

LA NORMATIVA PER LA PROGETTAZIONE DELLE LINEE ELETTRICHE AEREE ESTERNE CON TENSIONE SUPERIORE A 1 KV

Seconda parte (1)

Ipotesi di calcolo dei conduttori secondo la Norma linee - Calcolo dei sovraccarichi.

Andrea Gulinelli

AZIONE DEI CARICHI DI GHIACCIO O NEVE.

I carichi di ghiaccio o neve vengono valutati come carichi variabili. Lo spessore di riferimento, S_k , è quello con periodo di ritorno di 50 anni. La formazione di ghiaccio o neve è convenzionalmente cilindrica (valore estremo o ultimo con cui valutare il sovraccarico dovuto ad un manicotto, per i conduttori, di forma cilindrica a sezione circolare). Lo spessore è diverso in relazione alla zona (regioni e/o province) e alla quota sul livello del mare (per quote sopra il livello del mare $a_s > 1500$ m si assume $a_s = 1500$ m). Sono presi in considerazione tre tipi di carico, diversi come spessore, densità, altitudine e località.

Carico di tipo 1 (carico di ghiaccio)

Regioni:

Valle d'Aosta, Piemonte, Liguria, Lombardia, Trentino Alto Adige, Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Veneto, Abruzzo e Molise con quota sopra il livello del mare $a_s > 600$ m. Densità del ghiaccio $\rho_i = 900$ kg/m.

$$S_k = 0 \text{ mm per } a_s \leq 600 \text{ m}$$

$$S_k = 18 + 16 (a_s - 600)/1000 \text{ in mm } (a_s > 600 \text{ m}) \quad (1)$$

(1) La Parte I del presente lavoro è pubblicata sul numero 768 di Elettificazione nel quale si trovano anche le definizioni qui non riportate.

Carico di tipo 2 (carico di neve)

Regioni:

Valle d'Aosta, Piemonte, Liguria, Lombardia, Trentino Alto Adige, Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Veneto e Marche, Abruzzo, Molise, Toscana (con esclusione delle Province di Pisa, Livorno e Grosseto), Umbria, Lazio (con esclusione delle Province di Viterbo, Roma e Latina), Campania (con esclusione delle Province di Napoli e Caserta), Puglia (con esclusione delle Province di Brindisi e Lecce), Basilicata, Calabria (con esclusione delle Province di Vibo Valentia e di Reggio Calabria).

Densità della neve $\rho_1 = 500 \text{ kg/m}^3$.

$$S_k = 24 \text{ mm per } a_s \leq 600 \text{ m} \quad (2)$$

$$S_k = 24 + 20 (a_s - 600)/1000 \text{ in mm (} a_s > 600 \text{ m)} \quad (3)$$

Carico di tipo 3 (carico di neve)

Regioni:

Toscana (Province di Pisa, Livorno e Grosseto), Lazio (Province di Viterbo, Roma e Latina); Campania (Province di Napoli e Caserta), Puglia (Province di Brindisi e Lecce), Sardegna, Calabria (Province di Vibo Valentia e di Reggio Calabria), Sicilia. Densità della neve $\rho_1 = 500 \text{ kg/m}^3$.

$$S_k = 0 \text{ mm per } a_s \leq 600 \text{ m} \quad (4)$$

$$S_k = 20 + 15 (a_s - 600)/1000 \text{ in mm (} a_s > 600 \text{ m)} \quad (5)$$

Allo scopo di calcolare il carico di ghiaccio o neve per un periodo di ritorno diverso, si deve applicare la tab. 4.5.2/IT.1 della CEI 11-4:2017 (coerente con la Tabella B.2 della Norma linee).

Per i cavi MT, avendo forma ad elica, che fornisce maggiore rigidità torsionale alla singola anima e limita l'accrescimento di manicotti di ghiaccio o neve, ed avendo guaina in polietilene con superficie liscia, che favorisce lo scivolamento di eventuali depositi di ghiaccio o neve, si applica al carico di ghiaccio o neve un fattore di riduzione pari a 0,8.

