Calcolo delle linee elettriche a corrente continua

Il calcolo elettrico delle linee a corrente continua ha come scopo quello di determinare la sezione di rame della linea stessa e la distanza tra le sottostazioni, partendo dai seguenti elementi:

a)tensione di alimentazione;
b)andamento planimetrico di ciascuna tratta;
c)tipi di locomotore da usare;
d)peso dei convogli da trainare e loro velocità;
e)minima distanza fra i convogli;
f)cadute di tensione media e massima ammessa per brevi periodi, in particolare durante gli avviamenti.

Calcolo delle linee elettriche a corrente continua

Gli elementi b), c) e d) portano alla determinazione della corrente assorbita che supporremo nota e faremo entrare nel calcolo elettrico della linea come un dato.

Tensione nominale SSE: 3000 V

Tensione in uscita SSE: 3600 V

Tensione minima ammessa: 2500 V

$\Delta V_{max} = 1100$ V

Sezione equivalente della catenaria (a nuovo): 320 mm^2

Coefficiente di usura della catenaria K_c=0,9375

Coefficiente di usura della rotaia K_r=0,9

Massa della rotaia per unità di lunghezza: m_r=60 kg/m

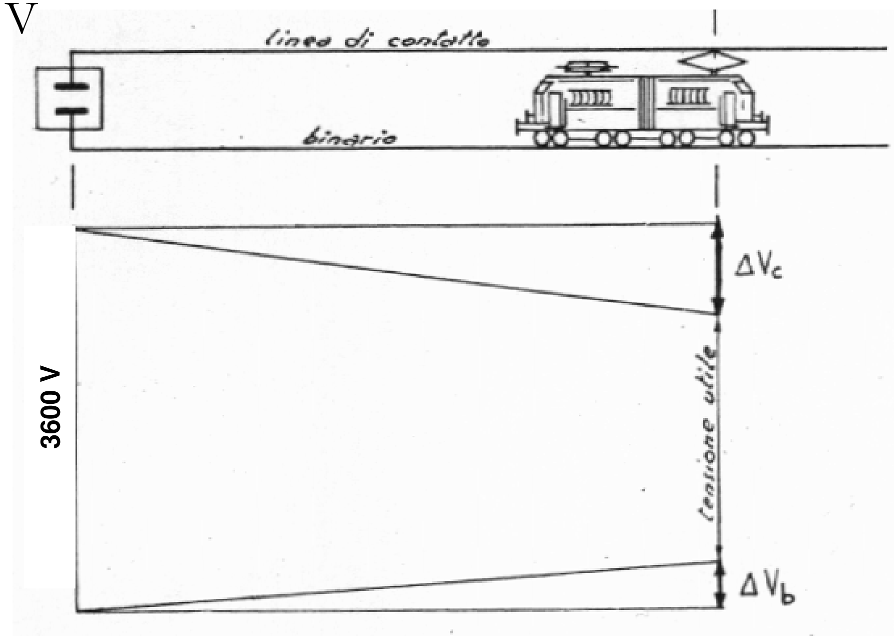
Massa specifica dell'acciaio: m_{Fe}=7850 kg/m^3

Resistività del rame: ρ_{Cu}=18 Ωmm^2/km

Resistività dell'acciaio: ρ_{Fe}=190 Ωmm^2/km

Corrente assorbita dal treno: I=300 A

Corrente assorbita dal treno allo spunto: I_S=500 A



Calcolo delle linee elettriche a corrente continua

Le resistenze in gioco sono quelle rappresentate dalla catenaria e dal circuito di ritorno (binario).

Calcoliamo la sezione della rotaia: $S_r = m_r / m_{Fe} = 60/7850 = 0{,}0075\ m^2 = 7500\ mm^2$

Resistenza della catenaria: $R_c = \rho_{Cu}\, L/S$

Resistenza del binario: $R_b = \rho_{Fe}\, L/2S_r$

quindi le corrispondenti resistenze specifiche:

$r_c = \rho_{Cu}/S\ K_c = 18/(320\ \ 0{,}9375) = 0{,}060\ \Omega/km$

$r_b = \rho_{Fe}/2S_r\ K_r = 190/(2\ \ 7500\ \ 0{,}9) = 0{,}014\ \Omega/km$

$r = r_c + r_b$ = resistenza complessiva (catenaria + binario) di un chilometro = **0,074 Ω/km**

Calcolo delle linee elettriche a corrente continua

La corrente che assorbe il locomotore provoca, sulla linea di contatto di resistenza chilometrica r_c e sul binario di resistenza chilometrica r_b rispettivamente le cadute di tensione:

$$\Delta V_c = r_c \, I$$
$$\Delta V_b = r_b \, I$$

lineari con la distanza, e massime in corrispondenza del punto più lontano dalla sottostazione nel quale si ha:

$$\Delta V = a\,(\Delta V_c + \Delta V_b) = a\,(r_c + r_b)\,I = a\,r\,I$$

con *a* lunghezza incognita.

Calcolo delle linee elettriche a corrente continua

Ricordando che la massima caduta di tensione ammessa è $\Delta V = 1100$ V e tenendo presente che delle due correnti di assorbimento la più gravosa è quella allo spunto ($I_S = 500$ A), si avrà:

$a = \Delta V/(r \; I_S) = 1100/(0{,}074 \; 500) = 29{,}7$ km

distanza in corrispondenza della quale si ha la massima caduta di tensione ammissibile.

Calcolo delle linee elettriche a corrente continua

Vediamo come all'aumentare della sezione della catenaria aumenti la distanza in corrispondenza della quale si registra la massima caduta di tensione ammissibile.

I dati di calcolo sono identici a quelli precedentemente utilizzati con l'unica differenza della sezione della catenaria che passa dai 320 mm^2 della precedente esercitazione alla ipotesi di 440 mm^2.

La resistenza della catenaria per chilometro è:

$r_c = \rho_{Cu}/S\ K_c = 18/(\mathbf{440}\ \ 0{,}9375) = 0{,}043\ \Omega/km$

da cui, la resistenza totale (catenaria + binario) per chilometro:

$r = r_c + r_b = 0{,}043 + 0{,}014 = 0{,}057\ \Omega/km$

ed il valore della distanza *a* :

$a = \Delta V/(r\ \ I_S) = 1100/(0{,}057\ \ 500) = \mathbf{38{,}6}$ km

Andamento della caduta di tensione vs posizione del treno

Un convoglio ferroviario percorre un tratto di linea di lunghezza L (40 km) con assorbimento costante I (300 A) di corrente.

