Facoltà di Ingegneria – Università degli Studi di Bologna

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Marco Gentilini

Contributo alla valutazione tecnico – economica delle linee di trasmissione energetica.

Quaderni del Dipartimento

MARCO GENTILINI

CONTRIBUTO ALLA VALUTAZIONE TECNICO–ECONOMICA DELLE LINEE DI TRASMISSIONE ENERGETICA.

1 – GENERALITA'.

Per una funzione: $y = y(x)$, monotona decrescente, supposto di riportare la grandezza y al valore iniziale, ($y = y_o$, per: $x = 0$), a intervalli regolari con mezzi esterni, la pendenza, se gli intervalli di ripristino sono sufficientemente contenuti, può ritenersi, (a meno dei gradini di risalita), costante: $dy(x)/dx = [dy(x)/dx]_o = -a$.
Il "rendimento di trasmissione" della grandezza y lungo il tratto, (Dx), di ripristino delle condizioni iniziali, vale quindi: $h = (y_o - aDx)/y_o$ e il rendimento totale, indicando con Dx_t la variazione totale della variabile x: $h_t = \left(\frac{y_o - aDx}{y_o}\right)^{\frac{Dx_t}{Dx}} = \left(1 - a\frac{Dx}{y_o}\right)^{\frac{Dx_t}{Dx}}$.
Supponendo un ripristino continuo, si ha:

$$\lim_{Dx \to 0} h_t = \lim_{Dx \to 0} \left(1 - a\frac{Dx}{y_o}\right)^{\frac{Dx_t}{Dx}} = e^{-a\frac{Dx_t}{y_o}},$$

ovvero in funzione della variabile x: $h(x) = e^{-ax/y_o}$.
Per la trasmissione a distanza di potenza, la funzione risulta: $P = P(L)$, con L coordinata spaziale di trasferimento.

2 – TRASMISSIONE DI POTENZA MECCANICA IN FORMA DI PRESSIONE DI UN FLUIDO.

Indicando con:
- D diametro della tubazione:
- k_a coefficiente di attrito fluidodinamico;
- f_c coefficiente maggiorativo di perdite concentrate;
- d_s densità del fluido;
- L lunghezza della tubazione;
- Q portata volumetrica del fluido;
- G portata in massa del fluido.

in tal caso si ha: $\mathbf{P = GDp/d_s}$, con: $\mathbf{a = \frac{dP}{dL} = \frac{8k_a(1 + f_c)G^3}{d_s^2\pi^2D^5}}$,

$\mathbf{\frac{a}{P} = \frac{8k_a(1 + f_c)G^2}{d_s\pi^2D^5Dp}}$, da cui: $\mathbf{h(L) = e^{-\frac{8k_a(1+f_c)G^2}{d_s\pi^2D^5Dp}L}}$.

3 – TRASMISSIONE DI POTENZA TERMICA.

Indicando con:
D diametro della tubazione:
$\mathbf{k_a}$ coefficiente di attrito fluidodinamico;
$\mathbf{R_t}$ resistenza termica per unità di lunghezza della condotta di trasporto del fluido;
$\mathbf{c_p}$ calore specifico del fluido,

in caso di fluidi monofase, si ha: $\mathbf{Q = Gc_pDT}$; $\mathbf{a = \left(\frac{dQ}{dL}\right)_o = \frac{DT}{R_t}}$, da cui:

$\mathbf{\frac{a}{Q} = \frac{1}{Gc_pR_t}}$, e quindi: $\mathbf{h(L) = e^{-\frac{L}{Gc_pR_t}}}$, mentre in caso di fluidi saturi, risulta: $\mathbf{Q = GDh}$; $\mathbf{a = \frac{dQ}{dL} = \frac{DT}{R_t}}$; $\mathbf{\frac{a}{Q} = \frac{DT}{GDhR_t}}$,

da cui: $\mathbf{h(L) = e^{-\frac{DT}{GDhR_t}L}}$.

4 – TRASMISSIONE DI POTENZA ELETTRICA.

Le perdite elettriche sono imputabili all'effetto Joule, per cui in un tratto elementare di conduttore si ha: $\mathbf{dP = -\,d(RI^2) = -\,I^2dR}$, con **R** resistenza del conduttore e **I** corrente elettrica, supposta costante.
Indicando con $\mathbf{r_s}$ la resistività per unità di lunghezza e di sezione, **(S)**, del conduttore e con **J**, la densità di corrente, si ottiene:

$$\mathbf{R = r_sL/S,\;\; J = I/S}, \text{ da cui: } \mathbf{dP = -\,r_sJ^2SdL},$$

e quindi: $\mathbf{-\,a = dP/dL = -\,r_sJ^2S}$; $\mathbf{-\,a/P = -\,r_sJ/V}$,
essendo: $\mathbf{P = VI = VJS}$, con **V** tensione applicata.