I CARICHI RISULTANTI E METODO DI COMBINAZIONE DI TEMPERATURA, VENTO E GHIACCIO O NEVE

Con riferimento alla tab. 1 della Parte I, per il peso p del conduttore scarico [daN/m] e considerando che i fattori parziali di sicurezza per le azioni sono assunti di valore 1, si indica:

- Ipotesi di temperatura minima V1B e/o V1A

$$P_{1B} = p + Q_{w1B} \quad \text{o} \quad P_{1A} = p + Q_{w1A} \quad (6)$$

- Ipotesi di vento estremo - V2

$$P_2 = p + Q_{w2} \quad (7)$$

- Ipotesi di coesistenza di vento, ghiaccio o neve - V3

Quando si è in presenza di due azioni concomitanti la NTC, come nel caso di vento e di ghiaccio di tipo 1 e anche di tipo 2, prevede di introdurre un coefficiente di contemporaneità (nel caso di specie $\Psi = 0,7$) per tener conto che i due fenomeni non possono verificarsi contemporaneamente al massimo del loro valore. Per fare ciò si mette in conto una rotazione con la quale ognuna delle azioni variabili compare almeno una volta con il suo valore massimo.

$$P_{3I} = p + Q_{w3I} + \Psi \cdot P_{k1} \quad (8)$$

$$P_{3II} = p + Q_{w3II} + \Psi \cdot P_{k2} \quad (9)$$

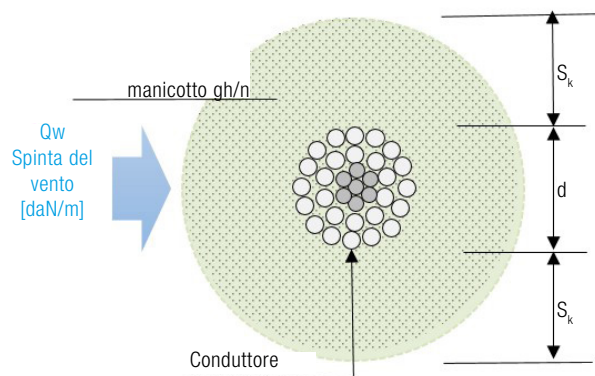
$$P_{3III} = p + \Psi \cdot Q_{w3I} + P_{k1} \quad (10)$$

$$P_{3IV} = p + \Psi \cdot Q_{w3II} + P_{k2} \quad (11)$$

Dove P_k è il peso del manicotto circolare di ghiaccio/neve, calcolabile con le seguenti espressioni, in funzione della densità ρ (peso specifico del ghiaccio o neve) prevista per le varie tipologie di ghiaccio/neve (Figura 1):

$$P_{k1} = \pi[S_{k1}(S_{k1} + d)] 10^{-6} \cdot \rho_1 \cdot 0,981 \text{ [daN/m]} \quad (12)$$

Figura 1 - Manicotto di ghiaccio o neve.



$$P_{k2} = \pi [S_{k2} (S_{k2} + d)] 10^{-6} \cdot \rho_2 \cdot 0,981 \text{ [daN/m]} \quad (13)$$

È scelto il valore risultante maggiore.

Per le pressioni del vento in presenza delle due diverse tipologie di ghiaccio è:

$$Q_{w3I} = q_b \cdot C_e \cdot G_x \cdot C_x \cdot A_I = 0,5 \cdot \rho_v (0,6 \cdot V_b)^2 \cdot C_e \cdot G_x \cdot C_x \cdot A_I \quad (14)$$

$$Q_{w3II} = q_b \cdot C_e \cdot G_x \cdot C_x \cdot A_{II} = 0,5 \cdot \rho_v (0,6 \cdot V_b)^2 \cdot C_e \cdot G_x \cdot C_x \cdot A_{II} \quad (15)$$

Dove il valore di q_b è uguale nei due casi e $A_I = (d + 2S_{k1})10^{-6}$ e $A_{II} = (d + 2S_{k2})10^{-6}$ rappresentano l'area per unità di lunghezza [m²/m] del conduttore caricato del manicotto nei due casi considerati.

- Ipotesi di massima temperatura per la verifica dei franchi e delle distanze – V4.