Determinare l'andamento delle cadute di tensione ΔV in linea in funzione della posizione del treno nei seguenti casi di alimentazione del tratto L (linea a doppio binario):

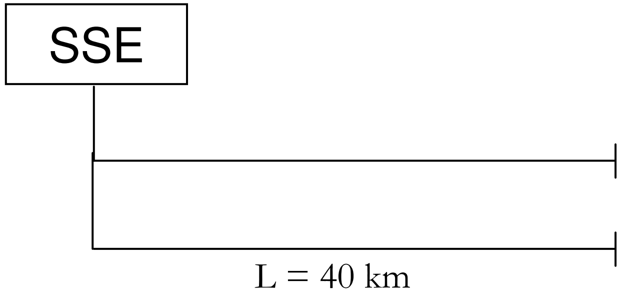
a. Alimentazione a sbalzo da un estremo

a1. senza posti di parallelo fra i due binari;

a2. con un posto di parallelo fra i due binari a metà della tratta L;

b. Alimentazione bilaterale

Alimentazione a sbalzo da un estremo

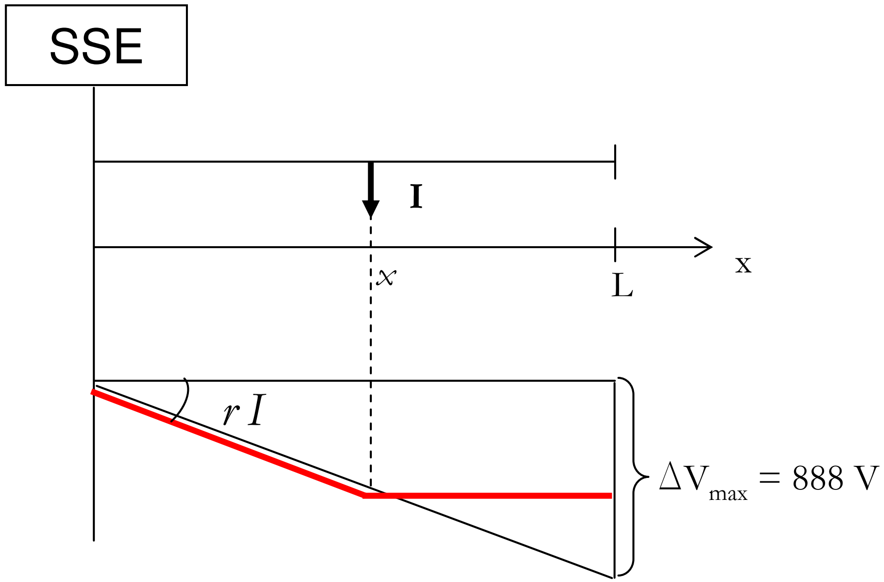


L'andamento della cdt in funzione della posizione x del treno è:

$\Delta V = r\,x\;I$ ovvero si tratta di una retta con pendenza $(r\,I)$

quindi il ΔV_{max} si ha per $x = L$ da cui

$\Delta V_{max} = r\,L\,I = 0{,}074 \;\; 40 \;\; 300 = 888$ V



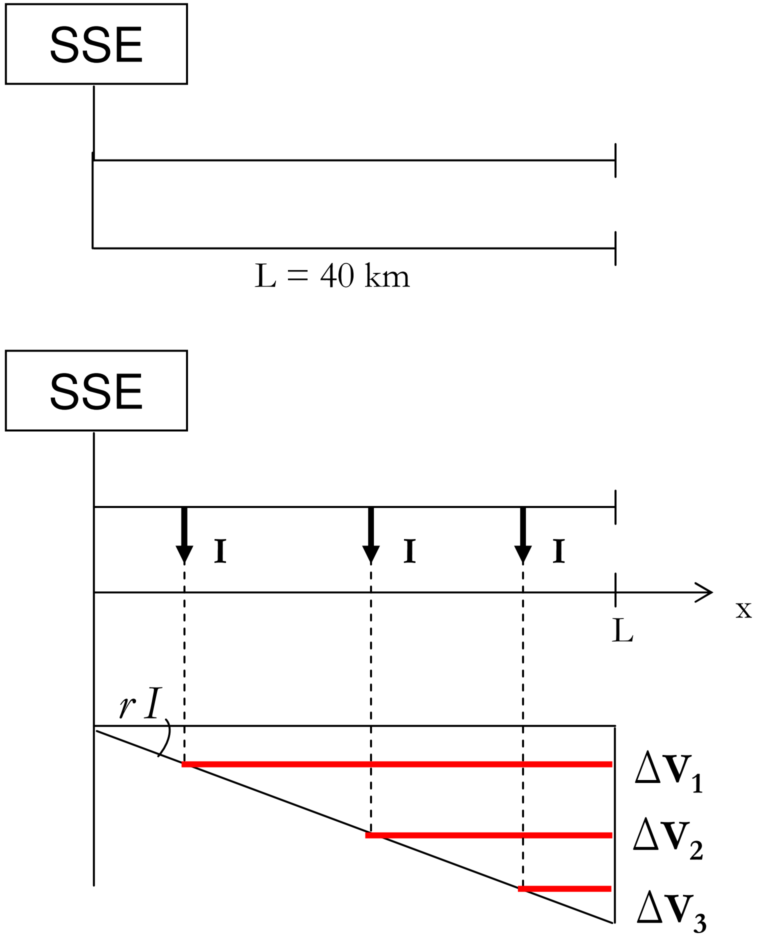
La cdt media sarà:

$$\Delta V_m = \frac{1}{L}\int_0^L \Delta V dx$$

nel nostro caso la cdt ha andamento lineare quindi $\Delta V_m = 1/L\ r\ I[(x)^2/2]_0^L =$

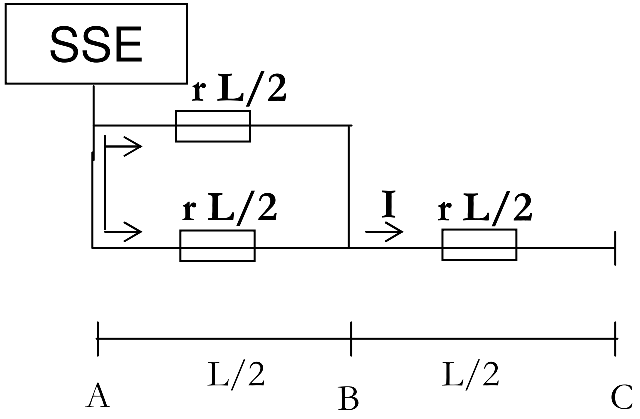
$=$ **$(r\ I\ L)/2$** $= (\Delta V_{max})/2 = 888/2 = 444$ V

Alimentazione a sbalzo da un estremo



Per differenti posizioni del treno avremo, a parità di corrente assorbita, tre differenti valori di caduta di tensione funzione della resistenza della catenaria e della posizione del treno (pendenza $r\,I$ della retta) .

Alimentazione a sbalzo da un estremo con posto di parallelo in L/2

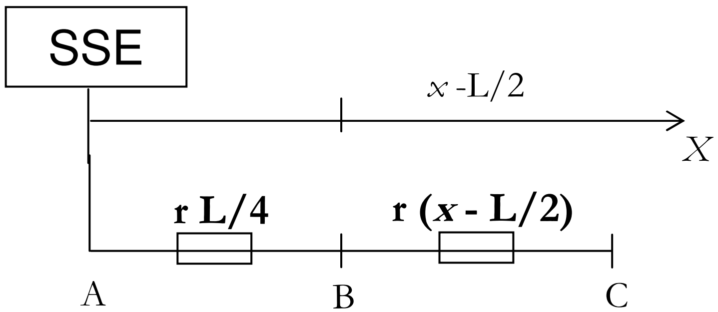


Nella maglia del circuito le due resistenze sono in parallelo quindi la resistenza equivalente = **r L/4**

La cdt nel punto B sarà:

$\Delta V_{AB} = r\, I\, L/4 = 0{,}074 \;\; 300 \;\; (40/4) = 222$ V

Circuito equivalente



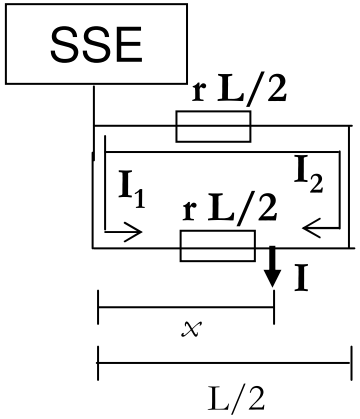
La cdt nel tratto BC sarà:

$\Delta V_{BC} = r\, I\, L/4 + r\, I\, (x - L/2) = r\, I\, (x - L/4)$

andamento lineare

$\Delta V_{BC\ max} = r\, I\, (x - L/4)^{x=L} = r\, I\, (L - L/4) = (3/4)L\, r\, I$

Alimentazione a sbalzo da un estremo con posto di parallelo in L/2



La cdt al treno a distanza x dalla SSE è:

$\Delta V = r\, I_1\, x = r\, I_2\, (L/2 + L/2 - x)$ con I_1 e I_2 incognite

l'altra equazione è: $I = I_1 + I_2$

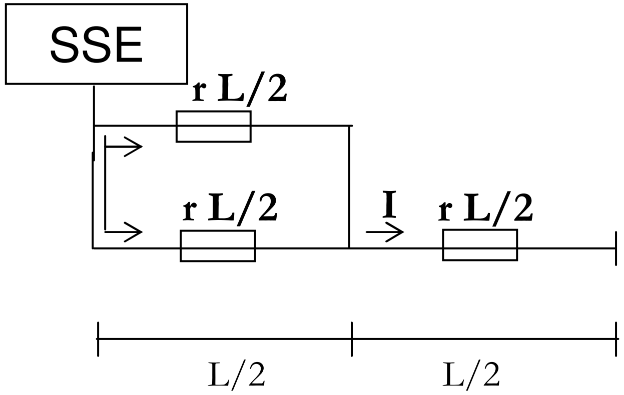
$$\begin{cases} r\, I_1\, x = r\, I_2\, (L - x) \\ I = I_1 + I_2 \end{cases} \qquad \begin{cases} I_1\, x = I_2\, (L - x) \\ I_1 = I - I_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_2 = I\, (x/L) \\ I_1 = I\, (1 - x/L) \end{cases}$$

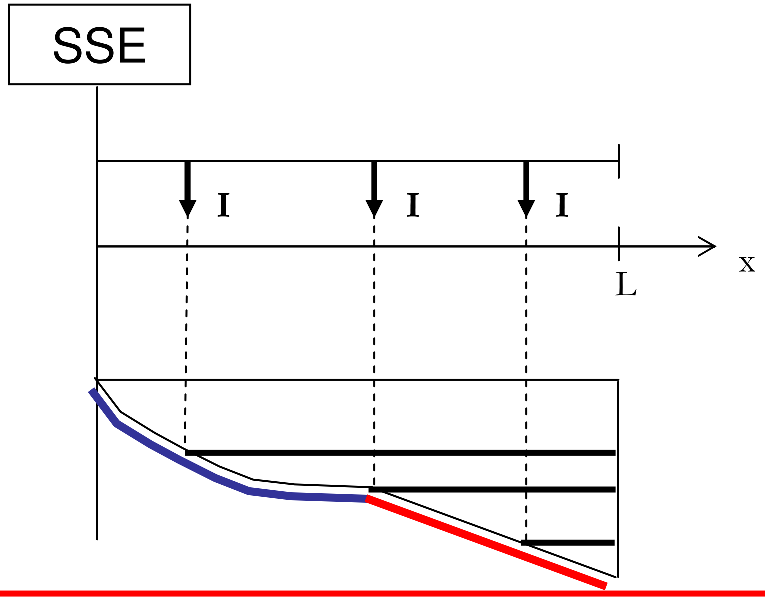
da cui : $\Delta V = r\, I_1\, x = \mathbf{r\, I\, (\mathit{x} - \mathit{x}^2/\mathit{L})}$ **andamento parabolico**

Il valore max di ΔV si ha per $x = L/2 \rightarrow \mathbf{\Delta V_{max}} = r\, I\, (L/2 - L/4) = \mathbf{(r\, I\, L)/4}$

Alimentazione a sbalzo da un estremo con posto di parallelo in L/2

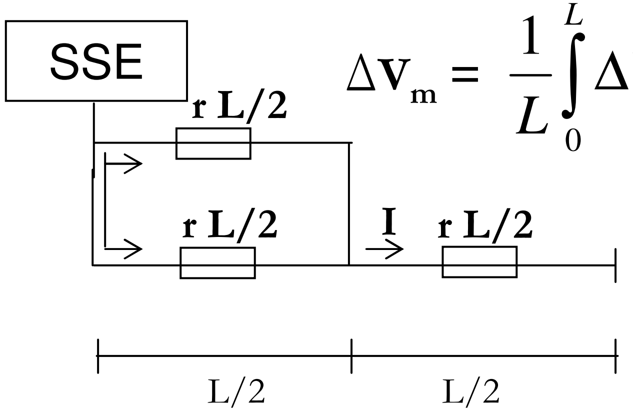


$\Delta V = r\, I_1\, x = \mathbf{r\, I\, (}\boldsymbol{x - x^2/L}\mathbf{)}$ ***andamento parabolico***



$\Delta V = r\, I\, (x - L/4)$ ***andamento lineare***

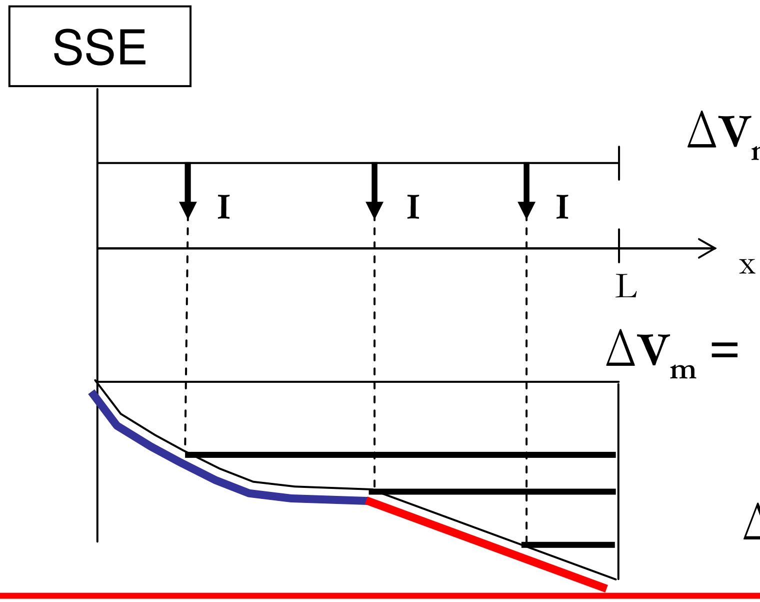
Alimentazione a sbalzo da un estremo con posto di parallelo in L/2



$$\Delta \mathbf{V}_{\mathrm{m}} = \frac{1}{L}\int_0^L \Delta V dx$$

$$\Delta \mathbf{V}_{\mathrm{m}} = \frac{1}{L}\left[\int_0^{L/2} rI\left(x-\frac{x^2}{L}\right)dx + \int_{L/2}^{L} rI\left(x-\frac{L}{4}\right)dx\right] =$$

$$\Delta \mathbf{V}_{\mathrm{m}} = \frac{rI}{L}\left[\int_0^{L/2}\left(x-\frac{x^2}{L}\right)dx + \int_{L/2}^{L}\left(x-\frac{L}{4}\right)dx\right] =$$

