

Appunti di Elettronica

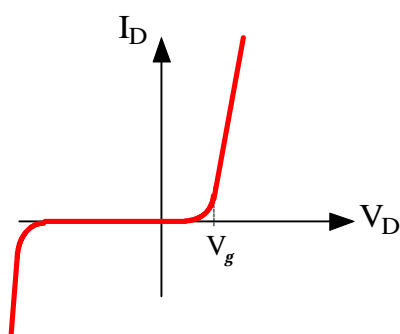
Capitolo 3 – Parte II

Circuiti limitatori di tensione a diodi

<i>Introduzione</i>	1
<i>Caratteristica di trasferimento di un circuito limitatore di tensione</i>	2
<i>Osservazione</i>	5
<i>Impiego di un circuito limitatore di tensione</i>	5
<i>Perfezionamenti del circuito</i>	6
<i>Caratteristica di un circuito limitatore reale: conduttanza finita del diodo in conduzione</i> ..	8
<i>Metodo analitico per la determinazione della caratteristica di trasferimento</i>	10
<i>Influenza di R</i>	11
<i>Limitazione di una tensione sinusoidale</i>	12
<i>Impiego di un diodo Zener per un circuito limitatore</i>	13

Introduzione

Consideriamo la classica caratteristica corrente-tensione di un diodo pn reale:



Siamo in particolare interessati alla zona di *conduzione diretta*, ossia a condizioni di funzionamento in cui la tensione V_D applicata ai capi del diodo è positiva, per cui il diodo è polarizzato direttamente. Questa caratteristica I-V presenta essenzialmente due importanti peculiarità:

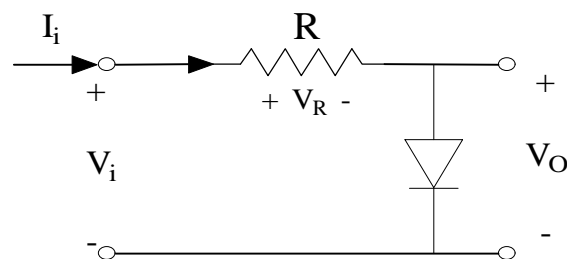
- la prima è che la corrente che attraversa il diodo è molto bassa (praticamente nulla) quando la tensione V_D è inferiore ad un certo valore V_γ (caratteristico di ciascun diodo), che prende il nome di *tensione di accensione*;

- la seconda è invece che, una volta "acceso" il diodo, ossia una volta superata la tensione di accensione ai capi dell'elemento, la corrente prende a crescere molto rapidamente, anche in conseguenza di aumenti ridotti della tensione applicata; possiamo esprimerci dicendo che, quando è in conduzione (ossia è acceso), il diodo presenta una *conduttanza incrementale*, pari a $g_D = \partial I_D / \partial V_D$, abbastanza elevata (o, ciò che è lo stesso, una *resistenza incrementale* abbastanza bassa).

Queste due peculiarità vengono sfruttate in una serie di applicazioni pratiche che coinvolgono i diodi. L'applicazione di cui ci occupiamo in questa sede è quella nei cosiddetti **circuiti limitatori di tensione**, mentre vedremo in seguito quella nei cosiddetti *circuiti alimentatori*.

Caratteristica di trasferimento di un circuito limitatore di tensione

Un semplice **circuito limitatore di tensione** è fatto nel modo seguente:

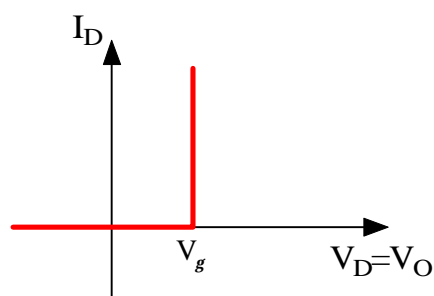


E' presente una tensione di ingresso V_i applicata ai capi di un collegamento in serie tra un resistore ed un diodo; la tensione di uscita V_O viene prelevata ai capi del diodo.

Il problema che ci poniamo è quello di osservare come varia la tensione V_O di uscita del circuito in funzione della tensione in ingresso V_i .

Possiamo rispondere a questa domanda sia a livello intuitivo, sia anche in modo più rigoroso. Vediamo intanto cosa possiamo dire a livello intuitivo.