Per queste verifiche, già indicate con f1), f2), f3) e g) nella tab. 1 della Parte I, previste in assenza di vento e ghiaccio, è:

$$P_4 = p$$

In Appendice sono riportati i risultati di calcolo dei sovraccarichi su un conduttori e il conseguente tiro che si instaura sullo stesso nei punti di attacco al sostegno, con la combinazione secondo la NTC e con la combinazione vettoriale classica, ad esempio per l'ipotesi V₃:

$$P_{3(II)} = [(P + P_{k1(2)})^2 + Q_{w3(II)}^2]^{1/2}$$

IPOTESI DI CALCOLO PER LA VERIFICA DEI SOSTEGNI (TAB. 4.2/IT.1 CEI 11-4:2017)

Come già detto nella Parte I le azioni sulle linee sono dovute alla spinta del vento, all'azione del tiro dei conduttori e delle funi di guardia anche in caso di ipotesi di rottura dei conduttori e delle funi di guardia medesime, al peso proprio dei componenti, al peso di formazioni di ghiaccio o neve sui conduttori e sulle funi di guardia, agli effetti della temperatura, alle azioni di costruzione e manutenzione e ai fenomeni sismici. I fattori parziali d'azione, fatta eccezione delle ipotesi dei carichi di costruzione e manutenzione, sono assunti pari a 1. Le ipotesi di carico per il calcolo di verifica dei sostegni sono riassunte nella tabella 1. Anche se non specificato nella norma CEI 11-4:2017 si deve intendere che le ipotesi 2a, 2b, 2c e 2d non contemplano presenza di vento.

Ipotesi 1a e 1b

Si devono mettere in conto la spinta del vento su i conduttori, i sostegni, gli armamenti (Figura 2).

In:

$$1a \rightarrow \text{zona A} \rightarrow v_{en} = \sqrt{C_e} \cdot V_b; \vartheta = -7 \text{ }^\circ\text{C}$$

o in

$$1b \rightarrow \text{zona B} \rightarrow v_{en} = 0,76 \cdot \sqrt{C_e} \cdot V_b; \vartheta = -20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ipotesi 2a

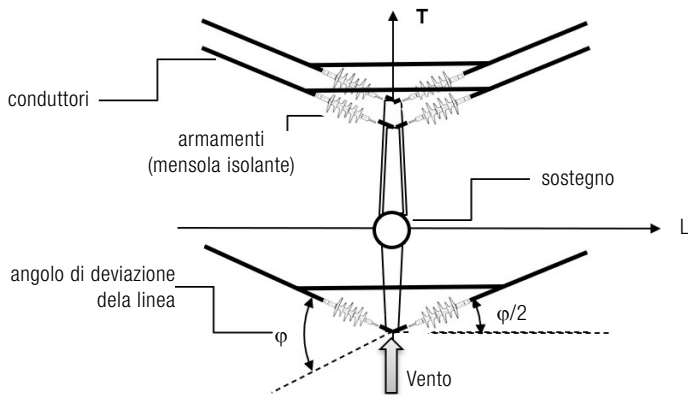
Nelle seguenti condizioni:

assenza di vento, alla $\vartheta = -2 \text{ }^\circ\text{C}$ conduttori integri e uniformemente caricati su tutte le campate con

Tabella 1 - Ipotesi di carico per il calcolo di verifica dei sostegni.

Ipotesi di carico	Carico indicato nel paragrafo	Condizioni
1a	4,4	Massima spinta del vento
1b		Spinta del vento alla temperatura minima
2a	4,5	Carichi uniformi dovuti a ghiaccio/neve su tutte le campate
2b		Carichi uniformi dovuti a ghiaccio/neve, flessione trasversale
2c		Carichi sbilanciati dovuti a ghiaccio/neve, flessione longitudinale
2d		Carichi sbilanciati dovuti a ghiaccio/neve, carico da torsione
3	4,6	Carichi combinati di vento e di ghiaccio/neve
4a	4,8,2 (a)	Carichi di sicurezza, carichi torsionali
4b	4.8.3 (b)	Carichi di sicurezza, carichi longitudinali
5	4.9.1	Carichi di costruzione e manutenzione

Figura 2 - Carichi dovuti alla spinta del vento.



$$P_k = \pi [S_k (S_k + d)] \rho \cdot D_g \cdot 0,981$$

(manicotto con periodo di ritorno a 50 anni), dove D_g è la semisomma delle due campate gravanti laterali al sostegno ^(?).

