



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ASTRONAUTICA, ELETTRICA ED  
ENERGETICA

# **Progettazione linea di trazione 3 kV**

## **SISTEMI ELETTRICI PER LA MOBILITÀ**

**Gruppo H**

Alessandro Uncini  
Mario Cascini  
Paolo Carboni

---

A.A. 2022/2023

# Contents

1	Introduzione	2
2	Andamenti della potenza nel tempo	3
3	Posizionamento delle SSE	5
4	Cadute di tensione	7
5	Massima densità di corrente	8
6	Sovraccaricabilità delle SSE	9
7	Selettività delle protezioni	10

# 1 Introduzione

In questa esercitazione si pone l'obiettivo di elettrificare una linea ferroviaria in DC a 3kV precedentemente simulata. La tratta si trova in Sardegna e collega la città di Bosa con la città di San Nicolò d'Arcidano seguendo il tracciato riportato in figura 1. La suddetta linea è stata pensata e progettata per un traffico regionale visto il luogo in cui è situata e le città che si vanno a collegare, motivo per il quale la train performance è stata simulata con il TAF (locomotore di rango B con velocità massima di  $140 \frac{km}{h}$ ).

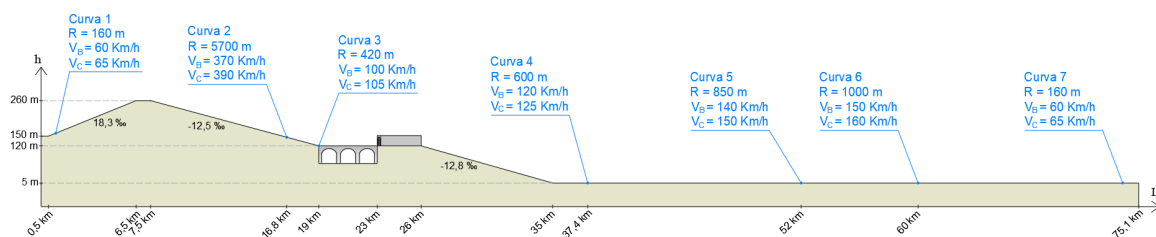


Figure 1: Tracciato Bosa - San Nicolò d'Arcidano

Nella figura 2 si riportano dei risultati generali della train performance, velocità e potenza richiesta al pantografo con una frenatura mista ma escludendo potenziali energie recuperabili.

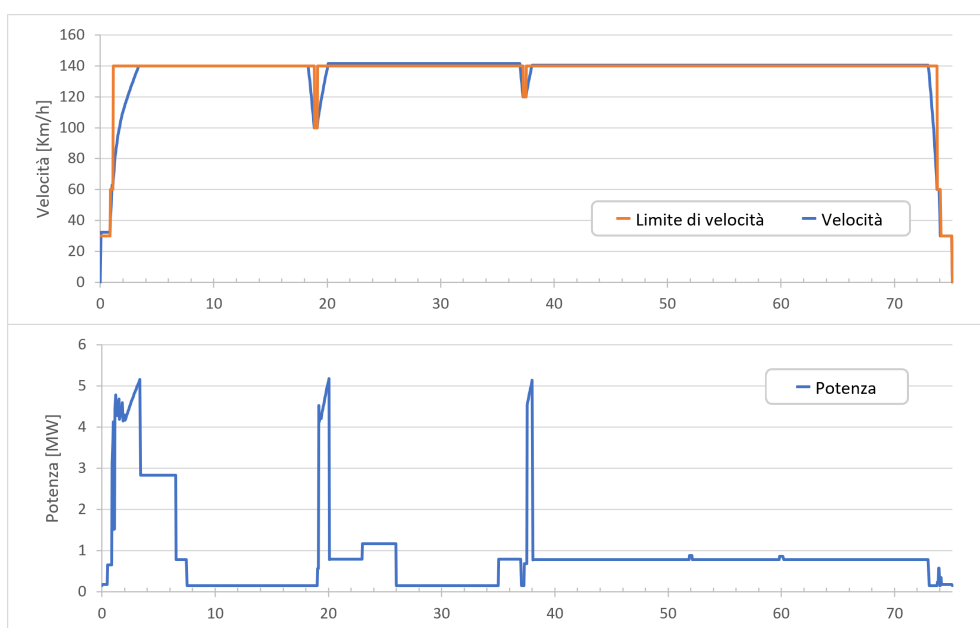


Figure 2: Velocità e potenza al pantografo, TAF, binario 1

Per l'elettificazione della tratta ferroviaria occorre:

- scegliere il posizionamento delle SSE, la dimensione e il numero dei gruppi nelle SSE e la sezione equivalente;
- verificare che le cadute di tensione non scendano sotto dei valori prestabiliti;

- verificare la massima densità di corrente sui conduttori;
- verificare la selettività delle protezioni andando a simulare un guasto in linea.

## 2 Andamenti della potenza nel tempo

Per la progettazione delle SSE si è fatto riferimento al TAF per i motivi sopra citati. Dalla train performance si è simulato un traffico omotachico con cadenzamento ogni 5 minuti partendo dalle ore 7:00 fino alle ore 8:00 considerando la linea sempre carica. Nella figura 3 si riporta la potenza totale richiesta dalla linea (binario 1 più binario 2) nel tempo di simulazione, questo grafico è stato ricavato utilizzando uno script in Matlab (riportato nell'appendice A).

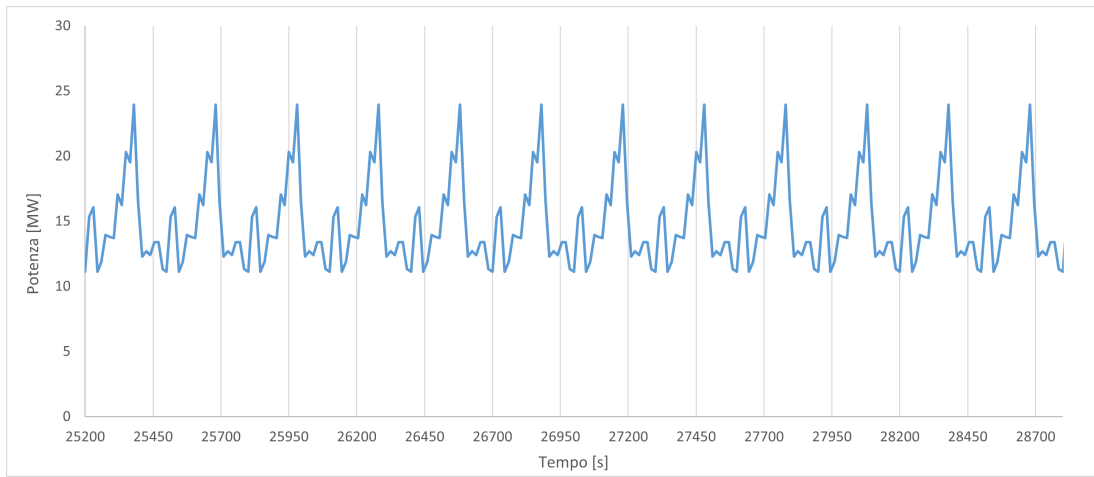


Figure 3: Potenza totale richiesta dalla linea

Si può osservare un andamento periodico della potenza ogni 5 minuti, allora in seguito, per il dimensionamento della linea, si farà riferimento dove possibile solo ad un periodo. Nella figura 4 si notano 2 picchi di potenza a 25 350 s e 25 380 s.

