



Zeno Martini (admin)

UNA SCELTA DEL CAVO

25 March 2008

La domanda premessa

Devo alimentare un motore di potenza x con una linea lunga y ... ecc.. Qual è la formula per calcolare la sezione del cavo? Una richiesta classica e frequente. Risposte ne sono state già date parecchie e da parecchi. Si fa immediatamente presente che non esiste una formula semplice valida sempre ma che c'è un procedimento da seguire. Ma la domanda ritorna. Imperterrita. L'articolo illustra il procedimento mostrandone le motivazioni.

Le esigenze da rispettare

Sono due le esigenze da soddisfare:

1. il cavo deve poter sopportare una corrente maggiore od almeno uguale a quella che deve trasportare. In altre parole la sua portata I_z deve essere maggiore od uguale alla corrente di impiego I_b .
2. La caduta di tensione massima deve avere un limite superiore(dell'ordine del 4%) della tensione nominale.

Portata

La portata è legata al problema termico. La corrente circolando nel cavo, principalmente per effetto joule, produce calore. Il calore prodotto fa innalzare la temperatura del cavo che si porta, rispetto alla temperatura dell'ambiente in cui si trova, ad una sovratemperatura tanto più alta quanto più difficoltoso è lo smaltimento del calore prodotto. Il componente nettamente più sensibile alla temperatura è l'isolamento. Più alta è la sua temperatura minore è la sua durata. Per assicurare una durata conveniente (20 anni) si è stabilita la massima temperatura di servizio. Per il PVC (polivinilcloruro) è di 70 °C per le varie gomme G, 85 °C o 90 °C. Lo smaltimento del calore prodotto dipende dal tipo di posa, per cui uno stesso cavo in diverse condizioni ha in realtà portate diverse. Inoltre, a parità di posa, bisogna considerare se oltre alla linea che si sta dimensionando ne esistono altre collocate nelle vicinanze. In caso di posa ravvicinata lo smaltimento è più difficoltoso e la portata dovrà essere diminuita. Inoltre, poiché lo smaltimento determina una sovratemperatura rispetto all'ambiente, è evidente che quanto maggiore è la temperatura dell'ambiente, tanto minore è la sovratemperatura che si può ammettere in quanto il limite per l'isolante

è una temperatura di servizio che è costante. Al crescere della temperatura ambiente si dovrà pertanto diminuire la portata del cavo.

Tutte le precedenti considerazioni sono esprimibili matematicamente, quindi teoricamente è possibile ricavare una relazione che lega la portata alla sezione. Ma in tale relazione compaiono quantità che dipendono dalle condizioni di posa e dalle altre condizioni elencate in modo non esprimibile matematicamente in modo semplice. Vediamolo:

a regime si ha

$$P_{\text{joule}} = h \cdot (\vartheta_c - \vartheta_a) \cdot A_L \text{ (W)}$$

ϑ_c : temperatura del cavo ($^{\circ}\text{C}$)

ϑ_a : temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

h : coefficiente di trasmissione del calore globale

(conduzione, convezione, irraggiamento) $\left(\frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C m}^2} \right)$

$$P = R \cdot I^2 \text{ (legge di joule) (W)}$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \text{ : resistenza del conduttore } (\Omega)$$

$$\rho \text{ : resistività; } l \text{ : lunghezza; } A \text{ : sezione } \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$$

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \text{ ; area della sezione (mm}^2\text{); } d \text{ : diametro (mm)}$$

$$A_L = \pi \cdot d \cdot L \text{ : superficie disperdente (m}^2\text{)}$$

L : lunghezza del cavo (m)

con passaggi non difficili, dopo aver fatto le sostituzioni

si ottiene un legame tra corrente e sezione

$$I = \pi \cdot \sqrt{\frac{h \cdot d^3}{4 \cdot \rho}} \cdot (\vartheta_c - \vartheta_a) = \pi \cdot \sqrt{\frac{h \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot A \right)^{\frac{3}{2}}}{4 \cdot \rho}} \cdot (\vartheta_c - \vartheta_a)$$

$$K \cdot I^2 = A^{\frac{3}{2}}$$

$$A = a \cdot I^{\frac{4}{3}}$$

$$K = \frac{4 \cdot \rho \cdot \pi^{\frac{3}{2}}}{\pi^2 \cdot h \cdot (\vartheta_c - \vartheta_a) \cdot 4^{\frac{3}{2}}}$$

$$a = K^{\frac{2}{3}} = \sqrt[3]{\frac{\rho^2}{4 \cdot h^2 \cdot \pi \cdot (\vartheta_c - \vartheta_a)^2}}$$