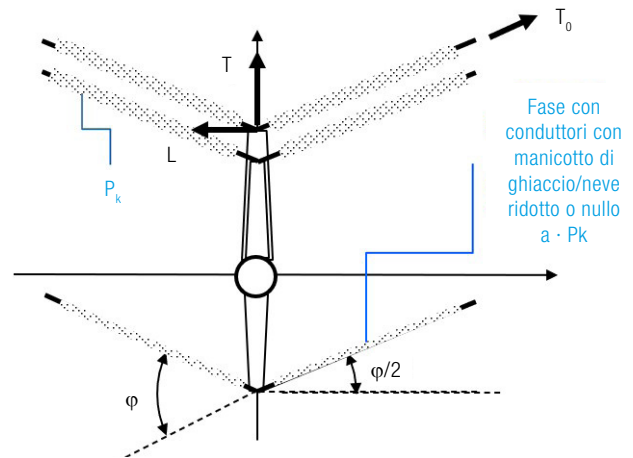
Ipotesi 2b

Nelle seguenti condizioni: assenza di vento, alla $\vartheta = - 2^\circ\text{C}$, conduttori integri e uniformemente carichi su tutte le campate, ma tale da accentuare la flessione trasversale, manicotto ridotto (o anche nullo) in una fase del valore di α -volte il manicotto di ghiaccio/neve (con periodo di ritorno 50 anni) delle altre due fasi. Quindi con carico di ghiaccio:

$$P_k = \alpha \cdot \pi [S_k (S_k + d)] \rho \cdot D_g \cdot 0,981$$

con $\alpha = 0,5$. Il momento flettente trasversale oltre all'azione d'angolo è accentuato (esempio della disposizione delle mensole sfalsate – detta a “quinconce” - figura 3) dal momento dovuto ai carichi verticali non equilibrati dei conduttori carichi

Figura 3 - Flessione trasversale sul sostegno con carichi uniformi.



di ghiaccio/neve (che per altro sussiste anche a conduttori scarichi): due di peso con manicotto P_k e uno di peso con manicotto $0,5 \cdot P_k$; tale momento rapportato con l'altezza del sostegno all'incastro costituisce un tiro trasversale d'angolo da sommare a quello dovuto al tiro d'angolo dei conduttori.

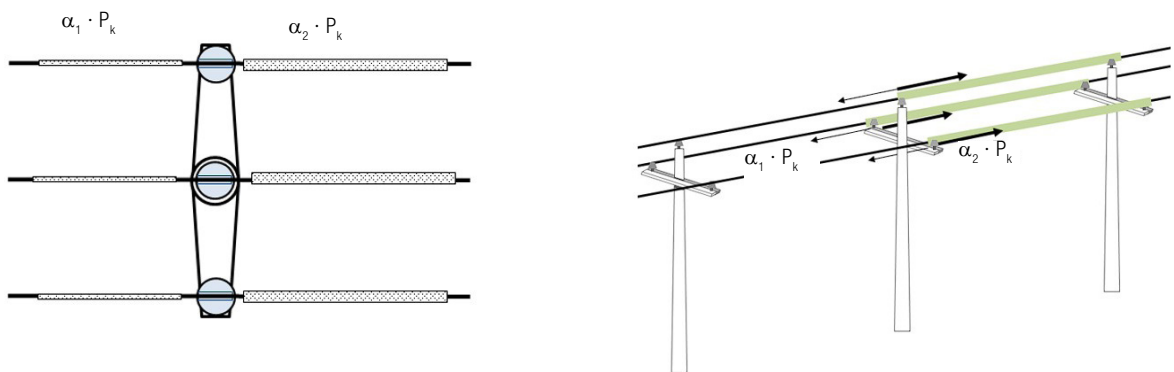
Ipotesi 2c

Nelle condizioni di assenza di vento, alla $\vartheta = - 2^\circ\text{C}$ e conduttori integri. La norma stabilisce di assumere su ciascuna fase manicotti di spessore diverso sulle campate adiacenti tali da provocare un effetto di momento flettente longitudinale in particolare una riduzione dei manicotti sulle campate adiacenti di: $\alpha_1 = 0,3 \cdot P_k$ (manicotto con periodo di ritorno 50 anni) e $\alpha_2 = 0,7 \cdot P_k$ (Figura 4). Se del caso si considera anche $\alpha_1 = 0$ e $\alpha_2 = 1$.