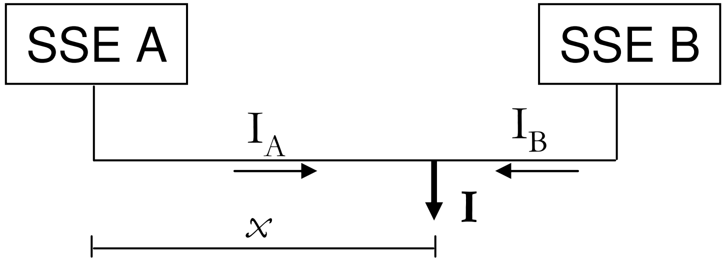


$$\Delta \mathbf{V}_{\mathrm{m}} = \frac{rI}{L}\left[\int_0^{L/2} x dx - \frac{1}{L}\int_0^{L/2} x^2 dx + \int_{L/2}^{L} x dx - \frac{L}{4}\int_{L/2}^{L} dx\right] =$$

$$\Delta \mathbf{V}_{\mathrm{m}} = \frac{rI}{L}\left[\left(\frac{x^2}{2}\right)_0^{L/2} - \frac{1}{L}\left(\frac{x^3}{3}\right)_0^{L/2} + \left(\frac{x^2}{2}\right)_{L/2}^{L} - \frac{L}{4}(x)_{L/2}^{L}\right] =$$

$$\Delta \mathbf{V}_{\mathrm{m}} = (\mathbf{r\ L\ I})/3$$

Alimentazione bilaterale



La cdt a distanza x sarà pari a :

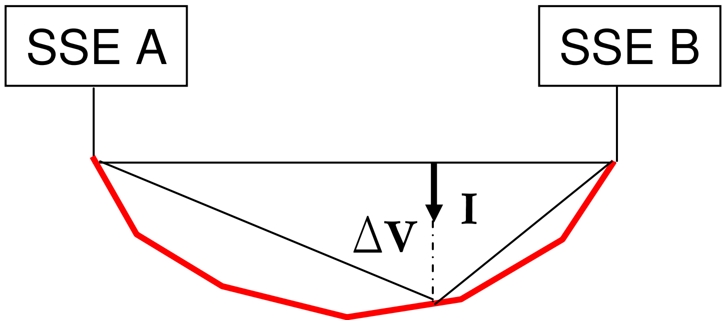
$\Delta V = r\, x\, I_A = r\,(L - x)\, I_B$ con I_A e I_B incognite

$$\begin{cases} r\, x\, I_A = r\,(L - x)\, I_B \\ I = I_A + I_B \end{cases}$$

sviluppando i calcoli:

$$\begin{cases} I_B = I\,(x/L) \\ I_A = I\,(1 - x/L) \end{cases}$$

$$\Delta V = r\, x\, I_A = r\,(L - x)\, I_B$$



$\Delta \mathbf{V} = r\, x\, I_A = \mathbf{r\, I\, (\mathit{x} - \mathit{x}^2/L)}$ ***andamento parabolico***

per $x = 0$ ed $x = L \rightarrow \Delta V = 0$

per $x = L/2 \rightarrow \Delta V_{max} = r\, I\, (L/4)$

$$\Delta \mathbf{V}_{\mathbf{m}} = \frac{1}{L}\int_0^L \Delta V dx = \frac{1}{L} r I \int_0^L \left(x - \frac{x^2}{L} \right) dx = \mathbf{(r\, L\, I)/6}$$

Protezione della linea di contatto - Premessa

Per evitare dannose conseguenze alla linea di contatto ed il verificarsi di situazioni di potenziale pericolo, un eventuale corto circuito sulla linea stessa deve poter essere rilevato ed eliminato nel più breve tempo possibile mediante l'apertura degli interruttori extrarapidi o dei sezionatori automatici che alimentano la tratta interessata dal guasto.

La scelta del sistema di protezione da adottare deve essere fatta in base a valutazioni tecnico-economiche che tengano conto delle reali esigenze di esercizio e con l'ottica di limitare al massimo le suddette soggezioni.

Protezione della linea di contatto – Tipologia del CTO CTO

I tipi di corto circuito che si possono verificare sulla linea di contatto sono i seguenti:

a) Franco a rotaia (contatto diretto tra la ldc e la rotaia)
b) Franco a circuito di protezione (contatto diretto tra la ldc e circuito di protezione)
c) Cedimento dell’isolamento (scarica elettrica su di un isolatore della ldc).

Poiché il guasto di tipo c) è quello più sfavorevole dal punto di vista delle protezioni, essendo le correnti di guasto più basse rispetto agli altri due casi (presenza di cdt sull’arco elettrico e di resistenza tra sostegno e binario), nei casi analizzati di seguito si farà sempre riferimento a questo tipo di guasto.