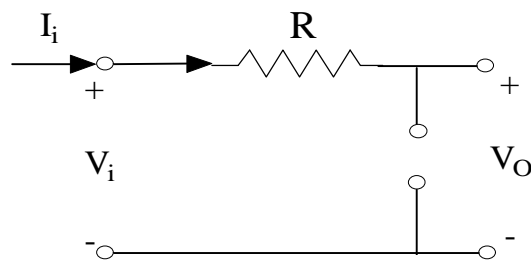
Innanzitutto, se vogliamo fare una analisi più qualitativa che quantitativa, possiamo supporre che la caratteristica del diodo non sia quella reale riportata in precedenza, bensì una sua *linearizzazione a tratti* fatta nel modo seguente:



Questa caratteristica indica per il diodo un comportamento ideale così caratterizzato: esso si comporta come un *circuito aperto* (ossia non lascia passare corrente) per tensioni inferiori alla tensione di accensione V_g , mentre invece si comporta come un *cortocircuito* (cioè lascia passare, senza esercitare alcuna resistenza, una qualsiasi corrente) per tensioni superiori alla tensione di accensione. Detto anche in altri termini, possiamo dire che il diodo presenta una conduttanza infinita (cioè una resistenza nulla) quando è acceso ed una conduttanza nulla (cioè una resistenza infinita) quando è spento.

Sulla base di questa approssimazione, possiamo individuare quale sia la variazione della tensione ai capi del diodo, che è appunto la tensione di uscita che ci interessa, in funzione delle variazioni della tensione di ingresso V_i .

Supponiamo che la tensione V_i parta inizialmente dal valore $0V$ e inizi via via a crescere; fino a quando la tensione ai capi del diodo non raggiunge il valore V_g , il diodo rimane spento, per cui si comporta come un circuito aperto:

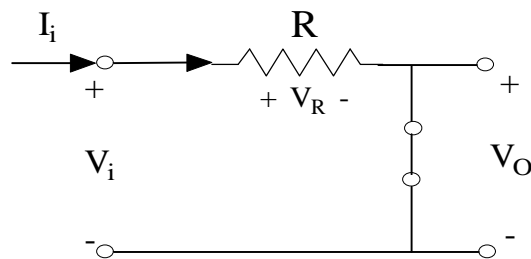


Questo fa sì che non scorra corrente nel resistore e che quindi non ci sia caduta di tensione ai capi di tale elemento; di conseguenza, la tensione ai capi del diodo risulta esattamente uguale alla tensione di ingresso.

Possiamo dunque cominciare a scrivere che

$$\text{per } V_i < V_g \quad \longrightarrow \quad V_o = V_i$$

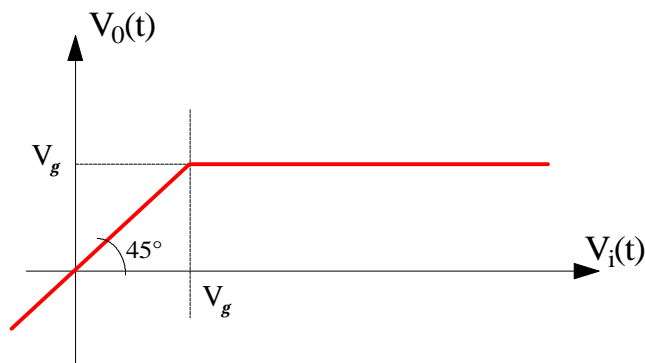
Viceversa, nel momento in cui la tensione ai capi del diodo eguaglia la tensione di accensione V_g , il diodo passa in conduzione e lascia passare corrente nel circuito:



In base alla caratteristica ideale del diodo, a prescindere da quale sia il valore della corrente che fluisce nel dispositivo, la tensione ai suoi capi, ossia la tensione di uscita, rimane costante sul valore V_g : possiamo perciò scrivere che

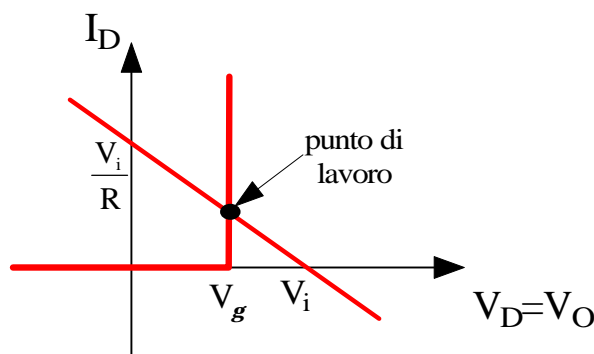
$$\text{per } V_i \geq V_g \quad \longrightarrow \quad V_o = V_g$$

Sulla base di queste due conclusioni possiamo dunque tracciare l'andamento della tensione di uscita in funzione di quella di ingresso:



Questa curva prende il nome di **caratteristica di trasferimento in tensione** (o anche di **caratteristica ingresso-uscita in tensione**) del circuito in esame. Essa mostra chiaramente la funzione di "limitazione della tensione" svolta dal circuito: *se la tensione applicata in ingresso è inferiore al valore V_g , la tensione in uscita riproduce esattamente (almeno in teoria, date le approssimazioni fatte sul diodo) la tensione in ingresso; se, invece, la tensione in ingresso supera il valore V_g , la tensione in uscita si mantiene comunque costante sul valore V_g .*

Possiamo giustificare questo risultato anche in termini più formali, servendoci del concetto di "punto operativo" del circuito in esame. Sappiamo infatti che, per tale circuito, il punto operativo, ossia la coppia (I,V) ai capi del diodo, si può ricavare, graficamente, come intersezione tra la caratteristica del diodo e quella della restante parte del circuito; questa "restante parte" del circuito non è altro che un equivalente di Thevenin dove la forma d'onda del generatore corrisponde alla tensione in ingresso V_i e dove la resistenza equivalente corrisponde ad R ; di conseguenza, l'intersezione tra le due caratteristiche fornisce quanto illustrato nella figura seguente:



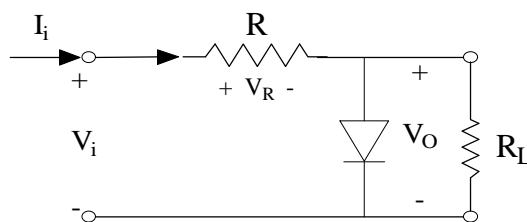
Questo grafico conferma quanto detto prima:

- quando $V_i=0$, la retta si riduce semplicemente ad un punto coincidente con l'origine, per cui non ci sono né tensioni né correnti nel diodo;
- aumentando il valore di V_i , la retta si va spostando verso destra e lo stesso fa il punto di lavoro: tale punto di lavoro, almeno finché $V_i < V_g$, corrisponde sempre alla coppia $(V_i, 0)$, la quale indica che la tensione in uscita è pari a quella di ingresso e che il diodo è spento, per cui né esso né il resistore sono percorsi da corrente;

- nel momento in cui la V_i uguaglia e supera la V_γ , il punto di lavoro non si sposta più lungo l'asse delle ascisse, ma lungo il tratto verticale della caratteristica del diodo relativa alla zona di conduzione: all'aumentare della tensione in ingresso, il punto di lavoro sale dunque verticalmente, il che corrisponde a dire che la tensione si mantiene costante su V_γ , mentre la corrente aumenta.

Osservazione

Spesso, il circuito limitatore descritto poco fa presenta anche un resistore di carico R_L ai capi del quale viene applicata proprio la tensione di uscita V_O del circuito:

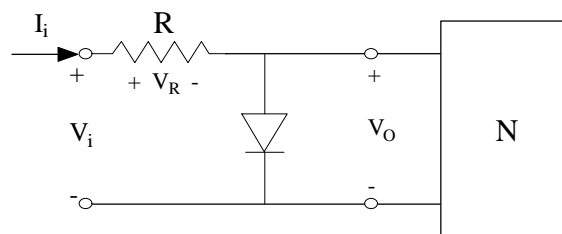


La presenza di R_L non modifica in modo apprezzabile il funzionamento descritto prima, specialmente quando R_L è sufficientemente elevata:

- quando il diodo è spento, la tensione di uscita non è più proprio quella di ingresso V_i , ma la sua partizione su R_L , ossia $\frac{R_L}{R + R_L} V_i$;
- quando, invece, il diodo è in conduzione, la sua resistenza è senz'altro minore di quella di R_L , per cui la gran parte della corrente I_i continua a fluire nel diodo.

Impiego di un circuito limitatore di tensione

L'impiego più classico che si può fare di un circuito limitatore di tensione è quello di effettuare una protezione da tensioni superiori alla V_γ . Tanto per essere chiari, si può pensare ad un collegamento del tipo seguente:



In questo schema, la tensione di alimentazione V_i , anziché essere applicata direttamente ai morsetti del circuito monoporta N , che rappresenta il carico (l'utente), passa prima per un limitatore del tipo descritto prima: lo scopo del limitatore è quello di impedire che ai capi di N giunga una tensione superiore al valore di V_γ . Per esempio, questo è quello che si fa negli strumenti di misura

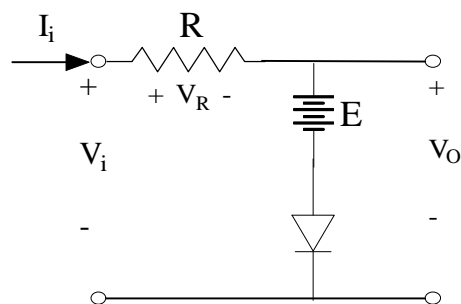
quando si vuole evitare che siano soggetti ad una tensione che supera una certa soglia di tolleranza del dispositivo.

