6. Generatori di corrente controllati

6.1 Generatori con un solo operazionale

In molte applicazioni è utile poter disporre di generatori di corrente controllati in tensione. Un modo semplice, ad esempio, per ottenere un segnale a dente di sega è quello di caricare, e scaricare, con corrente costante una capacità. Partiamo quindi dalla considerazione che per ottenere una rampa lineare di tensione si può caricare una capacità con una corrente costante I_K.
In tal caso la tensione sul condensatore V_C sarebbe

$$V_C = \frac{Q}{C} = \frac{I_K t}{C} \qquad (1.6)$$

Possiamo costruire un circuito come quello della Fig. 1.6, dove la tensione sul condensatore è dovuta alla corrente che fluisce attraverso la resistenza R_C e attraverso la R_F. La corrente attraverso R_C cala esponenzialmente al crescere della tensione V_C, quindi dimensioniamo R_F in modo da compensare questo calo attraverso R_C al fine di tenere costante la corrente di carica del condensatore I_K.
L'amplificatore con guadagno G, non invertente e finito, fornisce la tensione di correzione V_C*G. La condizione per rendere costante la corrente di carica, somma delle due correnti, è

$$I_{RC} + I_{RF} = I_K \qquad (2.6)$$

dove I_K è anche il valore della corrente iniziale a condensatore scarico

$$I = \frac{V^{CC}}{R_c} \qquad (3.6)$$

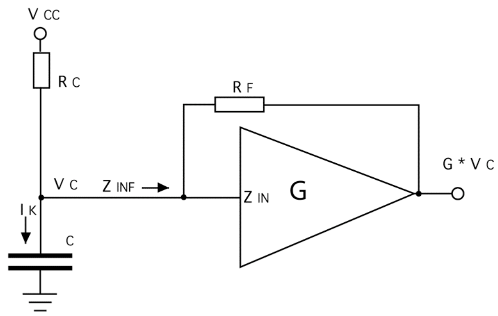

Fig. 1.6

Imponendo la carica a corrente costante avremo quindi dalle (2.6) e (3.6)

$$\frac{V^{CC}-V_C}{R_C}+\frac{GV_C-V_C}{R_K}=\frac{V^{CC}}{R_C} \qquad (4.6)$$

dalla quale si ricava quanto deve valere il guadagno dell'amplificatore non invertente

$$G=\frac{R_C+R_F}{R_C} \qquad (5.6)$$

Se osserviamo la Fig. 1.6 vediamo che per l'amplificatore non invertente con guadagno G la R_K è una resitenza di controreazione positiva.
Pertanto applicando la (11.2) si ottiene, tenedo presente qunto detto nel paragrafo 3 a proposito dell'impedenza d'ingresso infinita per gli amplificatori non invertenti del tipo di Fig. 5.3, l'impedenza d'ingresso con controreazione

$$Z_{INF}=\frac{Z_{IN}R_F}{R_F+(1-G)Z_{IN}}=\frac{R_F}{(1-G)} \qquad (6.6)$$

La capacità C vedrà come impedenza Z_K, parallelo della (6.6) con la R_C.
Conviene notare a questo punto che la (6.6) è una *impedenza negativa*. Il parallelo visto dalla C sarà quindi

$$Z_K = \frac{R_C * \frac{R_F}{(1-G)}}{R_C + \frac{R_F}{(1-G)}} \tag{7.6}$$

Poichè I_K deve essere costante, la (7.6) sarà quindi l'impedenza d'uscita di un generatore di corrente, quindi deve avere valore infinito. La condizione per cui Z_K valga infinito è che sia nullo il denominatore

$$R_C + \frac{R_F}{(1-G)} = 0 \tag{8.6}$$

che ci da nuovamente la condizione (5.6) per il guadagno G.
Abbiamo quindi trovato che utilizzando una porzione di controreazione positiva è possibile realizzare *impedenze negative* che in parallelo ad impedenze reali realizzano *impedenze infinite* ovvero generatori di corrente.
Lo schema generale di un tale generatore di corrente, controllato in tensione, sarà quello di Fig. 2.6. per il quale cercheremo la condizione perché sia costante e controllata da V_1 e V_2 la corrente sull'impedenza qualsiasi Z.

