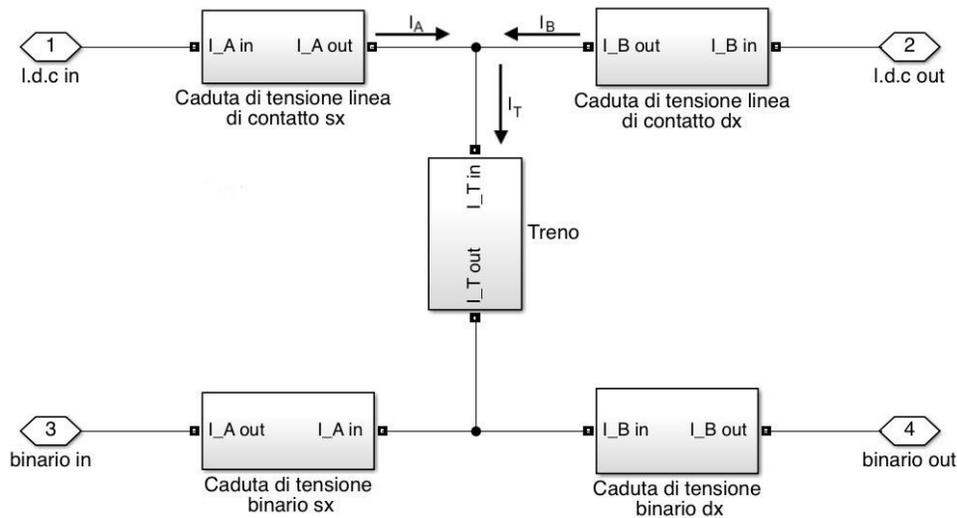


Figura 4.3.1: Esempio di sottosistemi contenuti nel blocco binario dispari tra le SSE A e B.

Le differenze tra i sottosistemi a sinistra e a destra del treno riguardano l'orientamento dei generatori di tensione pilotati corrispondenti alle cadute di tensione e lo spazio percorso dal treno. I generatori di tensione sono convenzionati come utilizzatori (polo positivo in corrispondenza della corrente entrante). Ai tratti di linea alla sinistra del treno viene assegnata una resistenza pari alla resistenza chilometrica moltiplicata per la posizione del treno nella tratta mentre per quelli di destra, si considera $D - x$ (distanza tra le SSE meno la posizione del treno). Nel seguito due esempi:

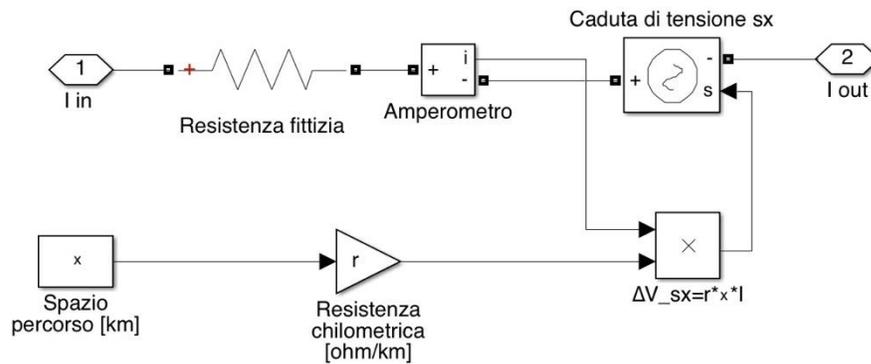


Figura 4.3.2: Sottosistema per modellizzare linea di contatto e binario alla sinistra del treno su binario dispari.

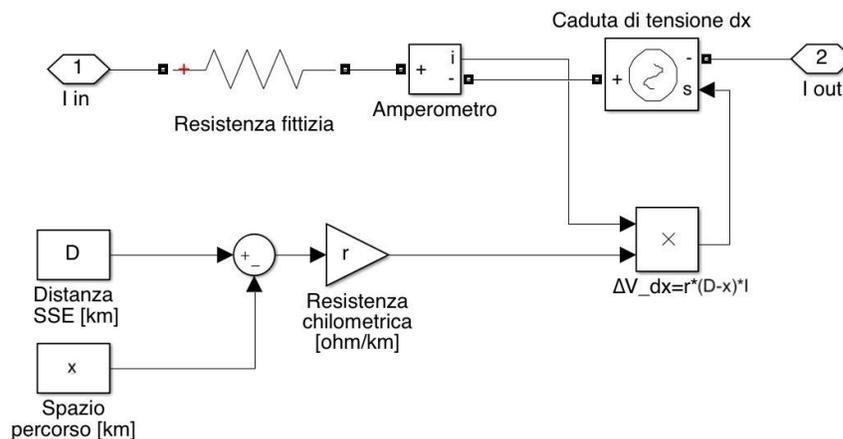


Figura 4.3.3: Sottosistema per modellizzare linea di contatto e binario alla destra del treno su binario dispari.

Il valore della resistenza chilometrica r è ovviamente r_c per il sottosistema corrispondente alla linea di contatto ed r_b per quello del circuito di ritorno. Per quanto riguarda il calcolo dello spazio percorso si è provveduto a creare un opportuno script MATLAB per le simulazioni di treni intervallati viaggianti a velocità costante mentre si è direttamente utilizzato lo spazio calcolato dal modello dinamico del treno per le simulazioni di ripartenza. Si è dovuta introdurre una resistenza fittizia di valore molto piccolo ($1 \text{ m}\Omega$) perché il programma non ammette la soluzione di circuiti con maglie costituite esclusivamente da generatori di tensione.

Per il binario pari i concetti riguardati la moltiplicazione della resistenza chilometrica per lo spazio percorso sono invertiti.

Le resistenze chilometriche della linea di contatto e del binario sono state ricavate utilizzando le formule mostrate in 3.3 e di seguito riportate. Per la linea di contatto si è considerata una catenaria composta da due corde portanti da 120 mm^2 e due funi di

contatto da 150 mm², per una sezione nominale totale S_n di 540 mm². La resistenza chilometrica, a 20 °C, è stata calcolata considerando un 15 % di usura della catenaria:

$$r_{c,20^{\circ}} = \frac{18}{S_n - 0,15 \cdot S_n} = 0,0392 \text{ } [\Omega/km] \quad (4.26)$$

Anche per il calcolo della resistenza chilometrica del binario, massa lineare m_b di 60 kg/m, si è considerata una riduzione della sua massa lineare del 15 %:

$$r_b = \frac{0,9}{m_b - 0,15 \cdot m_b} = 0,0176 \text{ } [\Omega/km] \quad (4.27)$$

Infine, per valutare la temperatura raggiunta dalla linea di contatto nelle varie condizioni di esercizio, ricordiamo che 80 °C sono la massima temperatura ammessa, è stato creato un modello termico che ha come input la potenza dissipata sulla linea di contatto e come output la sua temperatura. Per capire com'è stato sviluppato quest'ultimo modello richiamiamo i principali concetti riguardanti il regime termico di un conduttore cilindrico percorso da corrente (per maggiori approfondimenti si rimanda a [2] e [4]). L'energia termica generata per tutta la lunghezza del conduttore viene in parte ceduta all'ambiente circostante ed in parte immagazzinata all'interno del conduttore. Possiamo quindi scrivere il bilancio energetico come segue:

$$W(t) \cdot l \cdot dt = \gamma \cdot V \cdot c \cdot d\theta + k \cdot S_l \cdot \theta \cdot dt \quad (4.28)$$

Il primo termine rappresenta l'energia generata, il secondo termine l'energia accumulata e l'ultimo termine l'energia ceduta verso l'esterno. Il significato dei simboli utilizzati è di seguito spiegato:

- $W(t)$: potenza unitaria termica generata [W/m];
- l : lunghezza del conduttore [m];
- γ : massa specifica del materiale costituente il conduttore [kg/m³];
- $V = \pi \frac{d^2}{4} l$: volume del conduttore [m³];
- c : calore specifico del materiale costituente il conduttore [J/(kg·K)];
- k : coefficiente di trasmissione termica globale [W/(m²·K)];
- S_l : superficie laterale del conduttore [m²];
- $\theta = \theta_c - \theta_0$: salto termico tra il conduttore a temperatura θ_c e l'ambiente a temperatura θ_0 .

Se si trascurano le perdite dielettriche, la potenza termica generata per unità di lunghezza è data dalle perdite per effetto Joule. Possiamo quindi scrivere che:

$$W(t) = r \cdot i(t)^2 = \frac{\rho_{20^0}}{S} \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta) \cdot i(t)^2 \quad \left[\frac{W}{m} \right] \quad (4.29)$$

dove ρ_{20^0} è la resistività del conduttore a 20 °C, S la sua sezione trasversale e α il coefficiente di temperatura ($3,93 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ per il rame). Definendo la capacità termica C e la resistenza termica T per unità di lunghezza del conduttore:

$$C = \gamma \cdot c \cdot S \quad \left[\frac{J}{m \cdot K} \right] \quad (4.30)$$

$$T = \frac{1}{k \cdot \pi \cdot d} \quad \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (4.31)$$

possiamo riscrivere l'equazione 4.28 nel seguente modo:

$$W(t) \cdot l \cdot dt = C \cdot l \cdot d\theta + \frac{l}{T} \cdot \theta \cdot dt \quad (4.32)$$

dividendo ambo i membri per la lunghezza del conduttore, introducendo la costante di tempo termica $\tau = T \cdot C$ del conduttore e riordinando i vari termini, otteniamo la seguente espressione finale:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{W(t)}{C} - \frac{\theta}{\tau} \quad (4.33)$$

Osservando tale equazione differenziale possiamo affermare che è analoga a quella che si ottiene per la chiusura di un generatore elettrico su un circuito RC come mostrato in figura.

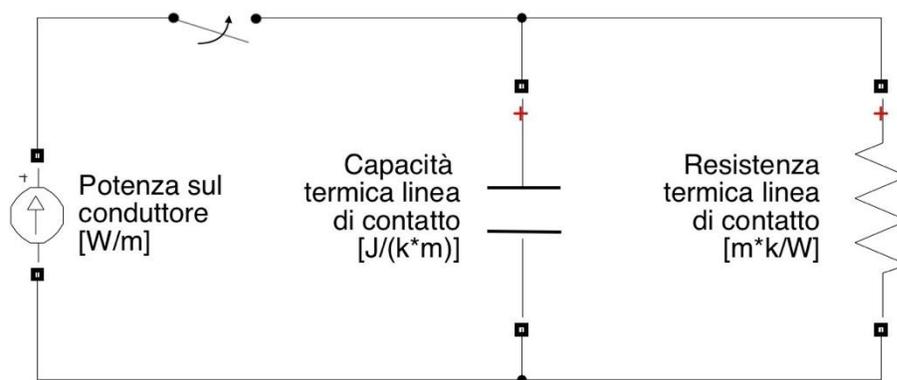


Figura 4.3.4: Analogia termo-elettrica del regime termico.

Possiamo quindi studiare il regime termico della nostra linea di contatto attraverso un'analogia termo-elettrica: $W(t)$ rappresenta la corrente e θ la tensione. Per il calcolo della capacità termica e della resistenza termica della catenaria si è considerato il sistema di conduttori come un unico conduttore di sezione nominale di 540 mm^2 . Noti quindi il calore specifico del rame, $c = 0,3831 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right]$ e la sua massa specifica, $\gamma = 8954 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$, dall'equazione 4.30 possiamo calcolare la capacità termica per unità di lunghezza del nostro sistema di conduttori: $C = 8954 \cdot \frac{540}{10^6} \cdot 0,3831 = 1852,3 \left[\frac{\text{J}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right]$. Assumendo che la catenaria abbia una costante di tempo termica di 10 minuti⁸, la resistenza termica si ricava come: $T = \frac{\tau}{C} = \frac{10 \cdot 60}{1852,3} = 0,3239 \left[\frac{\text{m}\cdot\text{K}}{\text{W}} \right]$. Riportiamo di seguito il modello termico:

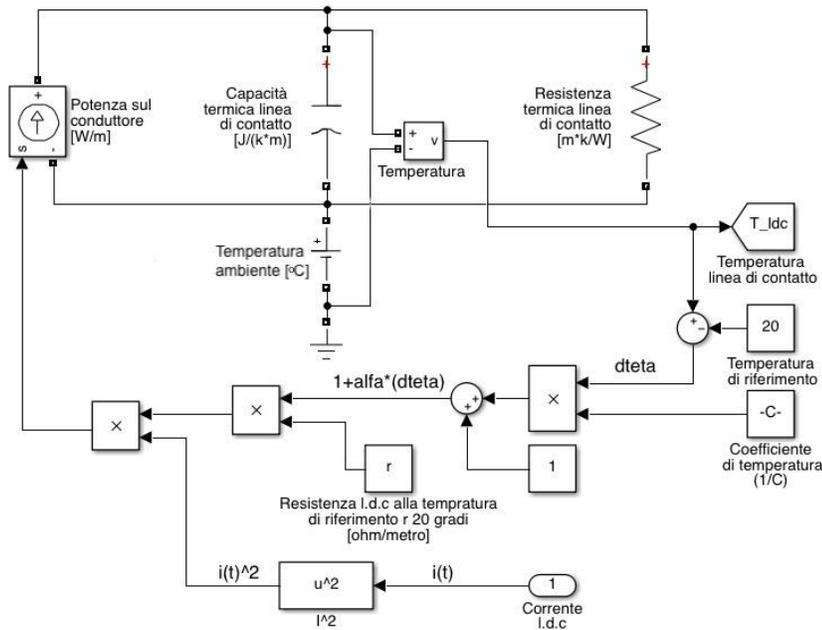


Figura 4.3.5: Modello termico per lo studio della temperatura della linea di contatto.

4.4 Verifica del modello complessivo

Prima di svolgere delle simulazioni utilizzando i vari modelli creati si è effettuata una simulazione di verifica basta su un'ipotesi di traffico esistente. Per la verifica del modello ci si è basati sui principi esposti nel sotto capitolo "Potenzialità e criteri di verifica". Prendendo come riferimento la Direttissima Firenze - Roma si sono simulati

⁸ In genere, per i conduttori in rame della linea di contatto (da 100 - 150 mm²), in condizioni di minima ventilazione, si assume una costante di tempo termica di 10 minuti (vedi [3] per maggiori informazioni).

Sistema di alimentazione MVDC per la trazione ferroviaria basato sull'interconnessione delle sottostazioni esistenti

treni viaggianti sui due binari in direzioni opposte ad una velocità di 250 km/h (un pantografo in presa) con un intervallo temporale tra due treni successivi di 20 minuti. Si si è considerata una tratta, priva di gallerie e pendenze, con tre SSE (A, B e C), distati 16 km. Il traffico dei treni è stato simulato per un intervallo temporale di 74 minuti.

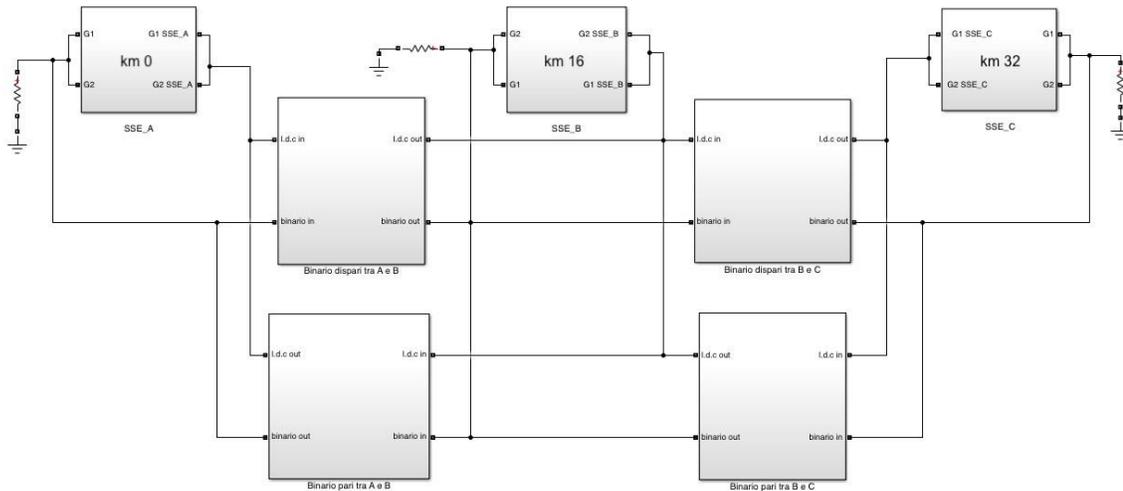


Figura 4.4.1: Tratta simulata.

Per la valutazione della corrente erogata da ciascun gruppo di una sottostazione si è scelto di prendere come riferimento la SSE posta al centro della tratta (SSE_B). Tale scelta è stata dettata dal fatto che quando i treni si trovano al chilometro 16 la sottostazione centrale eroga quasi tutta la corrente richiesta, e si ha quindi il carico massimo di corrente. Riportiamo di seguito la corrente erogata da ogni gruppo della sottostazione centrale.

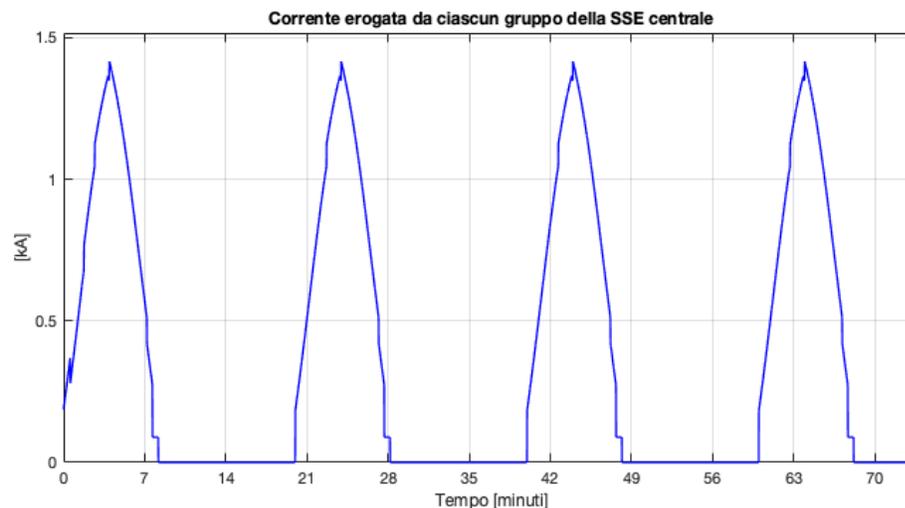


Figura 4.4.2: Corrente di gruppo in SSE_B.

Dalla figura precedente possiamo affermare che il carico massimo dei gruppi raddrizzatori, (tabella 3.4.2), non viene superato. Visto che abbiamo considerato le SSE costituite da due gruppi in funzionamento continuo, la corrente erogata alla linea di contatto è data dalla somma delle correnti erogate da ciascun gruppo. Quindi, quando entrambi i treni percorrono la tratta si trovano al chilometro 16, un treno per percorrere 16 chilometri alla velocità di 250 km/h impiega 3,84 minuti, la corrente erogata alla linea di contatto risulta essere di circa 3000 A. Questi 3000 A si suddividono sulle due linee di contatto del binario dispari e pari. Quindi, ricordando che per ogni linea di contatto in partenza dalla sottostazione è posizionato un extrarapido, vedi tabella 3.2.2 per corrente massima ammissibile, tale valore di corrente non è tale da far scattare l'extrarapido intempestivamente. I due criteri riguardanti il carico massimo dei gruppi raddrizzatori e la taratura degli interruttori extrarapidi sono quindi verificati.

Restano quindi da osservare la tensione al pantografo, la corrente assorbita dal treno (deve essere minore di 2 kA visto che abbiamo considerato un pantografo in presa) e la temperatura raggiunta dalla linea di contatto. Per quanto riguarda la tensione e corrente al pantografo esse possono variare a seconda che il treno si trovi tra le SSE A e B o tra le SSE B e C a causa dell'intervento del variatore sotto carico. Per capire questa affermazione si pensi alla seguente situazione: due treni viaggianti uno da sinistra verso destra sul binario dispari e l'altro da destra verso sinistra sul binario pari iniziano ad avvicinare la sottostazione centrale. Tale sottostazione eroga corrente ad entrambi i treni, supportata anche dalle due sottostazioni laterali. Man mano che i treni si avvicinano la corrente da essa erogata aumenta e quindi la tensione alla linea di contatto diminuisce per effetto della caduta dovuta alla commutazione della corrente nei ponti raddrizzatori. Il variatore, al fine di mantenere la tensione di riferimento alla linea di contatto, si sposta sulla presa superiore (ricordiamo che abbiamo modellizzato l'OLTC come se fosse posizionato al secondario). Una volta superata la sottostazione centrale, i due treni si trovano tra due sottostazioni dove la sottostazione centrale ha una tensione alla linea di contatto maggiore di quella che si aveva in precedenza. Tali considerazioni giustificano gli andamenti di tensione e corrente al pantografo di un treno che percorre la tratta considerata sul binario dispari riportati in figura 4.4.3:

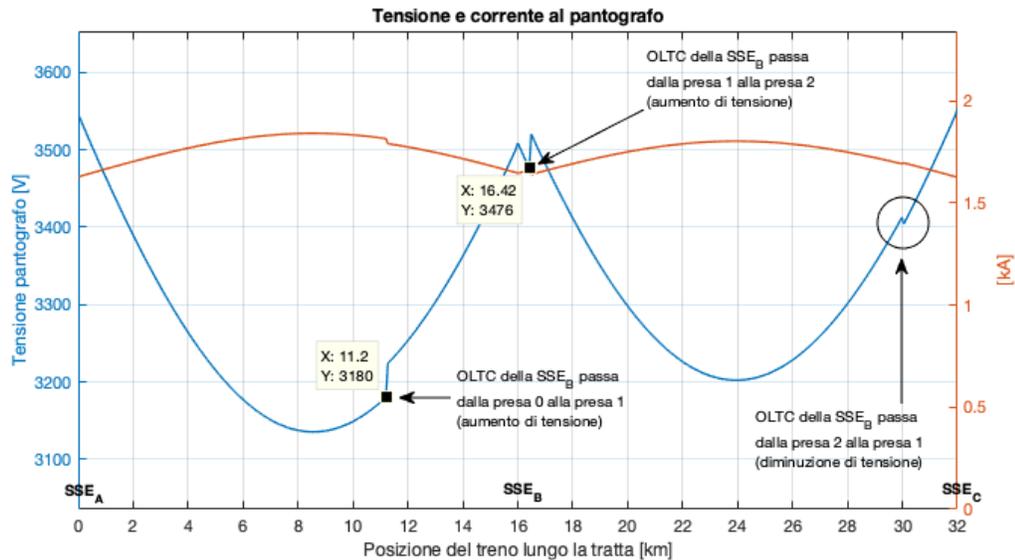


Figura 4.4.3: Forme d'onda al pantografo di un generico treno binario dispari.

Il treno sul binario pari presenta delle forme d'onda speculari. A titolo di esempio ulteriore di informazione nella figura seguente è riportato il posizionamento delle prese del variatore nella sottostazione centrale⁹.

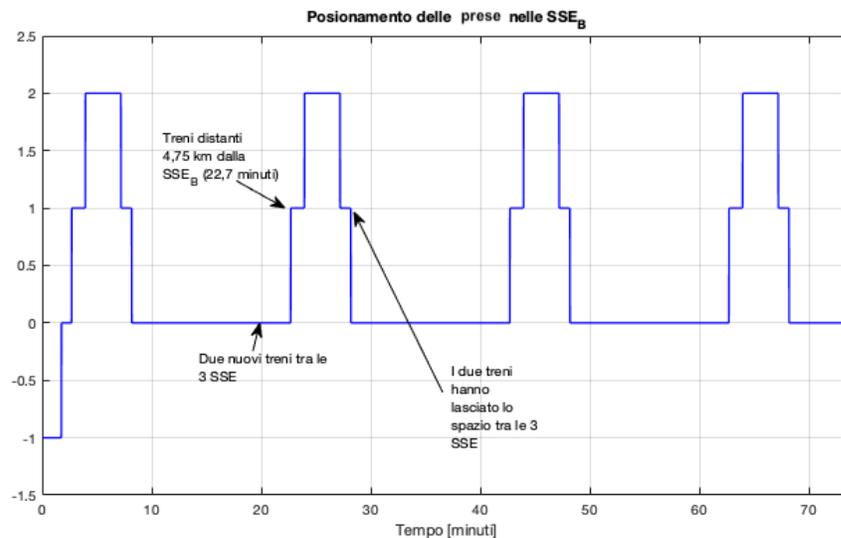


Figura 4.4.4: Posizionamento prese SSE_B. $V_{d0}=3600\text{ V} (-1)$, $V_{d0}=3660\text{ V} (0)$, $V_{d0}=3721\text{ V} (1)$, $V_{d0}=3782\text{ V} (2)$.

Dalla figura 4.4.3 possiamo osservare che la tensione al pantografo si mantiene tra i limiti richiesti dalle STI e che la corrente è decisamente inferiore ai 2 kA. Rimane infine

⁹ I variatori sotto carico delle SSE A e B passano inizialmente dalla presa -1 alla presa 0 per poi rimanere sempre posizionati sulla presa 0.

da studiare la temperatura a cui si portano i conduttori della linea di contatto. Facendo riferimento alle condizioni più sfavorevoli di temperatura ambiente (40 °C tenuto conto del riscaldamento dovuto al sole) la temperatura della linea di contatto è sempre di molto inferiore degli 80 °C ammissibili come mostrato in figura.