Ipotesi 2d

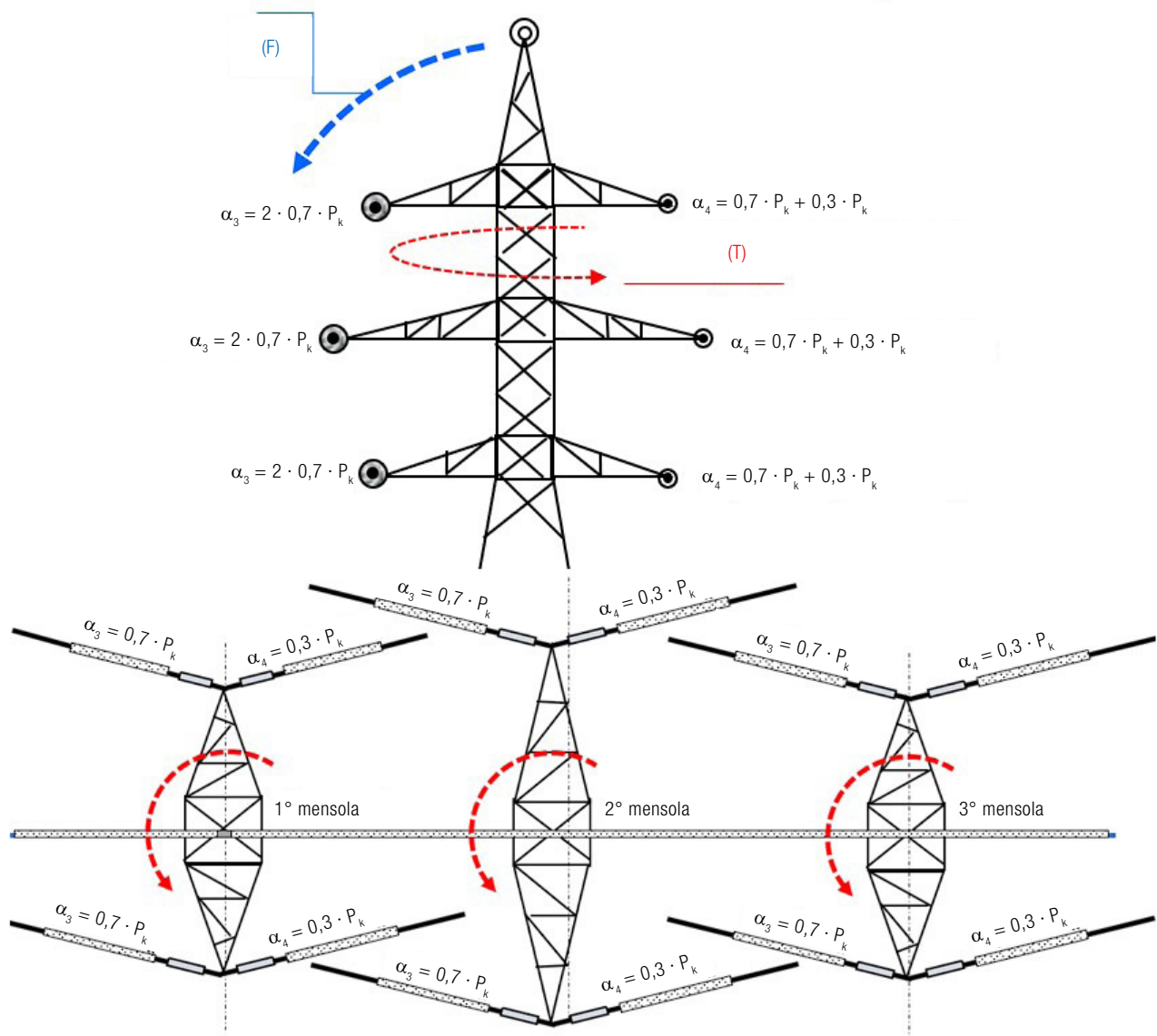
Nelle condizioni di assenza di vento, alla $\vartheta = - 2^\circ\text{C}$ e

Figura 4 - Carichi dovuti al ghiaccio/neve asimmetrici. Flessione longitudinale.



^(?) Per campate a livello corrisponde con la semisomma delle due campate topografiche laterali al sostegno

Figura 5 – Ipotesi 2d. Carichi asimmetrici di ghiaccio/neve, flessione e torsione.



conduttori integri. La norma stabilisce di assumere manicotti di spessore diverso sulle campate adiacenti tali da provocare un effetto di momento flettente e di momento torcente in particolare una riduzione dei manicotti sulle campate adiacenti di: $\alpha_3 = 0,3 \cdot P_k$ (manicotto con periodo di ritorno 50 anni) e $\alpha_4 = 0,7 \cdot P_k$ (Figura 5). La flessione (F), nell'esempio considerato, è dovuta ai carichi verticali non equilibrati che su una terna di conduttori sono proporzionali a $4,2 \cdot P_k$ e sull'altra sono proporzionali a $2,1 \cdot P_k + 0,9 \cdot P_k$, mentre la torsione T (dovuta alle componenti di tiro longitudinali non equilibrate causate dai differenti carichi di ghiaccio sulle campate laterali di ciascuna terna di conduttori (differenze di tiro complessivamente proporzionali a $2,1 \cdot P_k - 0,9 \cdot P_k$).