Quindi in base alla formula in blu, stabilita una corrente I_z , fissata la temperatura di esercizio del cavo, la temperatura ambiente, noto il coefficiente di trasmissione globale, si può teoricamente determinare la sezione. Si tratta però di una formula semplificata in quanto non si tengono conto di fenomeni quali l'effetto pelle, le perdite dielettriche e di eventuali guaine, l'influenza di conduttori vicini, e non

esiste un'espressione matematica che permetta di determinare il coefficiente di trasmissione globale al variare delle condizioni. Le norme CEI per tenere conto dei fenomeni trascurati suggeriscono una variazione dell'esponente 4/3. La formula teorica sarebbe cioè

$$A = a \cdot I_z^{1,6}$$

in cui rimane comunque inalterata la difficoltà di determinare il coefficiente **a**. Non resta che affidarsi al procedimento tabellare che sarà illustrato

La corrente di impiego I_b

La corrente di impiego dipende evidentemente dai carichi alimentati. Il modo più generale per determinarla, nel caso in cui la linea alimenti più carichi, è di calcolare la potenza apparente in arrivo, secondo le formule riportate:

$$I_b = \frac{S_a}{k \cdot U_n} \text{ (A)}$$

$$k = \sqrt{3} \text{ linea trifase; } k = 1 \text{ linea monofase}$$

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2} \text{ potenza apparente in fondo alla linea (VA)}$$

$$P_a = \sum P \text{ somma delle potenze attive dei carichi (W)}$$

$$Q_a = \sum Q \text{ somma delle potenze reattive dei carichi (var)}$$

$$U_n: \text{ tensione nominale (V)}$$

Se il carico è costituito da un unico motore trifase, la corrente nominale è un dato di targa, in genere. Ad ogni modo ricordiamo come essa si ricava dagli altri dati di targa (potenza, tensione, rendimento, fattore di potenza)

$$I = \frac{10^5 \cdot P_n}{1.73 \cdot U_n \cdot \eta\% \cdot \cos \varphi}$$

$$P_n: \text{ potenza (kW)}$$

$$\eta\%: \text{ rendimento percentuale}$$

$$\cos \varphi: \text{ fattore di potenza}$$

$$U_n: \text{ tensione nominale (V)}$$

Caduta di tensione

La seconda esigenza deriva dal fatto che la tensione in fondo ad una linea è diversa da quella in partenza, e le apparecchiature alimentate, per un funzionamento corretto, devono ricevere una tensione entro determinati limiti di tolleranza. Si stabilisce

allora una caduta di tensione massima (4% della tensione nominale od inferiore) che va verificata per il cavo scelto con la corrente di impiego prevista. Se la caduta è eccessiva non resta che scegliere un cavo di sezione maggiore, la cui portata è sicuramente adeguata, ma la cui caduta andrà nuovamente verificata. Per il calcolo occorre conoscere la resistenza e la reattanza unitarie del cavo ed applicare la formula

$$\Delta u\% = 100 \cdot \frac{U_p - U_a}{U_n} \cong \frac{100 \cdot L}{U_n} \cdot k \cdot (r_L \cdot \cos \varphi_a + x_L \cdot \sin \varphi_a) \cdot I_b$$

L : lunghezza della linea (m)

U_n : tensione nominale (V)

r_L : resistenza unitaria del cavo $\left(\frac{\Omega}{m}\right)$

x_L : reattanza unitaria del cavo $\left(\frac{\Omega}{m}\right)$

$k = 1$: linea monofase; $k = 1,73$: linea trifase

$\cos \varphi_a$: fattore di potenza all'arrivo

$$\sin \varphi_a = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_a}$$

I_b : corrente di impiego (A)

I valori di resistenza e reattanza sono forniti da tabelle, nelle quali può anche essere dato, in genere, anche il valore di caduta unitaria, cioè i volt per ogni metro di lunghezza e per ogni ampere e per un dato fattore di potenza in arrivo. E' in tal caso sufficiente moltiplicare tale valore per la lunghezza e per la corrente di impiego per trovare la caduta effettiva per quel dato fattore di potenza