Si ottiene, quindi: $\mathbf{h(L) = e^{-\frac{r_s JL}{V}}}$, da cui la convenienza a trasmettere la potenza elettrica alle massime tensioni tecnologicamente ed economicamente realizzabili.

I valori di rendimento di trasmissione relativi all'ipotesi di ripristino continuo delle condizioni iniziali, sono i massimi realizzabili.
Infatti per **Dx** finito il rendimento vale:

$$h_d = \frac{y_o - \frac{Dy}{Dx}Dx}{y_o} = 1 - \frac{\frac{Dy}{Dx}Dx}{y_o}.$$

Per **Dy/Dx = – a =** costante, il rendimento risulta sempre minore di quello relativo al ripristino continuo della grandezza:

$$h_d = 1 - a\frac{Dx}{y_o} < e^{-a\frac{Dx}{y_o}} = h.$$

Si ha, infatti: $\mathbf{h_d(0) = h(0) = 1}$, mentre la pendenza, (negativa) della curva $\mathbf{h_d(x)}$**,** risulta in modulo maggiore di quella della curva $\mathbf{h(x)}$:

$$\left|\frac{dh_d(x)}{dx}\right| = \frac{a}{y_o} > \left|\frac{dh(x)}{dx}\right| = \frac{a}{y_o}e^{-a\frac{x}{y_o}}.$$

I risultati vanno corretti per il caso reale, ovvero di stazioni di ripristino delle condizioni iniziali a intervalli finiti.

5 – TRASMISSIONE DI POTENZA MECCANICA IN FORMA DI PRESSIONE DI UN FLUIDO.

In tal caso si ha: **dP/dL = – a =** costante, da cui:

$$h_d(L) = 1 - a\frac{L}{y_o} = 1 - \frac{8k_a(1 + f_c)G^2L}{d_s\pi^2D^5Dp}.$$

La lunghezza massima percorribile, ($\mathbf{L_{max}}$), trasmettendo potenza:

$\mathbf{h_d(L_{max}) = 0}$, risulta: $$L_{max} = \frac{d_s\pi^2D^5Dp}{8k_a(1 + f_c)G^2}.$$

6 – TRASMISSIONE DI POTENZA TERMICA.

In questo caso, non risulta: **dQ(L)/dL = – a =** costante, essendo: $\frac{dQ}{dL} = -\frac{DT}{R_t} e^{-\frac{L}{Gc_pR_t}}$, e per il calcolo del rendimento occorre valutare la potenza, (variabile), dispersa nel tratto **L**:

$$-\int_o^L \frac{dQ}{dL} dL = \int_o^L \frac{DT}{R_t} e^{-\frac{L}{Gc_pR_t}} dL = Gc_pDT\left(1 - e^{-\frac{L}{Gc_pR_t}}\right),$$

e quindi: $h_d(L) = \frac{Q + \int_o^L \frac{dQ}{dL} dL}{Q} = e^{-\frac{L}{Gc_pR_t}}$, ovvero pari al massimo ottenibile.

In questo caso, tuttavia, le due forme di potenza, (quella trasmessa e quella dissipata), non hanno la stessa natura, in quanto il moto del fluido non è sorretto dalla dissipazione di parte dell'energia trasportata, (termica), ma dalla potenza meccanica richiesta per compensarne le perdite di carico, che degrada, infine, in potenza termica.

Nel bilancio occorre, quindi, considerare come potenza utile trasmessa anche quella dissipata per perdite di carico e come potenza spesa l'equivalente termico dell'energia meccanica impiegata.