Ipotesi 3

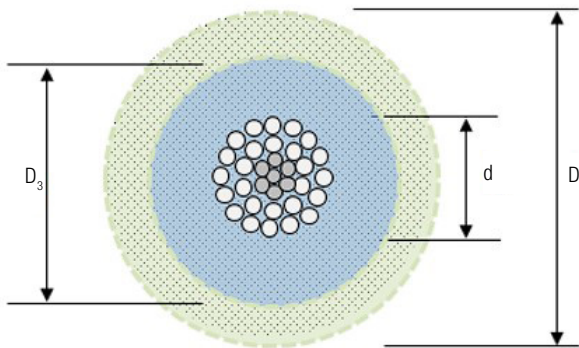
Nelle seguenti condizioni:

- temperatura $\vartheta = - 2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- vento alla velocità $0,6 \cdot \sqrt{C_e \cdot V_b}$;
- ghiaccio/neve concomitante, spessore del manicotto S_k relativo alla regione/località in cui si trova la linea in progetto; sono da prevedere due verifiche distinte per le zone ove è previsto sia il carico di ghiaccio di tipo 1 sia di tipo 2;
- conduttori integri.

Ipotesi 4a

(4.8.2 Norma linee – 4.8 IT.1 CEI 11-4:2017 - Carichi dovuti

Figura 6 – Diametro del manicotto di ghiaccio/neve con periodo di ritorno a 3 anni.



a conduttori rotti)

La verifica va condotta nelle zone ove è prevista formazione di ghiaccio/neve; i carichi devono essere calcolati:

- alla $\vartheta = - 2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- con il carico di vento con velocità $0,6 \cdot \sqrt{C_e \cdot V_b}$ agente sul cilindro di diametro equivalente al sovraccarico di ghiaccio;
- in presenza del ghiaccio con periodo di ritorno 3 anni che vale 0,37 quello con periodo di ritorno a 50 anni fino a ora considerato (Figura 6). La tab. 4.5.2/IT.1 della CEI 11-4:2017 fornisce i fattori di conversione per differenti periodi di ritorno dei carichi di ghiaccio o neve ⁽³⁾.

Ipotesi 4b (4.8.3 Norma linee – 4.8 IT.1 CEI 11-4:2017 - Carichi dovuti a conduttori rotti)

La verifica va condotta nelle zone ove non è prevista formazione di ghiaccio/neve; i carichi devono essere calcolati:

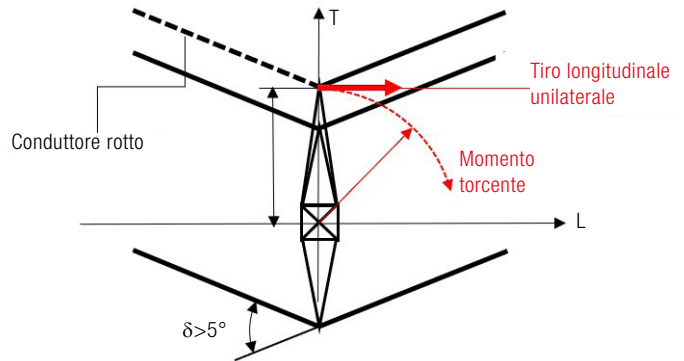
- alla $\vartheta = - 7 \text{ }^\circ\text{C}$;
- con il vento estremo con periodo di ritorno 3 anni, $0,76 \cdot \sqrt{C_e \cdot V_b}$.

Si devono di volta in volta considerare rotti i conduttori o funi di guardia che danno luogo alle più sfavorevoli condizioni di carico per i singoli elementi della struttura del sostegno (figura 7).

Non è prescritta la verifica a conduttori rotti per i sostegni di rettilineo, o calcolati per angoli di deviazione non superiore a 5° , delle linee con tensione $\leq 45 \text{ kV}$ quando i sostegni stessi hanno, nel senso longitudinale della linea, una resistenza meccanica almeno eguale a quella nel senso trasversale della linea.