Esempi

Supponiamo di dover alimentare un motore trifase di 200 kW con una linea in cavo multipolare in gomma G5 di lunghezza $L = 100$ m, posata su passerella insieme ad altri tre cavi disposti su uno strato orizzontale, in un ambiente la cui temperatura media è di 40 °C. La corrente nominale del motore è la corrente di impiego della linea. Ipotizzando un rendimento del 95% ed un fattore di potenza di 0,89 per la tensione nominale $U_n = 400$ V si ha

$$I = \frac{P}{1,73 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi}$$

quindi $I_n = 200 \cdot 10^3 / (0,89 \cdot 95 \cdot 400 \cdot 1,73) = 341$ A. Se la linea fosse posata su passerella da sola in ambiente in cui la temperatura fosse di 30 °C, sarebbe

sufficiente una sezione 150 mm^2 . Nella figura 1 infatti, che mostra i sistemi di posa più comuni, sulla riga F relativa della posa su passerella, in corrispondenza a cavi multipolari trifase (3 conduttori attivi) in gomma G5, si legge il numero 5 che seleziona la colonna delle portate da considerare nella successiva tabella delle portate di fig. 2. In questa colonna occorre selezionare un valore maggiore od uguale a 341. Si trova 390 cui corrisponde una sezione di 150 mm^2 . Nel nostro caso però, la temperatura ambiente è di 40°C e nella passerella ci sono 4 cavi. Occorre applicare allora coefficienti di riduzione, rispettivamente $k_t = 0,9$ e $k_r = 0,75$ che si ricavano dalla tabelle delle figure 3,4,5. Nella colonna 5 della tabella delle portate è necessario trovare il valore di I_z che soddisfa alla relazione

$$I_z \cdot k_t \cdot k_r \geq I_b$$

In definitiva la sezione da scegliere è quella che corrisponde alla portata

$$I_z \geq \frac{I_b}{k_t \cdot k_r} = \frac{341}{0,9 \cdot 0,75} = 505 \text{ A}$$

La sezione necessaria è perciò di 240 mm^2 . Ora si deve verificare la caduta di tensione. La fig. 6 riporta una tabella da cui è possibile ricavare resistenza e reattanza dei cavi. Per la sezione di 240 mm^2 si ha $r_L = 0,0754 \text{ ohm / km}$ a 20°C , mentre per la reattanza del cavo tribolare $x_L = 0,0752 \text{ ohm / km}$. La resistenza dipende dalla temperatura ed il nostro cavo si troverà sicuramente a temperatura superiore. Poiché la corrente di impiego non è di molto inferiore alla portata possiamo ipotizzare una temperatura del cavo prossima a quella di esercizio ammessa. Quindi conviene considerare la r_L ad 80°C : $r_L = 0,0943 \text{ ohm / km}$. Affinché si possa accettare la sezione scelta, se ammettiamo una caduta percentuale massima del 4%, la caduta percentuale effettiva deve essere inferiore. Calcoliamola:

$$\begin{aligned} \Delta u\% &\cong \frac{100 \cdot 0,1}{400} \cdot 1,73 \cdot \left(0,0943 \cdot 0,89 + 0,0752 \cdot \sqrt{1 - 0,89^2} \right) \cdot 341 = \\ &= 0,04325 \cdot (0,0839 + 0,0343) \cdot 341 = 1,74\% < 4\% \end{aligned}$$

Constatiamo che lo è; la sezione scelta è allora OK. Controlliamo la caduta trovata considerando il dato di tabella che dà la caduta di tensione unitaria che è di $u = 0,212 \text{ V / (A m)}$. Si ha $DU = u \cdot L \cdot I = 0,212 \cdot 0,1 \cdot 341 = 7,23 \text{ V}$. In percentuale: $Du\% = 723 / 400 = 1,8\%$. Osserviamo che la linea avrebbe potuto al massimo essere lunga $(4 / 1,74) \cdot 100 = 229 \text{ m}$ per poter ammettere una caduta ancora accettabile. Per linee più lunghe occorre passare a cavi di sezione maggiore. Nel caso specifico si sarebbe dovuti ricorrere, ad esempio, a due cavi tripolari in parallelo da 150 mm^2