Perfezionamenti del circuito

A questo punto, possiamo fare una serie di osservazioni importanti sui circuiti limitatori di tensione così come descritti fino ad ora.

La prima è la seguente: *non necessariamente la "tensione di soglia", ossia la tensione oltre la quale non si vuole far andare la V_o , deve essere pari alla tensione di accensione V_g del diodo.* Al contrario, è possibile dimensionare il circuito in modo tale che esso limiti una tensione prefissata, di valore qualsiasi (entro certi limiti): basta porre in serie al diodo un generatore di tensione la cui tensione applicata E sia tale che, sommata (il collegamento è in serie) alla V_g , dia proprio il valore della tensione di soglia voluta.

La configurazione circuitale da adottare diventa dunque la seguente:



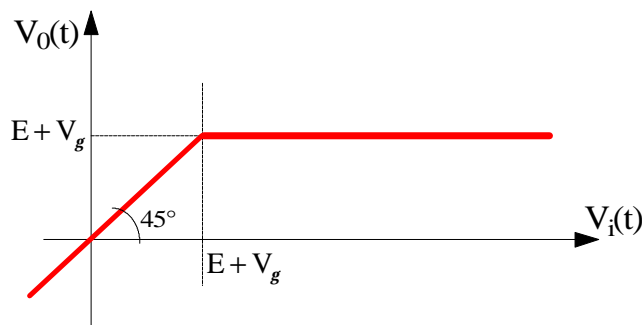
Il principio di funzionamento di questo circuito è ovviamente identico al precedente, salvo per il fatto che la tensione necessaria per accendere il diodo, e quindi per innescare la limitazione della tensione di uscita, non è più solo V_g , ma V_g+E : applicando la LKT osserviamo infatti che

$$V_i = V_D + E + V_R \cong V_D + E$$

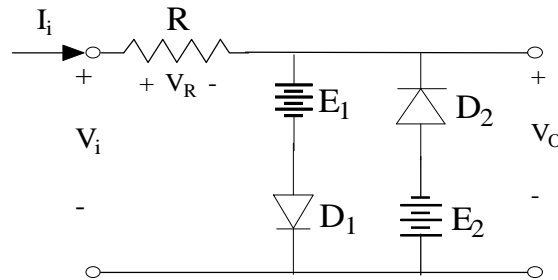
per cui la tensione applicata ai capi del diodo, ossia la tensione di uscita, risulta essere $V_D \cong V_i - E$.

Di conseguenza, perché il diodo vada in conduzione, la tensione di ingresso V_i da applicare è $E+V_g$ ed è quindi questa la tensione che viene limitata.

La caratteristica di trasferimento diventa dunque la seguente:



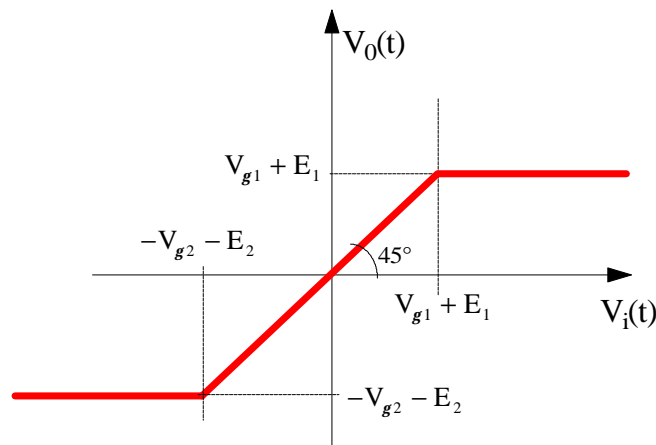
La seconda osservazione riguarda un ulteriore perfezionamento del circuito limitatore: infatti, si nota che, nel circuito fino ad ora considerato, la limitazione della tensione avviene solo per valori positivi della V_i , mentre invece non ci sono (almeno teoricamente) limiti per valori negativi della V_i . Allora, se vogliamo effettuare una limitazione della tensione anche sui valori negativi, ci basta utilizzare un altro diodo, magari con in serie un altro generatore di tensione, secondo la seguente configurazione circuitale:



In base agli stessi principi descritti prima, appare ovvio che questo circuito limita la tensione nell'intervallo

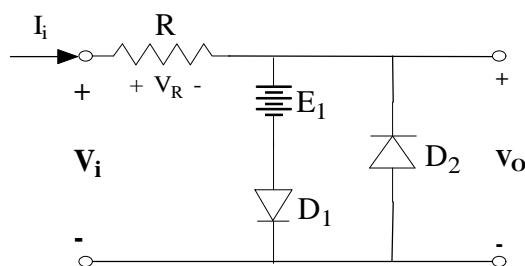
$$[-V_{g2} - E_2, V_{g1} + E_1]$$

ed ha perciò una caratteristica di trasferimento fatta nel modo seguente:

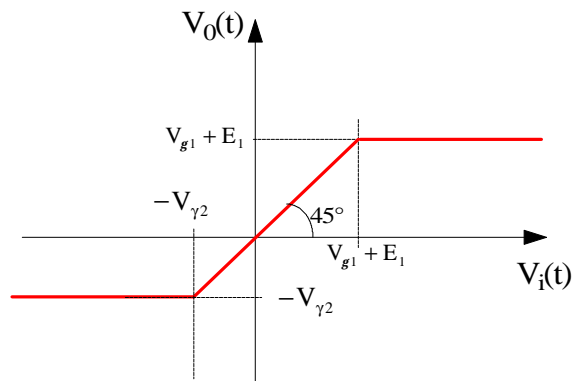


Chiaramente, questa caratteristica sarà simmetrica rispetto all'origine solo se i due diodi sono tecnologicamente uguali e se le batterie forniscono la stessa tensione.

Ovviamente, è anche possibile realizzare una configurazione circuitale del tipo seguente:



In questo caso, la caratteristica di trasferimento in tensione è la seguente:



Caratteristica di un circuito limitatore reale: conduttanza finita del diodo in conduzione

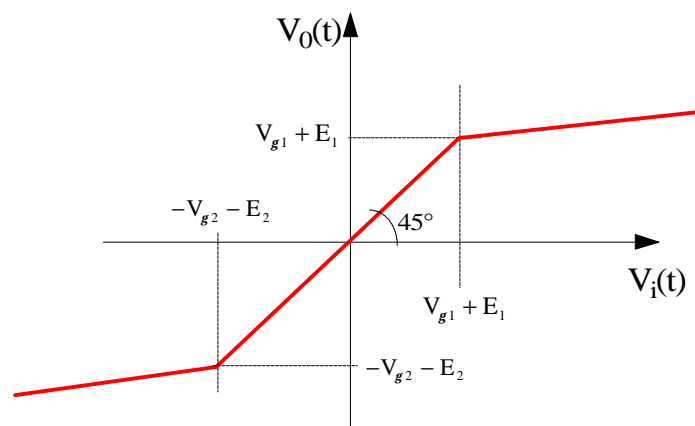
La terza ed ultima osservazione da fare riguarda il comportamento "reale" di un circuito limitatore come quello fino ad ora descritto. Infatti, la descrizione qualitativa fatta fino ad ora si è basata essenzialmente su due ipotesi di fondo:

- il diodo presenta una conduttanza infinita quando è in conduzione ed una conduttanza nulla quando è spento;
- si ignora la possibilità che, polarizzando il diodo in inversa, esso possa incorrere nel fenomeno della cosiddetta "rottura".

Vediamo allora se e come questi fattori possono modificare i discorsi fatti fino ad ora.

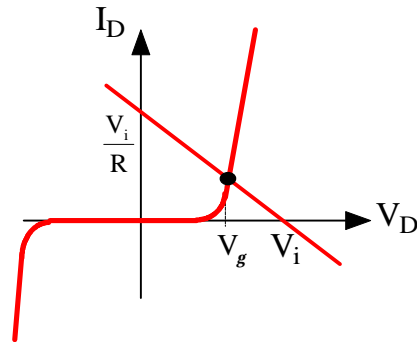
Cominciamo dagli effetti della conduttanza del diodo: l'ipotesi che la g_D sia infinita quando il diodo è in conduzione e nulla quando è spento, fa sì che, nella curva di trasferimento disegnata in precedenza, i due tratti orizzontali siano effettivamente orizzontali ed il tratto obliquo sia esattamente a 45° . Al contrario, in un circuito reale, le cose sono diverse, non fosse altro che per il fatto che la conduttanza del diodo, mentre può essere effettivamente ritenuta praticamente nulla quando esso è spento, non è senz'altro infinita quando esso è in conduzione.