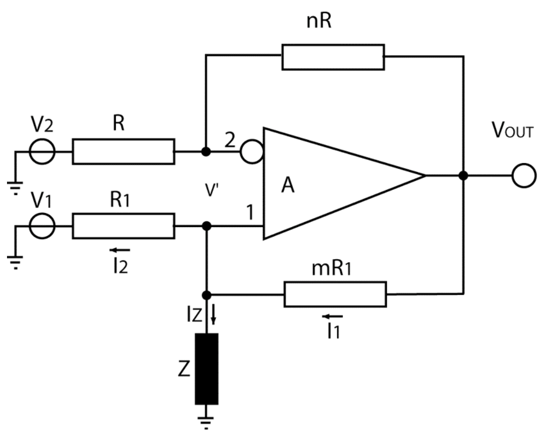

Fig. 2.6

Calcoleremo I_Z partendo dalla considerazione che le tensioni ai nodi d'ingresso sono uguali e che non ci sono correnti entranti, *corto circuito virtuale*.
Porremo poi la condizione che I_Z sia solamente funzione di V_1 e V_2.
Le condizioni per le due maglie d'ingresso, tenendo conto che nel nodo sull'impedenza Z le correnti si sommano come

$$I_Z = I_1 - I_2 \tag{9.6}$$

sono

$$\frac{V_2 - V'}{R} = \frac{V' - V_{OUT}}{nR} \tag{10.6}$$

$$I_Z = \frac{V_{OUT} - V'}{mR_1} - \frac{V' - V_1}{R_1} \tag{11.6}$$

Eliminando V' dalle due precedenti otteniamo

$$\left(V_2 + \frac{V_{OUT}}{n}\right)\frac{n}{n+1} = \left(V_1 + \frac{V_{OUT}}{m} - I_Z R_1\right)\frac{m}{m+1} \tag{12.6}$$

Perché I_Z sia solo funzione di V_1 e V_2 bisogna eliminare V_{OUT} e la condizione è che valga

$$m = n \tag{13.6}$$

In questo caso vale

$$I_Z = \frac{V_1 - V_2}{R_1} \tag{14.6}$$

quindi abbiamo realizzato un generatore di corrente controllato in tensione.
Lo stesso calcolo poteva essere fatto in modo diverso.
Avremmo potuto imporre la condizione che l'impedenza vista da Z fosse infinita. Ovvero che fosse infinito il parallelo tra R_1 e l'impedenza

d'ingresso, con controreazione, dell'amplificatore non invertente, con guadagno (*n+1*), e con resistenza di controreazione mR_1.
Questa impedenza, che chiameremo Z_C vale quindi

$$Z_C = \frac{R_1 * Z_{INF}}{R_1 + Z_{INF}} = \frac{R_1 \frac{mR_1}{1-(n+1)}}{R_1 + \frac{mR_1}{1-(n+1)}} \qquad (15.6)$$

la condizione per cui sia Z_C infinita è che valga

$$R_1 + \frac{mR_1}{1-(n+1)} = 0 \qquad (16.6)$$

ovvero che sia di nuovo

$$m = n \qquad (13.6)$$

Ora abbiamo trovato la condizione per cui l'impedenza *Z* veda un generatore di corrente ma non conosciamo il valore della corrente. Tuttavia sapendo ora che il generatore è di corrente, possiamo metterci nelle condizioni più comode per calcolare la corrente generata utilizzando la struttura di Fig. 3.6. Infatti la corrente è indipendente da *Z* e quindi sostituiamo *Z* con un cortocircuito per rendere immediato il calcolo.
In questo caso *V'* è uguale a zero quindi la corrente I_Z sul cortocircuito è una somma di due correnti

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_{OUT}}{nR_1} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{-nV_2}{nR_1} = I_Z = \frac{V_1 - V_2}{R_1} \qquad (17.6)$$

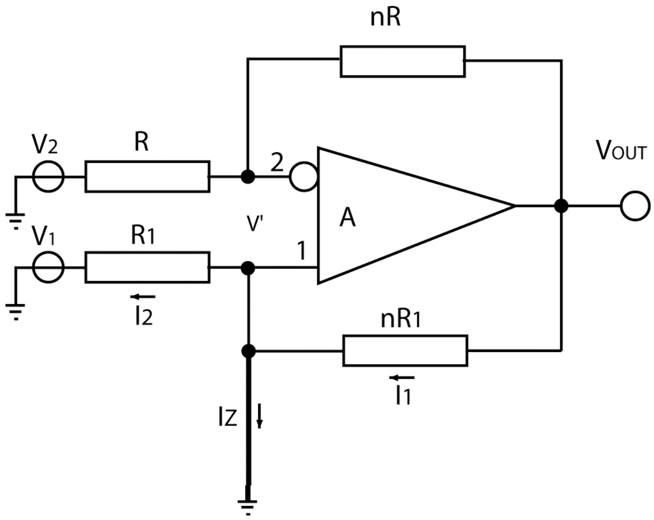

Fig. 3.6

che in definitiva ci riporta alla (14.6).