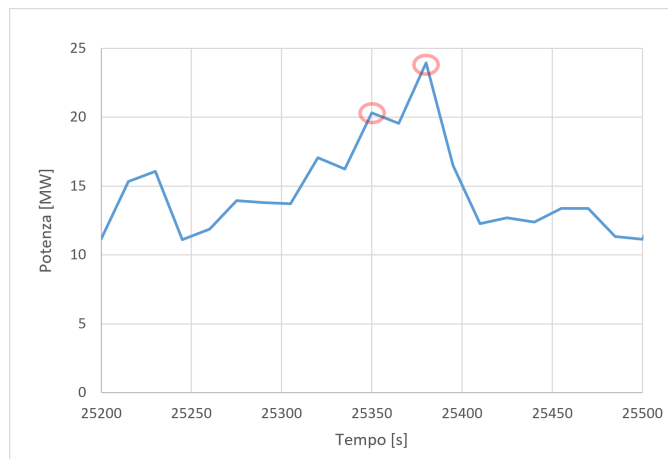


Figure 4: Potenza totale richiesta dalla linea in un periodo

Si osserva però che il valore di potenza riportato nei grafici 3 e 4 è totale, cioè è la somma della richiesta di potenza di tutti i treni lungo il tracciato. Questo valore non ci permette di distinguere la sovraccaricabilità di una SSE rispetto ad altre. Per descrivere meglio questo problema si riporta nella figura 5 un esempio generale prendendo 2 generiche linee con 3 SSE e una potenza totale uguale di 20 MW ma con diverse distribuzioni dei carichi. Si vede che nel primo caso la SSE in posizione centrale vede nei suoi tratti di competenza 2 carichi di 10 MW, mentre nel secondo caso la SSE centrale vede 2 carichi da 5 MW. In conclusione, anche se in entrambi i casi si ha lo stesso valore della potenza totale, nel primo caso la SSE erogherà una potenza maggiore e quindi ci troveremo in una condizione più gravosa dal punto di vista del dimensionamento.

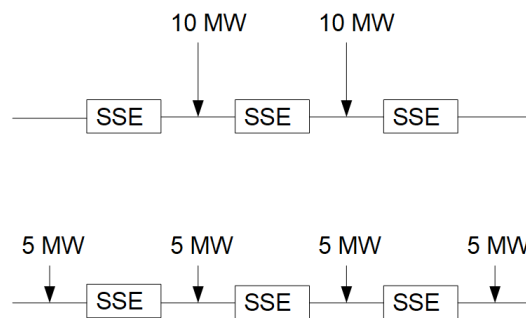


Figure 5: Esempio di distribuzione della potenza totale nella linea

### 3 Posizionamento delle SSE

La scelta dell'ubicazione delle SSE è stata svolta in base a criteri relativi alla presenza di accidentalità che rendessero difficile l'edificazione, la presenza di ponti o gallerie che complicherebbero la realizzazione, ottimizzando l'interdistanza specialmente in prossimità di zone particolarmente accidentate dove ci si aspetta un traffico più denso con richieste di potenza maggiori. In generale altri criteri da tenere in considerazione sono:

- Vicinanza ai centri urbani
- Vicinanza rete primaria

Il posizionamento scelto delle SSE è quello riportato in figura:

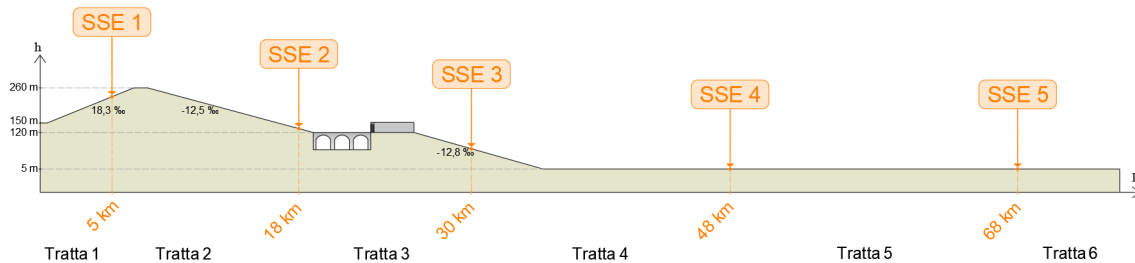


Figure 6: Posizione SSE sulla linea

Tutte le tratte della linea sono alimentate in bilaterale ad eccezione di quelle alle estremità, alimentate a sbalzo rispettivamente dalle SSE1 e SSE5. Per omologare il parco macchine su tutta la linea si è scelto di adottare tutti gruppi uguali con le seguenti caratteristiche:

- Potenza nominale 5.4 MVA
- Tensione a vuoto 3.6 kV
- Resistenza interna  $0.13 \Omega$
- Sovraccaricabilità del 100% per 2 ore o del 133% per 5 minuti

La scelta di questa taglia dei gruppi viene giustificata in seguito andando a considerare la sovraccaricabilità delle SSE. Per motivi di maggiore affidabilità e per sopperire alla perdita di 1 gruppo, per ogni SSE è previsto 1 gruppo di riserva.