Sistemi di posa in aria più comuni		scelta colonna tabella portata				
		ISOLAMENTO				
		PVC R ₂ , TI ₁ , TI ₂ (3)		Gomma etilenprop. (G5) Polietilene reticol. (4)		
		N° CONDUTTORI ATTIVI				
		3	2	3	2	
A  in tubi in vista B  in tubi incassati		cavi uni e multip.	2*	3*	4*	5*
C  in modanature zoccoli, stipiti, scanalature						
D  con fissaggio diretto a parete			4	5	6	7
E  con fissaggio diretto a soffitto						
F  in guide per cavi, passerelle, mensole			3	4	5	6
G  in canalette chiuse		cavi uni e multipolari	2	3	4	5
H  in canalette aperte			3	4	5	6
I  in cunicoli aperti o ventilati			2	3	4	5
L  sospesi a fune portante			5	6	7	8

Figura 1

CORRENTE AMMISSIBILE I_z (in A) PER CAVI IN Cu - POSA NON RAVVICINATA - PER T.A.: 30°C - (ved. note 1-2 e TAB. 1.3-2.1-2.2)								
SEZ. NOM. CONDUTT. mm ²	NUMERI DELLE COLONNE (ved. TAB. 1.1)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	—	12	13,5	15	17	19	21	23
1,5	—	15,5	17,5	19,5	22	24	27	29
2,5	—	21	24	26	30	33	37	40
4	—	28	32	35	40	45	50	55
6	—	36	41	46	52	58	64	70
10	—	50	57	63	71	80	88	97
16	—	68	76	85	96	107	119	130
25	—	89	101	112	127	142	157	172
35	—	111	125	138	157	175	194	213
50	—	134	151	168	190	212	235	257
70	—	171	192	213	242	270	299	327
95	—	207	232	258	293	327	362	396
120	—	239	269	299	339	379	419	458
150	—	275	309	344	390	435	481	527
185	—	314	353	392	444	496	549	602
240	—	369	415	461	522	581	645	707

Figura 2

Temperatura ambiente °C	Fattore di correzione K_t per temperatura ambiente diversa da 30 °C		
	Gomma qualità comune EI ₁	PVC R2 - TI ₁ TI ₂	Gomma G5 Polietilene reticol.
20	1,15	1,12	1,09
25	1,07	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00
35	0,93	0,93	0,95
40	0,82	0,87	0,90
45	0,71	0,79	0,85
50	0,58	0,71	0,80
55	—	0,61	0,74
60	—	0,50	0,67

Figura 3

PER POSA IN TUBI O PASSERELLE A-B-F-G - Cavi unipolari

Posa ravvicinata Kr	1 strato orizzontale					Più strati orizzontali														
	N° COND. ATTIVI					N° CONDUTTORI ATTIVI														
	4	6	9	12	>12	4	6	8	10	12	16	20	24	28	32	36	40			
	0,82	0,76	0,70	0,67	0,65	0,80	0,69	0,62	0,59	0,55	0,51	0,48	0,43	0,41	0,39	0,38	0,36			

Figura 4

PER POSA IN TUBI O PASSERELLE A-B-F-G - Cavi bipolari o tripolari

Posa ravvicinata Kr	1 strato orizzontale					Più strati orizzontali														
	N° DEI CAVI					N° DEI CAVI														
	2	3	4	6	9	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20			
	0,85	0,78	0,75	0,72	0,70	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,52	0,48	0,45	0,43	0,41	0,39	0,38			