Il generatore descritto da Fig. 2.6 pur interessante, mostra limiti al suo utilizzo non indifferenti che saranno subito evidenti dall'esempio applicativo che segue. Supponendo di voler realizzare un generatore controllato dalla sola V_2, per semplicità, dovremo scegliere la R_1.

Per avere un buon guadagno R_1 dovrà essere piccola, ad esempio *1000*Ω.

Quindi con un segnale, ad *esempio*, di *1V*, I_Z sarà *1mA*, *indipendentemente dal carico Z.*

Dobbiamo anche definire *n*.

Poichè la corrente I_Z generata dall'amplificatore, per raggiungere il carico *Z* deve attraversare nR_1, sarà opportuno che la nR_1 sia la più piccola possibile.

Poniamo $nR_1=10\Omega$, ovvero *n=0,01*.

R e *nR* sarà opportuno che siano grandi per non portare via corrente all'amplificatore e presentare una impedenza abbastanza grande a V_1.

In definitiva costruiamo il circuito di Fig. 4.6.

La corrente di *1mA* passa su *Z* indipendentemente da quanto vale *Z*.

Se *Z* è piccola, diciamo *10*Ω, ai suoi capi avremo una tensione di *10mV* e nessun problema.

Se invece *Z* fosse *10K*Ω ai suoi capi avremmo *10V*, assolutamente sopportabili dall'amplificatore. Ma attenzione: I_2 diventerebbe di *10mA*. Molto più grande della corrente destinata al carico *Z*. Il fatto che la resitenza che controlla il guadagno di corrente R_1 sia *in parallelo* al carico porta, al crescere dell'impedenza del carico, ad erogare correnti crescenti che tuttavia non sono destinate al carico Z e quindi sono un inutile spreco di potenza.

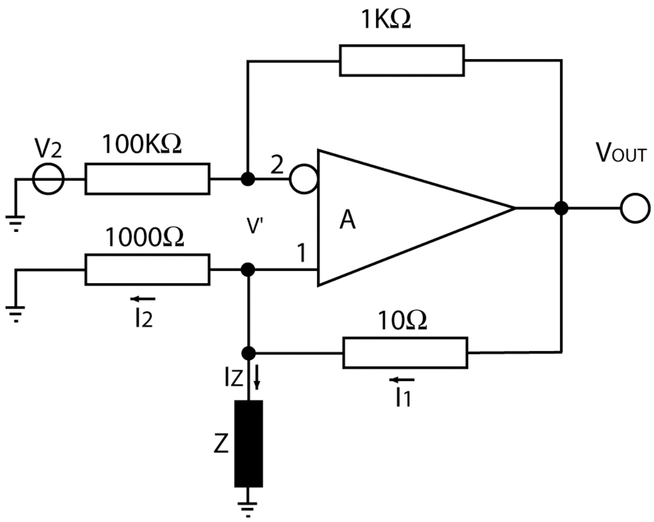

Fig. 4.6

Concludiamo con un ultima considerazione sugli effetti dell'amplificazione non infinita in assenza di controreazione. Di nuovo questo comporterebbe che V' non sarebbe nulla. Questo effetto si somma al fatto che gli amplificatori reali hanno una cosiddetta *tensione di offset* fra gli ingressi, ovvero una piccola differenza di tensione costante, normalmente molto piccola, che in alcuni casi è comunque dell'ordine di qualche mV o della decina di mV. Vediamo dalla Fig. 3.6 come si puo minimizzare l'effetto della tensione di offset tra gli ingressi. In assenza di segnali d'ingresso, per effetto dell'offset, sarà V' diversa da zero. Pertanto sarà V_{OUT}

$$V_{OUT} = (n+1)V' \tag{18.6}$$

che provocherà una $I_{Zoffset}$

$$I_{Zoffset}=\frac{(n+1)V'}{nR_1}=\left(1+\frac{1}{n}\right)\frac{V'}{R_1} \qquad (19.6)$$

Per renderla minima, a parità di R_1, si dovrà tenere n più grande possibile, il che è in contrasto con quanto discusso nell'esempio di Fig. 4.6 dove n conveniva fosse 0,01.
Vedremo ora uno schema ove la resistenza che controlla la corrente sul carico risulti essere in *serie* al carico.
Lo schema di Fig. 5.6 potrà essere usato qualora sia possibile connettere il carico Z senza che uno dei terminali sia a massa.