In riferimento alle problematiche viste alla fine del capitolo 2 si sono scelti i 2 tempi con potenze maggiori perché in entrambi i casi abbiamo 2 treni in accelerazione (che assorbono una potenza  $\simeq 5 \text{ MW}$ ) nei tratti iniziali e finali della linea, i quali sono alimentati a sbalzo. Inoltre l'istante 25380 s è il peggiore perché oltre a questi 2 treni è presente un altro locomotore in uscita da una curva che, accelerando per riportarsi a  $140 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , assorbe 4.6 MW.

In conclusione si sono scelti gli istanti:

$$25\,350\text{ s} \quad , \quad 25\,380\text{ s}$$

Di seguito si riportano le istantanee dell'assorbimento di potenza lungo la tratta nei tempi scelti:

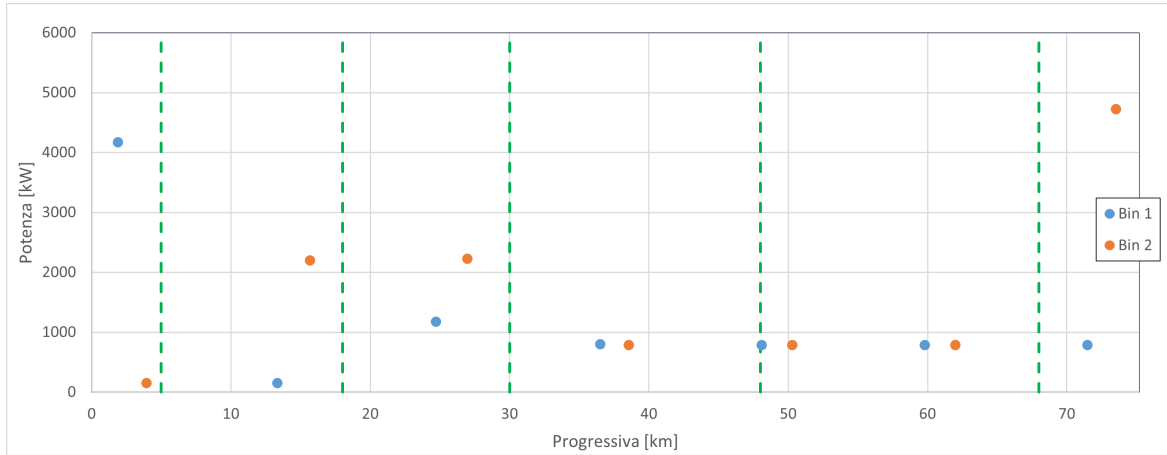


Figure 7: Posizione treni lungo la linea all'istante 25 350 s. Le SSE sono tratteggiate.