Protezione della linea di contatto – Schemi equivalenti

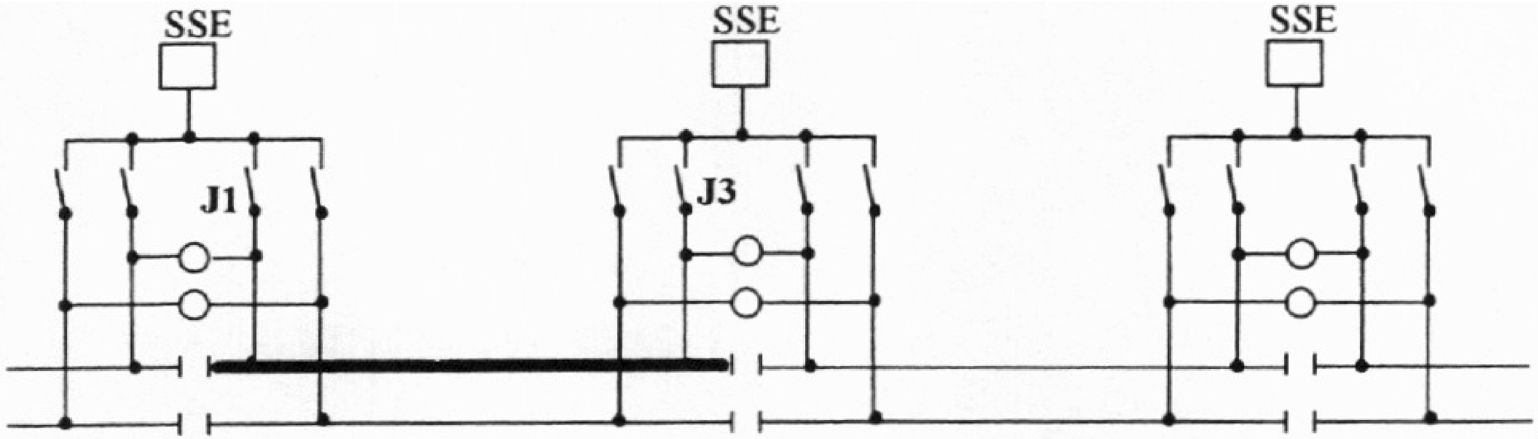


Fig. 1

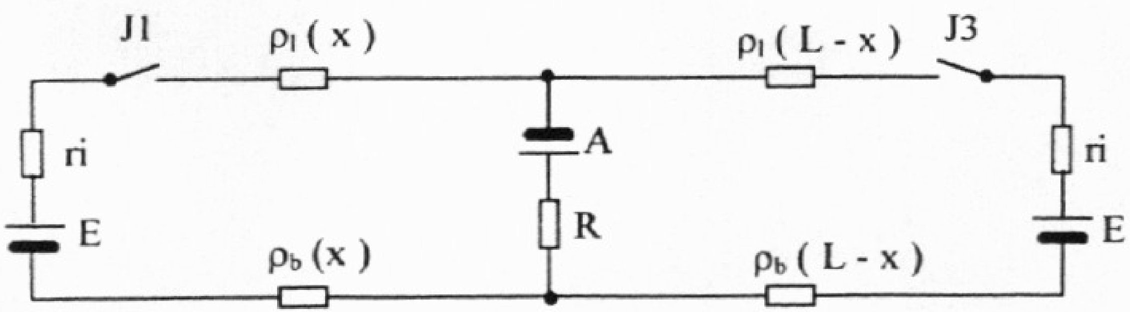
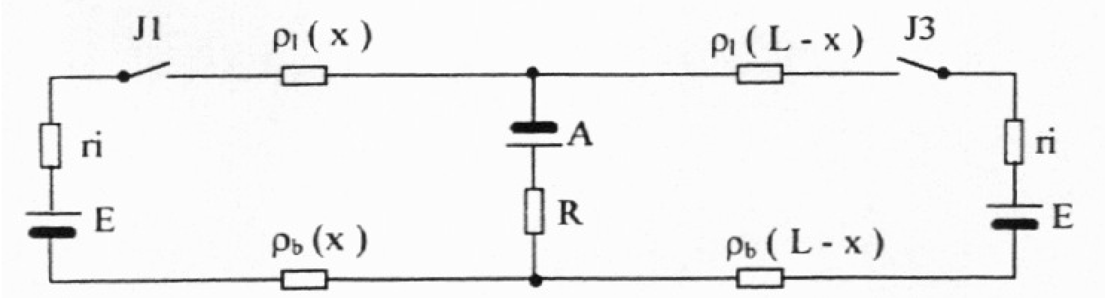


Fig. 2

Nel circuito equivalente di fig. 2 non compaiono le SSE adiacenti né i binari attigui in quanto nei calcoli vengono trascurati gli eventuali apporti di corrente da essi provenienti. Tale approssimazione è in linea con la sicurezza di intervento delle protezioni in quanto le correnti in gioco sarebbero sicuramente più elevate.

Protezione della linea di contatto – Parametri elettrici e geometrici



E = tensione a vuoto delle SSE = 3600 V

A = tensione d'arco nel punto di guasto = 400 V (valore trovato sperimentalmente)

R = resistenza tra sostegno e binario = 0,15 Ω (sostegno collegato al circuito di ritorno attraverso il trefolo di terra)

ri = resistenza interna equivalente SSE = 0,2 Ω

ρ_l = resistenza per km di catenaria

ρ_b = resistenza per km di binario

ρ_t = resistenza totale per km = $\rho_l + \rho_b$

L = distanza tra le due SSE

x = distanza del punto di guasto dalla SSE di sinistra

J1 e J3 = interruttori extrarapidi con scatto automatico per massima corrente

T = taratura di scatto per massima corrente

Protezione di tipo amperometrico con extrarapidi di SSE

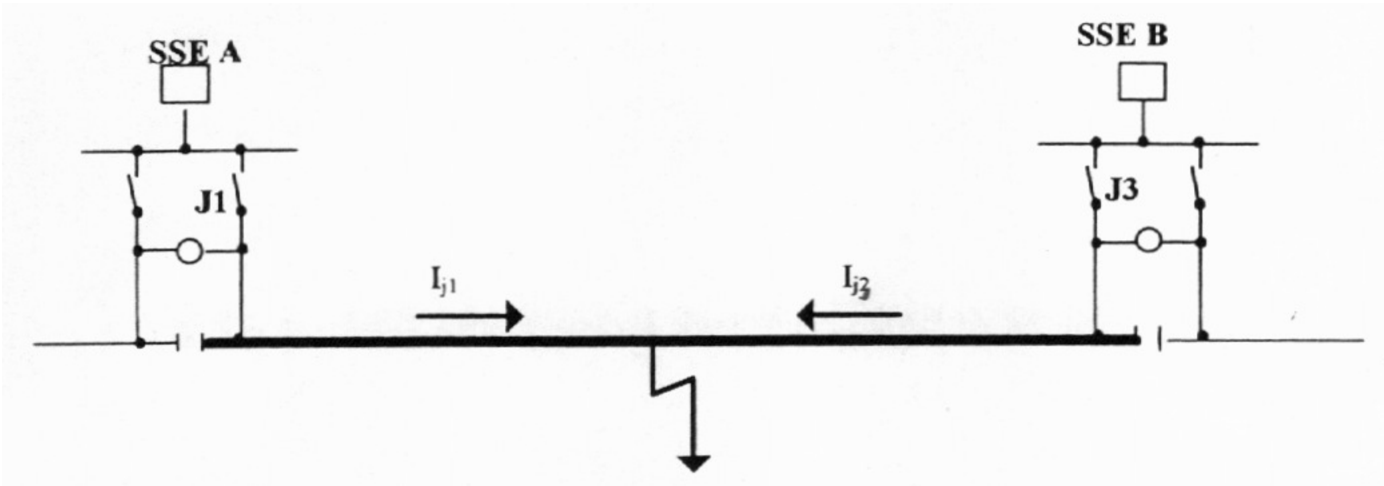
Questo tipo di protezione è ottenibile utilizzando lo scatto per massima corrente uscente dagli extrarapidi attraverso i quali i diversi tratti di linea vengono alimentati. La massima corrente viene rilevata da dispositivi insiti negli interruttori stessi o da relé amperometrici installati nella catena di alimentazione.

Con riferimento alle figure 1 e 2 della slide 17, affinché la protezione sia garantita occorre che scattino ambedue gli interruttori (J1 e J3); questa condizione comprende in effetti le seguenti le due condizioni, da soddisfare separatamente per qualsiasi posizione del guasto:

Protezione di tipo amperometrico con extrarapidi di SSE

1) che al verificarsi del guasto scatti almeno uno dei due interruttori J;

Per la condizione 1) la situazione più sfavorevole si ha quando il guasto è al centro della tratta (L/2) con entrambi gli interruttori J che alimentano il guasto stesso;

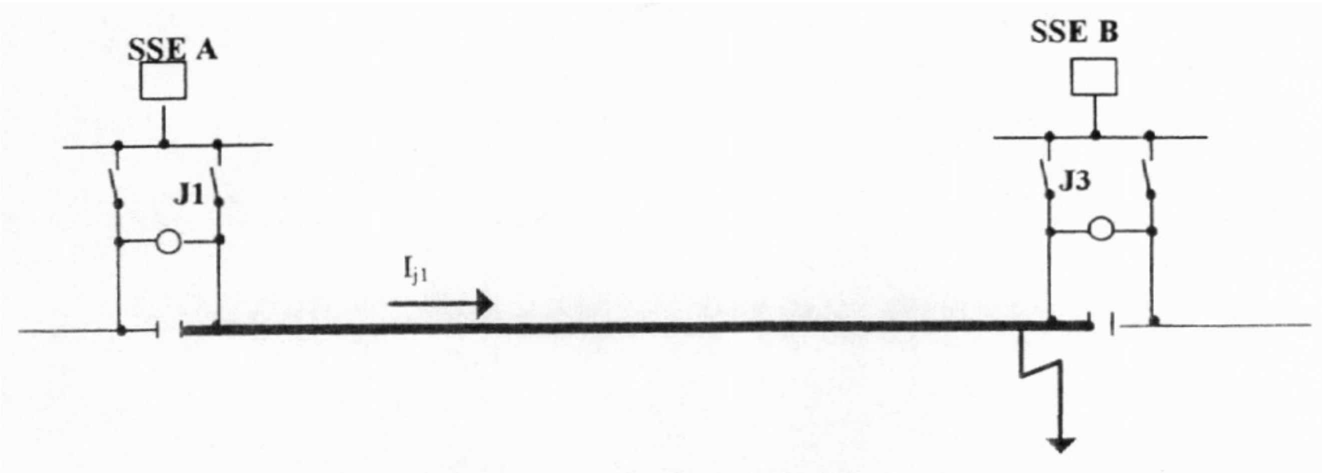


Pertanto $$\mathbf{I_{J1} = I_{J3}} = \frac{E - A}{ri + \rho_l (L/2) + \rho_b (L/2) + R} \qquad \textbf{(1)}$$