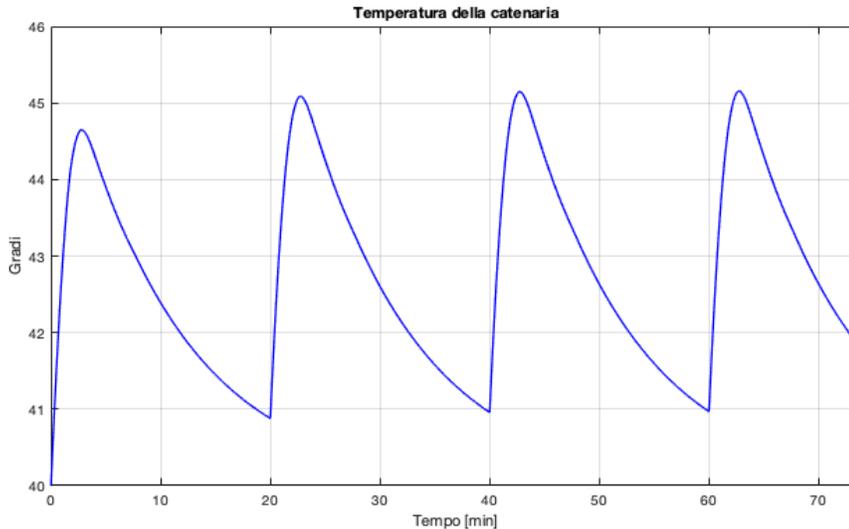


Figura 4.4.5: Temperatura linea di contatto con $T_{ambiente}=40\text{ °C}$.

Quindi, simulando un'ipotesi di traffico esistente, il modello creato presenta dei risultati in linea con quanto richiesto dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità.

Infine, per avere un'idea dell'efficienza del sistema in questa ipotesi di traffico, possiamo valutare il rendimento di trasmissione medio definito come il rapporto tra la potenza media assorbita dal treno $P_{T(m)}$ e la potenza media erogata dalle SSE $P_{SSE(m)}$. La potenza media assorbita dal treno può essere anche scritta come: $P_{SSE(m)} - P_{p(m)}$ dove la potenza media persa non è altro che il prodotto tra la caduta di tensione media al pantografo e la corrente media assorbita dal treno. Considerando che la tensione raddrizzata a vuoto abbia un valor medio di 3600 V possiamo scrivere:

$$\eta_{medio} = \frac{P_{T(m)}}{P_{SSE(m)}} = 1 - \frac{P_{p(m)}}{P_{SSE(m)}} = 1 - \frac{(3600 - V_{pan(m)})}{3600} \quad (4.34)$$

Calcolando quindi il valore medio della tensione al pantografo di figura 4.4.3 ($V_{pan(m)} = 3301,8\text{ V}$) otteniamo $\eta_{medio} = 91,72\%$.

5. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 kV

Dopo aver analizzato e studiato l'attuale sistema di trazione in corrente continua si è voluto sviluppare un nuovo sistema di trazione sempre in corrente continua, basandosi sul sistema Alta Velocità/Alta Capacità 2x25 kV 50 Hz come proposto in [15] e [18]. Con il termine "nuovo" non intendiamo un sistema completamente diverso da quello attuale, ma un sistema che, sfruttando l'infrastruttura esistente, riesca ad esprimere delle potenzialità decisamente maggiori rispetto a quello esistente.

Se si riuscisse ad aumentare la tensione a cui è sottoposto il pantografo si avrebbe, a parità di potenza, una riduzione della corrente assorbita. Una minor corrente sulla linea di contatto implicherebbe minori perdite quindi minor potenza erogata dalle SSE e di conseguenza una riduzione dell'energia richiesta. Per cercare di capire come aumentare la tensione applicata al treno, ovviamente senza cambiare la tensione nominale del sistema, possiamo introdurre la seguente similitudine. Pensiamo alla tensione al pantografo come un filo appeso con due chiodini posti alle sue estremità. Esso si disporrà nello spazio come una catenaria, abbassandosi quindi rispetto al livello in cui sono posizionati i punti di attacco. Se potessimo agganciare il filo in un punto qualsiasi allo stesso livello dei chiodini, la sua altezza media, rispetto al livello del suolo, risulterà maggiore di quella precedente. Ecco quindi che i punti d'attacco posti all'estremità del filo rappresentano le SSE, il suolo rappresenta i binari e il terzo punto d'attacco sarà la novità da introdurre nel sistema.

La soluzione proposta è quella di trasmettere l'energia a una tensione doppia rispetto a quella nominale del sistema per poi utilizzarla alla tensione nominale. Per far questo basterà dotare l'attuale sistema di un convertitore dc-dc (terzo punto d'attacco), ha il ruolo degli autotrasformatori utilizzati nel sistema 2x25 kV c.a., e modificare la tipologia di connessione dei ponti raddrizzatori. Da quando spiegato nel capitolo 3 ciascun gruppo di conversione è dotato di due ponti raddrizzatori che possono essere connessi in serie o in parallelo. Utilizzando la configurazione serie, con tensione nominale secondaria del trasformatore a tre avvolgimenti di 2710 V, collegando il binario al centro dei due ponti di Graetz e connettendo un secondo conduttore, detto feeder negativo, alla sbarra catodica della SSE, possiamo ottenere due sistemi distinti entrambi eserciti a 3 kV. Mentre il primo circuito elettrico comprende il binario, un ponte raddrizzatore e la linea di contatto a tensione +3 kV, il secondo riguarda il feeder a tensione -3 kV, l'altro ponte raddrizzatore e il binario. Il convertitore dc-dc ha quindi il compito di mantenere la tensione, nel punto della linea di contatto in cui è posizionato, ad un valore di riferimento attraverso il trasferimento di energia tra la linea di contatto

e feeder negativo. Il comportamento del convertitore può essere assimilato a quello di un trasformatore abbassatore con rapporto spire pari a 2 ($V_{in}=6$ kV, $V_{out}=3$ kV) e per questo motivo viene anche chiamato trasformatore elettronico di potenza. Ciascun binario sarà quindi dotato del proprio convertitore statico e feeder negativo. Manca ora da scegliere in che punto della tratta tra due SSE collocare il dc-dc. Nel paragrafo 3.3 abbiamo osservato che in una tratta bi alimentata con SSE aventi le stesse tensioni raddrizzate a vuoto, il punto di massimo della caduta di tensione al pantografo si presenta al centro della tratta. Ecco quindi trovata la collocazione del convertitore. Rappresentiamo di seguito i collegamenti relativi ad una tratta a singolo binario.

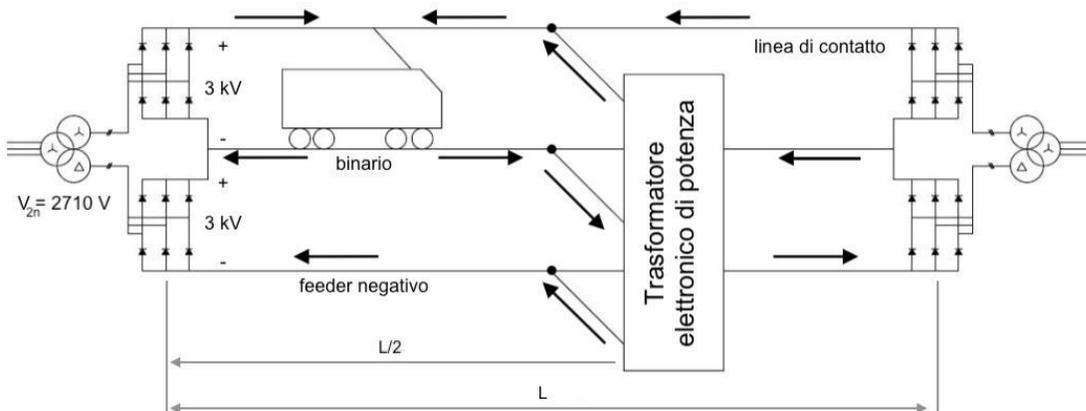


Figura 5.1: Rappresentazione dei collegamenti dei vari dispositivi e versi delle correnti di una tratta a singolo binario.

Per quanto riguarda la modellizzazione dell'attuale sistema si è provveduto a creare un modello per il convertitore statico dc-dc mentre linea di contatto, circuito di ritorno e sottostazioni elettriche sono stati adattati alla nuova configurazione. I due modelli del treno sono ovviamente rimasti gli stessi. Prima di iniziare a descrivere e commentare i modelli creati è fondamentale osservare che i limiti di carico dei gruppi di conversione saranno dimezzati rispetto a quelli del sistema 3 kV. Infatti, come precedentemente detto, ciascun gruppo di conversione è costituito da due ponti raddrizzatori connessi in serie e non più in parallelo. La connessione in serie oltre ad aumentare il ripple della tensione raddrizzata, convertitore esafase e non più dodecafase, dimezza il valore del carico ammissibile. Quindi per verificare se il carico massimo dei gruppi raddrizzatori non viene superato faremo riferimento ai dati di tabella 3.4.1. Il valore della potenza nominale installata per ciascun gruppo di conversione sia tra feeder negativo e binario sia tra binario e linea di contatto è ora: $P_{Gn} = V_n \cdot I_{Gn} = 3600 \cdot 750 = 2,7$ MW. Per avere la stessa potenza installata per ciascun gruppo come nel sistema 3 kV (5,4 MW) si potrebbe connettere in parallelo un altro ponte a ciascun ponte raddrizzatore.

5.1 Connessione e modellizzazione dei gruppi raddrizzatori

Le ipotesi riguardanti il numero di gruppi costituenti una SSE rimangono le stesse fatte per il modello 3 kV (ciascun raddrizzatore a diodi è ancora modellizzato con un generatore di tensione pilotato e la relativa resistenza in serie corrispondente alla caduta dovuta alla commutazione). Ciascuna SSE è stata quindi divisa in due sottosistemi come di seguito raffigurato:

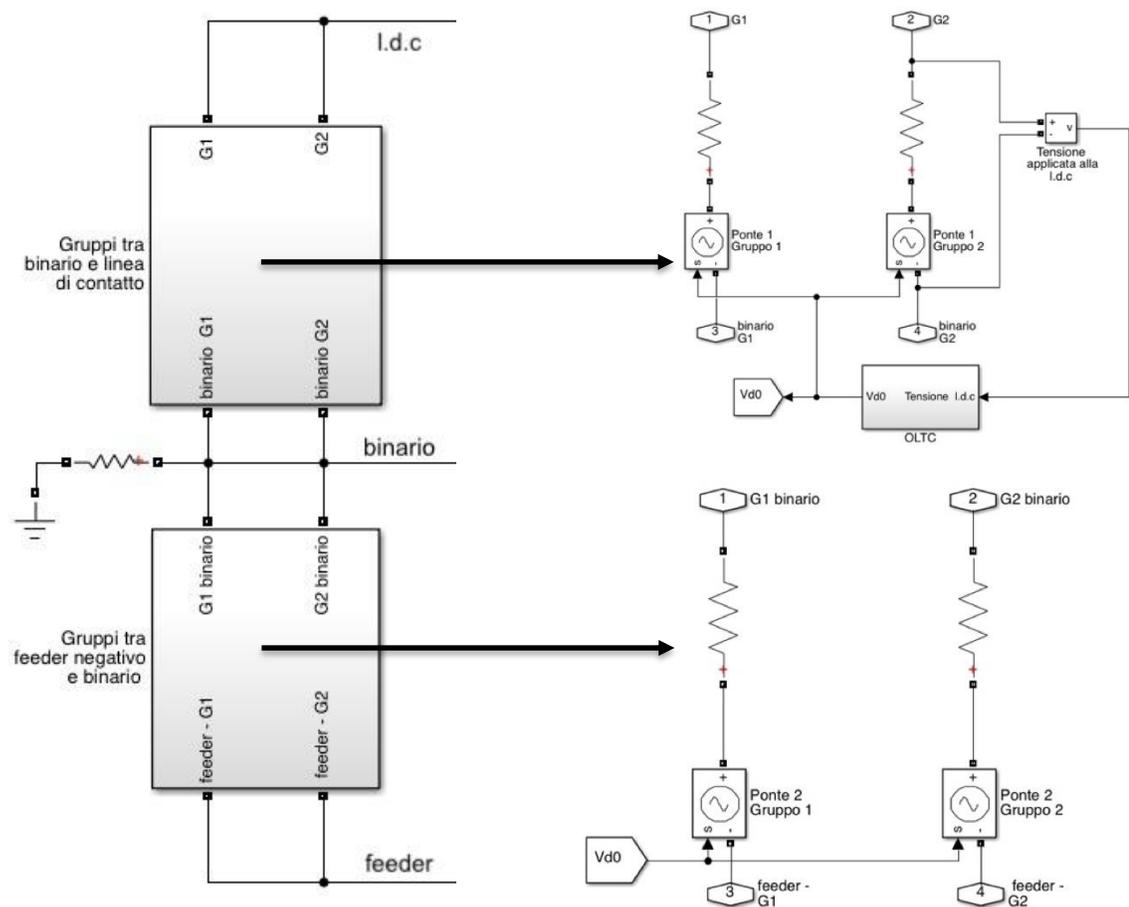


Figura 5.1.1: Modello di una SSE nel sistema 2x3kV con relativo schema interno.

Anche in questo caso per calcolare il valore della resistenza, $6 \cdot f \cdot L_s$, in serie ai generatori pilotati, si è seguito lo stesso ragionamento già spiegato in 4.1. Partendo dalla nota formula della caduta di tensione sul secondario del trasformatore con primario in corto circuito possiamo scrivere L_s come:

$$L_s = \frac{v_{cc\%} \cdot \frac{V_{2n}}{\sqrt{3}}}{\omega \cdot I_{s1n}} \quad (5.1)$$

Vista la connessione in serie dei due ponti, il valore efficace della corrente nominale di prima armonica al secondario del trasformatore I_{s1n} è legato alla corrente raddrizzata dalla seguente espressione:

$$I_{s1n} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_{dn} \quad (5.2)$$

Il valore della resistenza in serie a ciascun generatore pilotato risulta quindi:

$${}^{10}R_{int} = 6 \cdot f \cdot L_s = \frac{v_{cc\%} \cdot V_{2n}}{\sqrt{2} \cdot I_{dn}} \quad (5.3)$$

Con $V_{2n}=2710$ V, $I_{dn}=750$ A e $v_{cc\%}=0,12$ ciascuna resistenza di figura 5.1.1 vale quindi $0,3066 \Omega^{11}$.

Per il variatore a carico è stato mantenuto lo stesso modello spiegato in 4.1. Viene controllato il valore della tensione applicata tra binario e linea di contatto è stata dettata dal fatto che è la tensione a cui è soggetto il treno. Dato che in realtà il variatore è collocato al primario del trasformatore a tre avvolgimenti, il cambiamento di presa coinvolge entrambi i convertitori (quello collegato tra linea di contatto e binario e quello collegato tra binario e feeder negativo). Per questo motivo la tensione V_{d0} in uscita dal modello dell'OLTC corrisponde anche alla tensione a vuoto del gruppo raddrizzatore connesso tra feeder negativo e binario.

Spiegato quindi come sono state modellizzate le SSE per il sistema 2x3kV, si analizza il procedimento per modellizzare il movimento del treno.

Considerando sempre la linea di contatto ed il binario come dei generatori di tensione che creano una caduta di tensione al pantografo del treno a seconda della sua posizione nella tratta e della corrente erogata dalla SSE, si è suddivisa ciascuna tratta compresa tra due SSE in due parti uguali. Osservando ad esempio il binario dispari, la prima parte di tratta è compresa tra la SSE di sinistra e il convertitore dc-dc mentre la seconda tra quest'ultimo e la SSE di destra. Supponendo che il convertitore sia collocato al centro della tratta, ciascuna sezione rappresenta una lunghezza pari a $L/2$,

¹⁰ A differenza del sistema 3 kV abbiamo modellizzato ciascun raddrizzatore a diodi con un generatore pilotato di tensione. Per questo motivo R_{int} non viene divisa per due.

¹¹ Nel caso si scelga di avere due ponti in parallelo per sottosistema tale valore dovrà essere diviso per due.

con L distanza tra le due SSE. La configurazione appena descritta è riportata nella figura seguente. Considerazioni del tutto analoghe si possono fare per il binario pari.

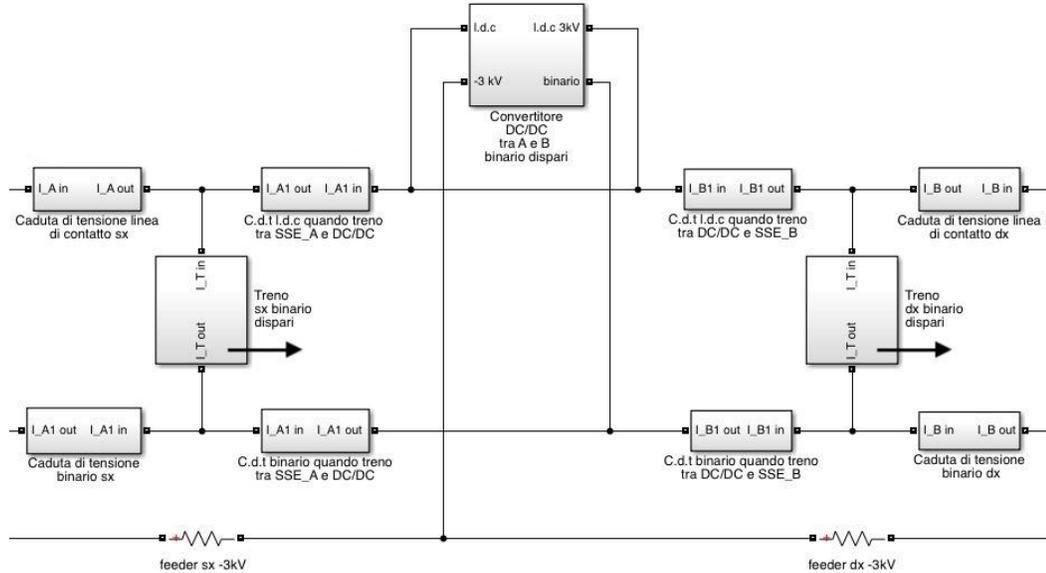


Figura 5.1.2: Schema a blocchi binario dispari. Treno viaggiante da sinistra verso destra.

I generatori di corrente, rappresentanti il treno, sono attivati a seconda della posizione del locomotore e visto che abbiamo suddiviso una tratta tra due SSE in due parti sono stati inseriti due “blocchi treno”, che in effetti rappresentano lo stesso treno. L’idea della logica di comando dei generatori è la stessa di quella utilizzata per il 3 kV con la differenza che il primo generatore viene disattivato e attivato il secondo in corrispondenza della metà della tratta.

Ricordiamo che i generatori di tensione pilotati presenti nei vari sotto blocchi rappresentati $I.d.c$ e binario sono posizionati con la polarità positiva nel verso entrante della corrente (I_{Ain} e I_{Bin}). Nella realtà quando il treno si trova tra la sottostazione di sinistra e il convertitore, linea di contatto e binario alla sinistra del treno presentano una resistenza data dal prodotto tra la rispettiva resistenza chilometrica e la posizione del treno, mentre per la restante tratta, compresa tra treno e convertitore, linea di contatto e binario avranno una resistenza data dal prodotto tra la rispettiva resistenza chilometrica e la differenza tra metà della totale distanza della tratta ($L/2$) e la posizione del treno. Invece nella tratta compresa tra convertitore e sottostazione di destra, ovvero dove non è ancora presente il treno, linea di contatto e binario dovranno presentare una resistenza data dal prodotto tra la rispettiva resistenza chilometrica e $L/2$. Le definizioni si invertono quando il treno si trova tra il convertitore e la sottostazione di destra. Vogliamo quindi modellizzare tale situazione reale

utilizzando i generatori di tensione. Per non dilungarci troppo nella spiegazione osserviamo solamente la linea di contatto; il binario è ovviamente stato modellizzato con gli stessi ragionamenti. Numeriamo quindi da 1 a 4, partendo da sinistra verso destra, i sotto blocchi sulla linea di contatto di figura 5.1.2. Riportiamo di seguito la loro modellizzazione interna:

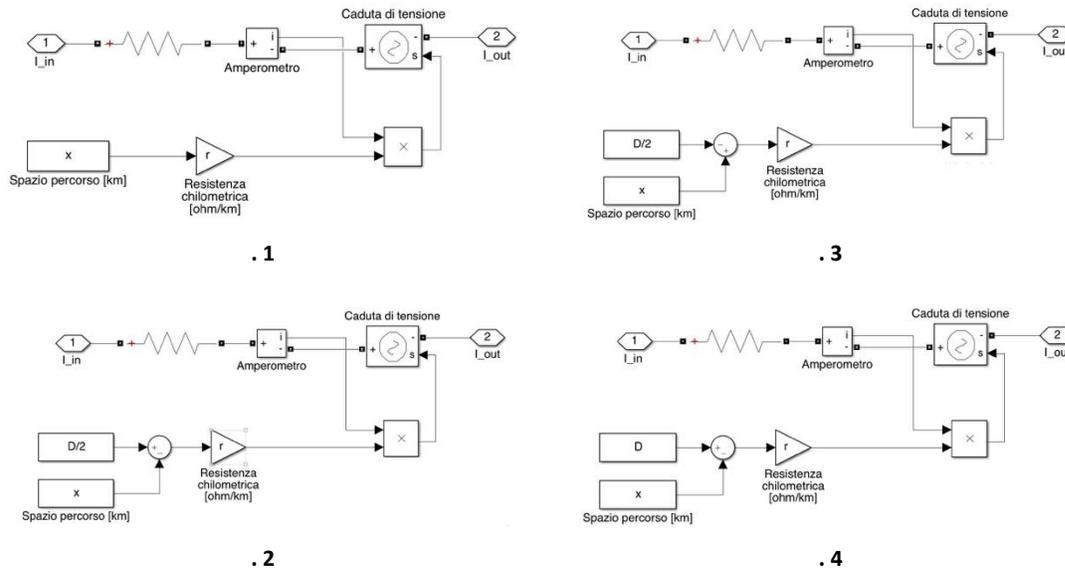


Figura 5.1.3: Interno dei vari sotto blocchi con x posizione del treno nella tratta.

Modellizzati quindi, come rappresentato in figura, i vari sotto blocchi, vediamo se le resistenze/cadute di tensione ottenute rispecchiano quando detto in precedenza. Quando il treno si trova tra la sottostazione di sinistra ed il convertitore ($0 < x < L/2$) i blocchi presentano le rispettive cadute (indichiamo con I la corrente in ingresso nel sotto blocco):

- blocco 1: $\Delta V_1 = r \cdot x \cdot I$ con I misurata positiva visto che viene erogata dalla SSE di sinistra;
- blocco 2: $\Delta V_2 = r \cdot \left(\frac{D}{2} - x\right) \cdot I$, con I misurata positiva, erogata dal convertitore DC/DC;
- blocco 3: $\Delta V_3 = r \cdot \left(x - \frac{D}{2}\right) \cdot I$. In questo caso la corrente misura è negativa perché erogata dalla SSE di destra ed inoltre $\left(x - \frac{D}{2}\right)$ risulta negativo;
- blocco 4: $\Delta V_4 = r \cdot (D - x) \cdot I$, con I misurata positiva, erogata dalla SSE di destra.

Sistema di alimentazione MVDC per la trazione ferroviaria basato sull'interconnessione delle sottostazioni esistenti

I blocchi 1 e 2 rappresentano quindi la situazione reale, notiamo che le cadute di tensione ΔV_1 e ΔV_2 sono moltiplicate rispettivamente per la posizione del treno e per la differenza tra metà della totale distanza della tratta ($L/2$) e la posizione del treno. Mettendo insieme i contributi dei blocchi 4 e 3 otteniamo $\Delta V_{4-3} = \Delta V_4 - \Delta V_3 = r \cdot (D - x) \cdot I - \left(r \cdot - \left(\left| \frac{D}{2} - x \right| \right) \cdot (-I) \right) = r \cdot \frac{D}{2} \cdot I$ con il meno che divide i due termini dato dalla diversa polarità dei due generatori costituenti i due blocchi. Ecco quindi che anche la restante parte della tratta, compresa tra dc-dc e sottostazione di destra, presenta una caduta di tensione in linea con quando dovrebbe realmente accadere. Tale soluzione è stata ovviamente verificata con delle simulazioni statiche. Attraverso gli stessi ragionamenti possiamo dimostrare che le cadute calcolate rispettano la realtà anche quando il treno è compreso tra il convertitore dc-dc e la sottostazione di destra. Per il binario le considerazioni si applicano in modo speculare visto che i treni viaggiano da destra verso sinistra.

Per la scelta del feeder negativo ci si è riferiti al sistema di corde utilizzato nell'Alta Velocità/Alta Capacità (conduttori in alluminio – acciaio). La sezione complessiva del sistema di corde risulta essere di 630 mm² presentando una resistenza chilometrica di 0,04598 Ω/km.

Una tratta a doppio binario, alimentata con il sistema 2x3 kV, è stata quindi studiata come rappresentato nella figura seguente.

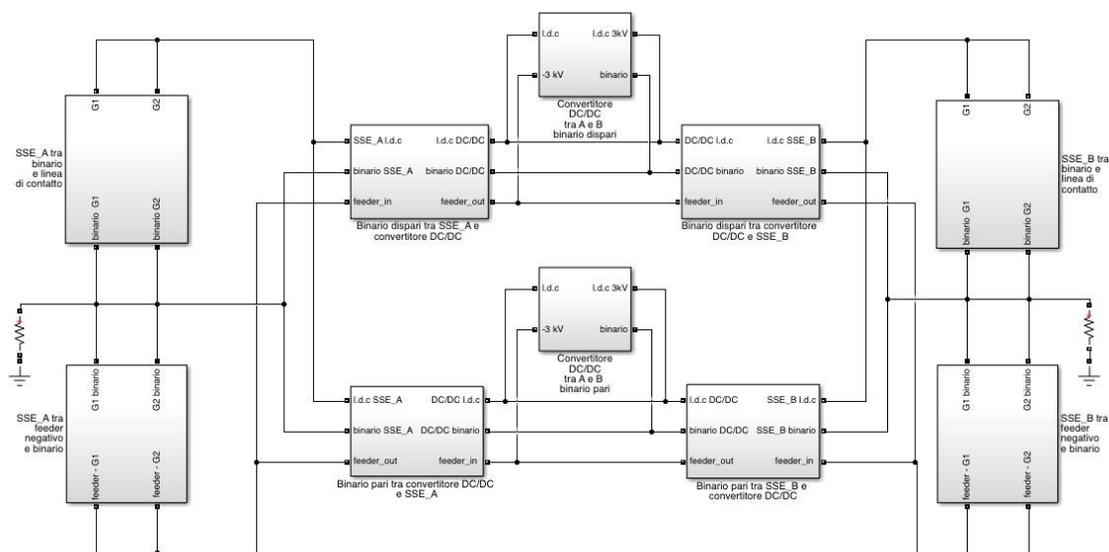


Figura 5.1.4: blocchi costituenti una tratta a doppio binario tra due SSE con sistema 2x3 kV.