Questo fatto comporta che la caratteristica di trasferimento di un limitatore reale sia fatta nel modo seguente:



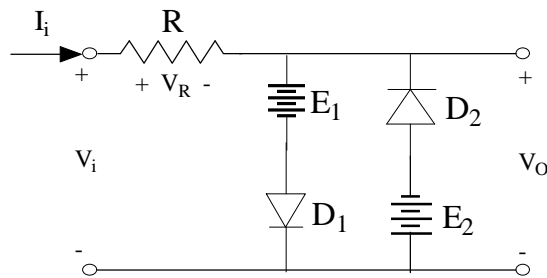
La pendenza del “tratto intermedio” è ancora approssimativamente di 45° (specialmente per bassi valori della tensione V_i , come confermato dai grafici ottenuti con Spice), mentre la pendenza degli altri due tratti non è più nulla. Ciò comporta che l'effetto limitante, nella realtà, non sia così drastico come quello descritto prima a livello puramente teorico.

Ancora una volta, questo può essere confermato per via grafica osservando le variazioni del punto di lavoro del circuito per diversi valori della tensione di ingresso:



Si nota, infatti, che, all'aumentare della V_i , ossia allo spostarsi della *retta di Thevenin* verso destra, il punto di lavoro non si sposta più verticalmente (cioè mantenendo costante la tensione sul valore V_γ), ma si sposta anche leggermente verso destra: ciò comporta che, all'aumentare della V_i , ci sia comunque anche un aumento di $V_D=V_O$. Ovviamente, questo aumento è tanto minore quanto maggiore è la pendenza della curva della corrente I_D , ossia appunto quanto maggiore è la conduttanza del diodo in conduzione.

Per quanto riguarda, infine, la possibilità della rottura di un diodo, le considerazioni da fare sono le seguenti. Consideriamo il circuito riportato nella figura seguente:



Abbiamo detto che questo circuito limita l'escursione della tensione di uscita nell'intervallo $[-V_{g2} - E_2, V_{g1} + E_1]$. Allora, è possibile che il valore di tensione $V_{\gamma1} + E_1$, che è una tensione inversa per il diodo D_2 , sia superiore al valore di tensione di breakdown V_{BD2} di tale diodo; questo fa sì che D_2 si rompa e che quindi il limitatore perda completamente di efficacia.

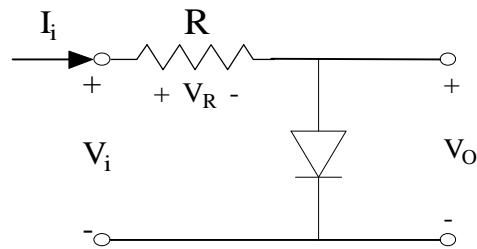
Stesso discorso, ovviamente, per il valore $V_{\gamma2} + E_2$, che è una tensione inversa per il diodo D_1 e potrebbe superare la tensione di breakdown di tale diodo.

Tutto ciò per dire che, nel dimensionare un circuito limitatore di questo tipo, è necessario che l'intervallo entro cui la tensione di uscita viene limitata sia comunque tale che nessuno dei due diodi rischi di essere portato oltre la tensione di rottura.

Metodo analitico per la determinazione della caratteristica di trasferimento

I discorsi che abbiamo fatto fino ad ora per ricavare la caratteristica di trasferimento del circuito limitatore di tensione sono stati essenzialmente di tipo qualitativo. E', invece, possibile ricavare la stessa caratteristica, sia pure facendo comunque qualche approssimazione, mediante metodi più rigorosi.

Consideriamo per semplicità il circuito seguente:

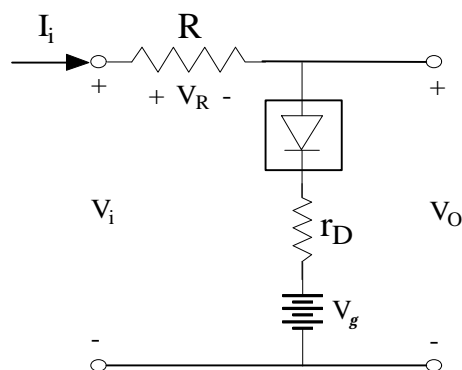


Vogliamo ricavarne la caratteristica reale di trasferimento, dove l'aggettivo "reale" corrisponde alla scelta di includere la conduttanza g_D non nulla del diodo in conduzione.