Protezione di tipo amperometrico con extrarapidi di SSE

2) che dopo scattato il primo interruttore scatti anche l'altro;

Per la condizione 2) la posizione più sfavorevole si ha quando il guasto è ad un estremo della tratta e quindi con uno dei due interruttori sicuramente aperto;



Pertanto $$\mathbf{I_{J1}} = \frac{E - A}{ri + \rho_l(L) + \rho_b(L) + R} \qquad \textbf{(2)}$$

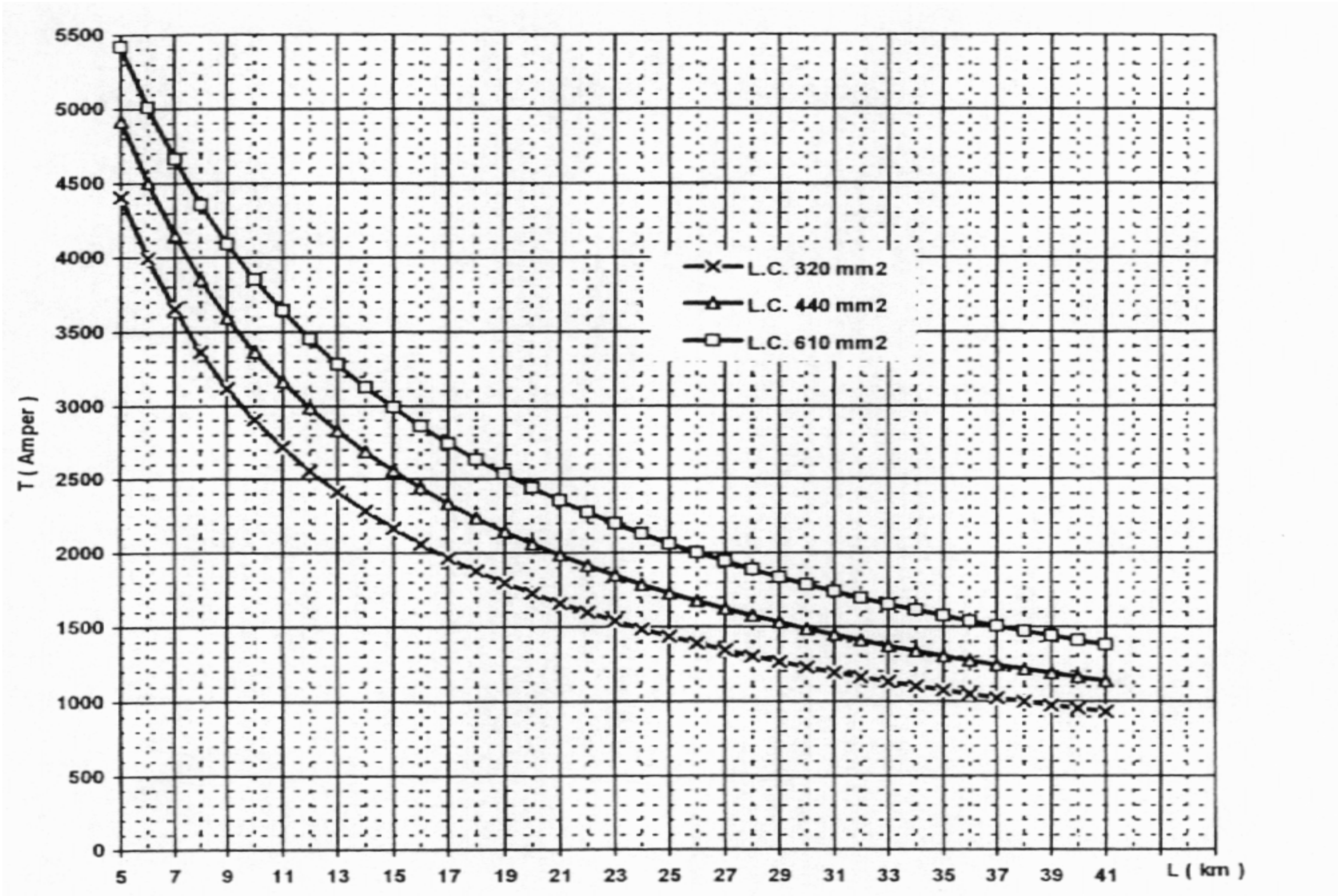
Protezione di tipo amperometrico con extrarapidi di SSE

La taratura massima che si può assegnare all'extrarapido sarà vincolata alla più limitativa delle due condizioni → condizione b) per cui la taratura dell'extrarapido sarà:

$$\mathbf{T} = \frac{E - A}{ri + \rho_l(L) + \rho_b(L) + R}$$

Protezione di tipo amperometrico con extrarapidi di SSE

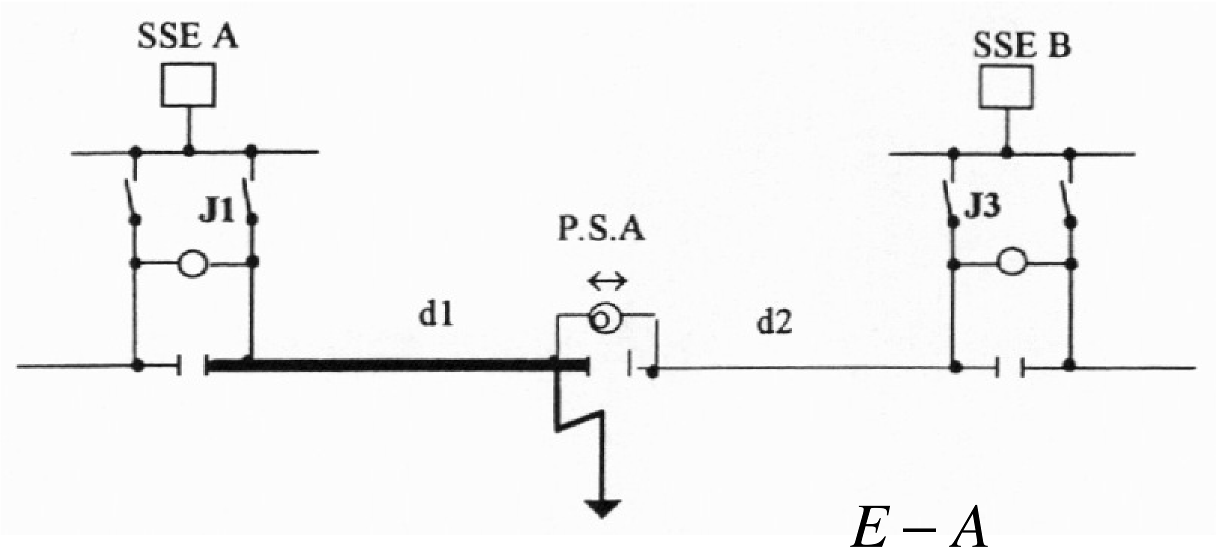
Limiti (T) di taratura degli extrarapidi in funzione della distanza (L) tra due SSE



Protezione di tipo amperometrico con posto di sezionamento automatico intermedio

I limiti di taratura forniti dalla formula precedente (2) provocherebbero oggi, con gli attuali assorbimenti ed il passo medio delle SSE, numerosi casi di soggezione alla circolazione treni per scatti intempestivi dovuti al sovraccarico.