L'andamento della temperatura del fluido lungo la condotta, risulta la soluzione della equazione di bilancio:

$$-\frac{T - T_o}{R_t} dL + \frac{8k_a(1 + f_c)G^3}{d_s^2\pi^2D^5} dL = Gc_pdT,$$ da cui:

$$T(L) = \left[DT - \frac{8k_a(1 + f_c)G^3R_t}{d_s^2\pi^2D^5}\right] e^{-\frac{L}{Gc_pR_t}} + T_o + \frac{8k_a(1 + f_c)G^3R_t}{d_s^2\pi^2D^5};$$

Il rendimento di trasmissione risulta, dunque:

$$h_d(L) = \frac{Q + \int_o^L \frac{dQ(L)}{dL} dL}{Q + \frac{8k_a(1 + f_c)G^3L}{h_td_s^2\pi^2D^5}} = \frac{Q + \int_o^L \frac{\left[T(L) \pm T_o\right]}{R_t} dL}{Q + \frac{8k_a(1 + f_c)G^3L}{h_td_s^2\pi^2D^5}} =$$

$$= \frac{\left[\frac{DT}{R_t} - \frac{8k_a(1+f_c)G^3}{d_s^2\pi^2D^5}\right]\left(1 \pm e^{-\frac{L}{Gc_pR_t}}\right) + \frac{8k_a(1+f_c)G^2L}{R_tc_pd_s^2\pi^2D^5}}{\frac{DT}{R_t} + \frac{8k_a(1+f_c)G^2L}{R_tc_ph_td_s^2\pi^2D^5}},$$

con h_t rendimento di conversione all'utenza di energia termica in energia meccanica/elettrica.

In caso di fluidi bifase, si ha: $Q = GDh$; $dQ/dL = -DT/R_t = -a$, e il rendimento risulta: $h_d(L) = 1 - a\frac{L}{y_o} = 1 - \frac{DT\,L}{GDhR_t}$, ovvero:

$$h_d(L) = \frac{\left[Q - \frac{DT}{R_t}L + \frac{8k_a(1+f_c)G^3L}{d_s^2\pi^2D^5}\right]}{Q + \frac{8k_a(1+f_c)G^3L}{h_td_s^2\pi^2D^5}} =$$

$$= \frac{\left[Dh - \frac{DT}{GR_t}L + \frac{8k_a(1+f_c)G^2L}{d_s^2\pi^2D^5}\right]}{Dh + \frac{8k_a(1+f_c)G^2L}{h_td_s^2\pi^2D^5}}.$$

7 – TRASMISSIONE DI POTENZA ELETTRICA.

In questo caso si ha: $-a = dP/dL = -r_sJ^2S$ = costante, da cui:

$$h_d(L) = 1 - aL/y_o = 1 - r_sJL/V,$$

da cui la convenienza alla trasmissione alle massime tensioni tecnologicamente ed economicamente realizzabili.

La lunghezza di linea massima percorribile, (L_{max}), trasmettendo potenza, [$h_d(L_{max}) = 0$], risulta: $L_{max} = V/(r_sJ)$.

Circa le dimensioni delle linee di trasmissione, si ha:

$P = (\pi D^2/4)d_sc\ Dp$, per la trasmissione di potenza meccanica tramite un fluido in pressione, con **c** velocità del fluido nella condotta;

$\mathbf{Q = (\pi D^2/4) d_s c\ \ c_p DT}$, ovvero: $\mathbf{Q = (\pi D^2/4) d_s c\ \ Dh}$, con diametro di isolamento pari a: $\mathbf{D\, e^{\frac{2\pi c_{ti}}{R_t}}}$, per la trasmissione di potenza termica;
$\mathbf{P = (\pi D_c^2/4)\ JV}$, con $\mathbf{D_c}$ diametro del conduttore, per la trasmissione di potenza elettrica.

Il peso delle linee per unità di lunghezza vale, quindi:

$\mathbf{\pi D^2 d_{st} r_d}$, con $\mathbf{d_{st}}$ densità del materiale costruttivo delle tubazioni, per la trasmissione di potenza meccanica e termica;

$\mathbf{(\pi D_c^2/4)\ d_{sr}}$, con $\mathbf{d_{sr}}$ densità del conduttore, per la trasmissione di potenza elettrica.

Rispetto alle linee elettriche, le linee fluidodinamiche di trasmissione di energia, presentano valori inferiori del rendimento e maggiori pesi, ingombri e quindi costi, mentre il rendimento delle macchine termiche e fluidodinamiche risulta assai inferiore a quello relativo alle macchine elettriche.

Il sistema di trasmissione energetica più economico appare, quindi, la linea elettrica sia per le ridotte dimensioni, affidabilità, flessibilità, agevole regolazione e semplice frazionamento, sia per gli elevati rendimenti di trasmissione e di utilizzazione, al punto da permettere lo sviluppo industriale svincolando le centrali di produzione di potenza dalle esigenze di frammentazione alle utenze e di ubicazione geografica rispetto ai centri industriali e civili di utilizzo.

****