La prima cosa che possiamo fare è quella di "modellare" in modo opportuno l'elemento non lineare rappresentato dal diodo; per fare questo, dobbiamo considerare essenzialmente 2 caratteristiche del diodo:

- in primo luogo, il fatto che esso conduca una corrente approssimativamente nulla (ossia non conduca) per tensioni inferiori alla tensione di accensione V_γ ;
- in secondo luogo, il fatto che esso, quando è acceso, non si comporta propriamente come un cortocircuito, ossia come un resistore di conduttanza infinita, ma presenta una certa conduttanza finita, per quanto alta.

Queste due caratteristiche possono essere efficacemente modellate nel modo seguente:



Abbiamo cioè sostituito il diodo con un collegamento in serie di tre elementi: il resistore r_D tiene conto, evidentemente, della resistenza in conduzione; il *diodo ideale* e la batteria di tensione V_γ tengono invece conto del fatto che il diodo lascia passare corrente (il cui valore è regolato dalla r_D e, in misura minore, da R) quando è acceso e non lascia passare corrente quando è spento.

A questo punto, per ricavare la tensione di uscita V_o in funzione di quella di ingresso V_i , possiamo applicare il principio della sovrapposizione degli effetti:

- quando la batteria di tensione V_g è passivata, la tensione di uscita vale

$$V'_o = \frac{r_D}{R+r_D} V_i.$$

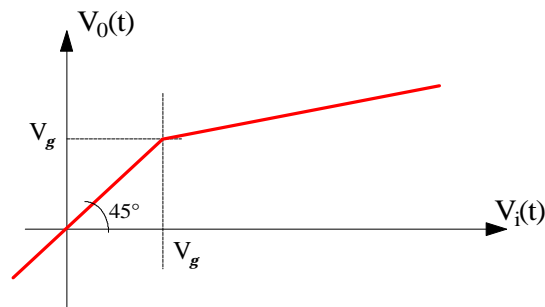
- quando, invece, la tensione V_i è assente, la tensione in uscita vale

$$V''_o = \frac{r_D}{R+r_D} V_g.$$

Sommando questi due contributi, otteniamo

$$V_o = \frac{r_D}{R+r_D} V_i + \frac{r_D}{R+r_D} V_g$$

Questa relazione, unita all'approssimazione per cui il diodo non lascia passare corrente quando è spento ($V_i < V_\gamma$), consente di tracciare la curva di trasferimento seguente:



Ovviamente, dall'equazione trovata prima, si deduce che la pendenza della retta per $V_i > V_\gamma$ è pari a $\frac{r_D}{R+r_D}$ (si tratta del coefficiente della V_i): questo mostra che l'effetto di limitazione ottenuto con il circuito considerato è tanto migliore quanto minore è il valore della r_D (o, ciò che è lo stesso, quanto maggiore è il valore di g_D).

Il caso ideale, considerato all'inizio, è quello in cui $r_D=0$, mentre ci si allontana dalla idealità tanto più quanto più r_D cresce.

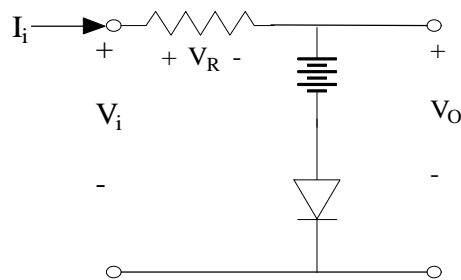
Influenza di R

Si può anche osservare che, non potendo agire sulla r_D , che è un parametro praticamente costante del diodo, è possibile agire sul valore di R : infatti, aumentando R , quel rapporto si riduce e quindi l'effetto limitante migliora.

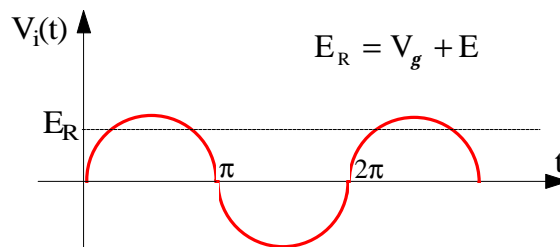
Tuttavia, è facile verificare (ed è anche abbastanza intuitivo) che, aumentando R , cioè, in definitiva, aumentando la caduta di tensione sul resistore, varia anche l'inclinazione del tratto di curva di trasferimento compreso tra $-V_\gamma$ e $+V_\gamma$: in particolare, tale inclinazione aumenta all'aumentare di R , il che comporta che la tensione di uscita, in questa regione di funzionamento, non sia più uguale alla tensione di ingresso. Tuttavia, dato che il valore di R è sotto il nostro diretto controllo, possiamo tenere conto della sua influenza sulla tensione in uscita prevedendo opportuni trattamenti di tale tensioni che recuperino, in qualche modo, gli effetti di R .