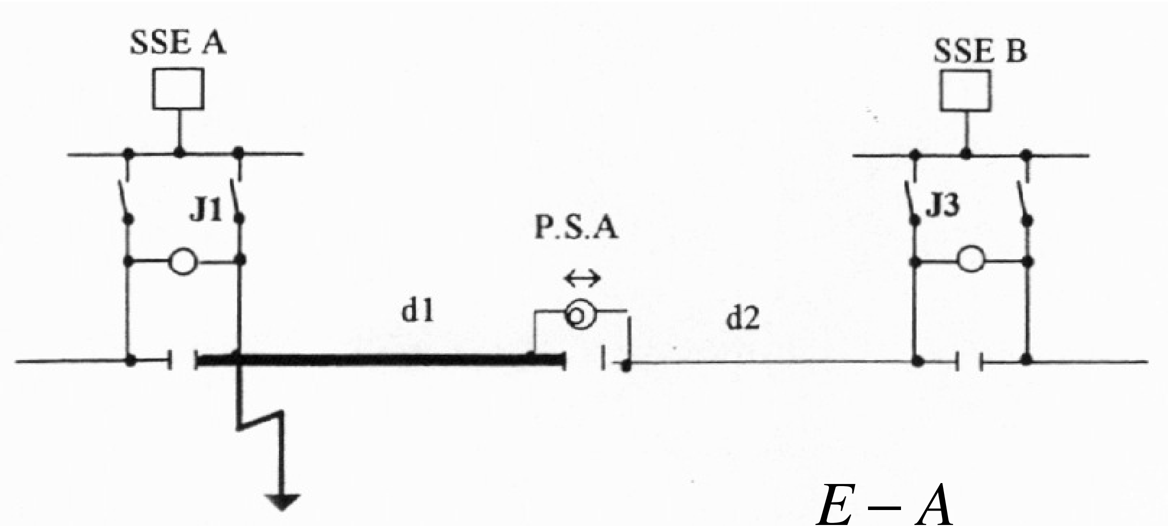
Detti limiti possono essere superati installando in tratta (possibilmente a centro tratta) un sezionatore automatico amperometrico con protezione bidirezionale.



A sezionatore già scattato $$\mathbf{T_{J1}} = \frac{E - A}{ri + \rho_l(d1) + \rho_b(d1) + R} \quad \textbf{(3)}$$

con d1 = distanza tra SSE e PSA

Protezione di tipo amperometrico con posto di sezionamento automatico intermedio

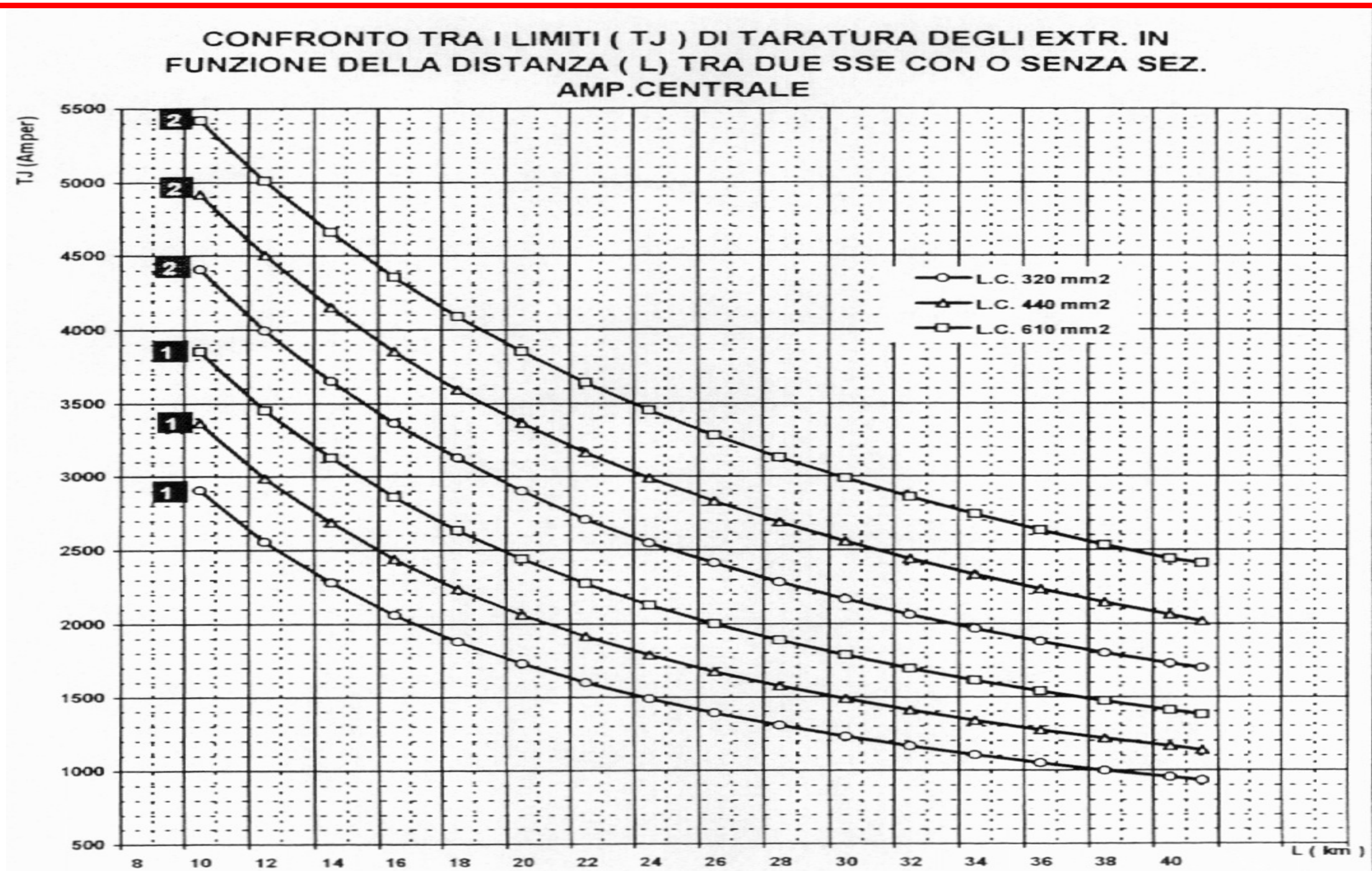


Ad extrarapido già scattato $$\mathbf{T_{sez}} = \frac{E - A}{ri + \rho_l(L) + \rho_b(L) + R} \qquad \mathbf{(2)}$$

Analogo ragionamento si può fare per la tratta elementare tra il PSA e la SSE B e pertanto la taratura da assegnare all'extrarapido J2 sarà data dalla formula (3) con d2 al posto di d1.

Si può notare che i limiti di taratura degli extrarapidi si sono elevati trasferendo il precedente limite al sezionatore amperometrico che però, se posto al centro, agli effetti del carico erogherà al massimo il 50 % di quanto erogato dagli extrarapidi di estremità.