5.2 L'importanza del convertitore elettronico di potenza

Prima di andare a spiegare come si è rappresentato il modello del convertitore si è voluta studiarne la sua importanza all'interno del nuovo sistema. Si è quindi andato a studiare lo schema circuitale di una tratta a singolo binario utilizzando il sistema 2x3 kV SENZA la presenza del convertitore elettronico di potenza. Definita x la distanza dal treno dalla sottostazione di sinistra e L lo spazio tra due sottostazioni si è studiata una situazione statica, di una tratta a singolo binario, come rappresentato nella seguente figura:

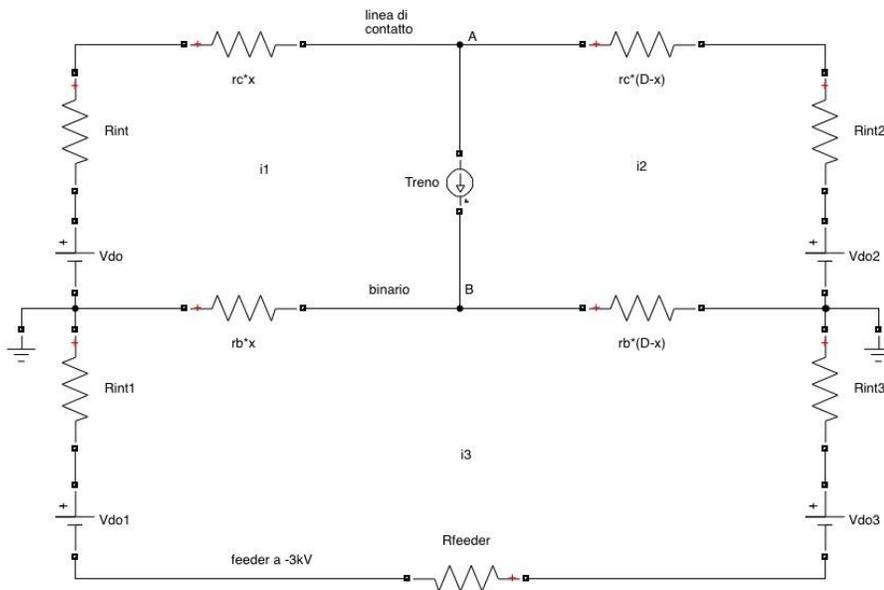


Figura 5.2.1: Rappresentazione statica del sistema 2x3 kV senza convertitore.

La tensione raddrizzata a vuoto in uscita da ciascun ponte a diodi è stata rappresentata con un generatore di tensione in continua senza considerare il numero di gruppi appartenente a una sottostazione. Vogliamo quindi cerca di capire se con questa configurazione il feeder negativo può contribuire all'alimentazione del treno. Definiamo i_1, i_2, i_3 le correnti di maglia con direzione oraria, R_f la resistenza del feeder negativo, V_T la tensione applicata al treno con convezione dei bipoli utilizzatori e $V_{d0,1,2,3}$ le tensioni raddrizzate a vuoto dei gruppi raddrizzatori. Trascuriamo le resistenze interne dei gruppi raddrizzatori. Applicando quindi il teorema delle maglie e ricordando che la corrente richiesta dal treno è data dal rapporto tra la potenza elettrica necessaria P_{el} e la tensione applicatagli V_T , possiamo scrivere il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} (r_c + r_b) \cdot x \cdot i_1 - r_b \cdot x \cdot i_3 = V_{d0} - V_T \\ (r_c + r_b) \cdot (L - x) \cdot i_2 - r_b \cdot (L - x) \cdot i_3 = V_T - V_{d02} \\ \left(R_f + r_b \cdot x + r_b \cdot (L - x) \right) \cdot i_3 - r_b \cdot x \cdot i_1 - r_b \cdot (L - x) \cdot i_2 = V_{d01} - V_{d03} \\ i_1 - i_2 = \frac{P_{el}}{V_T} \end{cases} \quad (5.4)$$

Visto che ciascun gruppo di ogni sottostazione elettrica è dotato del proprio variatore a carico possiamo assumere che le tensioni raddrizzate a vuoto siano tutte uguali tra di loro. Ricavando quindi dalla prima e seconda equazione del sistema rispettivamente il valore di i_1 e i_2 e sostituendoli nella terza equazione otteniamo la seguente equazione:

$$\left(R_f + r_b \cdot L - \frac{r_b^2 \cdot x}{r_0} - \frac{r_b^2 \cdot (L - x)}{r_0} \right) \cdot i_3 - \frac{r_b}{r_0} \cdot (V_{d0} - V_T) - \frac{r_b}{r_0} \cdot (V_T - V_{d0}) = 0 \quad (5.5)$$

con $r_0 = r_c + r_b$.

Dall'equazione 5.5 possiamo concludere che la corrente i_3 è sempre nulla in qualsiasi condizioni di carico. Potrebbe scorrere della corrente nel feeder negativo solo nel caso in cui le tensioni raddrizzate a vuoto fossero diverse tra di loro. Tuttavia, in questo caso la corrente nel feeder rappresenterebbe solamente una corrente di ricircolo e quindi anche questa volta non aiuterebbe l'alimentazione del treno.

Abbiamo quindi dimostrato che il convertitore elettronico di potenza, posizionato al centro della tratta, è essenziale per l'efficacia del sistema 2x3 kV.

5.3 Modello del convertitore elettronico di potenza

Per quanto riguarda il modello del convertitore non ci si è concentrati tanto sull'architettura hardware del dispositivo, quanto sul principio di funzionamento.

Come precedentemente spiegato nella parte introduttiva di questo capitolo, il convertitore elettronico di potenza deve mantenere la tensione applicata alla linea di contatto, pari ad un valore di riferimento, prelevando energia dal feeder negativo. Il ragionamento che ha portato alla costruzione del modello si è basato nel considerare il convertitore come un convertitore dc-dc a commutazione. Visto che la tensione in ingresso è maggiore rispetto a quella in uscita ci si è riferiti allo schema del convertitore abbassatore (buck).

Definiamo quindi ingresso del convertitore la parte collegata tra feeder negativo e linea di contatto, mentre uscita, la parte collegata tra binario e linea di contatto. L'uscita dal convertitore è una tensione, modellizzabile con un generatore pilotato di tensione,

Prima di descrivere come si sono modellizzate le perdite nel convertitore, soffermiamoci un attimo sui flussi di corrente in ingresso e in uscita. Il mantenimento della tensione al centro della tratta al livello di riferimento comporta una determinata erogazione di corrente da parte del convertitore. Visto che ingresso e uscita sono entrambi connessi alla linea di contatto, parte di tale corrente in uscita rientrerà nel convertitore per poi richiudersi attraverso il feeder negativo. Rappresentiamo l'andamento delle correnti nel caso in cui un treno sia posizionato tra la sottostazione di sinistra e il convertitore al centro della tratta.

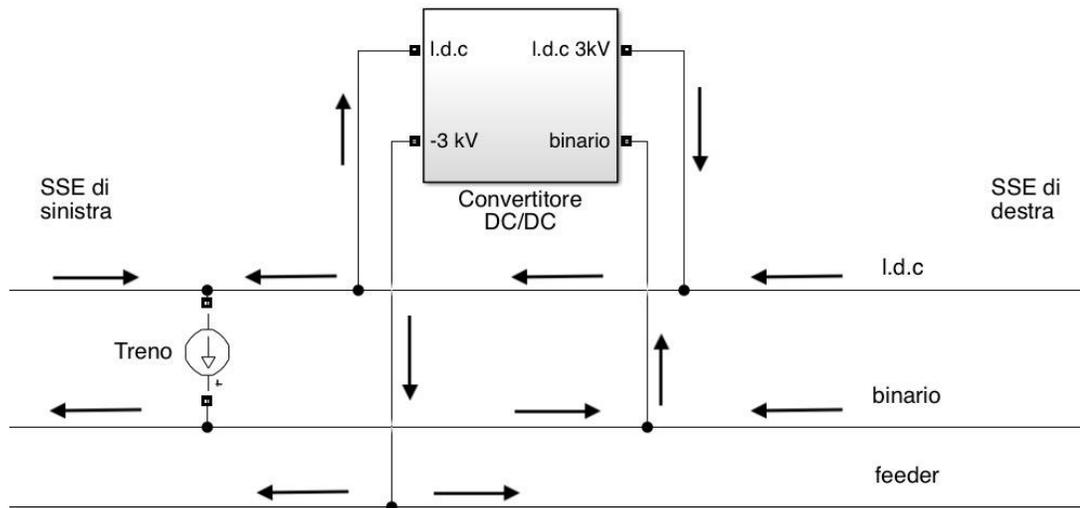


Figura 5.3.2: Andamento delle correnti in ingresso e in uscita dal convertitore.

Nel capitolo che raccoglie le simulazioni svolte rappresenteremo graficamente la corrente in uscita dalla porta l.d.c 3 kV di figura 5.3.2. Nel caso in cui il treno si trovi tra convertitore e sottostazione di destra l'andamento delle correnti è speculare.

Per completezza del modello si è considerato il convertitore con un rendimento non unitario. Come spiegato in [13] le perdite di un convertitore costituito da interruttori riguardano sia le perdite dovute alla conduzione, elementi resistivi, sia quelle date dalla commutazione degli switches. Per semplicità le due voci di perdita sono state valutate allo stesso modo considerando un rendimento del 98 % in condizioni nominali. Si è quindi inserita una resistenza di valore opportuno in serie al generatore pilotato di tensione. Per tale valutazione si sono effettuati gli stessi ragionamenti svolti per il calcolo dell'efficienza del pantografo. Riportiamo di seguito l'espressione utilizzata per il calcolo della resistenza che modella le perdite nel convertitore:

$$R_{dc-dc} = \frac{P_n \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right)}{I_n^2} \quad (5.6)$$

Per la valutazione dei parametri P_n e I_n si sono prima effettuate delle simulazioni considerando un rendimento unitario osservando la massima corrente erogata dal convertitore. Considerando quindi una corrente nominale di 6000 A, tale valore corrisponde ad un sovradimensionamento del 50 % rispetto alla massima corrente erogata, e una potenza nominale data dal prodotto della corrente nominale per la tensione nominale del sistema otteniamo che la resistenza, in serie al generatore di tensione, presenta un valore di 10 mΩ.

Il convertitore, così modellizzato, mantiene sempre la tensione al centro della tratta pari al valore di riferimento e non entra in funzione solamente quando tale tensione scende al di sotto di un determinato valore così da applicare una tensione al pantografo sempre maggiore rispetto al sistema 3kV e ridurre di conseguenza le correnti in linea. Possiamo quindi immaginare il convertitore come una sottostazione posizionata al centro della tratta. Quindi, l'alimentazione di un treno tra due sottostazioni distanti L nel sistema 3 kV corrisponde ad una alimentazione del treno tra due sottostazioni distanti 2L nel sistema 2x3 kV.

Nel corso di questo capitolo si è sempre parlato del convertitore come un unico dispositivo che svolge una conversione da continua a continua. Tuttavia, viste le elevate correnti in gioco (per fornire 9 MW alla tensione di 3 kV servono 3 kA) il "blocco convertitore" potrebbe essere costituito da più apparecchi collegati in parallelo o da un convertitore dc-ac-dc con isolamento galvanico (per maggiori informazioni si rimanda a [14]). In questa tesi si è ipotizzato un unico convertitore per binario, senza prestare particolare importanza al valore delle correnti erogate. Ulteriori studi per determinare la corretta struttura del convertitore sono necessari per un effettivo utilizzo di tale sistema di alimentazione per la trazione ferroviaria.

6. LE SIMULAZIONI: I DUE SISTEMI A CONFRONTO

In questo capitolo si analizzano i due sistemi attraverso delle simulazioni dinamiche di diverso tipo. Si osservano inizialmente treni intervallati viaggianti alla velocità di crociera in una tratta di media pendenza, priva di curve e gallerie e successivamente tratte più lunghe con diverse configurazioni altimetriche. Per verificare il corretto funzionamento delle due tipologie di alimentazione si fa riferimento ai criteri di verifica esposti nel paragrafo 3.4: carico massimo dei gruppi raddrizzatori, tensione al pantografo e sovratemperatura della catenaria. Si richiamano le ipotesi su cui ci basa per l'analisi:

- tratte a doppio binario con treni viaggianti in direzioni opposte sui due binari;
- per le caratteristiche e composizione dei treni studiati si è considerato l'ETR 1000 in composizione 8 carrozze;
- la massima corrente assorbibile da un pantografo è di 2 kA;
- treni con velocità superiori ai 250 km/h sono dotati di due pantografi in presa vista l'elevata potenza richiesta;
- la presenza di due pantografi in presa non limita la massima velocità raggiungibile, ovvero il "sistema pantografo-catenaria" riesce sempre a mantenere una forza di contatto sulla catenaria tale da non creare distacchi.

La scelta di considerare come treno di riferimento un treno ad alta velocità è stata detta dal fatto che, se il nuovo sistema analizzato è in grado di sostenere un traffico di treni veloci, a maggior ragione può essere utilizzato anche per alimentare tratte percorse da treni merci o treni regionali aventi più di due binari.

Per le prime simulazioni la direttissima Firenze - Roma è stata scelta come tratta di riferimento, per poi aumentare la distanza tra le sottostazioni così da vedere gli effetti di tale incremento sulle velocità raggiungibili con i due diversi sistemi. Vista l'elevata mole di ipotetici scenari simulabili, per ogni tipologia di scenario verranno rappresentati graficamente solamente i risultati di una simulazione di riferimento mentre gli altri risultati, della stessa tipologia di simulazione ma con input diversi, saranno riportati in forma tabellare. Si è quindi scelto di rappresentare graficamente solamente le forme d'onda di corrente e tensione al pantografo del treno sul binario dispari visto che quelle sul binario pari saranno speculari.

Per quanto riguarda la massima temperatura ammessa dalla linea di contatto si sono sempre considerate le peggiori condizioni di temperatura ambiente: 40 °C.

Infine, per una corretta valutazione delle potenzialità dei due sistemi di alimentazione ferroviaria si sono anche calcolati il rendimento di trasmissione medio¹²:

$$\eta_{medio} = \left(1 - \frac{3600 - V_{T(media)}}{3600}\right) \cdot 100 [\%] \quad (6.1)$$

la potenza media erogata dalle sottostazioni:

$$P_{SSE(M)} = \left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T V_{do} \cdot I_{SSE} \cdot dt\right) \cdot 10^{-6} [MW] \quad (6.2)$$

e la relativa energia richiesta alle linee primarie:

$$E = \frac{10^{-6}}{3600} \cdot \int_0^T V_{do} \cdot I_{SSE} \cdot dt [MWh] \quad (6.3)$$

dove T rappresenta il tempo di simulazione totale considerato, espresso in secondi.

Andiamo ora ad addentrarci nel seguente mondo di simulazioni.

6.1 Treni intervallati

La definizione di Alta Velocità/Alta Capacità è stata scelta come simulazione di riferimento: **treni viaggianti alla velocità di crociera di 300 km/h intervallati ogni 5 minuti**. Ricordiamo che per tali simulazioni è stato utilizzato il modello del treno a velocità costante: semplice generatore di corrente con input la potenza elettrica necessaria. Con tale modello la potenza elettrica richiesta al pantografo per mantenere i 300 km/h risulta essere di 9,48 MW. Per ogni tipologia di simulazione si è considerata una tratta costituita da 3 sottostazioni distanti $L_{[SSE]} = 16 \text{ o } 20 [km]$. Si è scelto di considerare 3 SSE così da simulare al meglio il grado di carico di una sottostazione. Infatti, la sottostazione centrale verrà considerata come sottostazione di riferimento: corrente erogata, potenza media e energia richiesta alle linee primarie saranno calcolate riferendosi alla sottostazione centrale.

Viste le velocità in gioco, il relativo intervallo temporale tra due treni successivi e la distanza tra due SSE, non si è mai considerata la possibilità di avere più di un treno sullo

¹² Nella formula del rendimento di trasmissione medio, $V_{T(media)}$ rappresenta il valore medio della tensione al pantografo mentre i 3600 V vengono considerati come la tensione nominale del sistema visto che stiamo simulando treni ad alta velocità e il valore di tensione è in linea con le STI.

stesso binario tra due sottostazioni ($\Delta s = dt_{[min]} \cdot 60 \cdot v_{[m/s]} \cdot 10^3 = 25 [km] > L_{[SSE]}$). Si è scelto un tempo di simulazione correlato all'intervallo temporale tra due treni successivi in modo da simulare il passaggio di più treni nella tratta considerata.

Verranno da prima riportati i risultati delle simulazioni riguardanti il sistema tradizionale, successivamente quelli del nuovo sistema e infine faremo un piccolo commento riguardo i risultati ottenuti.

6.1.1 Sistema 3 kV

Consideriamo inizialmente $L_{[SSE]} = 16 [km]$. Si è esaminata la tratta per un tempo di simulazione di 50 minuti così da simulare il passaggio di 20 treni: rispettivamente 10 nel binario dispari e altrettanti nel binario pari. In figura 6.1.1 è stata rappresentata la corrente erogata da ciascun gruppo della sottostazione centrale. Possiamo affermare che tale corrente erogata è la corrente erogata da ogni gruppo di una sottostazione a cui si avvicinano due treni nei due sensi di marcia.

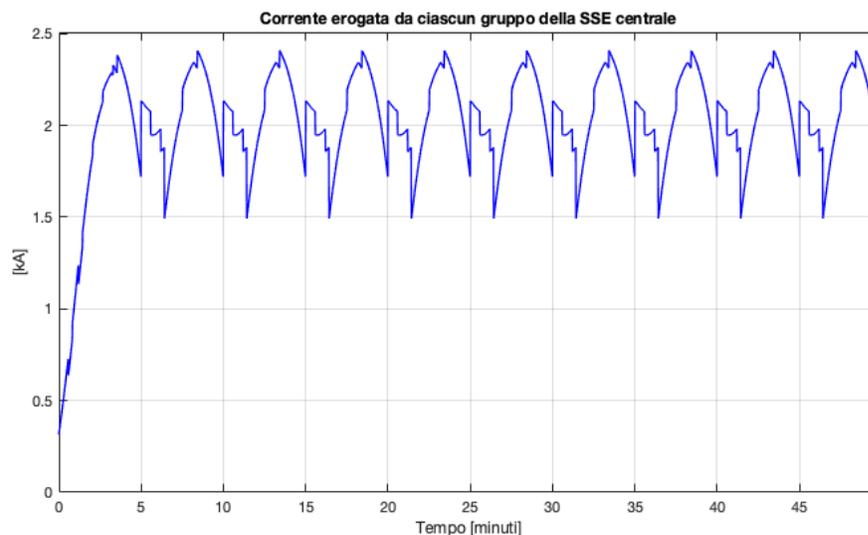


Figura 6.1.1: Corrente erogata da un gruppo di una SSE approcciata da due treni su due binari diversi, viaggiati in direzioni opposte ($L_{[SSE]} = 16 [km]$).

Il valore quadratico medio di tale forma d'onda risulta essere di 2,05 kA e quindi in linea con i limiti di carico dei gruppi raddrizzatori. Per quanto riguarda la tensione e corrente al pantografo si sono considerate le forme d'onda presentate da un treno che percorre la tratta dopo il passaggio del primo treno ad inizio simulazione. Gli andamenti di tensione e corrente al pantografo sono riportati di seguito:

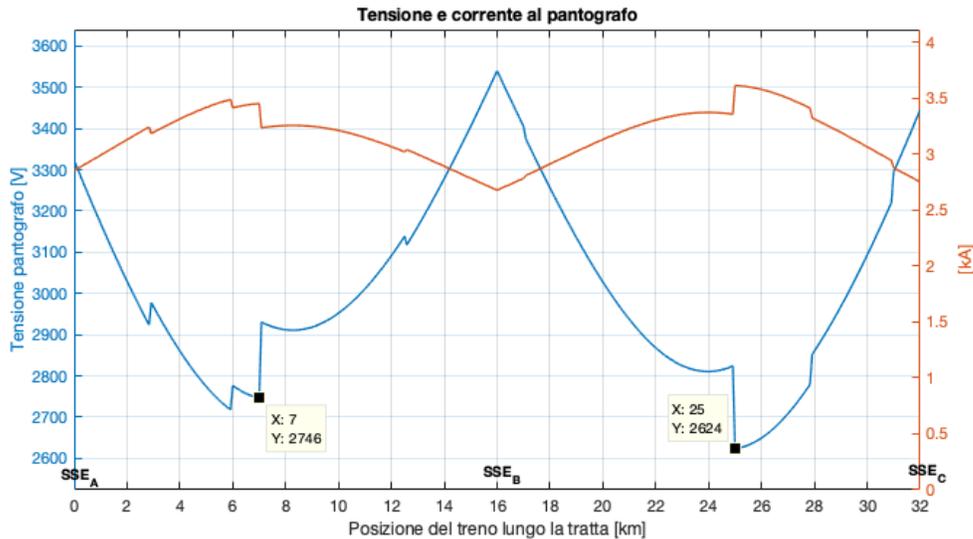


Figura 6.1.2: Tensione e corrente al pantografo treno generico sul binario dispari ($L_{[SSE]} = 16 [km]$).

Per capire l'andamento di tale forma d'onda ragioniamo come segue. Al tempo $t_0 = 0$ un treno sul binario dispari T_1 (pedice dispari) e uno sul binario pari T_2 (pedice pari) vanno verso la SSE centrale partendo entrambi ad una distanza di 16 km da essa. Dopo 5 minuti altri due treni T_3 e T_4 si affacciano agli estremi delle linee che fanno capo alla sottostazione centrale. Quando T_3 inizia a percorrere il binario dispari tra le sottostazioni A e B, T_2 ha già percorso 25 km e si trova tra le sottostazioni A e B nel binario pari. Quindi quando T_2 percorre i restanti 7 km, le sottostazioni A e B non devono più alimentare due treni (T_3 e T_2) ma solamente T_3 visto che T_2 ha percorso tutti i 32 km. Ecco perché al chilometro 7 di figura 6.1.2 abbiamo un aumento di tensione al pantografo. Invece quando T_3 si trova al chilometro 25 un altro treno T_6 si presenta sul binario pari in corrispondenza della sottostazione C. Questo giustifica l'abbassamento di tensione. Gli altri incrementi di tensione, come ad esempio al chilometro 3, sono dovuti all'aumento della tensione raddrizzata a vuoto delle sottostazioni, dovuti all'intervento del variatore a carico, per mantenere una tensione di 3600 V applicata alla linea di contatto. Le forme d'onda di corrente e tensione rappresentate nella figura precedente si ripropongono periodicamente in una condizione di regime con le ipotesi di traffico assunte.

Il pantografo presenta una tensione media di 3015 V che è maggiore rispetto al valore minimo permesso dalle STI e la corrente al pantografo non supera i 4 kA.

In figura 6.1.3 possiamo osservare come la temperatura della linea di contatto non superi gli 80 °C massimi ammissibili.

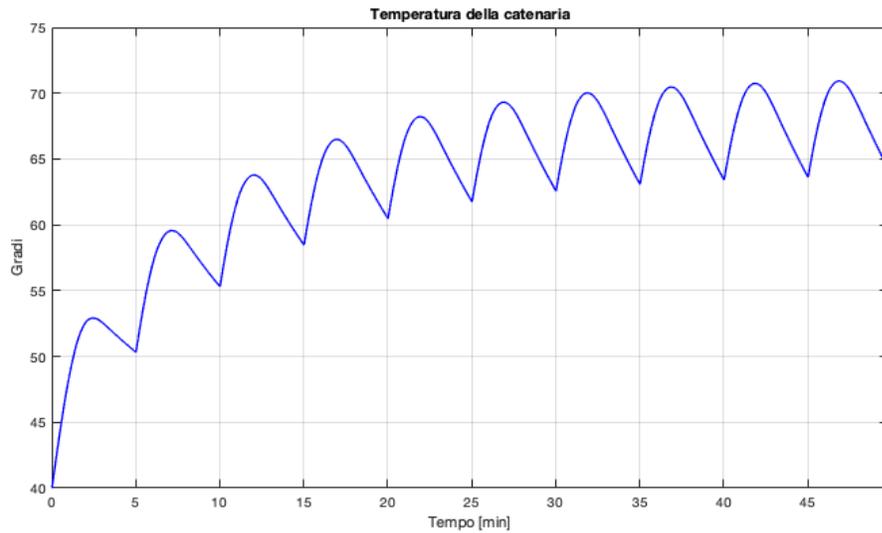


Figura 6.1.3: Temperatura linea di contatto con temperatura ambiente di 40 °C ($L_{[SSE]} = 16 [km]$).

Il rendimento di trasmissione dell'83 % fa sì che la sottostazione centrale richieda 13 MWh per l'alimentazione di 50 minuti della tratta (20 treni).