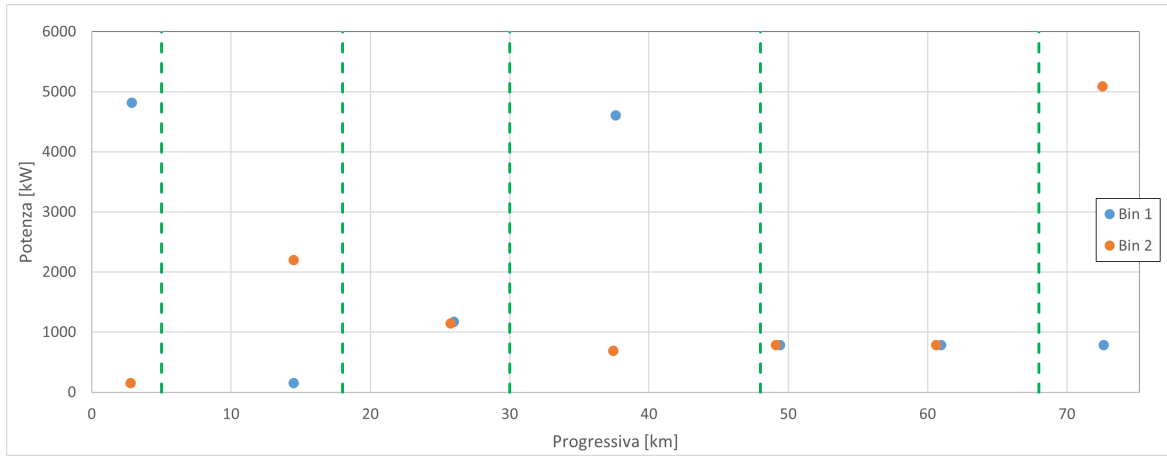


Figure 8: Posizione treni lungo la linea all'istante 25 380 s. Le SSE sono tratteggiate. Nella tratta da 48 km a 68 km sono presenti due treni su ogni binario.

## 4 Cadute di tensione

I valori delle tensioni al pantografo di una linea elettrificata a 3 kV in corrente continua imposti dalla norma sono:

- Tensione massima: 3.6 kV
- Tensione nominale: 3 kV
- Tensione media utile: 2.8 kV
- Tensione minima: 2 kV

In particolare un parametro fondamentale da verificare è la massima caduta di tensione, che deve essere contenuta entro i limiti normativi per garantire una marcia regolare dei treni. Poiché in ogni istante tra due sottostazioni si avranno al più 2 treni su ogni binario, per il calcolo delle cadute di tensione si può ricorrere alle seguenti formule:

$$\begin{cases} \Delta V_x = r(x-d)I_2 + rxI_1 \\ \Delta V_{(x-d)} = r(x-d)(I_2 + I_1) \end{cases} \Rightarrow \text{2 treni a sbalzo}$$

$$\begin{cases} \Delta V_x = \frac{r(L-x)}{L} [xI_1 + (x-d)I_2] \\ \Delta V_{(x-d)} = \frac{r(x-d)}{L} [(L-x)I_1 + (L-x+d)I_2] \end{cases} \Rightarrow \text{2 treni in bilaterale}$$

Per la linea di contatto si è optato per:

- 2 fili di contatto da 100 mm<sup>2</sup>
- 2 funi portanti da 120 mm<sup>2</sup>

ricavando quindi una sezione equivalente:

$$S_{eq} = n_{fc} \cdot 0.7 \cdot S_{fc} + n_{fp} \cdot S_{fp} + n_{al} \cdot S_{al} = 380 \text{ mm}^2$$

A questo punto è possibile calcolare la resistenza per unità di lunghezza della linea come la somma di quella della linea di trazione e quella del binario:

$$r = r_c + r_{bin} = \frac{18.8}{S_{eq}} + \frac{1}{2p} = 0.0645 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Si è considerata una tensione all'uscita di ogni SSE pari a 3.4 kV e una tensione ideale al pantografo di 3 kV, ricavando quindi la corrente assorbita da ogni treno come il rapporto  $\frac{P}{V}$ . Dalle tabelle 1 e 2 si nota come la condizione peggiore in assoluto sia sul secondo binario all'istante 25 350 s, seguita da quella che si ottiene all'istante 25 380 s sullo stesso binario.