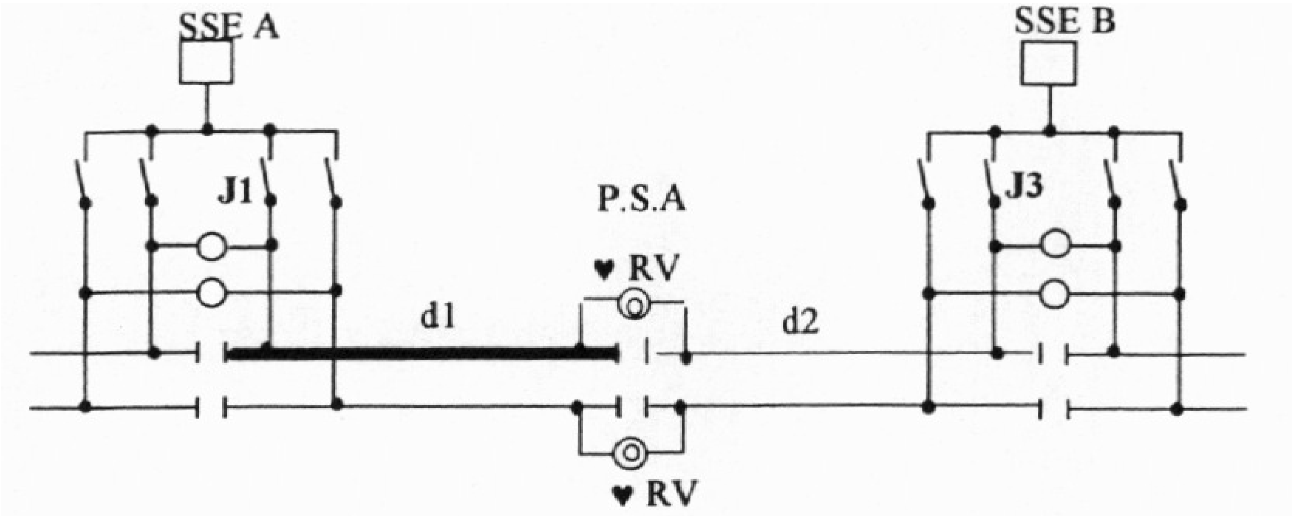
Protezione di tipo amperometrico con posto di sezionamento automatico intermedio



Le curve 1 sono relative all'impianto senza PSA al centro (formula (2))
Le curve 2 sono relative all'impianto con PSA al centro (formula (3))

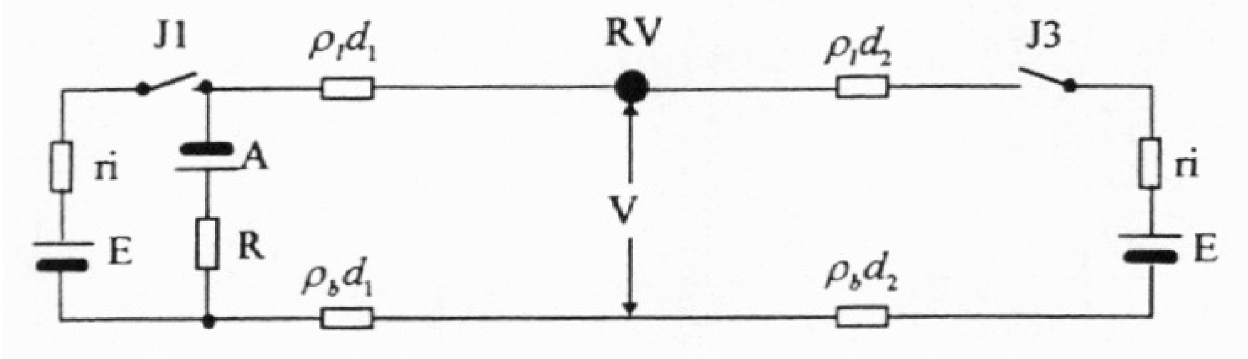
Protezione di tipo voltmetrico (con sezionatore automatico corrispondente)

Un corto circuito sulla linea di contatto è caratterizzato, oltre che da una corrente di guasto, da una caduta di tensione sulla linea provocata dalla corrente stessa; con l'ausilio di relé di minima tensione opportunamente dislocati e tarati, misurando la tensione che si viene a determinare tra la ldc ed un corrispondente punto del binario, è possibile rilevare il guasto e provocare l'intervento degli interruttori.



Anche con questo schema è necessario che siano soddisfatte le condizioni 1) e 2) già viste (slide 20 e 21) ed anche in questo caso risulta più limitativa la condizione b) per cui i guasti più critici da rilevare sono quelli che potrebbero avvenire alle due estremità della tratta in esame.

Protezione di tipo voltmetrico (con sezionatore automatico corrispondente)



Posto l'extrarapido J1 già aperto, la corrente di corto circuito vale:

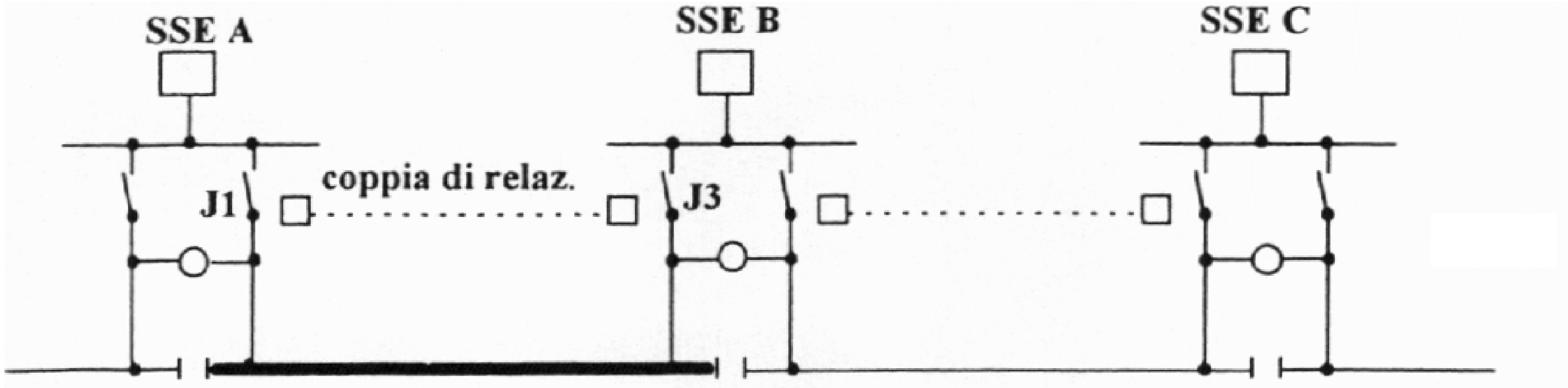
$$\mathbf{I_{cc}} = \frac{E-A}{R+r_i+(\rho_l+\rho_b)(d_1+d_2)} = \frac{E-A}{R+r_i+\rho_{tot}(d_1+d_2)}$$

da cui la tensione *V* misurata nel posto RV vale:

$$\boldsymbol{V} = \frac{(E-A)(R+\rho_{tot}d_1)}{R+r_i+\rho_{tot}(d_1+d_2)}+400$$

che è la taratura da assegnare al dispositivo voltmetrico che comanda lo scatto del sezionatore automatico corrispondente. Per l'extrarapido J1 il punto più critico da rilevare si trova nelle immediate vicinanze del sezionatore, quindi la sua taratura è sempre $\mathbf{T_{J1}} = \frac{E-A}{ri+\rho_l(d1)+\rho_b(d1)+R}$

Protezione di tipo amperometrico con asservimento tra due extrarapidi



Come per i casi già analizzati, anche in questo, per assicurare la protezione, è necessario che siano soddisfatte le condizioni 1) e 2) già viste.

Ma legando lo scatto di un extrarapido a quello del suo corrispondente i limiti di taratura visti nei casi precedenti possono essere superati per cui l'extrarapido deve essere tarato in modo da considerare come guasto più critico quello che potrebbe avvenire al centro della tratta in esame. Le tarature da assegnare agli interruttori J1 e J3 sono:

$$\mathbf{I_{J1}} = \mathbf{I_{J3}} = \frac{E - A}{ri + \rho_l (L/2) + \rho_b (L/2) + R}$$

Protezione di tipo amperometrico con asservimento tra due extrarapidi