Considerando invece sottostazioni distanti 20 km ($L_{[SSE]} = 20 [km]$) e simulando la tratta per un tempo di 61 minuti, otteniamo le seguenti forme d'onda:

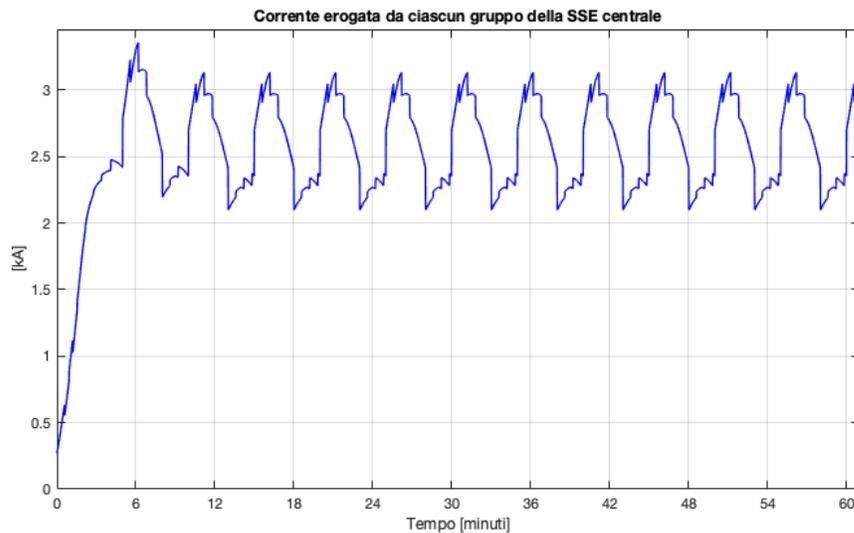


Figura 6.1.4: Corrente erogata da una SSE approcciata da due treni su due binari diversi, viaggiati in direzioni opposte ($L_{[SSE]} = 20 [km]$).

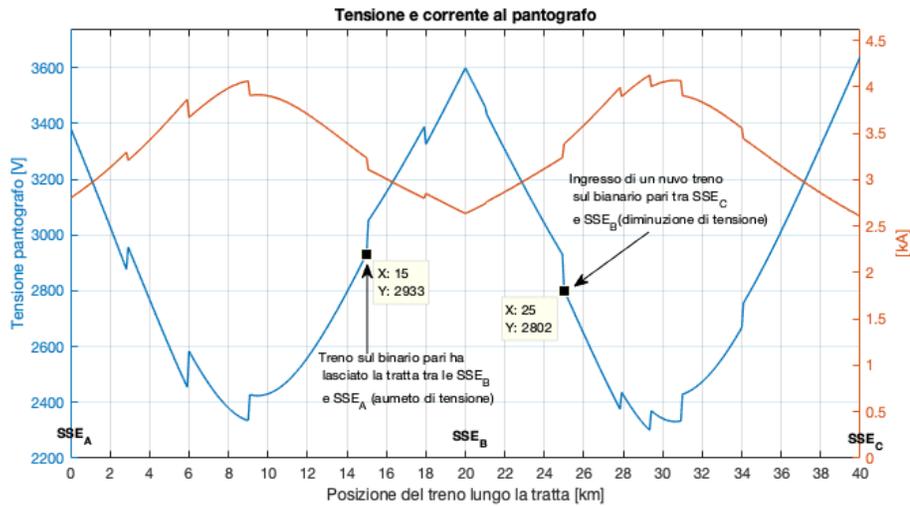


Figura 6.1.5: Tensione e corrente al pantografo treno generico sul binario dispari ($L_{[SSE]} = 20 [km]$). Gli incrementi di tensione non spiegati sono correlati all'aumento delle prese nei trasformatori di gruppo grazie all'intervento degli OLTC nelle SSE.

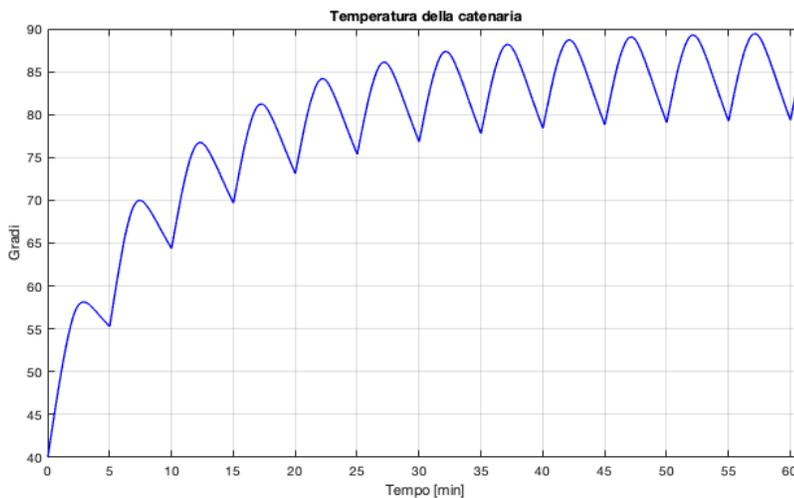


Figura 6.1.6: Temperatura linea di contatto con temperatura ambiente di 40 °C ($L_{[SSE]} = 20 [km]$).

Possiamo notare come aumentando di soli 4 chilometri la distanza tra le sottostazioni, il sistema attuale presenta diverse problematiche. La prima che salta subito all'occhio è la temperatura dei conduttori della linea di contatto che si porta ad un valore decisamente maggiore degli 80 °C ammessi. In secondo luogo, possiamo osservare come nel punto di mezzo tra due sottostazioni la corrente al pantografo raggiunge quasi i 4 kA a causa di un drastico abbassamento della tensione applicatagli. Quindi nel caso in cui la tratta presentasse un piccolo tratto in salita o una galleria il treno non riuscirebbe a mantenere la velocità di crociera in quanto il limite della massima

corrente assorbibile è già stato raggiunto. Per quanto riguarda i gruppi raddrizzatori il carico massimo ammissibili viene quasi raggiunto visto che la corrente quadratica media è di 2,6 kA. Con questa distanza tra le sottostazioni e le ipotesi di traffico considerate il rendimento di trasmissione risulta essere del 79,5 %. Infine, l'energia che la sottostazione centrale deve richiedere alle linee primarie risulta essere di 21 MWh per alimentare la tratta per 61 minuti (26 treni considerati).

Vista la robustezza del modello creato si sono effettuate altre simulazioni riguardati diverse velocità di crociera, distanza tra le sottostazioni e intervalli temporali dei treni. Per la scelta della distanza tra le sottostazioni si è considerata la massima potenza richiedibile dal treno, come calcolato nel paragrafo 3.4, vista la mancata modellizzazione della dinamica del treno (studiata successivamente). Quindi ad esempio un treno che richiede 9,4 MW non potrà mai percorrere una tratta con sottostazioni distanti 40 km riuscendo a mantenere la sua velocità di crociera in qualsiasi punto della tratta. Si sono quindi considerate velocità di 200 km/h (3,2 MW), 250 km/h (5,77 MW), 280 km/h (7,85 MW) e 300 km/h (9,48 MW) e sottostazioni distanti 40, 30, 20 e 16 chilometri. I risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella:

| v_T [km/h] | L_{SSE} [km] | dt [min] | $^{13}n_{treni}^0$ | $V_{T(media)}$ [V] | η_{medio} [%] | ^{14}E [MWh] |
|--------------|----------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 200 | 40 | 20 | 20 | 3175,0 | 88,2 | 13,0 |
| 200 | 30 | 15 | 20 | 3289,6 | 91,4 | 9,3 |
| 200 | 20 | 10 | 20 | 3393,8 | 94,3 | 5,8 |
| 200 | 16 | 5 | 20 | 3404,9 | 94,6 | 5,6 |
| 250 | 30 | 15 | 16 | 2989,0 | 83,0 | 13,8 |
| 250 | 20 | 10 | 16 | 3223,4 | 89,5 | 8,4 |
| 250 | 16 | 5 | 16 | 3290,4 | 91,4 | 6,3 |
| 280 | 20 | 10 | 16 | 3048,6 | 84,7 | 9,8 |
| 280 | 16 | 5 | 16 | 3148,4 | 87,5 | 8,2 |
| 300 | 20 | 10 | 14 | 2863,3 | 79,5 | 11,7 |
| 300 | 16 | 5 | 14 | 3015,4 | 83,8 | 9,2 |

Tabella 6.1.1: Risultati simulazioni svolte sul sistema 3 kV

¹³ Numero di treni che attraversano le 3 SSE nel tempo di simulazione T considerato.

¹⁴ Correlata al numero di treni considerati e riguardante la sottostazione centrale.

6.1.2 Sistema 2x3 kV

Effettuando una simulazione con gli stessi dati di input utilizzati per il sistema 3 kV (treni intervallati ogni 5 minuti alla velocità di 300 km/h con $L_{[SSE]} = 16 [km]$) le forme d'onda della corrente erogata da ciascun gruppo della sottostazione centrale hanno l'andamento rappresentato in figura 6.1.7 e figura 6.1.8:

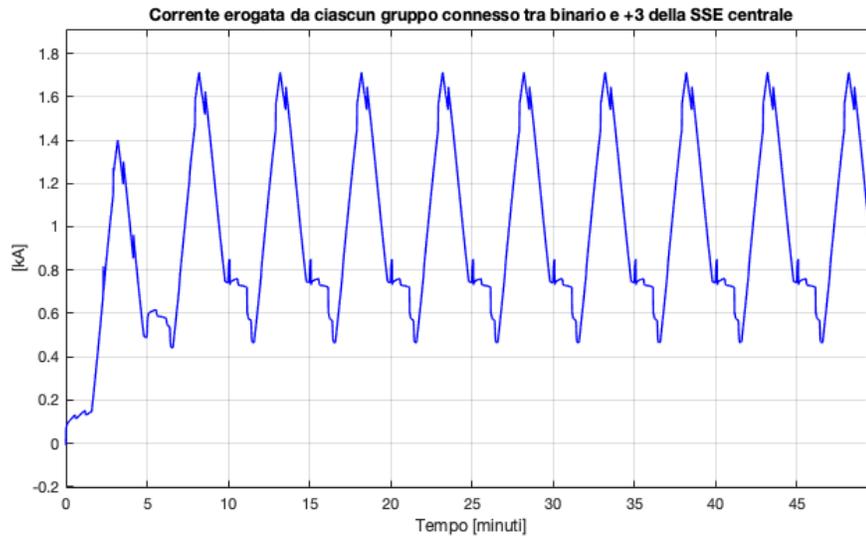


Figura 6.1.7: Corrente erogata gruppo tra binario e l.d.c. ($L_{[SSE]} = 16 [km]$).

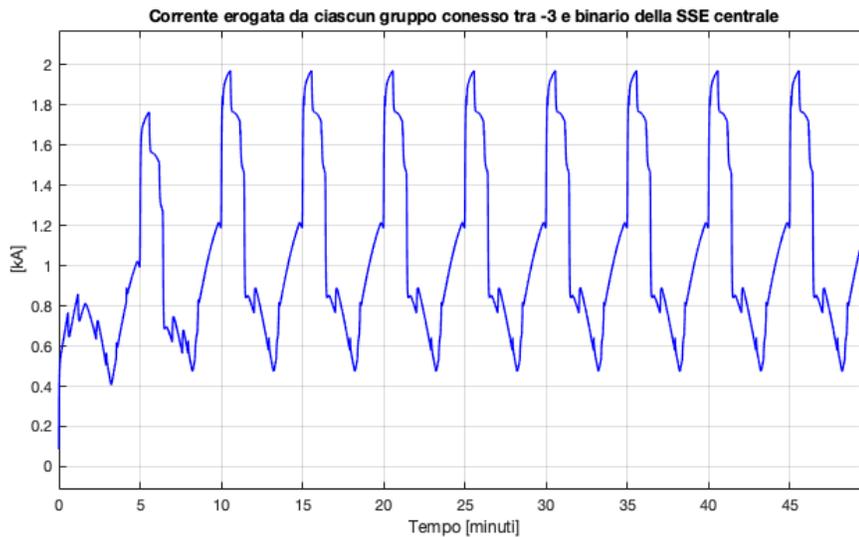


Figura 6.1.8: Corrente erogata gruppo tra feeder negativo e binario ($L_{[SSE]} = 16 [km]$).

Possiamo osservare che il gruppo connesso tra binario e linea di contatto presenta una corrente con un valore di picco inferiore ai 1,75 kA ammessi dal gruppo raddrizzatore

stesso, vedi tabella 3.4.1. La stessa cosa invece, non vale per il gruppo connesso tra feeder negativo e binario visto che eroga correnti fino ad un massimo di 2 kA. Tale inconveniente potrebbe essere semplicemente risolto mettendo un altro raddrizzatore a diodi in parallelo a quello esistente. **Nelle successive tipologie di simulazioni assumeremo quindi che tra feeder negativo e binario e binario e linea di contatto, ciascun gruppo sia costituito due raddrizzatori in parallelo.** Il valore quadratico medio della corrente erogata risulta essere di 1,05 kA per il gruppo connesso tra binario e linea di contatto e di 1,15 kA per il gruppo connesso tra feeder negativo e binario. Prendendo sempre come riferimento un treno sul binario dispari, esso presenta le seguenti forme d'onda riguardanti la tensione al pantografo e la corrente assorbita:

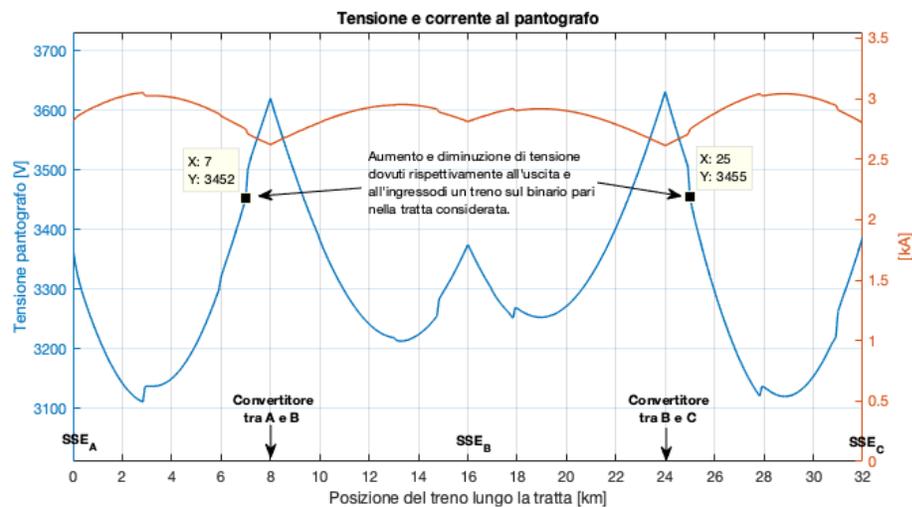


Figura 6.1.9: Tensione e corrente al pantografo treno generico sul binario dispari ($L_{[SSE]} = 16 [km]$).

Confrontando tale andamento con quello riportato in figura 6.1.2 possiamo subito notare come la corrente assorbita sia minore grazie ad un aumento della tensione applicata¹⁵. Quando il treno si trova in corrispondenza del convertitore elettronico di potenza la tensione applicata è di poco superiore ai 3600 V ammissibili a causa di come abbiamo impostato la tensione di riferimento del convertitore. Il valore medio di tale tensione è di 3300 V (molto superiore rispetto a quello ottenuto per il sistema a 3 kV). Per riuscire ad avere una forma d'onda di tensione al pantografo mai inferiore di 3100 V i convertitori elettronici di potenza giocano un ruolo fondamentale. Ciascun convertitore, posizionato al centro di ogni tratta compresa tra due sottostazioni, deve erogare correnti che presentano un valore di picco di circa 4,5 kA. Per rappresentare

¹⁵ La tensione al chilometro 0 è minore nel sistema 2x3 kV a causa della maggior caduta sulla resistenza interna siccome di valore doppio rispetto a quella del 3 kV. Con due ponti in parallelo tra feeder-binario e binario-l.d.c. si avrebbe una tensione applicata maggiore grazie al dimezzamento di R_{int} .

l'andamento della corrente in uscita si è considerato il convertitore posizionato sul binario dispari tra le sottostazioni A e B. L'andamento della corrente è di seguito raffigurato:

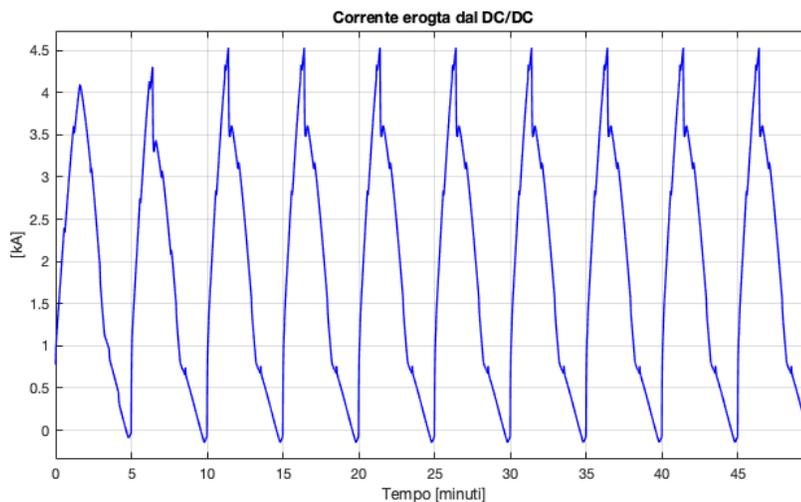


Figura 6.1.10: Corrente erogata dal DC/DC binario dispari tra A e B ($L_{[SSE]} = 16 [km]$).

La corrente in ingresso ha ovviamente la stessa forma d'onda ma con valore dimezzato. Infine, riportiamo per completezza la temperatura raggiunta dai conduttori della linea di contatto considerando sempre una temperatura ambiente di 40 °C:

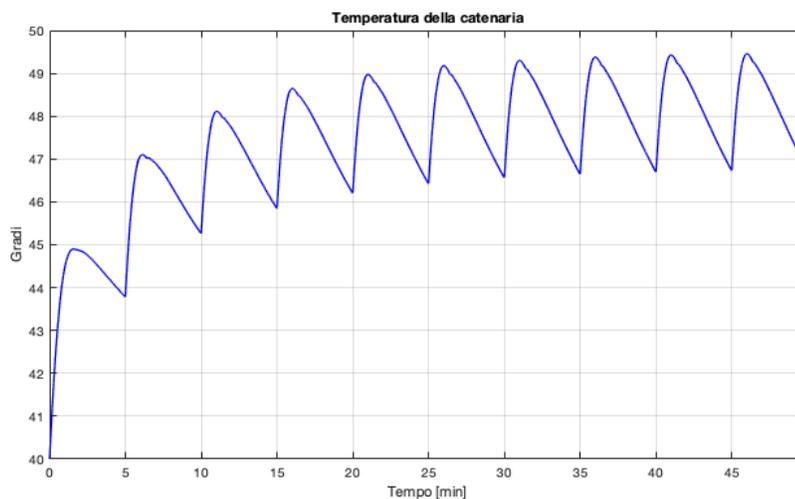


Figura 6.1.11: Temperatura linea di contatto con temperatura ambiente di 40 °C ($L_{[SSE]} = 16 [km]$).

Grazie ad un livello di tensione applicata al pantografo maggiore rispetto al sistema 3 kV le perdite per effetto Joule sulla linea di contatto sono minori e quindi l'energia necessaria per l'alimentazione dei treni sarà minore. Con tale configurazione di traffico

e distanza tra le sottostazioni il sistema 2x3 kV ha un rendimento di trasmissione del 91,67 % e la sottostazione centrale necessita di 13 MWh¹⁶ per fornire la corrente necessaria per l'alimentazione di 20 treni.

Mantenendo le stesse ipotesi di traffico andiamo ora a vedere cosa succede aumentando la distanza tra le SSE: $L_{[SSE]} = 20 [km]$. Riportiamo di seguito l'andamento della corrente erogata:

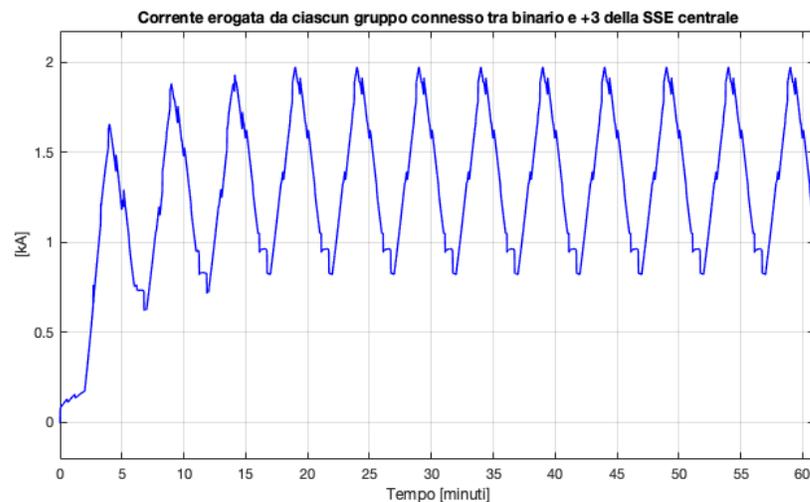


Figura 6.1.12: Corrente erogata gruppo tra binario e l.d.c. ($L_{[SSE]} = 20 [km]$).

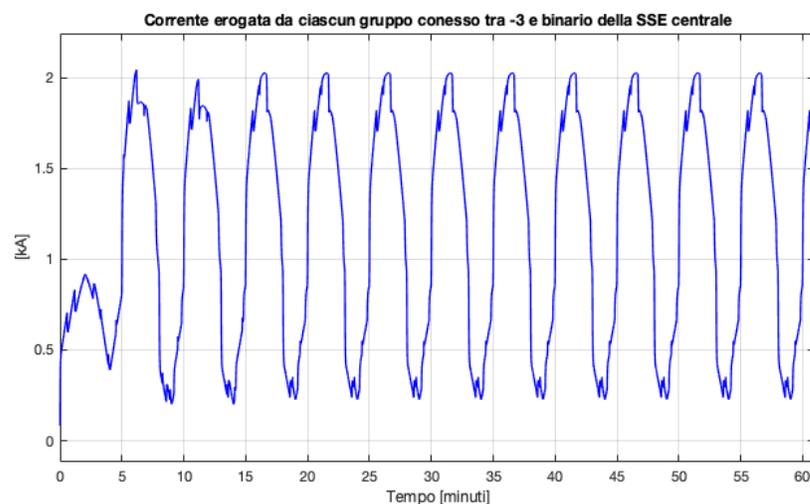


Figura 6.1.13: Corrente erogata gruppo tra feeder negativo e binario ($L_{[SSE]} = 20 [km]$).

¹⁶ Con due raddrizzatori a ponte in parallelo per ciascun gruppo feeder-binario e binario-l.d.c l'energia necessaria richiesta dalla sottostazione centrale risulta essere di 11,3 MWh e $\eta=93\%$.

Le correnti erogate da ciascun gruppo della SSE raggiungono valori di picco di circa 2 kA. Quindi come precedentemente detto possiamo risolvere tale problema di sovraccarico considerando due ponti in parallelo per ciascun gruppo connesso tra feeder negativo - binario e binario - linea di contatto. La tensione e corrente al pantografo hanno circa lo stesso andamento di prima grazie al corretto funzionamento dei convertitori dc-dc.

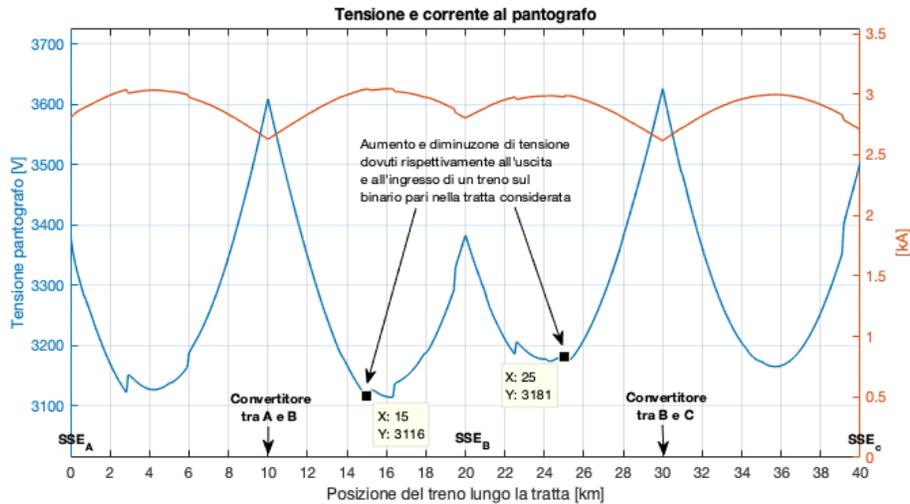


Figura 6.1.14: Tensione e corrente al pantografo treno generico sul binario dispari ($L_{[SSE]} = 20 [km]$).

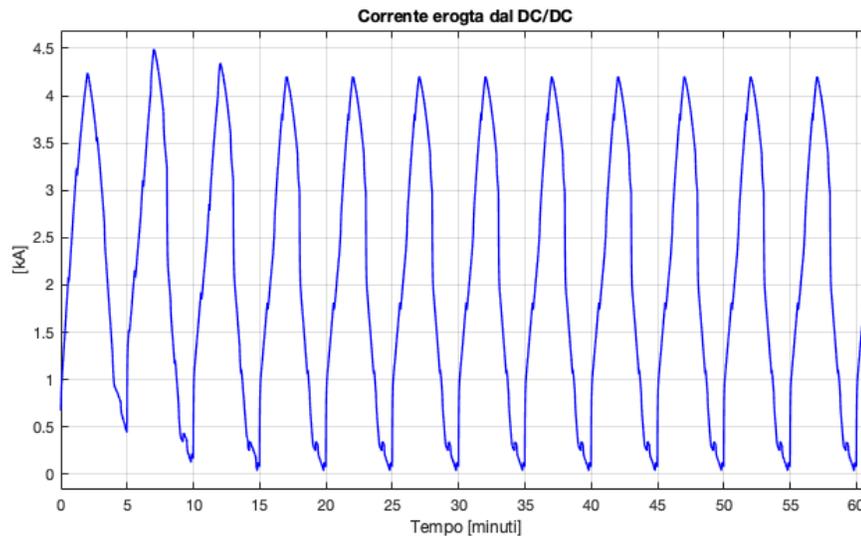


Figura 6.1.15: Corrente erogata dal DC/DC binario dispari tra A e B ($L_{[SSE]} = 20 [km]$)¹⁷.