Per i conduttori ancorati a catene di isolatori in sospensione,

Figura 7 - Ipotesi 4a e 4b – Carichi dovuti a conduttori rotti.



i carichi differenziali devono essere calcolati tenendo conto dello sbandamento in senso longitudinale della catena.

In ogni sostegno di linea con tensione $\leq 45 \text{ kV}$ si devono considerare separatamente:

- a - le parti sulle quali agiscono non più di quattro conduttori;
- b - le parti sulle quali agiscono più di quattro conduttori.

In ogni sostegno di linea con tensione $> 45 \text{ kV}$ si devono invece considerare separatamente:

- a - le parti sulle quali agiscono non più di sei conduttori;
- b - le parti sulle quali agiscono più di sei ma non più di diciotto conduttori.

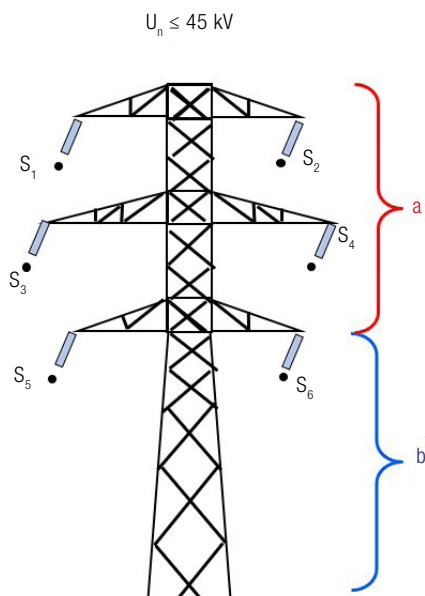
Il criterio che si segue è il seguente (per analogia valido anche per linee a tensione $> 45 \text{ kV}$): ciascuna delle parti di cui in a) deve essere verificata per la rottura di uno dei conduttori o di una delle eventuali funi di guardia che agiscono su di essa. Ciascuna delle parti di cui in b) deve essere verificata per la rottura di due qualunque fra i conduttori o funi di guardia che agiscono su di essa; questi due conduttori o funi di guardia, però, non devono agire entrambi su una stessa parte fra quelle considerate in a).

All'interno dei limiti sopra indicati devono essere considerati rotti i conduttori o le funi di guardia che danno luogo alla condizione di carico più sfavorevole su ciascun singolo elemento della struttura del sostegno. Con riferimento alla figura 8 per la verifica degli elementi strutturali di cui alla parte b), ad esempio si possono assumere rotti i conduttori S_1 e S_5 .

Per i conduttori sostenuti da catene di isolatori in sospensione, i carichi differenziali possono essere calcolati

⁽³⁾ Nel caso specifico il fattore di conversione 0,37 considerato porta il diametro sullo spessore del manicotto di ghiaccio/neve a ridursi al valore $D_3 = \sqrt{(0,37 \cdot D^2 + 0,63 \cdot d^2)}$.

Figura 8 - Carichi di sicurezza - Carichi torsionali. Rottura simultanea dei conduttori.



tenendo conto dello sbandamento della catena. Per il calcolo dell'azione derivante dalla rottura di un conduttore (singolo o appartenente ad un fascio) su un sostegno, può essere applicato il tiro massimo della tratta all'interno della quale si trova il sostegno. Da ultimo si deve segnalare che niente è precisato per quanto riguarda le linee in cavo aereo su fune portante, ossia se le ipotesi di verifica ai carichi di sicurezza prevedono la rottura della stessa.

Ipotesi 5

I carichi di costruzione e di manutenzione devono essere indicati nelle specifiche di progetto unitamente alla temperatura dei carichi permanenti. Si devono prevedere anche dei carichi di lavoro i cui valori, che dipendono dai metodi di costruzione, di accesso e dall'attrezzatura impiegata, sono da associare ai carichi permanenti. Devono essere moltiplicati per 1,5 (fattore parziale di azione).

APPENDICE

Si consideri una campata di conduttore di cui ai dati in appresso del quale si vuol conoscere il massimo valore assunto dal tiro assiale massimo all'attacco alto in corrispondenza di un sostegno capolinea (punto di linea area cavo interrato) di una campata di linea a MT.