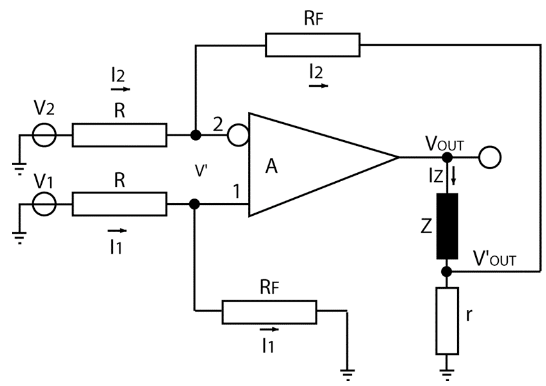

Fig. 5.6

Il calcolo approssimato I_Z è immediato se supponiamo che $R_F>>r$.
Essendo la R_F di controreazione connessa in V'_{OUT}, possiamo pensare che questo divenga il terminale d'uscita dell'amplificatore e che la Z sia incorporata nell'amplificatore come una impedenza che si aggiunge all'impedenza d'uscita dell'amplificatore stesso e che viene praticamente annullata dalla controreazione.
Avremo quindi

$$V'_{OUT}=\frac{R_F}{R}(V_1-V_2) \qquad (20.6)$$

e trascurando la corrente su R_F, la corrente su Z sarà uguale a quella su r

$$I_Z \approx I_r = \frac{V'_{OUT}}{r} = \frac{R_F}{R}(V_1 - V_2)\frac{1}{r} \tag{21.6}$$

Per fare il calcolo esatto di I_Z bisogna tener conto che

$$I_Z = I_r - I_2 = \frac{R_F}{R}(V_1 - V_2)\frac{1}{r} - \frac{\left(V_2 - V_1 \frac{R_F}{R_F + R}\right)}{R} \tag{22.6}$$

ovvero

$$I_Z = \frac{V_1}{R}\left(\frac{R_F}{r} + \frac{R_F}{R_F + R}\right) - \frac{V_2}{R}\left(\frac{R_F}{r} + 1\right) \tag{23.6}$$

che per $R_F >> r$ ritorna ad essere la (21.6).

6.1 Generatori con due operazionali

Un altro schema con resitenza di controllo della corrente in serie al carico Z è dato in Fig. 6.6.

Analizzeremo il circuito e porremo le condizioni per cui I_Z sia solamente funzione di V_1 e V_2.

Dovremo calcolare

$$I_Z = \frac{V_0 - V'}{R} \tag{24.6}$$

Dalla figura risulta che per l'amplificatore *1* sarà, ugualiando il valore delle tensione ai nodi d'ingresso trovati per le due maglie,

$$\frac{V_1 - V_0}{(1+m)R_1} mR_1 + V_0 = \frac{V_2 - V'}{(1+n)R_2} nR_2 + V' \tag{25.6}$$

dalla quale

$$V_0\left[1 - \frac{m}{(1+m)}\right] - V'\left[1 - \frac{n}{(1+n)}\right] = V_2 \frac{n}{(1+n)} - V_1 \frac{m}{(1+m)} \tag{26.6}$$

che per $n=m$

ci da

$$V_0 - V' = (V_2 - V_1)n \tag{27.6}$$

da cui

$$I_Z = \frac{V_0 - V'}{r} = \frac{V_2 - V_1}{r} * n \tag{28.6}$$

Si vede che agendo su n si può anche porre un guadagno al generatore. Si poteva fare il calcolo di I_Z anche in modo diverso.

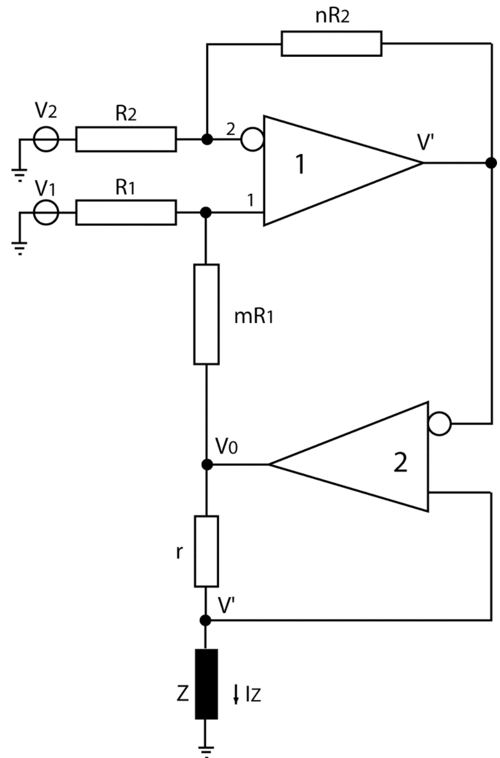

Fig.6.6

Se osserviamo il circuito di Fig. 6.6 riorganizzato come in Fig. 7.6, possiamo considerare l'amplificatore *2*, visto dal nodo dove è connessa *Z*,