¹⁷ Picchi di corrente minori rispetto a prima in quando viene erogata più corrente dalle sottostazioni.

Osservando le correnti erogate dalle SSE e dai convertitori possiamo notare che un aumento di distanza tra le sottostazioni implica un aumento di erogazioni di corrente da parte dei gruppi connessi tra binario e linea di contatto mentre le correnti erogate dai convertitori si riducono di poco. Rispetto ai 21 MWh richiesti dalla sottostazione centrale nel sistema 3 kV per l'alimentazione dei 26 treni considerati la stessa sottostazione richiede 19,8 MWh. Infine, vista la minor corrente sulla linea di contatto rispetto al 3 kV, la temperatura dei conduttori costituenti la catenaria di alimentazione dei treni non raggiunge mai la massima temperatura ammessa come mostrato di seguito:

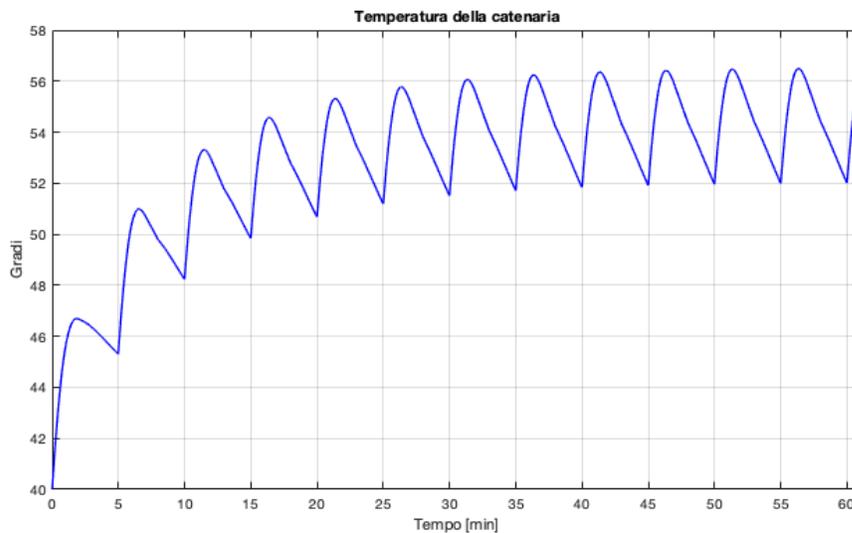


Figura 6.1.16: Temperatura linea di contatto con temperatura ambiente di 40 °C ($L_{[SSE]} = 20 [km]$).

Come fatto anche per il sistema 3 kV si sono effettuate le stesse simulazioni con diverse velocità e distanze tra le SSE. Riportiamo di seguito i risultati:

| v_T [km/h] | L_{SSE} [km] | dt [min] | $^{18}n_{treni}^0$ | $V_{T(media)}$ [V] | η_{medio} [%] | ^{19}E [MWh] |
|--------------|----------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 200 | 40 | 20 | 20 | 3425,8 | 95,16 | 12,6 |
| 200 | 30 | 15 | 20 | 3471,8 | 96,4 | 8,6 |
| 200 | 20 | 10 | 20 | 3515,8 | 97,7 | 4,8 |
| 200 | 16 | 5 | 20 | 3538,8 | 98,3 | 4,2 |
| 250 | 30 | 15 | 16 | 3340,9 | 92,8 | 13 |

¹⁸ Numero di treni che attraversano le 3 SSE nel tempo di simulazione T considerato.

¹⁹ Correlata al numero di treni considerati e riguardante la sottostazione centrale. Con due ponti in parallelo per ciascun gruppo l'energia risulta minore.

| | | | | | | |
|-----|----|----|----|--------|-------|------|
| 250 | 20 | 10 | 16 | 3431,6 | 95,32 | 7,7 |
| 250 | 16 | 5 | 16 | 3469,0 | 96,4 | 6,0 |
| 280 | 20 | 10 | 16 | 3332,9 | 92,6 | 8,8 |
| 280 | 16 | 5 | 16 | 3380,7 | 93,9 | 8,0 |
| 300 | 20 | 10 | 14 | 3247,0 | 90,2 | 10,0 |
| 300 | 16 | 5 | 14 | 3300,1 | 91,7 | 9,2 |

Tabella 6.1.2: Risultati simulazioni svolte sul sistema 2x3 kV.

Commento

I risultati di tabella 6.1.2 sono stati ottenuti considerando due ponti a diodi in serie per ciascun gruppo senza aggiungerne altri due in parallelo come accennato a pagina 87 al fine di risolvere le problematiche riguardanti le correnti di gruppo. L'aggiunta di altri due ponti in parallelo comporta il dimezzamento della resistenza in serie ai generatori pilotati di tensione in sottostazione con una diminuzione dell'energia richiesta dalle linee primarie. Da queste prime simulazioni si è potuto vedere come il sistema 2x3 kV riesca a mantenere una tensione più elevata al pantografo riducendo quindi la corrente sulla linea di contatto. Grazie a questa riduzione di corrente il nuovo sistema non presenta mai problematiche di sovratemperatura della linea di contatto, mentre il sistema a 3 kV con treni intervallati ogni 5 minuti viaggianti ad una velocità di crociera di 300 km/h e sottostazioni distanti 20 km presenta delle correnti in linea di valore tale da portare i conduttori ad una temperatura troppo elevata. Confrontando le tabelle con i risultati delle varie simulazioni possiamo notare che l'energia necessaria nel sistema 2x3 kV non differisce di molto da quella ottenuta per il sistema 3 kV perché stiamo considerando solamente due ponti in serie per gruppo. Possiamo comunque affermare che tale energia viene meglio utilizzata comportando una minor dispersione in calore.

6.2 Tratte con diverse configurazioni altimetriche e gallerie

Passiamo ora ad analizzare i due sistemi in esame considerando tratte con diverse configurazioni altimetriche e gallerie. Si è quindi creata una tratta a doppio binario composta da **7 SSE distanti 16 o 20 km l'una dall'altra**, percorsa da due treni in direzioni opposte in partenza dai due estremi della tratta. L'introduzione all'interno della tratta di pendenze e gallerie comporta, come spiegato in 4.2, un aumento di forza meccanica, quindi potenza elettrica, che il gruppo motore deve sviluppare al fine di

mantenere la velocità di crociera. Quindi per valutare al meglio l'andamento di corrente e tensione al pantografo si è utilizzato il secondo modello del treno descritto in 4.2. In queste simulazioni non si è tenuto conto della temperatura della linea di contatto perché, visto che abbiamo simulato solamente due treni nella tratta, i conduttori che costituiscono la linea di contatto sono percorsi da corrente per un tempo decisamente inferiore alla propria costante di tempo termica. Per verificare tale considerazione si è effettuata una simulazione di prova considerando che un treno, con due pantografi in presa, assorba sempre la massima corrente assorbibile, 4 kA, nello spazio compreso tra due SSE per circa 5 minuti. Ricordando che i 4 kA sono suddivisi tra le due SSE che alimentano il treno, la linea di contatto presenta una sovratemperatura di circa 2 °C e visto che dopo il passaggio del treno non è più percorsa da corrente, la temperatura dei conduttori si riporta a quella ambiente.

Le tipologie di simulazione sono state così raccolte:

- ripartenza dei due treni su tratto pianeggiante a diverse distanze dalla sottostazione di partenza con tratta avente salita gallerie e discesa;
- ripartenza dei due treni in salita a diverse distanze dalla sottostazione di partenza con tratta avente salita gallerie e discesa;
- ripartenza dai due treni su tratta con galleria lunga 20 km.

Come fatto per le simulazioni precedenti, per ogni tipologia di simulazione, rappresenteremo graficamente solamente la simulazione più significativa mentre gli altri risultati verranno raggruppati in tabelle. Oltre all'andamento della tensione e corrente al pantografo verranno anche osservati il tempo impiegato per raggiungere la velocità di regime e quello per percorrere l'intera tratta. Anche in questo caso si è scelto di rappresentare le forme d'onda di corrente, tensione, velocità e spazio percorso del treno sul binario dispari, non perché diverse da quello nel binario pari, ma solo per non rappresentare due volte gli stessi grafici. Si è considerata una velocità di crociera di **300 km/h** per entrambi i treni sui due binari.

Viste le problematiche riguardanti il carico dei gruppi raddrizzatori nel sistema 2x3 kV, si è deciso di considerare, nel sistema 2x3 kV, ciascun gruppo di conversione costituito da due gruppi di ponti raddrizzatori connessi in serie e che ciascun gruppo di ponti raddrizzatori sia costituito da due ponti in parallelo. Da un punto di vista del modello basta dividere per due il valore della resistenza interna calcolato nell'equazione 5.3.

Infine, siccome il modello del treno è caratterizzato da una massima corrente assorbibile data dal numero di pantografi in presa (considerati massimo 2) e poiché

stiamo considerando solamente due treni in linea, le correnti erogate dai gruppi di conversione non superano mai i limiti di carico. Per questo motivo si è deciso di non rappresentarle graficamente ma di fare solamente qualche accenno ai loro valori di picco. Andiamo ora ad analizzare le varie simulazioni svolte.

6.2.1 Ripartenza su tratto pianeggiante

Consideriamo due treni, uno sul binario dispari e uno sul binario pari, che partono a una distanza di 8 km dalla rispettiva sottostazione di sinistra per il treno sul binario dispari e destra per quello sul binario pari. Al fine di mettere maggiormente in evidenza le differenze tra i due sistemi di alimentazione, si è scelto di rappresentare la situazione in cui le SSE siano distanti 20 km l'una dall'altra. Il profilo altimetrico considerato è rappresentato in figura 6.2.1 dove si è considerata una pendenza, sia per il tratto in salita che per quello in discesa, dell'8 ‰ e un tratto in galleria lungo 10 km tra le sottostazioni C e D.

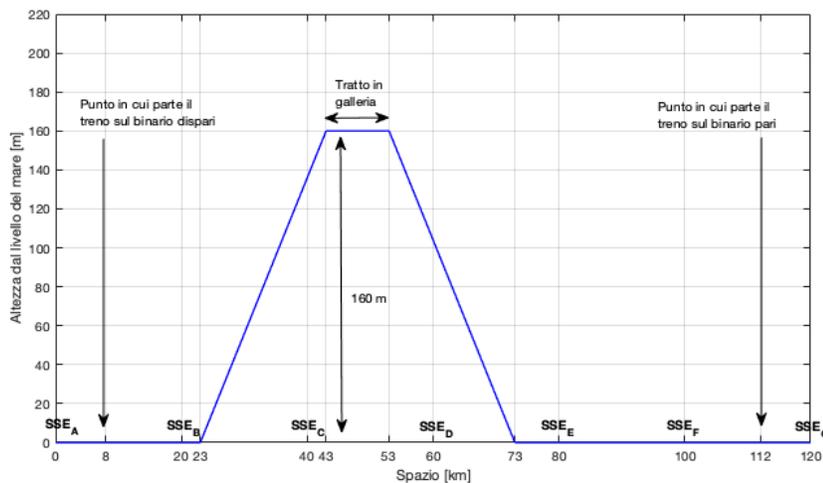


Figura 6.2.1: Profilo altimetrico della tratta considerando SSE distanti 20 km.

Mettiamo direttamente a confronto i risultati ottenuti nei due sistemi di alimentazione riportando il profilo di velocità, lo spazio percorso²⁰ e le forme d'onda di corrente e tensione al pantografo del treno sul binario dispari in funzione del chilometro a cui si trova. Per il sistema 2x3 kV possiamo ipotizzare che all'interno della galleria ci sia un apposito spazio per collocare il convertitore elettronico di potenza.

²⁰ Attenzione: se il treno parte dal chilometro 8 una volta percorsi 15 chilometri incontrerà il tratto in salita. Prestare attenzione quindi alla differenza tra spazio percorso e chilometro della tratta in cui si trova il treno.

Rappresentiamo di seguito prima le forme d'onda riguardanti il sistema 3 kV e successivamente quelle ottenute con il 2x3 kV.

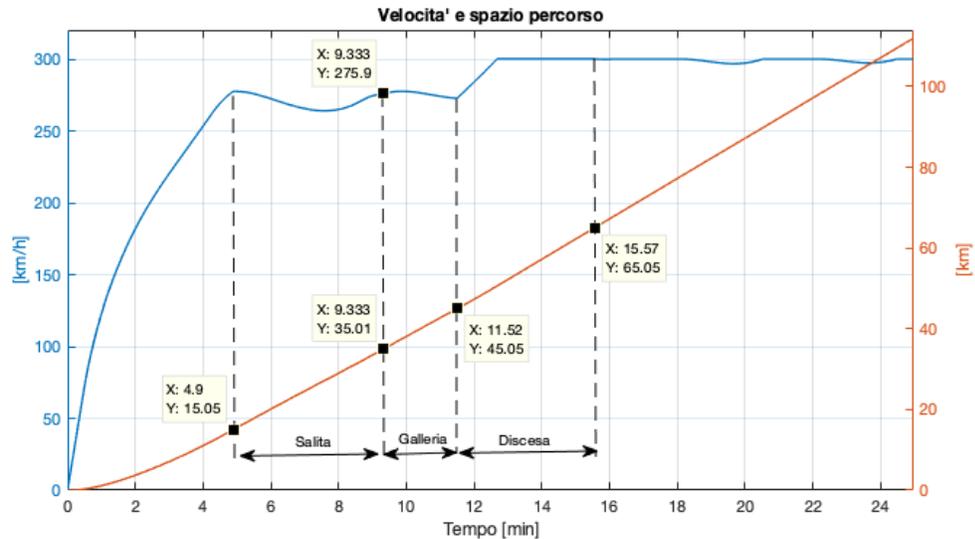


Figura 6.2.2: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 3kV.

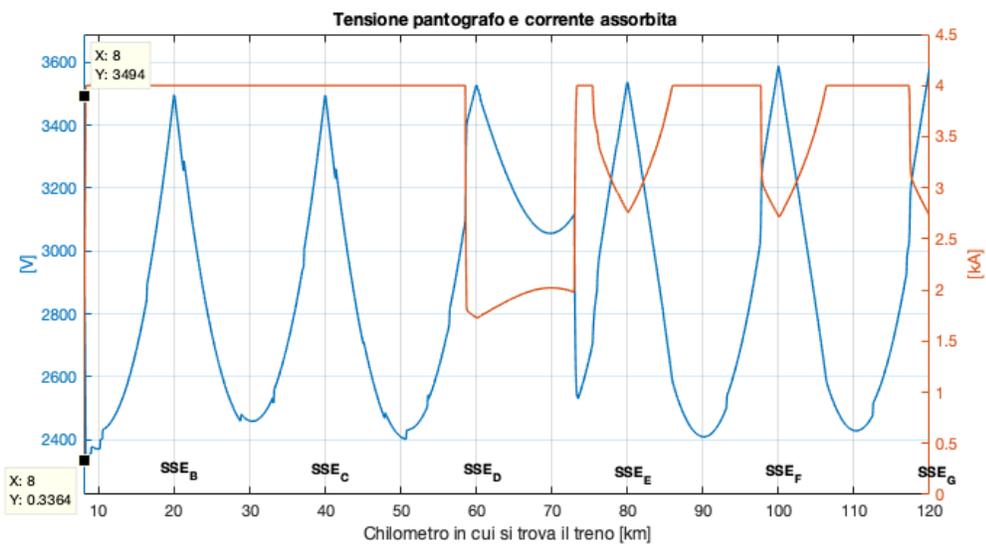


Figura 6.2.3: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 3 kV.

Dalla prima delle due figure possiamo notare come il treno raggiunga la velocità di regime dopo circa 12 minuti percorrendo 58 km. Il tratto in galleria viene quindi percorso ad una velocità di 280 km/h. La seconda figura mette invece in evidenza come il treno assorba per la maggior parte del tempo considerato 4 kA. L'energia fornita da tutte e 7 le SSE risulta essere di 11,3 MWh.

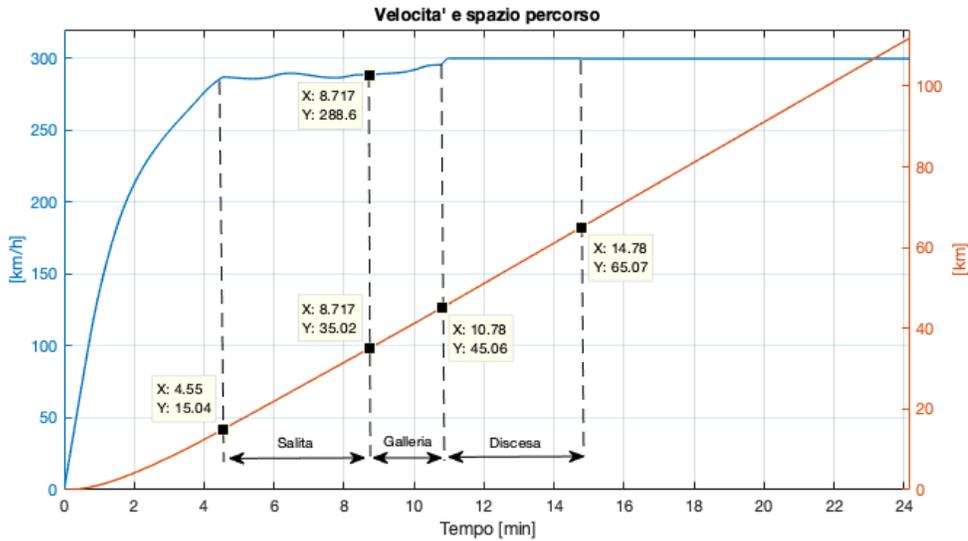


Figura 6.2.4: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 2x3kV.

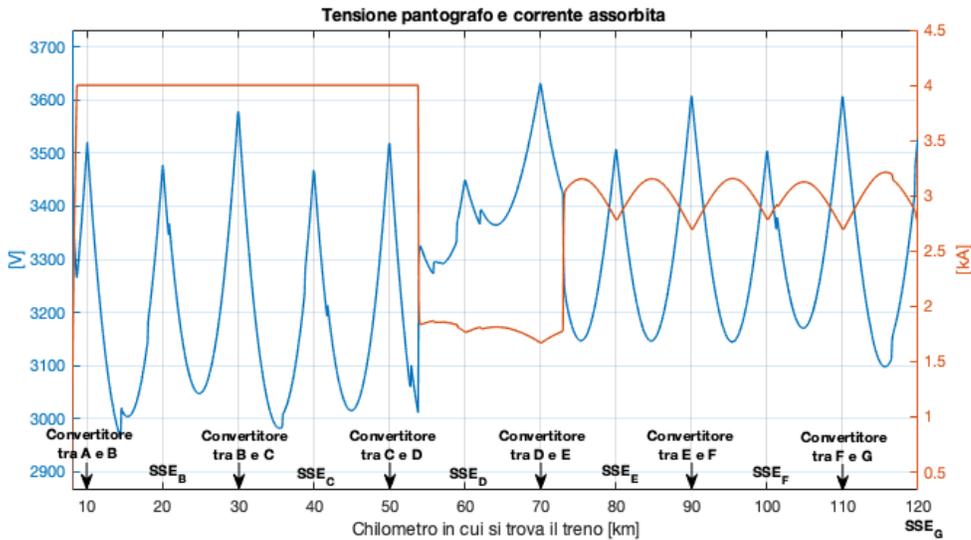


Figura 6.2.5: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 2x3 kV.

Nel sistema 2x3 kV invece il treno riesce ad arrivare a regime dopo 10 minuti percorrendo 45 km riuscendo quindi ad attraversare la galleria con la piena velocità di crociera. Inoltre, una volta superata la fase di avviamento e le asperità del tracciato, salita e galleria, la corrente assorbita al pantografo risulta essere di molto inferiore ai 4 kA. Questo minor assorbimento di corrente si traduce in una minor energia totale richiesta (10,6 MWh). Per quanto riguarda i tempi di percorrenza totali, essi non differiscono molto nei due sistemi di alimentazione: con il 2x3 kV completiamo la tratta considerata con 50 secondi di anticipo rispetto al 3 kV. Per il grado di carico delle

sottostazioni non abbiamo problemi di correnti troppo elevate sia nel 3 kV sia nel 2x3 kV e per questo motivo è stato deciso di non rappresentarle.

Grazie ad una maggior tensione applicata al pantografo il rendimento di trasmissione nel sistema 2x3 kV risulta essere del 90,8 % contro il 78,9 % del sistema 3 kV. L'ultima cosa da osservare è che nel sistema 2x3 kV i convertitori elettronici di potenza nella fase in cui il treno accelera e nei tratti in salita e galleria presentano correnti di punta comprese tra i 6 - 7 kA.

Oltre a questa simulazione sono state simulate anche altre posizioni in cui ripartiva il treno considerando la stessa configurazione altimetrica. Tutti le simulazioni hanno confermato le stesse considerazioni fatte in precedenza: maggior corrente sulla linea di contatto e energia fornita dalle SSE nel sistema 3kV rispetto al 2x3 kV, e minor tempo per raggiungere la velocità di regime nel sistema 2x3 kV.

6.2.2 Ripartenza in salita

Consideriamo per esempio che a causa di un guasto in linea o ad un passaggio a livello è stato inviato il segnale di blocco treno al macchinista. Sfortuna vuole che proprio in quell'istante entrambi i locomotori sui due binari stavano percorrendo un tratto in salita. Le sottostazioni sono distanti 20 km, il tratto in salita è lungo 43 km in entrambi i binari. La galleria è lunga 10 km e posizionata tra il chilometro 43 e 53. Quindi dalla configurazione altimetrica di figura 6.2.1 consideriamo che i tratti in salita partano dal chilometro 0 fino al chilometro 43 e dal chilometro 96 fino al chilometro 53: dislivello di 344 m con pendenza dell'8 ‰.

Vediamo quindi cosa succede quando i due treni devo ripartire rispettivamente dal chilometro 0 binario dispari e 96 binario pari, considerando sempre una pendenza dell'8 ‰. L'energia fornita dalle SSE sarà minore del caso precedente solamente perché la tratta considerata è interessata dal treno sul binario pari per un tempo minore: parte dal chilometro 96 e non 112 come in precedenza

Nel sistema 3 kV, a causa del lungo tratto in salita, il treno sul binario dispari raggiunge la velocità di regime dopo 15 minuti e impiega 27,22 minuti per percorre tutti i 120 km di tratta. Le sottostazioni devono fornire un'energia di 10,15 MWh. Le forme d'onda del profilo di velocità e della corrente e tensione al pantografo sono di seguito riportate.

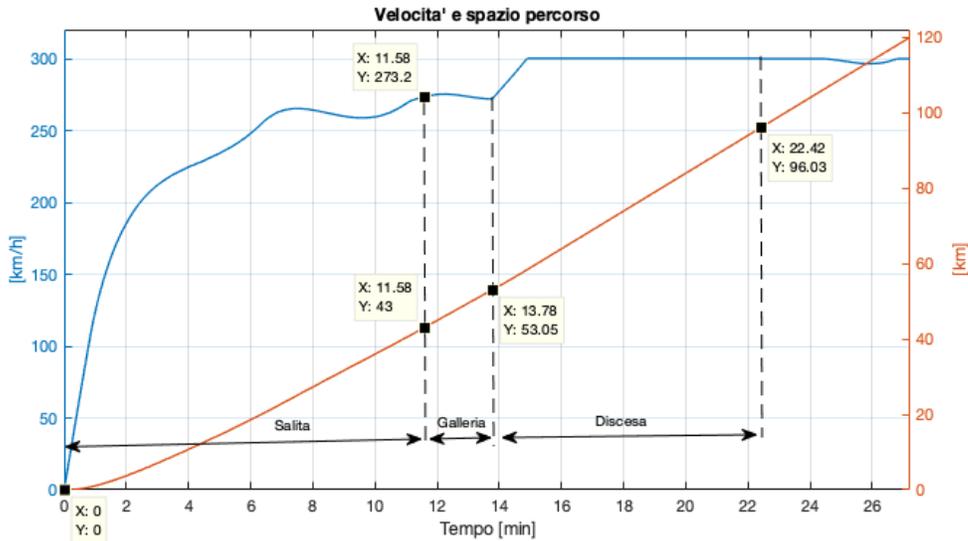


Figura 6.2.6: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 3kV.

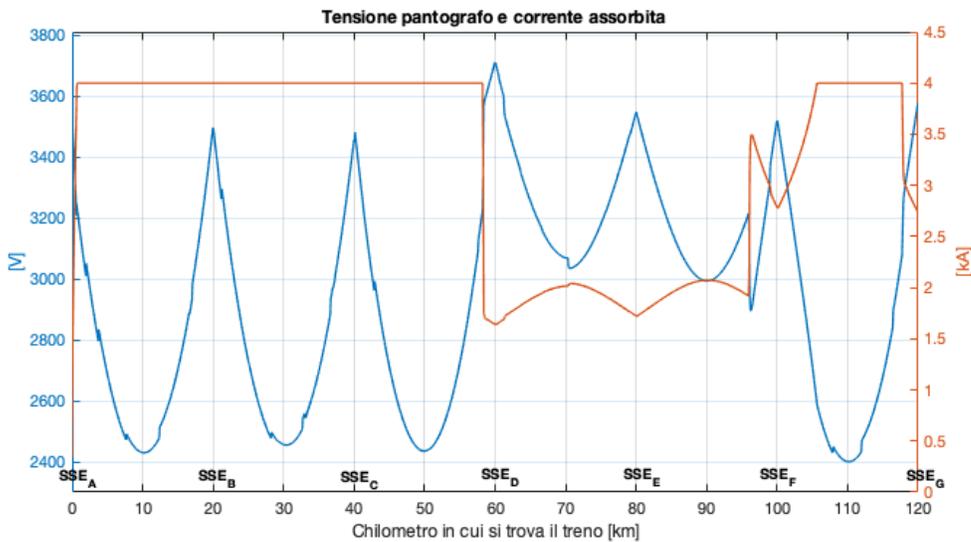


Figura 6.2.7: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 3 kV.