Istante [s]		Tratta 1	Tratta 2	Tratta 3	Tratta 4	Tratta 5	Tratta 6	
25350	<b>Treno 1</b>	280.1763	9.6392	74.4923	71.3016	82.298	58.7791	$\Delta V$ [V]
	<b>Treno 2</b>					2.2996		
25380	<b>Treno 1</b>	221.3902	8.2392	68.0617	434.8869	84.4588	78.5127	
	<b>Treno 2</b>					27.5396		

Table 1: C.d.t. calcolate binario 1

Istante [s]		Tratta 1	Tratta 2	Tratta 3	Tratta 4	Tratta 5	Tratta 6	
25350	<b>Treno 1</b>	3.3978	90.1854	108.1717	75.8666	82.5513	559.9368	$\Delta V$ [V]
	<b>Treno 2</b>					45.7331		
25380	<b>Treno 1</b>	7.1759	120.7759	67.3626	64.6843	84.4735	496.6655	
	<b>Treno 2</b>					24.4647		

Table 2: C.d.t. calcolate binario 2

Questo è riconducibile al fatto che, come si vede dalle figure 7 e 8, in questi istanti ho treni in partenza sul binario 2 che assorbono molta potenza e, poiché l'ultima tratta della linea è anche quella più lunga alimentata a sbalzo, le cadute di tensione non possono che essere elevate. Nonostante gli assorbimenti dei treni in partenza sul binario 1 siano simili a quelli sul binario 2 in questi istanti, non si ottengono le stesse cadute di tensione in quanto il tratto a sbalzo iniziale è più corto di quello finale. Le tensioni al pantografo, considerando i valori riportati in precedenza delle tensioni all'uscita delle SSE, rispettano i limiti normativi precedentemente riportati: in particolare non si scende mai sotto i 2800 V di tensione media utile (CEI 50388) sotto cui si dovrebbero limitare in corrente gli azionamenti dei treni.

## 5 Massima densità di corrente

Generalmente per le condutture di rame si considera 85 °C come la temperatura massima indefinitamente sopportabile. Considerando 45 °C la massima temperatura raggiungibile a causa delle condizioni ambientali, il carico elettrico può causare una sovratemperatura massima di 40 °C. Una densità di corrente di 4 A/mm<sup>2</sup> in meno di 30 minuti può causare una sopraelevazione di temperatura del conduttore di 40 °C. Con l'interruzione della corrente il conduttore tornerà alle condizioni di temperatura iniziali in circa 20 minuti. In tabella vengono riportati gli andamenti medi delle densità di corrente in partenza da ogni alimentatore di ogni sottostazione. Possiamo vedere che non raggiungiamo mai il valore medio di 4 A/mm<sup>2</sup>.

Osservare che la media è stata effettuata dalle 7:00 alle 8:00, ma questa coincide con il valore medio di 5 minuti, essendo l'andamento della corrente periodico in tutta l'ora di simulazione.

Nella figura 9 Sono stati riportati gli andamenti della densità di corrente nel tempo nelle tratte alimentate a sbalzo dalla SSE1 binario 1 verso sinistra e della SSE2 binario

	Binario 1		Binario 2	
	sinistra	destra	sinistra	destra
<b>SSE 1</b>	1.57	0.43	0.11	0.75
<b>SSE 2</b>	0.09	0.62	1.20	0.61
<b>SSE 3</b>	0.29	0.41	0.79	1.07
<b>SSE 4</b>	0.55	0.42	0.69	0.40
<b>SSE 5</b>	0.79	0.39	0.77	1.03

Table 3: Densità di corrente media [ $\text{A}/\text{mm}^2$ ]

2 verso destra, cioè le tratte in cui si trovano i treni in partenza. Nonostante il valore di  $4 \text{ A}/\text{mm}^2$  venga superato per pochi secondi, considerando che il valore medio si trova molto al di sotto dei  $4 \text{ A}/\text{mm}^2$ , si può concludere che non supereremo il limite di  $85^\circ\text{C}$ . Si osservi che è stato riportato solo un periodo, dalle 7:00 alle 7:05, visto l'andamento periodico della corrente in tutta la simulazione.