Figura 5

Sezione nominale	Resistenza kilometrica massima		Cavi unipolari				
			Reattanza kilometrica	Caduta di tensione unitaria $\Delta U'$ a 80 °C ⁽¹⁾			
				Corrente mono fase		Corrente trifase	
	$\cos \varphi = 1$ (¹)	$\cos \varphi = 0,8$ (ind)		$\cos \varphi = 1$ (²)	$\cos \varphi = 0,8$ (ind) (²)		
	a 20 °C	a 80 °C	X'				
(mm ²)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	$\left(\frac{V}{A \text{ km}}\right)$	$\left(\frac{V}{A \text{ km}}\right)$	$\left(\frac{V}{A \text{ km}}\right)$	$\left(\frac{V}{A \text{ km}}\right)$
1	18,1	22,1	0,176	44,2	35,6	38,3	30,8
1,5	12,1	14,8	0,168	29,7	23,9	25,7	20,7
2,5	7,41	8,91	0,155	17,8	14,4	15,4	12,5
4	4,61	5,57	0,143	11,1	9,08	9,65	7,87
6	3,08	3,71	0,135	7,41	6,10	6,42	5,28
10	1,83	2,24	0,119	4,47	3,72	3,87	3,22
16	1,15	1,41	0,112	2,82	2,39	2,44	2,07
25	0,727	0,889	0,106	1,78	1,55	1,54	1,34
35	0,524	0,641	0,101	1,28	1,15	1,11	0,993
50	0,387	0,473	0,101	0,947	0,878	0,820	0,760
70	0,268	0,328	0,0965	0,656	0,641	0,568	0,555
95	0,193	0,236	0,0975	0,473	0,494	0,410	0,428
120	0,153	0,188	0,0939	0,375	0,413	0,325	0,358
150	0,124	0,153	0,0928	0,306	0,356	0,265	0,308
185	0,0991	0,123	0,0908	0,246	0,306	0,213	0,265
240	0,0754	0,0943	0,0902	0,189	0,259	0,163	0,224

Figura 6

Se la linea non deve alimentare direttamente solo un motore ma, poniamo, un motore da 110 kW, con un utilizzato al 70 % della sua potenza nominale con un fattore di

potenza di 0,8, un forno da 40 kW resistivo e 200 lampade fluorescenti da 36 W a $\cos\phi = 0,6$, la corrente di impiego si calcola con

$$P_{am} = 0,7 \cdot 110 = 77 \text{ kW}$$

$$Q_{am} = P_{am} \cdot \tan(\arccos 0,8) = 77 \cdot \tan 36^\circ = 57,7 \text{ kvar}$$

$$P_F = 40 \text{ kW}; Q_F = 0$$

$$P_L = 200 \cdot 36 = 7200 \text{ W}$$

$$Q_L = P_L \cdot \tan(\arccos 0,6) = 7,2 \cdot \tan 53^\circ = 9,6 \text{ kvar}$$

$$P_a = P_{am} + P_F + P_L = 77 + 40 + 7,2 = 124,2 \text{ kW}$$

$$Q_a = Q_{am} + Q_F + Q_L = 57,7 + 0 + 9,6 = 67,3 \text{ kvar}$$

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2} = \sqrt{124,2^2 + 67,3^2} = 141,2 \text{ kVA}$$

$$\cos\phi_a = \cos\left(\arctan\left(\frac{Q_a}{P_a}\right)\right) = \cos(\arctan 0,54) = 0,879$$

$$I_b = \frac{S_a}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{141200}{1,73 \cdot 400} = 204 \text{ A}$$

La linea lunga $L=200$ m, sia costituita da cavi unipolari in PVC in canalette chiuse che contengono più di 12 conduttori ed in cui la temperatura sia di 35°C . I coefficienti di riduzione da applicare sono $k_t = 0,95$ e $k_r = 0,65$, mentre la colonna delle portate da considerare è la 3.

Deve ora essere

$$I_z \geq \frac{I_b}{k_t \cdot k_r} = \frac{204}{0,95 \cdot 0,65} = 329 \text{ A}$$

Quindi è necessaria una sezione di 185 mm^2 . La solita verifica della caduta nell'ipotesi che la linea sia lunga 200 m e che si desideri contenere la caduta al 3%. Dalla tabella di fig. 6 si ha $r_L = 0,123 \text{ ohm / km}$ $x_L = 0,0908 \text{ ohm / km}$.

Quindi si ha

$$\begin{aligned} \Delta u\% &\cong \frac{100 \cdot L}{U_n} \cdot k \cdot (r_L \cdot \cos\phi_a + x_L \cdot \sin\phi_a) \cdot I_b = \\ &= \frac{20}{400} \cdot 1,73 \cdot \left(0,123 \cdot 0,879 + 0,0908 \cdot \sqrt{1 - 0,879^2}\right) \cdot 204 = \\ &= 0,0865 \cdot (0,108 + 0,043) \cdot 204 = 2,66\% \end{aligned}$$