Invece nel sistema 2x3 kV il treno impiega 13 minuti per raggiungere la velocità di regime e appena uscito dalla galleria sta già viaggiando ai 300 km/h (nel 3 kV tale velocità viene raggiunta solamente 10 km dopo). Il tempo per percorrere i 120 km considerati è di 26,4 minuti e l'energia fornita da tutte le SSE è di 9,95 MWh, non molto inferiore rispetto all'altro sistema. Possiamo quindi evincere che introducendo una salita più lunga il sistema 3 kV inizia ad arrancare rispetto a quello nuovo, comportando anche una corrente più elevata sui conduttori della linea di contatto. Riportiamo per completezza le forme d'onda ottenute nel sistema 2x3 kV:

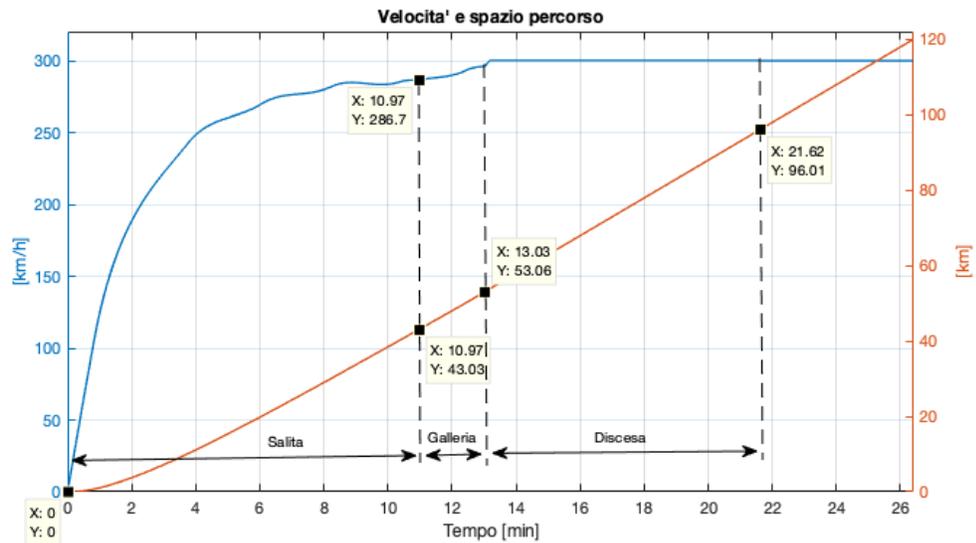


Figura 6.2.8: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 2x3kV.

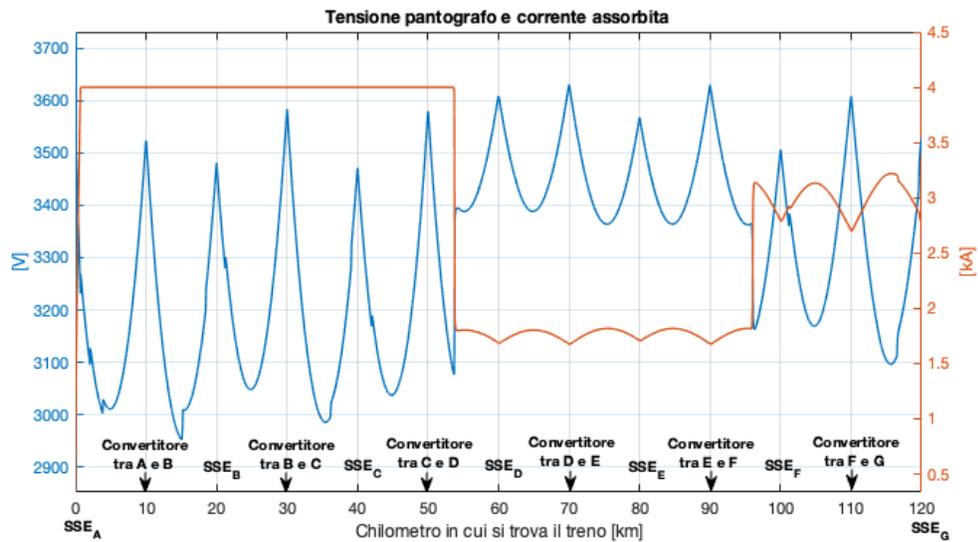


Figura 6.2.9: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 2x3 kV.

Per quanto riguarda le correnti erogate dalle SSE e dai convertitori DC/DC valgono le stesse considerazioni fatte nel paragrafo 6.2.1. Ovviamente avremo correnti leggermente maggiori di quelle precedenti ma non tali da creare problemi nei gruppi raddrizzatori.

Utilizzando la stessa configurazione per quanto riguarda il posizionamento dei tratti in pendenza e galleria, si sono assunti altri valori per la pendenza del tratto in salita e discesa. Una linea ferroviaria ad alta velocità alimentata con il sistema 2x25 kV c.a. può

supportare una pendenza massima del 21 ‰. Riportiamo in tabella i risultati ottenuti osservando sempre il treno sul binario pari:

| | $i_{\text{‰}}$ | $^{21}t_v$ [min] | t_{tot} [min] | $V_{T(media)}$ [V] | η_{medio} [%] | ^{22}E [MWh] |
|--------|----------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 3 kV | 4 | 14,3 | 26,5 | 2888,7 | 80,2 | 10,5 |
| | 15 | 16,0 | 28,6 | 2996,3 | 83,2 | 9,8 |
| | 21 | 17,5 | 29,9 | 3028,4 | 84,12 | 9,8 |
| 2x3 kV | 4 | 8 | 25,8 | 3275,6 | 90,9 | 10,1 |
| | 15 | 14,5 | 27,5 | 3321,9 | 92,3 | 9,5 |
| | 21 | 15,5 | 28,8 | 3339,2 | 92,7 | 9,5 |

Tabella 6.2.1: Risultati ottenuti per diverse pendenze con SSE distanti 20 km.

Osservando i risultati della tabella non dobbiamo allarmarci se all'aumentare della pendenza del tratto in salita l'energia diminuisca. Infatti, abbiamo considerato un tratto in discesa di uguale lunghezza e pendenza. Invece possiamo osservare come nel sistema 2x3 kV il treno raggiunge la velocità di crociera in un tempo minore. Questo si traduce in un assorbimento di corrente massima per un tempo minore evitando così di portare la linea di contatto a temperature troppo elevate nel caso in cui i treni che devono ripartire siano più di uno sullo stesso binario. Infine, il sistema 2x3 kV oltre a mantenere una tensione al pantografo ad un livello maggiore richiede anche meno energia alle linee primarie.

6.2.3 Tratta con galleria lunga 20 km

Ipotizziamo ora che una linea ad alta velocità a 3 kV con SSE distanti 16 km, incontri nel suo percorso un terreno montuoso. Visto che, come dimostrato in precedenza, nei tratti in salita i treni assorbono la massima corrente assorbibile al fine di mantenere la velocità di crociera, si è deciso di costruire una galleria lunga 20 km così da non caricare troppo la linea di contatto. Quindi grazie a questa galleria la tratta considerata presenta una pendenza nulla. Tuttavia, a causa della configurazione geografica del posto si è dovuto posizionare le due sottostazioni, tra cui è compreso il tratto in galleria, ad una distanza doppia rispetto a quella standardizzata. Per simulare tale scenario si sono considerate le 7 SSE precedenti (lunghezza totale della tratta 112 km) e si è posizionata la galleria tra le sottostazioni C e D distanti quindi 32 km l'una dall'altra. Considerando

²¹ Tempo per raggiungere la velocità di regime, 300 km/h.

²² Somma dell'energia fornita da tutte e 7 le SSE per il tempo in cui i due treni sono presenti nella tratta considerata.

quindi i due treni in partenza alle due estremità della tratta, chilometro 0 e chilometro 112, il treno sul binario dispari è caratterizzato dalle seguenti forme d'onda:

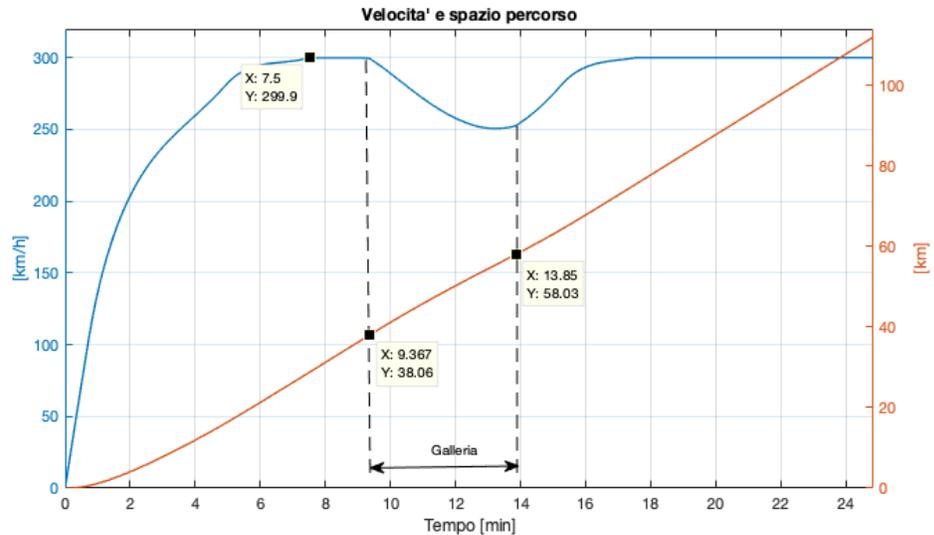


Figura 6.2.10: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 3kV.

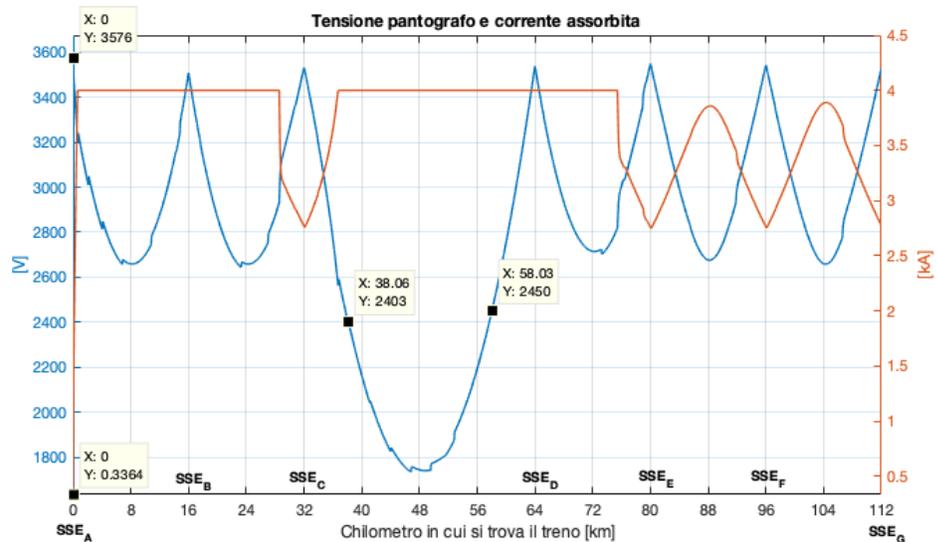


Figura 6.2.11: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 3 kV.

Dalla figura 6.2.10 possiamo intanto osservare che un treno per partire da fermo e raggiungere la velocità di 300 km/h, in una tratta priva di pendenze con alimentazione 3 kV e SSE distanti 16 km, impiega 7,5 minuti percorrendo 28,73 km. Una volta imboccata la galleria la velocità del treno diminuisce in quando la massima forza che può esplicare il motore, data dal prodotto della corrente massima per la tensione

applicata al gruppo motore, non riesce a bilanciare la forza resistente provocata dalla presenza della galleria. Possiamo inoltre notare come la tensione al pantografo si porti a valori decisamente inferiori dei 2000 V rischiando di far scattare le protezioni di minima tensione. Ovviamente nella realtà ci sarà un dispositivo che limita la corrente assorbita dal treno quando la tensione applicatagli si porta al di sotto di un certo valore, riducendo quindi ulteriormente la velocità sostenibile. Visto che tale controllore non è stato modellizzato possiamo affermare che stiamo considerando una situazione leggermente migliore, in termini di velocità con cui il treno percorre la tratta, rispetto alla situazione reale. Detto questo entrambi i treni impiegano circa 25 minuti per percorrere i 112 km considerati e la quantità di energia richiesta alle linee primarie da tutte le sottostazioni per alimentare i due treni risulta essere di 11,5 MWh.

Analizzate quindi le forme d'onda nel sistema 3 kV passiamo ad osservare quanto succede nel 2x3 kV. Immaginiamo che all'interno della galleria ci sia una zona di servizio. Possiamo quindi supporre di andare a collocare all'interno della galleria il convertitore elettronico di potenza necessario per il corretto funzionamento del sistema. Riportiamo di seguito i profili di velocità, spazio percorso, tensione e corrente ottenuti con il sistema 2x3 kV:

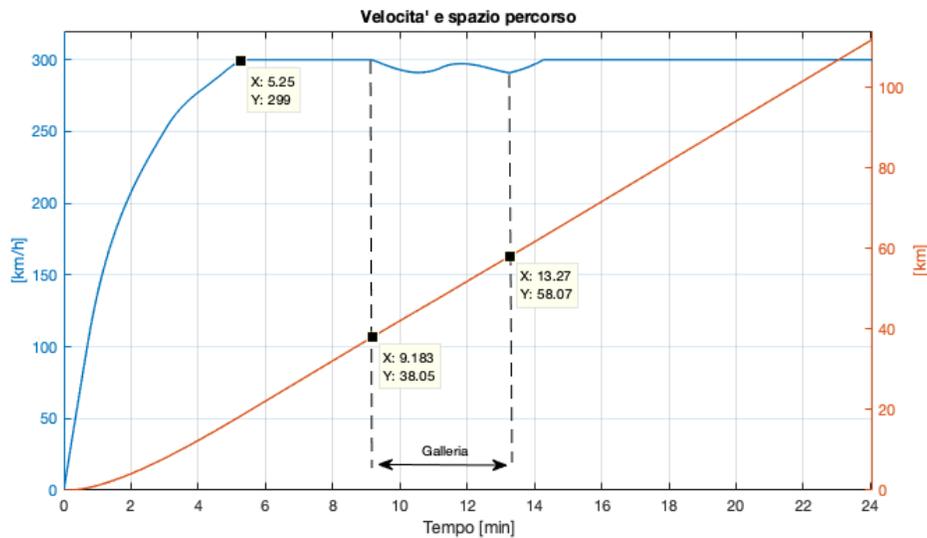


Figura 6.2.12: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 2x3 kV.

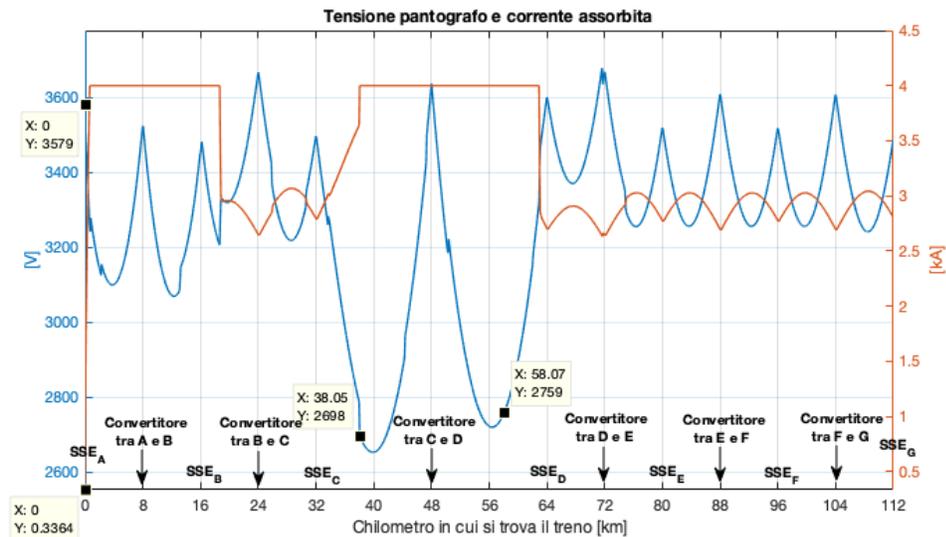


Figura 6.2.13: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 2x3 kV.

Come prima cosa dalla figura 6.2.12 possiamo osservare che, in caso di tratta piana e priva di pendenze, un treno alimentato con il sistema 2x3 kV impiega 5,25 minuti per raggiungere la velocità di 300 km/h, praticamente 2 minuti in meno rispetto al sistema 3 kV. Per quanto riguarda i valori di tensione al pantografo, quando il treno si trova in galleria, essi sono di molto superiori rispetto al limite dei 2000 V ammesso. Possiamo quindi affermare che con questa configurazione della tratta il sistema 2x3 kV riesce ad alimentare perfettamente il treno senza alcuna problematica. Il tempo impiegato dai due treni per percorrere i 120 km è di 24 minuti e la totale energia richiesta da tutte e 7 le sottostazioni risulta essere inferiore di 700 kWh rispetto a quella nel sistema 3 kV.

Come dimostrato nel sotto capitolo 5.2, tensione e corrente al pantografo hanno le forme d'onda riportate in figura 6.2.13 grazie alla presenza dei convertitori posizionati al centro di ogni tratta alimentata da due sottostazioni. I convertitori più sollecitati sono quelli posizionati tra le sottostazioni A - B su binario dispari, C - D su entrambi i binari, F - G su binario pari. Il primo e l'ultimo convertitore elencati presentano una corrente con valore di picco di 5,9 kA nel momento in cui il treno si trova in corrispondenza del rispettivo convertitore. Tale corrente di picco è giustificata dal fatto che in quei due tratti di linea i due treni sono in accelerazione chiedendo quindi una potenza maggiore rispetto a quella richiesta a regime. Per quanto riguarda i convertitori, uno su binario dispari e uno su binario pari, posizionati tra le sottostazioni C e D, le correnti erogate hanno l'andamento di seguito riportato: i chilometri sono considerati nel senso di marcia dei treni quindi binario dispari da 0 a 120 da sinistra verso destra mentre binario pari da 0 a 120 da destra verso sinistra.

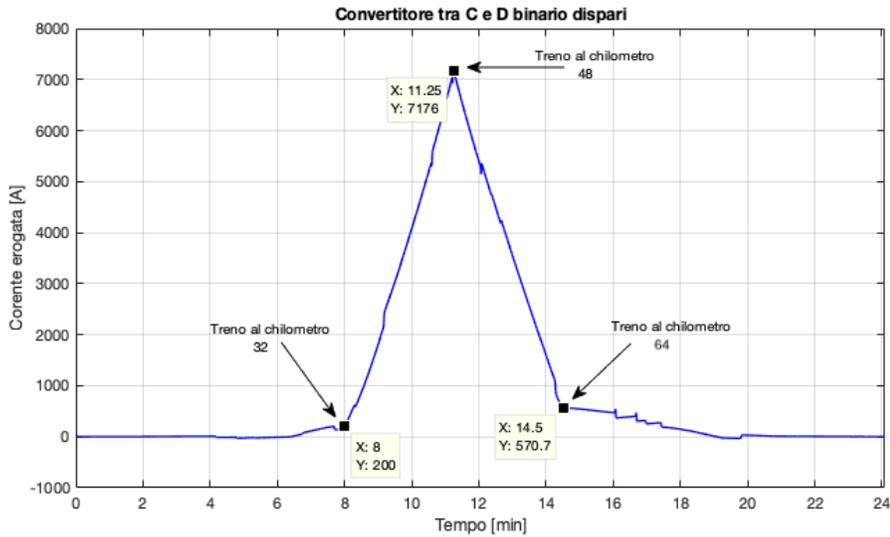


Figura 6.2.14: Profilo di corrente erogata dal convertitore tra C e D sul binario dispari.

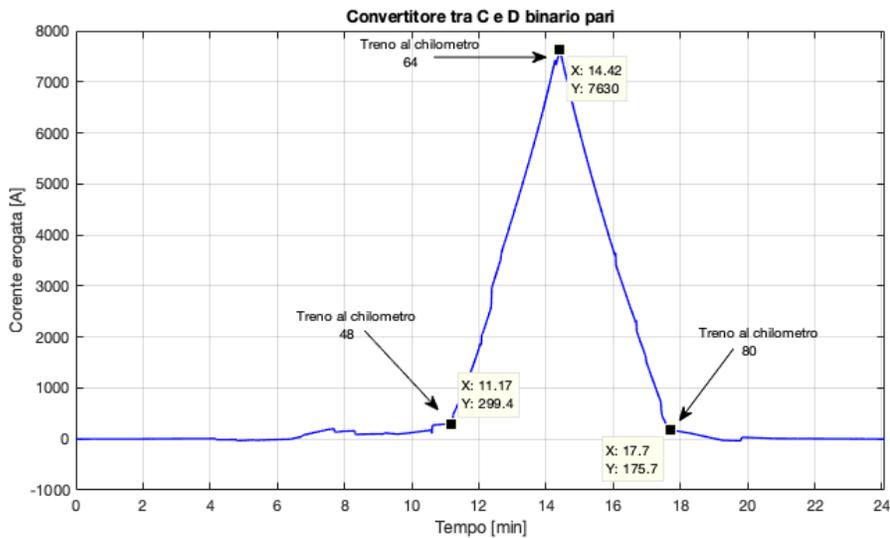


Figura 6.2.15: Profilo di corrente erogata dal convertitore tra C e D sul binario pari

Un valore così elevato di corrente è giustificato dal fatto che i due convertitori si trovano tra due sottostazioni distanti il doppio rispetto alla normale distanza. Siccome i due treni entrano nel tratto C - D in due momenti diversi, i variatori nelle SSE sono posizionati su prese diverse e quindi, diverse tensioni applicate alla linea di contatto e all'ingresso dei convertitori implicano diverse correnti erogate. Questo giustifica la lieve diversità tra le correnti erogate dei due convertitori. Gli altri convertitori sono invece percorsi da una corrente con valore di piccolo leggermente maggiore dei 4 kA visto che alimentano il treno quando è alla velocità di regime.

6.3 SSE distanti 40 km con treni viaggianti a 250 km/h

Fino ad adesso abbiamo sempre considerato una tratta già predisposta al passaggio di treni ad alta velocità e quindi con sottostazioni abbastanza vicine tra loro. In questo paragrafo vogliamo invece dimostrare che con l'implementazione del sistema 2x3 kV è possibile aumentare le velocità di percorrenza su tratte costruite per garantire velocità non superiori ai 150 km/h: per esempio la Brennero - Bolzano alimentata da 3 sottostazioni distanti 40 km l'una dall'altra, posizionate rispettivamente a Brennero, Fortezza e Prato Tires. Per il sistema 2x3 kV *continuiamo a considerare che ciascun gruppo di conversione sia costituito da due gruppi di ponti raddrizzatori connessi in serie e che ciascun gruppo di ponti raddrizzatori, feeder - binario e binario - linea di contatto, sia costituito da due ponti in parallelo.*

Consideriamo quindi le nostre 7 SSE distanziate l'una dall'altra 40 km che alimentano due treni in partenza alle due estremità della tratta, viaggianti alla velocità di 250 km/h nei due sensi di marcia. Si è scelta la velocità di 250 km/h e non 300 km/h per il seguente motivo: osservando la figura 3.4.3, con sottostazioni distanti 20 km quando il treno si trova al centro della tratta la massima potenza che può richiedere è di circa 10 MW. Utilizzando il sistema 2x3 kV con sottostazioni distanti 40 km, da un punto di vista ideale, è come se le sottostazioni fossero distanti 20 km nel sistema 3 kV. Considerando che i convertitori non sono delle vere e proprie sottostazioni elettriche, se facessimo viaggiare i treni a 300 km/h con sottostazioni distanti 40 km e alimentazione 2x3 kV il treno si troverebbe ad accelerare e decelerare raggiungendo la velocità di regime solamente nei punti in corrispondenza dei convertitori e delle sottostazioni. Ecco quindi perché la scelta dei 250 km/h comunque superiori agli attuali 150 km/h.

Per semplicità mettiamoci in una situazione ideale considerando che la tratta sia priva di pendenze e gallerie. Senza effettuare nessuna simulazione possiamo già affermare, che alimentare un treno con il sistema 3 kV viaggiante a 250 km/h e sottostazioni distanti 40 km comporterebbe delle problematiche riguardanti la tensione al pantografo e il mancato raggiungimento della velocità desiderata. Invece il sistema 2x3 kV grazie al feeder negativo e alla presenza dei convertitori elettronici di potenza potrebbe non presentare tali svantaggi.

Considereremo inizialmente i treni con un pantografo in presa (massima corrente assorbibile 2 kA) e successivamente osserveremo i benefici prodotti da un aumento della massima corrente assorbibile (due pantografi in presa) in termini di velocità raggiungibile dai treni.

Sistema 3 kV:

Forme d'onda del treno sul binario dispari con un pantografo in presa ($I_{max}=2000$ A).

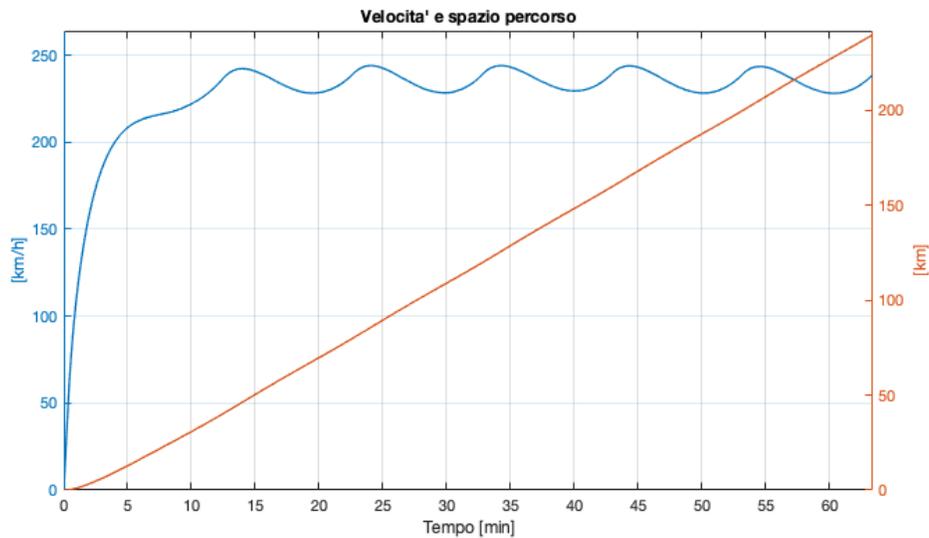


Figura 6.3.1: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 3 kV.