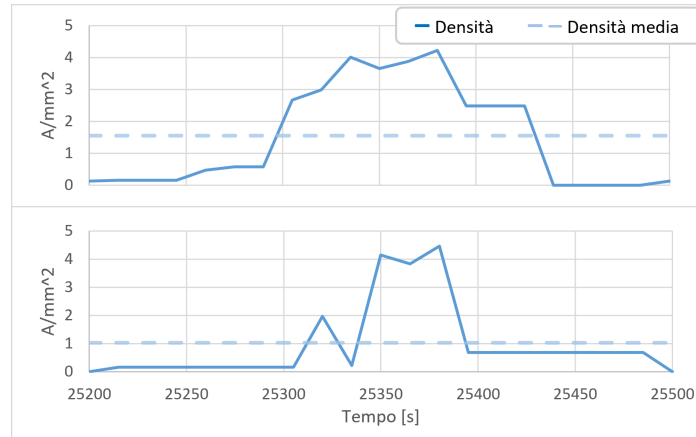


Figure 9: Densità di corrente nel tempo degli alimentatori del binario 1 sulla tratta 1, e del binario 2 sulla tratta 6.

Per tutte le altre SSE il valore nel tempo della densità di corrente non supera mai i  $4 \text{ A}/\text{mm}^2$ .

## 6 Sovraccaricabilità delle SSE

Considerando una tensione nominale delle sottostazioni di  $3.4 \text{ kV}$  e conoscendo gli andamenti nel tempo delle correnti erogate, si sono rappresentati gli andamenti della potenza erogata da ogni sottostazione.

Ricordando la scelta di adottare 2 gruppi per ogni SSE, ognuno da  $5.4 \text{ MVA}$  di cui uno in esercizio e uno di riserva, si nota come la potenza media risulta sempre inferiore alla potenza nominale. Il superamento della potenza nominale del gruppo avviene per

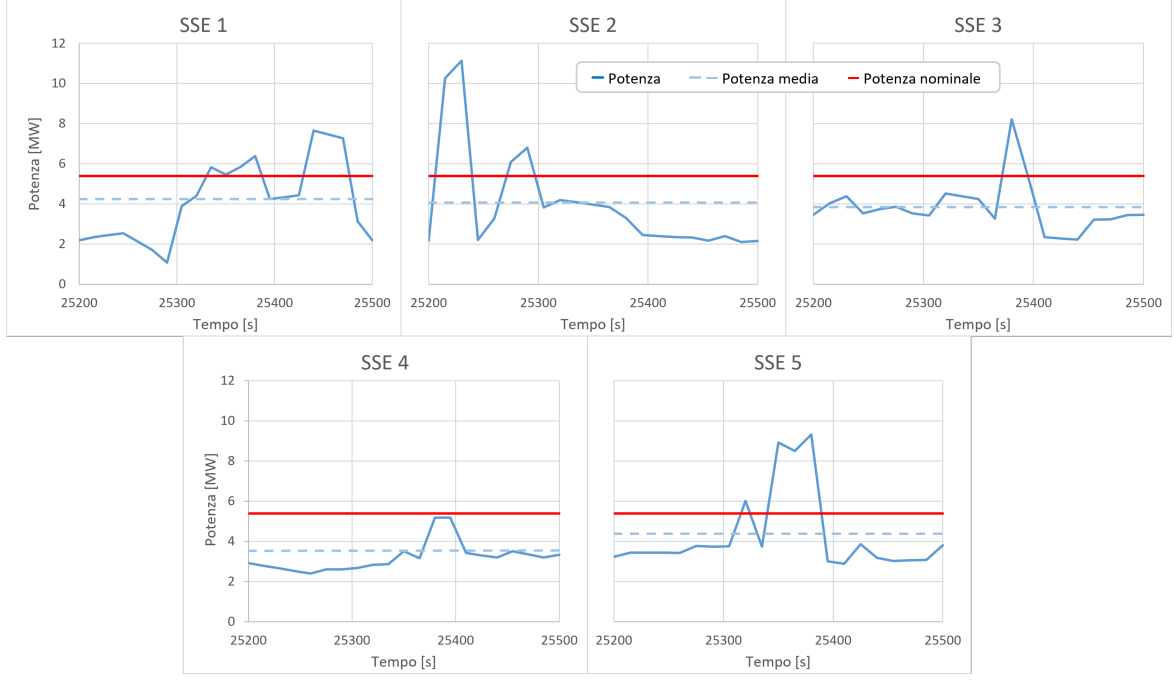


Figure 10: Potenza erogata dalle sottostazioni

periodi brevi (dell'ordine dei 30 secondi) inferiori ai limiti di sovraccaricabilità. Il picco di potenza maggiore viene erogato dal gruppo della SSE2 ed è di 11.1 MW.