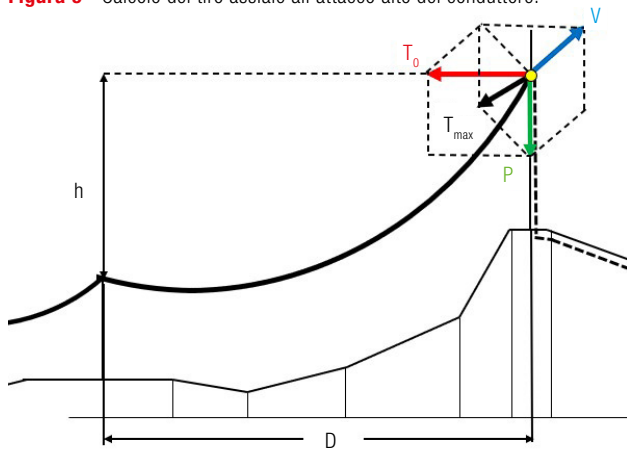
Conduttore alluminio acciaio ACSR 150.

- S → Sezione totale 148,5 mm²;
- p → Massa 0,516 kg/m (0,506 daN);
- R → Carico di rottura 4696 daN
- E → Modulo di elasticità 7754 daN/mm²;
- α → Coefficiente di dilatazione termico 18,9 · 10⁻⁶ °C⁻¹;
- d → Diametro conduttore 15,85 mm (d · 1m ≡ A [m²/m]);
- D → Campata topografica 200 m;
- h → Dislivello fra gli attacchi 30 m;
- k → Costante altimetrica (h/D=0,15);
- T_o → Tiro orizzontale nell'ipotesi EDS 436 daN;
- H_{ft} → quota sul suolo della linea 14 m;

Tabella 2

Norma CEI 11-4:2017									
Ipotesi	Sovraccarico [daN/m]	P+P _k [daN]	Vsc - Spinta vento [daN/m]	EDS daN	Tiro orizzontale [daN]	Tiro assiale massimo [daN]	Carico rottura R [daN]	Carico limite R/γ _M [daN]	T _{max} /R/γ _M [%]
V1 _B	3,15 2,70	0,506	2,64	436	2250 2020	2298 2068	4696	3757	61 55
V2≡V1 _A	5,09 4,61	0,506	4,58		3150 2980	3226 3056			86 81
V3	4,90 3,91	2,816	2,43		3050 2560	3148 2656			84 71
		2,506	3,00		3145 2655	84 71			
V4 _B	0,506	0,506	---		400	415			11
V(2a)	2,81 2,37	2,81	---		2000 1750	2083 1853			55 49
	2,51 2,12	2,51	---	---	---	---			
Nota: valori risultanti con i sovraccarichi calcolati con somma scalare -- valori risultanti con i sovraccarichi calcolati con somma vettoriale									
Norma CEI 11-4:1998									
MSA	1,252	0,506	1,14	436	1025	1052	4696	1878	56
MSB	1,647	1,480	0,71		1325	1371		(0,4 · R)	73
MFA	0,506	0,506	---		381	396		---	21
MFB	0,506	0,506	---		400	415		---	22

Figura 9 - Calcolo del tiro assiale all'attacco alto del conduttore.



- Sito Emilia Romagna altitudine $a_s = 850$ m (Regioni agricole con siepi di confine, con rare piccole fattorie, poche case e pochi alberi – NTC - Categoria II[^] di esposizione del sito).

00000

La tabella 2 porta il riepilogo dei risultati raffrontati anche con quelli ottenuti in applicazione della norma CEI 11-4:1998. Il tiro assiale massimo è stato calcolato con la seguente espressione

$$T_{\max} = [T_0^2 + (V_{sc} \cdot D/2)^2 + (p_v \cdot D/2 + K \cdot T_0)^2]^{1/2}$$

Dove (Figura 9):

- $V = V_{sc} \cdot D/2$ spinta del vento sul conduttore perpendicolare all'asse della linea;
- T_0 tiro orizzontale agente su un piano parallelo a quello dell'asse della linea, ortogonale a quello contenente V_{sc} ; i valori sono calcolati risolvendo l'equazione del cambiamento di stato della catenaria partendo dall'ipotesi base EDS di $T_0 = 436$ daN ($T_0/S = \sigma = 3$ kg/mm²);
- $p_v = (p + P_k)$ peso del conduttore e del manicotto di ghiaccio, agente sullo stesso piano di T_0 ;
- $P = p_v \cdot D/2 + K \cdot T_0$ componente verticale del tiro assiale massimo.

Continua sul prossimo numero.

(*) In via conservativa alla $\theta = 0^\circ$ C.