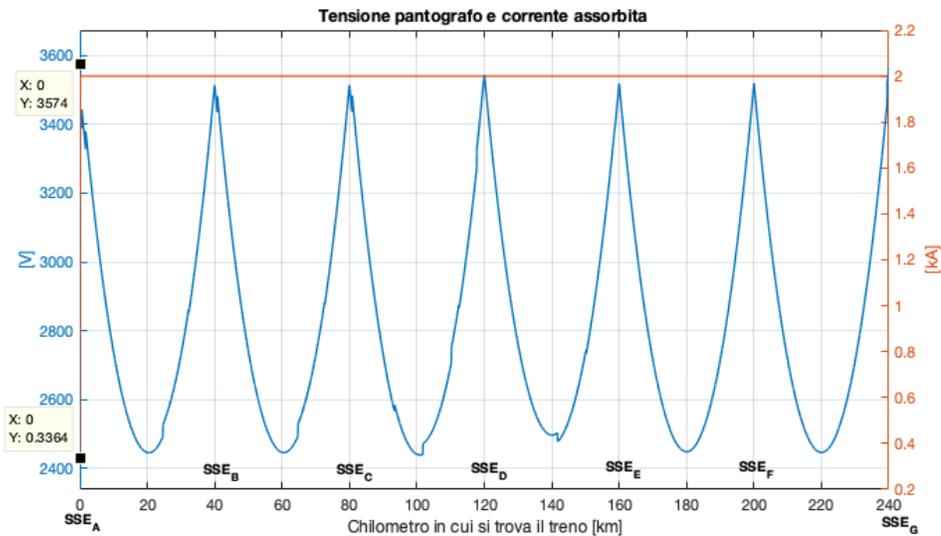


Figura 6.3.2: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 3 kV.

Dalla figura 6.3.1 possiamo notare che il treno non riesce mai a raggiungere la velocità di regime a causa della tensione troppo bassa applicata al pantografo e della massima corrente assorbibile. Infatti, quando il treno è al centro della tratta la tensione al pantografo risulta di 2450 V, che moltiplicati per i 2 kA assorbiti danno 4,9 MW contro gli oltre 5,4 MW necessari per viaggiare a 250 km/h. Ecco perché la velocità del treno

Sistema di alimentazione MVDC per la trazione ferroviaria basato sull'interconnessione delle sottostazioni esistenti

continua ad oscillare tra 230-240 km/h. Visto che comunque la tensione non scende mai al di sotto dei 2000 V minimi ammissibili, per aumentare la potenza assorbibile ipotizziamo di avere due pantografi in presa continuativa.

Forme d'onda del treno sul binario dispari con due pantografi in presa ($I_{max}=4000$ A).

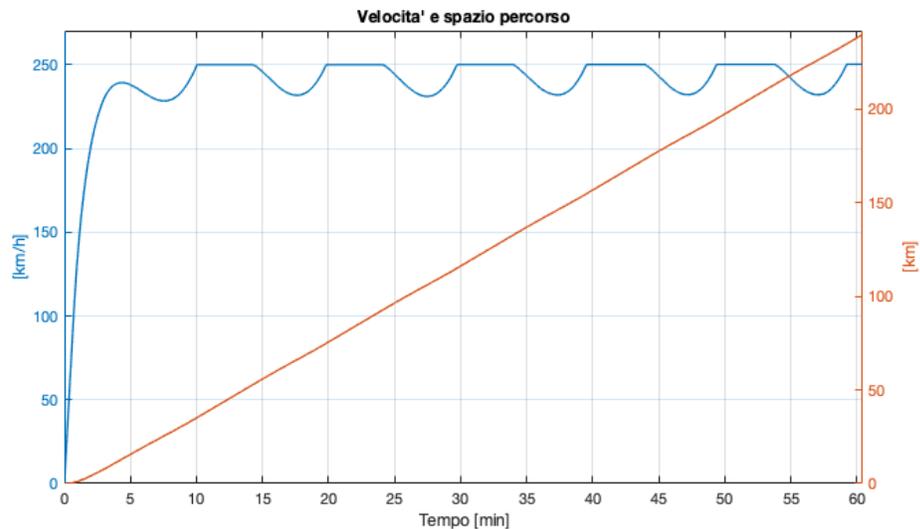


Figura 6.3.3: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 3 kV.

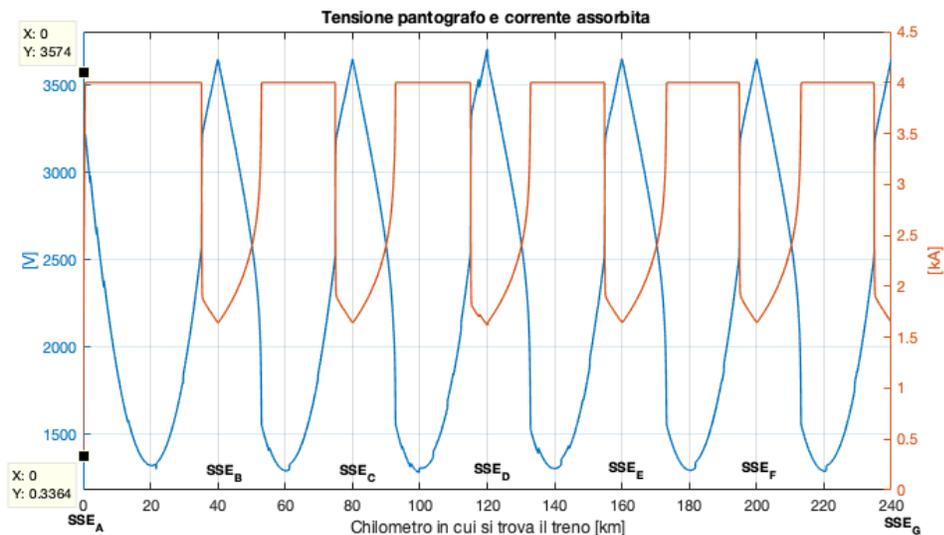


Figura 6.3.4: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 3 kV.

Dalle due ultime figure rappresentate possiamo concludere che una tratta alimentata con sistema 3 kV e sottostazioni distanti 40 km NON può essere percorsa da treni viaggianti alla velocità di 250 km/h: tensione al pantografo inferiore di 2000 V.

Sistema 2x3 kV:

Forme d'onda del treno sul binario dispari con un pantografo in presa ($I_{max}=2000$ A).

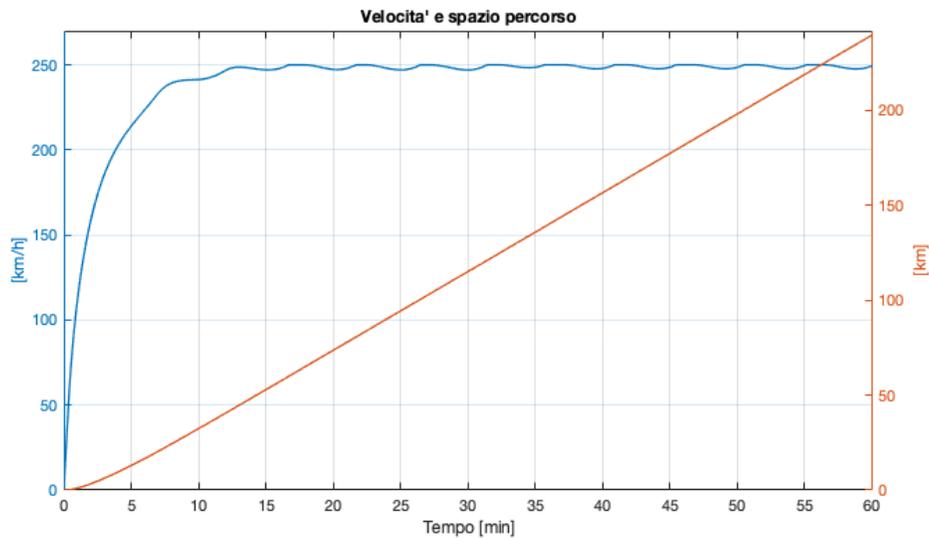


Figura 6.3.5: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 2x3 kV.

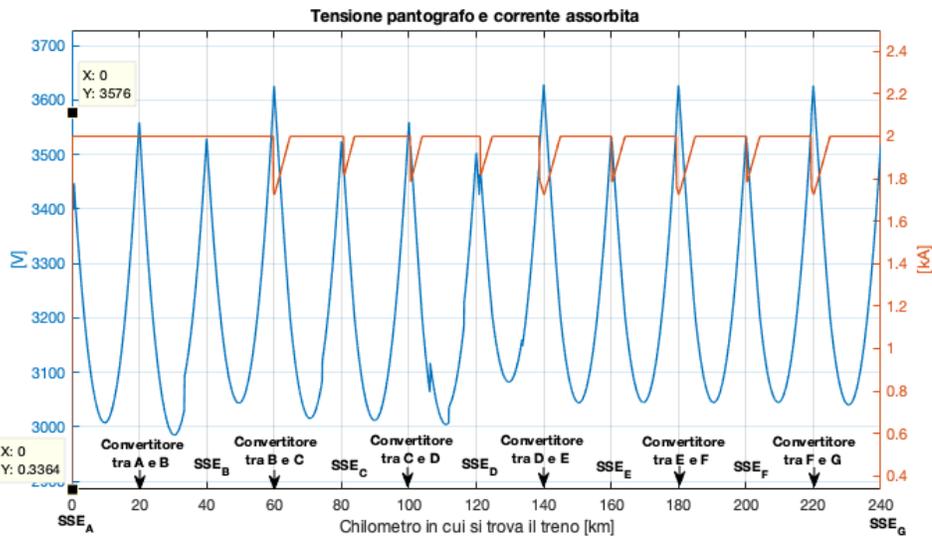


Figura 6.3.6: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 2x3 kV.

Possiamo osservare che anche con l'alimentazione 2x3 kV a causa della distanza tra le sottostazioni e della massima corrente assorbibile, il treno si troverebbe ad avere delle piccole accelerazioni e decelerazioni. Questo regime è causato dal fatto che per raggiungere la velocità di regime il treno necessita di una forza che è limitata dalla massima forza estraibile dalla linea di contatto dipendente dalla corrente massima

Sistema di alimentazione MVDC per la trazione ferroviaria basato sull'interconnessione delle sottostazioni esistenti

assorbibile e dalla tensione applicata. Vista la limitazione della massima corrente assorbibile il treno non è in grado di raggiungere i 250 km/h nel tratto iniziale e inizia quindi ad instaurarsi questo moto di accelerazioni e decelerazioni. Per risolvere tale problema consideriamo che il treno sia dotato di due pantografi in presa continuativa visto che il livello di tensione al pantografo è di molto superiore rispetto ai 2000 V minimi ammissibili.

Forme d'onda del treno sul binario dispari con due pantografi in presa ($I_{max}=4000$ A).

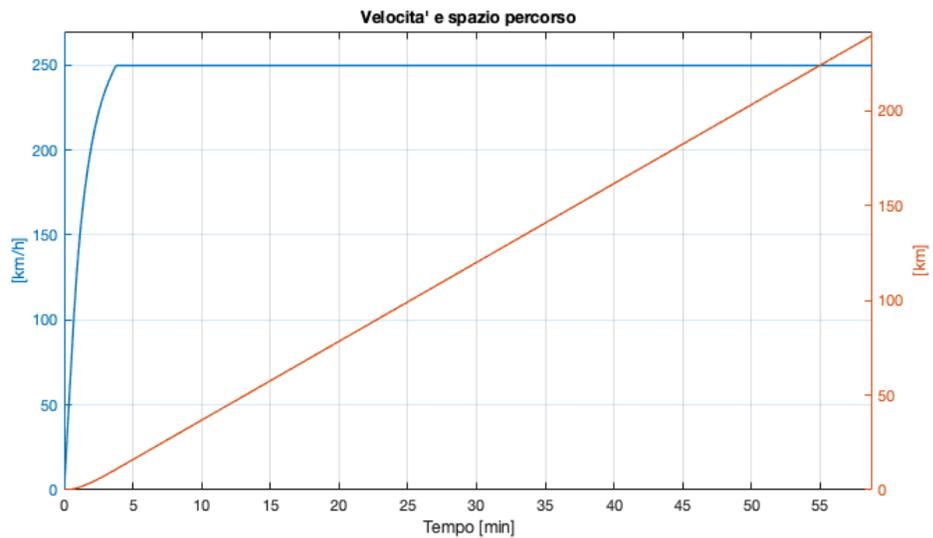


Figura 6.3.7: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 2x3 kV.

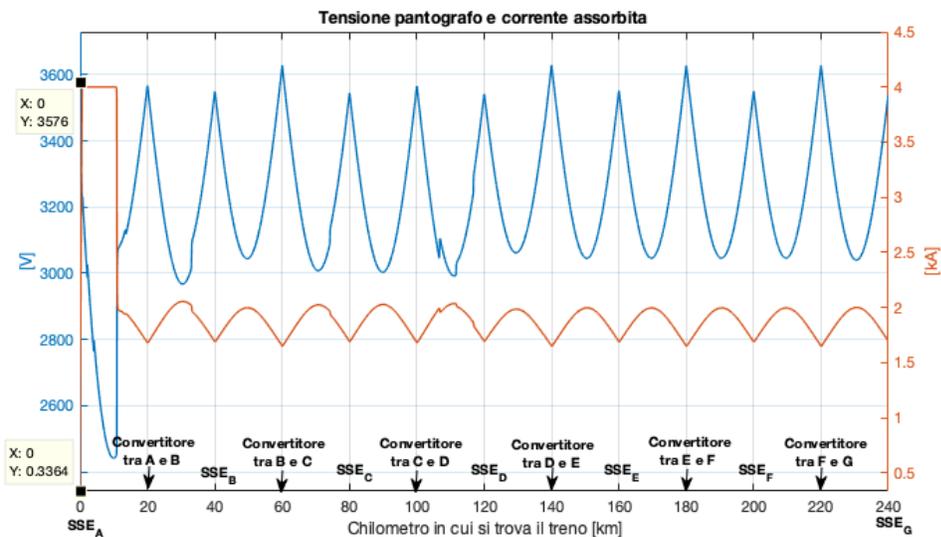


Figura 6.3.8: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 2x3 kV.

Ecco quindi che aumentando la massima corrente assorbibile da 2 a 4 kA i problemi precedentemente evidenziati vengono risolti. Possiamo quindi immaginare che durante la fase di accelerazione siano presenti due pantografi in presa continuativa per poi abbassarne uno e continuare con un solo pantografo in presa una volta raggiunta la velocità di regime. I convertitori elettronici di potenza erogano corrente con valori di picco compresi tra i 3 e 2 kA. Infine, con quest'ultima configurazione l'energia totale che devono fornire le 7 SSE per l'alimentazione dei due treni risulta essere di 15,6 MWh con un rendimento di trasmissione del 90 %.

Si è poi voluto verificare se il 2x3 kV riesce a sostenere un traffico di treni viaggianti a 250 km/h intervallati ogni 10 minuti²³ con sottostazioni distanti 40 km. Visto quanto esposto in precedenza, si è considerato che i treni una volta raggiunta la velocità di crociera proseguano il loro percorso con un solo pantografo in presa: corrente massima 2 kA. Considerando quindi 3 SSE distanti 40 km si è verificato se i criteri di verifica esposti in 3.4 vengano rispettati. Simulando il traffico ipotizzato per una durata di 144 minuti, osservando quindi il passaggio di 15 treni sul binario dispari e altrettanti su quello pari, i gruppi della sottostazione centrale presentano il profilo di carico di seguito riportato:

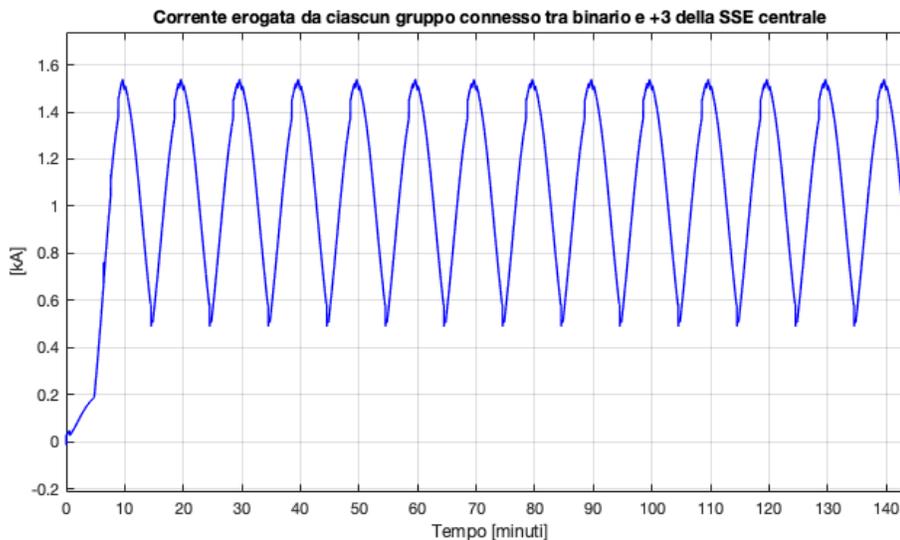


Figura 6.3.9: Corrente erogata gruppo tra binario e l.d.c. sottostazione centrale.

Ciascun treno per percorrere 40 km alla velocità di 250 km/h impiega 9.6 minuti. Passati quindi 10 minuti, la sottostazione centrale si trova a dover alimentare due treni quasi esclusivamente da sola. Ricordiamo che la totale corrente erogata alla linea di

²³ Intervallo temporale scelto per non avere più di un treno sullo stesso binario tra due SSE.

contatto è doppia rispetto a quella rappresentata visto che tutte le SSE sono composte da 2 gruppi in parallelo. Le correnti erogate dai gruppi connessi tra feeder e binario hanno invece il seguente andamento:

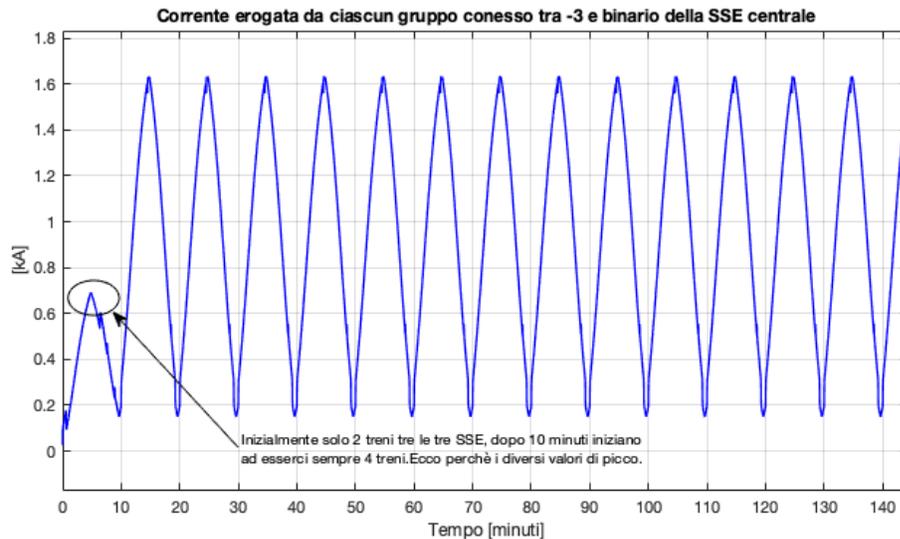


Figura 6.3.10: Corrente erogata gruppo tra feeder negativo e binario sottostazione centrale.

Possiamo quindi affermare che il carico massimo dei gruppi raddrizzatori non viene raggiunto in quanto valori di picco e corrente quadratica media sono di molto inferiori rispetto a quanto esposto in tabella 3.4.2: limiti di carico di un gruppo raddrizzatore costituito da due raddrizzatori in parallelo. Corrente e tensione al pantografo di un generico treno sul binario dispari hanno invece le seguenti forme d'onda:

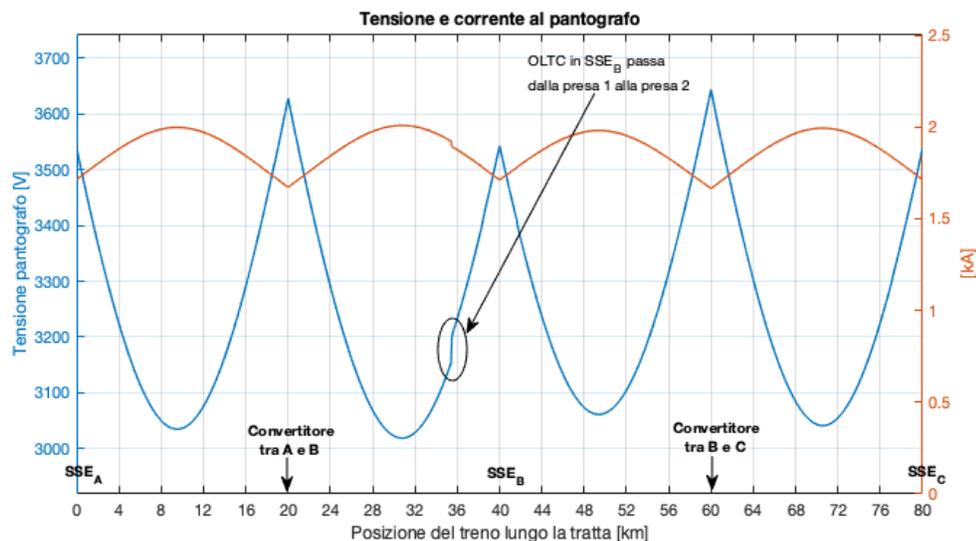


Figura 6.3.11: Tensione e corrente di un generico treno sul binario dispari.

Un tale livello di tensione è mantenuto grazie ai convertitori elettronici di potenza. Riportiamo di seguito la corrente erogata dal convertitore posto sul binario dispari tra le sottostazioni A e B.

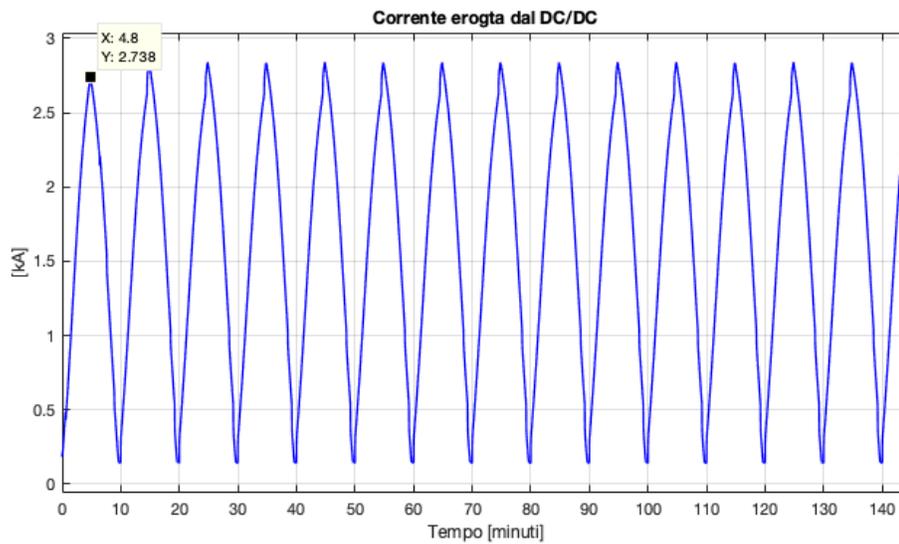


Figura 6.3.12: Corrente erogata dal DC/DC binario dispari tra A e B.

Manca quindi da verificare che la temperatura dei conduttori della linea di contatto non superi gli 80 °C. Ipotizzando una temperatura ambiente di 40 °C si ha il seguente profilo di temperatura:

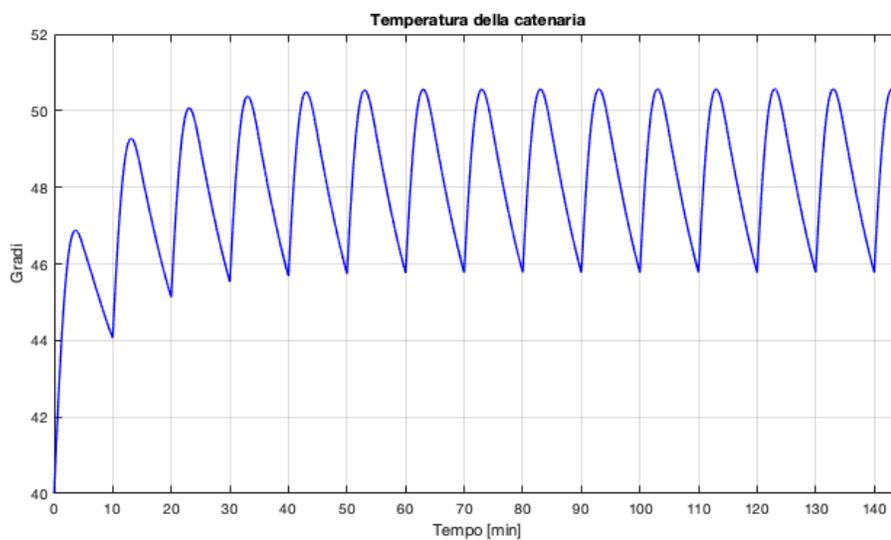


Figura 6.3.13: Temperatura linea di contatto con ambiente a 40 °C.

Da quanto sopra esposto tutti i criteri di verifica sono rispettati. Possiamo quindi affermare che con il sistema 2x3 kV possiamo sostenere un traffico di treni viaggianti a una velocità di 250 km/h intervallati ogni 10 minuti con sottostazioni distanti 40 km.