Limitazione di una tensione sinusoidale

Vediamo ora di chiarire ancora meglio, con un esempio concreto, quale effetto possa avere un circuito limitatore di tensione del tipo seguente:

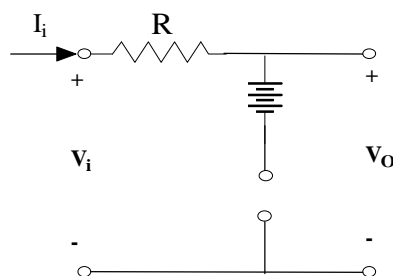


Supponiamo che la forma d'onda della tensione in ingresso V_i sia una sinusoide fatta nel modo seguente:

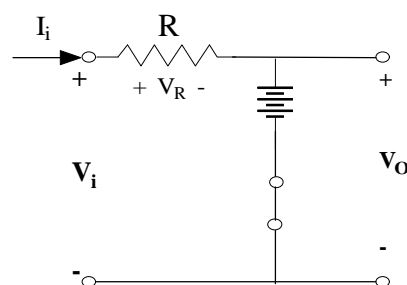


In base ai discorsi fatti, possiamo affermare quanto segue:

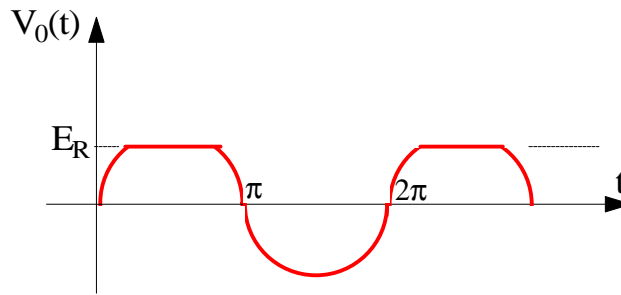
- quando $V_i(t) \leq E_R$, il diodo è sottoposto ad una tensione inferiore a quella di accensione, per cui esso risulta spento e non c'è corrente attraverso R ; le due forme d'onda, di ingresso e di uscita, sono le stesse:



- quando invece $V_i(t) > E_R$, il diodo è acceso e, nell'ipotesi di ritenere infinita la sua conduttanza, la tensione in uscita rimane costante e pari a E_R :



Graficamente, abbiamo dunque l'andamento seguente per la tensione di uscita:



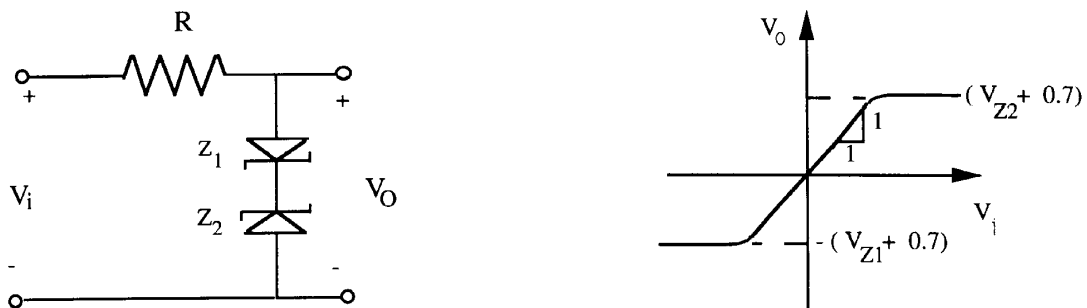
Da questa figura, risulta evidente l'effetto limitante (detto anche "tosante") del diodo sulla tensione in ingresso.

Naturalmente, nel caso reale, ossia in presenza di una conduttanza del diodo elevata ma non infinita in fase di conduzione, i tratti che sono stati disegnati orizzontali, in effetti sono leggermente curvilinei.

Impiego di un diodo Zener per un circuito limitatore

Un circuito limitatore è anche realizzabile utilizzando uno o due **diodi Zener**, a seconda che si voglia limitare la tensione di ingresso su una sola polarità o su entrambe.

Nella figura seguente è indicata la configurazione circuitale di un circuito di questo tipo e la corrispondente caratteristica di trasferimento in tensione:



In questo caso, anziché sfruttare la tensione di accensione del diodo e l'elevata conduttanza in fase di conduzione, viene sfruttata la stabilità della tensione di breakdown e l'elevata conduttanza in fase di breakdown.

Autore: **Sandro Petrizzelli**

e-mail: sandry@iol.it

sito personale: <http://users.iol.it/sandry>