Un gruppo da 3.6 MVA non riuscirebbe a erogare questa potenza nemmeno nel caso in cui si sovraccaricasse del 200 %. Per garantire l'erogazione degli 11.1 MW sarebbe stato necessario l'utilizzo contemporaneo di entrambi i gruppi da 3.6 MVA, perdendo quindi il criterio di sicurezza N-1.

## 7 Selettività delle protezioni

Per una corretta selettività del guasto e per evitare interventi intempestivi degli interruttori extrarapidi è necessario garantire la seguente condizione su ogni alimentatore:

$$I_{cc,MIN} \geq I_{carico,MAX}$$

Dove la  $I_{cc,MIN}$  è calcolata come:

$$I_{cc,MIN} = \frac{V_{d0,MIN}}{R_{sse} + R_g + r_{85} \cdot L}$$

Indichiamo con:

- $V_{d0,MIN}$  la tensione minima a vuoto ed è stata presa pari a 3200 V
- $R_{sse}$  la massima resistenza interna alla SSE e per il tipo di gruppo scelto è  $0.13 \Omega$
- $R_g$  la resistenza del guasto che è stata ipotizzata pari a  $0.15 \Omega$

- $r_{85} \cdot L$  la resistenza della linea riportando  $r$  alla massima temperatura di esercizio della linea ( $85^{\circ}\text{C}$ ),  $r_{85} = 0,074 \frac{\Omega}{km}$

Nella seguente tabella si riporta il confronto della minima corrente di guasto con la massima corrente di carico per le varie tratte:

	Tratta 1	Tratta 2	Tratta 3	Tratta 4	Tratta 5	Tratta 6
<b>Corrente di cortocircuito minima [A]</b>	4913	2570	2732	1980	1812	4000
<b>Corrente di carico massima [A]</b>	1605	1595	1420	1026	448	1696

Table 4: Confronto tra la minima corrente di corto circuito e la massima corrente di carico

Dai risultati riportati sopra si è verificato la corretta selettività del guasto in ogni tratta anche con protezioni a massima corrente.

## Appendice A

Si riporta di seguito lo script Matlab utilizzato per trovare la potenza totale su tutta la tratta per ogni istante della simulazione. L'input del programma è il file.txt ottenuto dall'unione dei cadenzamenti del binario 1 e 2 opportunamente modificato.

Listing 1: Calcolo potenza totale

```
1  clc;
2  close all;
3  clear;
4  % Formattazione richiesta per 'cad_tot.txt':
5  % Tempo;Treno;Potenza;Posizione;Binario
6  % Es: 23100;8;150.0;00.000;1
7
8  opts = delimitedTextImportOptions('Delimiter',';',...
9      'VariableNames',{'Tempo','Treno','Potenza',...
10      'Posizione','Binario'});
11  opts = setvartype(opts,{ 'Tempo','Treno','Potenza',...
12      'Posizione','Binario'},'double');
13  table = readtable('cad_tot.txt',opts);
14  table = sortrows(table,"Tempo");
15  t = table2array(table(:, "Tempo"));
16  train = table2array(table(:, "Treno"));
17  P = table2array(table(:, "Potenza"));
18  x = table2array(table(:, "Posizione"));
19  bin = table2array(table(:, "Binario"));
20
21  j = 1; % indice che conta gli istanti di tempo
22  i = 1; % indice che conta le righe del file.txt
23  while i < length(t)-1
24      P1(j) = P(i);
25      while (t(i+1)==t(i))
26          P1(j) = P1(j) + P(i+1);
27          i = i+1;
28      end
29      j = j+1;
30      i = i+1;
31  end
32
33  P1 = P1';
34  xlswrite('Potenze_tot_ordinate', P1);
```