6.4 A 350 km/h sulla Direttissima Firenze - Roma

Visto il sempre più presente avanzamento tecnologico per quando riguarda le massime velocità raggiungibili dai treni, vogliamo concludere la parte delle simulazioni chiedendoci se il sistema 2x3 kV riesce a sostenere una velocità di 350 km/h. Per viaggiare a tale velocità un elettrotreno veloce richiede circa 15 MW al pantografo. Quindi visto il modesto livello di tensione continua, tensione nominale 3.6 kV, abbiamo ipotizzato che il treno sia dotato di uno o più pantografi capaci di assorbire correnti massime fino a 6 kA altrimenti, con 4 kA assorbibili, la massima potenza al pantografo sarebbe di 12 MW senza considerare le cadute di tensione in linea.

Consideriamo quindi il caso della direttissima Firenze - Roma, sottostazioni distanti 16 km, con alimentazione 2x3 kV. Utilizzando le 7 classiche SSE e i due treni in partenza dai due estremi della tratta, il treno sul binario dispari presenta i seguenti andamenti:

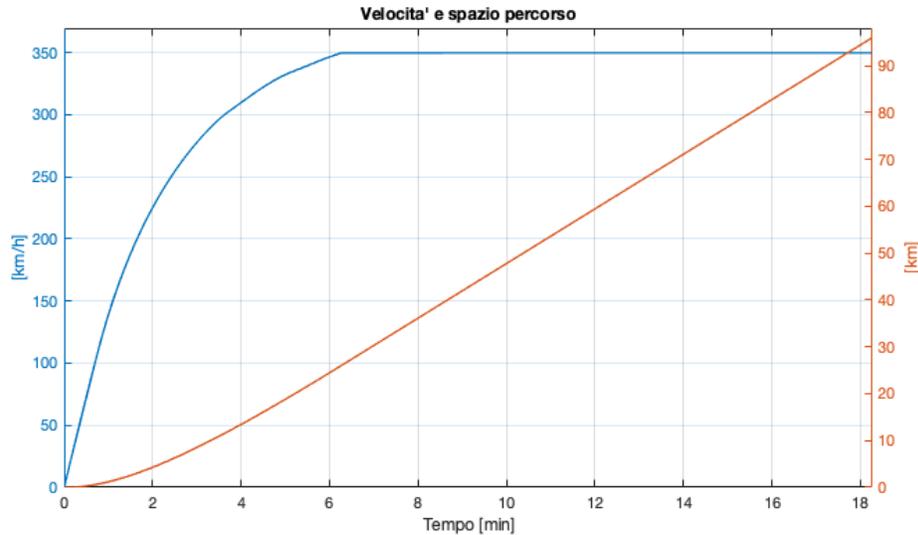


Figura 6.4.1: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 2x3 kV.

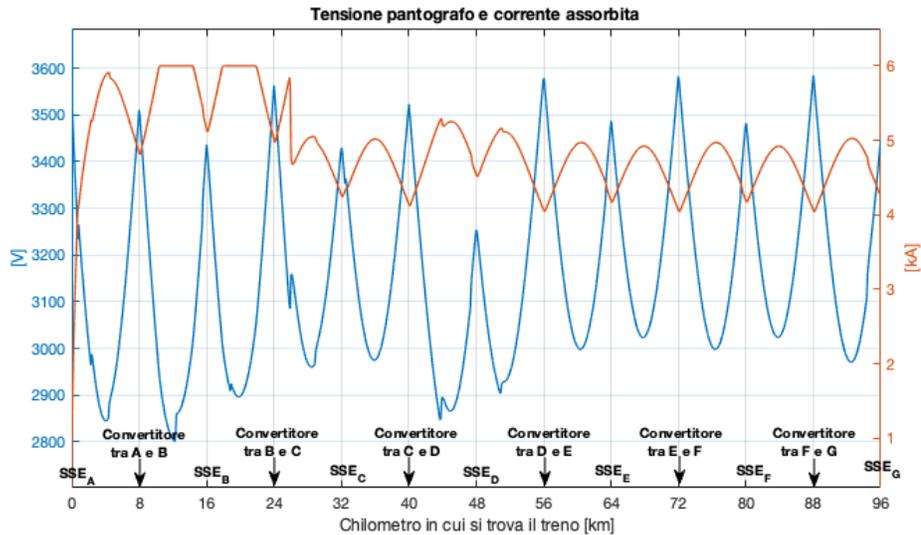


Figura 6.4.2: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 2x3 kV.

Possiamo quindi notare come la tensione al pantografo si mantiene entro i limiti e che il treno raggiunge la velocità di regime in circa 6 minuti partendo con una accelerazione di $0,7 \text{ m/s}^2$. L'abbassamento di tensione presente tra le sottostazioni C, D ed E è causato dal fatto che al chilometro 48 entrambi i treni vengono alimentati per la maggior parte dalla sottostazione D comportando un'erogazione di corrente di 6 kA da parte dei due gruppi connessi tra binario e linea di contatto e 4 kA da parte degli altri due connessi tra feeder e binario, aumentando di conseguenza la caduta di tensione sulla resistenza rappresentante il fenomeno della commutazione con conseguente diminuzione della tensione applicata alla linea di contatto.

Per verificare se un tale traffico veloce potrebbe essere sostenuto dalla direttissima con alimentazione 2x3 kV si è effettuata un'altra simulazione considerando una tratta con 3 sottostazioni percorsa da treni viaggianti alla velocità di 350 km/h intervallati ogni 5 minuti: come in 6.1 solamente aumentando la velocità di crociera. Si è quindi osservato se i criteri di verifica elencati in 3.4 vengano rispettati. *Considerando che ciascun gruppo di conversione sia costituito da due gruppi di ponti raddrizzatori connessi in serie e che ciascun gruppo di ponti raddrizzatori, feeder - binario e binario - linea di contatto, sia costituito da due ponti in parallelo*, il carico massimo ammissibile dei gruppi raddrizzatori viene rispettato in quanto le correnti di picco e la corrente quadratica media risultano inferiori dei limiti riportati in tabella 3.4.2. Riportiamo di seguito le forme d'onda relative a uno dei due gruppi di conversione presenti nella sottostazione centrale.

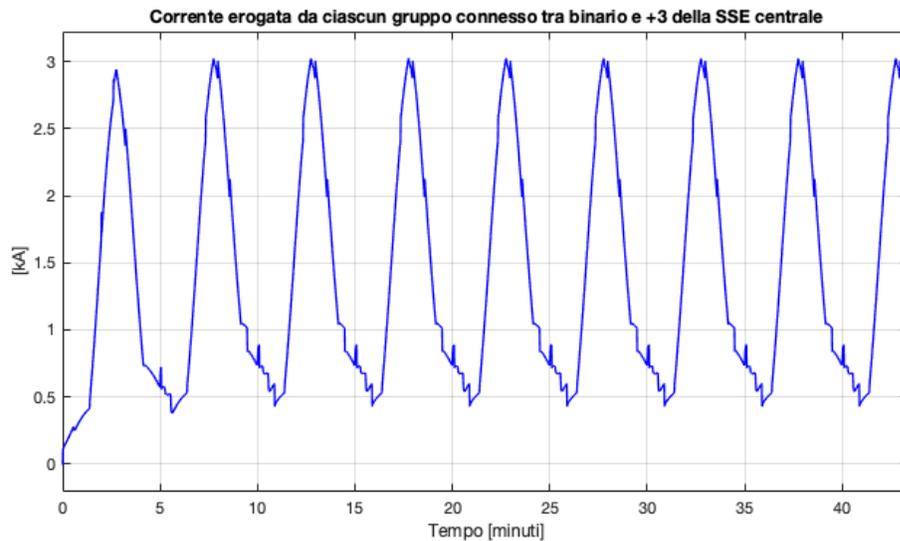


Figura 6.4.3: Corrente erogata gruppo tra binario e l.d.c. sottostazione centrale.

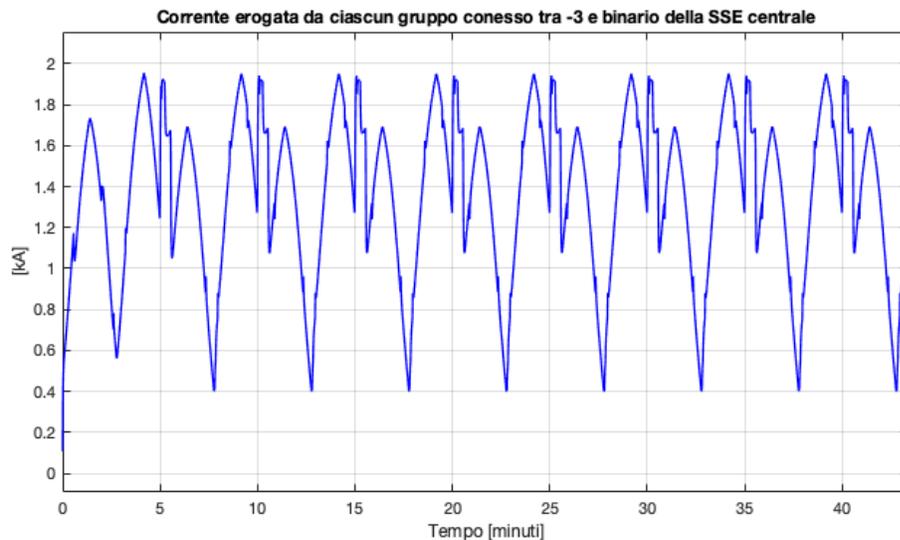


Figura 6.4.4: Corrente erogata gruppo tra feeder negativo e binario sottostazione centrale.

I convertitori elettronici di potenza invece, erogano correnti con valori di picco pari a 6 kA quanto il treno passa per i rispettivi punti in cui sono connessi.

Per quanto riguarda le forme d'onda di tensione e corrente al pantografo esse sono leggermente diverse di quelle rappresentate in figura 6.4.2. Infatti, nella situazione precedentemente studiata i due treni si avvicinavano alle sottostazioni che erano inizialmente scariche così che negli istanti iniziali la tensione applicata alla linea di contatto risultava effettivamente di 3600 V senza caduta dovuta alla commutazione.

Nelle attuali ipotesi di traffico, tensione e corrente al pantografo di un generico treno sul binario dispari presentano il seguente andamento:

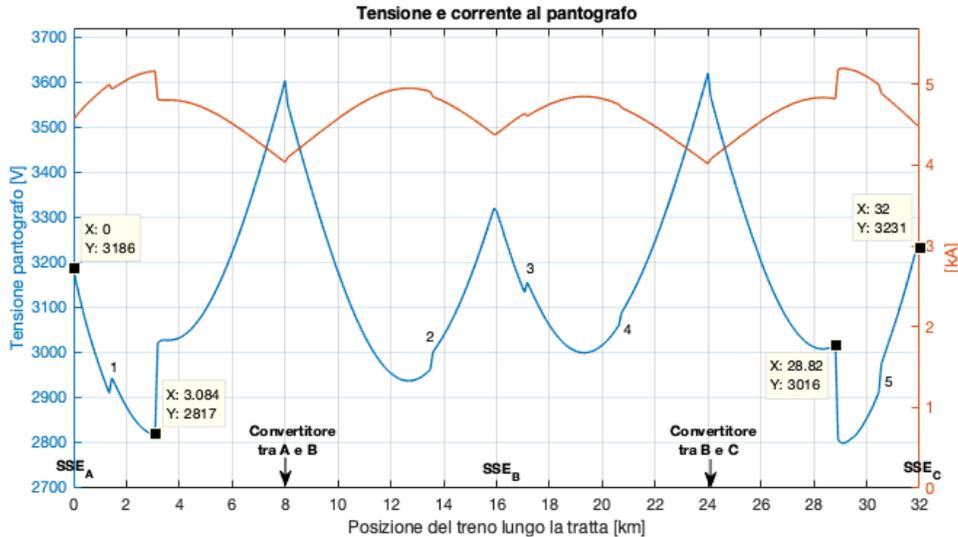


Figura 6.4.5: Tensione e corrente di un generico treno sul binario dispari alimentato con sistema 2x3 kV.

In corrispondenza dei numeri 1, 2, 3, 4 e 5 riportati in figura, la tensione al pantografo aumenta grazie all'intervento del variatore in una delle due sottostazioni tra cui è compreso il treno. Invece, l'aumento di tensione al chilometro 3 e l'abbassamento al chilometro 28, sono dovuti rispettivamente all'uscita di un treno sul binario pari dalla tratta e all'ingresso di un nuovo treno sempre sul binario pari nella tratta. Infine, al chilometro 32 il treno presenta una tensione maggiore rispetto a quella del chilometro 0 per il seguente motivo: quando il treno sul binario dispari si trova al chilometro 28, un altro treno sul binario pari si presenta in corrispondenza della sottostazione C provocando un abbassamento della tensione applicata alla linea di contatto; passati 30 secondi interviene il variatore della sottostazione C (punto 5) così da applicare una tensione alla linea di contatto maggiore rispetto a quella applicata dalla sottostazione A nell'istante iniziale. Le forme d'onda di tensione e corrente di un treno sul binario pari sono speculari rispetto a quelle rappresentate.

Manca quindi da verificare che la temperatura della linea di contatto non superi gli 80 °C massimi ammissibili. Ipotizzando di essere nelle condizioni peggiori per quanto riguarda la temperatura ambiente (40 °C) la temperatura dei conduttori della linea di contatto oscilla tra i 62 e 72 °C. Riportiamo in figura l'andamento della temperatura dei conduttori del binario dispari tra le sottostazioni A e B:

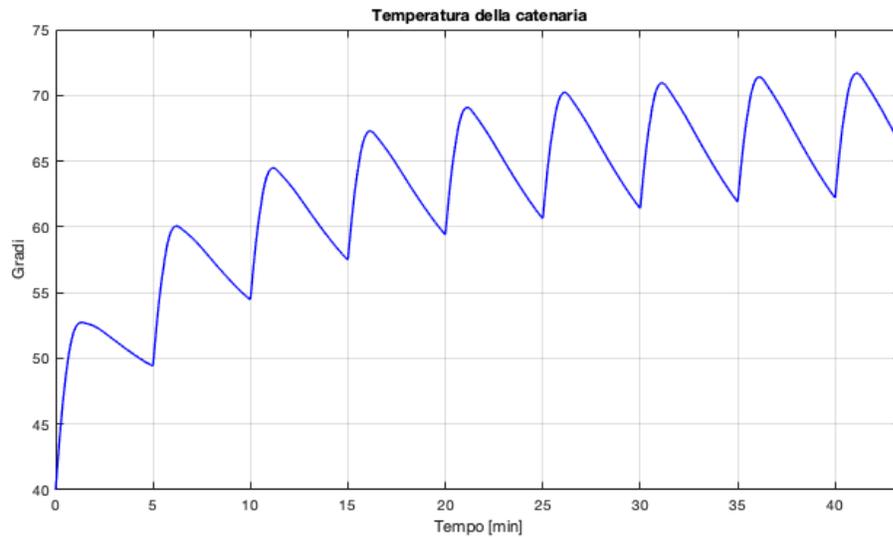


Figura 6.4.6: Temperatura linea di contatto.

Tutti i criteri di verifica sono rispettati e quindi abbiamo dimostrato che con il sistema 2x3 kV e sottostazioni distanti 16 km è possibile viaggiare a 350 km/h.

Riportiamo a titolo di esempio il profilo di velocità, lo spazio percorso e tensione e corrente al pantografo di un treno che cerca di viaggiare a 350 km/h su una tratta con sottostazioni distanti 16 km e alimentazione 3 kV.

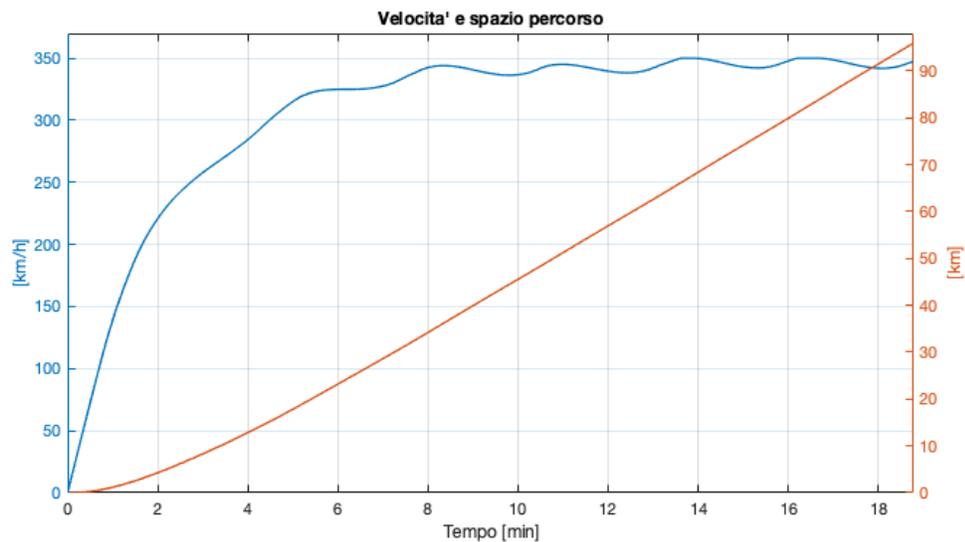


Figura 6.4.7: Profilo di velocità e spazio percorso treno binario dispari sistema 3 kV.

Il treno non riesce a raggiungere la velocità di regime in quanto a causa della caduta di tensione e della massima corrente assorbibile, i 15 MW necessari al pantografo non vengono mai forniti.

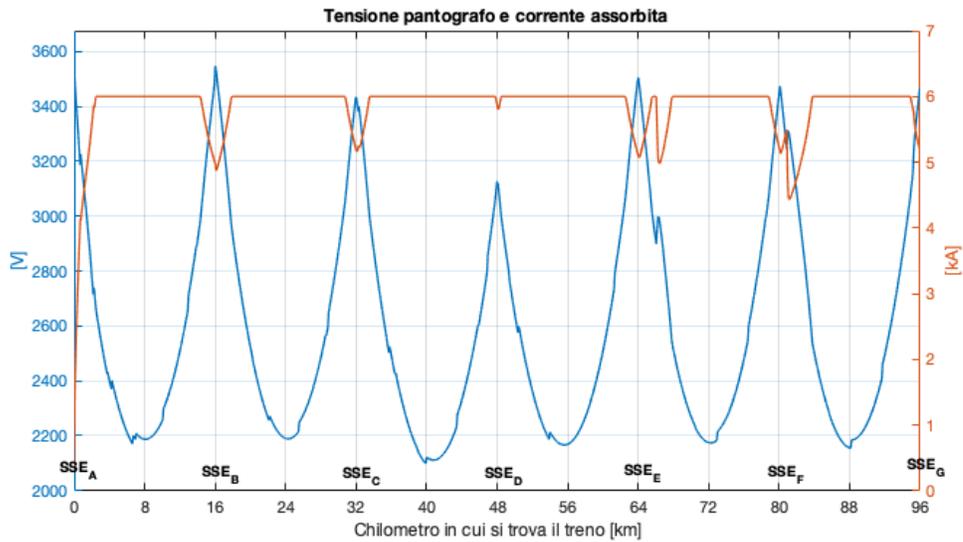


Figura 6.4.8: Tensione e corrente pantografo treno binario dispari sistema 3 kV.

Dalla figura 6.4.8 possiamo capire che anche se aumentassimo la massima corrente assorbibile le cadute di tensione aumenterebbero portando di conseguenza la tensione al pantografo a valori inferiori ai 2000 V. In sostanza, il sistema 3 kV non è in grado di sostenere un tale traffico.

7. CONCLUSIONI

Dalle simulazioni effettuate possiamo evincere che sfruttando l'infrastruttura esistente della trazione a 3 kV in corrente continua e introducendo un feeder, un convertitore elettronico di potenza intermedio e due ponti raddrizzatori per gruppo, oltre a quelli già presenti in sottostazione, possiamo incrementare le potenzialità della trazione elettrica in corrente continua. Nel 2x3 kV grazie a un più alto livello di tensione, abbiamo minori correnti in linea così da poter sostenere un traffico di treni ad alta velocità intervallati ogni 5 minuti anche con SSE distanti 20 km. Particolarmente importante è l'aumento delle potenzialità delle tratte con sottostazioni distanti 40 km che grazie al nuovo sistema possono essere percorse da treni viaggianti a 250 km/h intervallati ogni 10 minuti. Infine, nel caso di tratte con diverse configurazioni altimetriche, gallerie e maggiori distanze tra le SSE, il 2x3 kV si è dimostrato molto più efficiente permettendo di percorrere le tratte con velocità maggiori rispettando i limiti imposti dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità.

Il nuovo sistema deve tuttavia essere accompagnato dall'avanzamento tecnologico sia per quanto riguarda la possibilità di utilizzare convertitori elettronici in grado di erogare elevate correnti, sia per la massima corrente assorbibile dai pantografi. Infatti, nel corso della tesi si è sempre ipotizzato che due o più pantografi in presa non creino problemi di captazione della corrente garantendo quindi di percorrere le tratte a 300 - 350 km/h.

Per quanto riguarda gli studi futuri ci si dovrà concentrare sull'architettura e tipologia del convertitore da utilizzare, svolgere un'attenta analisi sulle correnti di guasto a causa di un corto circuito sulla linea di contatto, verificare se il contenuto armonico del convertitore può essere fonte di disturbo elettromagnetico ed infine mettere a confronto il 2x3 kV con l'attuale sistema utilizzato per l'Alta Velocità/ Alta Capacità.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia in primis il mio relatore Mauro Andriollo per l'aiuto datomi durante questi sei mesi di tesi e per avermi concesso la possibilità di studiare un argomento interessante e si spera di futura applicazione.

Ringrazio inoltre i miei genitori, Stefano e Angela, per l'educazione ricevuta e per non avermi mai fatto mancare niente, la mia sorellona Silvia che mi ha sempre voluto bene e sostenuto in tutto e per tutto e le famiglie Doti e Mattana.

Si ringraziano ulteriormente i partigiani: Tonno, Stefa, Lotty, Guido, Vise e Borto compagni di ventura e fratelli insostituibili (se dovessi ringraziarvi uno ad uno verrebbe fuori un'altra tesi), Davide Sartori con cui ho passato i migliori anni della mia vita, Bozzolo (detto Nick the Situation) per i saggi consigli, Carolina e Bombetto per la costante felicità, i compagni dell'università Enrico, Matteo, Davide, Riccardo, Barbara, Sara, Aki per avermi sopportato e aiutato nei tre anni passati insieme, Roberta per i bei momenti, la Caminese con tutti i ragazzi annessi per le gioie e i dispiaceri di questi ultimi anni e infine Lisbona per avermi accolto tra le sue braccia e avermi fatto conoscere dei coinquilini e amici indimenticabili (Cristiana, Giovanni, Simone, Marco, Enrica, Daria, Roberto, Ingrid, Orla, Toghurul).

Un ringraziamento speciale va fatto a Francesco fedele compagno di studi e di avventure, diventato ormai un fratello, con cui mi sono potuto confrontare in qualsiasi momento e che ha sopportato per 5 anni la mia infinita dose di ansia e capelli bianchi. Grazie per avermi sempre concesso un divano.

Per concludere devo dire grazie a mio cugino Davidone fonte di ispirazione e maestro di vita, senza di te non so chi e cosa sarei diventato.

No, non mi sono dimenticato di voi! Ringrazio anche le donne dei partigiani: Elena, Daria, Alessandra, Maria che hanno portato oltre all'organizzazione del gruppo anche una buona dose di ignoranza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Aeberhard, C. Courtois, P. Ladoux, "Railway Traction Power Supply from the state of the art to future trends", *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2010.
- [2] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, *Trasmissione del calore*, Padova, Cleup, 2014.
- [3] M. Brenna, F. Foadelli, D. Zaninelli, *Electrical Railway Transportation Systems*, Piscataway (NJ), IEEE Press, 2018.
- [4] R. Benato, L. Fellin, *Impianti elettrici*, Milano, Wolters Kluwer, 2014.
- [5] M. Chymera, C.J. Goodman, "The calculation of train performance", *University of Birmingham*.
- [6] Corso di *Sistemi elettrici per l'industria ed i trasporti*, Prof. R. Turri, Padova, 2018/2019.
- [7] V. Finzi, *Trazione elettrica, linee primarie e sottostazioni*, Genova, Coedit, 2002.
- [8] V. Finzi, D. Cervetto, *Trazione elettrica linee di contatto*, Genova, Coedit, 2003.
- [9] V. Finzi, *Impianti di sicurezza*, Genova, Coedit, 2001.
- [10] M. Bisiacco, M. E. Valcher, *Controlli Automatici*, Padova, Libreria Progetto, 2015.
- [11] M. Guarnieri, A. Stella, *Principi ed applicazioni di elettrotecnica*, Padova, Edizioni Progetto Padova, 2004.
- [12] L. Mayer, *Impianti ferroviari*, Roma, Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 1993.
- [13] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Elettronica di potenza*, Milano, Hoepli, 2017.
- [14] M. U. Nawaz, "Estimation of Running Resistance in Train Tunnels", *Norwegian University of Science and Technology*.

- [15] J.D. Pàez, D. Frey, J. Maneiro, "Overview of DC-DC Converters Dedicated to HVDC Grids", *IEEE Transactions Power Delivery*, vol.34, n.1, pp.119 - 128, febbraio 2019.
- [16] J. Rull-Duran, J. Bergas-Jane, S. Galceran-Arellano, A. Sumper, J. Coves-Moreno, "Power electronics improving 3 - wire DC railways electrification", *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009.
- [17] A. Steimel, *Electric Traction - Motive Power and Energy Supply*, 2014.
- [18] A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron, C. Courtois, "New Medium - Voltage DC Railway Electrification System", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol.4, n.2, pp.591 - 604, giugno 2018.
- [19] J. I. Prada Vázquez, "Sistema de electrificación ferroviaria 2x3000 V", Madrid, 2009.