come un amplificatore non invertente che ha nella rete di controreazione l'amplificatore *1*.
All'amplificatore non invertente è poi applicata una controreazione positiva attraverso *r*. Apriamo il ramo *r* e calcoliamo il guadagno dell'amplificatore *2* da *V'* a V_0.
In queste condizioni vale

$$V' = \frac{V_0}{1+m} * (1+n) \tag{29.6}$$

Il guadagno è pertanto

$$G = \frac{1+m}{1+n} \tag{30.6}$$

Chiudendo la controreazione attraverso *r* si può calcolare la impedenza vista da *Z* che sarà l'impedenza con controreazione

$$Z_{INF} = \frac{R_F}{1-G} = \frac{R_F}{1-\frac{1+m}{1+n}} \tag{31.6}$$

perchè essa sia infinita dovrà esse *G* uguale a *1* ovvero $n=m$.
Abbiamo trovato la condizione perchè ci sia un generatore di corrente ma non conosciamo la corrente. La calcoliamo analogamente a quanto fatto prima, ovvero la calcoliamo sul cortocircuito della Fig. 8.6.
Può essere interessante notare che la tensione *V'* sull'impedenza di carica, è disponibile anche all'uscita dell'amplificatore *1* dove è riprodotta a bassa impdenza. Nel seguito si vedranno alcune applicazioni.

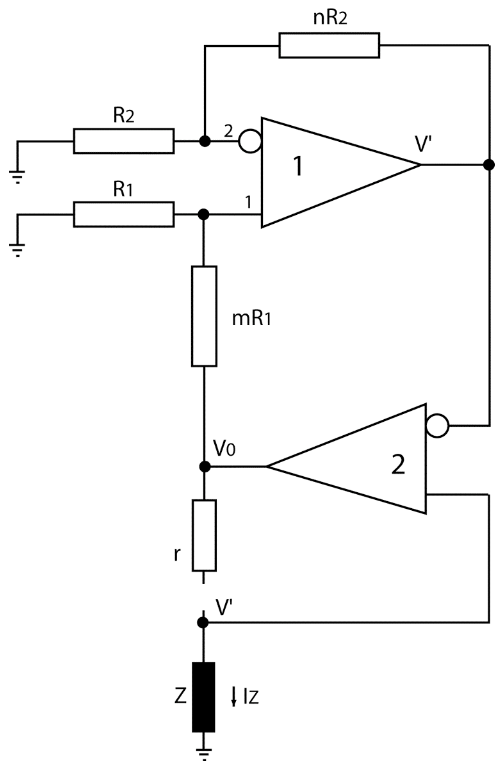

Fig. 7.6

Poichè le tensioni nei nodi *1* e *2* dell'amplificatore sono alla stessa tensione e *V'* vale zero, scriviamo

$$\frac{V_2}{1+n}n = \frac{V_0 - V_1}{1+n} + V_1 \qquad (32.6)$$

dalla quale

$$V_0 = n(V_2 - V_1) \qquad (33.6)$$

e in conclusione

$$I_Z = \frac{V_0}{r} = \frac{V_2 - V_1}{r}n \qquad (34.6)$$

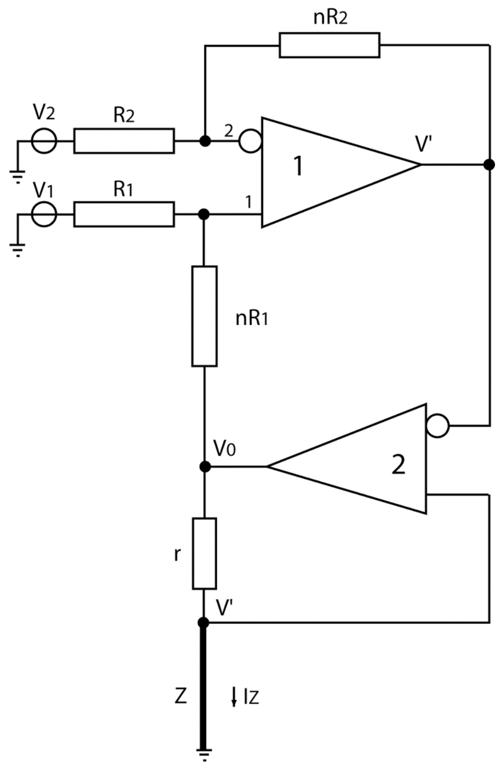

Fig. 8.6